

**Thermische Modifizierung
von Spanmaterial und Holzwerkstoffplatten
zur Verbesserung ausgewählter Eigenschaften**

DISSERTATION

zur Erlangung des Doktorgrades
an der Universität Hamburg,
Fachbereich Biologie

vorgelegt von
Wulf Paul
aus Groß-Gerau

Hamburg 2006

Genehmigt vom Department Biologie
der Fakultät für Mathematik, Informatik und Naturwissenschaften
an der Universität Hamburg
auf Antrag von Professor Dr. Arno Frühwald
Weiterer Gutachter der Dissertation:
Herr Professor Dr. H. Miltz
Tag der Disputation: 30. Oktober 2006

Hamburg, den 13. Oktober 2006



Professor Dr. Reinhard Lieberei
Leiter des Departments Biologie

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand am Zentrum Holzwirtschaft der Universität Hamburg und dem Institut für Holzphysik und mechanische Technologie des Holzes der Bundesforschungsanstalt für Forst- und Holzwirtschaft. Das Forschungsvorhaben wurde vom Bundesministerium für Wirtschaft durch die AiF über die DGfH unterstützt.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr. A. Frühwald für die Anleitung meiner Arbeit, die Unterstützung und die wertvollen Anregungen bei unseren Zusammenreffen.

Bei Herrn Prof. Dr. H. Militz möchte ich mich für die freundliche Übernahme des Koreferates bedanken.

Herrn Dr. M. Ohlmeyer danke ich für seine Unterstützung und ständige Diskussionsbereitschaft.

Danke an Herrn Dr. H. Leithoff für die ausführlichen Diskussionen rund um die Dauerhaftigkeit.

Bedanken möchte ich mich weiterhin bei Herrn Dr. R. Lehn für die Zeit, die er sich für meine Fragestellungen genommen hat.

Herrn Dipl.-Ing. (FH) R. Fallahi danke ich für eine gute und sehr erfolgreiche Zusammenarbeit.

Für die Durchführung umfangreicher praktischer Arbeiten geht ein ganz besonderes Dankeschön an Frau D. Bielenberg, Frau I. Sauerteig, Frau M. Lenz, Frau M. Heitmann sowie Frau I. Stichweh.

Für die Erarbeitung wertvoller Erkenntnisse im Rahmen ihrer Diplomarbeiten danke ich Herrn E. Meyer und Herrn G. Seitz.

Nicht zuletzt danke ich meiner Familie, und vor allem meiner lieben Emila für die Unterstützung und Geduld während meiner Arbeit - Vielen Dank!

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Literaturüberblick	3
2.1	Holz unter Temperatureinfluss	3
2.1.1	Änderungen der chemischen Bestandteile.....	4
2.1.1.1	Cellulose und Polyosen	4
2.1.1.2	Lignin.....	6
2.1.1.3	Extraktstoffe	7
2.1.2	Änderungen physikalischer und mechanischer Eigenschaften	7
2.1.3	Dauerhaftigkeit	9
2.2	Thermische Vergütung von Vollholz	10
2.2.1	Wasserdampfverfahren	11
2.2.2	Plato-Verfahren	12
2.2.3	Öl-Hitze-Behandlung.....	14
2.2.4	Inertgas-Verfahren	15
2.2.5	Weitere Verfahren zur thermischen Vergütung.....	17
2.3	Thermische Modifizierung von Holzwerkstoffen.....	17
2.3.1	Vorbehandlung.....	18
2.3.2	Simultan- und Nachbehandlung	22
3	Zielsetzung	26
4	Vorbehandlung unter Sauerstoff	28
4.1	Material und Methoden.....	28
4.1.1	Spanmaterial	28
4.1.2	Thermische Modifizierung	28
4.1.3	Klebstoff.....	28
4.1.4	Herstellung der Laborplatten	29
4.2	Prüfmethoden Werkstoffe	29
4.2.1	Probenvorbereitung.....	29
4.2.2	Dickenquellung	29
4.2.3	Feuchtegehalt.....	30
4.2.4	Rohdichte	30
4.2.5	Querzugfestigkeit	30

4.2.6	Querzugfestigkeit nach Kochprüfung	30
4.2.7	Biege-Elastizitätsmodul und Biegefestigkeit	31
4.2.8	Bewitterung	31
4.2.9	Dauerhaftigkeit.....	31
4.3	Ergebnisse und Diskussion.....	33
4.3.1	Gleichgewichtsfeuchte und Dickenquellung	33
4.3.2	Querzugfestigkeit und Biegeeigenschaften	36
4.3.3	Dauerhaftigkeit.....	40
4.3.4	Zusammenfassung	41
5	Vorbehandlung in sauerstoffreduzierter Atmosphäre.....	43
5.1	Material und Methoden.....	43
5.1.1	Spanmaterial	43
5.1.2	Klebstoffe	43
5.1.3	Thermische Modifizierung – Vorversuche	43
5.1.3.1	Masseabnahme.....	44
5.1.3.2	Feuchtegehalt.....	44
5.1.3.3	Dauerhaftigkeit.....	44
5.1.3.4	pH-Wert und Pufferkapazität.....	45
5.1.3.5	High Performance Liquid Chromatography	45
5.1.3.6	Kontaktwinkelmessung.....	46
5.1.3.7	Electron Spectroscopy for Chemical Analysis	46
5.1.4	Thermische Modifizierung.....	47
5.1.5	Herstellung der Laborplatten.....	48
5.2	Ergebnisse und Diskussion der Vorversuche.....	49
5.2.1	Masseabnahme.....	49
5.2.2	Gleichgewichtsfeuchte.....	50
5.2.3	Dauerhaftigkeit.....	52
5.2.4	Chemische Charakterisierung und Oberflächeneigenschaften	56
5.2.4.1	HPLC	56
5.2.4.2	pH-Wert und Pufferkapazität.....	58
5.2.4.3	Kontaktwinkelmessung und ESCA.....	61
5.3	Ergebnisse und Diskussion der Werkstoffprüfung	67
5.3.1	Gleichgewichtsfeuchte, Dickenquellung und Wasseraufnahme	67
5.3.1.1	OSB aus Kiefer	67

5.3.1.2	Spanplatten aus Fichte.....	73
5.3.1.3	OSB aus Pappel.....	78
5.3.1.4	Diskussion	81
5.3.2	Querzugfestigkeit	88
5.3.2.1	OSB aus Kiefer	88
5.3.2.2	Spanplatten aus Fichte.....	89
5.3.2.3	OSB aus Pappel.....	90
5.3.2.4	Diskussion	91
5.3.3	Nebenversuch zur Querzugfestigkeit	95
5.3.4	Biegeeigenschaften	98
5.3.5	Diskussion	102
5.3.6	Nebenversuche zur Biegefestigkeit.....	105
5.3.7	Witterungsbeständigkeit	110
5.3.7.1	OSB aus Kiefer	110
5.3.7.2	Spanplatten aus Fichte.....	114
5.3.7.3	OSB aus Pappel.....	117
5.3.7.4	Diskussion	120
5.3.8	Dauerhaftigkeit	123
5.3.9	Zusammenfassung	129
6	Simultan- und Nachbehandlung	131
6.1	Material und Methoden.....	131
6.1.1	Spanmaterial	131
6.1.2	Klebstoff.....	131
6.1.3	Herstellung der Laborplatten	131
6.1.4	Stapellagerung.....	132
6.1.5	Kombinationsverfahren SINA.....	132
6.1.6	Nachbehandlung	132
6.1.7	Prüfmethoden	133
6.2	Ergebnisse und Diskussion – Kombinationsverfahren SINA	134
6.2.1	Gleichgewichtsfeuchte und Dickenquellung.....	134
6.2.2	Querzugfestigkeit und Biegeeigenschaften.....	143
6.2.3	Witterungsbeständigkeit	154
6.2.4	Dauerhaftigkeit	160
6.2.5	Zusammenfassung	164

6.3	Ergebnisse und Diskussion – Nachbehandlung	166
6.3.1	Gleichgewichtsfeuchte und Dickenquellung	166
6.3.2	Querzugfestigkeit und Biegeeigenschaften	168
6.3.3	Zusammenfassung	173
7	Vergleichende Diskussion und Schlussfolgerung	175
7.1	Platteneigenschaften	175
7.2	Schlussfolgerung	180
8	Zusammenfassung	185
9	Literaturverzeichnis	187
10	Anhang	200
11	Abbildungsverzeichnis	202
12	Tabellenverzeichnis	212

1 Einleitung

Aufgrund seiner Hygroskopizität und den daraus resultierenden feuchtebedingten Verformungen ist die Verwendung von Holz in seinem natürlichen Zustand für bestimmte Bereiche nur eingeschränkt möglich. Das natürliche Quellen und Schwinden beeinflusst maßgeblich die Dimensionsstabilität eines Bauteils und damit seine Eignung für Verwendungen besonders dort, wo häufige Feuchtwechsel herrschen, wie z.B. im Außenbereich. Hierbei ist auch die oftmals geringe Dauerhaftigkeit der eingesetzten Holzarten ein limitierender Faktor.

Noch kritischer verhält es sich bei einer Verwendung von Holzwerkstoffen. Im Gegensatz zur Dickenquellung bei Vollholz, beruht die Dickenquellung von Holzwerkstoffen neben der natürlichen Quellung des Holzes, die reversibel ist, auch auf einer irreversiblen Komponente. Diese übersteigt in ihrem Ausmaß den Anteil der natürlichen Dickenquellung deutlich. Durch das Verpressen der Holzpartikel zu plattenförmigen Werkstoffen werden beim Verdichten des Spanmaterials Spannungen in der Platte aufgebaut. Wird der Werkstoff später hoher Feuchtigkeit ausgesetzt, kann es zu einem Abbau dieser Spannungen kommen. Durch den Rückgang der Deformation der Partikel resultiert daraus eine Dickenzunahme der Platte. Die eingeschlossenen Spannungen können so groß sein, dass sie bei ihrer Freisetzung die Festigkeit der Klebstoffbrücken zwischen den Partikeln übersteigen und somit zu Einbußen der mechanischen Festigkeit führen (Klauditz 1954, Neußer *et al.* 1965, Gatchell *et al.* 1966, Ernst 1967). Des Weiteren kann durch die nun aufgelockerte Struktur der Platte Wasser bis in die Plattenmitte eindringen und dort Feuchtenester bilden, wodurch die Gefahr von Pilzbefall steigt.

Eine Möglichkeit, das Quellverhalten von Holz zu vermindern bietet eine thermische Modifizierung. Unter Einwirkung hoher Temperaturen finden chemische Umwandlungen der Holzbestandteile statt, von denen vor allem die thermisch instabilen Polyosen betroffen sind. Durch den Abbau freier Hydroxylgruppen und durch die Bildung hydrophober Kondensationsprodukte werden die Hygroskopizität des Holzes und damit seine Feuchteaufnahme verringert. Durch die chemisch veränderte Holzmatrix wird zudem der enzyminduzierte und durch weitere Stoffwechselprodukte bedingte Abbau durch holzerstörende Pilze herabgesetzt (Tjeerdsma *et al.* 2002, Weiland und Guyonnet 2003).

Verfahren zur thermischen Modifizierung von Vollholz haben sich in den vergangenen Jahren bis zur Marktreife entwickelt, entsprechende Produkte werden beispielsweise als Thermowood, Menz-Holz oder Plato-Holz gehandelt. Die thermische Modifizierung von Holzwerkstoffen ist mit Ausnahme von Faserplatten (Burmester 1970) dagegen zwar Gegenstand

zahlreicher Arbeiten gewesen (u.a. Tomek 1966, Burmester 1974, Tomimura und Matsuda 1986, Sekino *et al.* 1997), die bisher aber nicht zu einer Umsetzung in industriellen Maßstab geführt haben.

Ziel dieser Arbeit ist es, Holzwerkstoffe mit reduzierter Dickenquellung und verbesserter Dauerhaftigkeit herzustellen. Dabei sollen geeignete Methoden zur thermischen Modifizierung von Holzwerkstoffen entwickelt werden, die sich in ihren Verfahren an die industrielle Holzwerkstoffproduktion anlehnen. Schnittstellen für eine thermische Vergütung stellen die Trocknung, die Verpressung sowie die anschließende Stapellagerung dar. Das behandelte Spanmaterial und die Platten werden auf ihre Feuchtebeständigkeit, Veränderung der Acidität, Benetzbarkeit und Dauerhaftigkeit sowie mechanische Eigenschaften geprüft.

2 Literaturüberblick

2.1 Holz unter Temperatureinfluss

Die Einwirkung hoher Temperaturen auf Holz kann zu einer bleibenden Veränderung seiner Eigenschaften führen. Dabei werden besonders die Hygroskopizität und damit das Quellverhalten beeinflusst; darüber hinaus nimmt die Dauerhaftigkeit zu und die Festigkeit ab. Das erste Verfahren zu einer gezielten Veränderung der Holzeigenschaften im Hinblick auf die Erhöhung der Dimensionsstabilität wurde von Stamm *et al.* (1946) durchgeführt. In dem so genannten „Staybwood“-Verfahren wird trockenes Holz in einer Metallschmelze behandelt.

Die alleinige Einwirkung von Wärme auf Holz, wie es z.B. in der technischen Holz Trocknung geschieht, führt nach Kubinsky (1971) nur zu geringfügigen Veränderungen des Quell- und Schwindverhaltens. Von entscheidendem Einfluss auf das Verhalten von Holz unter Einwirkung hoher Temperaturen ist der Wassergehalt, wie sich z.B. am thermischen Erweichen von Holz verdeutlichen lässt. Sowohl Nadel- als auch Laubhölzer erweichen in Abhängigkeit ihrer Holzfeuchte ab etwa 180°C mit einem Maximum bei 380°C (Chow und Pickles 1971). Die Veränderungen durch das Aufheizen des Wassers im Holz als eine hydrothermische Behandlung beruhen im Wesentlichen auf hydrolytischen Reaktionen. Burmester (1974) entwickelte ein Verfahren, bei dem Holz mit einem Feuchtegehalt zwischen 20 und 30% einer Hitzebehandlung ausgesetzt wird. Zudem fand er, dass sich ein geschlossenes System unter 5 bis 10 bar Druck positiv auf das Ergebnis auswirkt. Aus den herrschenden Prozessbedingungen (Feuchte, Wärme und Druck) leitete sich für diese Methode der Holzbehandlung der Begriff FWD-Verfahren ab. Burmester (1974) sieht den Vorteil der Hitzebehandlung in einem geschlossenen System unter Druck gegenüber einer Behandlung im Trockenschrank in den ausgeprägteren Vernetzungsreaktionen innerhalb der Zellwand.

Die hydrolytische Zersetzung von Holz setzt unter feuchten Bedingungen ab Temperaturen von etwa 150°C ein (Garrote *et al.* 1999). Die chemische Umwandlung der Holzkomponenten geht mit einer Veränderung der Strukturen sowie dem Freiwerden gasförmiger Abbauprodukte einher; die Pyrolyse von Holz beginnt bei Temperaturen ab 270°C. Mit steigender Temperatur nimmt die Bildung gasförmiger Produkte weiter zu, bis es bei Temperaturen ab 500°C zu einer Vergasung des Holzes kommt (Fengel und Wegener 1989). Die Strukturveränderungen, die durch das Schwinden von Holz beispielsweise während der Trocknung deutlich werden, beruhen auf einem Schwinden der Zellwände. Aus dem zunehmendem Volumenschwund bei erhöhten Temperaturen aufgrund des Substanzverlustes durch die thermische Zersetzung entstehen zusätzlich Schwindkräfte. Die Substanzverluste sind für die

verschiedenen Zellwandschichten unterschiedlich, so dass unterschiedlich hohe Schwindkräfte auftreten, wodurch es in der Folge zu Rissbildung und Stauchungen in den Zellwänden kommen kann (Fengel und Wegener 1989).

2.1.1 Änderungen der chemischen Bestandteile

Die strukturellen Änderungen resultieren aus Modifikationen der Holzbestandteile unter Temperatureinfluss. So weisen aus hitzebehandeltem Holz isolierte Cellulose und Polyosen andere Strukturen auf als aus unbehandeltem Holz (Fengel und Wegener 1989).

Im isolierten Zustand erfahren die Holzkomponenten andere Änderungen als im Zellwandverbund. Sandermann und Augustin (1963) konnten zeigen, dass sich die thermisch bedingten Änderungen im Holz nur begrenzt als Summe der Änderung der einzelnen Komponenten bestimmen lassen. Eine Mischung der Einzelkomponenten in den prozentualen Anteilen, wie sie in Holz vertreten sind, liefert nur in gewisser Annäherung das gleiche Ausmaß des thermischen Abbaus der jeweiligen Holzart. Zudem erfolgt der Abbau der Holzkomponenten im isolierten Zustand langsamer als in ihrem nativen Verbund (Alén *et al.* 1996).

Ab Temperaturen oberhalb 100°C beginnt die Spaltung chemischer Bindungen, im Temperaturbereich zwischen 100°C und 200°C werden Wasser und Spuren organischer Abbauprodukte freigesetzt. Die meisten gasförmigen Abbauprodukte im niedrigeren Temperaturbereich (bis 225°) sind Kohlenmonoxid, Kohlendioxid und Wasser (Antal 1983, Shafizadeh 1985, Faix *et al.* 1988, Bourgois und Guyonnet 1988, LeVan 1989, Dirol und Guyonnet 1993).

In inerter Atmosphäre werden Polyosen im Temperaturbereich zwischen 250°C bis 350°C, Cellulose zwischen 300°C und 400°C und Lignin zwischen 250°C bis 450°C abgebaut (Björkmann 1981, Williams und Besler 1994, Alén *et al.* 1995). Nach Byrne und Nagle (1997) beginnt die thermische Zersetzung bei Temperaturen ab 200°C mit dem Abbau der Polyosen bis 260°C, gefolgt von Cellulose ab 240 bis 350°C und schließlich die Zersetzung von Lignin zwischen 280 und 500°C.

2.1.1.1 Cellulose und Polyosen

Die thermisch unstabileren Kohlenhydrate Cellulose und Polyosen sind die strukturellen Bestandteile des Holzes. Je nach Holzart beträgt der Anteil der Cellulose 40 bis 50%, der der Polyosen zwischen 25 und 35%. Cellulose ist kettenförmig aus α -D-Glucoseeinheiten aufgebaut mit einem DP (Degree of Polymerisation) zwischen 5.000-10.000. Polyosen sind kurzkettiger (DP 150-200), bestehend aus verschiedenen Monosacchariden, deren Zusammensetzung und Gehalt für jede Holzart unterschiedlich ist. Die Bestandteile der Polyosen sind im

einzelnen D-Glucose, D-Mannose, D-Galactose, D-Xylose, L-Arabinose sowie geringe Anteile von L-Rhamnose, 4-O-Methyl-D-Glucuronsäure und D-Galacturonsäure, die über (1→4)- oder (1→6)-Bindungen miteinander verknüpft sind (Fengel und Wegener 1989).

Depolymerisation und Hydrolyse der thermisch empfindlichen Polyosen werden durch die Anwesenheit von Wasser begünstigt und können dadurch bereits bei Temperaturen unter 180°C einsetzen (Sivonen *et al.* 2002, Garrote *et al.* 2001).

Die thermische Modifizierung unter feuchten Bedingungen wird in der Literatur auch als Hydrothermolyse (Bonn *et al.* 1983, Hörmeyer *et al.* 1988, Kubikova *et al.* 1996), Autohydrolyse (Lora und Wayman 1978, Conner 1984, Carrasco 1989, Tortosa *et al.* 1995), oder hydrothermische Behandlung (Overend und Chornet 1987, Kubikova *et al.* 1996) bezeichnet; allen Prozessen liegen aber die gleichen Reaktionsmechanismen zugrunde.

Nach Abatzoglou *et al.* (1992) und Tortosa *et al.* (1995) findet die Modifizierung der Polyosen unter feuchten Bedingungen besonders im Temperaturbereich zwischen 150°C und 230°C statt; unterhalb 100°C ist das Ausmaß der hydrolytischen Reaktionen nur sehr gering.

Die thermische Zersetzung der Polyosen beruht auf dem Mechanismus einer sauren Hydrolyse. Durch die Anwesenheit von Wasser werden bei hohen Temperaturen vor allem die Etherbindungen der Polyosen protoniert. In der Folge werden die C-O-Bindungen zwischen einzelnen Polyoseneinheiten gespalten. Als Zwischenprodukte entstehen daraus ringförmige Carbonium-Ionen, aus denen durch Addition von Wasser schließlich die monomeren Strukturen der Polyosen als Endprodukte unter Abgabe eines Protons hervorgehen.

Infolge des Abbaus der Polyosen werden auch die Acetylgruppen abgespalten, wodurch Carbonsäuren (vor allem Essigsäure) gebildet werden (Kollmann und Fengel 1965, Bourgois und Guyonnet 1988, Garrote *et al.* 1999). Die entstandenen Carbonsäuren katalysieren den Abbau der Polysaccharide zusätzlich. Die Katalyse durch die gebildeten Carbonsäuren ist dabei nach Heitz *et al.* (1986) sowie Carrasco (1989) für den hydrolytischen Abbau von entscheidender Bedeutung.

Die Zucker der durch Depolymerisation aus den Polyosen gebildeten Oligo- und Monomere (Pentosen und Hexosen) werden weiter zu Furfural bzw. Hydroxymethylfurfural dehydriert (Bobleter und Binder 1980, Fengel und Wegener 1989).

Die thermische Modifizierung von Cellulose folgt den gleichen Reaktionsmechanismen wie die Zersetzung der Polyosen, aber aufgrund ihrer linearen Ausrichtung, dem hohen Polymerisationsgrad sowie der kristallinen Struktur bedarf es höherer Temperaturen (Garrote *et al.* 1999, Alén *et al.* 2002). Die Zersetzung der Cellulose setzt zwischen 210 und 220°C ein

(Heitz *et al.* 1986, Rubio *et al.* 1994), wobei der Abbau unter 230°C nur in geringem Ausmaß stattfindet. (Heitz *et al.* 1991, Carrasco *et al.* 1994). Biermann *et al.* (1984) sowie Bonn *et al.* (1983) fanden dagegen erst ab 270°C eine deutliche Zersetzung der Cellulose.

Der thermische Abbau beginnt zunächst in den weniger geordneten, amorphen Bereichen. Daher steigt der Kristallisationsgrad der Cellulose mit zunehmender Temperatur (Wikberg und Maunu 2004, Sivonen *et al.* 2002, Bhuiyan *et al.* 2000). Durch Änderung der Kristallinität werden wesentlich die Eigenschaften des Holzes bezüglich seiner Elastizität und dem Absorptionsverhalten sowie weiterer physikalischer Eigenschaften beeinflusst (Bhuiyan *et al.* 2000).

2.1.1.2 Lignin

Lignin ist die „Kittsubstanz“ des Holzes, die zwischen den Strukturelementen Cellulose und Polyosen eingebunden ist. Der Ligningehalt differiert zwischen verschiedenen Holzarten, für Nadelhölzer liegt er mit etwa 25 bis 30% höher als bei Laubhölzern (20-25%). Lignin ist aus Phenylpropaneinheiten aufgebaut, die über Etherbrücken oder C-C-Doppelbindungen miteinander zu dreidimensionalen Makromolekülen verbunden sind (DP 10-50). Nadelhölzer bestehen hauptsächlich aus Guajacyleinheiten, Laubhölzer sowohl aus Guajacyl- und Syringyleinheiten, und beide enthalten kleine Mengen von p-Hydroxyl-Phenolpropanoiden (Fengel und Wegener 1989).

Lignin ist die thermisch stabilste der drei Hauptkomponenten, dessen Zersetzung sich über einen großen Temperaturbereich erstreckt. Dies führen Alén *et al.* (2002) auf seine strukturelle Diversität zurück. Die Zersetzung des Lignins beruht einerseits auf dem Aufbrechen der Bindung zwischen den Kohlenhydraten und dem Ligninkomplex (Burstcher *et al.* 1987) und zum anderen auf einer Depolymerisation. Insbesondere die Syringileinheiten sind gegenüber einer Hydrothermolyse empfindlich (Shimizu *et al.* 1989). Oberhalb 200°C sinkt der Gehalt von Methoxylgruppen im Lignin und der relative Anteil des Lignins gegenüber den Kohlenhydraten im Holz nimmt zu. Durch die Demethoxylierung kommt es zu Vernetzungsreaktionen innerhalb des Ligninkomplexes, die zur verbesserten Dimensionsstabilität und reduzierten Hygroskopizität beitragen. Außerdem steigt die Anzahl freier Radikale, was zu Kondensationsreaktionen zwischen den aromatischen Ringen führen kann, woraus die Bildung eines vielfach vernetzten Komplexes zwischen den Holzkomponenten resultiert (Sivonen *et al.* 2002). Die organischen Säuren, die aus der Zersetzung der Polyosen hervorgegangen sind, katalysieren die Repolymerisation des Lignins. Zudem reagieren die Abbauprodukte aus den Zuckermonomeren (vor allem Furfural) mit dem Ligninkomplex unter Bildung eines unlösli-

chen Kondensationsproduktes (Lora und Wayman 1978, Dekker und Wallis 1983, Schultz *et al.* 1983, Muzzy *et al.* 1983, Heitz *et al.* 1991, Montané *et al.* 1994, Aoyama *et al.* 1995, Tortosa *et al.* 1995).

2.1.1.3 Extraktstoffe

Neben den Hauptkomponenten sind im Holz auch geringere Anteile von Extraktstoffen enthalten, holartenabhängig kann dieser Anteil bis 5% betragen. Dazu zählen Terpene, Fette, Wachse und Phenole. Extraktstoffe sind heterogen aufgebaut und die Anzahl der Verbindungen ist dementsprechend sehr hoch. Sie zählen nicht zu den strukturellen Komponenten im Holz und entweichen im Laufe einer thermischen Behandlung leicht als flüchtige Bestandteile (Sandermann und Augustin 1963, 1964). Nuopponen *et al.* (2003) konnten mittels FTIR an Kiefer (*Pinus sylvestris* L.) zeigen, dass Fette und Wachse aufgrund der Zersetzung von Fettsäureestern ab 100°C freigesetzt werden und ab 180°C nicht mehr nachweisbar sind, Harzsäuren dagegen sind erst oberhalb 200°C nicht mehr nachweisbar.

2.1.2 Änderungen physikalischer und mechanischer Eigenschaften

Die beschriebene Modifizierung der chemischen Bestandteile führt zu einer Veränderung der physikalischen und mechanischen Eigenschaften von thermisch behandeltem Holz. Das Ausmaß der Eigenschaftsänderung hängt sehr stark von den jeweiligen Prozessparametern ab, wobei die Temperatur von entscheidendem Einfluss ist. Unter gleichen Prozessbedingungen ist die Auswirkung der thermischen Modifizierung für Laubhölzer deutlicher als für Nadelhölzer (Kotilainen 2000). Dies führen Tjeerdsma *et al.* (2002) auf die höhere Reaktivität der Pentosen als Hauptbestandteil der Laubholzpolyosen gegenüber den Hexosen als Hauptbestandteil der Nadelholzpolyosen zurück.

Als Hauptträger der Sorption wird insbesondere durch den beschriebenen Abbau der Polyosen sowie die Abnahme der amorphen Bereiche der Cellulose das hygroskopische Verhalten thermisch behandelter Hölzer beeinflusst (Burmester 1970). Dabei nimmt die Hygroskopizität, ausgedrückt durch die Gleichgewichtsfeuchte, mit steigender Behandlungstemperatur ab (Popper *et al.* 2005). Neben der Abnahme frei zugänglicher Hydroxylgruppen wird die Hygroskopizität auch durch die Veresterung sowie die geschilderten Vernetzungsreaktionen herabgesetzt (Runkel und Wilke 1951, Tjeerdsma *et al.* 1998, Sivonen *et al.* 2002, Tjeerdsma und Militz 2005). Die Fasersättigung lässt sich durch thermische Behandlung um bis zu 50% reduzieren (Gohar und Guyonnet 1998, Rapp und Sailer 2000). Das Quell- und Schwindverhalten wird infolge der herabgesetzten Feuchteaufnahme beeinflusst und kann in Abhängigkeit der Prozessbedingungen um 30-80% reduziert werden (Giebler 1986, Gohar

und Guyonnet 1998, Militz und Tjeerdsma 2000).

Im Gegensatz zur Feuchtaufnahme wird die Aufnahme von Wasser aus der flüssigen Phase durch die Behandlung weniger verändert. Lukowsky und Böttcher (2001) untersuchten die Wasseraufnahme von thermisch modifizierter Kiefer. Während 24stündiger Wasserlagerung war die Wasseraufnahme des behandelten Holzes gegenüber einer unbehandelten Probe nur in der Anfangsphase vermindert, nach Ablauf des Untersuchungszeitraumes war kein Unterschied erkennbar. Vernois (2001) konnte sogar eine schnellere Wasseraufnahme bei thermisch behandelten Hölzern feststellen. Dies führt er auf zunehmende Porosität zurück.

Der thermische Abbau geht mit einer Masseabnahme und einem Volumenverlust des Holzes einher, die in Abhängigkeit des gewählten Verfahrens und der Prozessparameter unterschiedlich hoch ausfallen, wodurch die Dichte des Holzes abnimmt (Kubojima *et al.* 1998, Jämsä und Viitaniemi 2001, Patzelt *et al.* 2002). Dadurch wird die Wärmeleitfähigkeit reduziert, nach Untersuchungen von Jämsä und Viitaniemi (2001) um bis zu 25%. Diese Eigenschaft werten sie als vorteilhaft bei einer Verwendung für Außentüren, Fenster oder im Saunabau. Das Aufbrechen der Polyosenketten führt weiterhin zu einer erhöhten Verdichtbarkeit des Holzes, wodurch die Bildung von Spannungen vermindert und die Rückfederung reduziert werden (Sandermann und Augustin 1963, 1964, Kollmann und Fengel 1965, Hsu *et al.* 1988).

Neben den positiven Effekten einer thermischen Behandlung (reduzierte Feuchtaufnahme, vermindertes Quellverhalten) werden aber auch die Festigkeiten des Holzes, und hierbei vor allem die dynamischen Festigkeiten, herabgesetzt. So geht eine Verringerung des Schwindverhaltens um 50% nach Behandlung in einem geschlossenen System unter Luftabschluss mit einem Verlust der Biegefestigkeit um 30%, der Härte um 27% und der Zähigkeit um 60% einher (Burmester 1970). Bei einer Behandlung in Luftatmosphäre fallen die Festigkeitsverluste aufgrund oxidativer Reaktionen noch höher aus (Kubojima *et al.* 2000). In seiner Arbeit konnte Schneider (1971) eine Abnahme des Elastizitätsmoduls von Holz, das unter Luftzutritt behandelt wurde, feststellen. Außerdem führte die Behandlung zu einer Verringerung von Druckfestigkeit und Bruchschlagarbeit. Dabei hing die Festigkeitsabnahme von der Behandlungstemperatur ab; mit steigender Temperatur und Behandlungsdauer steigt die Festigkeitsabnahme an.

Bengtsson *et al.* (2002) stellten bei Fichte (*Picea abies*) und Kiefer (*Pinus sylvestris* L.), die bei 200°C bis 220°C thermisch behandelt wurden, eine Abnahme der Biegefestigkeit um 50% fest, während der Elastizitätsmodul unverändert blieb.

Schmid *et al.* (2004) verglichen die mechanischen Eigenschaften von Kiefer (*Pinus sylvestris* L.), die mit verschiedenen Verfahren behandelt worden war. Die Druckfestigkeit nahm durch die Behandlung etwas zu, während der Elastizitätsmodul nahezu unverändert blieb. Die stärkste Abnahme wiesen die dynamischen Festigkeiten auf, ausgedrückt durch die Schlagbiegefestigkeit. Dies ist auf die zunehmende Sprödigkeit des Holzes zurückzuführen und konnte schon in früheren Arbeiten gefunden werden (Militz und Tjeerdsma 2000, Rapp und Sailer 2000, Mayes und Oksanen 2002, Kamdem *et al.* 1999). Johansson und Morén (2006) stellten eine Abnahme der Scherfestigkeit und der Zugfestigkeit senkrecht zum Faserverlauf fest und führen dies besonders auf die Veränderungen des Ligninkomplexes zurück. In ihren Untersuchungen über die Verklebungseigenschaften thermisch behandelter Hölzer konnten Mayes und Oksanen (2002) sowie Rapp und Sailer (2000) zeigen, dass sich die meisten industriell genutzten Klebstoffsysteme grundsätzlich eignen (z.B. Polyvinyl-, Polyurethanklebstoffe, Isocyanate oder Resorcin-Phenolharze). Aufgrund der geringeren Scherfestigkeit kommt es aber zu vermehrtem Holzbruch. Zudem ist die Penetration durch die hydrophobe Oberfläche eingeschränkt bzw. verlangsamt, so dass der Verklebungsprozess entsprechend angepasst werden muss.

2.1.3 Dauerhaftigkeit

Neben der herabgesetzten Feuchteaufnahme und dem verminderten Quell- und Schwindverhalten, führt die thermische Behandlung zu einer Erhöhung der Resistenz gegen Pilzbefall. Das Ausmaß dieser Eigenschaftsänderung wird so wie die mechanischen und physikalischen Eigenschaften deutlich von den jeweiligen Prozessparametern bestimmt (Rapp und Sailer 2000, Mayes und Oksanen 2002).

Die Dauerhaftigkeit von Holz hängt primär von seiner chemischen Zusammensetzung und der Zugänglichkeit für Enzyme und andere Stoffwechselprodukte der holzerstörenden Pilze ab (Kirk und Cowling 1984). Für einen hydrolytischen oder oxidativen Abbau müssen die Stoffwechselprodukte bzw. Enzyme der holzabbauenden Organismen mit dem Substrat direkt in Kontakt treten können (Subramanian 1984). Zudem muss das Substrat eine spezifische Zusammensetzung aufweisen, damit der hoch selektive, über Enzyme initiierte Abbau stattfinden kann. Die Hauptkomponenten Cellulose, Polyosen und Lignin sind aufgrund ihrer Zusammensetzung und Struktur unterschiedlich anfällig für Pilzbefall. Cellulose ist bereits in ihrem nativen Zustand für cellulolytische Enzyme aufgrund der kristallinen Struktur nur eingeschränkt zugänglich. Durch eine thermische Modifizierung steigt der Kristallisationsgrad infolge der Reduzierung der amorphen Bereiche an (Wikberg und Maunu 2004, Sivonen *et al.* 2002, Bhuiyan *et al.* 2000), wodurch die Zugänglichkeit für Stoffwechselprodukte holzab-

bauender Organismen weiter eingeschränkt sein kann.

Der Abbau durch Pilze wird außerdem von der Verfügbarkeit von Hydroxylgruppen bestimmt. In den amorphen Bereichen der Cellulose finden sich etwa 50% der im Holz vorhandenen Hydroxylgruppen (Stamm und Baechler 1960). Das bedeutet, dass besonders die Polyosen bei einem Abbau durch Pilze eine entscheidende Rolle spielen, da sie als leicht hydrolysierbare Komponente die Hauptnahrungsquelle der Pilze darstellen, Lignin alleine reicht als Nährsubstrat nicht aus (Blanchette 1991).

Damit hängt die Dauerhaftigkeit thermisch behandelter Hölzer wesentlich von der Modifizierung der Polyosen ab. Das veränderte hygroskopische Verhalten aufgrund des Abbaus freier Hydroxylgruppen resultiert in einer herabgesetzten Wasseraufnahme. Dadurch kann die für einen Pilzabbau optimale Holzfeuchte zu gering ausfallen (Stamm *et al.* 1946, Stamm und Baechler 1960, Burmester 1974, Weiland und Guyonnet 1998, Tjeerdsma *et al.* 1998). Neben der verminderten Feuchteaufnahme gilt als weitere Ursache der erhöhten Dauerhaftigkeit die veränderte chemische Struktur der Zellwandkomponenten, so dass sie dadurch nicht mehr als Nährsubstrat erkennbar sind und somit den enzyminduzierten Abbau durch den Pilz erschweren (Buro 1954, Tjeerdsma *et al.* 2002). Besonders die Zersetzung der Pentosane als Hauptnahrungsquelle holzzerstörender Pilze spielt dabei eine Rolle (Weiland und Guyonnet 2003). Als weitere Erklärung der Dauerhaftigkeit thermisch behandelten Holzes führte Buro (1954) die mögliche Entstehung toxischer Nebenprodukte mit fungizider Wirkung an. Kamdem *et al.* (2000) konnten in ihrer Arbeit mittels GC-MS and ¹³C NMR zeigen, dass toxische Nebenprodukte zwar gebildet werden, deren Konzentration allerdings sehr gering ausfällt und somit nicht zur Pilzresistenz beitragen.

2.2 Thermische Vergütung von Vollholz

Das hygroskopische Verhalten von Holz und die damit verbundene Aufnahme und Abgabe von Feuchtigkeit infolge wechselnder Klimate kann zu Einbußen der Dimensionsstabilität von Holzkonstruktionen führen. Um die Maßhaltigkeit auch bei Feuchtwechseln langfristig zu sichern, stellt die Reduzierung von Quellen und Schwinden eine zentrale Vergütungsmaßnahme dar. Die Hitzebehandlung von Holz bietet nach Burmester (1974) in wirtschaftlicher Hinsicht den Vorteil, dass auf kostenintensive Tränkmittel verzichtet werden kann und bei der Schnittholztrocknung simultan eine Hitzebehandlung durchgeführt werden könnte. Zudem stellt die thermische Modifizierung keine Einschränkung bezüglich der eingesetzten Holzarten dar.

Nach anfänglichen Bemühungen, geeignete Verfahren zur Hitzebehandlung von Holz zu

entwickeln (z.B. Staybwood-Verfahren nach Stamm *et al.* 1946, FWD-Verfahren nach Burmester 1974, Giebeler 1983), haben sich innerhalb der vergangenen Jahre in Europa kleine Zentren der Holzmodifikation gebildet (Stingl *et al.* 2002). Gemeinsames Prinzip der praktizierten Verfahren ist, Holz in mehr oder weniger geschlossenen Systemen einer sauerstoffarmen Atmosphäre bei Temperaturen zwischen 160°C und 240°C für mehrere Stunden auszusetzen. Hinsichtlich Technologie und Durchführung sowie deren Einflüsse auf die Eigenschaften des Holzes bestehen jedoch verfahrensspezifische Unterschiede, die sich grob in vier Gruppen einteilen lassen und im Folgenden vorgestellt werden.

2.2.1 Wasserdampfverfahren

Der von VTT Building Technology entwickelte Prozess zur thermischen Vergütung von Holz ist unter dem Namen THERMOWOOD bekannt. Das Prinzip dieses Verfahrens beruht auf der drucklosen Behandlung von Vollholz bei Temperaturen zwischen 150°C und 250°C. Durch Einblasen von Wasserdampf als Schutzgas wird die Umgebungsluft soweit vertrieben, dass der Sauerstoffgehalt weniger als 3,5% beträgt und somit eine oxidative Zersetzung des Holzes vermieden werden kann.

Der Prozess lässt sich in drei Schritte einteilen und beginnt mit einer Aufwärmphase, in der das Holz auf 100°C vorgewärmt und anschließend bei Temperaturen zwischen 100°C und 150°C getrocknet wird, insofern die Holzfeuchte mehr als 10% beträgt. Danach wird die Temperatur auf die Zieltemperatur auf bis zu 250°C angehoben. Diese Prozessabschnitte können bis zu 48 Stunden betragen. Im weiteren Verlauf erfolgt die eigentliche Hitzebehandlung bei den jeweils angestrebten Temperaturen für eine Dauer zwischen 0,5 und vier Stunden. Im Anschluss daran wird das Holz runtergekühlt und konditioniert; die Gesamtdauer des Prozesses dauert bis zu drei Tage (Syrjänen 2001, Jämsä und Viitaniemi 2001, Mayes und Oksanen 2002).

Als Material werden Kiefer (*Pinus silvestris*), Fichte (*Picea abies*), Birke (*Betula verrucosam*, *Betula pubescens*) sowie Pappel (*Populus tremula*) eingesetzt. Aufgrund der Unterschiede in der chemischen Zusammensetzung sind die Behandlungsparameter und Ergebnisse für jede Holzart verschieden, gewöhnlich werden Nadelhölzer bei Temperaturen oberhalb 200°C „schärfer“ behandelt als Laubhölzer. Behandelte Nadelhölzer werden vor allem für Außenanwendungen eingesetzt, bei denen Schutz vor Feuchtigkeit und Pilzresistenz gefordert wird; Laubhölzer dagegen finden eher im Innenbereich Verwendung.

Nachteilig sind Rissbildung und Verformung zu bewerten, die Lukowsky und Böttcher (2001) sowie Niemz (2002) feststellen. Dabei kommt es neben einem Aufweiten bereits vorhandener

Risse auch zur Neubildung von Rissen, insbesondere im Umfeld von Ästen. Darüber hinaus kann es zur Verschalung kommen. Außerdem führt die Behandlung bei Kiefer und Fichte zu Harzaustritt, was zu Verunreinigungen in der Anlage führt und eine Verarbeitung (Hobeln) erschwert (Jämsä und Viitaniemi 2001, Stingl *et al.* 2002). In Hinblick auf eine spätere Verwendung, insbesondere bei einer Oberflächenbehandlung, kann die Abnahme des Harzgehaltes dagegen vorteilhaft sein.

Die Verfärbung des Holzes ist nicht UV-beständig, kann aber durch eine UV-beständige Beschichtung erhalten werden. Anstriche lassen sich problemlos auftragen, insofern die Beschichtungen nicht elektrostatisch aufgebracht werden sollen, hierfür muss das Holz zuvor zusätzlich befeuchtet werden (Mayes und Oksanen 2002, Jämsä und Viitaniemi 2001).

Durch das VTT-Verfahren wird eine Verringerung der Gleichgewichtsfeuchte um bis zu 50% erreicht und das Quellen und Schwinden wird um 50 bis 90% reduziert (Jämsä und Viitaniemi 2001, Lukowsky und Böttcher 2001).

Nach Pilztests gemäß EN 113 zeigte THERMOWOOD eine erhöhte Dauerhaftigkeit, wenn die Behandlungstemperatur über 220°C lag. Dennoch gilt thermisch behandeltes Holz als nicht geeignet für einen Einsatz in Erdkontakt (Jämsä und Viitaniemi 2001). Mit den höheren Behandlungstemperaturen und damit der Erhöhung der Resistenz gegen biologischen Befall nehmen die mechanischen Festigkeiten ab und das Holz wird spröde. Die Biege- und Zugfestigkeit sinken um 10% bis 30%, während Druckfestigkeit und Härte geringfügig verändert werden. Die größte Abnahme weisen die dynamischen Festigkeiten auf, die Schlagbiegefestigkeit sinkt um 50% bis 80%. Die Wärmeleitfähigkeit sinkt um 10 bis 30%. Der Masseverlust infolge der Behandlung beträgt zwischen 5 und 15% (Jämsä und Viitaniemi 2001, Lukowsky und Böttcher 2001).

2.2.2 Plato-Verfahren

In den Niederlanden wird die Thermobehandlung von Holz nach dem so genannten PLATO-Prozess durchgeführt. Der Prozess erfolgt zweistufig, mit einem zwischengeschalteten Trocknungsschritt. In der ersten Stufe wird das Holz unter erhöhtem Druck bei Temperaturen zwischen 160°C und 190°C behandelt (Hydrothermolyse). Der Hydrothermolyse schließt sich ein konventioneller Trocknungsabschnitt an, in dem das behandelte Holz auf eine Feuchte von etwa 10% getrocknet wird. Im weiteren Verlauf wird das Holz in der zweiten Prozessstufe gehärtet, indem das trockene Zwischenprodukt erneut auf Temperaturen von 170°C bis 190°C erhitzt wird. Die Dauer des Prozesses bemisst sich nach Holzart und den Dimensionen, im Allgemeinen beträgt die Hydrothermolyse zwischen

vier und fünf Stunden, die Trocknung des vorbehandelten Materials drei bis fünf Tage, der darauf folgende Härtungsschritt zwischen 14 und 16 Stunden. Im Anschluss daran muss das Holz noch während zwei bis drei Tagen konditionieren. Als Heizmedium dienen Dampf oder heiße Luft (Ruyter 1989, Boonstra *et al.* 1998).

Die Wirkung der Hydrothermolyse beruht auf unterschiedlichen chemischen Umsetzungen, wobei der Feuchtegehalt in den Zellwänden zu einer höheren Reaktivität der Holzbestandteile führt. Zudem kann unter verhältnismäßig geringen Temperaturen behandelt werden, so dass sich ein selektiver Abbau der Polyosen in der ersten Prozessstufe erreichen lässt, ohne dass es zu ungewünschten Nebenreaktionen kommt, welche zu einer negativen Beeinflussung der mechanischen Eigenschaften führen können (Tjeerdsma *et al.* 1998).

Durch die zweistufige Behandlung nimmt die Biegefestigkeit durchschnittlich um 5 bis 18% ab. In früheren Studien zur Hitzebehandlung von Holz durch einstufige Verfahren wird von Festigkeitsabnahmen von bis zu 50% und mehr berichtet (Seborg *et al.* 1953, Giebel 1983). Während des Prozesses können hohe Spannungen im Holz auftreten, da das Material drei Prozessstufen unterzogen wird, in denen es hohen Temperaturen und einer raschen Entfeuchtung ausgesetzt ist. Verschiedene Nadelhölzer, die sich nur schwer imprägnieren lassen, bringen auch bei einer Hitzebehandlung Schwierigkeiten mit sich und führen zu höheren Einbußen der Festigkeitswerte (Militz und Tjeerdsma 2001) sowie vermehrt zu Rissbildung (Lukowsky und Böttcher 2001).

Durch das veränderte hygroskopische Verhalten ist die Ausgleichsfeuchte um etwa 40% reduziert, wobei die typische Hysterese zwischen Adsorption und Desorption durch die thermische Modifizierung unverändert bleibt. Das Quell- und Schwindverhalten lässt sich um etwa 50% reduzieren, wobei die Quellreduzierung in tangentialer Richtung höher als in radialer Richtung ausfällt, so dass der geringere Unterschied zwischen beiden Quellmaße zu geringeren Spannungen im Holz führt (Militz und Tjeerdsma 2001).

Tjeerdsma *et al.* (1998, 2000) untersuchten die Dauerhaftigkeit von PLATO-Holz und um den Einfluss der Hydrothermolyse auf die Pilzresistenz zu bestimmen, verglichen sie PLATO-Holz mit Holzproben, die einem einstufigen, trockenen Behandlungsverfahren unterzogen wurden. Grundsätzlich zeigte hitzebehandeltes Holz gegenüber allen Prüfpilzen eine erhöhte Dauerhaftigkeit, vor allem gegen Braunfäule. Die Ergebnisse der Untersuchungen zeigten, dass die Prozessbedingungen auch einen Einfluss auf die Pilzresistenz haben; so scheint eine einstufige Hitzebehandlung weniger effektiv zu sein als eine Behandlung mit vorgeschalteter Hydrothermolyse. Die Bedingungen in der zweiten Behandlungsstufe, dem Härtungsprozess, haben größeren Einfluss auf die Resistenz gegenüber Braun- und Moderfäule. Die

Hydrothermolyse dagegen ist bestimmend für die Weißfäuleresistenz, vermutlich aufgrund der stärkeren Zersetzung der Polyosen in diesem Prozessabschnitt. Den größeren Effekt bezüglich der Braun- und Moderfäuleresistenz führen Tjeerdsma *et al.* (1998, 2000) auf die verminderte Hygroskopizität zurück.

2.2.3 Öl-Hitze-Behandlung

Die Hitzebehandlung von Holz findet normalerweise in inerten Gasatmosphären bei Temperaturen zwischen 180°C und 260°C statt (Leithoff und Peek 1998). Da die Siedetemperatur der meisten natürlichen Öle über diesen Temperaturen liegt, besteht die Möglichkeit, Holz in einem heißen Ölbad thermisch zu modifizieren. Kommerziell wird dieses Verfahren durch die Firma MENZ-HOLZ angewandt.

Der Prozess wird in einem geschlossenen Behälter durchgeführt, der zunächst mit Holz beladen wird. Dann wird aus einem Vorratstank das heiße Öl in den Prozesstank eingefüllt, wo das Öl auf der entsprechend hohen Temperatur gehalten wird und um das Holz zirkuliert. Nach Ende der Behandlungsdauer wird vor dem Entladen das Öl wieder abgepumpt. Die Öl-, und damit Prozesstemperatur, richtet sich nach dem angestrebten Vergütungsgrad. Demnach wird unter kontrollierter Ölaufnahme bei Temperaturen zwischen 180°C und 220°C behandelt. Die eigentliche Behandlungsdauer beträgt temperaturabhängig zwischen zwei und vier Stunden, wobei sich die Zeit nach der Temperatur im Inneren des Holzes richtet. Zusätzlich sind noch dimensionsabhängige Aufwärm- und Abkühlphasen erforderlich, so dass sich der gesamte Prozess über einen Zeitraum von bis zu 18 Stunden erstrecken kann. Das als Heizmedium eingesetzte Pflanzenöl (Raps-, Leinsamen- oder Sonnenblumenöl) bietet neben einem schnellen und gleichmäßigen Wärmetransport im gesamten Prozesstank auch den erforderlichen Sauerstoffabschluss (Rapp und Sailer 2001).

Die Dauerhaftigkeit gegen *Coniophora puteana* untersuchten Rapp und Sailer (2001) sowie Sailer *et al.* (2000). Mit steigender Behandlungstemperatur von 180°C bis 220°C konnte eine deutliche Zunahme der Dauerhaftigkeit im Vergleich zu Referenzproben, die für die gleiche Dauer und Temperatur in Luftatmosphäre behandelt wurden, festgestellt werden. Für Kiefersplintholz wurde die höchste Dauerhaftigkeit nach Behandlung bei 200°C erreicht, während für Splintholz der Fichte 220°C optimal erschienen. Matsuoka *et al.* (2002) untersuchten die Dauerhaftigkeit von Sugi (*Cryptomeria japonica*), das in flüssigem Paraffin bei Temperaturen von 90°C bis 150°C behandelt worden war. Sie konnten keine nennenswerte Zunahme der Dauerhaftigkeit gegen Braunfäule feststellen und führen dies auf zu geringe Behandlungstemperaturen zurück.

Wang und Cooper (2005) untersuchten in ihrer Arbeit die Wirkung einer Öl-Hitze-Behandlung (Rohparaffin) auf die Feuchteigenschaften von Weißfichte (*Picea glauca*). Die Quellungsreduzierung lag nach Behandlung bei maximaler Temperatur (220°C) und Dauer (vier Stunden) bei etwa 50%. Rapp und Sailer (2001) erreichen eine Quellungsreduzierung um 40% und eine Feuchte von 14% bei Fasersättigung, die unbehandelte Referenz weist einen Feuchtegehalt von 29% auf.

Wang und Cooper (2005) konnten außerdem zeigen, dass die Wasseraufnahme nur durch die aufgenommene Ölmenge bestimmt wird, während für die reduzierte Hygroskopizität und Dimensionsstabilität nur die chemischen Änderungen des Holzes infolge der Behandlung verantwortlich sind. Damit beeinflusst die Kombination aus Hitzebehandlung und Ölaufnahme nicht nur die Pilzresistenz, sondern die aufgenommene Ölmenge bietet zusätzlichen Schutz vor dem Eindringen von Wasser. Durch die Ölaufnahme erfährt das Holz eine Massezunahme um 50% bis 70% (Sailer *et al.* 2000).

Die Untersuchung der Biegeeigenschaften durch Rapp und Sailer (2001) ergeben, dass die Biegefestigkeit nach einer Öl-Hitze-Behandlung bei 220°C um etwa 30% abnimmt, während der Elastizitätsmodul unverändert bleibt. Die Öl-Hitze-Behandlung führt zu besonders starken Einbußen der dynamischen Festigkeiten; so liegt die Schlagbiegefestigkeit nach Behandlung bei 220°C um etwa 50% unter einer unbehandelten Referenz.

2.2.4 Inertgas-Verfahren

In Frankreich werden zwei Verfahren der Hitzebehandlung von Holz durchgeführt, „Retification“ und „Le Bois Perdure“. Der erste Prozess wurde von der ECOLE DES MINES DE SAINT-ETIENNE entwickelt, Lizenznehmer ist das Unternehmen NOW (New Option Wood), auch als RETITECH bekannt. Eine umfassende Beschreibung der Verfahren und grundlegende Untersuchungen stellte Vernois (2001) an, die im Folgenden zusammengefasst sind.

Für den erst genannten Prozess wird auf etwa 12% vorgetrocknetes Holz eingesetzt, das in Stickstoffatmosphäre mit einem Sauerstoffgehalt von weniger als 2% langsam auf Temperaturen von 200°C bis 240°C gebracht wird. Die Dauer des Prozesses beträgt in Abhängigkeit von Holzart und Abmessungen zwischen neun und zwölf Stunden.

Beim zweiten Prozess ist das Ausgangsmaterial saftfrisches Holz, das in einer ersten Prozessstufe künstlich getrocknet und dann in gesättigter Wasserdampf-atmosphäre auf 230°C erhitzt wird; das Wasser zur Dampferzeugung stammt aus dem Holz.

Wie bei allen Hitzebehandlungsverfahren wird auch hier ein Kompromiss eingegangen zwischen Erhöhung der Dauerhaftigkeit und Verlust der mechanischen Eigenschaften. Holz, das

bei 230°C bis 240°C behandelt wird, ist dauerhafter als bei 210°C behandeltes Holz, allerdings zu Lasten der Biegefestigkeit, die um bis zu 30 bis 40% abnimmt, wobei ein zusätzliches Problem darin besteht, dass das Holz sehr brüchig ist und ohne Kriechen brechen kann. Die Eigenschaften des Endproduktes hängen sehr stark von der Temperatur ab, bereits leichte Abweichungen der Behandlungstemperatur führen zu Veränderungen in den Eigenschaften. So konnte bei der *Retification* gefunden werden, dass bei 230°C eine Veränderung des Lignins in Form von Vernetzungsreaktionen stattfindet, die sich in dieser Form bei Temperaturen ober- und unterhalb von 230°C nicht zeigen. Die Eigenschaftsänderungen durch den Einfluss von Behandlungstemperatur und -dauer sind für jede eingesetzte Holzart verschieden; so berichtet Vernois (2001), dass die mechanischen Eigenschaften von Pappel weniger beeinträchtigt werden als bei Kiefernarten, und Pappel auch im Hinblick auf die Dauerhaftigkeit zu guten Ergebnissen führt. Daraus folgt, dass die Rohdichte nicht der einzige Einflussparameter auf das Behandlungsergebnis ist.

Grundsätzlich bereiten Hölzer mit einer höheren Rohdichte mehr Probleme bei der Behandlung, da sie eher zum Reißen und damit zu deutlichen Verringerungen der mechanischen Eigenschaften neigen. Lukowsky und Böttcher (2001) konnten in ihren Untersuchungen außerdem das Auftreten von Verschalung feststellen, sowie Stingl *et al.* (2002) Harzaustritt und Fleckenbildung im Bereich von Harzgallen.

Mit diesem Verfahren behandeltes Holz weist Gleichgewichtsfeuchten von etwa 4 bis 5% bei 20°C und 65% relativer Luftfeuchte auf, bei unbehandeltem Holz liegen diese Werte zwischen 10 und 12%. Durch entstehende Porosität nimmt das behandelte Holz bis zu 20% mehr Wasser aus der flüssigen Phase auf, gibt es aber bei erneutem Trocknen auch schneller wieder ab, ein Verhalten, das Vernois (2001) für Baumaterialien als vorteilhaft betrachtet. Vom hygroskopischen Verhalten abhängig, wird das Quellverhalten ab einer Behandlungstemperatur von 200°C um den Faktor zwei reduziert. Neben den mechanischen Eigenschaften finden auch Veränderungen anderer physikalischer Größen statt, die für die weitere Verarbeitung berücksichtigt werden müssen. Durch die Hitzebehandlung wird die Oberflächenspannung des Holzes deutlich beeinflusst, so dass hitzebehandeltes Holz spezieller Anstrichsysteme bedarf, falls notwendig lässt sich die Oberflächenspannung durch Additive einstellen. Untersuchungen über die Dauerhaftigkeit von Holz, das nach den französischen Verfahren behandelt wurde, haben Kamdem *et al.* (2002) durchgeführt. Sie konnten eine Verbesserung der Dauerhaftigkeit von Buche, Pappel und Fichte sowie See-Kiefer feststellen, aber die verbesserte Dauerhaftigkeit ist nicht ausreichend, um das modifizierte Holz ohne weitere Schutzmaßnahmen im Erdkontakt einzusetzen.

2.2.5 Weitere Verfahren zur thermischen Vergütung

Ausgehend von den vorgestellten Verfahren haben sich in den vergangenen Jahren weitere Prozesse abgeleitet, so zum Beispiel das finnische STELLAC-Verfahren, der österreichische MIRAKO-Prozess oder das in russisch-deutscher Kooperation hergestellte BARKETT-Holz. Diese Prozesse lehnen sich verfahrenstechnisch an das THERMOWOOD-Verfahren an. Unterschiede bestehen bezüglich der Prozesstemperatur sowie Dauer und richten sich nach dem jeweiligen Einsatzbereich des Endproduktes. Nach Vorbild des französischen Inertgas-Verfahrens stellt die Schweizer Firma BALZ seit Anfang 2002 Thermoholz her.

2.3 Thermische Modifizierung von Holzwerkstoffen

Die thermische Modifizierung ist nicht auf den Vollholzbereich beschränkt geblieben. Zahlreiche Arbeiten beschäftigen sich mit Verfahren, um eine Hitzebehandlung auf Holzwerkstoffe anzuwenden (z.B. Tomek 1966, Burmester 1974, Tomimura und Matsuda 1986, Sekino *et al.* 1997). Ziel hierbei ist vor allem die Verbesserung der Dimensionsstabilität, deren Einfluss auf die Eigenschaften des Werkstoffes ungleich höher als für Vollholz ist. Eine Verwendung von Holzwerkstoffen in Bereichen häufiger Feuchtewechsel wird insbesondere durch ihre starke und vor allem irreversible Dickenquellung eingeschränkt. Das Ausmaß der Dimensionsänderung hängt von unterschiedlichen Faktoren ab, die sowohl verfahrenstechnisch als auch materialspezifisch bedingt sein können (Jonhson 1964, Neußer *et al.* 1965, Suchsland 1972). Diese Einflussgrößen sind neben Holzart (hygroskopisches Verhalten, Verdichtbarkeit), Partikelgröße und -geometrie auch Plattendichte und Plattenaufbau; weiterhin beeinflussen Bindemitteltyp, -anteil sowie -verteilung das Ausmaß der Dickenquellung.

Die Dickenänderung von Holzwerkstoffen durch Feuchteinfluss geht sowohl auf eine reversible als auch irreversible Komponente zurück. Der reversible Anteil an der Dickenquellung beruht auf dem hygroskopischen Verhalten des Holzes. Die irreversible Komponente dagegen, von Klauditz (1954) als Deformationsrückgang bezeichnet, ist auf die Rückfederung verpresster Holzpartikel insbesondere durch Wiederbefeuchten zurückzuführen (Neußer *et al.* 1965, Gatchell *et al.* 1966, Ernst 1967). Bei der Verdichtung der Partikel durch den Pressvorgang und dem Aushärten des Klebstoffes werden Spannungen innerhalb und zwischen den Partikeln aufgebaut. Bei Wiederbefeuchtung – durch Lagerung in Wasser oder bei hoher Luftfeuchte – beginnt der Werkstoff zu quellen. Neben der natürlichen Quellung des Holzes durch Feuchteinfluss, werden auch die Spannungen im Inneren der Platte abgebaut, woraus die Dickenzunahme resultiert. Die irreversible Komponente der Dickenquellung bei Holzwerkstoffen übersteigt dabei die natürliche Quellung von Vollholz. Der Deformations-

rückgang kann mit mechanischem Versagen der Klebstoffbrücken zwischen einzelnen Partikeln verbunden sein, wenn die Quellungsspannungen die Festigkeit der Klebstoffbrücken übersteigen.

Durch thermische Modifizierung erfolgt eine teilweise Zersetzung der Polyosen. Als Hauptträger der Sorption und durch ihren Beitrag zur Plastizität des Holzes, werden sowohl die reversible als auch irreversible Komponente der Dickenquellung beeinflusst. Nicht nur die Feuchtaufnahme wird vermindert, sondern auch die Verdichtbarkeit der Holzpartikel erhöht (Hsu *et al.* 1988). Dadurch können beim Pressvorgang weniger Spannungen im Werkstoff aufgebaut werden, die sich bei Wiederbefeuchten abbauen und damit zu einer Quellung der Platte führen können. Bei der thermischen Modifizierung von Partikelwerkstoffen haben sich drei verschiedene Ansätze herausgebildet, die sich im Hinblick auf den Produktionsprozess auf den Zeitpunkt vor und nach dem Verpressen beziehen. So lassen sich Vorbehandlung des Spanmaterials vor dem Beleimen und Verpressen, Simultanbehandlung während des Pressvorganges und Nachbehandlung des verpressten Werkstoffes unterscheiden.

2.3.1 Vorbehandlung

Maku und Sasaki (1956) konnten bei Platten aus hitzebehandelten Spänen eine reduziert Dickenquellung und verringerte Wasseraufnahme feststellen; das Ausmaß der Eigenschaftsänderung fiel mit steigender Intensität der Prozessbedingungen höher aus. Eine Vorbehandlung von Hobelspänen aus Douglasie bei 205°C für bis zu 45 Minuten führte Lehmann (1964) in seinen Untersuchungen durch. Er konnte eine geringere Verbesserung der Dickenquellung, aber starke Einbußen der Festigkeit finden. Die Biegefestigkeit war um 50%, der Biege-E-Modul um 20% und die Querkzugfestigkeit um 50% reduziert. Die Abnahme der Querkzugfestigkeit lässt sich vermutlich auf eine Inaktivierung zurückführen. Wenn die Temperaturen auf der Holzoberfläche zu stark ansteigen, gelangen mit der Dampfphase wasserunlösliche, unpolare Extraktstoffe an die Oberfläche. In der Folge kann die Benetzbarkeit verringert sein (Gray 1962, Jordan und Wellons 1977, Hse und Kuo 1988) und somit eine vollständige Verklebung beeinträchtigen. Eine thermische Vergütung von Spänen vor dem Pressvorgang führte Tomek (1966) durch. Hierzu behandelte er Späne aus Zerreiche (*Quercus cerris*), deren Feuchte zunächst auf 40% eingestellt worden war, im Trockner durch Rauchgase einer Kohlefeuerung. Das Trocknungsmedium setzte sich zu 79% aus Stickstoff, zu 13% aus Sauerstoff sowie einem Anteil von 7% Kohlendioxid und 1% Kohlenmonoxid zusammen. Die Rauchgase wurden durch einen Lüfter bewegt, so dass die ruhende Spannschicht einer konstanten Dicke gleichmäßig umströmt werden konnte. Die Behandlung wurde bei Temperaturen zwischen 230°C und 300°C für eine Dauer von einer bis vier Minuten

durchgeführt. Nach der Behandlung hatte der Feuchtegehalt auf 3% bis 5,5% abgenommen, die resultierende Masseabnahme lag maximal bei rund 7%. Durch die Vorbehandlung war die Feuchtaufnahme der Späne gegenüber unbehandelten Spänen geringer, das Adsorptionsvermögen daraus gefertigter Spanplatten lag um etwa 30% unter dem von Spanplatten aus unbehandelten Spänen. Die Dickenquellung der Spanplatten war um bis zu 50% reduziert, wobei mit steigender Vergütungstemperatur die Dickenquellung geringer ausfiel bzw. bei gleicher Temperatur durch Anheben der Behandlungsdauer. Die Festigkeit dagegen nahm mit zunehmender Temperatur prinzipiell ab. Dennoch konnte Tomek (1966) für eine bestimmte Behandlungstemperatur und –dauer eine Zunahme der Biegefestigkeit gegenüber der Referenz um 20% feststellen. Dieses Ergebnis führt er auf die reduzierte Feuchtaufnahme zurück, wodurch weniger Klebstoff durch das Holz aufgenommen würde und somit besser zur Ausbildung der Festigkeit beitragen kann. Allerdings nimmt mit zunehmender Temperatur die holzeigene Festigkeit soweit ab, dass der positive Effekt der herabgesetzten Feuchtaufnahme und dem damit höheren Festigkeitsbeitrag des Klebstoffes wieder sinkt. Tomek (1966) führt die Möglichkeit an, dass die Heißvergütung die technische Trocknung ersetzen könnte.

Nach Anwendung des FWD-Verfahrens auf Vollholz, führte Burmester (1974) in seiner Arbeit die thermische Behandlung auch für Holzwerkstoffe durch; sowohl für Sperrholz als auch für Spanplatten. Die Behandlung von Schäl furnieren verschiedener Holzarten zur Herstellung von Sperrhölzern erfolgte bei 170°C für fünf Stunden. Dadurch lässt sich eine Verminderung der Feuchteverformung holzartenabhängig etwa zwischen 45 und 65% erreichen. Die Schäl furniere wurden mit Phenol-Formaldehydharz zu Platten verleimt, hinsichtlich der Verleimbarkeit ergaben sich keine Schwierigkeiten. Bei Einwirken unterschiedlicher Klimate auf die beiden Seiten von Sperrhölzern neigen sie zum Schüsseln, woraus geringere Dimensionsstabilität resultiert. Burmester (1974) stellte in seiner Arbeit aus FWD-behandelten Buchen furnieren (3mm dicke Schäl furniere, 170°C, neun Stunden) Sperrholzplatten her, die er einseitig unterschiedlichen Klimaten aussetzte. Bei Einwirkung einer relativen Luftfeuchte von 33% betrug die Verformung der behandelten Platte nur 25% des Wertes der unbehandelten Referenzplatte, bei einseitiger Belastung mit wasserdampfgesättigter Luft sogar nur 10%. Neben der gestiegenen Formstabilität wies die behandelte Platte eine um 60% geringere Quellung quer zur Faserrichtung auf, in Längsrichtung ergab sich kein Unterschied, so dass die behandelte Platte in beide Hauptrichtungen um das gleiche Maß quillt. Weiterhin führte die FWD-Behandlung zu einer Reduzierung der Dickenquellung um etwa 65%, die Wasseraufnahme war um 25% verringert.

Eine thermische Behandlung von Spänen, die Burmester (1974) für zweckmäßiger hält als die Behandlung von Platten, kann bei höheren Temperaturen erfolgen als die Behandlung von Vollholz und die Behandlungszeiten können kürzer ausfallen. Burmester (1974) führte die thermische Behandlung mit Spänen einer Anfangsfeuchte von 25% durch. In einem Drehautoklaven wurde die Spanmasse bei 220 bis 230°C behandelt. Die Späne wurden mit Phenolharz bzw. Isocyanat als Bindemittel zu Platten verpresst. Nach Behandlung bei 220°C für drei Stunden war die Dickenquellung um etwa 80% gegenüber einer unbehandelten Referenzplatte reduziert. Zudem konnte gefunden werden, dass nach dieser Behandlungsdauer keine Rückfederung (Springback) der Platte mehr auftrat, woraus auf geringere Festigkeitsverluste infolge von Feuchtwechsels geschlossen werden kann. Nach fünfstündiger Behandlung war die Vergütungswirkung rückläufig. Die Querkzugfestigkeit wurde durch die Behandlung unwesentlich beeinflusst, die Biegefestigkeit dagegen nimmt ab, wobei das Ausmaß der Abnahme temperatur- und zeitabhängig ist. In Versuchen zur biologischen Dauerhaftigkeit konnte nach viermonatiger Inkubationszeit kein statistisch gesicherter Masseverlust durch die Prüfpilze *Coniophora puteana* und *Poria vaillantii* festgestellt werden. Dies führt Burmester (1974) auf den thermisch bedingten Verlust der Polyosen zurück sowie Veränderungen der Cellulose durch Brückenbildungen; die Feuchte der Proben lag nach dem Pilztest bei 16% und damit unter der Feuchtigkeitsgrenze für Pilzwachstum. Nach Burmester (1974) lassen sich grundsätzlich alle Holzarten in jeglicher Form (als Schnittholz, Furnier, Spänen und so weiter) mittels FWD-Verfahren vergüten, wobei spezifische Lösungen gefunden werden müssen, um die Behandlungsmaßnahme in den jeweiligen Prozess einzugliedern. Für die Vergütung von Spänen im industriellen Prozess bedarf es laut Burmester (1974) einer kontinuierlichen Anlage. Zu diesem Zweck kämen Kocheranlagen mit Zellradschleusen aus der Zellstoffindustrie in Betracht.

Tomimura und Matsuda (1986) behandelten Hackschnitzel aus Kiefer und Birke mit Dampf bei Drücken von etwa 8 bis 10 bar und eine Dauer von 7 bis 90 Minuten. Nach dieser Vorbehandlung wurden die Hackschnitzel zerspannt. Die bei maximalem Druck und maximaler Dauer behandelten Hackschnitzel ließen sich nicht zerspanen, vielmehr wurden sie durch den Zerspaner zu Fasern aufgetrennt, weshalb die Vorbehandlung bei 10 bar für 90 Minuten an Spänen in Baumwollbeuteln durchgeführt wurde. Die Zerspanung vorbehandelter Hackschnitzel bedurfte höherer Energiemengen als die von unbehandelten. Ziel ihrer Arbeit war, die Autoadhäsion dampfbehandelter Späne zur Herstellung bindemittelfreier Spanplatten zu nutzen. Weiterhin wurden Späne aus vorbehandelten Hackschnitzeln mit UF- und PF-Harz gebunden. Die Herstellung der bindemittelfreien Platten durch Heißpressen bei 180°C für

15 Minuten ergab, dass dampfbehandelte Kieferspäne nicht geeignet sind. Durch die Dampfbehandlung waren die chemischen Holzbestandteile der Kiefer weniger stark verändert als die der Birke. Nach Tomimura und Matsuda (1986) werden die zahlreichen C–C-Bindungen im Lignin der Kiefer durch die Dampfbehandlung nicht gespalten. Die Platten aus Birkenspänen ohne Bindemittelzusatz zeigten geringe Biegefestigkeit bei hohem Biege-E-Modul. Die Eigenschaften der UF-gebundenen Platten aus vorbehandeltem Spanmaterial zeigten im Vergleich zu denen aus unbehandelten Spänen eine Erhöhung der Dimensionsstabilität, dabei war die Dickenquellung der Platten aus Birkenspänen stärker reduziert als die aus Kieferspänen. Durch vorheriges Fraktionieren schlossen Tomimura und Matsuda (1986) einen Einfluss der Spangröße auf unterschiedliches Quellverhalten aus, und machten somit Unterschiede der chemischen Zusammensetzung von Kiefer und Birke für die abweichenden Resultate verantwortlich. Die Polyosen sowie das Lignin von Laubholz lassen sich leichter unter den angewandten Bedingungen hydrolysieren. Bei der Verklebung mit PF-Harz war der positive Effekt der Dampfbehandlung auf die Platteneigenschaften, v.a. die reduzierte Dickenquellung, weniger deutlich. Grund für diesen Unterschied ist die hydrolytische Teilerzersetzung des UF-Harzes bei Wasserlagerung und der nachfolgende Deformationsrückgang der unbehandelten Späne. Die Dampfbehandlung dagegen führt durch die teilweise thermische Zersetzung der Polyosen zu einer Abnahme der holzeigenen Nachgiebigkeit, wodurch die Verdichtbarkeit zunimmt und damit eine Rückfederung der Platte verringert wird. Durch die Hydrolysebeständigkeit des PF-Harzes, die eine Rückfederung durch den Spannungsabbau unbehandelter Späne kompensiert, fällt der Unterschied in der Dickenquellung geringer aus. Durch die Behandlung der Späne nahmen Querkzugfestigkeit und Biegefestigkeit ab, während der Biege-E-Modul etwas stieg. Die Ursache dafür sehen Tomimura und Matsuda (1986) im Abbau der Holzkomponenten, wodurch sich die Eigenschaften der Späne ändern. Durch die Behandlung werden die Späne starrer, aber auch brüchiger.

Sekino *et al.* (1997) behandelten luftgetrocknete Späne der Holzart *Cryptomeria japonica* in Dampf bei 180°C bis 210°C und Drücken zwischen 10 und 19 bar. Die vorbehandelten Späne sowie unbehandelte verpressten sie mit UF-Harz zu Platten und untersuchten Dickenquellung und Querkzugfestigkeit. Die Dickenquellung nach 72-stündiger Wasserlagerung war deutlich reduziert, mit höherer Behandlungstemperatur fiel die Dickenquellung geringer aus, bei maximaler Temperatur von 210°C sank die Dickenquellung unabhängig der Plattendichte auf etwa 5%, während nach Vorbehandlung bei den niedrigeren Temperaturen die Dickenquellung mit steigender Dichte leicht zunahm. Die Dickenquellung ist zeitabhängig; je länger die Wasserlagerung andauert, desto stärker die Quellung. Daher stellen Sekino *et al.*

(1997) die Vermutung an, dass die reduzierte Dickenquellung auf einer verringerten Permeabilität der Platten beruhen könnte, da die Quellung zwar unterschiedlich stark, die Wasseraufnahme jedoch gleich ausfiel. Das bedeutet, die verringerte Dickenquellung ist nicht allein auf eine verminderte Wasseraufnahme zurückzuführen. Die Ursache liegt in der erhöhten Verdichtbarkeit der Partikel nach der Vorbehandlung und damit geringerem Deformationsrückgang. Die Querkzugfestigkeit war durch die Vorbehandlung nicht verändert, lag nach Wechselzyklen sogar über denen der Referenz. Dies führen die Autoren auf den vermindernden Springback sowie Deformationsrückgang einerseits und die reduzierte Hygroskopizität des Holzes andererseits zurück. Einen ähnlichen Ansatz wie Tomimura und Matsuda (1986), Hackschnitzel thermisch zu behandeln und anschließend zu zerspanen, wählten Ohlmeyer und Lukowsky (2004). Sie stellten aus bereits thermisch modifiziertem Vollholz Späne her, um daraus Platten zu fertigen. Durch die zunehmende Versprödung des Holzes infolge der Hitzeeinwirkung stieg der Feinanteil beim Zerspanen an. Die Platten wiesen eine reduzierte Dickenquellung auf.

2.3.2 Simultan- und Nachbehandlung

Bei einer thermischen Vergütung der Plattenwerkstoffe erfolgt die Hitzeeinwirkung entweder unmittelbar während des Verpressens oder im Anschluss daran (Nachbehandlung). Anfänglich wurde die thermische Vergütung auf Faserplatten angewandt, mit dem Ziel die Dickenquellung und vor allem die Rückfederung zu beseitigen. Die Behandlung in der Presse führt zur Feuchteabnahme, wobei es ab einem Feuchtegehalt von 30% interfibrillare Wasserstoffbindungen ausgebildet werden. Steigt die Temperatur in der Platte über 150°C, setzt ein hydrolytischer und oxidativer Abbau ein, der zu Vernetzungsreaktionen führt. Durch den Temperatureinfluss beginnen die im Holz befindlichen Harze zu fließen und können sich so an die Faser binden (Klauditz 1954, Klauditz und Stegmann 1955). Durch diese Bindung entsteht eine dauerhafte Kontraktion der Platte, die selbst bei Eindringen von Feuchtigkeit eine Dickenquellung verhindert. Das Ausmaß dieser Eigenschaftsänderung ist temperatur- und zeitabhängig.

Eine wirksame Reduzierung des Springback lässt sich besonders bei Temperaturen oberhalb 200°C erreichen. Neben der Presstemperatur und -zeit hat auch der Feuchtegehalt einen Einfluss auf die Quellvergütung. Mit einem Feuchtegehalt von 20% bis 25% und bei einer Presstemperatur von 200°C lässt sich ein Springback vermeiden. Mit der Abnahme des Springback sind Zunahmen in Wasserabweisung, Dimensionsstabilität und Festigkeit verbunden; die holzeigene Quellung wurde aber nicht verändert (Mildenstein 1965). Während die Dickenquellung deutlich herabgesetzt wird, kann die Wasseraufnahme unverändert blei-

ben, da insbesondere Platten mit geringer Dichte genügend Hohlraumvolumen aufweisen, in das Wasser aufgenommen werden kann. Durch den Hydrophobierungseffekt infolge der Einlagerung von Harzen führt die Wasseraufnahme aber nicht zu einer Dickenquellung (Burmester 1970). Die verminderte Dickenquellung mit steigender Presstemperatur geht gleichzeitig aufgrund zunehmender Versprödung mit einer Abnahme der Schlagbiegefestigkeit einher. Die Versprödung beruht auf der zunehmenden Vernetzung zwischen den Polymeren. Bezüglich einer Reduzierung von Dickenquellung und Wasseraufnahme ist eine höhere Presstemperatur vorteilhafter als niedrigere Presstemperaturen mit anschließender Härtung unter erhöhten Temperaturen.

Goroyias und Hale (2002 a) untersuchten die Auswirkung verlängerter Presszeiten und Presstemperaturen auf die Dimensionsstabilität und mechanischen Eigenschaften von PF-gebundenen OSB aus Kiefer (*Pinus sylvestris* L.). Hierzu verpressten sie OSB bei Temperaturen von 210°C bis 250°C für eine Dauer von sechs bis zwölf Minuten. Die Autoren stellen fest, dass die Biegefestigkeit der Platten tendenziell mit steigender Presstemperatur und –dauer abnimmt, obwohl sich für einige Behandlungsparameter eine Verbesserung der Biegefestigkeit ergab. Der Festigkeitsverlust ließe sich nach Goroyias und Hale (2002 a) möglicherweise durch einen höheren Bindemittelanteil vermindern. Die Querkzugfestigkeit konnte durch die Versuchsbedingungen verbessert werden, die Festigkeitszunahme lag bei maximal 29%. Die Ursache sehen Goroyias und Hale (2002 a) in der besseren Wärmeübertragung, die bei hohen Temperaturen und Presszeiten erfolgt. Damit könnte die Aushärtung des PF-Harzes besser erfolgen. Die Dickenquellung konnte mit zunehmender Presstemperatur und –zeit verbessert werden, nach 12minütiger Presszeit bei 250°C war die Dickenquellung um 78% reduziert. Ausschlaggebend dafür war die vergleichsweise hohe Verweildauer der Platte bei über 200°C im Plattenkern. So betrug die Temperatur im Plattenkern bereits nach drei Minuten 200°C und stieg weiter, bis nahezu die Heizplattentemperatur erreicht war. In ihren Untersuchungen fanden die Autoren eine Korrelation zwischen der Dickenquellung der Platten und der Temperatur in der Mittelschicht, so dass sich daran Aussagen über den Grad der Dimensionsstabilität treffen ließen.

Neben der thermischen Vergütung während des Pressvorganges, stellt die nachträgliche Behandlung eine Methode zur Dimensionsstabilisierung dar. Ernst (1967) orientierte sich an der für Vollholz bekannten Methode zur Herstellung von Formholz. Hierbei wird durch Dämpfen eine Plastifizierung des Holzes erreicht und unter Druck in die entsprechende Form gebracht. Nach dem Abkühlen bleibt das Holz so in seiner Lage fixiert und die ursprünglichen Festigkeiten weitgehend erhalten. Diese Verfahren bot für Ernst (1967) die Grundlage für

Versuche, Späne im Plattenverbund auf die gleiche Art dauerhaft zu fixieren und somit eine Rückfederung zu vermeiden. Nach einer Behandlung für 2 Stunden bei 200°C konnte eine Reduzierung der Dickenquellung nach 24stündiger Wasserlagerung um mehr als 60% erreicht werden, allerdings nur bei Verwendung von Phenolharz als Bindemittel. Suchsland und Enlow (1968) konnten durch ein- bis zweistündige Behandlung bei 218°C die Rückfederung reduzieren, die Gesamtdickenquellung um 30%. Die mechanischen Eigenschaften der phenolisch gebundenen Spanplatten wurden durch die Behandlung nicht beeinflusst, die Querkzugfestigkeit war sogar erhöht.

Heebink und Hefty (1969) untersuchten die Eigenschaften von Phenolharz-gebundenen Spanplatten aus Douglasie durch Nachbehandlung für 10 Minuten bei 180°C in gesättigtem Dampf. Die Behandlung hatte deutlichen Einfluss auf Dickenquellung und Deformationsrückgang und nur geringe Auswirkung auf Biege- und Querkzugfestigkeit. Durch die Nachbehandlung in Dampf wird aufgrund einer permanenten Zunahme der Dicke die Dichte reduziert; dieser Dichteabnahme schreibt Halligan (1970) den Rückgang der mechanischen Eigenschaften zu. Heebink und Hefty (1969) verglichen die Nachbehandlung in Dampf mit einer Nachbehandlung in Luftatmosphäre und konnten zeigen, dass eine Nachbehandlung in Luftatmosphäre für zwei Stunden bei 220°C den gleichen Effekt hinsichtlich einer Reduzierung der Rückstellkraft hatte wie die Nachbehandlung für 10 Minuten bei 180°C in gesättigtem Dampf. Beide Verfahren zeigten nach zweistündigem Kochtest um 50% reduzierte Dickenquellung und weitgehende Beseitigung des Deformationsrückganges.

Faserplatten aus Buche, nach dem Trockenverfahren ohne Bindemittelzusatz hergestellt, wiesen durch eine Nachbehandlung bei 200°C für vier Stunden eine Dickenquellung nach 24stündiger Wasserlagerung von 5% auf (Burmester 1970). Diese Form der thermischen Modifizierung entspricht einem Tempern; das bedeutet eine reine Hitzebehandlung ohne zusätzliche Anwesenheit von Feuchte und Druck. Dieses Verfahren eignet sich für Spanplatten nur bedingt (Burmester und Deppe 1973). Der Feuchtegehalt der Platte wird stark reduziert und eine anschließende Rückkonditionierung gelingt nur schwer aufgrund des Absperreffektes der Decklagen. Durch die Wiederbefeuchtung kühlt die zudem Platte ab, so dass in die Decklagen eingebrachte Spannungen irreversibel fixiert werden.

Um die Dimensionsstabilität von OSB zu verbessern, schlagen Del Menezzi und Tomaselli (2006) eine Nachbehandlung bereits verpresster Platten in einer Presse vor. In ihren Untersuchungen wurden mit PF-Harz gebundene OSB bei 250°C für eine Dauer von vier bis zehn Minuten nachbehandelt; der Pressdruck von 0,17 kPa diente nur dazu, einen Kontakt zwischen Heizplatten und Platte herzustellen. Die Platten wiesen nach der Behandlung eine

herabgesetzte Feuchteaufnahme auf, außerdem konnte die Dickenquellung nach Wasserlagerung sowie der irreversible Anteil verringert werden; die Wasseraufnahme dagegen blieb durch die Nachbehandlung unverändert. Das Ausmaß der Eigenschaftsänderung war mit zunehmender Behandlungsdauer höher. Die Platten zeigten nach der Behandlung eine dunkle Verfärbung, die bis in die Plattenmitte reichte. Die Nachbehandlung geht mit einer Dimensionsänderung sowie einer Masseabnahme einher, welche die Autoren als gutes Maß für die Wirksamkeit der Nachbehandlung deuten. Die nachbehandelten OSB wiesen eine glattere Oberfläche auf als zuvor, woraus Del Menezzi und Tomaselli (2006) als möglichen Gebrauchszweck die Verwendung als Betonschalungslatten anführen, da eine ebene Oberfläche weniger Abdrücke im Beton hinterlässt.

Die Vorteile einer Hitzebehandlung von Spanmaterial vor der Beileimung und dem Verpressen liegen nach Burmester und Deppe (1973) in der Homogenität gegenüber einer Nachbehandlung. Weiterhin entfallen die Probleme der Rückklimatisierung und Konditionierung. Im Vergleich zu einer Spanplatte, die durch Nachbehandlung vergütet wurde, war die Dickenquellung einer Platte aus vorbehandelten Spänen nach 120 Stunden Wasserlagerung um mehr als 65% reduziert. Die Festigkeitsabnahme um etwa 40% lag in der gleichen Größenordnung. Einen weiteren Vorteil der Vorbehandlung besteht darin, dass diese Form der Behandlung bindemittelunabhängig erfolgen kann. Für Simultan- und Nachbehandlung durch Dampf eignen sich nur Phenolharze oder Isocyanate. Dagegen eignet sich die Vorbehandlung vor allem auch für Harnstoff- oder Harnstoffmischharze, die gegen hydrolytischen Abbau unbeständig sind.

3 Zielsetzung

Die Vorteile einer thermischen Modifizierung von Holz sind seit langem bekannt und in der Literatur durch zahlreiche Arbeiten beschrieben sowie durch praktische Anwendungen belegt. Das Hauptaugenmerk gilt dabei vor allem der thermischen Vergütung von Vollholz, was aber nicht heißt, dass die Forschung den Bereich der Holzwerkstoffe außer Betracht gelassen hätte. Im Gegensatz zum Vollholzbereich haben die Versuche, durch eine thermische Modifizierung die Eigenschaften von Partikelwerkstoffen zu verbessern, jedoch bisher nicht den Schritt in Richtung industrieller Umsetzung geschafft.

Eine mögliche Ursache könnte die Art der technischen Umsetzung sein; bei den meisten Verfahren wird das Spanmaterial bzw. der Werkstoff unter Druck in Dampfatmosfera behandelt, die Behandlungsdauer liegt meistens bei mehreren Stunden. Besonders im Hinblick auf eine kontinuierliche Fertigung könnten hierdurch Engpässe entstehen.

Dabei kann gerade für den Bereich der Holzwerkstoffe eine thermische Modifizierung sehr zweckmäßig sein. Denn aufgrund ihrer starken und irreversiblen Dickenquellung, die zu hohen Einbußen der Festigkeiten führt, sind herkömmliche Holzwerkstoffe aus Spanmaterial für die Verwendung im Außenbereich ungeeignet. Sperrhölzer erscheinen geeigneter, neigen aber trotz des Absperreffektes bei Einwirken unterschiedlicher Klimate auf die Plattenflächen zum Verwölben und in der Folge kann es zur Rissbildung kommen (Burmester 1974). Der Einsatz von Sperrholz im Außenbereich gelingt derzeit nur durch zusätzliche Beschichtung mit Phenolharzpapieren, bei Spanplatten, sofern nicht mineralisch gebunden, lassen sich für Außenverwendungen nur durch einen sehr hohen Bindemittelanteil befriedigende Ergebnisse erreichen. Die wesentlichen Anforderungen an Platten in solchen Anwendungen stellen Dimensionsstabilität und Witterungsbeständigkeit gegen häufige Feuchtwechsel sowie den Einfluss von Frost und UV-Licht dar.

Ziel dieser Arbeit ist es, einen Plattenwerkstoff ohne höheren Klebstoffeinsatz zu entwickeln, der aufgrund seiner reduzierten Dickenquellung und verbesserten Dauerhaftigkeit in Bereichen häufiger Feuchtwechsel eingesetzt werden kann. Eine Verwendung z.B. als Betonschalungs- oder Fassadenplatte und hier als Trägermaterial für Kunststoffe, Anstriche und Putz oder als sichtbares Flächenelement ist denkbar.

Es sollen geeignete Methoden zur thermischen Modifizierung von Holzwerkstoffen entwickelt werden, die sich in ihren Verfahren an die industrielle Holzwerkstoffproduktion anlehnen. Geeignete Schnittstellen sind dabei die Trocknung, der Pressvorgang sowie die anschlie-

ßende Stapellagerung, da das Spanmaterial bzw. der verpresste Werkstoff in diesen Prozessabschnitten ohnehin mit hohen Temperaturen in Kontakt tritt. Dabei lassen sich grundsätzlich Vor- und Nachbehandlung unterscheiden, je nachdem ob die thermische Modifizierung am Spanmaterial vor dem Beleimen und Verpressen erfolgt oder erst nachdem die Platte bereits verpresst wurde. Eine Vorbehandlung von Spanmaterial bietet aufgrund der geringen Abmessungen des Ausgangsmaterials den Vorteil einer kürzeren Behandlungsdauer als bei Vollholz und zudem kann auf eine langsame Aufheizphase verzichtet werden, da die Gefahr von Rissbildung infolge zu schneller Austrocknung des Materials ausgeschlossen werden kann. Daher bietet sich vor allem ein Verfahren an, das dem Wasserdampfverfahren für die thermische Modifizierung von Vollholz entspricht. Zum einen kann hierbei die Behandlung unter Atmosphärendruck bis zu Temperaturen von 250°C stattfinden, denn durch Einblasen von Wasserdampf als Schutzgas wird die Umgebungsluft soweit vertrieben, dass keine oxidative Zersetzung des Holzes einsetzen kann. Zudem ließe sich der Prozess unmittelbar an die technische Trocknung anschließen, entsprechend der Aufwärm- und Trocknungsphase bei der Vollholzmodifizierung, in denen das Holz auf eine Feuchte von 10% getrocknet wird. Die Nachbehandlung des bereits verpressten Werkstoffes erfolgt unter simulierten Stapelbedingungen, wodurch der Werkstoff neben Hitze auch Druck ausgesetzt wird.

Das behandelte Spanmaterial bzw. die Platten werden auf ihre Feuchtebeständigkeit, Veränderung der Acidität, Benetzbarkeit und Dauerhaftigkeit sowie mechanische Eigenschaften geprüft.

4 Vorbehandlung unter Sauerstoff

In ersten Versuchen wurde die Möglichkeit untersucht, eine Reduzierung der Feuchteaufnahme und Dickenquellung durch Aufheizen des Spanmaterials auf die jeweilige Zieltemperatur in Luftsauerstoff zu erreichen. Ziel war es, mittels bestehender technischer Einrichtung den maximalen Effekt auf Dickenquellung und Dauerhaftigkeit zu prüfen.

4.1 Material und Methoden

4.1.1 Spanmaterial

Für die Vorbehandlung wurden industriell hergestellte OSB-Strands aus Kiefer (*Pinus sylvestris* L.) eingesetzt, die technisch bereits auf eine Feuchte von 4% vorgetrocknet worden waren.

4.1.2 Thermische Modifizierung

Die Vorbehandlung der Strands wurde in einem Trockenschrank für Temperaturen von 140°C bis 180°C in Luftsauerstoff durchgeführt, die Behandlungsdauer auf 15 Stunden festgesetzt, wobei die Lufttemperatur im Ofen maßgeblich war. In dieser Versuchsreihe sollte zunächst nur der Einfluss der Temperatur auf die späteren Platteneigenschaften untersucht werden, weshalb die Behandlungsdauer und Holzfeuchte konstant blieben.

Eine abgewogene Menge Strands (etwa 3,5 kg) wurden in eine Stahlwanne mit einem Volumen gefüllt und manuell leicht verdichtet. Um eine annähernd geschlossene Luftatmosphäre zu schaffen, wurden die Strands mit Aluminiumfolie abgedeckt und zusätzlich durch ein Flächengewicht beschwert. Der Temperaturverlauf im Trockenschrank sowie im Spanhaufen wurde mittels Thermoelementen gemessen. Nach Ablauf der Behandlungsdauer kühlten die Strands noch einige Stunden in der Ofenatmosphäre ab. Erst nachdem 50°C unterschritten waren, wurden die Strands entnommen, um einen Sauerstoffkontakt unter Hitze weitgehend auszuschließen. Nach der Vorbehandlung wurde durch erneutes Wägen der Gewichtsverlust bestimmt, bevor die Strands beleimt und zu Platten verpresst wurden.

4.1.3 Klebstoff

Als Klebstoff wurde polymeres Diphenylmethan-Diisocyanat (PMDI) der BAYER AG (DES-MODUR® 1520 A20) mit einem Anteil von 5% bezogen auf atro Strand-Masse verwendet.

4.1.4 Herstellung der Laborplatten

Die Beleimung der unbehandelten sowie vorbehandelten Strands erfolgte in einem Mischer der Firma Lödige, das Bindemittel wurde unter Luftdruck über eine Zweistoffdüse auf das Spanmaterial aufgebracht. Durch Umwälzen mittels Schaufeln konnte eine gleichmäßige Bindemittelverteilung erreicht werden. Um eine Nachzerkleinerung der Strands möglichst gering zu halten, wurde eine Drehzahl von 28 min^{-1} gewählt. Die Beleimung erfolgte zweistufig; zuerst wurde Wasser, danach das jeweilige Klebstoffsystem in die Beleimtrommel eingedüst. Die Referenzplatten wurden sowohl mit als auch ohne Paraffinzusatz von 1% bezogen auf atro Strandmasse hergestellt. Die Feuchte der Strands wurde auf 10% eingestellt und anschließend manuell in einen Streurahmen auf das Pressblech verteilt, wodurch sich keine Orientierung der Strands erreichen ließ. Nach manueller Vorverdichtung wurden die Platten in einer Laborpresse der Firma Siempelkamp verpresst, die Heizplattentemperatur betrug 220°C . Alle Platten wurden mit einem Presszeitfaktor (PZF) von 12 sec/mm auf eine Plattendicke von 16 mm bei einer Zieldichte von 650 kg/m^3 (atro) verpresst. Nach dem Pressen wurden die Platten bis zum Abkühlen auf Raumtemperatur aufrecht gelagert.

4.2 Prüfmethoden Werkstoffe

4.2.1 Probenvorbereitung

Die Laborplatten wurden umseitig 50 mm besäumt, die verbliebene Fläche wurde in 18 Probenkörper einer Fläche von $50 \times 50 \text{ mm}^2$ und in drei Probenkörper einer Fläche von $370 \times 50 \text{ mm}^2$ zerlegt. Vor jeder Prüfung werden die Proben gemäß EN 317 (1993) bis zur Massekonstanz bei einer relativen Luftfeuchte von 65% und einer Temperatur von 20°C klimatisiert.

4.2.2 Dickenquellung

Die Dickenzunahme des Prüfkörpers nach vollständiger Wasserlagerung wurde nach EN 317 (1993) bestimmt, die Lagerungszeit beträgt 24 Stunden. Danach werden die Prüfkörper aus dem Wasser genommen, überschüssiges Wasser entfernt und die Dicke gemessen. Um das Langzeitverhalten der untersuchten Platten besser beurteilen zu können, wurde die Dickenquellung auf bis zu 168 Stunden ausgeweitet, und zusätzlich die irreversible Dickenquellung bestimmt. Hierzu wurden die Probekörper nach der Wasserlagerung und Dickenmessung getrocknet und anschließend bei 20°C und 65% r. Lf. bis zur Gewichtskonstanz klimatisiert und erneut Vermessen.

4.2.3 Feuchtegehalt

Die Bestimmung des Feuchtegehaltes erfolgte gemäß EN 322 (1993); die Prüfkörper wurden bis zur Massekonstanz bei 103°C getrocknet. Nach dem Trocknen wurden die Proben in einem Exsikkator über P_2O_5 abgekühlt und anschließend gewogen, um den Masseverlust zu bestimmen. Nach diesem Ansatz erfolgte auch die Bestimmung der Gleichgewichtsfeuchte. Als Gleichgewichtsfeuchte wird der Feuchtegehalt von Holz und Holzwerkstoffen bezeichnet, der sich unter den jeweiligen herrschenden Klimabedingungen einstellt. Die Höhe des Feuchtegehaltes hängt von der Temperatur und relativen Luftfeuchtigkeit der Umgebung ab. Nach Klimatisierung der Proben gemäß EN 317 (1993) wurde analog EN 322 (1993) verfahren; es wurde die Gleichgewichtsfeuchte bei 20°C und 65% r. Lf. durch Klimatisierung bestimmt.

4.2.4 Rohdichte

Die Rohdichte, als Verhältnis der Masse eines Prüfkörpers zu seinem Volumen, wurde nach EN 323 (1993) bestimmt. Die quadratischen Prüfkörper wurden nach Klimatisierung mittels Messschraube und Messschieber ausgemessen und gewogen.

4.2.5 Querkzugfestigkeit

Die Querkzugfestigkeit, das bedeutet die Zugfestigkeit senkrecht zur Plattenebene, ergibt sich aus dem Verhältnis der Bruchkraft zur Querschnittsfläche des Prüfkörpers. Entsprechend EN 319 (1993) wurden die Prüfkörper mittels Schmelzkleber beidseitig mit Prüfjochen verklebt und in eine Prüfmaschine eingespannt, welche die notwendige Zugkraft bis zum Bruch der Proben aufbrachte.

4.2.6 Querkzugfestigkeit nach Kochprüfung

Die mit Jochen verklebten Prüfkörper wurden gemäß EN 1087-1 (1995), für OSB in Verbindung mit EN 300 (1997), in ein Wasserbad gelegt und zum Sieden gebracht. Das Kochen wurde für eine Dauer von 120 Minuten fortgesetzt, die Prüfkörper anschließend entnommen und abgekühlt. Die Prüfung der Querkzugfestigkeit wurde an den nassen Proben analog EN 319 (1993) durchgeführt. Die Prüfung der Querkzugfestigkeit von OSB erfolgte in Verbindung mit EN 300 (1997); dabei werden die Proben erst nach dem Kochen und Abkühlen mit den Jochen verklebt.

4.2.7 Biege-Elastizitätsmodul und Biegefestigkeit

Die Bestimmung des Biege-Elastizitätsmoduls (E-Modul) und der Biegefestigkeit erfolgte nach EN 310 (1993) durch Aufbringen einer Last in der Mitte eines an zwei Punkten aufliegenden Prüfkörpers. Der E-Modul wurde unter Berücksichtigung des linearen Bereiches des Kraft-Durchbiegungs- Diagramms berechnet, die Biegefestigkeit durch Bestimmung des Verhältnisses vom Biegemoment bei Bruchlast zum Widerstandsmoment seines vollen Querschnittes.

4.2.8 Bewitterung

Durch künstliche Bewitterung wird die Widerstandsfähigkeit der Probekörper gegen Temperatur- und Feuchtwechsel sowie Frost und UV-Strahlung geprüft. Ziel ist es, durch geeignete Testmethoden Rückschlüsse auf das Langzeitverhalten des Werkstoffes unter Freilandbedingungen ziehen zu können. Zwei verschiedene Zyklustests wurden angewandt – der 14tägige BAM-Zyklus (im Text Zyklustest 1) sowie ein in der Industrie eingesetzter fünf-wöchiger Zyklustest (im Text Zyklustest 2). Die künstliche Bewitterung gemäß BAM-Zyklus wurde in einem Klimaschrank durchgeführt. Ein Bewitterungszyklus hatte die Dauer von 14 Tagen, während denen die Proben unterschiedlichen Klimaten ausgesetzt waren. Im Wechsel wurden Temperaturen von -15°C, 20°C und 55°C durchlaufen, wahlweise in Verbindung mit UV-Licht oder künstlicher Beregnung. Einzelheiten des Programmablaufs der künstlichen Bewitterung können Tabelle 24 im Anhang entnommen werden. In Tabelle 25 im Anhang ist das Programm von Zyklustest 2 angegeben. Ein Zyklus dauerte sieben Tage, die Probekörper durchliefen insgesamt fünf Zyklen. Die Entnahme und Prüfung der Proben erfolgt nach jedem Teilzyklus. Nach Durchlaufen der Prüfung wurden die Probekörper bei 20°C und 65% r. Lf. klimatisiert. Anschließend wurden die irreversible Dickenquellung, wie unter 4.2.2 beschreiben, sowie die Querkzugfestigkeit nach EN 319 (1993) bestimmt.

4.2.9 Dauerhaftigkeit

Die Prüfung der biologischen Dauerhaftigkeit für die Platten erfolgte nach ENV 12038. Nach Bestimmen der anfänglichen Trockenmasse wurden die Proben bis zur Gewichtskonstanz klimatisiert und anschließend sterilisiert. Das Nährmedium wurde aus 4% Malz und 2% Agar hergestellt. Zur Überprüfung der Virulenz wurden Proben aus Kiefernspiltholz und Buche mit einer Querschnittsfläche von 30 x 30 mm² und einer Länge in axialer Richtung von 5 mm verwendet. Die Virulenzproben dienen zur Kontrolle der Aktivität des Prüfpilzes und lagen für alle Pilze über dem Mindestmasseverlust von 20%. Die Messkontrolle aus Kiefernspiltholz bzw. Buche entspricht in ihren Abmessungen denen des Prüfkörpers und zeigt den Einfluss

der Probengröße auf die Befallsaktivität. Als Prüfpilze wurden der Weißfäuleerreger *Pleurotus ostreatus* und die Braunfäuleerreger *Coniophora puteana* und *Poria placenta* eingesetzt. Nach 16wöchiger Inkubationszeit wurden die Proben gedarrt und der Masseverlust festgestellt. Zur Beurteilung der Dauerhaftigkeit wird bei Plattenwerkstoffen der DSI (Decay Susceptibility Index) nach Gleichung 1 gebildet.

$$DSI = \frac{\% \text{Masseverlust des Plattenwerkstoffes}}{\% \text{Masseverlust der Messkontrolle}} * 100$$

Gleichung 1

4.3 Ergebnisse und Diskussion

4.3.1 Gleichgewichtsfeuchte und Dickenquellung

Die Vorbehandlung der Strands führt zu einer Masseabnahme des Materials, die mit steigender Behandlungstemperatur aufgrund der fortschreitenden Zersetzung zunimmt und maximal etwa 5,5% nach Vorbehandlung bei 180°C erreichte. Die Auswirkung der thermischen Behandlung auf die Gleichgewichtsfeuchte der Strands bei 20°C und 65% relativer Luftfeuchte (r. Lf.) ist in Abbildung 1 dargestellt. Im unbehandelten Zustand erreichen die Strands einen Feuchtegehalt von 9%. Durch die Vorbehandlung sinkt die Feuchteaufnahme mit steigender Temperatur auf etwa 8,6% bis 8,3% nach Vorbehandlung bei 140°C bzw. 150°C. Mit Anheben der Temperatur auf 160°C ist eine deutliche Abnahme der Feuchte auf 7,4% zu erkennen, die auf minimal 6,5% nach Vorbehandlung bei 180°C abnimmt. Entsprechend den geringeren Gleichgewichtsfeuchten der vorbehandelten Strands, stellten sich auch bei den daraus gefertigten Laborplatten niedrigere Ausgleichsfeuchten ein als bei den Referenzplatten, ebenfalls in Abbildung 1 dargestellt. Dabei kann kein Unterschied zu den mit Paraffinzusatz hergestellten Platten gefunden werden. Paraffin als Hydrophobierungsmittel verhindert kurzzeitig nur das Eindringen von Wasser in flüssiger Phase, der Einfluss auf das Sorptionsverhalten ist dagegen nur gering (Roffael *et al.* 2005).

Die Gleichgewichtsfeuchte der Platten liegt über denen der Strands; nach Vorbehandlung bei 140°C resultiert eine Plattenfeuchte von rund 9% und liegt damit nur gering über dem Wert für lose Strands bzw. im Bereich der Referenzplatten. Mit steigender Vorbehandlungstemperatur sinkt die Gleichgewichtsfeuchte daraus gefertigter Platten, das Ausmaß der Abnahme ist jedoch geringer als bei den Strands im unverpressten Zustand. So liegt die minimale Feuchteaufnahme der Platten aus Strands, die bei 180°C vorbehandelt wurden, bei 8% und damit deutlich über dem Wert von 6,5% für die 180°C-Strands. Im Vergleich zur Referenzplatte lässt sich durch Vorbehandlung bei 180°C eine Verminderung der Feuchteaufnahme um 14% erreichen. Die Abnahme des Feuchtegleichgewichtes infolge der Vorbehandlung geht auf den Abbau frei zugänglicher Hydroxylgruppen der Polyosen zurück. Dadurch entfallen mögliche Kontaktstellen für Wassermoleküle im Holz. Perkitny und Szymankiewicz (1963) konnten in ihrer Arbeit zeigen, dass die Ausgleichsfeuchte von Spanplatten aus Kiefer höher ausfällt als für Kiefer selbst. Allerdings tritt dieser Effekt erst bei höheren r. Lf (80%) auf. Da in dieser Untersuchung die Gleichgewichtsfeuchte bei 65% r. Lf. bestimmt wurde, ist der Unterschied in der Feuchteaufnahme zwischen den losen Strands und den daraus gefertigten Platten eher auf eine nicht komplette Ausgleichsfeuchte zurückzuführen.

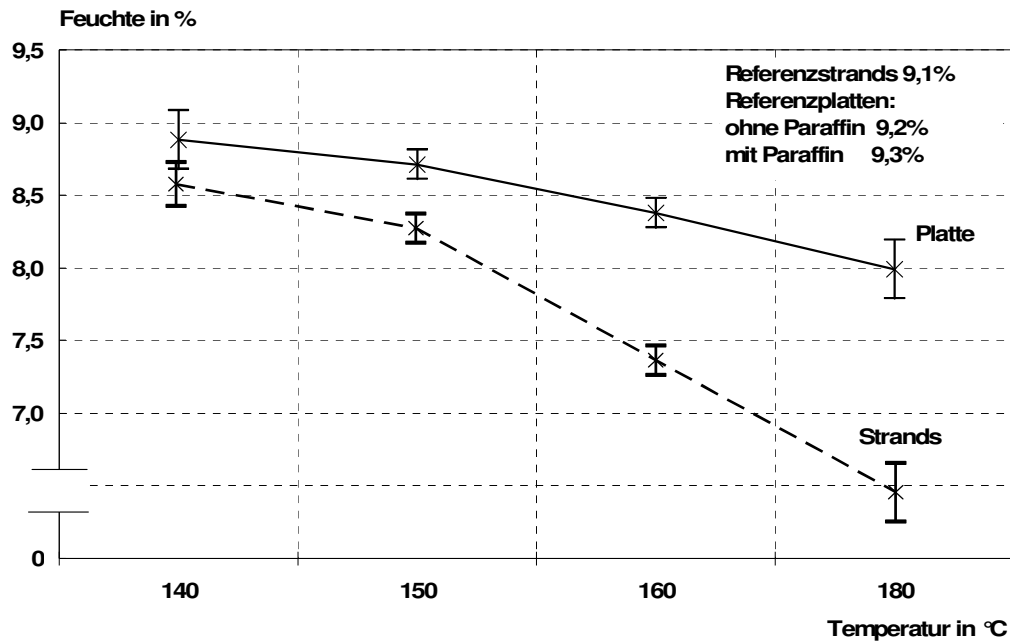


Abbildung 1: Gleichgewichtsfeuchte bei 20°C und 65% r. Lf. von OSB-Strands aus Kiefer, die bei 140°C bis 180°C in Luftatmosphäre vorbehandelt wurden, sowie daraus gefertigter Platten.

Die Dickenquellung und Wasseraufnahme nach 24stündiger Wasserlagerung ist Abbildung 2 zu entnehmen. Für die Referenzplatte ohne Paraffinzusatz ergibt sich eine Dickenquellung um rund 22%, durch Paraffinzusatz kann die Dickenquellung um etwa 50% auf 10,4% reduziert werden. Nach Vorbehandlung der Strands bei 140°C bis 150°C sinkt die Dickenquellung daraus gefertigter OSB auf etwa 18,5%, entsprechend einer Abnahme um 16%. Mit Anheben der Vorbehandlungstemperatur auf 160°C wird eine deutliche Abnahme der Dickenquellung erkennbar. Mit einer Dickenzunahme nach 24stündiger Wasserlagerung von 13,5% liegt die Dickenquellung um 37% unter der Referenzplatte ohne Paraffinzusatz. Nach Vorbehandlung bei 180°C lässt sich eine Reduzierung der Dickenquellung um 50% gegenüber der Referenz erreichen; eine Verbesserung, die ansonsten nur durch den Zusatz von Paraffin erreicht werden konnte.

Die reduzierte Dickenquellung lässt sich auf zwei Effekte zurückführen, deren Ausmaß temperaturabhängig ist. Einerseits führen die Entstehung hydrophober Bestandteile durch Vernetzungsreaktionen von Abbauprodukten mit dem Lignin sowie die Autokondensation des Lignins und der Abbau freier Hydroxylgruppen zu einer geringeren Wasseraufnahme in die Zellwände. Zum anderen führt ein Abbau der Polyosen zu einer erhöhten Verdichtbarkeit des Holzes. Dadurch werden beim Verpressen weniger Spannungen in die Platte eingebracht, die durch die holzeigene Rückstellkraft zur Dickenquellung beitragen können.

Die Wasseraufnahme nach 24stündiger Wasserlagerung folgt in ihrem Verlauf der Dickenquellung. Nach Vorbehandlung bei 140°C und 150°C liegt die Wasseraufnahme zwischen 54% und 58% und damit geringfügig über der Referenzplatte ohne Paraffin (53%). Mit Anheben der Temperatur auf 160°C liegt die Wasseraufnahme bei 43%. Während die Dickenquellung nach Vorbehandlung bei 180°C um 50% unter der Referenz liegt, steigt die Wasseraufnahme auf 48,5% an und liegt somit nur um 9% unter dem Referenzwert.

Eine denkbare Ursache für die im Vergleich zur Dickenquellung gering bis unveränderte Wasseraufnahme ist, dass sich mit zunehmender Behandlungstemperatur und damit fortschreitender Zersetzung der Holzsubstanz das Porenvolumen ändert. Durch den zunehmenden Volumenschwund aufgrund des Substanzverlustes durch die thermische Zersetzung entstehen Schwindkräfte. Da die Substanzverluste für die verschiedenen Zellwandschichten unterschiedlich sind, treten unterschiedlich hohe Schwindkräfte auf. Dadurch kommt es in den Zellwänden zu Rissbildung und Stauchungen (Fengel und Wegener 1989). In so entstandene Risse kann Wasser eindringen, ohne zur Dickenquellung beizutragen, da die erwähnte Bildung und Einlagerung hydrophober Substanzen in den Zellwänden zu einem dimensionsstabilen Gefüge führt. Die erhöhte Wasseraufnahme hitzebehandelten Holzes bei geringerer Quellung konnte auch durch Vernois (2001) gefunden werden. Der Anstieg der Wasseraufnahme mit weiter abnehmender Dickenquellung der Platten aus 180°C-Strands gegenüber den Platten aus 160°C-Strands lässt sich auf die Bildung hydrophober Produkte und gleichzeitig erhöhter Rissbildung infolge fortschreitender thermischer Zersetzung des Holzes begründen. Eine weitere Erklärung liefert die zunehmende Versprödung des Holzes mit steigender Behandlungstemperatur. So kann es durch die Beleimung zu einer Nachzerkleinerung der thermisch modifizierten Strands gekommen sein, so dass in der Folge die Plattenstruktur im Vergleich zur Referenz einen größeren Anteil an frei zugänglichen Hohlräumen aufweist, in die Wasser eindringen kann.

Durch die Zugabe von Paraffin als Hydrophobierungsmittel lässt sich die Wasseraufnahme auf rund 25% reduzieren. Die Wirkung des Paraffins dauert allerdings nur kurzzeitig an, mit zunehmender Dauer der Wasserlagerung verliert Paraffin seine Schutzfunktion (Dunky und Niemz 2002).

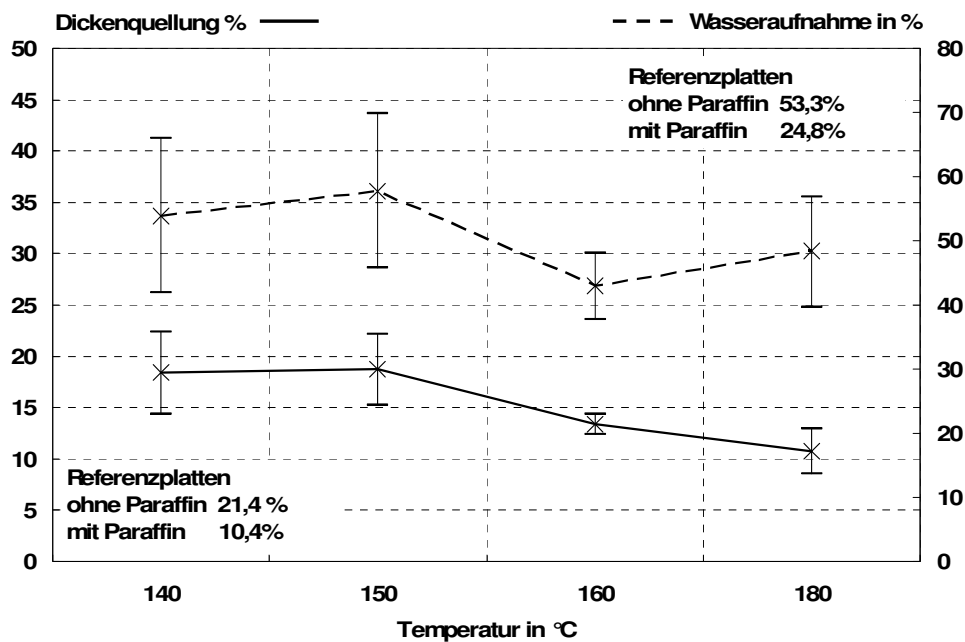


Abbildung 2: Dickenquellung und Wasseraufnahme nach 24 Stunden Wasserlagerung von OSB aus Kiefer, deren Strands bei 140°C bis 180°C in Luftatmosphäre vorbehandelt wurden.

4.3.2 Querzugfestigkeit und Biegeeigenschaften

Die Querzugfestigkeit der Referenzplatten liegt bei 1,2 bis 1,3 N/mm² (Abbildung 3); die etwas niedrigeren Werte ergeben sich für die Platten mit Paraffinzusatz. Eine mögliche Ursache könnte die etwas hydrophobere Oberfläche der Strands infolge des Paraffins sein, so dass durch die herabgesetzte Benetzbarkeit die Verteilung des Klebstoffes weniger vollständig erfolgt ist als bei den Platten ohne Paraffinzugabe. Durch die Vorbehandlung bei 140°C, 150°C sowie 180°C liegt die Querzugfestigkeit mit 1,0 bis 1,1 N/mm² unter der Referenz. Nach dem Kochtest sinkt die Querzugfestigkeit der Referenzplatten auf 0,4 bis 0,5 N/mm² ab, der niedrigere Wert wird auch hier für die paraffinierte Platte gemessen. Die Querzugfestigkeit nach Kochtest der OSB aus vorbehandelten Strands beträgt zwischen 0,5 bis 0,6 N/mm² und liegt damit über den Referenzwerten.

Die Ursache für die höheren Festigkeiten der Platten aus behandelten Strands nach Kochtest ist auf die erwähnte Abnahme der Polyosen und damit der Nachgiebigkeit des Holzes zurückzuführen. Durch die erhöhte Verdichtbarkeit des Holzes werden weniger Spannungen beim Verpressen in den Werkstoff induziert, die insbesondere bei Befeuchten freigesetzt werden und somit wesentlich zur Dickenzunahme beitragen. Durch eine reduzierte Dickenquellung wirken weniger Spannungen auf die Klebstoffverbindung, so dass die mechanische Belastung, die zu Einbußen der Klebfestigkeit führen kann, minimiert wird.

Die höhere Querkzugfestigkeit der Platten aus Strands, die bei 160°C vorbehandelt wurden, im Vergleich zu den Platten aus 180°C-Strands, lässt sich auf die beginnende thermische Zersetzung des Holzes zurückführen. Ab 180°C können im Holz exotherme Reaktionen auftreten, so dass der Substanzverlust stark zunimmt. Die damit einhergehenden Schwindkräfte führen zu Rissbildung und Stauchungen, so dass die holzeigene Festigkeit sinkt. Da die Vorbehandlung in Luftsauerstoff durchgeführt wurde, können oxidative Reaktionen in stärkerem Ausmaß stattfinden als in sauerstoffreduzierter oder inerter Atmosphäre. Nach Chow (1971) setzen Oxidationsreaktionen in Stickstoffatmosphäre erst bei höheren Temperaturen ein als in Sauerstoff. Nach Tomek (1966) beeinflusst die geringere Feuchtaufnahme hitzbehandelter Späne die Festigkeit daraus gefertigter Platten, da somit weniger Klebstoff in das Holz eindringt und damit zu einem höheren Anteil zur Festigkeit beitragen kann. In den Versuchen zur Gleichgewichtsfeuchte ist zu erkennen, dass mit einem Temperaturanstieg von 150°C auf 160°C ein deutlicher Rückgang der Feuchtaufnahme stattfindet. Allerdings überwiegt die thermische Zersetzung nach Tomek (1966) den positiven Effekt verminderter Feuchtaufnahme auf die Festigkeit ab einem gewissen Abbaugrad.

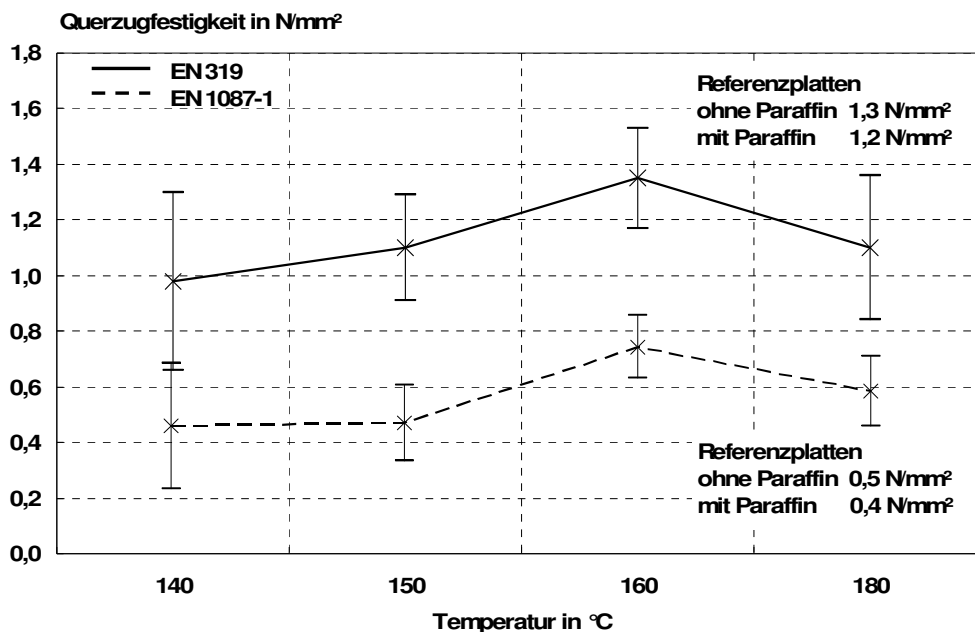


Abbildung 3: Querkzugfestigkeit vor (EN 319) und nach Kochtest (EN 1087-1) PMDI-gebundener Kiefer-OSB, deren Strands bei 140°C bis 180°C thermisch modifiziert wurden.

Im Gegensatz zur Querzugfestigkeit werden die Biegeeigenschaften durch die thermische Vorbehandlung stärker beeinflusst (Abbildung 4, Abbildung 5). Nach Vorbehandlung bei 140°C liegt die Biegefestigkeit um etwa 15% unter der Referenz ohne Paraffinzusatz (35,5 N/mm²); die Biegefestigkeit der Referenzplatte mit Paraffinzusatz fällt etwas höher aus, die Abweichung ist aber statistisch nicht signifikant. Mit Anheben der Temperatur auf 150°C sinkt die Biegefestigkeit weiter auf rund 28 N/mm². Nach Vorbehandlung bei 160°C weisen die OSB keine Abnahme gegenüber der Referenz auf, während die 180°C-Behandlung zu den größten Einbußen der Festigkeit führt. Die Abnahme der Biegefestigkeit gegenüber der Referenz beträgt etwa 30%.

Als Ursache für die relativ höhere Biegefestigkeit der 160°C-Platten im Vergleich zu den übrigen Behandlungstemperaturen, kann die reduzierte Feuchtaufnahme der Strands nach Behandlung bei 160°C angenommen werden. In Abbildung 1 wird ersichtlich, dass erst ab dieser Temperatur eine deutliche Abnahme der Feuchte erreicht wird. Tomek (1966) fand in seinen Untersuchungen über Spanplatten aus hitzevergüteten Spänen der Zerreiche (*Quercus cerris*) eine Zunahme der Biegefestigkeit um 20%. Diesen Festigkeitsanstieg gegenüber der Referenz schreibt er der herabgesetzten Feuchtaufnahme der thermisch behandelten Späne zu, in deren Folge weniger Klebstoff in die Späne eindringen kann und damit ein höherer Klebstoffanteil zur Festigkeit beiträgt.

Allerdings nimmt die holzeigene Festigkeit mit weiter voranschreitender Modifizierung ab, so dass der positive Effekt einer herabgesetzten Feuchtaufnahme auf die Verklebungseigenschaft nur zu einem gewissen Grad vorteilhaft ist (Tomek 1966). Unter den hier angewandten Versuchsbedingungen scheint dieser Abbaugrad nach Vorbehandlung bei 180°C erreicht zu sein, wobei die eigentliche Temperatur des Holzes aufgrund einsetzender exothermer Reaktion noch höher liegen kann.

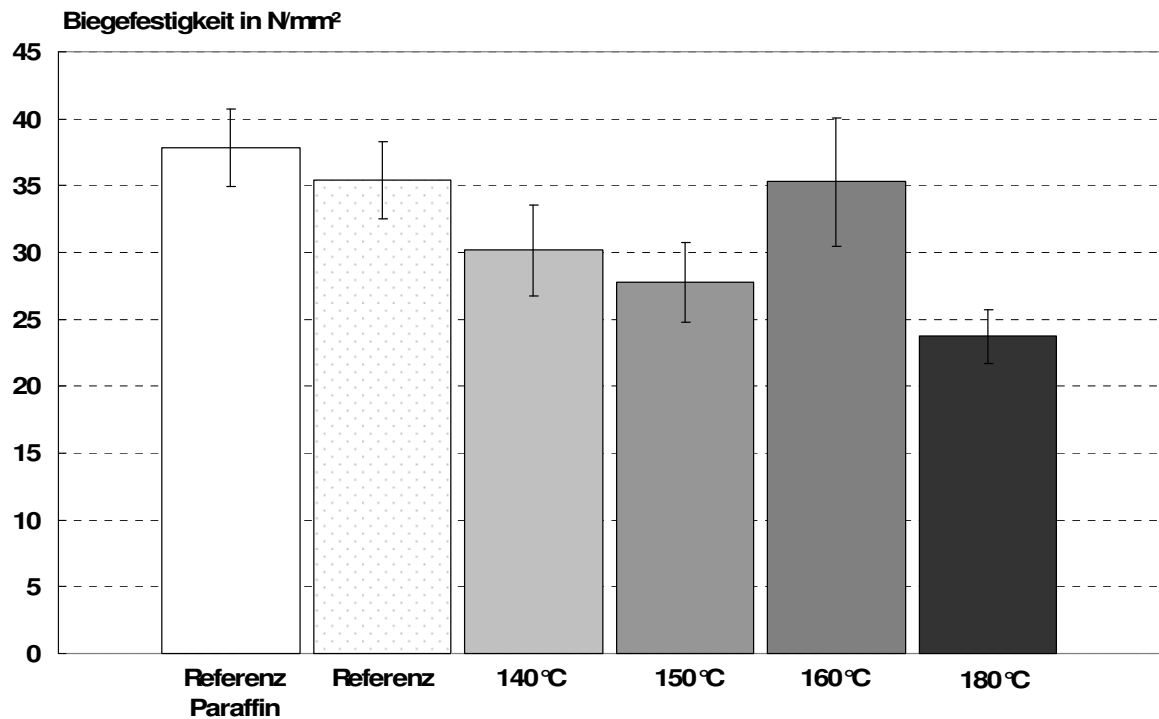


Abbildung 4: Biegefestigkeit PMDI-gebundener Kiefer-OSB, deren Strands bei 140°C bis 180°C thermisch modifiziert wurden.

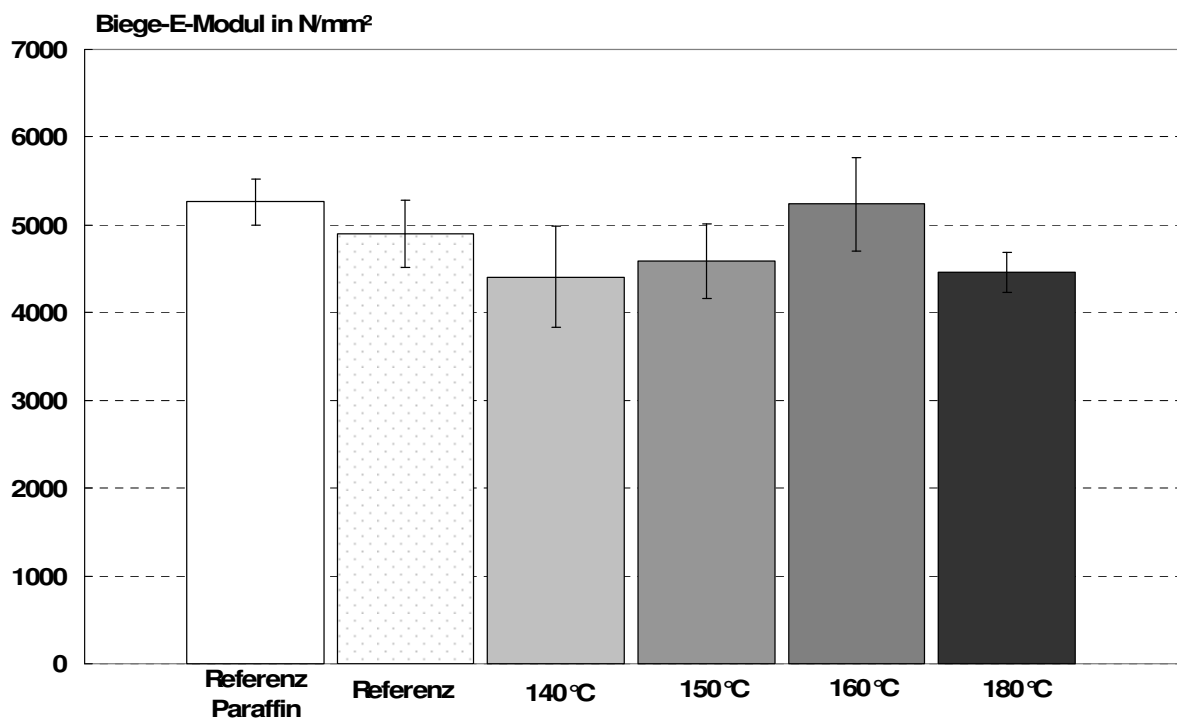


Abbildung 5: Biege-E-Modul PMDI-gebundener Kiefer-OSB, deren Strands bei 140°C bis 180°C thermisch modifiziert wurden.

4.3.3 Dauerhaftigkeit

Die biologische Resistenz wurde nach ENV 12038 während einer Inkubationszeit von 16 Wochen geprüft, die Masseverluste der Proben wurden anschließend bestimmt. Die Ergebnisse sind in Abbildung 6 dargestellt. Maßgeblich für die Bestimmung der Dauerhaftigkeit ist der höchste verursachte Masseverlust, aus dem zusammen mit dem Masseverlust der jeweiligen Messkontrolle der DSI (Decay Susceptibility Index) gebildet wird.

Der stärkste Abbau wird durch den Braunfäuleerreger *Coniophora puteana* verursacht. Nach Behandlung bei 160°C liegt der Masseverlust bei 40%; zusammen mit dem Masseverlust der Messkontrolle durch *Coniophora puteana*, ergibt sich ein DSI von 89 (vgl. Tabelle 1). Durch Vorbehandlung bei 180°C sinkt der Masseverlust durch Pilzabbau auf 25%, entsprechend nimmt der DSI auf 56 ab. Die Ergebnisse zeigen deutlich den Einfluss der Temperatur auf die Dauerhaftigkeit. Bei den Versuchen wurden nur OSB untersucht, deren Strands bei 160°C und 180°C vorbehandelt worden waren, da sich erst ab einer Behandlungstemperatur von 160°C deutliche Änderungen bezüglich der Feuchtaufnahme ergaben, woraus auf einen Abbau der Polyosen geschlossen werden kann. Durch den verstärkten Abbau der Polyosen bei 180°C, der anhand der geringen Feuchtaufnahme ersichtlich wird (Abbildung 1), nimmt auch die Resistenz gegen Pilzbefall zu.

Als mögliche Ursache gilt besonders der Abbau der Pentosane, die dem Pilz als Hauptnahrungsquelle dienen (Weiland und Guyonnet 2003). Weiterhin führt die Entstehung hydrophober Bestandteile durch Vernetzungsreaktionen von Abbauprodukten (z.B. Furfural) mit dem Lignin und der Autokondensation des Lignins nicht nur zu einer verbesserten Feuchteresistenz, sondern durch die veränderte Holzmatrix kann das enzymatische System des Pilzes das Holz nicht mehr als Substrat erkennen und abbauen (Tjeerdsma *et al.* 1998).

In Anlehnung an EN 350-1 (1994) lässt sich der DSI auch in Dauerhaftigkeitsklassen ausdrücken, wobei dies normativ nicht festgelegt ist und nur dem besseren Verständnis dient. Demnach lässt sich durch die Vorbehandlung in dieser Form maximal Dauerhaftigkeitsklasse 3 nach Behandlung bei 180°C erreichen.

Allerdings gilt es zu berücksichtigen, dass die Dauerhaftigkeit im Vergleich zur Messkontrolle bestimmt wird, die für den Braunfäuleerreger *Coniophora puteana* aus Kiefernspaltholz besteht. Die eingesetzten OSB-Strands dagegen bestehen hauptsächlich aus Kiefernherbstholz, das in seinem natürlichen Zustand bereits Dauerhaftigkeitsklasse 3 erreicht. Daher kann die bestimmte Dauerhaftigkeit nicht ausschließlich auf die thermische Modifizierung zurückgeführt werden.

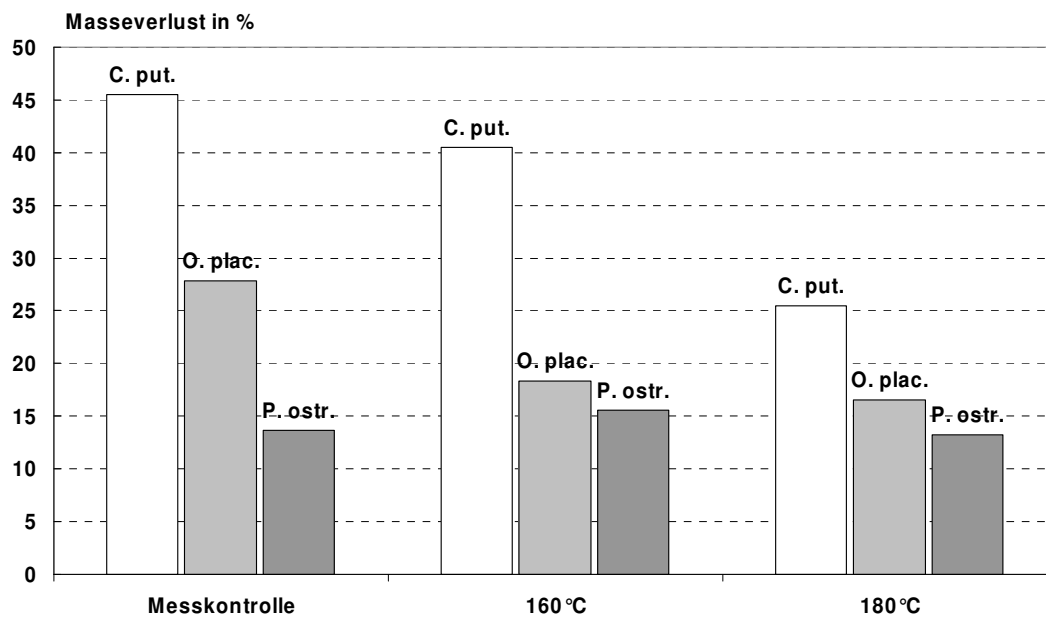


Abbildung 6: Dauerhaftigkeit gegen Pilzabbau PMDI-gebundener Kiefer-OSB, deren Strands bei 160°C und 180°C thermisch modifiziert wurden.

Tabelle 1: DSI-Werte und in Anlehnung an EN 350 entsprechende Dauerhaftigkeitsklasse PMDI-gebundener Kiefer-OSB, deren Strands bei 160°C und 180°C thermisch modifiziert wurden

Probe	DSI	Pilz	DH (Klasse)
Vorbehandlung 160°C	89,07	Cp	4
Vorbehandlung 180°C	56,08	Cp	3

4.3.4 Zusammenfassung

In Tabelle 2 sind die Ergebnisse der Vorbehandlung nach dem ersten Ansatz in einer Übersicht zusammengefasst. Mittels einer Vorbehandlung in der hier beschriebenen Form lässt sich die Feuchteaufnahme um maximal 14% und die Dickenquellung um 50% vermindern. In Abhängigkeit der Behandlungstemperatur bleibt die Querkzugfestigkeit nach EN 319 (1993) unverändert bzw. nimmt um maximal 25% ab. Nach Kochtest dagegen fällt die Abnahme deutlich geringer aus oder übersteigt die der Referenz um über 40%. Die Biegefestigkeit ist infolge der thermischen Zersetzung um ein Drittel und der Biege-E-Modul um 10% verringert. Die Dauerhaftigkeit gegen biologischen Abbau konnte leicht angehoben werden.

Tabelle 2: Relative Änderung der Eigenschaften in Prozent gegenüber der jeweiligen Referenz; Angabe der Dauerhaftigkeit (DH) gegen Pilzbefall in Anlehnung an EN 350-1

Probe	Feuchte	Dickenquellung (24 h)	Querzugfestigkeit			DH (Klasse)	
	(20°C / 65%)		nach trocken	Kochtest	MOE		MOR
140°C, PMDI	-4,5	-14,0	-24,5	-4,0	-10,0	-14,7	-
150°C, PMDI	-6,5	-12,5	-15,4	-2,0	-6,3	-21,5	-
160°C, PMDI	-9,5	-37,0	3,8	46,0	6,0	-0,4	4
180°C, PMDI	-14,0	-50,0	-15,4	18,0	-9,0	-33,0	3

Die Dickenquellung, deren Ausmaß neben der Dimensionsstabilität auch die mechanischen Festigkeiten beeinflusst und damit als entscheidende Eigenschaftsänderung betrachtet werden kann, ließ sich am effektivsten durch Vorbehandlung bei 180°C erreichen. Diesbezüglich ergaben sich aber gerade in diesem Temperaturbereich durch die Vorbehandlung in der präsentierten Form einige Schwierigkeiten. Durch die einsetzenden exothermen Reaktionen stieg die Temperatur im Spanmaterial an, so dass durch die Anwesenheit von Luftsauerstoff die Gefahr bestand, dass es zu einem Entzünden des Materials kommt. Zwar sollte durch die Abdeckung des Spanmaterials durch Aluminiumfolie sowie zusätzlichem Beschweren mittels eines Flächengewichtes der Sauerstoffzutritt unterbunden werden, aber dennoch zeigten sich am Spanmaterial Spuren lokaler Verbrennung. Als weiteren Nachteil stellte sich die Behandlung unbewegten Spanmaterials heraus. Durch die übereinander liegenden Strandschichten entsteht ein Temperaturgradient, der besonders bei höheren Temperaturen zu einer ungleichmäßigen thermischen Modifizierung führt. Daher scheint unter diesen Versuchsbedingungen eine Vorbehandlung bei 160°C vorteilhafter; die Reduzierung der Dickenquellung fällt zwar geringer aus, dafür bleiben die mechanischen Eigenschaften unverändert bzw. weisen sogar eine Verbesserung auf. Dennoch ist die Behandlungsdauer mit insgesamt 15 Stunden sehr zeitintensiv und somit für eine Umsetzung in die industrielle Praxis eher kritisch zu beurteilen.

5 Vorbehandlung in sauerstoffreduzierter Atmosphäre

Anhand der Ergebnisse zur Vorbehandlung in Luftsauerstoff konnte bereits die Möglichkeit einer effektiven Methode zur Verbesserung der Dickenquellung gezeigt werden. Wie in Abschnitt 4.3.4 bereits erwähnt, gestaltete sich aber insbesondere eine Vorbehandlung oberhalb 160°C problematisch aufgrund des Temperaturgradienten innerhalb der ruhenden Spanmasse, so dass keine gleichmäßige thermische Modifizierung gewährleistet werden konnte. Auf Grundlage dieser Erkenntnisse entstand der Ansatz zu einer Vorbehandlung in sauerstoffreduzierter Atmosphäre. Dadurch sollte nicht nur die Brandgefahr minimiert werden, sondern durch die Möglichkeit der Behandlung bei Temperaturen oberhalb 200°C auch die Behandlungsdauer drastisch gekürzt werden können. Darüber hinaus wurde die Verfahrenstechnik derart gestaltet, dass das Spangut während der Behandlung bewegt werden konnte, um eine homogene Durchwärmung zu ermöglichen.

5.1 Material und Methoden

5.1.1 Spanmaterial

Die thermische Modifizierung in Form einer Vorbehandlung wurde auf OSB-Strands und Späne der Holzarten Kiefer (*Pinus sylvestris* L.) Pappel (*Populus tremula* L.) und Fichte (*Picea abies* L.) angewandt. Die Kiefer-Strands entstammten industrieller Fertigung, die OSB-Strands aus Pappel sowie die Späne aus Kiefer bzw. Fichte wurden im Labor hergestellt. Das eingesetzte Spanmaterial war technisch bereits auf eine Feuchte von etwa 4% vorge-trocknet.

5.1.2 Klebstoffe

Als Klebstoffe wurden Melamin-Harnstoff-Phenol-Formaldehydharz (MUPF) der BASF AG (Kauratec 500), Phenol-Formaldehydharz (PF) der Bakelite AG (Bakelite PF 1279 HW) sowie polymeres Diphenylmethan-Diisocyanat (PMDI) der BAYER AG (DESMODUR® 1520 A20) eingesetzt. Der Klebstoffanteil bezogen auf trockene Spanmasse betrug bei Verwendung von MUPF 8%, bei PF 10% und für PMDI 5%. Als Härter wurden dem MUPF-Harz 3% Ammoniumnitrat und dem PF-Harz 5% Natronlauge beigemischt.

5.1.3 Thermische Modifizierung – Vorversuche

In Vorversuchen wurden zunächst kleine Mengen OSB-Strands aus Kiefer (*Pinus sylvestris* L.) und Pappel (*Populus tremula* L.) bei unterschiedlichen Temperaturen (180, 200, 220, 240°C) und Behandlungszeiten (30, 60, 90 Minuten) in sauerstoffreduzierter Atmosphäre thermisch

modifiziert. Die Eigenschaftsänderungen (Masseabnahme, Feuchteaufnahme, Dauerhaftigkeit) sowie die Änderung der chemischen Zusammensetzung und deren Auswirkung auf physikalische Eigenschaften wurden mittels geeigneter Verfahren untersucht. Dadurch lassen sich entscheidende Aussagen über das Materialverhalten bei der Herstellung der Platten sowie die Eigenschaften des späteren Werkstoffes treffen. Die Ergebnisse wurden in Zusammenhang gestellt, um optimale Prozessbedingungen für die Umsetzung des Verfahrens in einen größeren Maßstab zu finden. Die Prüfmethoden sind nachstehend aufgeführt.

5.1.3.1 Masseabnahme

Die anhand der Vorversuche gefundenen Verfahrensparameter resultierten unter konstanten Prozessbedingungen in einer für Behandlungstemperatur und –dauer spezifischen Masseabnahme. Um den Grad der Modifizierung festzustellen, wurde daher die Masseabnahme als Maßgröße herangezogen. Unter Berücksichtigung des Feuchtegehaltes vor und nach thermischer Modifizierung wurde die Masseabnahme gravimetrisch bestimmt.

5.1.3.2 Feuchtegehalt

Die Gleichgewichtsfeuchte der Strands aus den Vorversuchen sowie unbehandelte Referenzproben wurde bei 20°C und 65% r. Lf. mittels Darrmethode gravimetrisch nach EN 322 (1993) bestimmt.

5.1.3.3 Dauerhaftigkeit

Die Resistenz gegen Pilzbefall vorbehandelter sowie unbehandelter Proben wurde an OSB-Strands aus Kiefer nach EN 350-1 (1994) geprüft. Hierzu wurden einzelne Strands wie in Abbildung 7 dargestellt mittels Teflonband gebündelt. Nach Bestimmen der anfänglichen Trockenmasse wurden die Proben bis zur Gewichtskonstanz bei 20°C und 65% r. Lf. klimatisiert und anschließend sterilisiert. Als Prüfpilze wurden der Braunfäuleerreger *Poria placenta* sowie der Weißfäuleerreger *Coriolus versicolor* eingesetzt. Das Nährmedium wurde aus 4% Malz und 2% Agar hergestellt. Zur Überprüfung der Virulenz wurden Proben aus Kiefern-splintholz mit einer Querschnittsfläche von 30 x 30 mm² und einer Länge von 5 mm verwendet. Nach achtwöchiger Inkubationszeit wurden die Proben gedarrt und der Masseverlust festgestellt. Gemäß EN 350-1 (1994) (Tabelle 3) wurden die Proben nach ihrer Dauerhaftigkeit klassifiziert. Der x-Wert entspricht dem Quotienten aus Masseverlust der OSB-Strands und Masseverlust der Kontrollproben.

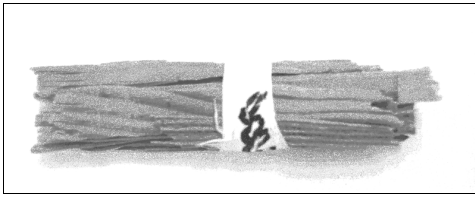


Abbildung 7: Mittels Teflonband gebündelte OSB-Strands aus Kiefer zur Prüfung der Dauerhaftigkeit nach EN 350.

Tabelle 3: Einteilung in Dauerhaftigkeitsklassen nach EN 350 (1994)

Dauerhaftigkeitsklasse	Beschreibung	x-Wert
1	Sehr dauerhaft	$x \leq 0,15$
2	Dauerhaft	$0,15 \leq x \leq 0,30$
3	Mäßig dauerhaft	$0,30 \leq x \leq 0,60$
4	Gering dauerhaft	$0,60 \leq x \leq 0,90$
5	Nicht dauerhaft	$x > 0,90$

5.1.3.4 pH-Wert und Pufferkapazität

Zur Bestimmung des pH-Wertes wurden zunächst etwa 5 g Probenmaterial in einer Schwingmühle der Firma Herzog fein gemahlen. Anschließend wurde das Holzmehl zusammen mit 150 ml destilliertem Wasser in einen 300 ml Erlenmeyerkolben gefüllt und für 24 Stunden auf einem Rütteltisch extrahiert. Nach anschließendem abfiltrieren wurden 20 ml des Filtrats in ein Becherglas pipettiert und der pH-Wert dieser Lösung mittels pH-Elektrode gemessen, der Ablesezeitpunkt mit zwei Minuten nach Eintauchen der Elektrode festgesetzt. Durch Titration der Lösung gegen 0,01 mol/l NaOH (Titrisol) bis pH 7 wurde die Pufferkapazität bestimmt.

5.1.3.5 High Performance Liquid Chromatography

Mittels High Performance Liquid Chromatography (HPLC) erfolgte die Zuckerbestimmung der Proben in unbehandeltem Zustand sowie nach Vorbehandlung. Vor der chromatographischen Untersuchung wurden die Proben durch eine zweistufige Hydrolyse aufgeschlossen. Hierzu wurde das Probenmaterial zunächst mittels einer Schwingmühle (Fabrikat Herzog) fein gemahlen. Zur Vorhydrolyse wurden 200 (± 10) mg (atro) des Stoffes mit 72%iger Schwefelsäure (H_2SO_4) versetzt und eine Stunde bei 30°C in einem Thermostaten unter Rühren hydrolysiert. Nach Ablauf der Zeit wurde die Vorhydrolyse durch Zugabe von 6 ml

destilliertem Wasser abgebrochen. Anschließend wurde die Probe mit 50 ml destilliertem Wasser in einen 100 ml Messkolben überführt und mit einer Glaskugel als Kühler verschlossen. Die auf diese Weise vorbehandelte Probe wurde in einem Autoklaven für 40 Minuten bei 120°C unter Druck nachhydrolysiert. Nach dem Abkühlen wurde der Messkolben bis zum Eichstrich aufgefüllt, geschüttelt und das kondensierte Lignin als Hydrolyserückstand auf einer G4-Fritte abfiltriert. Von dem Filtrat wurde etwa 1 ml für die Zuckeranalytik entnommen, der Hydrolyserückstand intensiv mit destilliertem Wasser gewaschen, bei 105°C getrocknet und gravimetrisch bestimmt. Als stationäre Phase für die HPLC wurde ein starkes Anionenaustauscherharz MCI Gel CA08F (Mitsubishi), gepackt in Omnifit Leersäule 7 x 11,5 mm (60°C), verwendet. Als mobile Phase wurde Kaliumtetraborat eingesetzt, das sich als Gradientenelution über die Retentionszeit von 47 Minuten mit 0,7 ml / min aus 0,3 M Kaliumtetraborat (A) und 0,9 M Kaliumtetraborat (B) zusammensetzte; zum Zeitpunkt 0 betrug das Verhältnis A:B 90%:10%, nach 35 Minuten 10%:90%.

5.1.3.6 Kontaktwinkelmessung

Die Messung des Kontaktwinkels gibt Aufschluss über die Oberflächenbeschaffenheit eines Stoffes hinsichtlich seiner Benetzbarkeit durch Flüssigkeiten. Die Benetzbarkeit ist umso unvollständiger, je größer der Kontaktwinkel wird, das bedeutet bei Holzoberflächen eine Zunahme der Hydrophobie. Anhand der Messergebnisse lassen sich Rückschlüsse über das Fließverhalten und damit die Verteilung von Klebstoffen ziehen, wovon die Verklebungsgüte und damit mechanische Eigenschaften des Werkstoffes abhängen. Zur Bestimmung des Kontaktwinkels stand ein Kontaktwinkelmessgerät G 1 der Firma ERMA Optical Limited Tokio zur Verfügung. Mittels einer Mikrobürette wurde ein Tropfen destillierten Wassers definierter Größe auf die Probe aufgegeben und der Kontaktwinkel nach Fokussierung direkt an der Goniometerskala nach einer Minute abgelesen. Bei den Referenzproben aus Pappel wurde der Ablesezeitpunkt auf 30 Sekunden herabgesetzt, da die Wasseraufnahmegeschwindigkeit sehr hoch war. Für jede Probe wurden 10 Messungen an einzelnen, klimatisierten Strands bzw. Spänen durchgeführt, die Messung der Kontaktwinkel fand in Normklima bei 20°C und 65% r. Lf. statt.

5.1.3.7 Electron Spectroscopy for Chemical Analysis

Electron Spectroscopy for Chemical Analysis (ESCA) ist eine Methode zur Oberflächenanalyse, die Informationen über die Elementzusammensetzung bis eine Tiefe zwischen 2 und 4 nm sowie über den chemischen Bindungszustand der Elemente liefert. Zusammen mit den Ergebnissen aus der Kontaktwinkelmessung diente diese Methode dazu, Aussagen

über die Oberflächenbeschaffenheit thermisch modifizierten Spanmaterials im Vergleich zu unbehandelten Referenzen zu treffen, um Einflüsse auf die Verklebungsqualität und damit Eigenschaften des Plattenwerkstoffes zu erklären. Das Messprinzip beruht auf dem Photoeffekt. Durch Anregung mit Photonen durch Röntgenstrahlung werden aus Atomen, Molekülen oder Festkörpern Elektronen herausgelöst, deren kinetische Energie bestimmt wird. Daraus lässt sich die charakteristische Bindungsenergie der jeweiligen Moleküle bestimmen. Die ESCA-Messung erfolgte bei der BASF AG in Ludwigshafen an Bruchstücken der Strands bzw. Späne unbehandelter Referenzen sowie vorbehandelter Proben. Die ESCA-Spektren wurden quantitativ aus zwei Messungen je Probe auf einer Analysefläche von etwa 0,5 mm² ausgewertet.

5.1.4 Thermische Modifizierung

Die thermische Modifizierung des vorgetrockneten Spanmaterials erfolgte durch einen einstufigen Prozess in einer trockenen und sauerstoffreduzierten Atmosphäre. Die Sauerstoffreduktion konnte durch zeitweises Einsprühen von Wasserdampf sowie durch die freiwerdenden gasförmigen Reaktionsprodukte während des Prozessverlaufes erreicht werden. Mittels des Sauerstoffmeßsystems MF010-O-LC der Firma J. Dittrich Elektronik GmbH & Co. KG wurde ein Sauerstoffgehalt während des laufenden Prozesses von etwa 13 bis 15% gemessen. Um eine homogene Modifizierung des Spanmaterials zu gewährleisten, wurde die Vorbehandlung in einem eigens für den Labormaßstab gebauten Trommel-trockner durchgeführt mit einem Volumen von etwa. Die Trommel wurde durch einen zentriert angebrachten Heizstab beheizt, die Wärmeübertragung auf das Spanmaterial erfolgte sowohl konvektiv durch die aufgeheizte Prozessatmosphäre als auch konduktiv durch die Innenwände der Trommel aus Aluminium und durch das Spanmaterial selbst. Die thermische Modifizierung erfolgte für zwei Temperaturstufen, 220°C für eine Dauer von 30 Minuten und 240°C für 10 Minuten, kontrolliert durch Thermoelemente. Der Grad der thermischen Modifizierung wurde anhand der temperaturspezifischen Masseabnahme festgestellt, die durch die Vorversuche ermittelt wurde. Pro Vorbehandlung wurden etwa 4 kg Spanmaterial modifiziert. Nach Ablauf der Behandlungszeit wurde das Material durch Einsprühen von Wasserdampf rasch auf unter 200°C abgekühlt und der Trommel entnommen. Um eventuelle Schwankungen in der Masseabnahme der einzelnen Chargen auszugleichen, wurde das vorbehandelte Spanmaterial miteinander vermischt und in verschlossenen Plastiksäcken bis zur Weiterverarbeitung gelagert.

5.1.5 Herstellung der Laborplatten

Aufgrund der Nachzerkleinerung der OSB-Strands aus Kiefer durch den Modifizierungsprozess, wurden vor dem Beleimen die vorbehandelten sowie unbehandelten Strands zunächst gesiebt, um den Feinanteil kleiner 3 mm zu entfernen. Dieser Anteil betrug für die vorbehandelten Strands etwa 10% und für die unbehandelten Strands 3%. Die Beleimung der Strands und Späne (nachfolgend Spanmaterial) erfolgte in einem Mischer der Firma Lödige, das Bindemittel wurde unter Luftdruck über eine Zweistoffdüse auf das Spanmaterial aufgebracht. Durch Umwälzen mittels Schaufeln konnte eine gleichmäßige Bindemittelverteilung erreicht werden. Um eine Nachzerkleinerung der Strands möglichst gering zu halten, wurde eine Drehzahl von 28 min^{-1} gewählt, beim Beleimen der Späne konnte die Drehzahl erhöht werden. Die Beleimung erfolgte zweistufig; zuerst wurde Wasser, danach das jeweilige Klebstoffsystem in die Beleimtrommel eingedüst. Die Feuchte des Spanmaterials wurde durch die Beleimung auf 10% eingestellt. Das beleimte Spanmaterial wurde manuell in einen Streurahmen auf das Pressblech verteilt, wodurch sich bei den OSB-Strands keine Orientierung erreichen ließ. Nach manueller Vorverdichtung wurden die Platten in einer Laborpresse der Firma Siempelkamp verpresst, die Heizplattentemperatur betrug 220°C . Sämtliche Platten wurden mit einem Presszeitfaktor (PZF) von 12 sec/mm auf eine Plattendicke von 16 mm bei einer angestrebten Plattenrohichte von 620 kg/m^3 (atro) verpresst. Nach dem Pressen wurden die Platten zum Abkühlen bei Raumtemperatur aufrecht gelagert. Bei Verleimung mit PF wurden die Platten in einer isolierten Kiste für 24 Stunden zum Nachreifen bzw. vollständigen Aushärten gelagert.

5.2 Ergebnisse und Diskussion der Vorversuche

Die Vorversuche zur thermischen Modifizierung von Strands aus Kiefer (*Pinus sylvestris* L.) bei 180°C bis 240°C für eine Gesamtdauer von 30, 60 und 90 Minuten, werden in diesem Abschnitt vorgestellt und diskutiert. Anhand der Ergebnisse sollten optimale Prozessparameter gefunden werden, um das Verfahren auf andere Holzarten – Fichte (*Picea abies*) und Pappel (*Populus tremula*) – sowie größere Mengen Spanmaterial zur Herstellung von Platten anzuwenden.

5.2.1 Masseabnahme

Als Zielgröße für die Behandlung wird die Masseabnahme als Maß für den Modifikationsgrad herangezogen. In Abhängigkeit der Behandlungstemperatur und –dauer ergeben sich für die einzelnen Behandlungsstufen unterschiedliche Masseabnahmen (Abbildung 8). Die in der Abbildung aufgezeigte Behandlungsdauer bezieht sich auf die effektive Verweilzeit des Spanmaterials nach Erreichen der jeweiligen Zieltemperatur, bestimmt mittels Thermoelementen. Bei 180°C und einer maximalen Gesamtdauer von 90 Minuten wird eine Masseabnahme von 0,85% erreicht. Mit Anheben der Temperatur auf 200°C steigt die Masseabnahme nach 30minütiger Behandlung auf 0,5% und nach 90 Minuten auf maximal 2%. Bei 220°C Behandlungstemperatur reicht die Masseabnahme von 2% nach 30 Minuten bis 6,5% nach 90 Minuten. Der Anstieg auf 240°C resultiert in einer maximalen Masseabnahme von etwa 14% nach 90 Minuten Gesamtdauer der Behandlung.

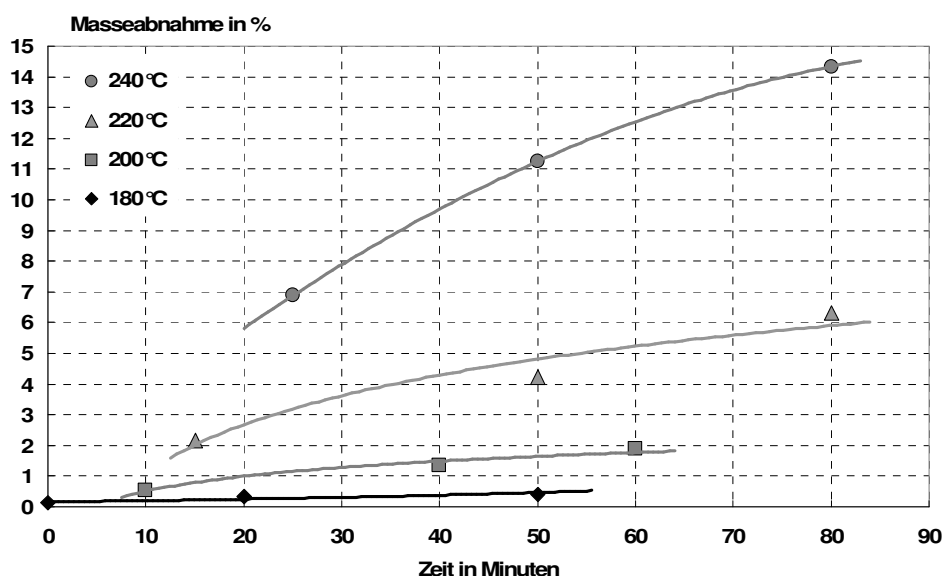


Abbildung 8: Masseabnahme von Kiefern-Strands durch thermische Modifizierung bei Temperaturen von 180°C bis 240°C in Abhängigkeit der Behandlungsdauer.

Die Masseabnahme durch thermische Zersetzung im Laufe der Modifizierung nimmt deutlich mit steigender Temperatur zu (Abbildung 8). Der Einfluss der Behandlungsdauer auf die Masseabnahme wird mit steigender Temperatur größer. Bei 180°C hat ein Anstieg der Behandlungsdauer nur einen geringen Einfluss auf die Masseabnahme. Wurde die Temperatur um 20°C angehoben, zeigt sich bereits ein deutlicher Einfluss auf die resultierende Masseabnahme bei Verlängerung der Behandlungszeit. Das bedeutet, eine Verlängerung der Behandlungsdauer resultiert bei hohen Temperaturen in stärkeren Masseabnahmen. Dieses Erkenntnis deckt sich mit Ergebnissen von Burmester (1970). Aus seiner Arbeit geht hervor, dass der Einfluss der Temperatur auf den Grad der Modifizierung gegenüber der Zeit übersteigt. Den größeren Einfluss der Temperatur gegenüber der Behandlungsdauer fanden auch Chow (1971) und Mazela *et al.* (2004). Eine Hitzebehandlung bei niedrigeren Temperaturen, aber längerer Dauer, kompensiert nicht den Modifikationsgrad höherer Temperaturen. In sauerstoffreduzierter Atmosphäre, wie in diesem Fall, kann davon ausgegangen werden, dass die Masseabnahme als Maß für den Grad der Modifikation für jede Temperatur ein konstantes Niveau erreichen wird. Der Abbau der Polyosen setzt ab 200°C ein (Byrne und Nagle 1997), erkennbar am deutlichen Anstieg der Masseabnahme gegenüber der Behandlung bei 180°C. Durch den herabgesetzten Sauerstoffanteil lassen sich oxidative Reaktionen vernachlässigen, so dass aus einer effektiven Behandlung von 50 Minuten bei 180°C nur geringe Masseabnahmen resultieren.

5.2.2 Gleichgewichtsfeuchte

Die Gleichgewichtsfeuchte nach Konditionierung bei 20°C und 65% r. LF. ist in Abbildung 9 dargestellt. Um den Zusammenhang zwischen Masseabnahme durch thermische Modifizierung und resultierender Gleichgewichtsfeuchte zu bewerten, wird die Gleichgewichtsfeuchte gegen die Masseabnahme nach Abbildung 8 aufgetragen. Die in Abbildung 9 dargestellten Messpunkte entsprechen somit den unterschiedlichen Behandlungsstufen bei den jeweiligen Temperaturen und der Dauer von 30, 60 bzw. 90 Minuten. Steigende Masseabnahme korrespondiert mit abnehmender Gleichgewichtsfeuchte. Unbehandelte Referenzproben erreichen eine Gleichgewichtsfeuchte von 9,5%. Durch die thermische Modifizierung sinkt die Gleichgewichtsfeuchte aufgrund der Abnahme frei zugänglicher Hydroxylgruppen (Tjeerdsma und Militz 2005). Dabei erreicht die Gleichgewichtsfeuchte mit steigender Masseabnahme ein konstantes Niveau von 5,5% bis 6,5%. Dieser Level wird ab einer thermisch bedingten Masseabnahme von etwa 6% erreicht, unabhängig der Behandlungstemperaturen. Eine höhere Masseabnahme durch längere Behandlungszeiten hat keine weitere Auswirkung auf die Gleichgewichtsfeuchte.

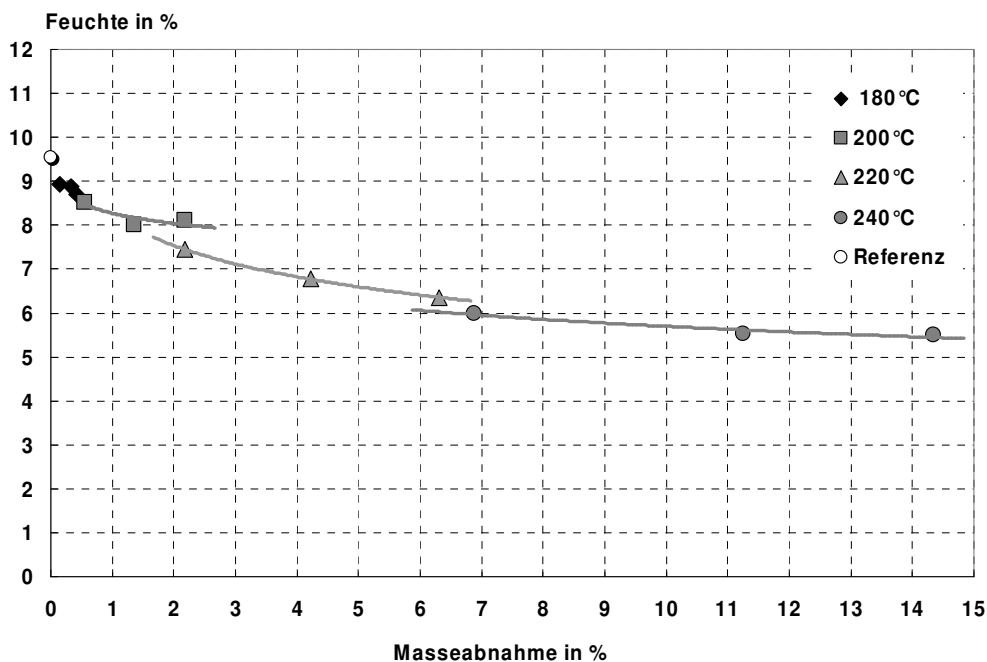


Abbildung 9: Gleichgewichtsfeuchte bei 20°C und 65% r. Lf. von Kiefer-Strands in Abhängigkeit der Masseabnahme infolge thermischer Modifizierung gemäß Abbildung 8.

Diese Ergebnisse belegen, dass der Abbau der Polyosen stärker durch die Temperatur als durch die Dauer der Behandlung bewirkt wird. Von der Annäherung der Gleichgewichtsfeuchte auf einen konstanten Wert kann darauf geschlossen werden, bei welcher Masseabnahme der Abbau freier Hydroxylgruppen abgeschlossen ist. Stärkere Masseabnahmen bei höheren Temperaturen und Behandlungszeiten resultieren aus der beginnenden Zersetzung der Cellulose, die in trockener Atmosphäre bei 240°C einsetzt (Byrne und Nagle 1997). Der Beitrag der Cellulose an der Sorption bleibt auf ihre amorphe Bereiche begrenzt. Somit bleiben höhere Masseabnahmen ohne Effekt auf weiter als das konstante Niveau herabgesetzte Gleichgewichtsfeuchten.

Der vorgestellte Zusammenhang zwischen Masseabnahme und reduzierter Gleichgewichtsfeuchte lässt sich auf jeden Prozess zur thermischen Modifizierung übertragen. Jedoch gilt zu beachten, dass das Ausmaß der Modifizierung, angezeigt durch die Masseabnahme, nicht nur von der Temperatur abhängt, sondern auch von Prozessgas, Atmosphäre und Druck. Buro (1954) untersuchte den Einfluss des Prozessgases auf die Sorptionsänderung hitzebehandelter Kiefer. Die Behandlung wurde sowohl in Luftsauerstoff als auch in Stickstoff durchgeführt. Bei gleicher Temperatur führte eine Behandlung in Stickstoff zu einer geringeren Verbesserung des Sorptionsverhaltens; in Bezug auf die erreichte Masseabnahme war

der Effekt einer Behandlung in Stickstoff jedoch größer. Auch Chow (1971) konnte in seinen Untersuchungen zeigen, dass die thermische Zersetzung von Holz in Luftatmosphäre früher einsetzt als in Stickstoff.

5.2.3 Dauerhaftigkeit

Die Ergebnisse zur Prüfung der Pilzresistenz sind in Abbildung 10 abgebildet. Der dargestellte Masseverlust resultiert aus den Ergebnissen mit dem Braunfäulepilz *Poria placenta* nach achtwöchiger Befallszeit. Die Versuchsergebnisse mit dem Weißfäuleerreger *Coriolus versicolor* wurden hierbei nicht in Betracht gezogen, da die resultierenden Masseverluste sowohl der Kontrolle als auch der thermisch behandelten Strands geringer waren als durch *Poria placenta*. Die Beurteilung der Resistenz gegen biologischen Abbau und damit die Einteilung in Dauerhaftigkeitsklassen gemäß EN 350-1 (1994) (vgl. Tabelle 3) erfolgt anhand des Prüfpilzes, der den stärksten Holzabbau verursacht. In Abbildung 10 ist der Masseverlust durch Pilzabbau gegen die Masseabnahme durch thermische Modifizierung aufgetragen. Die Messpunkte entsprechen den Masseabnahmen für die jeweilige Behandlungstemperatur, wie in Abbildung 8 dargestellt. Die entsprechende Dauerhaftigkeitsklasse ist in dem Diagramm angegeben, wobei nur die Proben gekennzeichnet sind, deren Dauerhaftigkeit Klasse 3 und besser entspricht.

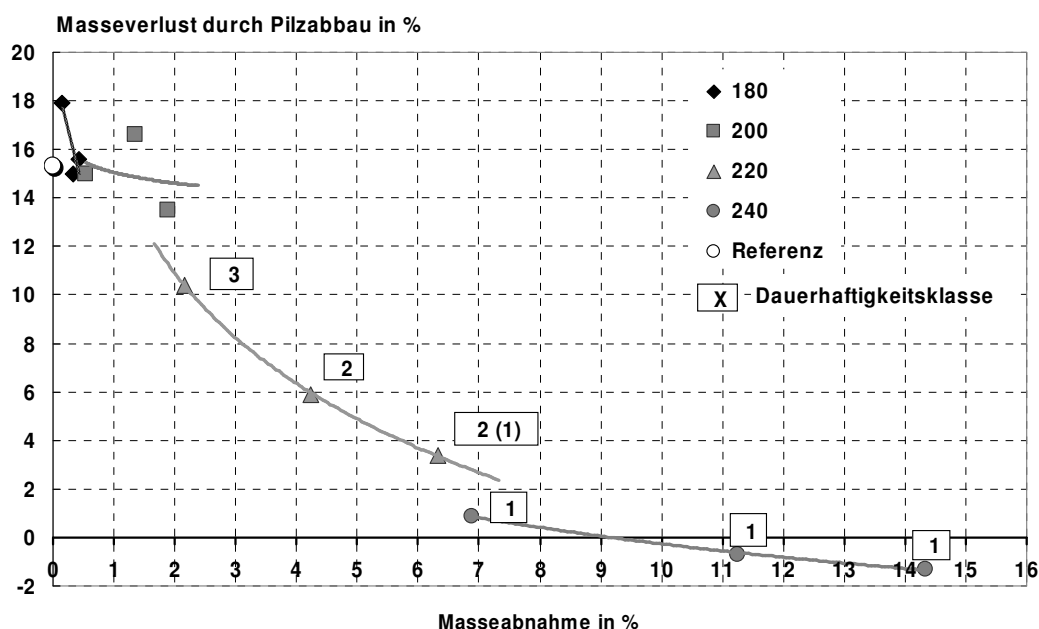


Abbildung 10: Masseverlust von Kiefern-Strands durch Pilzabbau (*Poria placenta*) in Abhängigkeit der Masseabnahme durch thermische Modifizierung gemäß Abbildung 8.

Anhand der Ergebnisse ist der Zusammenhang steigender Masseabnahme durch thermische Modifizierung und resultierende Zunahme der Pilzresistenz deutlich zu erkennen. Die unbehandelte Referenzprobe war mit einem Masseverlust von 15% nicht dauerhaft gegen *Poria placenta*. Eine thermische Modifizierung bei 180 und 200°C resultierte in maximalen Masseabnahmen durch die Behandlung von 2% und einem Masseverlust durch den Prüfpilz von 14% (nicht dauerhaft). Daraus folgt, dass eine thermische Modifizierung unter den hier angewandten Bedingungen für Temperaturen von 200°C und niedriger keinen Einfluss auf eine verbesserte Pilzresistenz hat.

Diese Erkenntnis stimmt mit den Ergebnissen der Arbeit von Mazela *et al.* (2004) überein. In ihren Untersuchungen über die Dauerhaftigkeit von Kiefernspiltholz infolge thermischer Behandlung konnten sie keine Verbesserung der Pilzresistenz feststellen, wenn die Temperatur weniger als 200°C betrug. Mazela *et al.* (2004) gehen davon aus, dass im Verlauf des Kohlenhydratabbaus durch Polymerisation Dextrin und andere verzweigte Kohlenhydrate gebildet werden. Nach Highley (1987) können solche Kohlenhydrate leichter durch den Pilz abgebaut werden.

Ein Anheben der Behandlungstemperatur resultiert in erhöhter Dauerhaftigkeit gegen Pilzbefall; dies konnte auch von Mazela *et al.* (2004) gefunden werden. Eine effektive Vorbehandlung bei 220°C für 15 Minuten resultiert in einer Masseabnahme von 2%, wie bei 200°C erst nach 60 Minuten (Abbildung 8). Trotz der gleichen Masseabnahme führt eine Vorbehandlung bei 220°C bereits zu einer Steigerung der Pilzresistenz. Der Masseverlust erreicht 10% und die Probe entspricht somit bereits Dauerhaftigkeitsklasse 3. Die Zersetzung der Polyosen geht bei Temperaturen oberhalb 200°C unter anderem mit der Bildung von Furfural einher. Nach Kamdem *et al.* (2000) sowie Mazela *et al.* (2004) können daraus toxische Nebenprodukte entstehen, die sich auf die Pilzresistenz auswirken.

Aus diesem Vergleich wird ersichtlich, dass sich der Vergütungseffekt nicht durch längere Behandlungszeiten bei geringeren Temperaturen kompensieren lässt, wie bereits erwähnt und durch Burmester (1970), Chow (1971) sowie Mazela *et al.* (2004) berichtet. Weiterhin zeigten die Ergebnisse, dass eine Behandlung bei Temperaturen über 200°C notwendig wird, um eine vergütende Wirkung zu erreichen. Dies wird durch Jämsä und Viitaniemi (2001) bestätigt, wonach eine erhöhte Pilzresistenz Temperaturen von mindestens 220°C erfordert. Eine Masseabnahme von etwa 4% durch eine Behandlung bei 220°C korrespondierte mit Dauerhaftigkeitsklasse 2 mit einem Masseverlust durch Abbau von 6%. Dauerhaftigkeitsklassen zwischen 1 und 2 entsprechen einer Masseabnahme durch Modifizierung von 6%. Die thermische Behandlung bei 240°C resultierte für alle Proben in Dauer-

haftigkeitsklasse 1. Der Masseverlust durch *Poria placenta* lag bei weniger als 2%. Die negativen Masseverluste nach Pilzbefall sind auf Zucker zurückzuführen, die durch das Pilzmycel aus dem Malzagar in das Holz eingetragen werden (Miller und Blum 1960). Nach Kennedy (1958) kann diese Massezunahme einen Anteil von bis zu 2% an der Masse des Probestkörpers betragen.

Nach den vorstehenden Ergebnissen korrespondiert eine erhöhte Masseabnahme durch thermische Modifizierung sowohl mit herabgesetzter Gleichgewichtsfeuchte als auch mit erhöhter Pilzresistenz. Daher lässt sich auf eine Korrelation zwischen reduzierter Gleichgewichtsfeuchte und verbesserter Pilzresistenz schließen. In Abbildung 11 ist der Masseverlust durch Pilzbefall gegen die Gleichgewichtsfeuchte nach Abbildung 9 aufgetragen. Demnach steht einer Gleichgewichtsfeuchte von etwa 7% Pilzresistenz gemäß Dauerhaftigkeitsklasse 2 gegenüber. In Abbildung 9 konnte gezeigt werden, dass die Gleichgewichtsfeuchte ein konstantes Niveau bei 6% erreicht, unabhängig der angewandten Temperatur und Behandlungsdauer. Somit markiert das Erreichen eines konstanten Wertes der Gleichgewichtsfeuchte verbesserte Resistenz gegen biologischen Abbau. Der Zusammenhang zwischen Gleichgewichtsfeuchte und Pilzresistenz als Maß für den Grad der Modifizierung ist geeigneter als nur die Masseabnahme zu bestimmen.

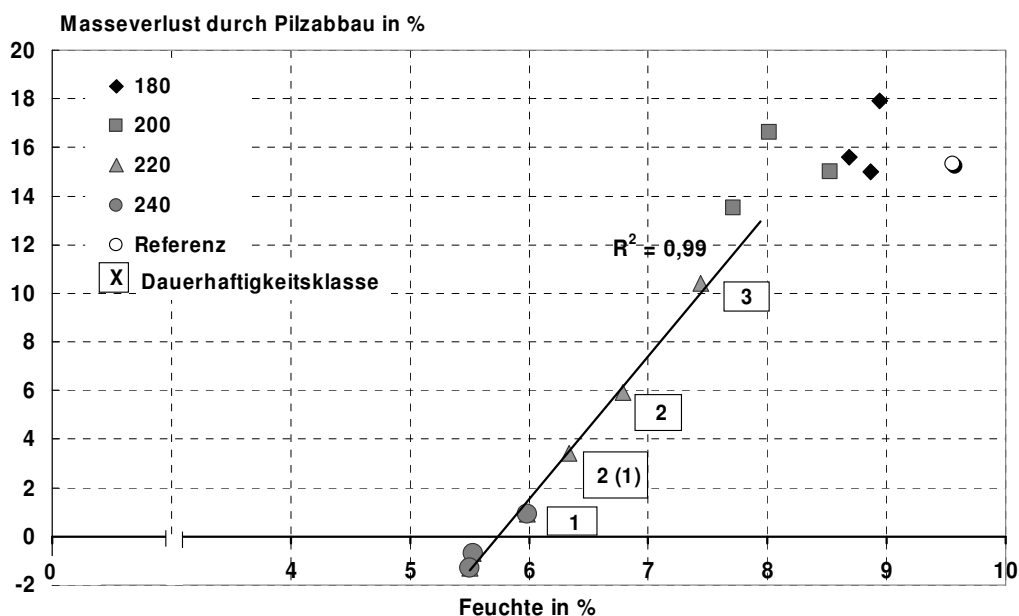


Abbildung 11: Masseverlust von Kiefern-Strands durch Pilzabbau (*Poria placenta*) in Abhängigkeit der Gleichgewichtsfeuchte bei 20°C / 65% gemäß Abbildung 9.

Mit Hilfe der gefundenen Zusammenhänge zwischen reduzierter Gleichgewichtsfeuchte und erhöhter Pilzresistenz wurden entsprechend für die Holzart Pappel (*Populus tremula*) die geeigneten Behandlungsparameter bestimmt. Die thermische Modifizierung wurde für Temperaturen zwischen 200°C und 240°C für effektive Behandlungszeiten von 10, 20 und 30 Minuten durchgeführt. In Abbildung 12 ist die Masseabnahme infolge der Vorbehandlung gegen die Zeit aufgetragen. Mit steigender Temperatur und Behandlungsdauer fiel die Masseabnahme höher aus. Nach maximaler Behandlungsdauer von 30 Minuten ergaben sich Masseabnahmen zwischen 2% bei 200°C und 11% bei 240°C.

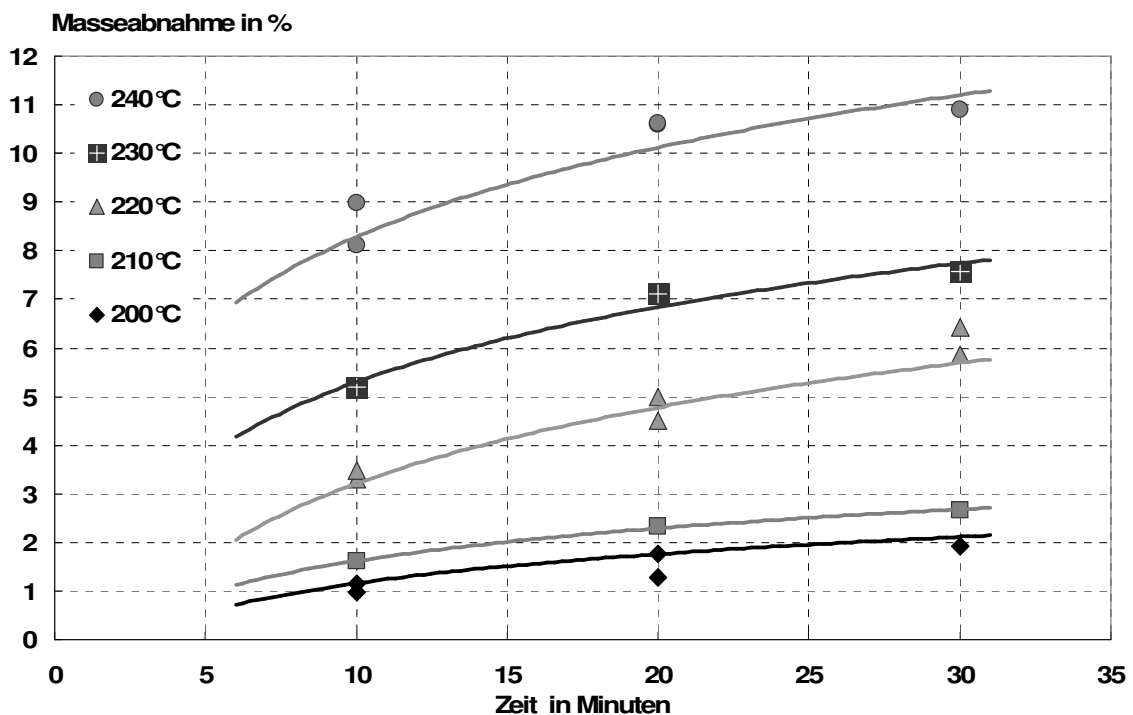


Abbildung 12: Masseabnahme von Pappel-Strands durch thermische Modifizierung bei 200°C bis 240°C in Abhängigkeit der Behandlungsdauer.

Die Gleichgewichtsfeuchte für die jeweiligen Behandlungstemperaturen ist in Abhängigkeit der resultierenden Masseabnahmen in Abbildung 13 dargestellt. Die unbehandelte Referenz erreichte eine Ausgleichsfeuchte bei 20°C und 65% r. Lf. von 8,5%. Eine Behandlung bei 200°C und einer Masseabnahme von 2% reduzierte die Gleichgewichtsfeuchte auf etwa 6%. Mit steigender Behandlungstemperatur und dementsprechend wachsender Masseabnahme verringerte sich die Gleichgewichtsfeuchte auf ein Minimum von etwa 4,5%. Dieser Wert markiert den Beginn des oben erwähnten Erreichens einer konstanten Ausgleichsfeuchte. Daraus folgt, dass ab einer thermisch bedingten Masseabnahme von 6 - 7% von erhöhter Pilzresistenz ausgegangen werden kann.

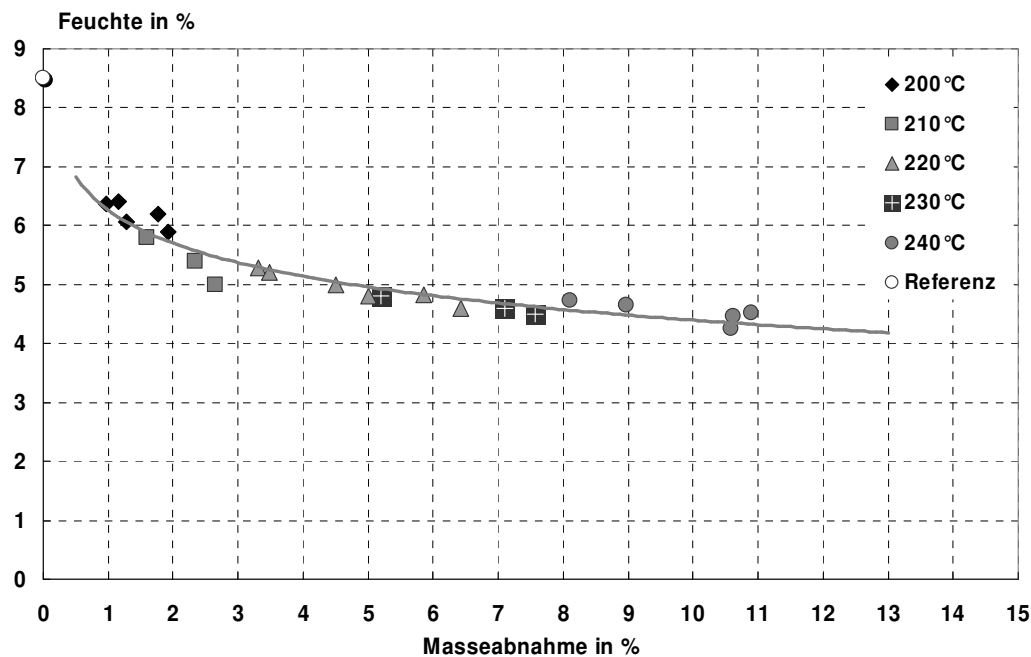


Abbildung 13: Gleichgewichtsfeuchte bei 20°C / 65% von Pappel-Strands in Abhängigkeit der Masseabnahme durch thermische Modifizierung gemäß Abbildung 12.

5.2.4 Chemische Charakterisierung und Oberflächeneigenschaften

Die Wirkung einer thermischen Modifizierung auf die chemische Zusammensetzung lässt sich durch geeignete Methoden nachweisen. Mittels HPLC, Kontaktwinkelmessung und ESCA konnten die chemischen Veränderungen der Strands und Späne sowie damit zusammenhängende Eigenschaftsänderungen dokumentiert werden. Die in diesem Abschnitt vorgestellten Ergebnisse liefern die Erklärungsgrundlage für veränderte physikalische und mechanische Platteneigenschaften.

5.2.4.1 HPLC

Mit HPLC (*High Performance Liquid Chromatography*) wurden die modifizierten Proben auf Veränderungen in ihrer Zuckerzusammensetzung im Vergleich zu unbehandelten Referenzen untersucht. In Tabelle 4 sind die Ergebnisse für Strands aus Kiefer und Pappel sowie für Fichtenspäne aufgeführt. Durch HPLC werden die Zuckermonomere erfasst, wofür die Proben vor der Analyse durch eine zweistufige saure Hydrolyse in ihre Bausteine aufgespalten werden müssen. Der Anteil nicht-hydrolysierbarer Bestandteile wird als Hydrolyserückstand aufgenommen. Für alle Proben steigt der Hydrolyserückstand nach der Vorbehandlung an, der Anteil der 4-O-Methylgruppen sowie der einzelnen Zucker weisen eine Abnahme auf. Der Glucoseanteil dagegen ist nach der thermischen Modifizierung gestiegen. Ein Einfluss der

Behandlungstemperatur lässt sich bei den Kiefern-Strands, die sowohl bei 220°C als auch 240°C vorbehandelt wurden, feststellen; die Abnahme bzw. Zunahme der einzelnen Komponenten fällt bei höherer Temperatur deutlicher aus. Der Abbau der Kohlenhydrate durch thermische Modifizierung ist auf die autokatalytischen Vorgänge im Holz während der Vorbehandlung zurückzuführen. Die Acetylgruppen der Polyosen werden hydrolytisch unter Entstehung von Carbonsäuren (vor allem Essigsäure) abgespalten und katalysieren den hydrolytischen Abbau der Polyosen in monomere und oligomere Strukturen. Aus den Pentosen geht dabei als wichtigste Komponente Xylose hervor, aus den Hexosanen Glucose. Der durch HPLC bestimmte Glucoseanteil geht vor allem auf Bruchstücke der Cellulose zurück, die zum einen in Folge thermischer Zersetzung entstehen (Burmester 1970) sowie durch die saure Hydrolyse bei der Probenvorbereitung. Der Anteil der Glucose liegt für die modifizierten Proben über denen der jeweiligen Referenz. Dieses Ergebnis, trotz genereller Abnahme der Zuckeranteile, ist Folge der Dehydratisierung während der Vorbehandlung. Dadurch verringert sich der Abstand der Celluloseketten zueinander, und folglich steigt der Kristallisationsgrad der Cellulose bei den modifizierten Proben. Dadurch kann die saure Hydrolyse, ausgehend von den amorphen Bereichen, bei der Probenvorbereitung in geringerem Ausmaß stattfinden als bei den Referenzproben mit unveränderter Cellulosestruktur. Mit sinkendem Zuckeranteil steigt der Hydrolyserückstand der thermisch modifizierten Proben. Durch die während der thermischen Modifizierung auftretende Dehydratisierung werden die hydrolysierten Kohlenhydrate (Xylose, Glucose) zu Aldehyden umgesetzt (Fengel, Wegener 1989). Aus Xylose mit furanosidischer Ringstruktur entsteht Furfural, aus Glucose mit pyranosidischer Ringstruktur 5-Hydroxymethylfurfural (Bobleter und Binder 1980).

Furfural und 5-Hydroxymethylfurfural unterliegen während der thermischen Modifizierung einer Dehydratisierung, woraus elektrophile Carbonium-Ionen hervorgehen, die sich am Lignin an Stellen höherer Elektronendichte anlagern können. An das Carbonium-Ion wiederum kann sich Formaldehyd anlagern, dass im Laufe der Modifizierung aus den Seitenketten der Hexosen abgespalten wurde. Auf diese Weise wird das bestehende Lignin untereinander zusätzlich verknüpft, so dass ein höher hydrophobes, verdichtetes, dreidimensionales Netzwerk gebildet wird. Die so entstandenen Strukturen sind Ursache für die erhöhte Feuchteresistenz und Härte thermisch modifizierter Hölzer.

Bei den OSB-Strands aus Kiefer ist ein messbarer Unterschied zwischen den Behandlungstemperaturen erkennbar. Der Xyloseanteil der bei 240°C modifizierten Strands fällt um etwa 13% geringer aus als nach Vorbehandlung bei 220°C, der Mannoseanteil nur um 0,6%. Dagegen liegt der Hydrolyserückstand der bei 240°C modifizierten Strands um 3% über denen

bei 220°C vorbehandelten. (Tabelle 4) Die Ursache für die stärkere Abnahme der Xylose gegenüber der Mannose liegt in der geringeren thermischen Stabilität der Pentosen im Vergleich zu Hexosen. Dadurch kann unter Einfluss höherer Temperaturen mehr Furfural durch Dehydratisierung aus den Xylosen gebildet werden. Die höhere Reaktivität des Furfurals gegenüber 5-Hydroxymethylfurfural begünstigt die Ausbildung der beschriebenen Vernetzungsreaktionen mit dem Ligninkomplex. Der höhere Vernetzungsgrad nach Vorbehandlung bei angehobener Temperatur wird schließlich durch HPLC anhand eines gestiegenen Hydrolyserückstandes nachweisbar. Die Beziehung zwischen Xyloseabbau und Zunahme des Hydrolyserückstandes ist auch an den anderen Proben, die nur bei 220°C modifiziert worden waren, ersichtlich. Je stärker die Abnahme des Xyloseanteils gegenüber der Referenz ausfällt, desto größer ist auch die Zunahme des Hydrolyserückstandes. Unabhängig vom absolut höheren Gehalt an Pentosen, weisen die Strands aus Pappel auch relativ die höchste Abnahme der Xylose (14%) sowie Zunahme des Hydrolyserückstandes (12%) nach Vorbehandlung bei 220°C auf.

Tabelle 4: Relativwerte der Zuckerbestimmung nach zweistufiger Hydrolyse mittels HPLC für thermisch modifizierte Proben und unbehandelte Referenzen (Ref.), Angaben in Prozent

Probe	Hydrolyse- rückst.	Zucker (abs %)	Xyl ose	Glu- cose	Man- nose	Ga- lac- tose	Arabi- nose	Rham- nose	4-O-Me- thyl
Pappel Ref.	27,3	60,5	19,4	72,4	4,8	0,7	0,6	0,5	1,6
Pappel 220°C	30,5	59,9	16,7	77,1	3,6	0,9	0,4	0,3	1,2
Fichte Ref.	29,1	63,2	8,0	68,3	18,2	3,0	1,0	0,3	1,2
Fichte 220°C	31,6	62,3	7,1	71,3	17,4	2,5	1,0	0,2	0,6
Kiefer Ref.	29,8	59,8	8,4	67,3	17,4	3,7	2,1	0,2	1,0
Kiefer 220°C	32,6	61,4	7,7	69,2	16,9	3,7	1,6	0,2	0,7
Kiefer 240°C	33,7	61,0	6,7	71,8	16,8	3,1	1,1	0,2	0,4

5.2.4.2 pH-Wert und Pufferkapazität

In Tabelle 5 sind die pH-Werte des Spanmaterials im unbehandelten Zustand sowie nach Vorbehandlung aufgeführt. Der pH-Wert der Pappelproben liegt mit etwa 7 im Vergleich zu Literaturangaben zu hoch, für Pappel im nativen Zustand sollte sich ein pH von etwa 6 ergeben (Wagenführ 1989). Dennoch ist infolge der Vorbehandlung eine geringe Abnahme des pH-Wertes zu erkennen. Für die unbehandelte Fichtereferenz konnte ein pH von 5,9 gemessen werden. Nach der Vorbehandlung bei 220°C sinkt der pH deutlich auf 4,6. Bei den Kie-

ferstrands ist dagegen keine Änderung des pH-Wertes nach thermischer Modifizierung im Vergleich zur Referenz erkennbar, die Abweichung um rund 0,1 vom Referenzwert (4,6) liegt im Bereich des Messfehlers. Die pH-Werte der Referenzproben aus Fichte und Kiefer liegen im Vergleich zu den Werten, die Jung und Roffael (2002) in ihrer Untersuchung über Kiefer- und Fichtespäne gemessen haben (4,5 bzw. 4,1) höher. Die Ursache für diese Abweichung lässt sich auf die Umgebungsbedingungen am Messplatz zurückführen, an dem häufig mit NaOH gearbeitet wird und dadurch eine erhöhte Alkalikonzentration herrschen kann.

Die Pufferkapazität wurde durch Titrieren gegen 0,01 mol/l NaOH bis pH 7 bestimmt, wobei die Pufferkapazität der Pappelproben nicht bestimmt wurde, da der pH-Wert bereits bei 7 lag. Die Ergebnisse sind in Abbildung 14 dargestellt. Der Vergleich der Referenzproben zeigt, dass die alkalische Pufferkapazität der Fichteproben deutlich unter der von Kiefer liegt. Dieses Ergebnis entspricht den Resultaten, die Jung und Roffael (2002) in ihren Untersuchungen finden konnten. Neben pH-Wert und Pufferkapazität bestimmten sie auch den Gehalt flüchtiger Säuren. Demnach enthält Kiefer mehr Essig- und Ameisensäure als Fichte, woraus zum einen ein geringerer pH resultiert, zum anderen die Pufferkapazität steigt. Die Pufferkapazität der thermisch modifizierten Fichtespäne stimmt qualitativ mit den Ergebnissen der pH-Wert-Messung überein. Nach der Vorbehandlung bei 220°C sinkt der pH und entsprechend steigt die Pufferkapazität an. Die Änderung des pH-Wertes und damit der Pufferkapazität beruht auf dem Abbau der Polyosen, der besonders im Temperaturbereich zwischen 200°C und 260°C mit dem Freiwerden von Essigsäure einhergeht (Tjeerdsma *et al.* 1998). Durch Hydrolyse bildet sich aus den acetylierten Polyosen Essigsäure, die katalytisch die weitere hydrolytische Zersetzung der Polyosen in lösliche Zucker bewirkt.

Dieses Verhalten konnte bei den Strands aus Kiefer nicht gefunden werden. Im Gegensatz zu den thermisch modifizierten Fichteproben nimmt die Pufferkapazität infolge der Vorbehandlung im Vergleich zur Referenz ab, wobei ein Einfluss der Temperatur erkennbar wird. Die thermische Modifizierung bei 240°C führt zu einer geringeren Pufferkapazität als die 220°C-Behandlung. In Bezug auf die gemessenen pH-Werte, bei denen kein Unterschied zwischen Referenz und vorbehandelten Proben gefunden werden konnte, deutet die Pufferkapazität jedoch darauf hin, dass die Proben nach der Vorbehandlung weniger sauer sind als die unbehandelte Referenz. Dass sich keine nennenswerte Änderung des pH-Wertes infolge der Vorbehandlung feststellen lässt, kann auf den bereits im nativen Zustand hohen Säuregehalt der Kiefer zurückgeführt werden. Zwar wird, wie bereits erwähnt, durch den Abbau der Polyosen im Laufe der thermischen Modifizierung Essigsäure freigesetzt, aber aufgrund des hohen Gehaltes Ameisensäure in nativer Kiefer, die eine stärkere Säure als Essigsäure

ist, hat der Anteil neu gebildeter Essigsäure keinen wesentlichen Einfluss auf den pH-Wert.

Als Ursache für die Abnahme der Pufferkapazität nach Vorbehandlung kommt der relativ höhere Extraktstoffgehalt der Kiefer im Vergleich zu Fichte in Betracht; der Benzol-Alkohol-Auszug wird mit rund 6% für Kiefer und 2,3% für Fichte angegeben (Wagenführ 1989). Extraktstoffe können eine puffernde Wirkung auf das Holz haben; unter Temperatureinfluss entweichen einige als flüchtige Bestandteile und tragen somit bei den thermisch modifizierten Proben nicht zur Pufferkapazität bei. Zudem konnte mittels ESCA bei Kiefer nach der Vorbehandlung Silicium nachgewiesen werden (Tabelle 7), das basisch wirkt und damit zu einer Abnahme der alkalischen Pufferkapazität beiträgt.

Tabelle 5: pH-Werte thermisch modifizierter Proben
sowie unbehandelter Referenzen

Probe	pH
Pappel Ref.	7,56
Pappel 220°C	6,94
Fichte Ref.	5,92
Fichte 220°C	4,59
Kiefer Ref.	4,61
Kiefer 220°C	4,54
Kiefer 240°C	4,54

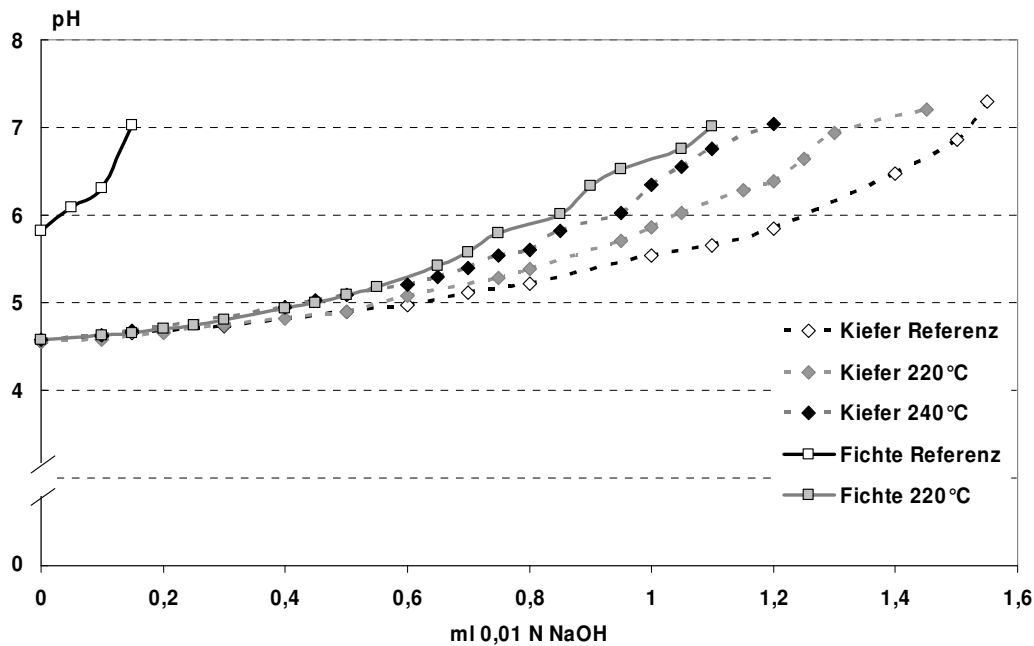


Abbildung 14: Titrationskurven zur Bestimmung der Pufferkapazität von Strands aus Kiefer und Fichtespänen nach Vorbehandlung bei 220°C bzw. 240°C im Vergleich zur unbehandelten Referenz.

5.2.4.3 Kontaktwinkelmessung und ESCA

Um die Veränderung der Oberflächenbeschaffenheit der Strands und Späne zu charakterisieren, wurden die Kontaktwinkel sowie die chemischen Zusammensetzung der Holzoberfläche untersucht. Die Messergebnisse der Kontaktwinkel sind in Tabelle 6 dargestellt. Die thermische Modifizierung führt zu einer Zunahme der Kontaktwinkel im Vergleich zur jeweiligen Referenz. Bezüglich der Holzarten können Unterschiede festgestellt werden. Bei den Strands aus Kiefer liegt der Kontaktwinkel der Referenz bei etwa 60° und steigt auf rund 105° an, bezüglich der Vorbehandlungstemperatur ist kein signifikanter Unterschied festzustellen. Für die Fichtespäne wurden bereits im unbehandelten Zustand deutlich höhere Kontaktwinkel gemessen (rund 110°), die nach der Vorbehandlung nur noch verhältnismäßig gering auf etwa 124° steigen. Allerdings sind die hohen Kontaktwinkel für die Referenzspäne aus Fichte kritisch zu betrachten und vermutlich auf Messfehler, die sich durch die geringe Probengröße ergaben, zurückzuführen. Dennoch wird die relative Änderung der Benetzbarkeit infolge der thermischen Modifizierung deutlich. Die deutlichste Veränderung durch thermische Modifizierung zeigen die Strands aus Pappel; von circa 33° im unbehandelten Zustand werden nach der Vorbehandlung Kontaktwinkel um 120° gemessen. Die Aufnahmegeschwindigkeit des Wassertropfens war bei der Pappel-Referenz so hoch, dass die

Messzeit auf 30 Sekunden herabgesetzt wurde gegenüber einer Minute bei den übrigen Proben. Herczeg (1965) konnte zeigen, dass eine einwandfreie Benetzung Voraussetzung für die Ausbildung einer guten Bindung ist, woraus Khan *et al.* (2004) schließen, dass der Kontaktwinkel indirekt mit der Verklebungsgüte in Beziehung steht.

Die Benetzbarkeit ist umso vollständiger, je kleiner der Kontaktwinkel ist; nach Scheikl *et al.* (1996) bedeuten Kontaktwinkel kleiner 45° gute Benetzbarkeit, Kontaktwinkel von 90° und mehr dagegen deuten auf eine unvollständige Benetzung hin. Die Benetzbarkeit von Holzoberflächen wird vor allem durch Extraktstoffe beeinflusst, weiterhin durch Dichte, Porosität, Rauigkeit und Prozessbedingungen. Gray (1962) untersuchte die Auswirkung von Extraktstoffen auf die Benetzbarkeit anhand von Kontaktwinkelmessungen. Oberflächenverunreinigungen, die in einer Zunahme der Kontaktwinkel resultieren, führt er auf durch niedermolekulare Fettsäuren, hohen Extraktstoff- sowie Harzgehalt zurück. Die Extraktstoffe werden in zwei Gruppen unterteilt, wasserlösliche und wasserunlösliche. Die wasserlöslichen sind polar und werden im Verlauf der Trocknung an die Holzoberfläche transportiert und verbleiben dort nach Verdunsten des Wassers als Feststoffe. Mit fortschreitender Trocknungsdauer bei hohen Temperaturen gelangt gebundenes Wasser als Dampf an die Holzoberfläche. Wenn die Diffusionsrate des Wassers an die Oberfläche die Verdunstungsrate des Wassers von der Oberfläche unterschreitet, reicht die Verdunstungskälte nicht mehr aus, um einen Temperaturanstieg auf der Oberfläche zu vermeiden (Atherton und Welty 1972). Mit der Dampfphase werden wasserunlösliche, unpolare Extraktstoffe an die Oberfläche transportiert und können dadurch die Benetzbarkeit verringern (Gray 1962, Jordan und Wellons 1977, Hse und Kuo 1988); dieser Effekt wird als Inaktivierung bezeichnet. In bisherigen Arbeiten über die Ursachen einer Inaktivierung von Holzoberflächen (z.B. Koch 1964, Hancock 1964, Haskell *et al.* 1966, Suchsland und Stevens 1968, Nearn 1974), standen vor allem Furniere zur Herstellung von Sperrhölzern im Mittelpunkt. Nach Christiansen (1990) kann eine Inaktivierung aber auch bei Spanmaterial auftreten. Der Effekt tritt jedoch weniger deutlich in den Vordergrund, da bei der Verklebung von Partikelwerkstoffen eine Vielzahl von Mechanismen zusammenwirkt. Deshalb ist über Inaktivierungsprozesse bei Partikelwerkstoffen bisher wenig bekannt.

Tabelle 6: Ergebnisse der Kontaktwinkelmessung thermisch modifizierter Proben und unbehandelter Referenzen (Ref.)

Probe	Kontaktwinkel in Grad
Pappel Ref. *)	32,7 ± 6,3
Pappel 220°C *)	122,2 ± 6,3
Fichte Ref.	109,0 ± 5,3
Fichte 220°C	123,8 ± 6,8
Kiefer Ref.	61,0 ± 3,8
Kiefer 220°C	100,3 ± 5,1
Kiefer 240°C	104,8 ± 3,2

*) Messzeit nach 30 Sekunden

Die Ergebnisse der ESCA sind in Tabelle 7 aufgeführt. Neben den verschiedenen Kohlenstoffverbindungen, können auch Phosphor (P) und Calcium (Ca) gefunden werden, deren Konzentration durch die Vorbehandlung drastisch reduziert wird. Bei Pappel- und Kieferstrands lässt sich zudem nach der thermischen Modifizierung Silicium (Si) nachweisen. Die Abnahme des Stickstoffanteils bei allen Proben nach thermischer Modifizierung geht auf den Abbau von Proteinen zurück. Der Sauerstoffanteil nimmt durch die Vorbehandlung signifikant ab, der Gesamtkohlenstoffanteil dagegen zu.

In lignocellulosischen Materialien werden die Kohlenstoffatome in Abhängigkeit ihrer Bindungsenergie nach Dorris und Gray (1978) in vier Klassen unterteilt: C1 bis C4. Die erste Klasse (C1) entspricht Kohlenstoffatomen, die mit Kohlenstoff oder Wasserstoff gebunden sind (C-C, C-H). Zu Klasse C2 zählen Kohlenstoffatome, die einfach an ein einzelnes Sauerstoffatom gebunden sind (C-O). In der dritten Klasse (C3) werden Kohlenstoffatome zusammengefasst, die entweder eine Carbonylgruppe (C=O) oder zwei Sauerstoffatome (O-C-O) tragen. Klasse C4 entspricht Kohlenstoffatomen, die an zwei Sauerstoffatome gebunden sind, einfach sowie über eine Carbonylverbindung (O-C=O). Darüber hinaus wurden die Verhältnisse von Sauerstoff zu Gesamtkohlenstoff (O/C) und C1 zu C2 gebildet. Die C1-Komponente wird auf Lignin und Extraktstoffe zurückgeführt, während die C2-Komponente aus allen Holzbestandteilen hervorgeht (Šernek *et al.* 2004). Durch die Abnahme des Sauerstoffanteils einerseits und die Zunahme des Gesamtkohlenstoffanteils andererseits, nimmt das O/C-Verhältnis aller Proben nach thermischer Modifizierung im Vergleich zur

jeweiligen Referenz leicht ab. Shen *et al.* (1998) fanden mittels ESCA, dass sich das Säure/Base-Verhältnis negativ proportional zum O/C-Verhältnis verhält. Das bedeutet, je geringer das O/C-Verhältnis desto niedriger der pH-Wert der Probe. Eine leichte Abnahme des pH-Wertes infolge der thermischen Modifizierung konnte auch bei den Proben in dieser Arbeit gefunden werden (Tabelle 5). Die Abnahme des Sauerstoffanteils bedeutet auch eine Abnahme der Polarität der Holzoberflächen, worauf sich die gemessene Zunahme der Kontaktwinkel nach der Vorbehandlung zurückführen lässt (Tabelle 7).

Tabelle 7: Mittels ESCA bestimmte Elementzusammensetzung der Oberfläche thermisch modifizierter Proben und unbehandelter Referenzen (Ref.), Angaben der absoluten Anteile in Prozent

Probe	C (%)	C1 (%)	C2 (%)	C4 (%)	N (%)	O (%)	O / C	C1 / C2	Si (%)	P (%)	Ca (%)
Pappel Ref.	77,5	50	23	5	1,9	19,6	0,25	2,17	-	0,5	0,5
Pappel 220°C	82,4	56	23	3	0,5	16,8	0,21	2,44	0,3	-	0,1
Fichte Ref.	76,3	48	23	5	1,0	22,6	0,29	2,08	-	-	0,2
Fichte 220°C	80,2	43	27	10	0,6	19,2	0,24	1,59	-	-	-
Kiefer Ref.	78,3	56	17	5	0,9	20,3	0,26	3,29	-	0,2	0,3
Kiefer 220°C	79,9	52	22	6	0,3	18,8	0,24	2,36	1,1	-	-
Kiefer 240°C	81,0	51	23	7	0,4	18,3	0,23	2,22	1,2	-	-
Kiefer Ref. (Span)	79,4	52	21	6	1,1	19,3	0,24	2,47	-	0,1	0,1
Kiefer 220°C (Span)	81,5	50	26	6	0,4	18,1	0,22	1,93	-	-	-

Unterschiede können bezüglich der Anteile in den einzelnen Kohlenstoffklassen gefunden werden. Die OSB-Strands aus Pappel zeigen nach Vorbehandlung eine Zunahme der C1-Komponente, C2 bleibt unverändert und der Anteil an C4 nimmt leicht ab. Aufgrund der Zunahme in C1 bei unverändertem Anteil in C2 steigt entsprechend das Verhältnis C1/C2 der modifizierten Pappel-Strands gegenüber der Referenz. Dagegen weisen die Fichtenspäne sowie Kiefer-Strands eine Abnahme in C1 und Zunahmen in den Klassen C2 und C4 auf, wodurch das Verhältnis C1/C2 nach Vorbehandlung sinkt. Bezüglich der Behandlungstemperatur lässt sich ein geringer Einfluss bei den Strands aus Kiefer feststellen, die bei 220°C und 240°C modifiziert worden waren; die Zu- bzw. Abnahmen fallen für die höhere Temperatur

stärker aus. Kohlenstoffatome der Klasse C3 lassen bei den untersuchten Proben nicht detektieren; nach Šernek *et al.* (2004) ist mit Ausnahme für Cellulose der Anteil der C3-Komponente im Holz gering. In seinen Untersuchungen konnte die C3-Komponente nur an isolierter Cellulose in höherem Maß nachgewiesen werden.

Nach Börås und Gatenholm (1999) korrespondiert ein geringes O/C- oder ein hohes C1/C2-Verhältnis mit einem relativ höheren Anteil von Extraktstoffen auf der Oberfläche. Der Gehalt hydrophober Substanzen auf der Oberfläche lässt sich mit dem C1/C2-Verhältnis ausdrücken. Börås und Gatenholm (1999) haben den Extraktstoffgehalt gegen das C1/C2-Verhältnis aufgetragen und fanden mit steigendem C1/C2 eine Zunahme des Extraktstoffgehaltes auf der Oberfläche. Dieses Ergebnis findet sich durch Untersuchungen von Johansson *et al.* (1999) bestätigt. Demnach ist ein geringeres O/C-Verhältnis und ein höherer Anteil C1, woraus eine Abnahme des C1/C2-Verhältnisses resultiert auf eine größere Menge Lignin oder Extraktstoffe auf der Oberfläche zurückzuführen. Eine Zunahme beider Verhältnisse gegenüber der Referenz nach Vorbehandlung kann nur bei den Pappel-Strands gemessen werden, weshalb die Zunahme der Kontaktwinkel bei diesen Proben auch am höchsten ausfällt. Dieser Zusammenhang lässt sich durch Šernek *et al.* (2004) bestätigen; sie fanden in ihrer Arbeit, dass mit steigender Temperatur auf der Holzoberfläche eine Abnahme von O/C und eine Zunahme von C1/C2 erfolgen, bei gleichzeitigem Anstieg des Kontaktwinkels. Als Ursache für die Veränderung der Oberflächenzusammensetzung gilt vor allem die Anreicherung unpolarer Substanzen und hydrophober Extraktstoffe, deren Ausmaß mit steigender Temperatur zunimmt.

Dies führen Hse und Kuo (1988) auf den beschleunigten Wassertransport bei hohen Temperaturen zurück. Dadurch gelangen neben wasserlöslichen Extraktstoffen auch wasserunlösliche Extraktstoffe über die Dampfphase an die Oberfläche. Außerdem werden beim Abkühlen Kohlenwasserstoffverbindungen auf der Oberfläche durch Kondensation angelagert. Die Extraktstoffwanderung an die Oberfläche und die Anlagerung von Kohlenwasserstoffverbindungen auf der Oberfläche gelten als Hauptmechanismen für die Änderung der Oberflächenchemie. Die veränderten Oberflächeneigenschaften können zu Einbußen der Verklebungsgüte führen, da sie Fließverhalten und Aushärtung der Klebstoffe beeinflussen. So konnten Šernek *et al.* (2004) durch Versuche über das Bruchverhalten verklebter Holzflächen zeigen, dass mit zunehmenden Kontaktwinkeln die Maximalkraft, die zum Bruch der Klebfuge führt, abnimmt.

Die Ergebnisse aus der Prüfung der Oberflächeneigenschaften haben gezeigt, dass die chemische Zusammensetzung infolge der Vorbehandlung verändert wird und die Benetzbarkeit abnimmt; das Ausmaß der Veränderungen ist dabei holzartenabhängig. Daraus können sich unterschiedliche Verklebungseigenschaften ergeben, die bei der Herstellung zu Holzwerkstoffen unter Umständen zu berücksichtigen sind. Eine Abnahme der Benetzbarkeit lässt sich beispielsweise durch die Auswahl eines geeigneten Klebstoffsystems, die sich in ihrem Benetzungsverhalten unterscheiden, kompensieren, oder durch einen höheren Grad der Klebstoffverteilung. Seitens der Verfahrenstechnik besteht die Möglichkeit über das Pressprogramm unter Variation des Pressdruckes sowie der Presstemperatur und –zeit das Fließverhalten des Klebstoffes und somit die Verteilung zu verändern.

5.3 Ergebnisse und Diskussion der Werkstoffprüfung

Auf Grundlage der Vorversuche wurde die thermische Modifizierung für Kiefern-Strands bei 220°C und 240°C durchgeführt, wobei die anzustrebende Masseabnahme zwischen 5% und 6% lag. Die effektive Behandlungsdauer bei der Zieltemperatur betrug für die 220°C-Behandlung 30 Minuten und bei 240°C 10 Minuten. Die thermische Modifizierung der Späne aus Fichte und Kiefer sowie der Pappel-Strands erfolgte bei 220°C für eine effektive Dauer von 30 Minuten. Die angestrebte Masseabnahme von 6% bis 7% für Pappel richtete sich nach den Vorversuchen; für Fichte wurde analog der Kiefer-Strands eine Masseabnahme von 5% bis 6% eingestellt.

5.3.1 Gleichgewichtsfeuchte, Dickenquellung und Wasseraufnahme

5.3.1.1 OSB aus Kiefer

Die Gleichgewichtsfeuchte bei 20°C und 65% r. Lf. der Kiefer-OSB ist in Abbildung 15 dargestellt. In Abhängigkeit des eingesetzten Klebstoffes liegt die Ausgleichsfeuchte der Referenzplatten aus unbehandelten Strands zwischen 9,5% (MUPF, PMDI) und 10,5% (PF); die höheren Werte für PF-gebundene Platten beruhen auf der Hygroskopizität des Alkalis im Phenolharz. Die thermische Modifizierung führt zu geringeren Ausgleichsfeuchten der Platten; mit steigender Temperatur der Vorbehandlung sinkt die Gleichgewichtsfeuchte. Für MUPF- und PMDI-gebundene Platten aus vorbehandelten OSB-Strands sinkt die Gleichgewichtsfeuchte auf 7% und für PF-gebundene OSB auf 8,5% bei einer Behandlungstemperatur von 240°C. Der Unterschied zwischen einer Vorbehandlung bei 220°C bzw. 240°C und deren Einfluss auf die Gleichgewichtsfeuchte ist statistisch signifikant.

Die Dickenquellung nach Wasserlagerung ist in Abbildung 16 dargestellt: Die Dickenänderung der Probekörper wurde nach zwei, 24 und 168 Stunden gemessen. Nach den ersten zwei Stunden ist die Dickenquellung der MUPF- und PF-gebundenen OSB höher als bei Verwendung von PMDI. Für die unbehandelten Referenzplatten beträgt die Dickenzunahme 16% (MUPF) und 15% (PF) gegenüber etwa 9% (PMDI). Durch thermische Modifizierung der Strands bei 220°C quillt die Probe um 8,5% (MUPF), 10,5% (PF) und etwa 3% (PMDI). Nach Vorbehandlung bei 240°C fällt die Dickenquellung mit 7% und 9,5% für MUPF bzw. PF geringer aus, für PMDI mit etwa 3% entspricht sie der Platte aus 220°C-Strands.

Die 24stündige Wasserlagerung resultiert in einer Dickenquellung der Referenzen zwischen 19,5% (PF, PMDI) und 23,5% (MUPF). Nach Vorbehandlung bei 220°C weisen die OSB signifikant geringere Quellwerte auf; nach 24 Stunden Wasserlagerung beträgt die Dickenquellung 11% (PMDI), 13% (PF) bzw. 14% (MUPF). Ein Anheben der Vorbehandlungstemperatur

auf 240°C resultiert in einer weiteren signifikanten Abnahme der Dickenquellung; die Werte liegen zwischen 10%, 11% und 11,5% für PMDI-, PF- bzw. MUPF-gebundene Platten. Die Verlängerung der Wasserlagerung auf 168 Stunden hat nur noch geringen Einfluss auf die Dickenquellung; die Dickenquellung der MUPF-Platten beträgt 26% (Referenz), 15% (bei 220°C-Vorbehandlung) und 13% (bei 240°C-Vorbehandlung). Die PF-gebundenen OSB erreichen nach 168 Stunden 21% (Referenz), 14% (bei 220°C-Vorbehandlung) bzw. 13% (bei 240°C-Vorbehandlung); die PMDI-Platten 21,5% (Referenz), 13% (bei 220°C-Vorbehandlung) und 12% (bei 240°C-Vorbehandlung).

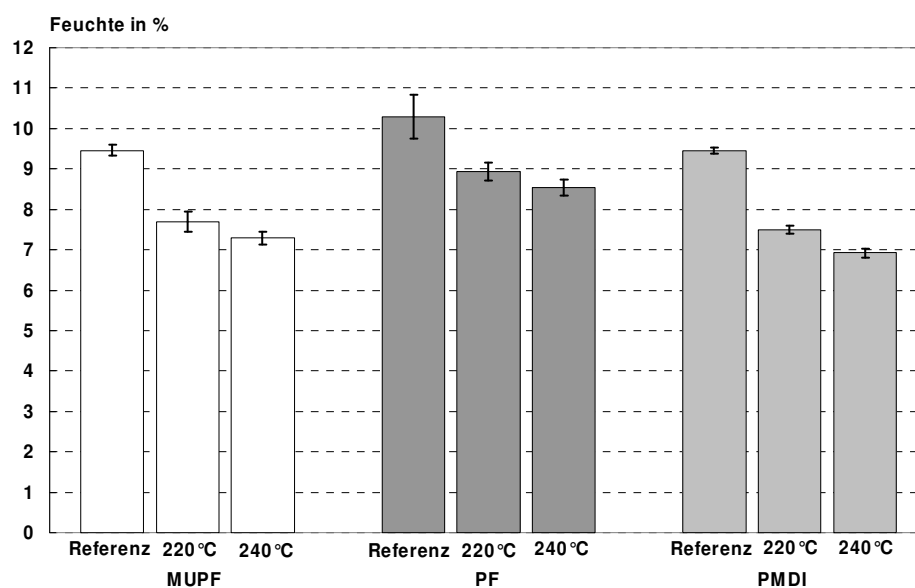


Abbildung 15: Gleichgewichtsfeuchte bei 20°C und 65% r. Lf.. von OSB aus Kiefer. Die bei 220°C und 240°C vorbehandelten Strands sowie unbehandelte Referenzstrands wurden mit MUPF, PF und PMDI zu Platten verpresst.

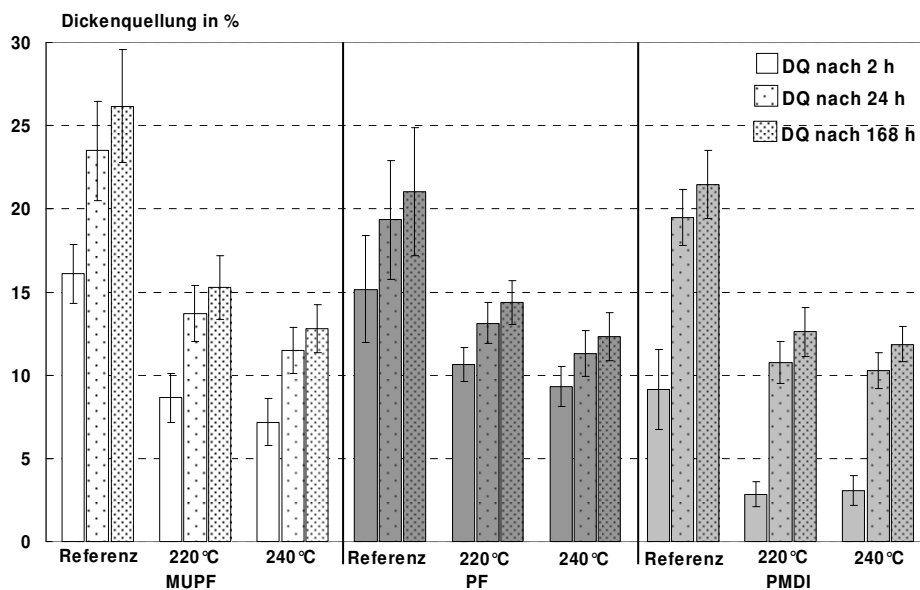


Abbildung 16: Dickenquellung (DQ) nach 2, 24 und 168 Stunden Wasserlagerung von OSB aus Kiefer. Die bei 220°C und 240°C vorbehandelten Strands sowie unbehandelte Referenzstrands wurden mit MUPF, PF und PMDI zu Platten verpresst.

Die Wasseraufnahme (WA) nach zwei, 24 und 168 Stunden ist in Abbildung 17 dargestellt. Für die PF-gebundenen Platten ist die WA am höchsten. Sowohl für die Referenz als auch für die Platten aus vorbehandelten Strands liegt die Wasseraufnahme nach zwei Stunden bei circa 50%, nach 24 Stunden bei etwa 65% und nach 168 Stunden zwischen 75% und 80%. Die MUPF-gebundenen OSB (Referenz und nach Vorbehandlung) nimmt nach 24 Stunden Wasserlagerung etwa 60% und nach 168 Stunden 75% Wasser auf. Ein Einfluss der thermischen Modifizierung ist nur zu Beginn der Wasserlagerung nach zwei Stunden zu erkennen. Die MUPF-gebundene Referenzplatte absorbiert 45% Wasser, die OSB aus vorbehandelten Strands rund 40%. Die Wasseraufnahme der PMDI-gebundenen Platten ist nach zwei und 24 Stunden am geringsten; nach zwei Stunden Wasserlagerung liegt die WA der Referenz bei rund 30%, die der vorbehandelten Platten bei etwa 17%. Nach 24 Stunden beträgt der Wert für die Referenz etwa 55%, für die OSB aus vorbehandelten Strands circa 45%. Am Ende der Prüfdauer erreichen die PMDI-Platten Werte zwischen 70% bis 75% und entsprechen somit den MUPF-gebundenen OSB. Ein Einfluss der Vorbehandlungstemperatur auf die WA kann nicht gefunden werden.

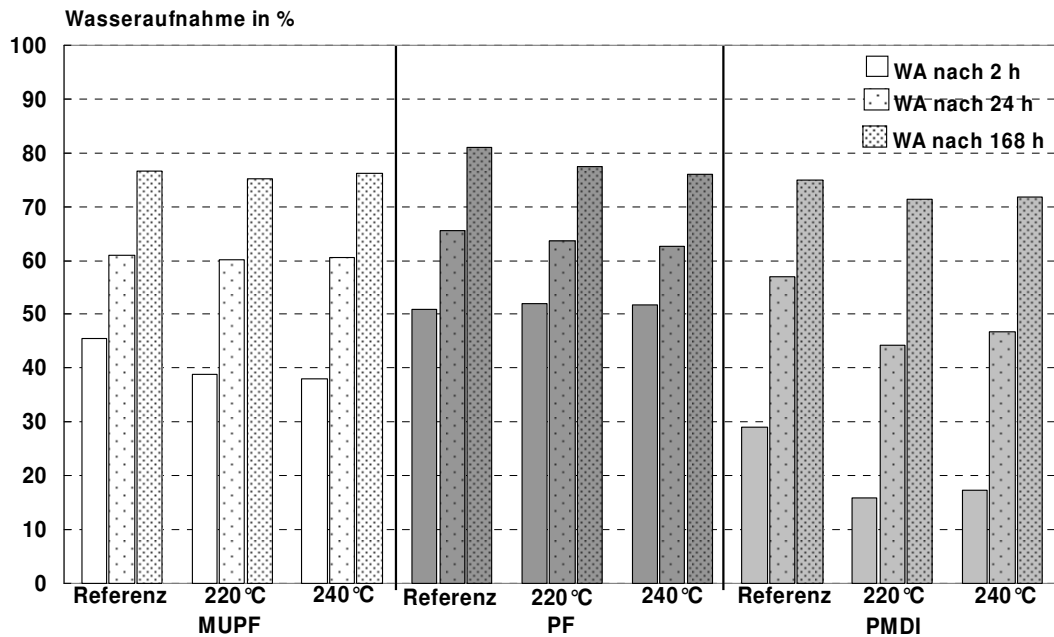


Abbildung 17: Wasseraufnahme (WA) nach 2, 24 und 168 Stunden Wasserlagerung von OSB aus Kiefer. Die bei 220°C und 240°C vorbehandelten Strands sowie unbehandelte Referenzstrands wurden mit MUPF, PF und PMDI zu Platten verpresst.

Um das Quellungsverhalten während der Wasserlagerung besser beurteilen zu können, wurde die Dickenquellung nach zwei Stunden mit dem Wert nach 24 Stunden und der 24 Stunden- Wert mit dem nach 168 Stunden ins Verhältnis gesetzt (Tabelle 8) einer der Verhältniswert, desto größer die Dickenquellung innerhalb des betrachteten Zeitraumes. Die Werte der MUPF- und PF-gebundenen OSB zeigen für die Referenzen und für die Platten aus modifizierten Strands gleiche Verhältniswerte. Bei den PMDI-gebundenen Platten ergeben sich für die OSB aus vorbehandelten Strands geringere Verhältniswerte als für die entsprechende Referenz. Das bedeutet, dass die Dickenzunahme der modifizierten Platten im Vergleich zur Referenz schneller erfolgt.

Tabelle 8: Verhältnis der Dickenquellung (DQ) nach 2 zu 24 und 24 zu 168 Stunden Wasserlagerung von OSB aus Kiefer - die bei 220°C und 240°C vorbehandelten Strands sowie unbehandelte Referenzstrands wurden mit MUPF, PF und PMDI verpresst

Klebstoff	Probe	DQ_{2h} / DQ_{24h}	DQ_{24h} / DQ_{168h}
MUPF	Referenz	0,69	0,90
	220°C	0,63	0,90
	240°C	0,63	0,90
PF	Referenz	0,78	0,92
	220°C	0,81	0,91
	240°C	0,82	0,92
PMDI	Referenz	0,47	0,91
	220°C	0,26	0,85
	240°C	0,30	0,87

Analog zur Dickenquellung wurde auch für die Wasseraufnahme das Verhältnis nach zwei zu 24 Stunden bzw. 24 zu 168 Stunden gebildet (Tabelle 9). Wie bei den Verhältniswerten zur Dickenquellung gilt auch hierbei, dass eine kleinere Verhältniszahl auf eine schnellere Wasseraufnahme hinweist. Für die MUPF-gebundenen OSB differieren die Werte zu Beginn der Wasserlagerung gering voneinander. Die Platten aus vorbehandelten Strands weisen etwas niedrigere Verhältniswerte auf, was auf eine schnellere Wasseraufnahme zwischen zwei und 24 Stunden schließen lässt. Danach verlangsamt sich die Wasseraufnahme und entspricht der Referenz. Für die PF-Platten zeigt sich kein Unterschied in der Wasseraufnahmegeschwindigkeit durch die Vorbehandlung der Strands. Bei den PMDI-gebundenen Platten zeigt sich wie bei der Dickenquellung (Tabelle 8) eine deutliche Abweichung der Verhältniswerte zwischen Referenz und OSB aus vorbehandelten Strands, die auf eine schnellere Wasserabsorption der vorbehandelten Platten über die Prüfdauer von 168 Stunden schließen lässt.

Tabelle 9: Verhältnis der Wasseraufnahme (WA) nach 2 zu 24 und 24 zu 168 Stunden Wasserlagerung von OSB aus Kiefer - die bei 220°C und 240°C vorbehandelten Strands sowie unbehandelte Referenzstrands wurden mit MUPF, PF und PMDI zu Platten verpresst

Klebstoff	Probe	WA_{2h} / WA_{24h}	WA_{24h} / WA_{168h}
MUPF	Referenz	0,75	0,79
	220°C	0,65	0,80
	240°C	0,63	0,79
PF	Referenz	0,78	0,81
	220°C	0,82	0,82
	240°C	0,83	0,82
PMDI	Referenz	0,51	0,76
	220°C	0,36	0,62
	240°C	0,37	0,65

Die oben stehenden Prüfergebnisse haben gezeigt, dass das Ausmaß von Dickenquellung und Wasseraufnahme zeitabhängig ist. Durch die erste Messung nach zwei Stunden sowie durch Anheben der Dauer der Wasserlagerung auf 168 Stunden konnte die zeitliche Auswirkung dokumentiert werden. Dabei trat vor allem der Einfluss des Klebstoffes deutlich in den Vordergrund, mit dem Resultat, dass nur kurzzeitig (bis 24 Stunden) ein Unterschied zwischen den eingesetzten Klebstoffen besteht. In Hinblick auf eine Langzeitbeanspruchung bedeutet dies, dass in Bezug auf Dickenquellung und Wasseraufnahme während einer Wasserlagerung das jeweilige Klebstoffsystem nur eine untergeordnete Rolle spielt. Die Platten aus vorbehandelten Strands verhielten sich zeitabhängig wie die jeweilige Referenz, wiesen aber eine deutlich reduzierte Dickenquellung auf; die Wasseraufnahme hingegen war nur gering bis unverändert.

Nach 168 Stunden Wasserlagerung wurden die Probekörper getrocknet und erneut bei 20°C und 65% r. Lf. klimatisiert, um die irreversible Dickenzunahme infolge der Wasserlagerung zu bestimmen (Abbildung 18). Der Einfluss des verwendeten Klebstoffes ist deutlich: MUPF-gebundene OSB führen im Vergleich zu PF- und PMDI-gebundenen Platten zu den höchsten irreversiblen Dickenquellungen. Die Referenzplatten aus unbehandelten Strands weisen irreversible Dickenzunahmen von 10%, 12% und etwa 20,5% für PF, PMDI bzw. MUPF auf. Die OSB aus vorbehandelten Strands haben eine verbleibende Dickenänderung von 9,5% bis 14% für MUPF-gebunden Platten, 5% bis 7% für PF und 6% bis 7,5% bei Verwendung von PMDI; die geringeren Werte beziehen sich auf die Platten, deren Strands bei 240°C modifiziert wurden.

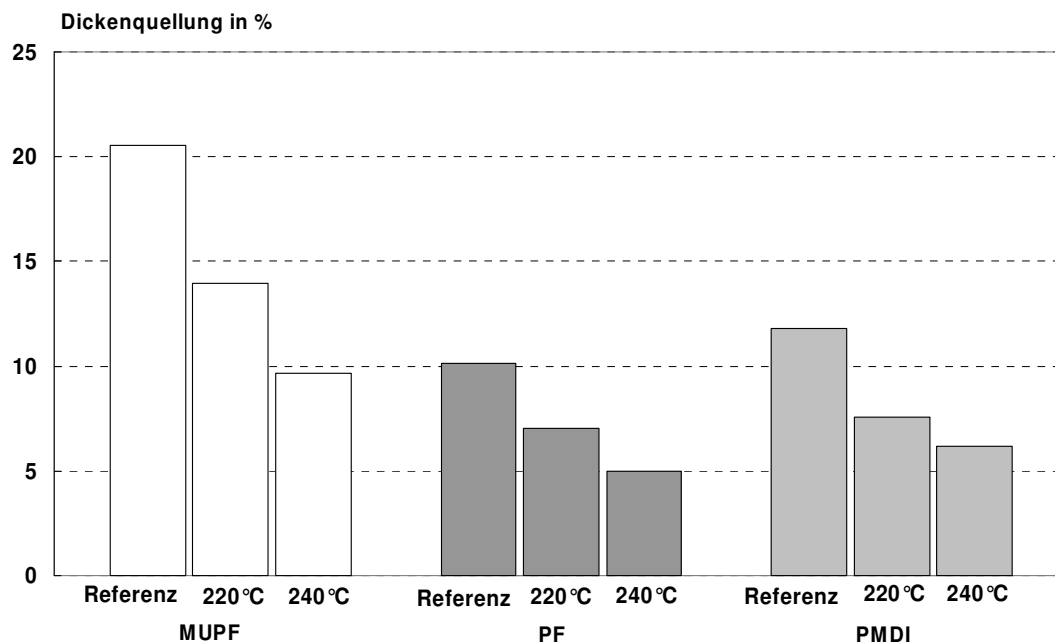


Abbildung 18: Irreversible Dickenquellung (IDQ) nach 168 Stunden Wasserlagerung von OSB aus Kiefer. Die bei 220°C und 240°C vorbehandelten Strands sowie unbehandelte Referenzstrands wurden mit MUPF, PF und PMDI zu Platten verpresst.

5.3.1.2 Spanplatten aus Fichte

Die Gleichgewichtsfeuchte der Spanplatten aus Fichte bei 20°C und 65% r. Lf. (Abbildung 19) beträgt für die Referenzplatten zwischen 9% (MUPF) und 9,5% (PMDI). Durch thermische Modifizierung bei 220°C reduziert sich die Gleichgewichtsfeuchte der Spanplatten für beide Klebstoffsysteme auf 7,5%.

Die Dickenquellung der Fichte-Spanplatten nach zwei Stunden Wasserlagerung beträgt für die Referenzplatten 2,5% (PMDI) bis 6% (MUPF); nach Vorbehandlung der Späne reduziert sich die Dickenquellung auf 1% (PMDI) bis 2% (MUPF), dargestellt in Abbildung 20.

Nach 24 Stunden Wasserlagerung hat die Dickenquellung der Referenzplatten auf 7% mit PMDI als Klebstoff bzw. 16% mit MUPF zugenommen. Die Dickenquellung der vorbehandelten PMDI-gebundenen Platten beträgt nach 3,5% und die der MUPF-Platten 5%.

Die Verlängerung der Wasserlagerung auf 168 Stunden resultiert bei den Referenzplatten in einer Dickenquellung von etwa 18%, unabhängig des verwendeten Klebstoffsystems. Die Vorbehandlung der Späne verringert die Dickenquellung der Platten nach 168 Stunden Wasserlagerung auf 8% bis 10% für PMDI bzw. MUPF. Die geringere Dickenquellung nach Vorbehandlung bei 220°C ist statistisch signifikant.

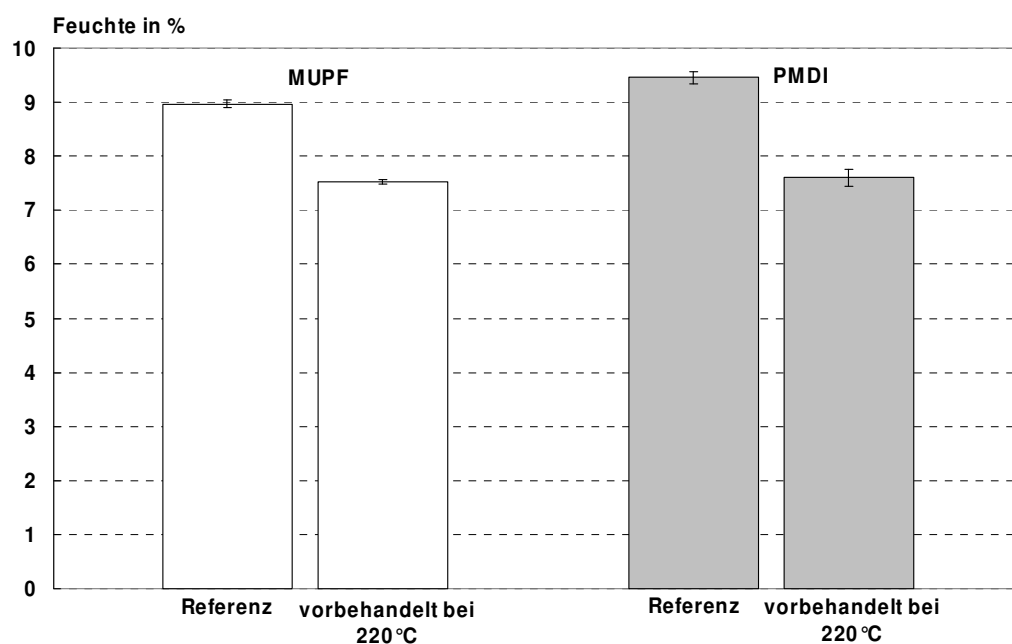


Abbildung 19: Gleichgewichtsfeuchte bei 20°C und 65% r. Lf. von Spanplatten aus Fichte. Die bei 220°C vorbehandelten Späne sowie unbehandelte Referenzspäne wurden mit MUPF und PMDI zu Platten verpresst.

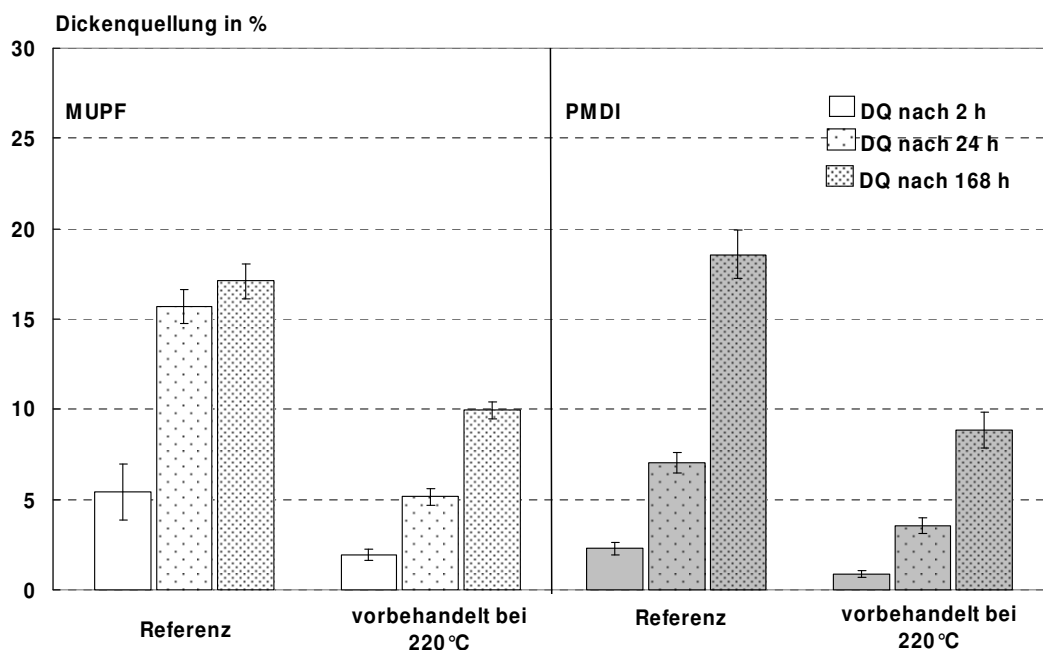


Abbildung 20: Dickenquellung (DQ) nach 2, 24 und 168 Stunden Wasserlagerung von Spanplatten aus Fichte. Die bei 220°C vorbehandelten Späne sowie unbehandelte Referenzspäne wurden mit MUPF und PMDI zu Platten verpresst.

In Abbildung 21 ist die Wasseraufnahme (WA) der Spanplatten dargestellt. Die WA wurde nach zwei, 24 und 168 Stunden gemessen. Nach zwei Stunden Wasserlagerung nehmen die MUPF-Platten aus unbehandelten Spänen 36% Wasser auf, nach 24 Stunden rund 70% und nach 168 Stunden 86%. Durch thermische Modifizierung bei 220°C kann die WA auf 10%, 30% und 60% nach zwei, 24 bzw. 168 Stunden reduziert werden. Die PMDI-gebundenen Platten aus unbehandelten Spänen weisen eine WA von 8% (zwei Stunden), 20% (24 Stunden) und 57% (168 Stunden) auf. Die Vorbehandlung reduziert die WA auf 6%, 18% und 47% nach zwei, 24 und 168 Stunden Wasserlagerung.

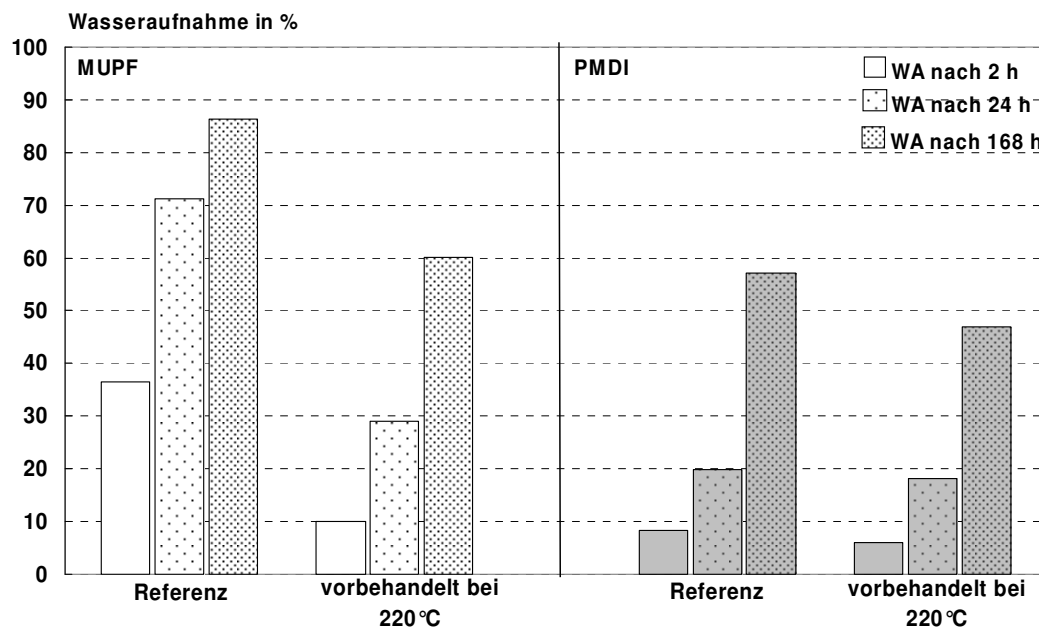


Abbildung 21: Wasseraufnahme (WA) nach 2, 24 und 168 Stunden Wasserlagerung von Spanplatten aus Fichte. Die bei 220°C vorbehandelten Späne sowie unbehandelte Referenzspäne wurden mit MUPF und PMDI zu Platten verpresst.

In Tabelle 10 sind die Verhältnisse der Dickenquellung nach zwei zu 24 bzw. 24 zu 168 Stunden Wasserlagerung aufgeführt. Die MUPF-gebundenen Spanplatten, sowohl Referenz als auch nach Vorbehandlung, zeigen innerhalb der ersten 24 Stunden ein gleiches Quellverhalten. Die Dickenzunahme nach 24 bis 168 Stunden fällt für die Referenz geringer aus, erkennbar an der größeren Verhältniszahl. Die maximale Dickenzunahme ist demnach bereits nach den ersten 24 Stunden nahezu erreicht. Die Platten aus modifizierten Spänen zeigen zwischen 24 und 168 Stunden Wasserlagerung einen stetigen, aber schwächeren Anstieg als zu Beginn. Die PMDI-Platten zeigen einen gleichmäßigen Anstieg der Dicken-

quellung im Verlauf der Wasserlagerung. Das kleinere Verhältnis der Dickenzunahme nach zwei gegenüber 24 Stunden der Platten aus thermisch modifizierten Spänen weist auf eine geringere Dickenquellung während der ersten zwei Stunden hin.

Tabelle 10: Verhältnis der Dickenquellung (DQ) nach 2 zu 24 und 24 zu 168 Stunden Wasserlagerung von Spanplatten aus Fichte; die bei 220°C vorbehandelten Späne sowie unbehandelte Referenzspäne wurden mit MUPF und PMDI verpresst

Klebstoff	Probe	DQ _{2h} / DQ _{24h}	DQ _{24h} / DQ _{168h}
MUPF	Referenz	0,34	0,92
	220°C	0,37	0,52
PMDI	Referenz	0,33	0,38
	220°C	0,25	0,40

Für die Spanplatten aus modifizierten Spänen erfolgt die Wasseraufnahme schneller als für die Referenzen, ersichtlich aus den kleineren Verhältniszahlen (Tabelle 11). Der Unterschied ist bei den MUPF-gebundenen Platten ausgeprägter als bei Verwendung von PMDI.

Tabelle 11: Verhältnis der Wasseraufnahme (WA) nach 2 zu 24 und 24 zu 168 Stunden Wasserlagerung von Spanplatten aus Fichte; die bei 220°C vorbehandelten Späne sowie unbehandelte Referenzspäne wurden mit MUPF und PMDI zu Platten verpresst

Klebstoff	Probe	WA _{2h} / WA _{24h}	WA _{24h} / WA _{168h}
MUPF	Referenz	0,52	0,82
	220°C	0,34	0,48
PMDI	Referenz	0,42	0,35
	220°C	0,33	0,39

Die irreversible Dickenquellung der Probekörper wurde durch Trocknung der Quellungsproben und anschließende Klimatisierung bei 20°C und 65% r. Lf. der Quellungsproben bestimmt (Abbildung 22). Die MUPF-Platte aus unbehandelten Spänen wies eine verbleibende Dickenänderung von etwa 10% auf. Die Vorbehandlung bei 220°C resultierte in einer irreversiblen Dickenquellung von 5,5%. Die PMDI-gebundenen Spanplatten zeigten eine geringere irreversible Dickenquellung. Die unbehandelte Referenzplatte führte zu einem Wert von 6%, während die thermische Modifizierung der Späne die verbleibende Dickenzunahme nach 168 Stunden Wasserlagerung auf 1,25% reduzierte.

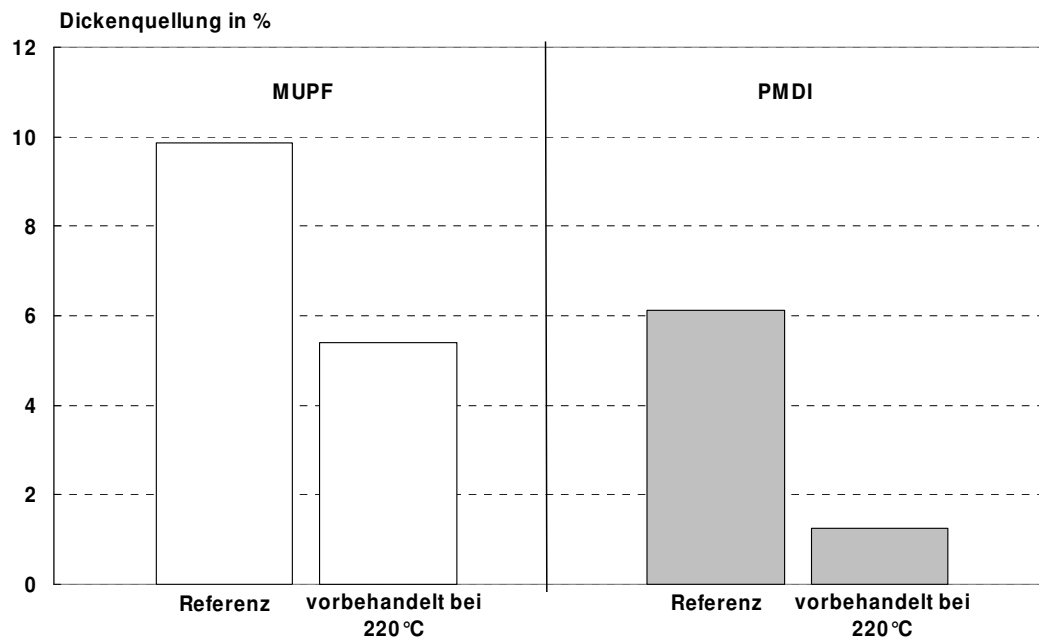


Abbildung 22: Irreversible Dickenquellung (IDQ) nach 168 Stunden Wasserlagerung von Spanplatten aus Fichte. Die bei 220°C vorbehandelten Späne sowie unbehandelte Referenzspäne wurden mit MUPF und PMDI zu Platten verpresst.

5.3.1.3 OSB aus Pappel

Die Pappel-OSB aus unbehandelten Strands erreicht nach Lagerung bei 20°C und 65% r. Lf. eine Ausgleichsfeuchte von etwa 8%, die Vorbehandlung der Strands reduziert die Gleichgewichtsfeuchte auf 5,8% (Abbildung 23).

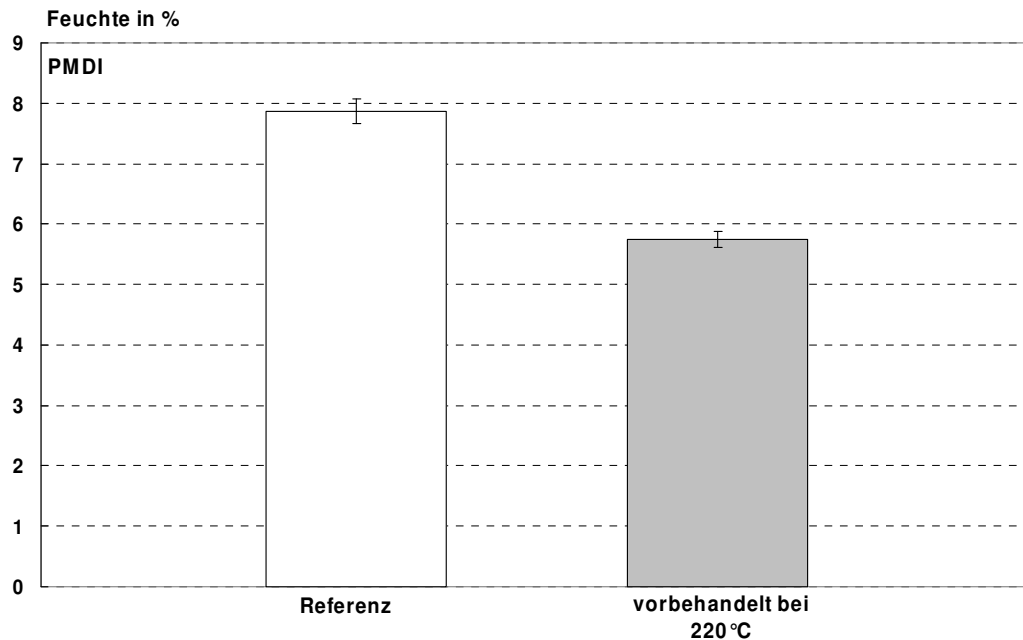


Abbildung 23: Gleichgewichtsfeuchte bei 20°C und 65% r. Lf. von OSB aus Pappel. Die bei 220°C vorbehandelten Strands sowie unbehandelte Strands wurden mit PMDI zu Platten verpresst.

Die Dickenquellung der mittels PMDI gebundenen Pappel-OSB ist in Abbildung 24 dargestellt. Die Referenz quillt um 2% nach zwei Stunden, 11% nach 24 und 20% nach 168 Stunden. Die Platte aus vorbehandelten Strands hat eine Dickenquellung von 0,6% nach zwei Stunden; die Verlängerung der Wasserlagerung auf 24 und 168 Stunden resultiert in einer Dickenquellung von etwa 4% bzw. 11%.

Die Wasseraufnahme während der Prüfung der Dickenquellung nach zwei, 24 und 168 Stunden ergibt für die Referenzplatte Werte von 6,5%, 34% und 70% nach den jeweiligen Zeitpunkten der Messung (Abbildung 25). Die Vorbehandlung der Pappel-Strands reduziert die Wasseraufnahme der Platte auf 4,6% nach zwei Stunden sowie auf 22% und 57% nach 24 bzw. 168 Stunden.

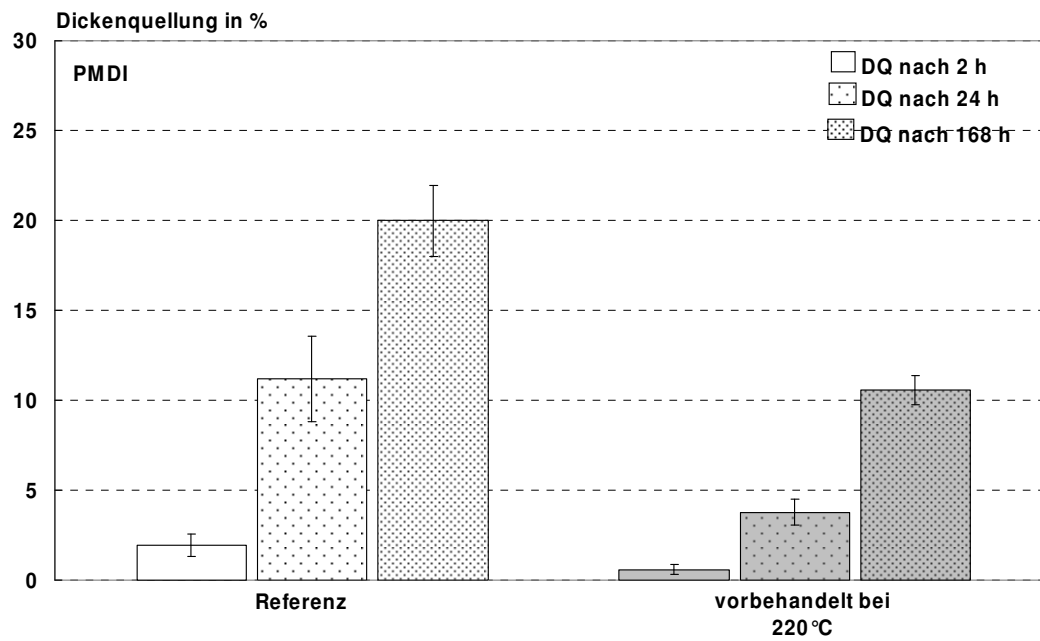


Abbildung 24: Dickenquellung (DQ) nach 2, 24 und 168 Stunden Wasserlagerung von OSB aus Pappel. Die bei 220°C vorbehandelten Strands sowie unbehandelte Referenzstrands wurden mit PMDI zu Platten verpresst.

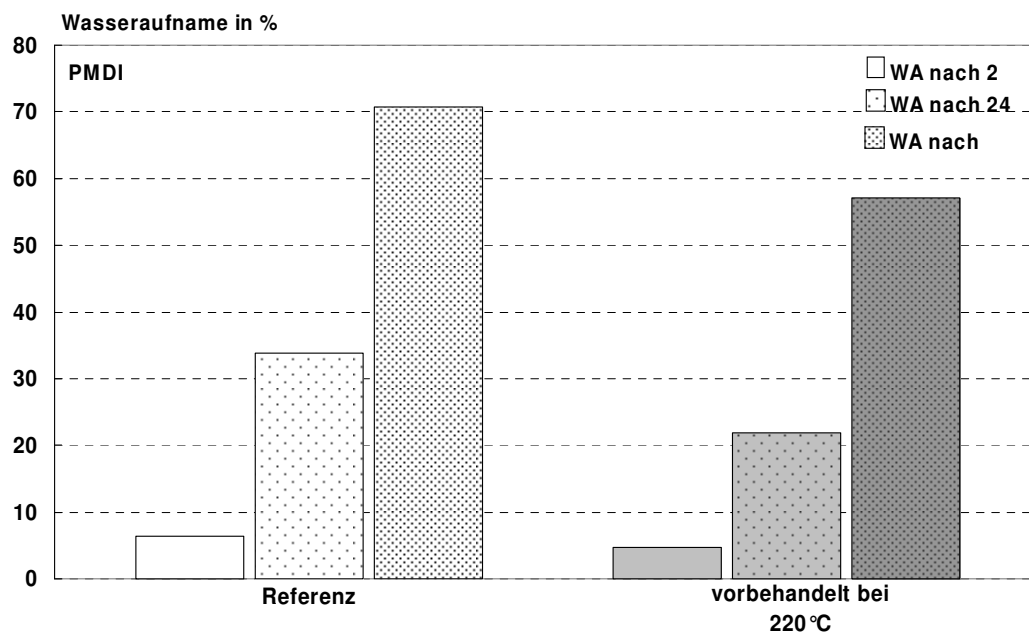


Abbildung 25: Wasseraufnahme (WA) nach 2, 24 und 168 Stunden Wasserlagerung von OSB aus Pappel. Die bei 220°C vorbehandelten Strands sowie unbehandelte Referenzstrands wurden mit PMDI zu Platten verpresst.

Die Dickenzunahme der Pappel-OSB verläuft sowohl für die Referenz als auch für die modifizierte Platte während der ersten 24 Stunden gleich stark, wie aus den Verhältniszahlen ersichtlich (Tabelle 12). Mit steigender Dauer der Wasserlagerung verlangsamt sich die Dickenquellung, für die Referenz stärker als für die Platte aus vorbehandelten Strands.

Tabelle 12: Verhältnis der Dickenquellung (DQ) nach 2 zu 24 und 24 zu 168 Stunden Wasserlagerung von OSB aus Pappel - die bei 220°C vorbehandelten Strands sowie unbehandelte Referenzstrands wurden mit PMDI zu Platten verpresst

Klebstoff	Probe	DQ _{2h} / DQ _{24h}	DQ _{24h} / DQ _{168h}
PMDI	Referenz	0,17	0,56
	220°C	0,15	0,36

Die Geschwindigkeit der Wasseraufnahme erfolgt wie bei der Dickenquellung zu Beginn der Wasserlagerung nach zwei bis 24 Stunden für die Referenz und die vorbehandelte Platte gleich schnell. Mit voranschreitender Dauer nimmt die Wasseraufnahmegeschwindigkeit ab, für die Referenz stärker als für die Platte aus modifizierten Strands, erkennbar aus der größeren Verhältniszahl für die Referenzprobe (Tabelle 13).

Tabelle 13: Verhältnis der Wasseraufnahme (WA) nach 2 zu 24 und 24 zu 168 Stunden Wasserlagerung von OSB aus Pappel - die bei 220°C vorbehandelten Strands sowie unbehandelte Referenzstrands wurden mit PMDI zu Platten verpresst

Klebstoff	Probe	WA _{2h} / WA _{24h}	WA _{24h} / WA _{168h}
PMDI	Referenz	0,19	0,48
	220°C	0,21	0,38

Analog zu den vorstehenden Versuchen wurde durch Trocknung und anschließende Klimatisierung der Quellungsproben die irreversible Dickenquellung bestimmt (Abbildung 26). Die unbehandelte Referenz liegt mit 7,5% verbliebener Dickenzunahme deutlich über der Platte aus vorbehandelten Strands (3,5%).

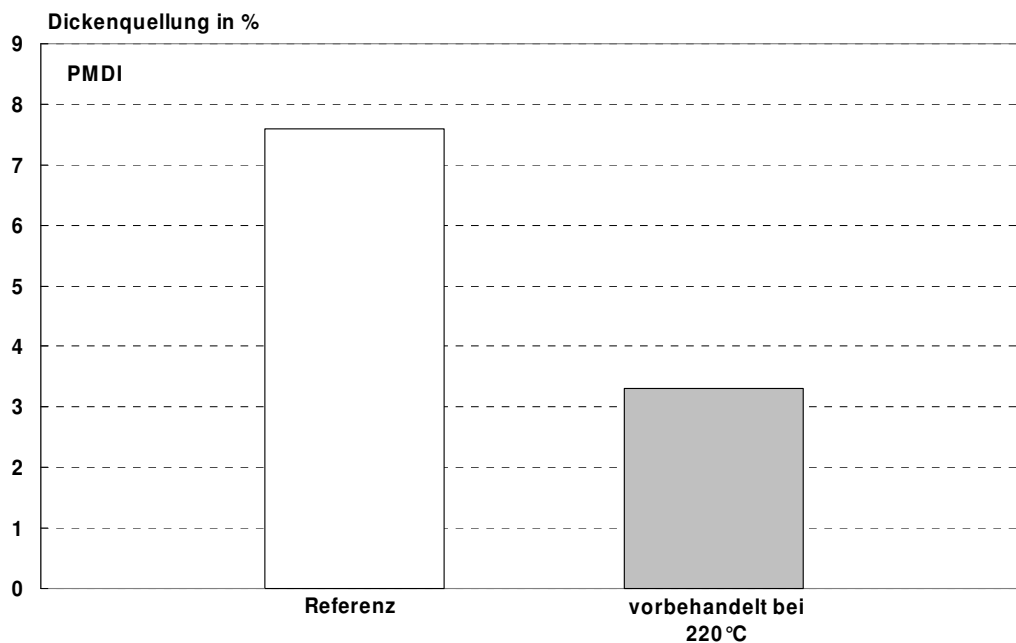


Abbildung 26: Irreversible Dickenquellung (IDQ) nach 168 Stunden Wasserlagerung von OSB aus Pappel. Die bei 220°C vorbehandelten Strands sowie unbehandelte Referenzstrands wurden mit PMDI zu Platten verpresst.

5.3.1.4 Diskussion

Die Gleichgewichtsfeuchte der Platten aus thermisch unter Sauerstoffabschluss modifizierten Spänen bzw. Strands fällt deutlich geringer aus als die der jeweiligen Referenz (Abbildung 15, Abbildung 19, Abbildung 23). Durch die Vorbehandlung werden in dem gewählten Temperaturbereich oberhalb 200°C hauptsächlich die thermisch instabilen Polyosen modifiziert (Byrne und Nagle 1997). Als sorptiv wirksamste Komponente im Holz tragen sie wesentlich zur Adsorption von Wasser bei. Durch die Vorbehandlung werden freie Hydroxylgruppen als Kontaktstelle für Wassermoleküle abgebaut. Buro (1954) führt außerdem an, dass es durch die Bildung von Etherbrücken zu einer engeren Verbindung zwischen den Fibrillen kommen kann, wodurch die Kapillarkondensation herabgesetzt wird. Das hygroskopische Verhalten eines Werkstoffes ist bindemittelabhängig; die höheren Ausgleichsfeuchten PF-gebundener Platten (Abbildung 15) sind auf die Hygroskopizität des Alkalis im PF-Harz zurückzuführen.

Außer der Gleichgewichtsfeuchte konnte auch die Dickenquellung durch die thermische Modifizierung deutlich herabgesetzt werden (Abbildung 16, Abbildung 20, Abbildung 24). Die Dickenquellung der Platten aus modifizierten Partikeln war nach 168stündiger Wasserlage-

rung für alle Plattentypen um 40% bis 50% gegenüber den Referenzplatten reduziert.

Dabei beruht die geringere Dickenquellung der Platten aus modifizierten Strands und Spänen nicht allein auf dem veränderten hygroskopischen Verhalten des Holzes. Wie unter 2.3 (Thermische Modifizierung von Holzwerkstoffen) beschrieben, setzt sich die Dickenquellung von Holzwerkstoffen aus einer reversiblen und irreversiblen Komponente zusammen. Der reversible Anteil umfasst das Ausmaß der natürlichen Quellung des Holzes. Die irreversible Komponente dagegen geht zum einen auf die Rückfederung (Springback) der verpressten Holzpartikel nach Verlassen der Presse zurück (Neußer *et al.* 1965, Gatchell *et al.* 1966, Ernst 1967) und zum anderen werden die durch den Pressvorgang induzierten Spannungen bei Wiederbefeuchten des Werkstoffes abgebaut (Deformationsrückgang), woraus die Dickenzunahme resultiert.

Durch die Vorbehandlung der Partikel findet eine Veränderung der chemischen Eigenschaften statt, die mittels HPLC dokumentiert werden konnte. Diese Eigenschaftsänderungen haben direkten Einfluss sowohl auf die reversible als auch irreversible Komponente der Dickenquellung. Die Hygroskopizität konnte durch den Abbau freier Hydroxylgruppen, wie durch Bestimmung der Ausgleichsfeuchte (Abbildung 9) gezeigt, vermindert werden. Zusätzlich deutet der Anstieg des Hydrolyserückstandes auf die Bildung hydrophober Reaktionsprodukte hin, die eine Wassereinlagerung im Holz erschweren, wie mittels HPLC nachgewiesen werden konnte (Tabelle 4). Bei den OSB aus Kiefer, deren Strands bei 220°C und 240°C modifiziert worden waren, war ein Einfluss der Behandlungstemperatur erkennbar (Abbildung 16). Mit höherer Temperatur fiel die Dickenquellung geringer aus, gleichermaßen war der Hydrolyserückstand nach Vorbehandlung bei 240°C gestiegen (Tabelle 4). Goroyias und Hale (2002 a) konnten an einzelnen OSB-Strands aus Kiefer (*Pinus sylvestris* L.) die Auswirkung einer thermischen Modifizierung auf eine verbesserte reversible Dickenquellung zeigen. Nach Hitzebehandlung in inerter Atmosphäre war die Dickenquellung für Proben, die bei 210°C und mehr behandelt worden waren, signifikant verbessert. Die irreversible Komponente, die bei Holzwerkstoffen die reversible überlagert, wird durch den teilweisen Abbau der Polyosen beeinflusst. In der nativen Holzmatrix wirken die Polyosen zwischen Lignin und Cellulose „vermittelnd“ und funktionieren wie ein natürlicher Weichmacher. Somit tragen sie wesentlich zur Nachgiebigkeit des Holzes bei. Aus diesem Grund bewirkt eine teilweise thermische Zersetzung der Polyosen nicht nur eine verminderte Feuchteaufnahme, sondern erhöht auch die Verdichtbarkeit der Holzpartikel (Hsu *et al.* 1988). Dadurch werden beim Pressvorgang weniger Spannungen im Werkstoff aufgebaut, die sich bei Wiederbefeuchten abbauen und damit zu einer Quellung der Platte führen können. Das bedeutet durch die

thermische Modifizierung wird die irreversible Komponente der Dickenquellung reduziert. Die Zersetzung der Polyosen ließ sich chromatographisch feststellen. Der Abbau der Pentosane – als Hauptbestandteil der Polyosen – konnte durch Abnahme der Xylose bei der Zuckerbestimmung mittels HPLC gezeigt werden. Der Einfluss der Vorbehandlungstemperatur zeigte sich auch durch eine stärkere Abnahme der Xylose bei den Kiefer-Strands, die bei 240°C vorbehandelt worden waren (Tabelle 4).

Absolut betrachtet fiel die Dickenquellung für die verschiedenen Plattentypen jedoch unterschiedlich stark aus. Dies ist auf verschiedene Einflussgrößen auf die Dickenquellung zurückzuführen. Seitens der Holzeigenschaften wird der Springback und Deformationsrückgang am stärksten durch die Rohdichte bestimmt. Für gleiche Plattendichte müssen Holzarten geringerer Rohdichte stärker verdichtet werden, so dass die induzierten Spannungen zunehmen. Bei den in dieser Arbeit eingesetzten Holzarten liegt die Rohdichte mit 430 bis 490 g/cm³ in der gleichen Größenordnung (Wagenführ 1989), so dass eine unterschiedlich hohe Verdichtung weitgehend ausgeschlossen wird. Aber nicht nur holartenspezifische Eigenschaften bezüglich hygroskopischem Verhalten und Verdichtbarkeit beeinflussen die Dickenquellung. Weitere Einflussgrößen stellen verfahrenstechnisch die Pressbedingungen und werkstoffspezifisch Plattendichte und -aufbau, Bindemittelanteil und -verteilung sowie die Partikelgeometrie dar. Für alle Plattentypen wurde als Zielrohndichte 620 kg/m³ (atro) bei einer Dicke von 16 mm angestrebt und das Pressprogramm (PZF 12 s/mm) konstant gehalten. Daher wird der Einfluss dieser Faktoren auf die unterschiedliche Dickenquellung als gering eingestuft.

Die größte Dickenzunahme infolge Wasserlagerung wiesen die Kiefer-OSB, gefolgt von Pappel-OSB und schließlich den Spanplatten aus Fichte auf. Neben dem Einfluss des Klebstoffes auf das Ausmaß der Dickenquellung, der an anderer Stelle diskutiert wird, sind die Unterschiede auf strukturelle Merkmale zurückzuführen. Da alle Plattentypen einschichtig aufgebaut und die OSB nicht orientiert gestreut worden waren, dürfte die Partikelgeometrie im Vordergrund stehen. Diesbezüglich sind sowohl das Verhältnis von Länge zu Breite als auch die Dicke entscheidend (Mottet 1967). So fanden Jorgensen und Odell (1961) beim Vergleich von Spanplatten aus Spänen unterschiedlicher Dicke eine um das dreifache erhöhte Dickenquellung bei den Platten aus dickeren Spänen. Rackwitz (1963) untersuchte die Dickenquellung von Spanplatten nach 24stündiger Wasserlagerung und fand eine um 40% höhere Dickenzunahme, wenn sich die Spandicke verdoppelte. Die irreversible Dickenquellung wird nach Brumbaugh (1960) durch dünnere Partikel herabgesetzt. Die Dicke der Pappel-Strands entsprach mit durchschnittlich 0,4 mm nur etwa der Hälfte der OSB-Strands aus

Kiefer (0,7 mm). Dementsprechend lag die Dickenquellung nach 24 Stunden Wasserlagerung für die OSB aus Pappel mit 11,2% (Abbildung 24) deutlich unter dem Wert für die Kiefer-OSB (19,5%, Abbildung 20).

Im Gegensatz zur Dickenquellung war die Wasseraufnahme nach thermischer Modifizierung je nach Plattentyp weniger stark verändert (Abbildung 17, Abbildung 21, Abbildung 25). Nach 168stündiger Wasserlagerung brachte die thermische Modifizierung eine Reduzierung der Wasseraufnahme um 20-30% bei Spanplatte, 20% bei den OSB aus Pappel und 5% bei den Kiefer-OSB. Neben der Spandicke sind auch die Abmessungen von Bedeutung für Dickenquellung und Wasseraufnahme. Die thermische Modifizierung führt durch den teilweisen Abbau der Polyosen und einer damit verbundenen Abnahme der Verformbarkeit zu einer Versprödung des Materials (Hsu *et al.* 1988). Daher ist eine Nachzerkleinerung während der thermischen Modifizierung selbst und besonders während der Beileimung nicht zu vermeiden. Durch den höheren Anteil kleinerer Partikel vor allem in der Fraktion modifizierter Strands, resultiert im Plattenaufbau eine Struktur mit mehr Fehlstellen. Der Begriff „Fehlstellen“ meint die Lücken, die an den Kontaktstellen der stoßweise in Plattenebene liegenden und sich überlagernden Partikel entstehen. Mit abnehmender Partikelgröße nimmt die Anzahl solcher Kontaktstellen zu; im Plattenquerschnitt steigt dadurch die frei zugängliche innere Oberfläche.

Vor allem bei den OSB aus Kiefer (Abbildung 17) waren die Unterschiede in der Wasseraufnahme zwischen Referenz und Platten aus modifizierten Strands gering. Aufgrund der vergleichsweise heterogenen Größenfraktion der Kiefern-Strands, konnte eine Plattenstruktur mit ungleich höherem Anteil von Fehlstellen entstehen als bei den OSB aus Pappel. Aufgrund der größeren Abmessungen der Pappel-Strands und einer homogenen Größenverteilung kann die Wegsamkeit für eindringendes Wasser zusätzlich eingeschränkt sein. Durch ihre Breite entsteht ein relativ geschichteter Plattenaufbau, bei dem die Strands in der Decklage absperrend wirken können. Dieser Effekt wird durch die geringen Abmessungen der Probekörper (50*50 mm²) verstärkt.

Dass aber bei verhältnismäßig hoher Wasseraufnahme die Dickenquellung bei den Platten aus thermisch modifizierten Strands und Spänen trotzdem geringer ausfällt als bei den unbehandelten Referenzproben, ist auf die erwähnten veränderten Holzeigenschaften zurückzuführen. Durch den Abbau freier Hydroxylgruppen als Kontaktstellen für Wassermoleküle zum einen und der Zunahme hydrophober Substanzen zum anderen, kann das eindringende Wasser nicht zur Quellung des Holzes beitragen, sondern lagert sich lediglich in den frei zugänglichen Hohlräumen ein. Goroyias und Hale (2002 b) konnten in ihrer Arbeit über den

Einfluss verlängerter Presszeiten auf Dickenquellung und Wasseraufnahme von OSB zwar eine Reduzierung der Dickenquellung feststellen, wenn durch den Pressvorgang im Plattenkern Temperaturen von mehr als 200°C erreicht wurden, die Wasseraufnahme blieb aber unverändert. Dies führen sie auf wassergefüllte Hohlräume in der Platte zurück.

Eine weitere denkbare Ursache ließe sich auf eine erhöhte Porosität des Holzes infolge der thermischen Belastung zurückführen. Vernois (2001) führt an, dass durch die poröse Struktur thermisch modifizierten Vollholzes bei Wasserlagerung mehr als 20% Wasser absorbiert werden können. Allerdings ist der Anteil holzeigener Porosität an der Gesamtwasseraufnahme eines Plattenwerkstoffes als gering einzuschätzen.

Die irreversible Dickenzunahme wurde nach Wasserlagerung, anschließender Trocknung und Klimatisierung bei 20°C und 65% r. Lf. bestimmt (Abbildung 18, Abbildung 22, Abbildung 26). Im Vergleich zur Dickenquellung nach Wasserlagerung lagen die Werte der Platten aus modifizierten Partikeln um 30% bis maximal 80% unter denen der Referenzen.

Bei den OSB aus Kiefer zeigte sich ein Einfluss der Vorbehandlungstemperatur. Der Unterschied zwischen der 220°C- und 240°C-Platte war bei der irreversiblen Dickenquellung ausgeprägter als bei der Dickenquellung während Wasserlagerung (Abbildung 16). Die irreversible Dickenquellung der 240°C-Platten lag um circa 50%, die der 220°C-Platte um etwa 30% unter denen der Referenz (Abbildung 18). Das heißt, die Vorbehandlungstemperatur hat größere Auswirkung auf einen reduzierten Deformationsrückgang – was wiederum auf eine stärkere thermische Zersetzung der Polyosen hinweist – als auf die herabgesetzte Hygroskopizität. Dies konnte auch durch die Vorversuche über den Einfluss von Masseabnahme infolge thermischer Modifizierung auf die Gleichgewichtsfeuchte gezeigt werden (Abbildung 9). Die Gleichgewichtsfeuchte näherte sich ab einer bestimmten Masseabnahme unabhängig der Behandlungstemperatur und –dauer einem konstanten Wert an. Das bedeutet die Auswirkung der thermischen Modifizierung auf die hygroskopische und damit reversible Komponente der Dickenquellung erreicht ein Maximum. Darüber hinaus ist der Einfluss von Temperatur und Zeit für diese Komponente der Dickenquellung nur noch gering. Die zunehmende Masseabnahme bei längerer Behandlungsdauer weist auf eine thermische Modifikation der Polyosen hin, die über den Abbau freier Hydroxylgruppen hinausgeht. Diese Zersetzung, durch HPLC aufgrund der stärkeren Abnahme des Xyloseanteils nach 240°C-Behandlung erkennbar (Tabelle 4), hat eine positive Auswirkung auf die Verdichtbarkeit der Partikel und damit auf den Deformationsrückgang. So war die irreversible Dickenquellung der PMDI-gebundenen OSB aus Kiefer um bis zu 48% gegenüber der Referenz reduziert. Die irreversible Dickenquellung der Pappel-OSB aus modifizierten Strands lag sogar um 57%

unter der Referenzprobe; die absolute sowie relative Abnahme des Xyloseanteils von Pappel nach thermischer Modifizierung war am größten (Tabelle 4). Die PMDI-gebundenen Platten aus modifizierten Fichtespänen wiesen mit 80% niedrigerer Werte als die Referenz die geringste irreversible Dickenquellung auf.

Dickenquellung und Wasseraufnahme hängen aber nicht nur von holzspezifischen und strukturellen Eigenschaften des Werkstoffes ab, sondern auch wesentlich vom eingesetzten Klebstoff, wie die Ergebnisse gezeigt haben. Durch Messung von Dickenquellung und Wasseraufnahme zu unterschiedlichen Zeitpunkten, sowie der Verlängerung des Untersuchungszeitraumes auf 168 Stunden konnte der Einfluss des Klebstoffes auf das Verhalten der Werkstoffe während einer Wasserlagerung dokumentiert werden. Die Verhältnisse von Maßänderung und Wasseraufnahme (Tabellen 10 bis 15) geben Auskunft über die zeitabhängige Zunahme von Dickenquellung und Wasserabsorption.

Um den Einfluss des Klebstoffes auf die Quelleigenschaften herauszustellen, werden in diesem Abschnitt nur die Referenzplatten der OSB aus Kiefer sowie die der Spanplatten aus Fichte betrachtet. Bei den OSB aus Kiefer (Abbildung 16) erreichten die PF- und MUPF-Platten nach den ersten zwei Stunden Wasserlagerung gleiche Werte für die Dickenquellung, die PMDI-Platten waren deutlich weniger gequollen. Die maximale Dickenquellung war für alle Platten nach 24 Stunden nahezu erreicht; die auf 168 Stunden verlängerte Wasserlagerung resultierte nur noch in einer geringen Zunahme der Dickenquellung.

Die MUPF-Platten wiesen nach Ablauf der Prüfdauer die größte Dickenquellung auf, die PMDI-gebundenen OSB hatten etwa einen gleichen Wert wie die PF-Platten erreicht. Das bedeutet im Vergleich zu den MUPF- und PF-Platten stieg die Dickenquellung der PMDI-Platten nach den ersten zwei Stunden stark an bzw. verlief während der ersten zwei Stunden langsamer. Dies wird auch durch die kleinere Verhältniszahl (0,47) der Dickenquellung von zwei zu 24 Stunden für die PMDI-Platten deutlich (Tabelle 10). Die PF- und MUPF-Platten zeigten etwa ein gleiches Quellverhalten. Die geringere Dickenquellung der PF-Platten zwischen zwei bis 24 Stunden wird durch die höhere Verhältniszahl (0,78) gegenüber den MUPF-Platten (0,69) deutlich. Wie erwähnt, war die Dickenzunahme nach 24 Stunden bis zum Ende der Prüfung nur noch gering, die Verhältniszahlen der Referenzplatten lagen für alle Klebstoffsysteme bei 0,9. Das bedeutet, die Klebstoffe beeinflussen vor allem bei einer kurzzeitigen Wasserlagerung das Quellverhalten.

Der relative Verlauf der Dickenquellung deckt sich mit dem der Wasseraufnahmegeschwindigkeit (Tabelle 11). Die Verhältniszahlen dokumentieren auch hier eine während der ersten zwei Stunden langsamere und zwischen zwei und 24 Stunden schnellere Wasserabsorption

der PMDI- (0,51) gegenüber den PF- (0,78) und MUPF-Platten (0,75). Bei einer Wasserlagerung über 24 Stunden hinaus sank die Absorptionsgeschwindigkeit der PMDI-Referenz (0,76) auf das Niveau der PF- (0,81) und MUPF-Platten (0,79). Im Gegensatz zur Dickenquellung nähert sich das 24 zu 168 Stunden- Verhältnis der Wasseraufnahme nicht dem Wert 1 an. Das bedeutet, dass die maximale Dickenquellung bereits nach 24 Stunden nahezu erreicht war, die Platten aber noch Wasser aufnehmen konnten. Dieser Sachverhalt deutet auf das bereits erwähnte Vorhandensein frei zugänglicher innerer Oberfläche hin.

Die höhere Wasserabsorption bei den PF-gebundenen OSB aus Kiefer lässt sich auf den hygroskopischen Charakter des Alkalis im PF-Harz zurückführen. Somit wird eine größere Menge Wasser absorbiert, ohne nennenswert zur Dickenquellung beizutragen. Die Dickenquellung der MUPF-gebundenen OSB aus Kiefer übersteigt die der PF-gebundenen – trotz geringerer Wasseraufnahme. Dieses scheinbar kontroverse Verhalten lässt sich durch die geringe Hydrolysebeständigkeit des MUPF-Harzes während der Wasserlagerung erklären (Dunky 2002). Die Wasserlagerung begünstigt den hydrolytischen Abbau und führt somit zu einem Verlust der Klebfestigkeit. In diesem Zusammenhang kann der Deformationsrückgang stärker in den Vordergrund rücken, wodurch eine gelockerte Plattenstruktur mit möglicherweise für Wasser frei zugänglichen Hohlräumen entsteht. Zudem kann es zu einem mechanischen Versagen der Klebstoffbrücken zwischen einzelnen Partikeln führen, wenn die Quellungsspannungen die Festigkeit der Klebstoffbrücken übersteigen. Darüber hinaus besteht die theoretische Möglichkeit, dass Wassermoleküle den ausgehärteten MUPF-Harz verdrängen, da nach Berechnungen die Adhäsion zwischen Wasser und Cellulose stärker ist als die zwischen Harnstoff-Formaldehyd-Oligomeren und Cellulose; für PF-Harz dagegen verhält es sich umgekehrt (Pizzi 1994).

Bei den Spanplatten aus Fichte stellte sich der Einfluss des Klebstoffes über den untersuchten Zeitraum deutlicher heraus als bei den OSB. Nicht nur bedingt durch die Plattenstruktur, sondern auch größerer inneren Oberfläche. Der Benetzungsgrad einzelner Späne ist höher als bei einem OSB-Strand und die Klebstoffeigenschaften treten mehr in den Vordergrund.

Absolut fiel die Dickenquellung für die PMDI-gebundenen Spanplatten nach den ersten 24 Stunden geringer aus; die Dickenzunahme erfolgte aber für beide Plattentypen gleich schnell (Tabelle 12), wie das Verhältnis der Dickenquellung von 2 gegenüber 24 Stunden zeigt (0,3). Die maximale Dickenquellung war bei den MUPF-gebundenen Spanplatten nach 24 Stunden nahezu erreicht und die Dickenzunahme nach Verlängern der Wasserlagerung auf 168 Stunden nur noch gering; der Verhältniswert stieg entsprechend auf 0,9. Die Dickenquellung der PMDI-Platten dagegen stieg nach 24 Stunden weiter stetig an und hatte nach

Ablauf des Untersuchungszeitraumes um das gleiche Maß zugenommen wie die MUPF-gebundene Spanplatte. Wie bei den OSB zeigt sich auch hier der nur kurzzeitige Effekt des Klebstoffes auf die Dickenquellung während Wasserlagerung. Im Gegensatz zu den OSB aus Kiefer deuten die ermittelten Verhältniszahlen für die PMDI-gebundenen Spanplatten nach Ablauf des untersuchten Zeitraumes noch nicht auf ein erreichtes Maximum von Dickenquellung und Wasseraufnahme hin (Tabelle 12 und 13). Dieser Unterschied ist aber eher auf bereits erwähnte strukturelle Unterschiede zurückzuführen. Der Unterschied der Spanplatten voneinander lässt sich aber direkt auf den Klebstoff beziehen. Durch die relativ größere innere Oberfläche von Spanplatten gegenüber OSB kann die Klebstoffeigenschaft stärker in den Vordergrund treten. Durch den höheren Benetzungsgrad von PMDI gegenüber Kondensationsharzen (Grunwald 2002) lässt sich auch ein höherer und damit engmaschiger Vernetzungsgrad annehmen, wodurch die Wasseraufnahme herabgesetzt wird.

5.3.2 Querzugfestigkeit

5.3.2.1 OSB aus Kiefer

In Abbildung 27 sind die Ergebnisse aus der Querzugfestigkeitsprüfung der Kiefer-OSB dargestellt. Die Werte der Referenzplatten betrugen zwischen 0,52 N/mm² für MUPF und 0,57 N/mm² für PF; die Querzugfestigkeit der PMDI-gebundenen Platten erreichte etwa 1,1 N/mm². Die Vorbehandlung der Strands resultierte in einer Abnahme der Querzugfestigkeit um 10 bis 15%; bezüglich der Höhe der Vorbehandlungstemperatur konnte kein Einfluss gefunden werden. Die Querzugfestigkeit der MUPF-Platten aus vorbehandelten Strands betrug etwa 0,45 N/mm² und für PMDI wurden Werte von 0,9 N/mm² erreicht; die Querzugfestigkeit der PF-Platten aus modifizierten Strands liegt bei 0,5 N/mm².

Nach dem Kochtest sank die Querzugfestigkeit auf 0,04 N/mm² (MUPF), 0,25 N/mm² (PF) bzw. 0,43 N/mm² (PMDI). Die Querzugfestigkeit der MUPF- und PF-Platten aus vorbehandelten Strands erreichte nach dem Kochtest etwa das gleiche Niveau wie deren Referenzplatten. Die Querzugfestigkeiten nach Kochtest der PMDI-Platten aus thermisch modifizierten Strands lagen mit etwa 0,52 N/mm² statistisch signifikant über denen der entsprechenden Referenz.

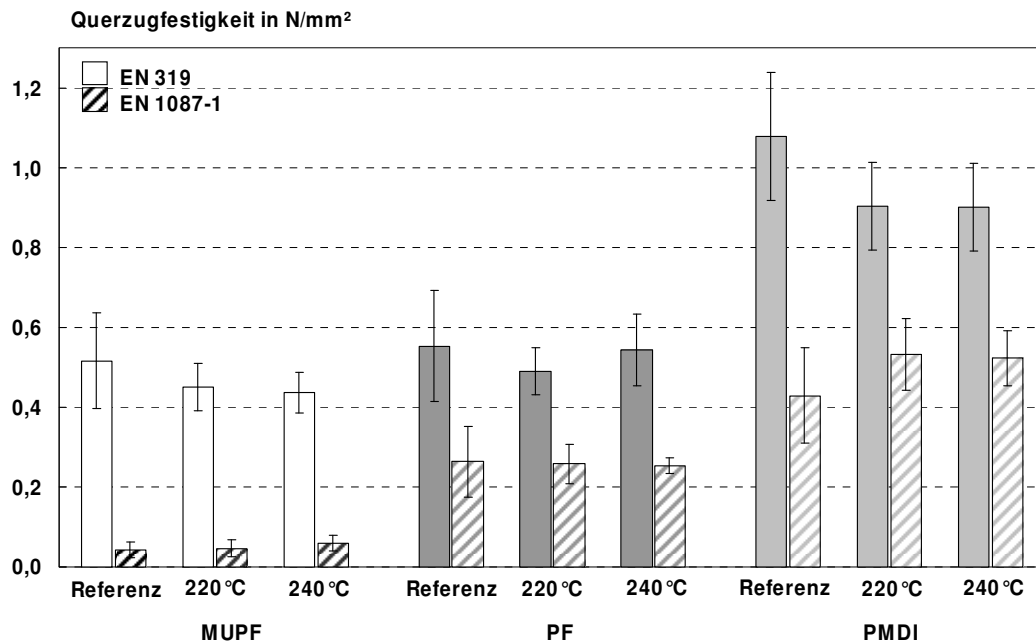


Abbildung 27: Querzugfestigkeit (QZ) trocken (EN 319) und nach Kochtest (EN 1087-1) von OSB aus Kiefer. Die bei 220°C und 240°C vorbehandelten Strands sowie unbehandelte Referenzstrands wurden mit MUPF, PF und PMDI zu Platten verpresst.

5.3.2.2 Spanplatten aus Fichte

Die Querzugfestigkeiten der MUPF- und PMDI-gebundenen Fichte-Spanplatten zeigen einen deutlichen Einfluss des eingesetzten Klebstoffes (Abbildung 28). Die Referenzplatten erreichen Werte von 0,95 N/mm² (MUPF) und 1,35 N/mm² (PMDI). Die Querzugfestigkeit der MUPF-Platten aus vorbehandelten Spänen erreicht mit 0,7 N/mm² einen um etwa 25% geringeren Wert als die Referenz. Die PMDI-gebundenen Spanplatten liegen nach Vorbehandlung mit etwa 1,4 N/mm² geringfügig, aber statistisch nicht signifikant über der Referenz.

Nach dem Kochtest beträgt die Querzugfestigkeit der Referenzplatten 0,55 N/mm² (MUPF) bzw. 1,05 N/mm² (PMDI). Die Querzugfestigkeit nach Kochtest der vorbehandelten MUPF-gebundenen Spanplatten liegt mit 0,4 N/mm² niedriger als die Referenz. Die Querzugfestigkeit der PMDI-Platte aus vorbehandelten Spänen beträgt nach Kochtest 1,17 N/mm² und liegt damit statistisch signifikant um 10% über der Referenz.

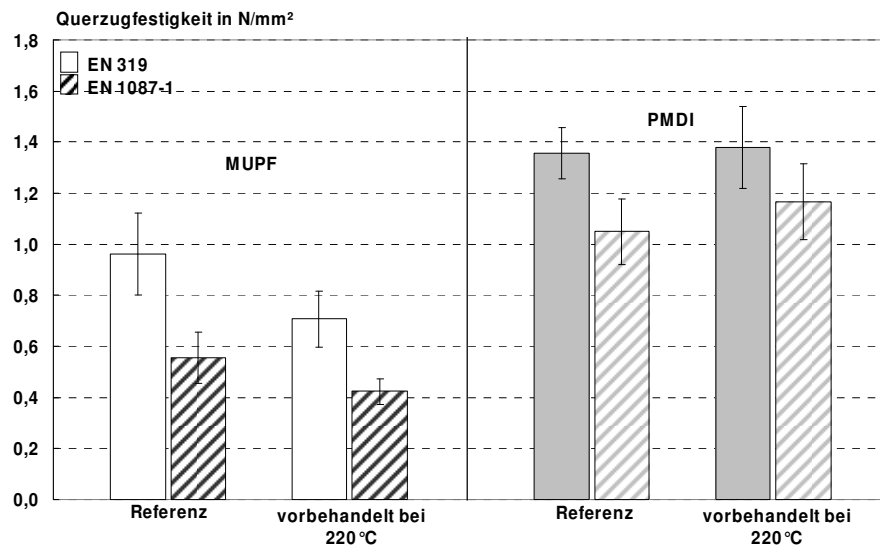


Abbildung 28: Querzugfestigkeit (QZ) trocken (EN 319) und nach Kochtest (EN 1087-1) von Spanplatten aus Fichte. Die bei 220°C vorbehandelten Späne sowie unbehandelte Referenzspäne wurden mit MUPF und PMDI zu Platten verpresst.

5.3.2.3 OSB aus Pappel

Die Ergebnisse der Querzugprüfung von OSB aus Pappel sind in Abbildung 29 dargestellt. Die Referenzplatte erreicht Werte von etwa 1 N/mm², nach der Vorbehandlung sinkt die Querzugfestigkeit auf 0,8 N/mm².

Nach dem Kochtest beträgt die Querzugfestigkeit der Referenz 0,75 N/mm² und die der vorbehandelten Platte nach dem Kochtest 0,55 N/mm²

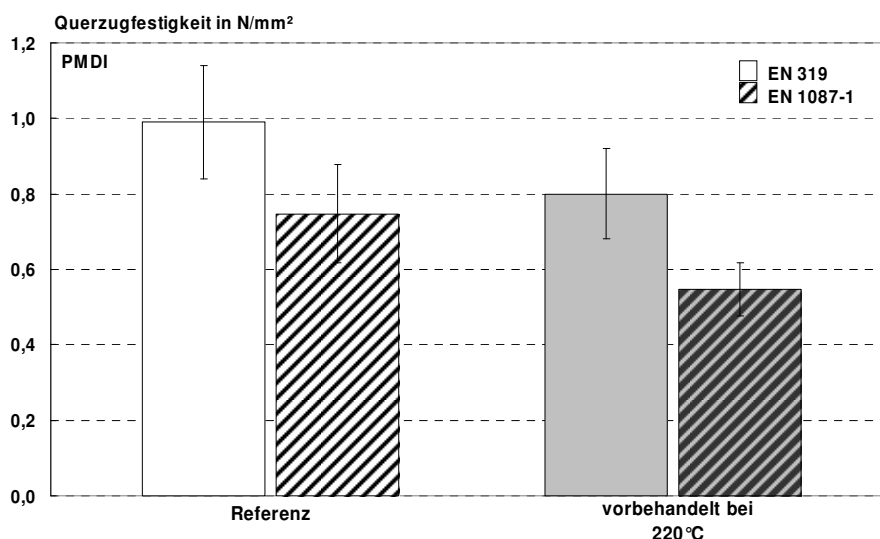


Abbildung 29: Querzugfestigkeit (QZ) trocken (EN 319) und nach Kochtest (EN 1087-1) von OSB aus Pappel. Die bei 220°C vorbehandelten Strands sowie unbehandelte Referenzstrands wurden mit PMDI zu Platten verpresst.

5.3.2.4 Diskussion

Die Querkzugfestigkeit hängt primär vom verwendeten Klebstoff ab. Neben dem Klebstoffanteil, der in diesen Untersuchungen für die Kondensationsharze mit 8% (MUPF) bis 10% (PF) über dem von PMDI (5%) liegt, sind die Bindungsmechanismen von Einfluss. Aufgrund unterschiedlicher Bindungsenergien erreichen MUPF- und PF-gebundene Platten geringere Querkzugfestigkeit als bei Verwendung von PMDI. Die Adhäsion der eingesetzten Klebstoffe beruht hauptsächlich auf der Ausbildung sekundärer Kräfte. Dabei handelt es sich bei den Kondensationsharzen vor allem um Van der Waals-Kräfte und bei PMDI um die Ausbildung von Wasserstoffbrückenbindungen (Pizzi 1994). Nach dem Kochtest nahm die Querkzugfestigkeit erwartungsgemäß ab, das Ausmaß wird sehr deutlich vom Klebstoff beeinflusst. Bei einem direkten Vergleich der Kondensationsharze fällt der starke Abfall der Querkzugfestigkeit nach Kochtest besonders auf. Während die trocken bestimmte Querkzugfestigkeit der PF- und MUPF-gebundenen OSB aus Kiefer etwa die gleichen Werte erreichte, hatte die Querkzugfestigkeit der MUPF-Platten nach dem Kochtest um etwa 90%, die der PF-gebundenen Kiefer-OSB um etwa 50% abgenommen (Abbildung 27). Ursache dafür ist die geringere Hydrolysebeständigkeit des MUPF-Harzes. Die Aushärtung von Harnstoffharzen erfolgt in zwei Reaktionsstufen, einer alkalischen Methyloation und einer sauren Kondensation. Die Reversibilität des Methyloationsschrittes bedingt die geringe Hydrolysebeständigkeit von Harnstoffharzen bei Einwirken von Wasser, vor allem in Verbindung mit hohen Temperaturen. Die schwache Bindung zwischen dem Kohlenstoffatom der Methylenbrücke und dem Stickstoffatom des Harnstoffes (Dunky 2002) führt bei hohen Temperaturen und insbesondere unter Feuchteinfluss zu einem hydrolytischen Abbau des Klebharzes. Bei Phenolharzen dagegen ist die C–C-Bindung zwischen dem phenolischen Ring und der Methyloolgruppe des Phenols stabiler gegen Hitze und Feuchtigkeit als die C–N-Bindung zwischen der Methylool- und der Amidgruppe des Melamins im MUPF-Harz (Dunky 2002); zudem bilden PF-Harze im ausgehärteten Zustand engmaschig vernetzte, unschmelzbare Duroplaste (Römpf 2005). Die höhere Querkzugfestigkeit PMDI-gebundener Platten geht auf die hohe Resistenz gegen Hitze und die hohe Zugfestigkeit des verzweigten Polyharnstoffnetzwerkes zurück, das vor allem bei der Reaktion der Isocyanatgruppe mit Wasser gebildet wird (Grunwald 2002).

Die Querkzugfestigkeit der MUPF- und PF-Platten aus thermisch modifizierten Strands bzw. Spänen fiel geringer aus als ihre jeweilige Referenz. Dabei lag die Querkzugfestigkeit der PF- und MUPF-gebundenen OSB aus Kiefer um maximal 10% bzw. 15% und die der MUPF-gebundenen Spanplatte aus Fichte um rund 30% unter der Referenz (Abbildung 27, Abbildung 28). Wie erwähnt, beruht die Adhäsion der Kondensationsharze vor allem auf Van der Waals-

Kräften, deren Ausbildung von der Polarität des Substrates abhängt (Römpp 2005).

Mittels ESCA konnte gezeigt werden, dass der Sauerstoffgehalt nach der Vorbehandlung abnimmt (Tabelle 7). Mit gleichzeitiger Zunahme des Kohlenstoffgehaltes resultiert somit nach thermischer Modifizierung ein geringeres O/C-Verhältnis. Dadurch sinkt die Polarität und die Ausbildung von Van der Waals-Kräften bei Platten aus thermisch modifiziertem Material ist weniger stark ausgeprägt, woraus Festigkeitsverluste resultieren. Die Abnahme der Polarität findet sich auch in der Zunahme des Kontaktwinkels nach thermischer Modifizierung bestätigt (Tabelle 6). Nach Börås und Gatenholm (1999) beruht ein vermindertes Verhältnis von O/C auf einer relativ höheren Extraktstoffkonzentration auf der Holzoberfläche. Šernek *et al.* (2004) fanden in ihren Untersuchungen, dass die Konzentration unpolarer Holzkomponenten auf der Oberfläche mit steigender Trocknungstemperatur zunimmt, was sich durch reduziertes O/C äußerte. Dies führen Hse und Kuo (1988) auf einen beschleunigten Wassertransport bei hohen Temperaturen zurück, wodurch nicht nur wasserlösliche Extraktstoffe an die Oberfläche gelangen, sondern bei hohen Temperaturen auch wasserunlösliche Extraktstoffe über die Dampfphase.

Der verhältnismäßig geringere Verlust der Querkzugfestigkeit der PF- gegenüber den MUPF- gebundenen OSB aus modifizierten Strands gegenüber der Referenz lässt sich auf die Zunahme von Carbonylverbindungen infolge der thermischen Modifizierung zurückzuführen. Durch ihre phenolische Hydroxylgruppe weisen Phenolharze gegenüber Carbonylverbindungen eine hohe Reaktivität auf (Römpp 2005). Daher kann angenommen werden, dass die verminderte Adhäsion aufgrund gesunkener Polarität wiederum durch den gestiegenen Gehalt von Carbonylverbindungen zu einem gewissen Grad kompensiert wird.

Neben dem reduzierten O/C-Verhältnis gilt nach Börås und Gatenholm (1999) und Šernek *et al.* (2004) auch eine Zunahme des Verhältnisses von C1/C2, das heißt ein höherer Anteil von C-H- gegenüber C-O-Bindungen, als Indiz für eine Abnahme der Polarität. Die Zunahme des C1-Anteils führt Šernek *et al.* (2004) auf Kohlenwasserstoffverbindungen zurück, die auf der Oberfläche beim Abkühlen durch Kondensation angelagert werden. Damit gelten Extraktstoffwanderung an die Oberfläche und die Anlagerung von Kohlenwasserstoffverbindungen auf der Oberfläche als Hauptmechanismen für eine Änderung der chemischen Zusammensetzung thermisch belasteter Holzoberflächen.

Abweichend von den Resultaten, die Šernek *et al.* (2004) fanden, wiesen die Proben in dieser Arbeit jedoch nach thermischer Modifizierung eine Abnahme des Verhältnisses von C1/C2 auf, wie mittels ESCA bestimmt werden konnte (Tabelle 7); die einzige Ausnahme bildeten die Pappel-Strands. Dementsprechend wiesen die modifizierten Pappel-Strands auch einen

ungleich stärkeren Anstieg des Kontaktwinkels im Vergleich zu den übrigen Proben auf (Tabelle 6). Die Abnahme der Polarität aufgrund des gestiegenen C1/C2 und gesunkenen O/C wirkt sich auf die Benetzbarkeit der Oberfläche aus.

Die gute Verklebbarkeit von PMDI beruht neben seiner hohen Reaktivität auch auf einem im Vergleich zu wasserbasierenden Kondensationsharzen geringeren Benetzungswinkel, so dass das Eindringen in und die Benetzbarkeit der zu verklebenden Oberflächen besser erfolgen kann (Grunwald 2002). Durch die große Zunahme des Kontaktwinkels der modifizierten Pappel-Strands wird diese vorteilhafte Eigenschaft des PMDI stark eingeschränkt, woraus ein geringerer Benetzungsgrad durch den Klebstoff resultiert, der folglich zu Einbußen der Klebfestigkeit führt. So wiesen die PMDI-gebundenen OSB aus modifizierten Pappel-Strands mit 20% niedrigerer Querkzugfestigkeit gegenüber der Referenz die größte Abnahme im Vergleich zu den anderen PMDI-gebundenen Platten auf (Abbildung 29). Dieses Ergebnis widerspricht der von Paul und Ohlmeyer (2005) beschriebenen Annahme erhöhter Reaktivität von PMDI gegenüber thermisch modifizierter Holzoberflächen. Da die Reaktion von PMDI mit Holz auf den Gehalt reaktiver Wasserstoffatome in lignocellulosischem Material zurückgeht (Grunwald 2002), schließen Paul und Ohlmeyer (2005), dass eine Zunahme von Kohlenwasserstoffverbindungen, worauf eine Zunahme des Verhältnisses C1 / C2 hindeutet, die Anzahl reaktiver Wasserstoffatome erhöht, woraus eine gesteigerte Reaktionsrate des PMDI mit thermisch modifizierten Partikeln resultiert.

Ein weiterer Grund für die verhältnismäßig höchste Abnahme der Querkzugfestigkeit bei den OSB aus Pappel ist auf die Geometrie der Strands zurückzuführen. Durch die relativ homogenen Abmessungen der Strands ist der Plattenaufbau eher geschichtet als bei den OSB aus Kiefer, unterstützt durch die kleinen Probenabmessungen (50 x 50 mm²). Dadurch fällt der Anteil der für Partikelwerkstoffe charakteristischen mechanischen Verankerung der Späne untereinander geringer aus.

Trotz einer Abnahme des Verhältnisses von C1/C2, aber aufgrund des reduzierten O/C-Verhältnisses war eine Reduzierung der Polarität und damit der Benetzbarkeit auch bei den Strands aus Kiefer und den Fichtespänen durch Kontaktwinkelmessung festzustellen (Tabelle 6). Die Zunahme der Kontaktwinkel fiel dabei weniger stark als für die Pappel-Strands aus – und hier wiederum für die Kiefer-Strands höher als für die Fichtespäne. Somit lag die Querkzugfestigkeit der PMDI-gebundenen OSB aus Kiefer um 15% unter dem Referenzwert. Die Querkzugfestigkeit der PMDI-gebundenen Platten aus modifizierten Fichtespänen blieb unverändert, wobei neben dem geringeren Anstieg des Benetzungswinkels auch der erwähnte höhere Benetzungsgrad eine positive Wirkung hat.

Nach optischer Bewertung der Bruchbilder der Querkzugproben war sowohl für die Referenzen, als auch für Proben aus modifiziertem Spanmaterial Holzbruch erkennbar. Das bedeutet, dass die geringere Querkzugfestigkeit weniger auf eine mangelnde Klebfestigkeit als vielmehr auf eine geschwächte Holzmatrix zurückzuführen ist. Durch die thermische Modifizierung und damit einsetzender pyrolytischer Teilzersetzung vor allem der Polyosen, sinkt die holzeigene Festigkeit. Dieser Festigkeitsverlust lässt sich durch das Klebstoffsystem unterschiedlich stark kompensieren. Bei Verwendung von MUPF lag die Abnahme der Querkzugfestigkeit modifizierter Spanplatten um 30% unter der Referenz und blieb unverändert bei PMDI. Die Abnahme der Querkzugfestigkeit der modifizierten OSB aus Kiefer betrug für beide Klebstoffe 15%. Das unterschiedlich hohe Ausmaß der reduzierten Querkzugfestigkeit von Spanplatte gegenüber OSB lässt sich dabei auf die größere innere Oberfläche der Spanplatte zurückführen. Der Benetzungsgrad eines einzelnen Spans ist ungleich höher als der eines OSB-Strands. Durch die damit verbundene, größere Anzahl von Kontaktstellen zwischen Klebstoff und Holz, rückt der Einfluss der Holzeigenschaften auf die Verklebung in den Vordergrund.

Die Abnahme der Querkzugfestigkeit nach Kochtest fiel für die Platten aus modifizierten Partikeln weniger stark aus als für die jeweiligen Referenzplatten. Die Ausnahme bildeten auch hier die OSB aus Pappel aufgrund der erwähnten eingeschränkten Benetzbarkeit mit PMDI. Als Ursache ist die verminderte Dickenquellung der Platten aus vorbehandelten Strands oder Spänen anzuführen, wie bereits in Abschnitt 5.3.1.4 (Diskussion zur Dickenquellung) diskutiert wurde. Durch die erhöhte Verdichtbarkeit der Partikel infolge des teilweisen Abbaus der Polyosen werden beim Verpressen weniger Spannungen in die Platte induziert, die durch Befeuchten abgebaut werden und damit zu einem Deformationsrückgang führen.

Zusammenfassend gilt, dass die Querkzugfestigkeit von Plattenwerkstoffen aus modifiziertem Spanmaterial neben den spezifischen Einflussfaktoren (Plattenstruktur, Spangeometrie etc.) vom Grad der Modifizierung abhängt. Dadurch wird die Oberflächenchemie beeinflusst, die maßgeblich die Benetzbarkeit bestimmt. Darüber hinaus hängt die holzeigene Festigkeit von dem zunehmenden Abbau der Polyosen ab. Die Ergebnisse haben gezeigt, dass sich herkömmliche Klebstoffsysteme und -anteile eignen bzw. Festigkeitseinbußen zu einem gewissen Grad kompensierbar sind, wie bereits durch Paul und Ohlmeyer (2005) beschrieben. Die Änderung der chemischen Zusammensetzung der Holzoberfläche führt holzartenabhängig zu einer unterschiedlich hohen Abnahme der Polarität, einer Zunahme der Kontaktwinkel und somit zu verändertem Benetzungsverhalten. Bei den Platten aus Kiefer und Fichte scheint die Abnahme der Querkzugfestigkeit jedoch vor allem auf einer reduzierten holzeigenen Festigkeit

zu beruhen, während bei Pappel ein Zusammenwirken beider Einflüsse auf die Querkzugfestigkeit wahrscheinlich ist.

Aus den Ergebnissen folgt, dass die Querkzugfestigkeit wesentlich durch den Klebstoff beeinflusst wird, wobei weniger der Anteil als vielmehr Unterschiede der Bindungsmechanismen entscheidend sind. Weitere Einflussfaktoren sind Spangröße und Spanstruktur. Durch die Vorbehandlung findet eine Veränderung der chemischen Oberflächenzusammensetzung statt, die je nach Ausmaß zu Einbußen der Verklebungsgüte führen kann. Dennoch ist die Abnahme der Querkzugfestigkeit nach Vorbehandlung eher Resultat verminderter Holzfestigkeit als auf ein Versagen der Klebfuge zurückzuführen, worauf die Bruchbilder schließen lassen. Durch geeignete Klebstoffauswahl lässt sich verminderte Holzfestigkeit zu einem gewissen Grad kompensieren. Der Deformationsrückgang vorbehandelter Platten wirkt sich positiv auf die Querkzugfestigkeit nach Kochtest aus.

5.3.3 Nebenversuch zur Querkzugfestigkeit

Als wichtige Erkenntnis aus oben stehenden Ergebnissen haben die PF-Harz gebundenen Kiefer-OSB gezeigt, dass eine Verklebung von thermisch modifiziertem Nadelholz mittels Phenolharz möglich ist. Šernek *et al.* (2004) fanden in ihrer Arbeit insbesondere bei *Pinus taeda* L. eine Anfälligkeit für Inaktivierung, die insbesondere eine Verklebung mit PF-Harz einschränkt. Als mögliche Ursache führen sie neben der herabgesetzten Benetzbarkeit auch die Abnahme des pH-Wertes auf, wodurch die alkalische Aushärtung des PF-Harzes eingeschränkt sein kann. Die Abnahme des pH-Wertes war infolge der Vorbehandlung nur gering (Tabelle 5), die Zunahme des Kontaktwinkels jedoch deutlich (Tabelle 6). Im Unterschied zu den Ergebnissen von Šernek *et al.* (2004) wies die chemische Zusammensetzung der Oberfläche zwar eine Abnahme des O/C- aber keine Zunahme des C1/C2-Verhältnisses auf (Tabelle 7).

Untersuchungen von Kadlec (1980) an Furnieren aus Douglasie (*Pseudotsuga menziesii* L.) haben gezeigt, dass die Benetzbarkeit mit steigender Temperatur abnimmt, ein Abschleifen der Oberfläche die Benetzbarkeit jedoch verbessert. blieb die Holzoberfläche anschließend unbelassen, stellte sich erneut nach einer gewissen Zeitspanne eine Abnahme der Benetzbarkeit ein. Daher sollte in einem Nebenversuch ein eventueller zeitlicher Einfluss auf die Änderung der Oberflächenchemie und damit der Verklebungsgüte untersucht werden.

Hierzu wurden Kieferspäne mit PF-Harz zu Platten verpresst. Dabei wurden einer unbehandelten Referenz Platten aus thermisch modifizierten Spänen gegenübergestellt, die eine bzw. 168 Stunden nach ihrer Modifizierung (220°C für 30 Minuten) beleimt und zu Platten

verpresst wurden. Die Platten wurden anschließend auf ihre Querkzugfestigkeit, sowohl trocken (EN 319) als auch nach Kochtest (EN 1087-1) geprüft (Abbildung 30). Die Referenzplatte hat eine Querkzugfestigkeit von $0,9 \text{ N/mm}^2$, die Festigkeit der Platten aus modifizierten Spänen liegt mit rund $0,7 \text{ N/mm}^2$ um etwa 20% unter dem Referenzwert, unabhängig des Zeitpunktes der Plattenherstellung. Nach dem Kochtest sinkt die Querkzugfestigkeit der Referenz auf $0,68 \text{ N/mm}^2$, die der 1-Stunden-Platte auf $0,45 \text{ N/mm}^2$ und die der 168-Stunden-Platte auf $0,52 \text{ N/mm}^2$; damit liegt die Querkzugfestigkeit nach Kochtest für die 1-Stunden-Platte um ein Drittel und die der 168-Stunden-Platte um ein Viertel unter dem Referenzwert.

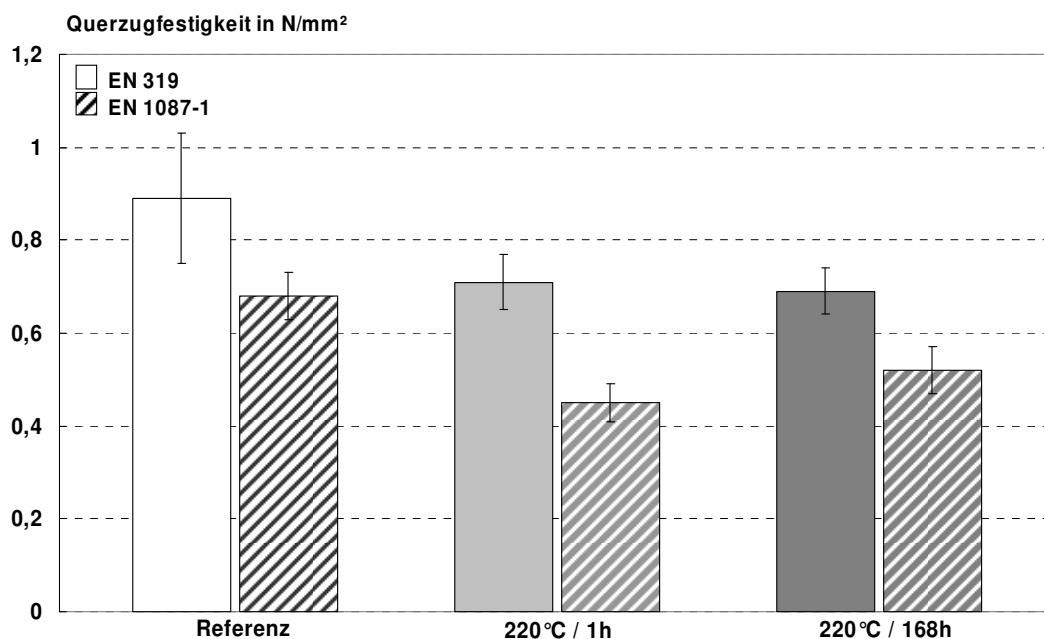


Abbildung 30: Querkzugfestigkeit trocken (EN 319) sowie nach Kochtest (EN 1087-1) von Kiefernspanplatten aus modifizierten Spänen im Vergleich zur unbehandelten Referenz. Die Platten aus vorbehandelten Spänen wurden 1 bzw. 168 Stunden nach der Vorbehandlung mit PF zu Platten verpresst.

Anhand der Ergebnisse aus der Querkzugprüfung ist kein Einfluss des Zeitpunktes der Beileimung auf die Verklebungsgüte festzustellen. Im Gegenteil, die Querkzugfestigkeit nach Kochtest fiel für die Platte, die 168 Stunden nach thermischer Modifizierung hergestellt wurde, höher aus im Vergleich zu der 1-Stunden-Platte.

Die geringere Querkzugfestigkeit von Platten aus vorbehandeltem Spanmaterial gegenüber der Referenz war bereits aus den vorhergehenden Untersuchungen bekannt.

Dies lässt sich einerseits auf eine Abnahme der Polarität zurückzuführen, wie durch ESCA

anhand der Abnahme des Sauerstoffgehaltes und damit des O/C-Verhältnisses dokumentiert werden konnte (Tabelle 7). Da die Adhäsion von Kondensationsharzen vor allem auf Van der Waals-Kräften beruht, deren Ausbildung von der Polarität des Substrates abhängt (Römpp 2005) kann die Ausbildung von Van der Waals-Kräften bei Platten aus thermisch modifiziertem Material eingeschränkt sein, woraus Festigkeitsverluste resultieren können. Andererseits führt der Abbau der Polyosen zu einem Verlust der holzeigenen Festigkeit und trägt dadurch zu einer Abnahme der Querkzugfestigkeit bei. Letzteres scheint von überwiegendem Einfluss zu sein, da nach optischer Beurteilung der Bruchbilder vor allem Holzbruch festzustellen war.

Die höhere Querkzugfestigkeit nach Kochtest der 168-Stunden-Platte lässt sich auf eine weiter vorangeschrittene Modifizierung zurückführen. Nach der Vorbehandlung werden die Späne vor Entnahme aus der Heiztrommel auf Temperaturen unter 200°C abgekühlt und anschließend bei Raumtemperatur gelagert. Bei der 1-Stunden-Platte schloss sich die Beileimung unmittelbar der Vorbehandlung an, so dass das Spangut vergleichsweise schneller abkühlen konnte, während die Späne, aus denen erst nach 168 Stunden Platten hergestellt werden sollten, entsprechend langsamer abkühlten. Somit kann die thermische Modifizierung zu einem gewissen Grad weiter vorangeschritten sein, was konkret einen stärkeren Abbau der Polyosen bedeutet. Wie bereits erwähnt, geht damit eine höhere Verdichtbarkeit des Holzes einher. Dadurch wird der Spannungsaufbau in der Platte während des Pressvorganges vermindert. Durch den Kochtest und die damit verbundene Durchfeuchtung der Probekörper führt ein Spannungsabbau der 168-Stunden-Platte zu einer geringeren Belastung der Klebstoffbrücken zwischen den einzelnen Spänen, wodurch die Querkzugfestigkeit im Vergleich zur 1-Stunden-Platte nach Kochtest höher ausfällt.

Zusammenfassend hat der Nebenversuch gezeigt, dass über den betrachteten Zeitraum zwischen Vorbehandlung und Plattenherstellung offenbar keine signifikante Veränderung der Oberflächenchemie stattfindet, die zu Einbußen der Verklebungsgüte führt.

5.3.4 Biegeeigenschaften

Der Biege-Elastizitätsmodul der OSB aus Kiefer wird um etwa 10% bis 30% im Vergleich zu den Referenzplatten reduziert (Abbildung 31), die Abnahme ist bei den MUPF-Platten am stärksten. Die MUPF-gebundene Referenz erreicht einen Biege-E-Modul von etwa 4500 N/mm², durch Vorbehandlung der Strands bei 220°C bzw. 240°C sinkt der E-Modul auf 3350 N/mm² bis 3150 N/mm². Die PF-Referenz weist einen E-Modul von etwa 3800 N/mm² auf, die PF-Platten aus vorbehandelten Strands erreichen Werte zwischen 3400 bis 3500 N/mm². Den höchsten Biege-Elastizitätsmodul erreichen die PMDI-gebundenen Platten; die Referenz erreicht 4700 N/mm², die Werte der Platten aus modifizierten Strands liegen zwischen 4200 und 4400 N/mm². Die Biegefestigkeit der Platten verringert sich durch die Vorbehandlung um 35% bis 50% gegenüber den Referenzen (Abbildung 32), ebenfalls mit der stärksten Abnahme bei den MUPF-Platten. Die Biegefestigkeit der Referenzen beträgt zwischen 26 N/mm² (MUPF, PF) und 35 N/mm² (PMDI); durch thermische Modifizierung der Strands sinkt die Biegefestigkeit auf 12,5 N/mm² (MUPF), 15 N/mm² (PF) bzw. etwa 22 N/mm² (PMDI). Die Höhe der Vorbehandlungstemperatur hat keinen signifikanten Einfluss auf die verminderte Biegefestigkeit.

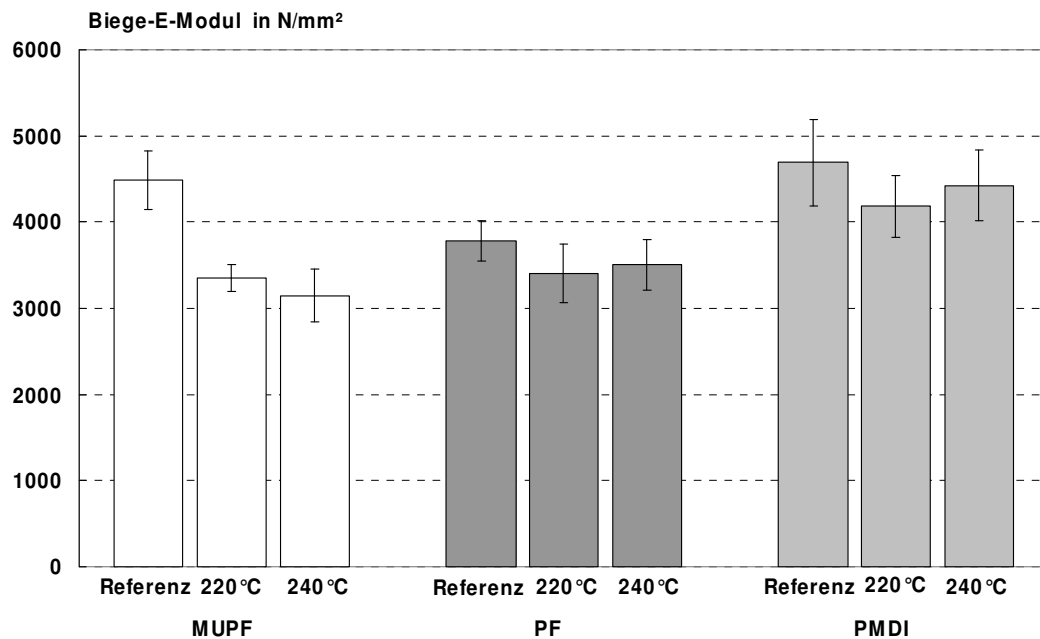


Abbildung 31: Biege-Elastizitätsmodul von OSB aus Kiefer. Die bei 220°C und 240°C vorbehandelten Strands sowie unbehandelte Referenzstrands wurden mit MUPF, PF und PMDI zu Platten verpresst.

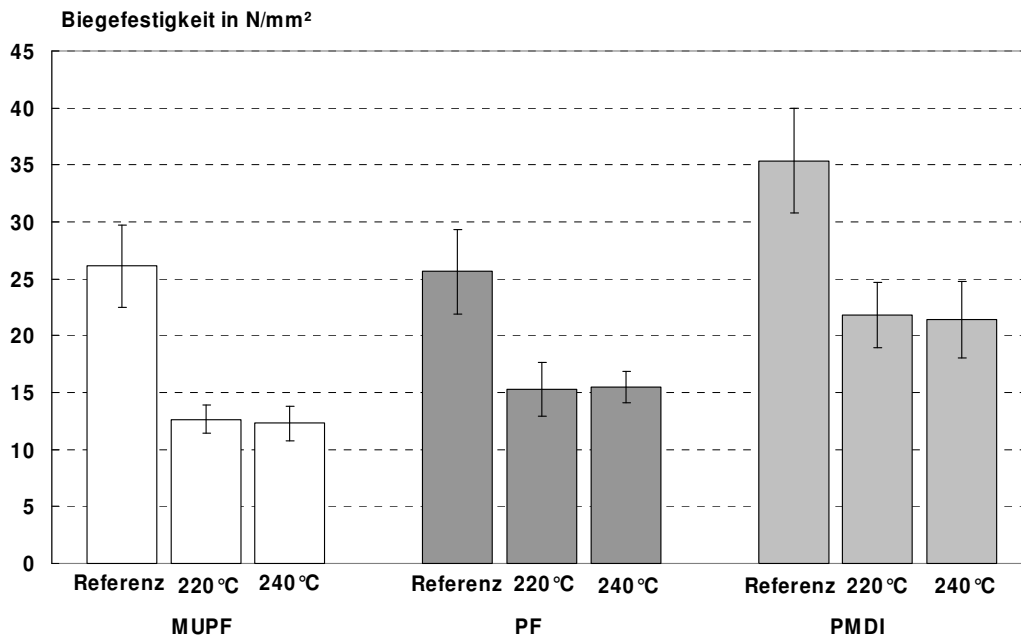


Abbildung 32: Biegefestigkeit von OSB aus Kiefer. Die bei 220°C und 240°C vorbehandelten Strands sowie unbehandelte Referenzstrands wurden mit MUPF, PF und PMDI zu Platten verpresst.

Die Biegeeigenschaften der Fichte-Spanplatten sind Abbildung 33 und Abbildung 34 zu entnehmen. Der Biege-Elastizitätsmodul der Referenzplatten beträgt 3350 N/mm² für MUPF und 3500 N/mm² für PMDI als Klebstoff. Für die Spanplatten aus vorbehandelten Fichtespänen werden Biege-E-Moduln von 3000 N/mm² (MUPF) und 3700 N/mm² (PMDI) bestimmt (Abbildung 33). Damit liegen die Werte der MUPF-Platte statistisch signifikant um 10% unter denen der Referenz. Die um 3% höheren Werte der modifizierten PMDI-Platten sind dagegen nicht signifikant. Die Biegefestigkeiten (Abbildung 34) der Fichte-Spanplatten erreichen 23 N/mm² (MUPF) und 24 N/mm² (PMDI). Durch die thermische Vorbehandlung verringern sich die Festigkeiten der MUPF-Platten um 40% auf 14 N/mm² und die der PMDI-Platten um 20% auf 19 N/mm² gegenüber der jeweiligen Referenz.

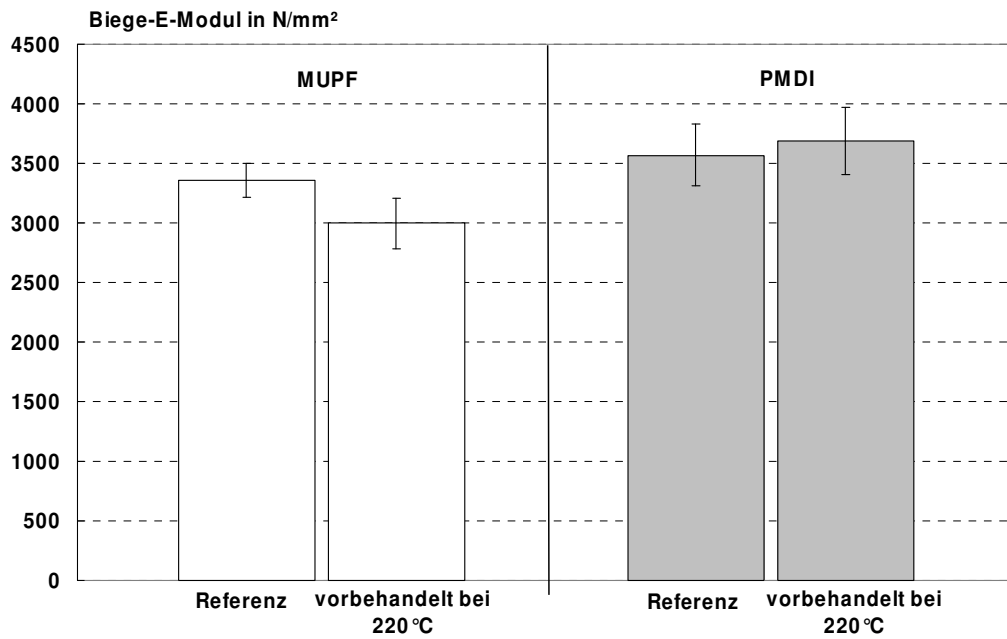


Abbildung 33: Biege-Elastizitätsmodul von Spanplatten aus Fichte. Die bei 220°C vorbehandelten Späne sowie unbehandelte Referenzspäne wurden mit MUPF und PMDI zu Platten verpresst.

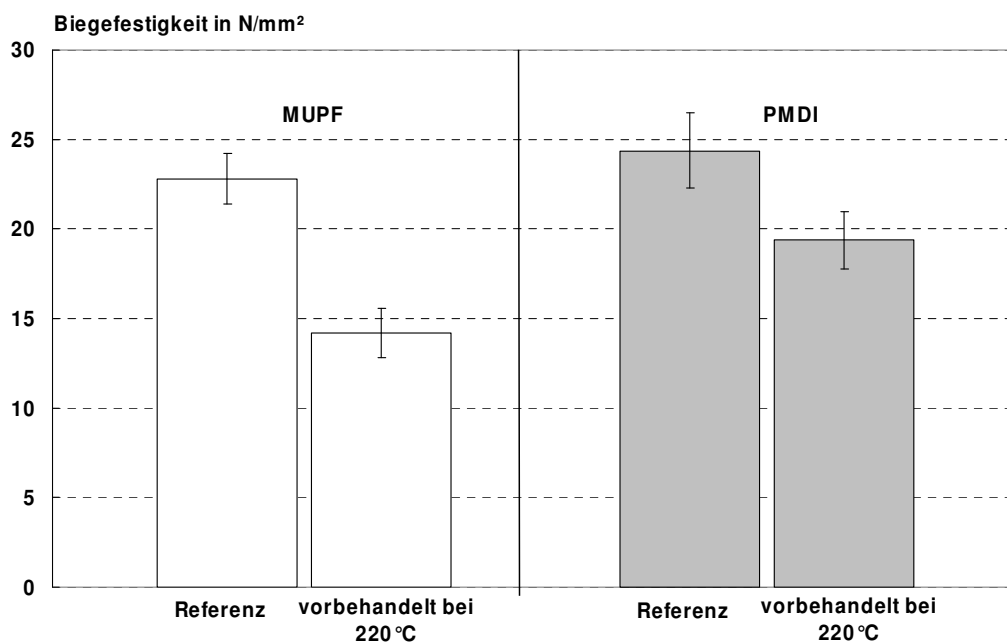


Abbildung 34: Biegefestigkeit von Spanplatten aus Fichte. Die bei 220°C vorbehandelten Späne sowie unbehandelte Referenzspäne wurden mit MUPF und PMDI zu Platten verpresst.

Die Prüfung der Biegeeigenschaften der Pappel-OSB ergibt für den Biege-E-Modul der unbehandelten Referenz etwa 5400 N/mm² und für die Platte aus vorbehandelten Strands 5750 N/mm²; der um 6% höhere Wert ist statistisch nicht signifikant (Abbildung 35). Die Biegefestigkeit (Abbildung 36) wird durch die Vorbehandlung deutlich verringert und liegt mit 27 N/mm² um etwa 40% unter der Referenz (47 N/mm²).

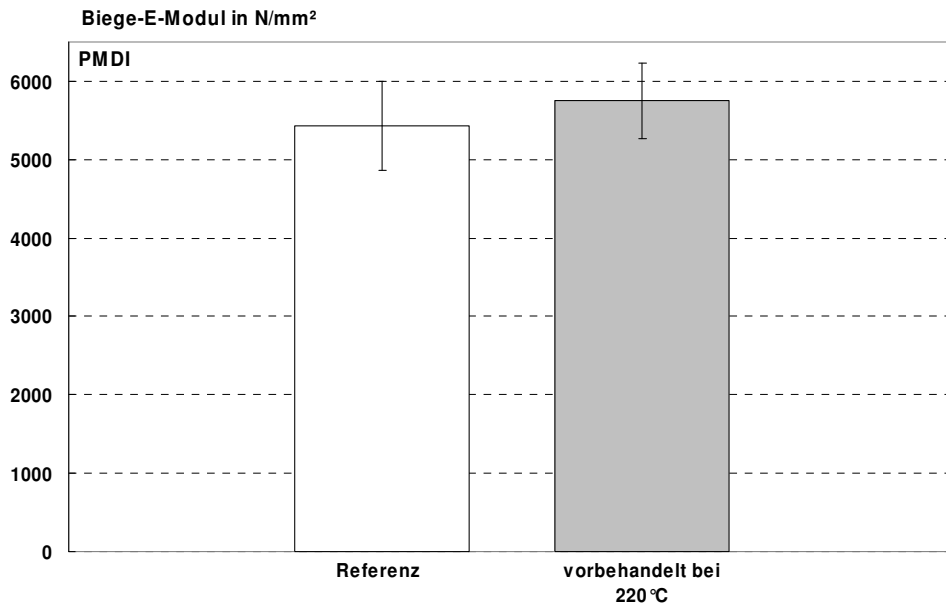


Abbildung 35: Biege-Elastizitätsmodul von OSB aus Pappel. Die bei 220°C vorbehandelten Strands sowie unbehandelte Referenzstrands wurden mit PMDI zu Platten verpresst.

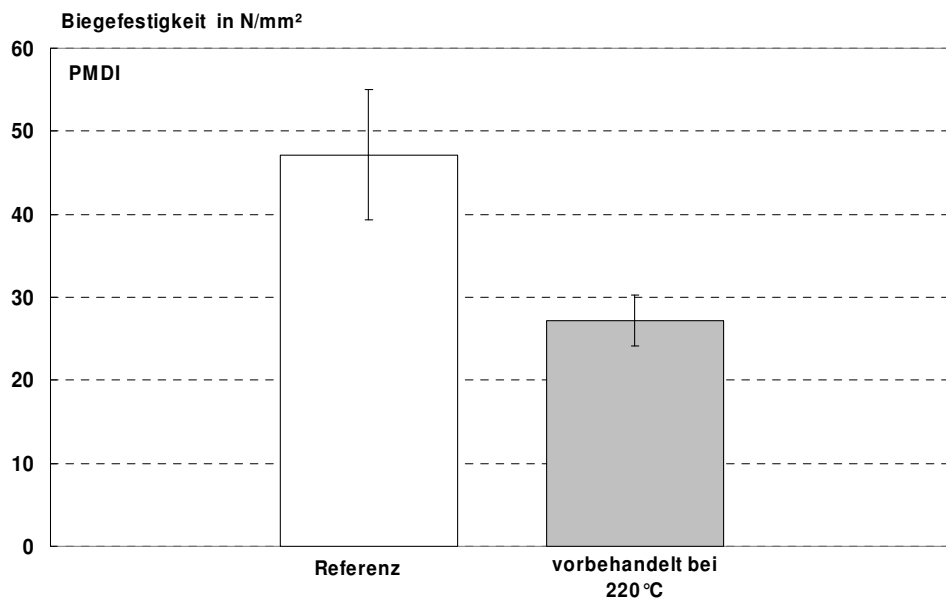


Abbildung 36: Biegefestigkeit von OSB aus Pappel. Die bei 220°C vorbehandelten Strands sowie unbehandelte Referenzstrands wurden mit PMDI zu Platten verpresst.

5.3.5 Diskussion

Die Ergebnisse aus der Prüfung der Biegeeigenschaften haben anhand der Referenzproben gezeigt, dass der Einfluss des Klebstoffsystems auf den Biege-Elastizitätsmodul weniger Bedeutung hat als auf die Biegefestigkeit. So erreichten die Spanplatten aus Fichte und OSB aus Kiefer, sowohl mit MUPF als auch mit PMDI gebunden, jeweils gleich hohe Biege-Elastizitätsmoduln (Abbildung 31, Abbildung 33); lediglich die PF-gebundene OSB-Referenz wies einen etwas geringeren Biege-Elastizitätsmodul auf.

Bei der Biegefestigkeit fiel neben dem Klebstoff auch der Plattentyp als Einflussfaktor auf. So konnten bei den Fichte-Spanplatten für beide Klebstoffe (MUPF und PMDI) etwa gleich hohe Werte erreicht werden (Abbildung 34), während bei den OSB aus Kiefer deutliche Unterschiede in Abhängigkeit des Klebstoffes festzustellen waren (Abbildung 32). Die Verwendung der Kondensationsharze (MUPF, PF) lieferte gleich hohe Biegefestigkeiten für die Referenzplatten, mit PMDI lag die Biegefestigkeit um etwa 35% darüber. Als Ursache für die abweichenden Ergebnisse zwischen OSB und Spanplatte ist die Partikelgeometrie zu nennen. In Abhängigkeit der Partikelgröße resultieren verschieden hohe innere Oberflächen der Platten, wovon der Benetzungsgrad durch Bindemittel abhängt. Bei einem relativ geringeren Benetzungsgrad eines OSB-Strands im Vergleich zu einem Span, ist anzunehmen, dass die charakteristischen Eigenschaften des Klebstoffsystems stärker in Erscheinung treten. Bei Spänen werden unterschiedliche Klebstofffestigkeiten durch den höheren Benetzungsgrad kompensiert. Wie bereits in Abschnitt 5.3.2.4 (Diskussion zur Querkzugfestigkeit) beschrieben, unterscheiden sich die Bindungskräfte von Kondensationsharzen und PMDI. Durch die Ausbildung von Wasserstoffbrückenbindungen werden bei Verwendung von PMDI stärkere Klebverbindungen ausgebildet als beim Einsatz von Kondensationsharzen, deren Adhäsion vor allem auf Van der Waals-Kräften basiert (Pizzi 1984).

Durch die thermische Modifizierung und die damit verbundene Teilzersetzung der Polyosen verliert Holz an Elastizität, wie bereits in Abschnitt 5.3.1.4 (Diskussion zur Dickenquellung) erwähnt. Daraus resultiert einerseits eine erhöhte Verdichtbarkeit der Holzmatrix (Hsu *et al.* 1988), die in Hinblick auf einen reduzierten Springback und Deformationsrückgang wünschenswert ist. Andererseits führt der Verlust von Elastizität zu einer zunehmenden Versprödung des Holzes, woraus vor allem eine Abnahme der dynamischen Festigkeiten resultiert, die für Vollholz bis zu 50% betragen kann (Schmid *et al.* 2004, Mayes und Oksanen 2002, Militz und Tjeerdsma 2000, Kamdem *et al.* 1999). Daher weisen die Platten aus modifizierten Partikeln deutlich geringere Biegefestigkeiten auf als ihre jeweilige Referenz.

Insbesondere bei den modifizierten OSB ist die Abnahme der Biegefestigkeit auch auf eine

reduzierte Strandgröße im Vergleich zur Referenz zurückzuführen. Bereits während der Vorbehandlung durch die Rotation der Trommel kommt es zu einer Nachzerkleinerung des Materials. Vor dem Beleimen wurde die Fraktion der Partikel kleiner als 3 mm ausgesiebt; der Anteil betrug nach thermischer Modifizierung etwa 10% und bei den unbehandelten Strands 3%. Zudem führt auch die Beleimung der Strands im Mischer zu einer Nachzerkleinerung, deren Ausmaß für die vorbehandelten Strands aufgrund der Versprödung höher ausfällt als für unbehandelte Strands. Die Auswirkung der Versprödung durch thermische Vorbehandlung auf eine Zunahme des Feinanteils konnte auch durch Ohlmeyer und Lukowsky (2004) festgestellt werden. Beim Zerspanen thermisch vorbehandeltem und unbehandeltem Holz stellten sie eine Zunahme des Feinanteils bei den thermisch modifizierten Hölzern fest. Buro (1954) führt die zunehmende Versprödung auf eine Vernetzung der Fibrillen durch die Bildung von Etherbrücken zurück. Dadurch wird zwar einerseits die Kapillarkondensation herabgesetzt, zum anderen entsteht eine engere Verbindung der Fibrillen untereinander.

In Abhängigkeit des Klebstoffes war bei den OSB aus Kiefer die Biegefestigkeit um bis zu 50% reduziert. Die Abnahme war für die MUPF-gebundenen Platten am stärksten, gefolgt von PF und PMDI. Im Gegensatz zu den Referenzproben, bei denen die Biegefestigkeit bei Verklebung mit PF und MUPF gleich hoch ausfiel, lag die Biegefestigkeit der modifizierten PF-Platten über denen der MUPF-Platten aus modifizierten Strands. Dieser klebstoffabhängige Unterschied ist auf die veränderte Oberflächenchemie der Strands nach thermischer Modifizierung zurückzuführen. Wie unter Abschnitt 5.3.2.4 (Diskussion zur Querzugfestigkeit) ausgeführt, nimmt durch die Vorbehandlung die Polarität der Holzoberfläche ab. Dadurch sinkt einerseits die Benetzbarkeit und andererseits wird die Ausbildung von Van der Waals-Kräften eingeschränkt. Als weitere Folge der thermischen Belastung kommt es zu einer Zunahme von Carbonylverbindungen. Aufgrund der hohen Reaktivität ihrer phenolische Hydroxylgruppe gegenüber Carbonylverbindungen (Römpf 2005), kann somit angenommen werden, dass bei Verklebung mit PF-Harz die gesunkene Polarität zu einem gewissen Grad kompensiert wird.

Bei den Spanplatten aus vorbehandelten Fichtespänen ist der Einfluss der modifizierten Oberflächenchemie auf die Verklebung noch deutlicher zu erkennen. Die Biegefestigkeit der Referenzproben wich nur gering voneinander ab, nach der Vorbehandlung lag die Biegefestigkeit der PMDI-gebundenen Platte deutlich über der MUPF-Platte aus modifizierten Spänen. Wie bereits bei der unterschiedlich hohen Abnahme der Querzugfestigkeit modifizierter Spanplatten in Abhängigkeit des Klebstoffes angeführt, stellt die höhere Anzahl von Kontaktstellen zwischen Klebstoff und Holz aufgrund eines höheren Benetzungsgrades von Spänen

die Holzeigenschaften auf die Verklebung in den Vordergrund. Im Vergleich der modifizierten PMDI-gebundenen Platten fällt die Abnahme der Biegefestigkeit bei den Pappel-OSB um 40% gegenüber der Referenz am höchsten aus. Das gleiche Verhalten konnte bereits bei der Querkzugfestigkeit gefunden werden. Die Ursache ist auch hier auf den starken Anstieg des Kontaktwinkels zurückzuführen, der aus der Abnahme der Polarität resultiert. Besonders bei den Pappel-Strands fand nicht nur durch die Abnahme des Sauerstoffgehaltes, sondern auch durch die Zunahme von Kohlenwasserstoffverbindungen auf der Oberfläche, ersichtlich aus dem gestiegenen Verhältnis $C1 / C2$, eine starke Veränderung der Oberflächenchemie statt. Im Gegensatz hierzu fand Tomek (1966) für Spanplatten aus hitzevergüteten Spänen der Zerreiche (*Quercus cerris*) eine Zunahme der Biegefestigkeit um 20%. Diesen Festigkeitsanstieg gegenüber der Referenz schreibt er der herabgesetzten Feuchteaufnahme zu, in deren Folge weniger Klebstoff durch die Späne aufgesaugt würde und damit ein höherer Klebstoffanteil zur Festigkeit beitragen kann. Tomek (1966) erwähnt aber auch, dass die herabgesetzte Feuchteaufnahme nur zu einem gewissen Grad vorteilhaft ist, bei weiter voranschreitender Modifizierung nimmt die Festigkeit durch thermische Zersetzung ab.

Die Ergebnisse haben gezeigt, dass insbesondere die Biegefestigkeit durch die thermische Modifizierung abnimmt, die Abnahme des Biege-Elastizitätsmoduls dagegen fällt geringer aus. Kubojima *et al.* (2000) konnten in ihrer Untersuchung über die Biegeeigenschaften thermisch behandelter Sitka Fichte (*Picea sitchensis* Carr.) zeigen, dass die größte Veränderung im plastischen Bereich stattfindet, während die Abnahme im elastischen Bereich nur gering ist. Daraus folgt, dass die Hauptfaktoren, die zur Minderung der Biegefestigkeit sowie der dynamischen Festigkeiten beitragen, Einbußen von Plastizität sowie Viskosität und nicht der Elastizität sind. Da die Polyosen zur Plastizität des Holzes beitragen (Hsu *et al.* 1988), ist die Abnahme der Biegefestigkeit besonders auf ihren Abbau zurückzuführen.

Zwar lassen sich durch geeignete Klebstoffe Festigkeitseinbußen zu einem gewissen Grad kompensieren, aber dennoch bedeutet die Festigkeitsabnahme eine Einschränkung in Bezug auf die Einsatzmöglichkeiten thermisch modifizierter Holzwerkstoffe, die in der jeweiligen Verwendung berücksichtigt werden müssen. So ist eine Verwendung in Bereichen hoher mechanischer und vor allem dynamischer Belastung kritisch zu beurteilen. Mögliche Lösungsansätze, die Biegefestigkeit zu verbessern, stellen neben der Erhöhung des Klebstoffanteils beispielsweise eine zusätzliche Beschichtung dar. Diesbezüglich wurden Nebenversuche durchgeführt, die in folgendem Abschnitt vorgestellt werden.

5.3.6 Nebenversuche zur Biegefestigkeit

In weiterführenden Versuchen wurden mögliche Ansätze geprüft, um insbesondere die Festigkeitseigenschaften der Platten aus thermisch modifiziertem Spanmaterial zu verbessern. Dabei wurde beispielhaft für Spanplatten aus Fichte der Effekt einer Beschichtung mit Deckfurnieren untersucht.

Hierzu wurden die MUPF- und PMDI-gebundenen Spanplatten aus obigen Untersuchungen zusätzlich beidseitig mit Kieferfurnier einer Dicke von 1,5 mm verklebt. Als Klebstoff wurde Phenolharz (Bakelite PF 2453 HW) eingesetzt, die Auftragsmenge betrug 200 g/m². Die Biegeeigenschaften der Platten wurden nach EN 310 (1993) geprüft, die Ergebnisse sind Abbildung 37 und Abbildung 38 zu entnehmen. Durch die Beschichtung liegen die absoluten Werte von Biege-E-Modul und Biegefestigkeit entlang der Richtung der Deckfurniere erwartungsgemäß über denen ohne zusätzliche Beschichtung (Abbildung 33 und Abbildung 34). Der Biege-E-Modul der unbeschichteten Platten liegt klebstoffabhängig um rund 11% (MUPF) unter dem Referenzwert bzw. weist keine Abnahme auf (PMDI). Auch mit zusätzlicher Beschichtung bleibt dieses Verhältnis erhalten, die MUPF-gebundene Platte hat gegenüber der Referenz einen etwas niedrigeren Biege-E-Modul. Die Biegefestigkeit der unbeschichteten Spanplatten liegt klebstoffabhängig um 20% (PMDI) bis etwa 40% (MUPF) unter der Referenz. Durch die Beschichtung lässt sich die relative Abnahme auf 8% (PMDI) bis 12% (MUPF) verringern. Damit bietet sich die zusätzliche Beplankung mit Deckfurnieren als gute Möglichkeit zur Verbesserung der Biegefestigkeit thermisch modifizierter Platten an.

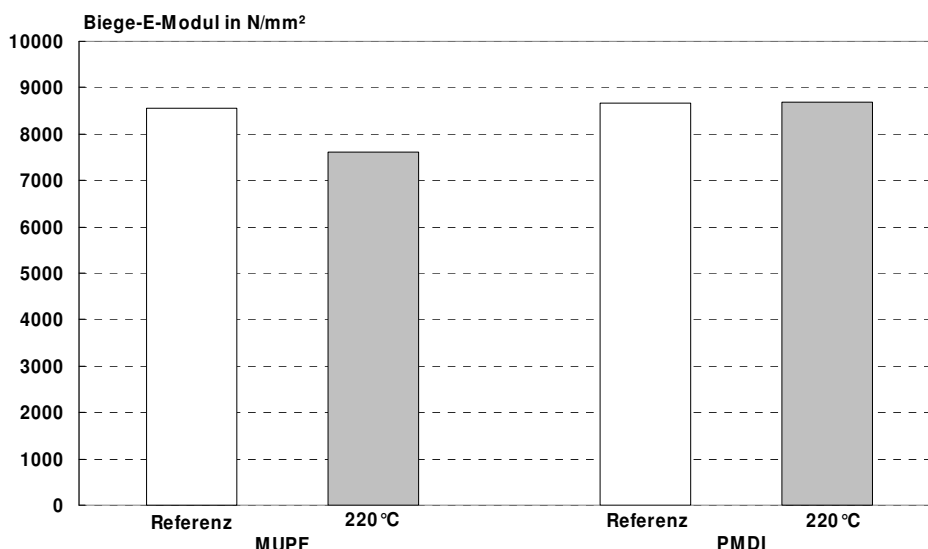


Abbildung 37: Biege-E-Modul MUPF- und PMDI-gebundener Fichtespanplatten aus unbehandelten und thermisch modifizierten Spänen, die zusätzlich mit Deckfurnieren aus Kiefer beschichtet wurden.

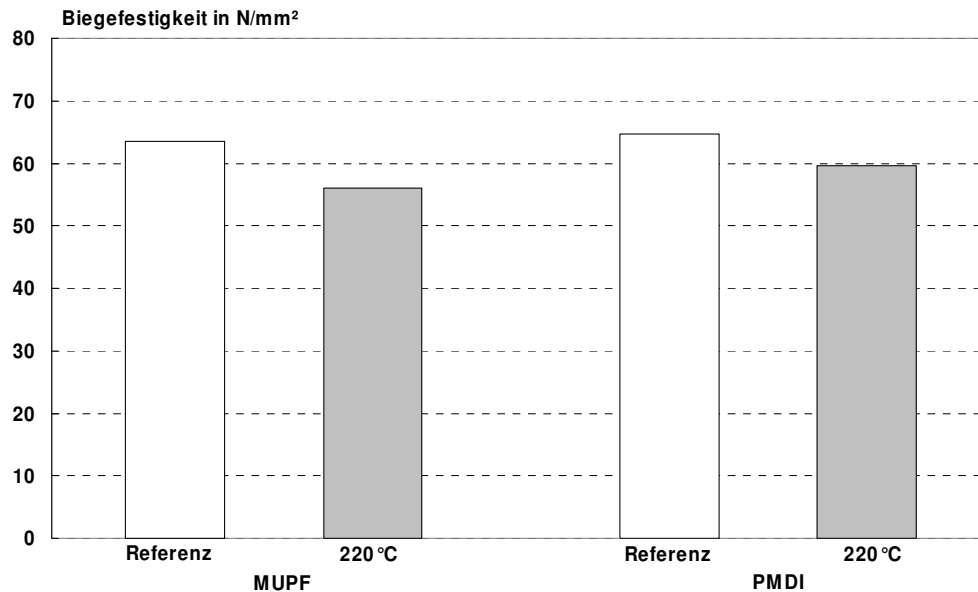


Abbildung 38: Biegefestigkeit MUPF- und PMDI-gebundener Fichtespanplatten aus unbehandelten und thermisch modifizierten Spänen, zusätzlich beschichtet mit Deckfurnieren aus Kiefer.

Als weitere Methode wurde ein Verbundwerkstoff aus unbehandelten und thermisch modifizierten Fichtespänen hergestellt. Ziel dieses Ansatzes war, die Schwachstellen einer thermischen Modifizierung, vor allem die Biegeeigenschaften, durch die Zugabe von unbehandelten Spänen zu kompensieren. Die Beleimung der bei 220°C für 30 Minuten vorbehandelten bzw. unbehandelten Späne erfolgte aufgrund der unterschiedlichen Ausgangsfeuchte getrennt. Als Klebstoff wurde PMDI eingesetzt und die Feuchte durch die Beleimung auf 10% eingestellt. Danach wurde das Spanmaterial im Verhältnis 1:1 gemischt, gestreut und zu einer Platte verpresst. Anschließend wurden neben den Biegeeigenschaften auch Querkzugfestigkeit, Feuchteaufnahme sowie Dickenquellung geprüft und die Resultate den Prüfergebnissen der PMDI-gebundenen Spanplatten aus obigen Versuchen gegenübergestellt. Durch die Kombination aus thermisch modifizierten mit unbehandelten Spänen soll ein Werkstoff entstehen, der eine reduzierte Dickenquellung und Feuchteaufnahme aufweist, mit möglichst unveränderten mechanischen Eigenschaften.

In Abbildung 39 und Abbildung 40 sind die Biegeeigenschaften dargestellt. Der Biege-E-Modul sowie die Biegefestigkeit der Verbundplatte übersteigen die Werte der Referenz sowie der Platte aus vorbehandelten Spänen. Aufgrund des Abbaus der Polyosen infolge der thermischen Modifizierung resultiert die Festigkeitsabnahme der Platte aus vorbehandelten Spänen. Durch den Verbund aus thermisch modifizierten und unbehandelten Spänen lassen sich diese Festigkeitseinbußen kompensieren.

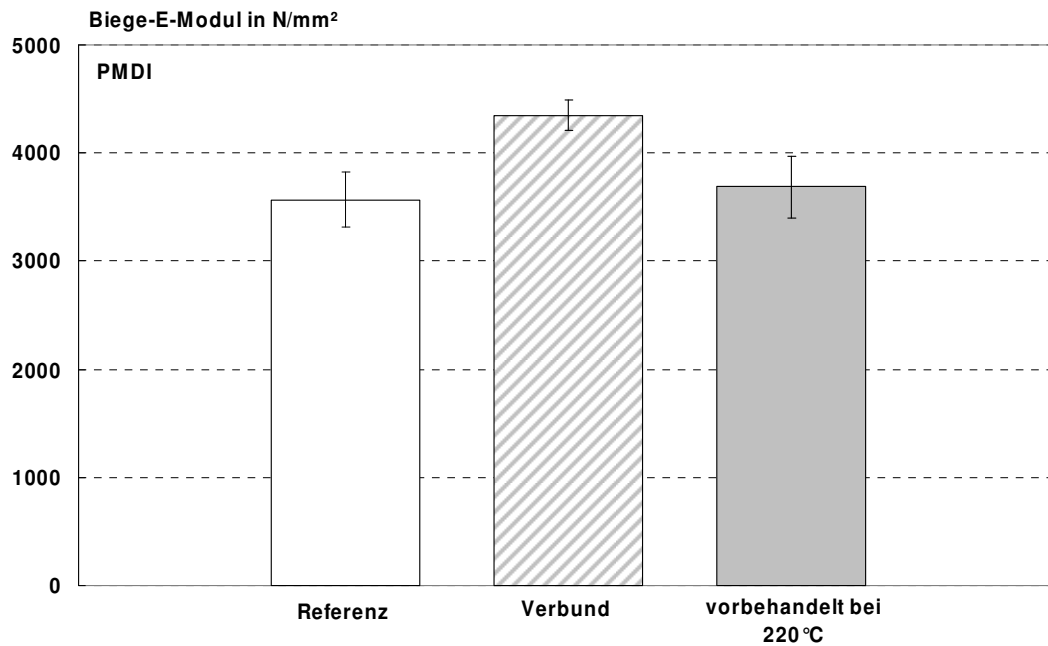


Abbildung 39: Biege-E-Modul PMDI-gebundener Fichtespanplatten aus unbehandelten und thermisch modifizierten Spänen sowie aus einem Verbund beider Spantypen.

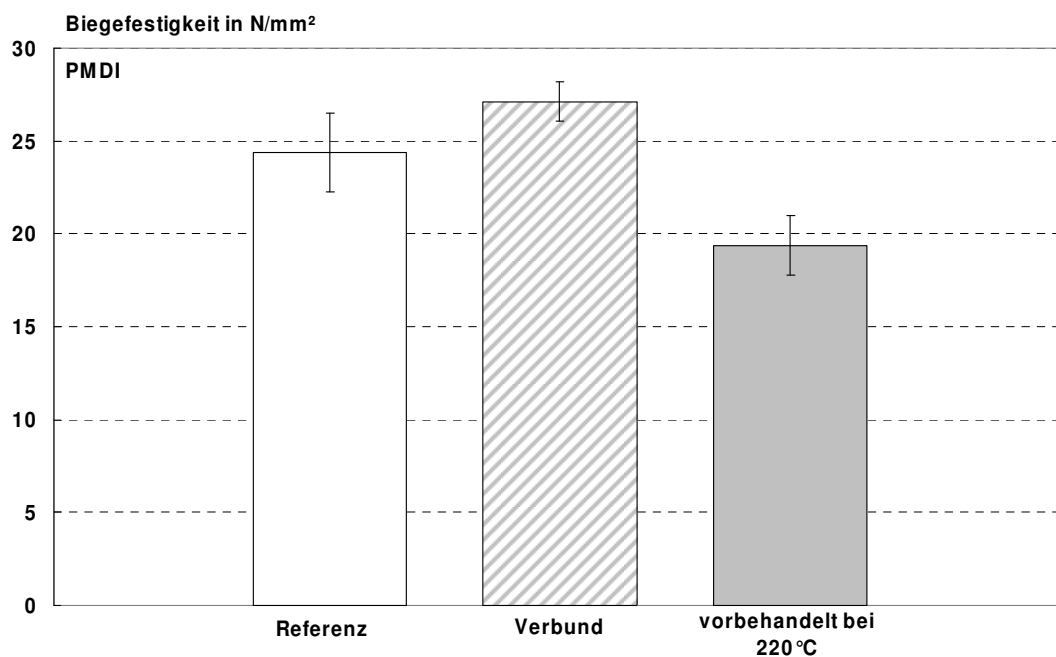


Abbildung 40: Biegefestigkeit PMDI-gebundener Fichtespanplatten aus unbehandelten und thermisch modifizierten Spänen sowie aus einem Verbund beider Spantypen.

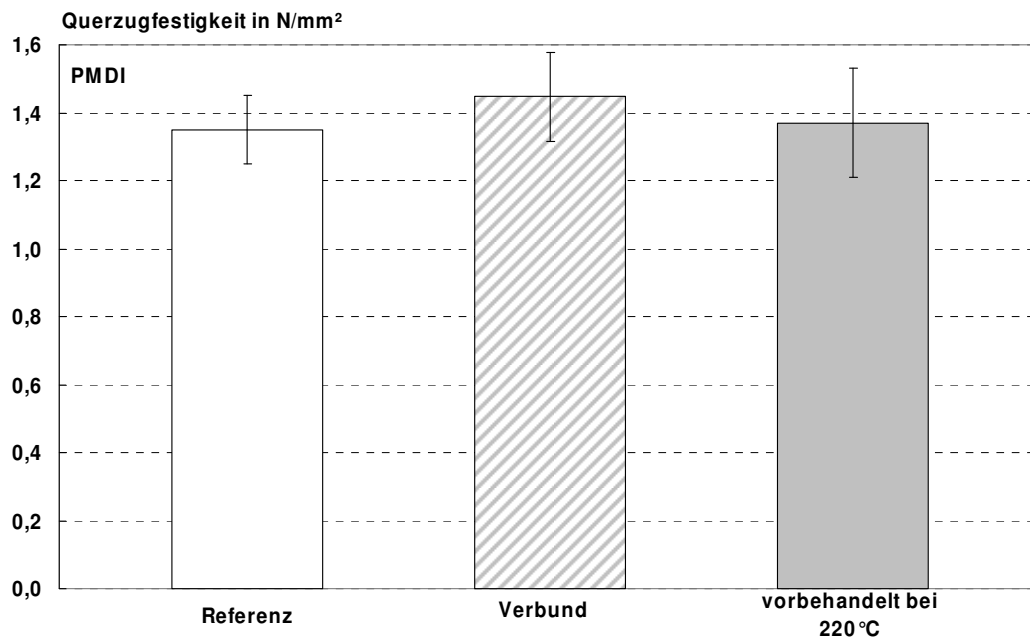


Abbildung 41: Querzugfestigkeit PMDI-gebundener Fichtespanplatten aus unbehandelten und thermisch modifizierten Spänen sowie aus einem Verbund beider Spantypen.

Die Querzugfestigkeit (Abbildung 41) bleibt unverändert, und liegt mit rund 1,5 N/mm² im Bereich von Referenz und vollständig modifizierter Platte. Das bedeutet, dass nicht nur die Verklebung thermisch modifizierter Partikel untereinander, sondern auch eine Verklebung mit unbehandelten Spänen uneingeschränkt möglich ist.

Bei der Feuchteaufnahme ist die Zusammensetzung der Verbundplatte und damit der Einfluss auf die Eigenschaften besonders gut zu erkennen (Abbildung 42). So stellt sich für den Verbundwerkstoff ein Wert ein, der mit 8,3% zwischen der Referenz und der vollständig modifizierten Platte liegt. Die Dickenquellung nach zwei, 24 und 168 Stunden Wasserlagerung ist in Abbildung 43 dargestellt. Während die Dickenquellung der Platte aus vorbehandelten Spänen über den gesamten Untersuchungszeitraum um 50% unter der Referenz liegt, zeigt sich bei dem Verbundwerkstoff erst mit zunehmender Dauer der Wasserlagerung ein Effekt der modifizierten Späne. Nach den ersten zwei Stunden besteht kein Unterschied zwischen Referenz und Verbundwerkstoff. Mit zunehmender Dauer der Wasserlagerung liegt die Dickenquellung des Verbundwerkstoffes nach 24 Stunden um 10% und nach 168 Stunden um 30% unter dem Referenzwert.

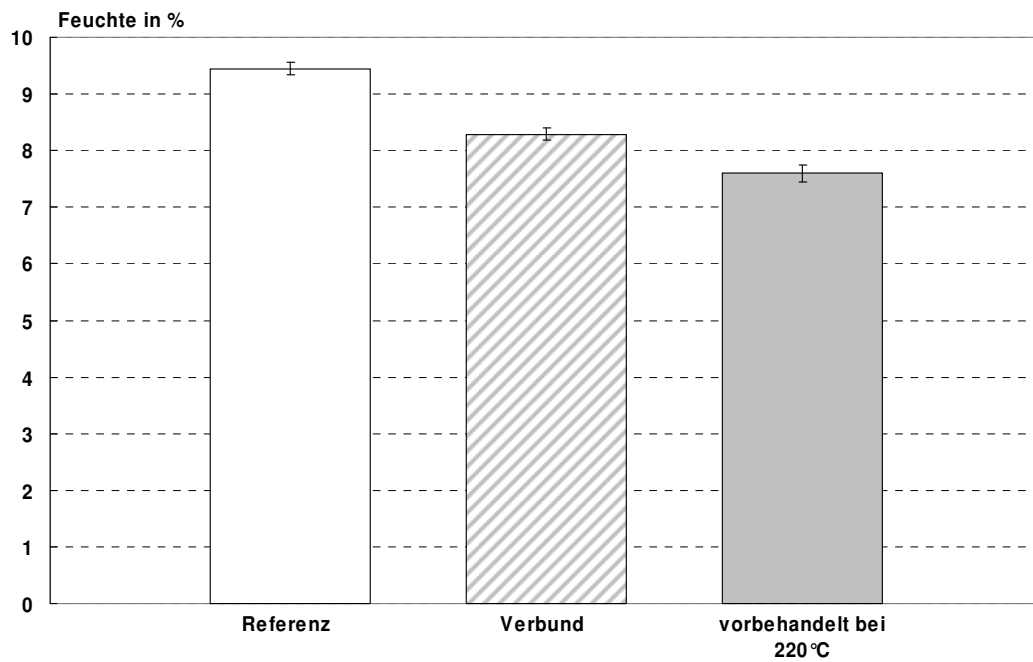


Abbildung 42: Feuchtaufnahme bei 20°C und 65% r. Lf. PMDI-gebundener Fichtespanplatten aus unbehandelten und thermisch modifizierten Spänen sowie einem Verbund aus beiden Spantypen.

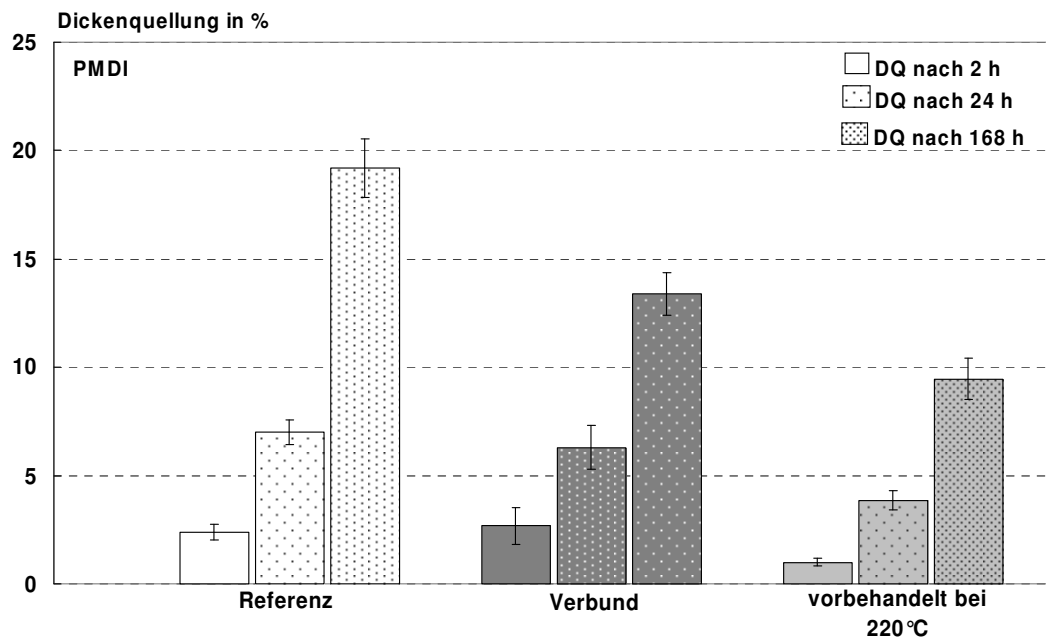


Abbildung 43: Dickenquellung nach zwei, 24 und 168 Stunden Wasserlagerung PMDI-gebundener Fichtespanplatten aus unbehandelten und thermisch modifizierten Spänen sowie einem Verbund aus beiden Spantypen.

Bei einer unbehandelten Platte beruht die Dickenquellung besonders auf dem irreversiblen Anteil, das heißt dem Deformationsrückgang der verpressten Partikel. Nach einer thermischen Modifizierung nimmt die Verdichtbarkeit der Späne zu, worauf wesentlich die Verbesserung der Dickenquellung beruht. Bei der Verbundplatte geht die Dickenquellung demnach vor allem auf den Anteil der unbehandelten Späne zurück, die ungehindert quellen können. Da der Anteil der unbehandelten Späne nur 50% beträgt, fällt die Dickenquellung geringer aus als bei der Referenz. Um eine weitere Verringerung der Dickenquellung bereits nach 24 Stunden zu erreichen, muss der Anteil modifizierter Späne höher als 50% sein.

Die Ergebnisse haben gezeigt, dass sich die Biegefestigkeit von Platten aus modifiziertem Spanmaterial durch geeignete Methoden deutlich verbessern lässt. Insbesondere der Ansatz des Verbundwerkstoffes bietet neben der Verbesserung der Biegeeigenschaften den Vorteil eines Werkstoffes mit veränderbaren Eigenschaften. Durch Variation des Mischungsverhältnisses modifizierter zu unbehandelter Späne ließe sich je nach Verwendungszweck bei gleich bleibendem Klebstoffanteil die Eigenschaft der Platte entsprechend anpassen. Bisher wird eine Veränderung der Platteneigenschaften oftmals über den Klebstoffanteil erreicht. Daher wäre es erstrebenswert, in weiterführenden Untersuchungen herauszufinden, inwieweit sich ein höherer Klebstoffeinsatz durch die Beigabe thermisch modifizierten Spanmaterials kompensieren lässt.

5.3.7 Witterungsbeständigkeit

Die Witterungsbeständigkeit wurde durch künstliche Bewitterung anhand zweier Zyklustests geprüft. Nach Durchlaufen des BAM-Zyklus (Tabelle 24, im Anhang), im folgenden als Zyklustest 1 bezeichnet, bzw. eines in der Industrie angewandten Wechseltests (Tabelle 25, im Anhang), nachfolgend Zyklustest 2 genannt, wurden die Probekörper auf ihre irreversible Dickenquellung und Querkzugfestigkeit geprüft.

5.3.7.1 OSB aus Kiefer

In Abbildung 44 und Abbildung 45 sind die Ergebnisse der OSB aus Kiefer dargestellt. Die irreversible Dickenquellung nach Klimatisierung der Proben bei 20°C und 65% r. Lf. beträgt für die Referenzen klebstoffabhängig 25% (MUPF), 18,5% (PF) und 15% (PMDI). Durch Vorbehandlung der Strands sinkt die Dickenzunahme auf Werte zwischen 11% und 14% (MUPF), 9,5% bis etwa 10% (PF) sowie rund 9,5% (PMDI). Die geringeren Werte beziehen sich dabei auf die Vorbehandlung bei 240°C. Der Unterschied bezüglich der Behandlungstemperatur ist besonders bei den MUPF-gebundenen OSB erkennbar (Abbildung 44).

Die Querkzugfestigkeit nach künstlicher Bewitterung zeigt einen deutlichen Einfluss des ver-

wendeten Klebstoffes (Abbildung 45). Für die Referenzen werden Festigkeiten von $0,15 \text{ N/mm}^2$ (MUPF), $0,35 \text{ N/mm}^2$ (PF) und $0,63 \text{ N/mm}^2$ (PMDI) gemessen. Durch die Vorbehandlung bei 220°C resultieren Querkzugfestigkeiten von $0,17 \text{ N/mm}^2$ (MUPF), $0,35 \text{ N/mm}^2$ (PF) und etwa $0,70 \text{ N/mm}^2$ (PMDI), nach thermischer Modifizierung bei 240°C $0,22 \text{ N/mm}^2$ (MUPF), $0,45 \text{ N/mm}^2$ (PF) und $0,73 \text{ N/mm}^2$ (PMDI).

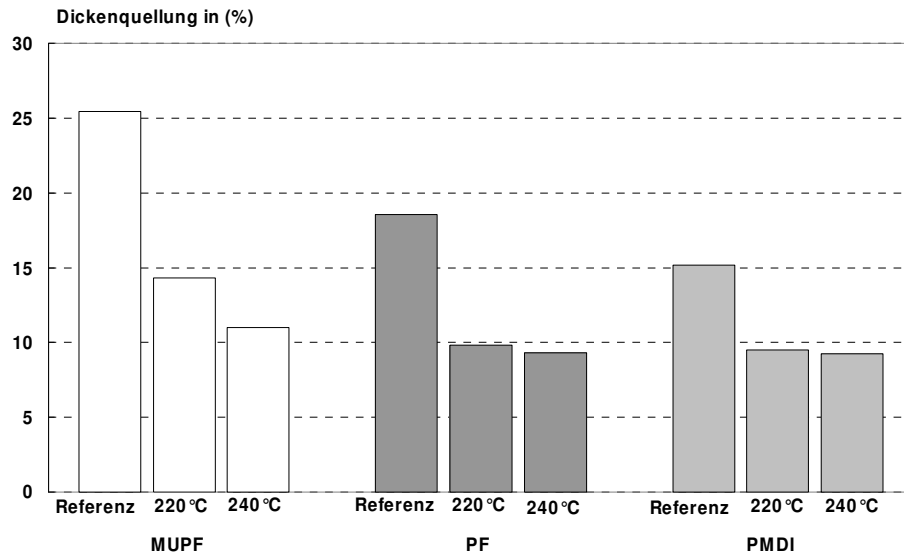


Abbildung 44: Irreversible Dickenquellung nach BAM-Zyklus von OSB aus Kiefer. Die bei 220°C und 240°C behandelten Strands sowie unbehandelte Referenzstrands wurden mit MUPF, PF und PMDI zu Platten verpresst.

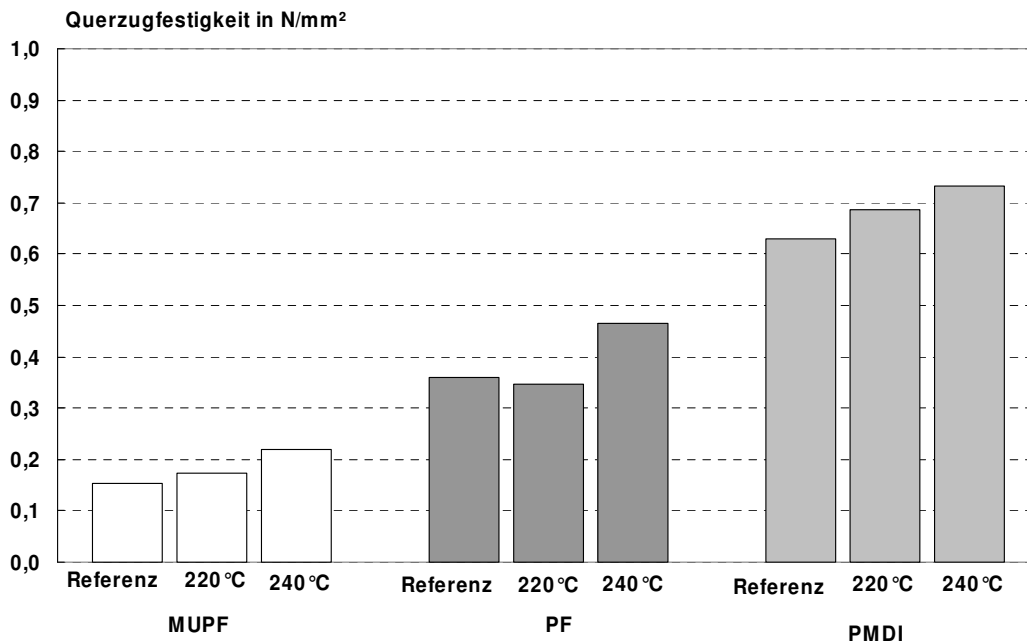


Abbildung 45: Querkzugfestigkeit nach BAM-Zyklus von OSB aus Kiefer. Die bei 220°C und 240°C vorbehandelten Strands sowie unbehandelte Referenzstrands wurden mit MUPF, PF und PMDI zu Platten verpresst.

Die Ergebnisse der irreversiblen Dickenquellung der Kiefer-OSB nach Durchlaufen von Zyklustest 2 sind in Abbildung 46 dargestellt. Ein Einfluss des verwendeten Klebstoffes ist deutlich zu erkennen. Die MUPF-gebundenen Platten weisen die höchste irreversible Dickenquellung auf, nach dem ersten Zyklus liegt die Dickenzunahme bei 30%, die sich mit zunehmender Zyklenzahl auf maximal 43% erhöht. Die PF- und PMDI-Referenz erreichen etwa die gleichen Werte. Nach Zyklus 1 beträgt die verbleibende Dickenzunahme etwa 14% und steigt nach fünf Zyklen nur gering auf 15% an. Die PF-gebundene Referenz weist dabei einen schwingungsartigen Verlauf der Dickenquellung über die Zyklenzahl auf, mit Maxima von etwa 17% nach Zyklus 2 und 4.

Die thermische Modifizierung der Strands bewirkt eine deutlich geringere Dickenänderung nach Ablauf des Zyklustests. Ein Einfluss der Behandlungstemperatur kann festgestellt werden; die 240°C-Behandlung resultiert in geringerer irreversibler Dickenänderung. In Abhängigkeit des Klebstoffes liegen die Werte der 220°C-Behandlung nach Durchlaufen des ersten Zyklus zwischen 17% (MUPF), 8,5% (PF) und 7,7% (PMDI). Die irreversible Dickenquellung nach fünf Zyklen steigert sich auf 21,5% (MUPF), 12,5% (PF) und 8,7% (PMDI). Die thermische Modifizierung der Strands bei 240°C ergibt nach dem ersten Zyklus 12,3% (MUPF), 7,4% (PF) und 7,2% (PMDI), nach Zyklus 5 hat die irreversible Dickenquellung auf 18,7% (MUPF), 10,7% (PF) und 8,3% (PMDI) zugenommen. Wie bereits bei der Dickenquellung nach Wasserlagerung zu erkennen (Abbildung 16), erfolgt die Dickenzunahme in Abhängigkeit des Klebstoffes unterschiedlich. Die MUPF-Platten weisen einen stufenartigen Anstieg der Dickenänderung auf, die PF-gebundenen OSB zeigen eine eher stetige Zunahme der Dickenquellung. Die PMDI-Platten dagegen erreichen ihr Maximum nahezu sprunghaft bereits nach dem ersten Zyklus.

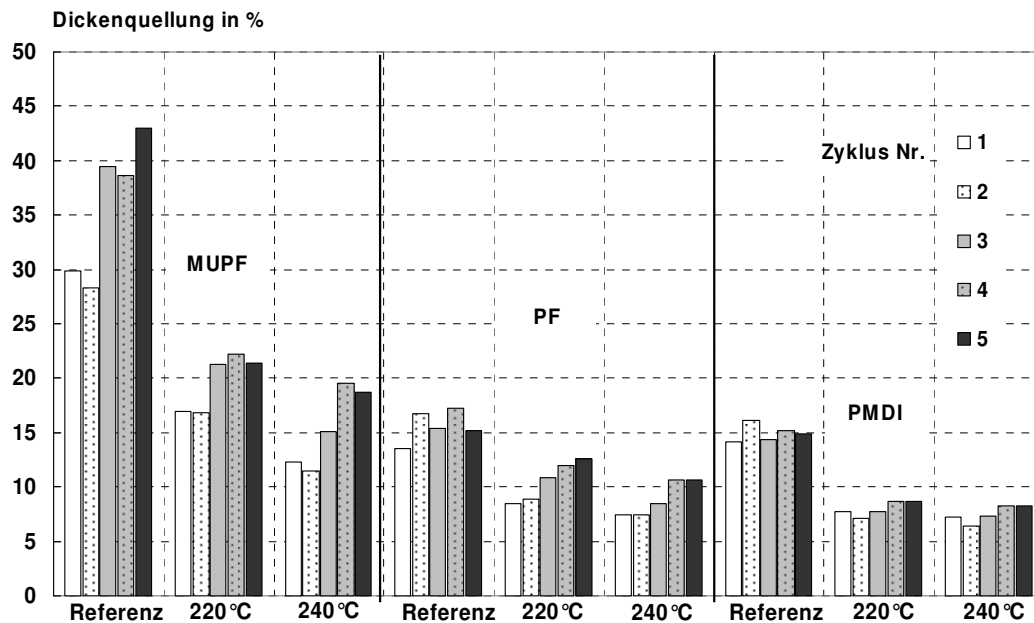


Abbildung 46: Irreversible Dickenquellung nach Zyklustest (2) von OSB aus Kiefer. Die bei 220°C und 240°C vorbehandelten Strands sowie unbehandelte Referenzstrands wurden mit MUPF, PF und PMDI zu Platten verpresst.

Die Querkzugfestigkeit nimmt in Abhängigkeit des Klebstoffes mit zunehmender Zyklenzahl in der Reihenfolge PMDI, PF, MUPF ab (Abbildung 47). Die Referenzen erreichen Querkzugfestigkeiten von 0,06 N/mm² (MUPF), 0,3 N/mm² (PF) und 0,6 N/mm² (PMDI) nach dem ersten Zyklus. Nach Ablauf der gesamten Prüfdauer sinken die Querkzugfestigkeiten auf 0,02 N/mm² (MUPF), 0,2 N/mm² (PF) und 0,35 N/mm² (PMDI). Die Vorbehandlung der Strands bewirkt eine geringere Abnahme der Querkzugfestigkeiten nach Durchlaufen des Zyklustests; wie bei der irreversiblen Dickenquellung ist ein Effekt der höheren Behandlungstemperatur zu erkennen. In Abhängigkeit des Klebstoffes beträgt die Querkzugfestigkeit nach dem ersten Zyklus für die 220°C-Platten etwa 0,1 N/mm² (MUPF), 0,35 N/mm² (PF) und 0,7 N/mm² (PMDI). Mit zunehmender Zyklenzahl sinkt die Querkzugfestigkeit nach Zyklus 5 auf 0,02 N/mm² (MUPF), 0,2 N/mm² (PF) und 0,42 N/mm² (PMDI). Die Vorbehandlung bei 240°C führt zu Querkzugfestigkeiten von 0,16 N/mm² (MUPF) 0,4 N/mm² (PF) und 0,63 N/mm² (PMDI) nach dem ersten Zyklus. Nach fünf Zyklen sinkt die Querkzugfestigkeit auf 0,24 N/mm² (PF) und 0,42 N/mm² (PMDI). Die MUPF-gebundene OSB versagt mechanisch nach dem fünften Zyklus, nach Zyklus 4 beträgt die Querkzugfestigkeit 0,06 N/mm².

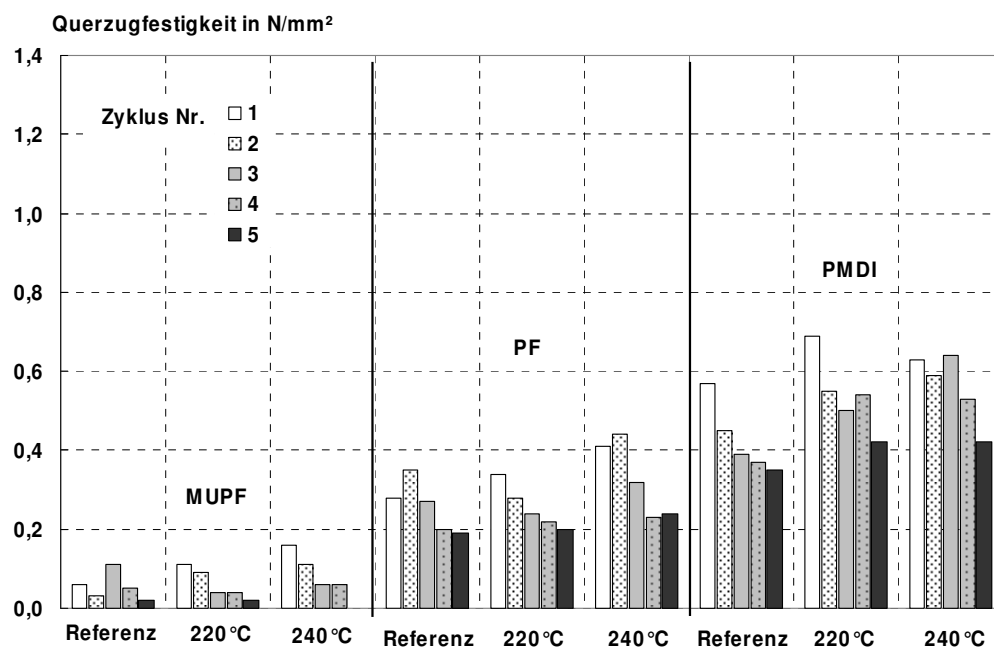


Abbildung 47: Querzugfestigkeit nach Zyklustest (2) von OSB aus Kiefer. Die bei 220°C und 240°C vorbehandelten Strands sowie unbehandelte Referenzstrands wurden mit MUPF, PF und PMDI zu Platten verpresst.

5.3.7.2 Spanplatten aus Fichte

Die verbleibende Dickenänderung der Fichtespanplatten nach Zyklustest 1 ergibt klebstoffabhängig Werte von 14% (MUPF) und 6% (PMDI) für die Referenzproben. Die thermische Modifizierung der Späne führt zu einer geringeren irreversiblen Dickenquellung, welche für die MUPF-Platten um 35% und für die PMDI-Platten um 50% unter denen der Referenz liegen (Abbildung 48). Die verbliebene Querzugfestigkeit nach Durchlaufen von Zyklustest 1 der Spanplatten aus Fichte ist Abbildung 49 zu entnehmen. Für die MUPF-gebundenen Referenzplatten ergeben sich Querzugfestigkeiten von 0,8 N/mm², für die PMDI-Platten etwa 1,3 N/mm². Nach thermischer Modifizierung der Späne beträgt die verbliebene Querzugfestigkeit der MUPF-Platten 0,7 N/mm² und die der PMDI-gebundenen rund 1,4 N/mm².

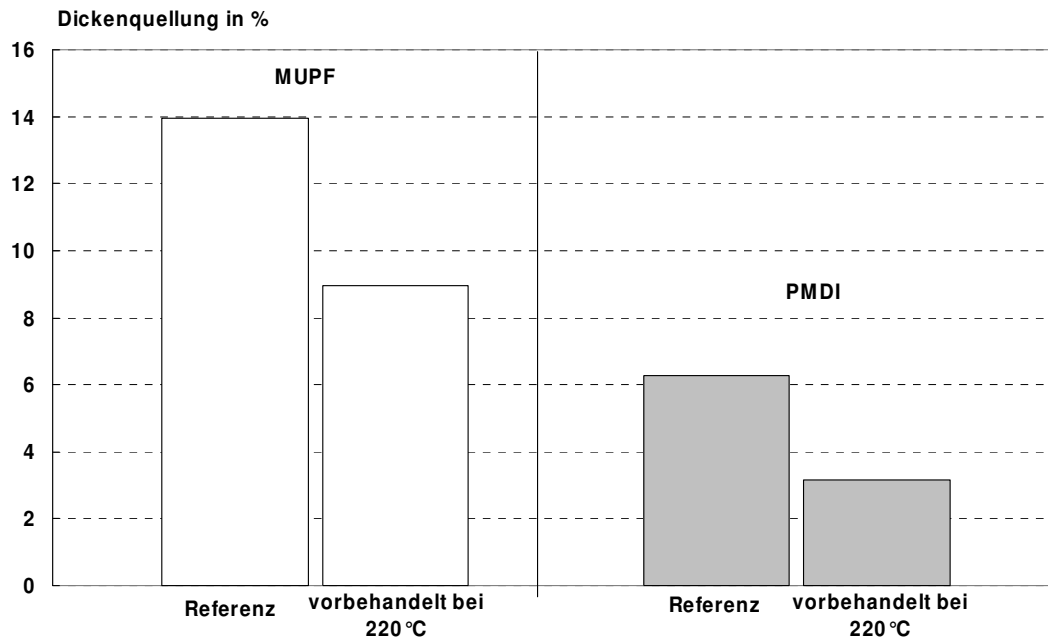


Abbildung 48: Irreversible Dickenquellung nach BAM-Zyklus von Spanplatten aus Fichte. Die bei 220°C vorbehandelten Späne sowie unbehandelte Referenzspäne wurden mit MUPF und PMDI zu Platten verpresst.

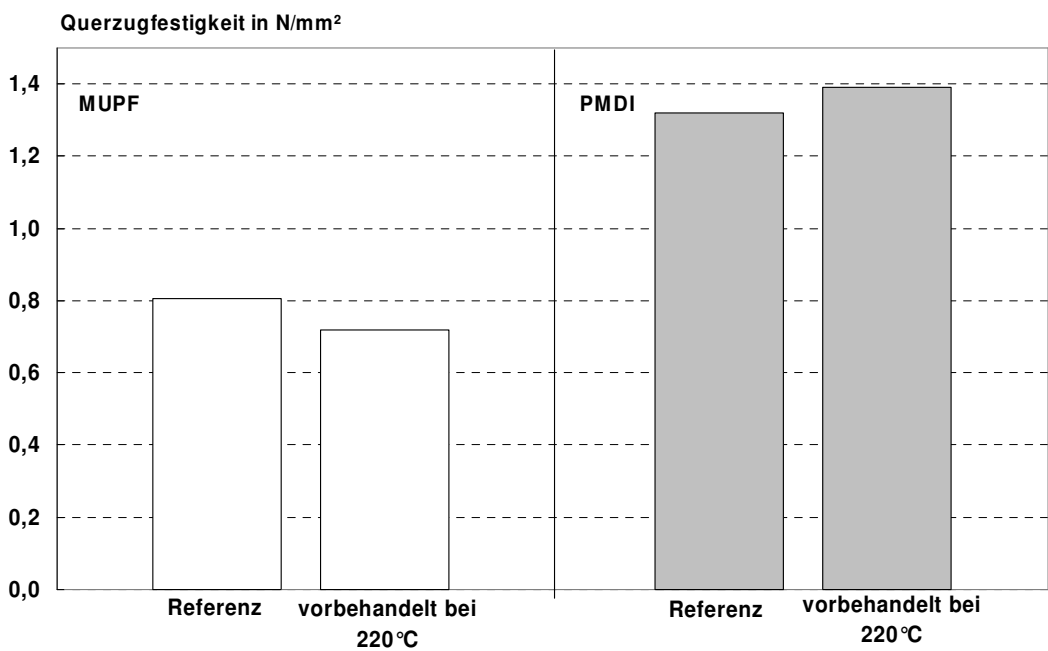


Abbildung 49: Querzugfestigkeit nach BAM-Zyklus von Spanplatten aus Fichte. Die bei 220°C vorbehandelten Späne sowie unbehandelte Referenzspäne wurden mit MUPF und PMDI zu Platten verpresst.

Die irreversible Dickenquellung nach Zyklustest 2 der MUPF- und PMDI-gebundenen Spanplatten aus Fichte nimmt mit zunehmender Zyklenzahl zu (Abbildung 50). In Abhängigkeit des Klebstoffes werden bei der MUPF-Referenz Werte von 14,5% nach dem ersten Zyklus bis 19,5% nach dem fünften Zyklus gemessen. Die verbleibende Dickenzunahme der PMDI-Referenz fällt mit 9,5% nach dem ersten und 13% nach dem letzten Zyklus geringer aus. Die Vorbehandlung resultiert in einer Abnahme der irreversiblen Dickenquellung. Nach dem ersten Zyklus liegen die Werte bei 9% (MUPF) und 4,5% (PMDI); mit fortschreitender Zyklenzahl steigen die Werte auf ein Maximum von 13,5% (MUPF) und 6% (PMDI). Die Zunahme der Dickenquellung erfolgt für alle Proben stetig, bei der mit PMDI gebundenen 240°C-Platte ist die Dickenzunahme nach dem ersten Zyklus deutlich niedriger.

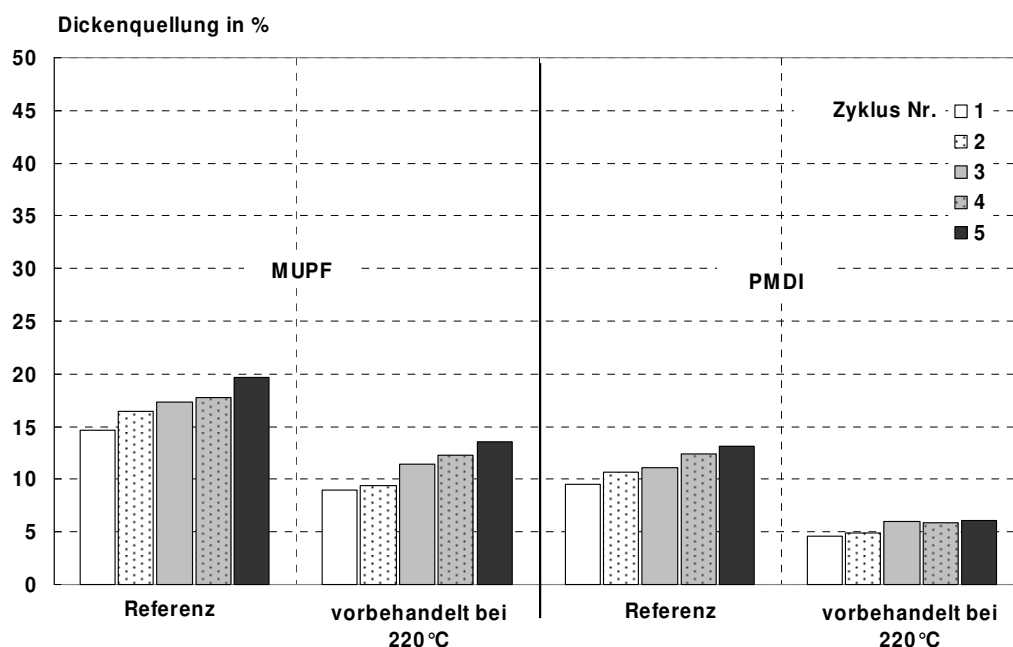


Abbildung 50: Irreversible Dickenquellung nach Zyklustest (2) von Spanplatten aus Fichte. Die bei 220°C vorbehandelten Späne sowie unbehandelte Referenzspäne wurden mit MUPF und PMDI zu Platten verpresst.

Die verbleibende Querkzugfestigkeit nach Zyklustest 2 ist in Abbildung 51 dargestellt. Die Abnahme erfolgt stetig mit zunehmender Zyklenzahl. Nach dem ersten Zyklus weisen die Referenzen klebstoffabhängig Werte von 0,8 N/mm² (MUPF) und 1,3 N/mm² (PMDI) auf, die nach dem fünften Zyklus auf 0,45 N/mm² (MUPF) und 0,92 N/mm² (PMDI) gesunken sind. Die Vorbehandlung der Späne resultiert in Querkzugfestigkeiten von 0,67 /mm² (MUPF) und 1,25 N/mm² (PMDI) nach dem ersten und 0,37 N/mm² (MUPF) bzw. 0,96 N/mm² (PMDI)

nach dem fünften Zyklus. Die Vorbehandlung bei 220°C zeigt keinen Einfluss auf die Querkzugfestigkeit bei Verklebung mit PMDI. Bei Verklebung mit MUPF wird nach Zyklus 5 eine um 20% geringere gegenüber der Referenz gemessen.

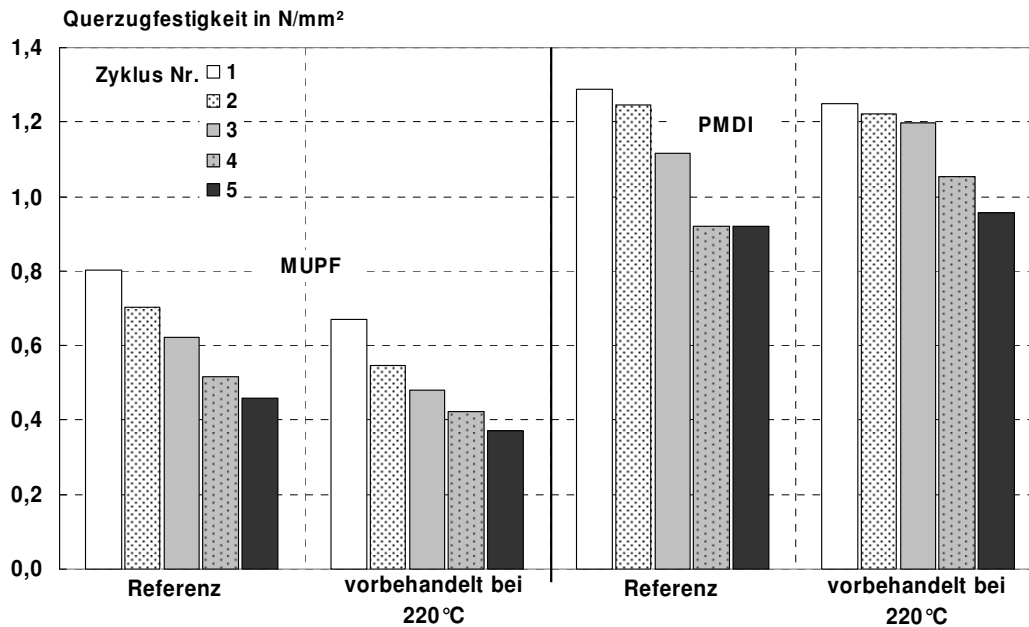


Abbildung 51: Querzugfestigkeit nach Zyklustest (2) von Spanplatten aus Fichte. Die bei 220°C vorbehandelten Späne sowie unbehandelte Referenzspäne wurden mit MUPF und PMDI zu Platten verpresst.

5.3.7.3 OSB aus Pappel

Nach Durchlaufen der künstlichen Bewitterung gemäß Zyklustest 1 verbleibt für die OSB aus Pappel ein irreversibler Anteil der Dickenquellung von etwa 12% für die unbehandelte Referenz; durch die Vorbehandlung der Strands kann dieser Anteil mit rund 6% um die Hälfte verringert werden (Abbildung 52).

Die Querkzugfestigkeit nach Durchlaufen des BAM-Zyklus beträgt für die Referenz 0,85 N/mm² und nach thermischer Modifizierung der Pappel-Strands 0,65 N/mm² (Abbildung 53), entsprechend einer Abnahme von etwa 25%.

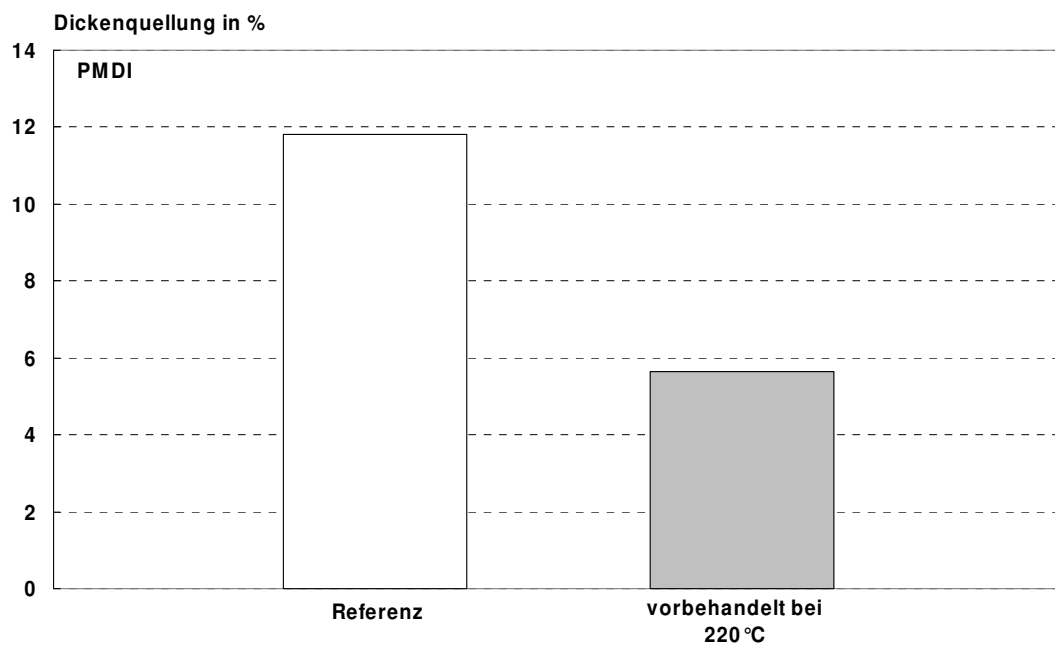


Abbildung 52: Irreversible Dickenquellung nach BAM-Zyklus von OSB aus Pappel. Die bei 220°C vorbehandelten Strands sowie unbehandelte Referenzstrands wurden mit PMDI zu Platten verpresst.

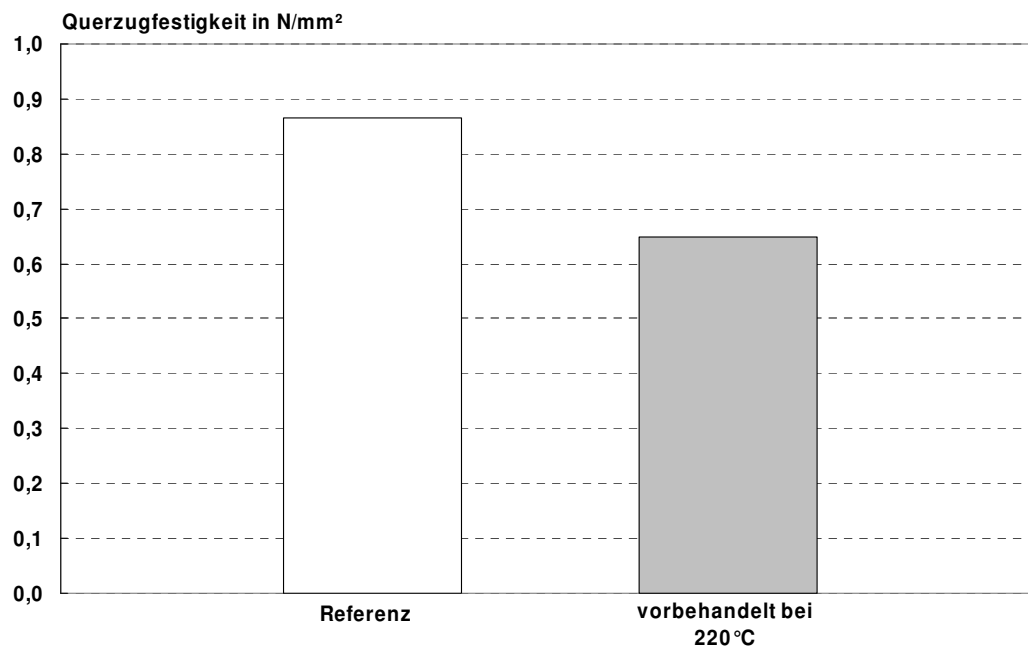


Abbildung 53: Querzugfestigkeit nach BAM-Zyklus von OSB aus Pappel. Die bei 220°C vorbehandelten Strands sowie unbehandelte Referenzstrands wurden mit PMDI zu Platten verpresst.

Die verbleibende Dickenänderung der Pappel-OSB nach Zyklustest 2 erreicht nach dem ersten Zyklus einen Wert von 11,5% für die Referenzprobe. Die thermische Modifikation der Strands bei 220°C verringert die irreversible Dickenzunahme auf etwa 7,5%. Mit zunehmender Zyklenzahl steigen die Werte auf 17% für die Referenz und 10,5% für die 220°C-Platte nach dem fünften Zyklus (Abbildung 54).

In Abbildung 55 ist die Querkzugfestigkeit nach Zyklustest 2 für die Pappel-OSB gezeigt. Mit steigender Zyklenzahl nimmt die Querkzugfestigkeit stufenweise ab. Die Referenz weist nach den ersten beiden Zyklen eine Festigkeit von 0,95 N/mm² auf. Im weiteren Testverlauf sinken die Werte auf 0,68 N/mm² bis 0,6 N/mm² nach Zyklus 3 bzw. 4. Nach dem fünften Zyklus beträgt die Querkzugfestigkeit 0,5 N/mm². Die OSB aus vorbehandelten Strands weist geringere Festigkeitswerte auf, die ebenfalls mit fortschreitender Zyklenzahl stufenweise abnehmen. Nach den ersten beiden Zyklen beträgt die Festigkeit 0,6 N/mm² bis 0,64 N/mm² und sinkt nach Zyklus 3 und 4 auf etwa 0,45 N/mm². Nach Ablauf des fünften Zyklus beträgt die Querkzugfestigkeit noch 0,3 N/mm².

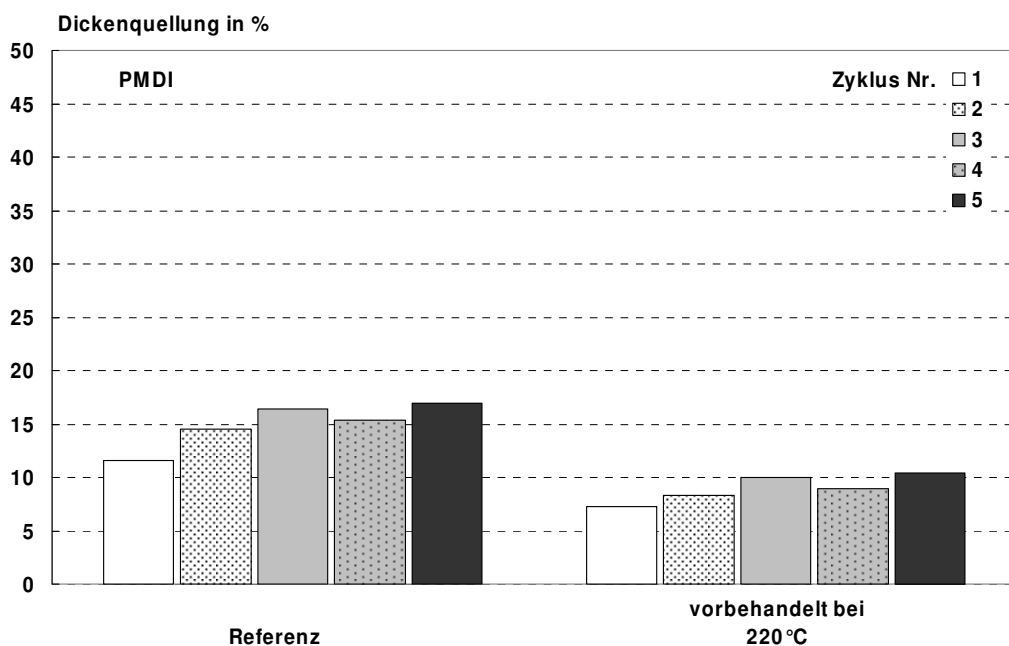


Abbildung 54: Irreversible Dickenquellung nach Zyklustest (2) von OSB aus Pappel. Die bei 220°C vorbehandelten Strands sowie unbehandelte Referenzstrands wurden mit PMDI zu Platten verpresst.

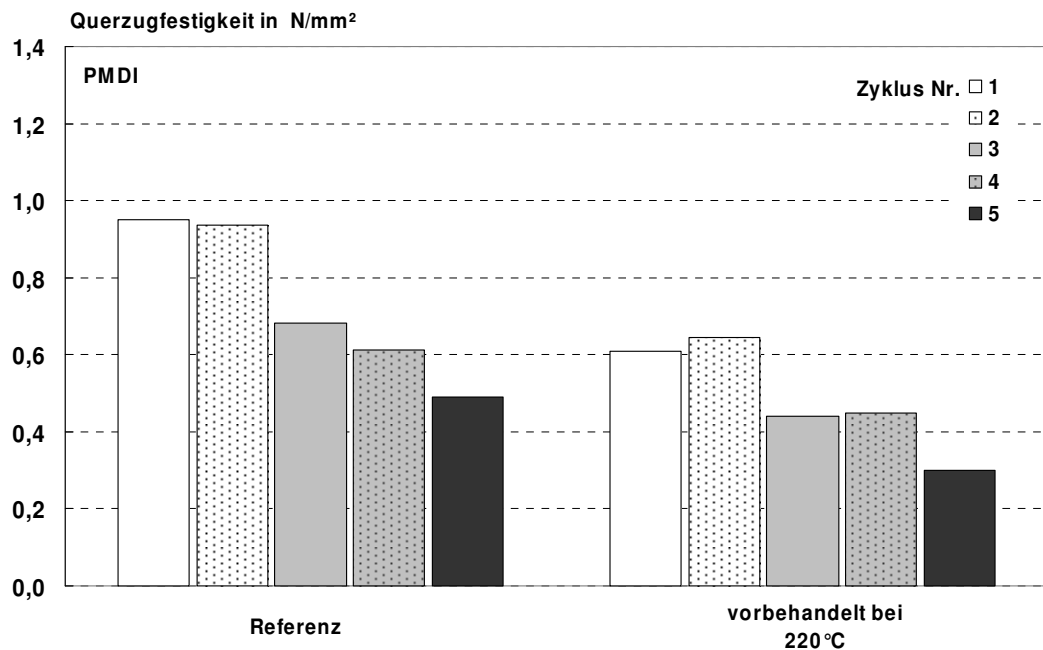


Abbildung 55: Querzugfestigkeit nach Zyklustest (2) von OSB aus Pappel. Die bei 220°C vorbehandelten Strands sowie unbehandelte Referenzstrands wurden mit PMDI zu Platten verpresst.

5.3.7.4 Diskussion

Beim Vergleich der Ergebnisse für die durchgeführten Bewitterungszyklen wurde gefunden, dass die Prüfergebnisse nach Durchlaufen von Zyklustest 1 etwa denen von Zyklustest 2 nach Durchlaufen des ersten Teilzyklus entsprachen. Für alle Plattentypen führte der industrielle Wechseltest (Zyklustest 2) nach komplettem Durchlauf zu deutlich geringeren Querzugfestigkeiten als nach Durchlaufen des BAM-Zyklus (Zyklustest 1). Nicht nur aufgrund der längeren Dauer (14 gegenüber 35 Tage), sondern insbesondere aufgrund der Wasserlagerung bei hohen Temperaturen stellten die Bedingungen in Zyklustest 2 eine größere Belastung für die Prüfkörper dar.

Das Ausmaß der Dickenquellung fiel in Abhängigkeit des Plattentyps und insbesondere vom eingesetzten Bindemittel unterschiedlich stark aus. Die MUPF-gebundenen OSB aus Kiefer bzw. Spanplatten aus Fichte zeigten nach Zyklustest 2 gegenüber Zyklustest 1 eine deutlich erhöhte Dickenquellung; die Verklebung mit PF und PMDI zeigte ähnliche Werte.

Die Querzugfestigkeit der MUPF-Platten nach Zyklustest 2 lag deutlich unter denen nach Zyklustest 1; die der PF- und PMDI-gebundenen OSB erreichten nach den ersten ein bis zwei Zyklen etwa die Querzugfestigkeiten wie nach Zyklustest 1, nahmen mit zunehmender Zyklenzahl aber deutlich ab. Die starke Dickenquellung und Abnahme der Querzugfestigkeit

der MUPF-Platten nach dem industriellen Wechseltest gegenüber dem BAM-Zyklus ist besonders auf die Warmwasserlagerung zurückzuführen, die im Wechsel mit Einfrieren zehn Stunden pro Zyklus betrug (Tabelle 25). Durch die geringe Witterungsbeständigkeit des MUPF-Harzes wird unter diesen Bedingungen die hydrolytische Zersetzung des Klebstoffes begünstigt, die nahezu bis zum Versagen der Klebeverbindung führte (Abbildung 47). Die dadurch ohnehin geschwächte Struktur der Platte wird bei den Referenzproben zusätzlich durch den Deformationsrückgang belastet. Die trotz verminderter Klebfestigkeit geringere Dickenquellung bzw. etwas höhere Querkzugfestigkeit der MUPF-Platten aus thermisch modifizierten Strands beruht auf der reduzierten Rückstellkraft dieser Platten. Durch die erhöhte Verdichtbarkeit der Partikel infolge des Abbaus der Polyosen werden beim Verpressen weniger Spannungen in die Platte induziert, die durch Wasserlagerung freigesetzt werden könnten. Die unveränderte oder gering gestiegene Dickenquellung PF- und PMDI-gebundener Platten aus Kiefer bzw. Fichte nach Durchlaufen von Zyklustest 2 im Vergleich zu Zyklustest 1 ist auf die höhere Stabilität dieser Klebstoffsysteme gegen Hydrolyse zurückzuführen. PMDI bildet nach dem Aushärten ein verzweigtes Polyharnstoffnetzwerk (Grunwald 2002) und PF-Harze bilden im ausgehärteten Zustand engmaschig vernetzte, unschmelzbare Duroplaste (Römpf 2005). Neben den Klebstoffeigenschaften profitieren die Platten aus vorbehandeltem Spanmaterial zusätzlich aus der erwähnten Reduzierung von Springback und Deformationsrückgang.

Im Verlauf von Zyklustest 2 nimmt die Querkzugfestigkeit der PF- und PMDI-gebundenen Platten deutlicher ab als die Dickenquellung zunimmt. Nach dem ersten Zyklus entsprechen die erreichten Werte denen nach Zyklustest 1, mit steigender Zyklenzahl sinkt die Querkzugfestigkeit. Der höhere Verlust der Querkzugfestigkeit bei vergleichsweise gering gestiegener Dickenquellung konnte auch von Okkonen und River (1996) gefunden werden. In ihrer Arbeit untersuchten sie an verschiedenen PF-gebundenen OSB aus Pappel Dickenquellung und Querkzugfestigkeit, unter anderem nach einem Kochwechseltest über 40 Zyklen. Nach einem Zyklus hatte die Querkzugfestigkeit bereits um etwa 60% und nach 20 Zyklen um über 90% abgenommen. Die Dickenquellung dagegen war nach dem ersten Zyklus um maximal 34% gestiegen und lag nach 20 Zyklen bei 45%.

Anhand der Resultate lässt sich ein deutlicher Zusammenhang zwischen Dickenquellung und Querkzugfestigkeit feststellen; zunehmende Dickenquellung korrespondiert mit deutlich niedrigeren Querkzugfestigkeiten. Grundsätzlich führt die Dickenquellung zu einer Schwächung innerhalb der Plattenstruktur, woraus Abnahmen der Querkzugfestigkeit resultieren können. Insbesondere die Ergebnisse aus Zyklustest 2 machen diese Beziehung deutlich, da

nach jedem der fünf Teilzyklen Proben entnommen wurden, deren irreversible Dickenquellung und verbliebene Querkzugfestigkeit bestimmt worden waren. Die Einflussfaktoren auf Dickenquellung und damit auf Plattenstruktur und Querkzugfestigkeit im Einzelnen sind in Abschnitt 5.3.1.4 diskutiert. Für die OSB aus Pappel zeigte sich wie für die anderen Plattentypen auch, dass Dickenquellung und Querkzugfestigkeit nach Zyklustest 1 (BAM-Zyklus) den Werten entsprachen, die in Zyklustest 2 bereits nach dem ersten Teilzyklus erreicht wurden. Die Querkzugfestigkeit der Platte aus modifizierten Strands lag nach den Zyklustests wie schon bei Prüfung des Querkzuges nach EN 319 (1993) (Abbildung 29) unter dem Referenzwert. Die Ursache liegt unter anderem in dem vergleichsweise höheren Anstieg des Kontaktwinkels und damit verbundenen Einschränkungen bei der Verklebung, wie bereits in Abschnitt 5.3.2.4 (Diskussion zur Querkzugfestigkeit) ausgeführt wurde. Durch die Ergebnisse lassen sich nicht nur Annahmen über das mögliche Langzeitverhalten der Platten machen, sondern auch über die Aussagefähigkeit der beiden Zyklustests. Als Maß zur Beurteilung der Witterungsbeständigkeit werden Dickenquellung und verbleibende Querkzugfestigkeit herangezogen. Die Versuche haben gezeigt, dass diesbezüglich der 14tägige BAM-Zyklus (Zyklustest 1) dem ersten Teilzyklus des Zyklustests nach Industrievorgabe (Zyklustest 2) mit der Dauer von sieben Tagen entspricht. Darüber hinaus kann davon ausgegangen werden, dass die angewandten Zyklustests eine gute Einschätzung des Langzeitverhaltens der Plattenwerkstoffe erlauben. Okkonen und River (1996) verglichen die Ergebnisse des Kochwechseltests in ihrer Arbeit mit Ergebnissen nach einjähriger Freilandwitterung. Nach 40 Zyklen hatte die Querkzugfestigkeit um mehr als 95% abgenommen und die Dickenquellung war auf etwa 50% gestiegen. Nach einjähriger Freilandwitterung dagegen war die Querkzugfestigkeit nur um etwa 35% gesunken, während die Dickenquellung auf 20% gestiegen war.

Die vorgestellten Ergebnisse haben gezeigt, dass die bereits aus den vorhergehenden Versuchen zur Dickenquellung und Querkzugfestigkeit gefundenen Erkenntnisse auch in Hinblick auf eine Langzeitbelastung Bestand haben. Prinzipiell nimmt mit zunehmender Prüfdauer die Dickenquellung zu und die Querkzugfestigkeit ab, relativ bleibt das Verhältnis von Referenz zu modifizierter Platte erhalten. Das bedeutet, durch die Vorbehandlung des Spanmaterials wird eine bleibende Eigenschaftsänderung erreicht. In Hinblick auf die Prüfmethodik haben die Ergebnisse erbracht, dass die Belastung auf die Prüfkörper, gemessen an Dickenquellung und Querkzugfestigkeit, des kompletten ersten Zyklustests dem eines Teilzyklus des zweiten Testverfahrens entspricht. Damit lässt sich bereits nach wesentlich kürzerer Prüfdauer eine Einschätzung über das Langzeitverhalten eines Werkstoffes treffen.

5.3.8 Dauerhaftigkeit

Die biologische Resistenz wurde nach ENV 12038 mittels zwei Braunfäuleerregern (*Poria placenta* (Pp), *Coniophora puteana* (Cp)) und einem Weißfäuleerreger (*Pleurotus ostreatus* (Po)) untersucht. Die Ergebnisse nach 16wöchiger Inkubationszeit sind Abbildung 56 bis Abbildung 58 zu entnehmen. Zur Beurteilung der Dauerhaftigkeit bei Plattenwerkstoffen dient der DSI, wie unter Abschnitt 4.2.9 beschrieben. Dabei ist der jeweils höchste Masseverlust entscheidend, die DSI-Werte für alle Plattentypen sind in Tabelle 14 aufgeführt.

In Abbildung 56 sind die Ergebnisse der OSB aus Kiefer dargestellt. Dabei fällt auf, dass bei Verwendung von MUPF und PF kein wesentlicher Abbau durch *Poria placenta* stattfindet, für die PF-gebundenen Platten bleibt zudem auch ein Abbau durch *Coniophora puteana* aus. Die MUPF-gebundene Referenz wird durch *Coniophora puteana* mit einem Masseverlust von 50% am stärksten abgebaut, woraus sich ein DSI von 115 ergibt. Die Vorbehandlung bei 220°C bzw. 240°C resultiert in Masseverlusten von rund 19% bzw. 17,5%, im Unterschied zur Referenz allerdings durch *Pleurotus ostreatus* verursacht. Der DSI beträgt 69 nach Vorbehandlung bei 220°C und 64 nach thermischer Modifizierung bei 240°C. Die PF-gebundenen OSB werden am stärksten durch *Pleurotus ostreatus* abgebaut, die Masseverluste erreichen 25% für die Referenz (DSI = 92) und nach Vorbehandlung liegen die Masseverluste bei rund 21,5% für die 220°C-Behandlung bzw. 20,5% nach Vorbehandlung bei 240°C; entsprechend liegt der DSI mit 78 bzw. 76 deutlich unter dem Referenzwert. Für die PMDI-gebundenen OSB ergibt sich der höchste Masseverlust der Referenz (35,5%) sowie nach Vorbehandlung bei 220°C (22%) durch *Coniophora puteana*, der DSI erreicht demnach 81,6 bzw. 63,4. Der Masseverlust der 240°C-Platte erreicht mit 20% nach Abbau durch *Poria placenta* seinen höchsten Wert, der DSI liegt bei 61,5.

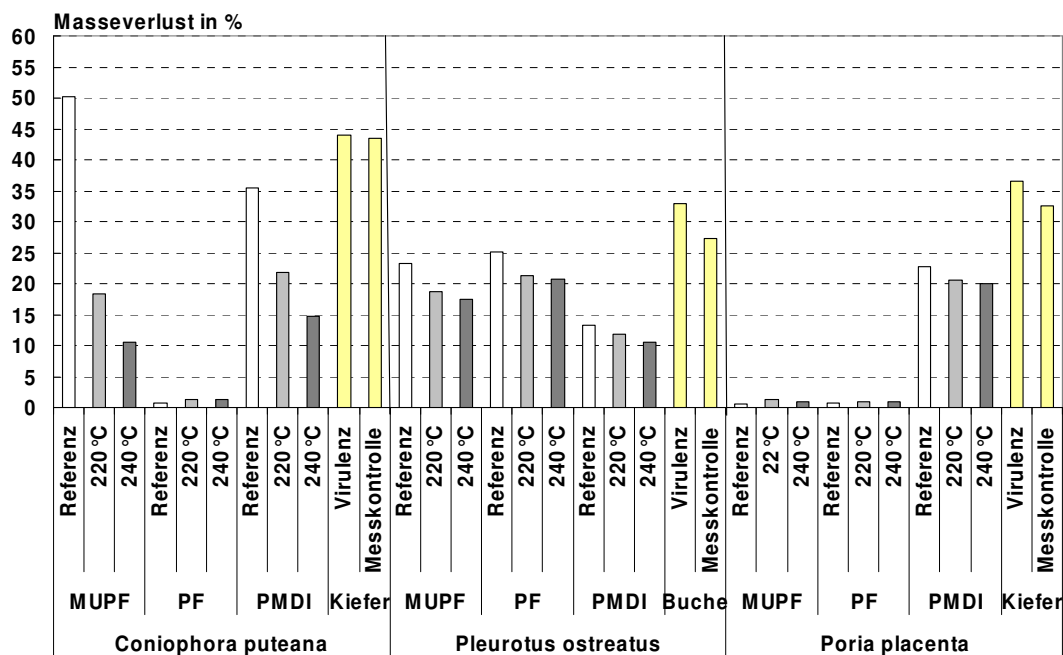


Abbildung 56: Masseverlust durch *Coniophora puteana*, *Pleurotus ostreatus* und *Poria placenta* nach 16wöchiger Inkubationszeit von OSB aus Kiefer. Die bei 220°C und 240°C vorbehandelten Strands sowie unbehandelte Referenzstrands wurden mit MUPF, PF und PMDI zu Platten verpresst.

Bei den Spanplatten aus Fichte (Abbildung 57) werden die MUPF-gebundenen Platten durch *Coniophora puteana* am stärksten abgebaut. Die Masseverluste erreichen etwa 53% für die Referenz und 35% nach Vorbehandlung bei 220°C. Der DSI für die modifizierte Platte fällt demnach mit 87,5% geringer aus als für die Referenz (122,5). Wie bereits bei den MUPF-gebundenen OSB aus Kiefer führt der Befall durch *Poria placenta* zu keinem wesentlichen Masseverlust. Die PMDI-gebundene Referenz wird ebenfalls am stärksten durch *Coniophora puteana* abgebaut (38%), entsprechend einem DSI von rund 89. Nach Vorbehandlung bei 220°C sinkt der Masseverlust auf 22% durch Abbau von *Poria placenta* (DSI = 67).

Die Referenz-OSB aus Pappel zeigt den höchsten Masseverlust mit 36,5% infolge des Abbaus durch *Coniophora puteana* (Abbildung 58); nach Vorbehandlung liegt der Masseverlust durch *Pleurotus ostreatus* bei 10,5%. Daraus ergeben sich DSI-Werte von 84 für die Referenz und 38,6 für die OSB aus vorbehandelten Strands.

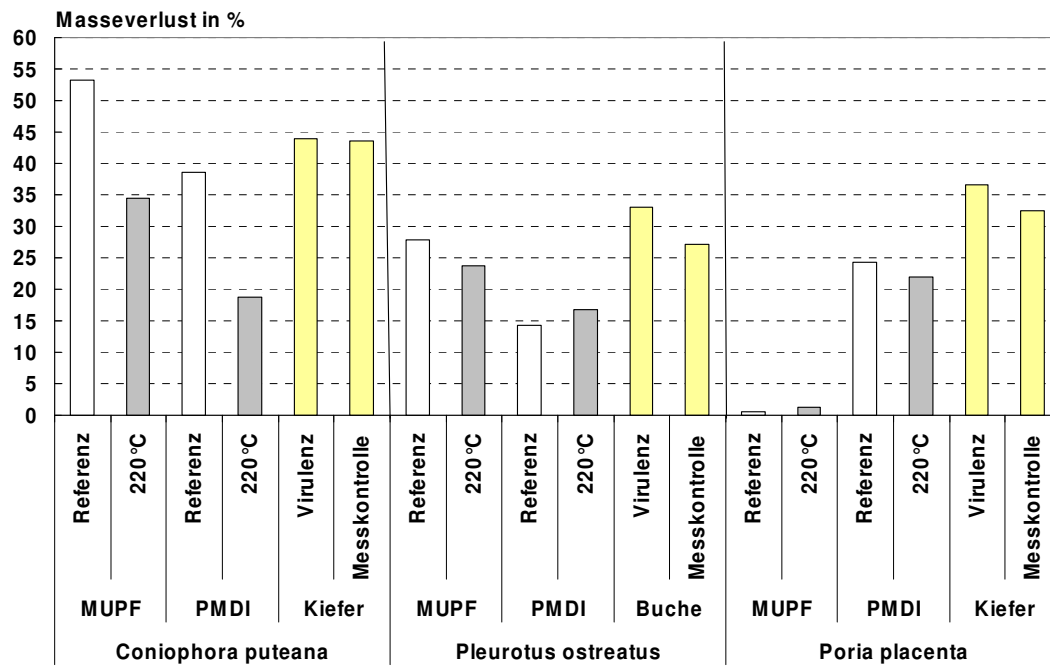


Abbildung 57: Masseverlust durch *Coniophora puteana*, *Pleurotus ostreatus* und *Poria placenta* nach 16wöchiger Inkubationszeit von Spanplatten aus Fichte. Die bei 220°C vorbehandelten Späne sowie unbehandelte Referenzspäne wurden mit MUPF und PMDI zu Platten verpresst.

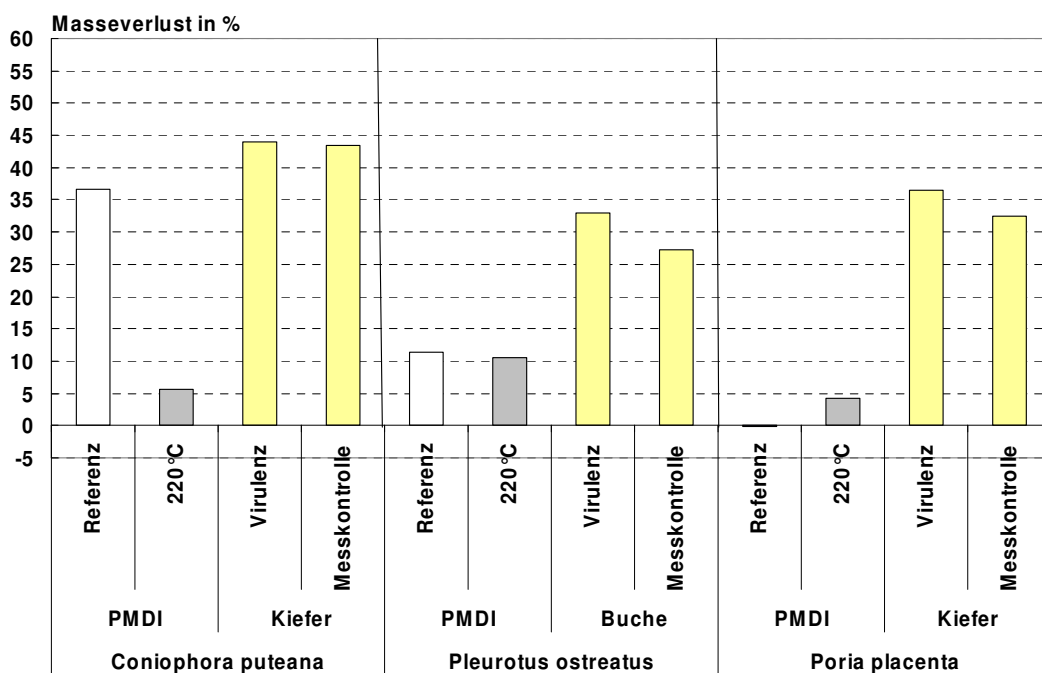


Abbildung 58: Masseverlust durch *Coniophora puteana*, *Pleurotus ostreatus* und *Poria placenta* nach 16wöchiger Inkubationszeit von OSB aus Pappel. Die bei 220°C vorbehandelten Strands sowie unbehandelte Referenzstrands wurden mit PMDI zu Platten verpresst.

Tabelle 14: Dauerhaftigkeit nach ENV 12038, angegeben als DSI (Decay Susceptibility Index) von Platten aus unbehandeltem (Ref.) und durch Vorbehandlung bei 220°C bzw. 240°C modifiziertem Spanmaterial

Probe / Behandlung	Bindemittel	DSI	Pilz	DH (Klasse)
Kiefer OSB / Ref.	MUPF	115,2	Cp	5
Kiefer OSB / 220°C	MUPF	69,1	Po	4
Kiefer OSB / 240°C	MUPF	64,3	Po	4
Kiefer OSB / Ref.	PF	92,3	Po	5
Kiefer OSB / 220°C	PF	78,3	Po	4
Kiefer OSB / 240°C	PF	76,1	Po	4
Kiefer OSB / Ref.	PMDI	81,6	Cp	4
Kiefer OSB / 220°C	PMDI	63,4	Pp	4
Kiefer OSB / 240°C	PMDI	61,5	Pp	4
Fichte Spanplatte / Ref.	MUPF	122,5	Cp	5
Fichte Spanplatte / 220°C	MUPF	87,5	Cp	4
Fichte Spanplatte / Ref.	PMDI	88,7	Cp	4
Fichte Spanplatte / 220°C	PMDI	67,4	Pp	4
Pappel OSB / Ref.	PMDI	84,1	Cp	4
Pappel OSB / 220°C	PMDI	38,6	Po	3

Die Ergebnisse zur Dauerhaftigkeit haben gezeigt, dass durch die Vorbehandlung die Resistenz gegen Pilzabbau erhöht werden kann. Der DSI gibt an, um wie viel höher bzw. niedriger der Masseverlust durch Pilzabbau im Vergleich zur jeweiligen Messkontrolle liegt. Bei den MUPF-gebundenen Referenzproben der OSB aus Kiefer sowie der Spanplatte aus Fichte liegt der Masseverlust über der Messkontrolle (Tabelle 14). Beim Vergleich der Referenzproben ist ein Einfluss des Klebstoffes erkennbar. Der DSI-Wert MUPF-gebundener Platten übersteigt den der PF- und PMDI-gebundenen Werkstoffe. In Hinblick auf die Pilzaktivität zeigt sich, dass MUPF-gebundene Platten durch *Poria placenta* nicht abgebaut werden (Abbildung 56, Abbildung 57), bei Verwendung von PF findet weder durch *Poria placenta* noch durch *Coniophora puteana* (Abbildung 56) ein Abbau statt. Nach Leithoff und Peek (2000) ist *Coniophora puteana* gegenüber Phenolharz empfindlich, weshalb der Abbau durch diesen Prüfpilz verhältnismäßig gering ausfällt. In ihrer Arbeit über die Dauerhaftigkeit nach ENV 12038 im Anschluss einer künstlichen sowie Freilandbewitterung von PF-verleimten Sperrhölzern fanden sie einen geringeren Abbau durch *Coniophora puteana* als durch *Coriolus versicolor*.

Trotz der Empfindlichkeit gegenüber phenolhaltigen Bindemitteln war der Masseverlust bei MUPF- und PF-gebundenen Platten größer als bei den PMDI-verleimten Platten. Eine mögliche Ursache dafür stellt die höhere Dickenquellung MUPF- und PF-gebundener Platten dar (Abbildung 16, Abbildung 20). Da die Dauerhaftigkeitsprüfung bei 70% r. Lf. stattfindet und zudem Feuchtigkeit durch den Pilz in die Probe eingetragen wird, kommt es durch die Feuchtaufnahme zu einer Dickenquellung der Probekörper. Daraus resultiert eine aufgelockerte Plattenstruktur, wodurch die Wegsamkeit für den Pilz erleichtert wird. Einen ähnlichen Zusammenhang zwischen Quellverhalten und Dauerhaftigkeit stellen Leithoff und Peek (2000) beim Vergleich von Sperrhölzern mit LVL (Laminated Veneer Lumber) heraus. Die Masseabnahme durch Pilzabbau fiel für LVL höher aus, was Leithoff und Peek (2000) auf die stärkere Quellung von LVL infolge der künstlichen Bewitterung zurückführen. Die daraus resultierende höhere Belastung auf die Klebstoffugen kann zu vermehrter Rissbildung führen, sodass die Plattenstruktur für den Pilz leichter zugänglich wird.

Durch die Vorbehandlung fällt der Masseverlust durch Pilzabbau geringer aus, entsprechend sinkt der DSI der Platten aus vorbehandeltem Spanmaterial auf Werte unterhalb der Referenz (Tabelle 14). Bei den Kiefer-OSB zeigt sich ein Einfluss der Vorbehandlungstemperatur auf das Ergebnis (Abbildung 56). Die 240°C-Behandlung führt zu etwas höherer Dauerhaftigkeit als nach Vorbehandlung bei 220°C, erkennbar an den geringeren DSI-Werten. Die relativ größte Verbesserung der Dauerhaftigkeit durch Vorbehandlung weisen die OSB aus Pappel auf. Gemessen an den DSI-Werten konnte die Dauerhaftigkeit der Platten aus thermisch modifizierten Strands um 54% gegenüber der Referenz verbessert werden.

Die Verbesserung der Dauerhaftigkeit durch thermische Modifizierung wird in der Literatur auf verschiedene Ursachen zurückgeführt, die sich auf drei Theorien eingrenzen lassen (Weiland und Guyonnet 2003). Zum einen gilt die Annahme, dass durch die Zersetzung bzw. den Abbau der Pentosane bereits die Erstbesiedelung durch holzerstörende Pilze verzögert wird, da die Pentosane dem Pilz als Hauptnahrungsquelle dienen. Die zweite Theorie geht davon aus, dass die Veränderung des Holzes zu einer erhöhten Pilzresistenz führt. Im Verlauf der thermischen Zersetzung der Polyosen entsteht als Nebenprodukt unter anderem Furfural, das mit dem verbliebenen Lignin unter Bildung eines hydrophoben Netzwerkes reagieren kann (Tjeerdsma *et al.* 1998). Daraus resultiert nicht nur eine verbesserte Feuchteresistenz thermisch modifizierten Holzes, sondern das enzymatische System des Pilzes kann das Holz aufgrund dieser veränderten Eigenschaften nicht mehr als Substrat erkennen und abbauen. Als dritte Theorie gilt die Bildung toxischer Nebenprodukte, die fungizid wirken können (Kamdem *et al.* 2000, Mazela *et al.* 2004).

Die Bildung toxischer Nebenprodukte wurde nicht untersucht, es konnten aber mittels HPLC Veränderungen der Holzeigenschaften hinsichtlich des Abbaus der Polyosen und der Zunahme hydrophober Bestandteile nachgewiesen werden (Tabelle 4). Grundsätzlich führt die thermische Modifizierung zu einer Abnahme der Pentosen, vor allem Xylose, und einer Zunahme des Hydrolyserückstandes. Bei den OSB-Strands aus Kiefer war dabei ein messbarer Unterschied zwischen den Behandlungstemperaturen erkennbar. Die Abnahme der Pentosen bzw. die Zunahme des Hydrolyserückstandes fiel nach Vorbehandlung bei 240°C höher aus als nach der 220°C-Behandlung. Damit lässt sich die erhöhte Dauerhaftigkeit der OSB nach Vorbehandlung bei 240°C gegenüber einer Vorbehandlung bei 220°C begründen. Die Ursache für die relativ höhere Resistenz gegen Pilzabbau der Platten aus modifizierten Pappel-Strands gegenüber Kiefer und Fichte lässt sich ebenfalls auf die veränderte chemische Zusammensetzung infolge der Vorbehandlung zurückführen. Unabhängig des absolut höheren Gehaltes von Pentosen, wiesen die Strands aus Pappel auch relativ die höchste Abnahme der Xylose sowie Zunahme des Hydrolyserückstandes nach Vorbehandlung bei 220°C gegenüber der Referenz auf.

Zwar konnte durch die Vorbehandlung des Spanmaterials die Dauerhaftigkeit der Platten erhöht werden, das Ausmaß der Verbesserung fiel aber im Vergleich zu den Ergebnissen der Vorversuche (Abbildung 10) deutlich geringer aus. Als mögliche Ursache der unterschiedlich hohen Dauerhaftigkeit kann die kürzere Inkubationszeit von acht Wochen in den Vorversuchen im Vergleich zu 16 Wochen bei der Prüfung der Plattenwerkstoffe in Betracht gezogen werden. Weiterhin hat die Probenbeschaffenheit einen Einfluss auf die Befallsaktivität. Bei Vollholz erfolgt der Pilzbefall vor allem über die Hirnholzfläche, über den Querschnitt breitet sich der Pilz anschließend über Tüpfelkanäle aus. Plattenwerkstoffe dagegen bieten eine vergleichsweise offene Kantenstruktur, über die der Pilz leicht in das Innere eindringen kann, vor allem wenn die Struktur infolge Dickenquellung aufgelockert ist. In den Vorversuchen wurden einzelne OSB-Strands mit schmaler Hirnholzfläche zu Bündeln zusammengeschlossen, sodass der Pilzbefall vor allem über die weniger zugänglichen Radialflächen erfolgen musste, woraus ein geringerer Abbau über die achtwöchige Inkubationszeit stattgefunden haben kann. Um eine bessere Einschätzung der Ergebnisse zu erreichen, lässt sich der DSI in Anlehnung an EN 350-1 (1994) in Dauerhaftigkeitsklassen ausdrücken, wobei diese Einteilung normativ nicht festgelegt ist. Demnach lässt sich durch die Vorbehandlung holzartenabhängig maximal Dauerhaftigkeitsklasse 4 für Kiefer und Fichte bzw. Dauerhaftigkeitsklasse 3 für Pappel erreichen. Dabei ist zu erwähnen, dass die Grenze zur Einteilung in eine bessere Dauerhaftigkeitsklasse bei einigen Proben nur leicht überschritten

wird. Dennoch, nach ENV 12038 gilt ein Plattenwerkstoff als vollständig dauerhaft gegen Pilzbefall, wenn der Masseverlust unter 3% liegt. Dieser Wert konnte nicht erreicht werden, sodass die Platten auch nach Vorbehandlung nicht als vollständig dauerhaft einzustufen sind.

Als wichtige Erkenntnis haben insbesondere die Ergebnisse der Pappel-OSB gezeigt, dass der in den Vorversuchen an Kiefer gefundene Zusammenhang zwischen verminderter Gleichgewichtsfeuchte und erhöhter Pilzresistenz auch für eine praktische Umsetzung Bestand hat.

5.3.9 Zusammenfassung

In Tabelle 15 sind die Prüfergebnisse in einer Übersicht zusammengefasst. Die Feuchteaufnahme konnte durch die Vorbehandlung bei allen Platten gesenkt werden. Dabei ist bei den OSB aus Kiefer, deren Strands sowohl bei 220°C als auch 240°C vorbehandelt worden waren, ein deutlicher Einfluss der Temperatur zu erkennen, in Abhängigkeit des Klebstoffes liegt die Reduzierung der Feuchteaufnahme zwischen 17% und 27%; die höhere Feuchteaufnahme der mit Kondensationsharzen gebundenen Platten ist auf den Formaldehydanteil bzw. den Alkaligehalt zurückzuführen. Die Querkzugfestigkeit der Kiefer-OSB nimmt infolge der thermischen Modifizierung um mindesten 2% und maximal rund 16% gegenüber der jeweiligen Referenz ab. Bedingt durch die reduzierte Dickenquellung fällt die Abnahme der Querkzugfestigkeit geringer aus bzw. übersteigt die der Referenz um maximal 38%. Die Biegefestigkeit dagegen weist die deutlichsten Einbußen auf. Durch den Elastizitätsverlust aufgrund des Abbaus der Polyosen sinkt die Biegefestigkeit um 40% bis 50%; die Abnahme des Biege-E-Modul fällt mit 6% bis rund 30% etwas geringer aus. In Bezug auf die eingesetzte Holzart, führte die Vorbehandlung bei Pappel zu einer Reduzierung der Feuchteaufnahme und Dickenquellung um 27% bzw. 66%. Aufgrund des höheren Gehaltes an Pentosanen von Pappel gegenüber Kiefer, bedeutet die gleiche thermische Belastung einen höheren Grad des Abbaus und damit auch der Umsetzung zu hydrophoben Vernetzungsprodukten. Nachteilig wirkt sich der stärkere Abbau in Hinblick auf die Festigkeiten aus. Die relative Abnahme der Querkzugfestigkeit betrug 20% und nach Kochtest 26,5%; die Biegefestigkeit hatte um 42,5% abgenommen, der Biege-E-Modul dagegen überstieg den der Referenz um 6%. In Bezug auf die Dauerhaftigkeit wirkt sich der höhere Abbaugrad wiederum positiv aus; nach Vorbehandlung bei 220°C erreichten die OSB aus Pappel die höchste Dauerhaftigkeit, die in Anlehnung an EN 350-1 (1994) Klasse 3 entspricht.

Bei den Spanplatten aus Fichte wird im Vergleich zu den OSB aus Kiefer der Einfluss des Klebstoffes aufgrund des relativ höheren Benetzungsgrades durch die ungleich größere in-

neren Oberfläche noch deutlicher. Die Dickenquellung wird durch die Vorbehandlung um 50% bis über 65% reduziert, mit MUPF als Bindemittel nimmt die Querkzugfestigkeit ab, bei Verwendung von PMDI dagegen zu. Die Einbußen der Biegeeigenschaften waren für die PMDI-verklebten Platten ebenfalls geringer.

Tabelle 15: Relative Veränderung der Eigenschaften im Vergleich zur Referenz, Angaben in Prozent; Dauerhaftigkeit (DH) in Anlehnung an EN 350 in Dauerhaftigkeitsklasse angegeben

Probe	Feuchte (20°C / 65%)	Dicken- quellung (24 h)	Querkzugfestigkeit		MOE	MOR	DH (Klasse)
			trocken	nach Kochtest			
Ki 220°C, MUPF	-18,5	-41,7	-11,7	9,5	-25,0	-51,5	4
Ki 240°C, MUPF	-22,8	-51,0	-13,7	38,0	-29,0	-52,8	4
Ki 220°C, PF	-13,0	-32,0	-11,0	-2,3	-10,0	-40,3	4
Ki 240°C, PF	-17,0	-41,5	-2,0	-3,8	-7,2	-39,5	4
Ki 220°C, PMDI	-21,0	-44,8	-15,8	23,0	-10,8	-38,3	4
Ki 240°C, PMDI	-27,0	-47,2	-15,8	21,0	-5,6	-39,4	4
Fi 220°C, MUPF	-16,0	-67,0	-26,0	-23,5	-10,7	-37,7	4
Fi 220°C, PMDI	-19,5	-49,0	1,5	10,5	3,0	-20,5	4
Pa 220°C, PMDI	-27,0	-66,0	-20,0	-26,5	6,0	-42,5	3

6 Simultan- und Nachbehandlung

Im Vergleich zur Vorbehandlung erfolgen Simultan- und Nachbehandlung während des Pressens der Platten beziehungsweise nach der Plattenherstellung. Bei der Simultanbehandlung wird die thermische Modifizierung während des Pressvorganges durch Verlängern der Presszeit und damit einem Anstieg der Temperatur über den Plattenquerschnitt angestrebt. Die Nachbehandlung schließt sich dem Pressvorgang an; der verpresste Werkstoff wird anschließend unter Wärmezufuhr und Druck modifiziert.

6.1 Material und Methoden

6.1.1 Spanmaterial

Die Versuche zur Simultan- und Nachbehandlung wurden bei OSB aus Kiefer (*Pinus sylvestris* L.) durchgeführt. Dabei wurden industriell hergestellte Mittelschicht-Strands verwendet, die auf eine Feuchte von etwa 4% vorgetrocknet waren.

6.1.2 Klebstoff

Für die Versuchsreihe wurde Diphenylmethan-Diisocyanat (PMDI) der BAYER AG (DES-MODUR® 1520 A20) sowie ein Melamin-Harnstoff-Phenol-Formaldehydharz (MUPF) der BASF AG (Kauratec 500) eingesetzt; als Härter wurden dem MUPF-Harz 3% Ammoniumnitrat beigemischt. Der Klebstoffanteil bezogen auf trockene Spanmasse betrug bei Verwendung von MUPF 8% und für PMDI 5%. Als Hydrophobierungsmittel kam Paraffinemulsion (Mobilcer 730) mit einem Anteil von 1% bezogen auf trockene Spanmasse zum Einsatz.

6.1.3 Herstellung der Laborplatten

Die Strands wurden in einem Mischer der Firma LÖDIGE beleimt, das Bindemittel unter Luftdruck über eine Zweistoffdüse auf das Spangut aufgebracht. Ein gleichmäßiger Klebstoffauftrag wurde durch Umwälzschaufeln in der Beleimtrommel erreicht. Die Drehzahl war mit 28 min^{-1} niedrig gewählt, um eine Nachzerkleinerung der Strands zu verringern. Die Beleimung erfolgte zweistufig; zunächst wurden Wasser und Paraffin, danach das jeweilige Klebstoffsystem aufgetragen. Die Feuchte des Spanguts wurde durch die Beleimung auf 10% eingestellt. Die beleimten Strands wurden manuell in einen Streurahmen auf das Pressblech verteilt, wodurch keine Orientierung erreicht wurde. Nach manueller Vorverdichtung wurden die Platten in einer Laborpresse der Firma SIEMPELKAMP verpresst, die Heizplattentemperatur betrug 220°C . Die Platten wurden nach dem Verpressen und vor der Stapellagerung luftdicht in Aluminiumfolie verpackt, um übermäßiges Abkühlen und Austrocknen zu vermeiden.

6.1.4 Stapellagerung

Die Nachbehandlung der Platten erfolgte entsprechend der jeweiligen Versuchsreihe bei unterschiedlichen Temperaturen unter simulierten Stapelbedingungen. Hierzu wurden die Platten einer Abmessung von 500 x 500 mm² in eine Box eingelagert, in der durch regelbare Heizplatten eine Temperatur von maximal 180°C eingestellt werden kann. Der Plattenstapel wurde zusätzlich durch ein Flächengewicht beschwert, um so eine Stapelhöhe von 1 m zu simulieren.

6.1.5 Kombinationsverfahren SINA

In dieser Versuchsreihe wurde die Nachbehandlung von MUPF- und PMDI-gebundenen OSB im Stapel bei Temperaturen von 160°C und 180°C für eine Dauer von 24 bis 72 Stunden durchgeführt. Zusätzlich sollte ein Einfluss der Plattenfeuchte auf das Ergebnis einer thermischen Modifizierung untersucht werden. Hierzu wurde nach dem Verpressen eine entsprechende Wassermenge auf die Platten aufgebracht und die Plattenfeuchte auf 4% bzw. 6% eingestellt.

Damit die Platten nach dem Verpressen bis zum Zeitpunkt der Stapellagerung nicht zu stark auskühlen und um eine gleichmäßige Durchwärmung der Platten zu gewährleisten, wurde die Presszeit angehoben. Hierzu wurde mittels Thermoelementen die Temperatur in der Mittelschicht der OSB während des Pressvorganges gemessen. Nach einer Presszeit von 1100 Sekunden (entsprechend einem Presszeitfaktor von etwa 73 s/mm) erreichte die Temperatur in der Mittelschicht 210°C; dieses Pressprogramm wurde auf alle Platten angewandt. Als Referenz dienten Platten, bei denen weder die Feuchte eingestellt noch eine Stapelbehandlung nachfolgte. Da der eigentlichen Nachbehandlung in dieser Versuchsreihe bereits eine Simultanbehandlung durch angehobene Presszeit vorausging, lässt sich dieses Verfahren als Kombinationsverfahren, bestehend aus **SI**multan- und **NA**chbehandlung (SINA) bezeichnen. Für diese Versuchsreihe wurden insgesamt 36 Platten, zwei von jedem Typ, mit einer Dicke von 15 mm hergestellt und untersucht.

6.1.6 Nachbehandlung

In einer zweiten Versuchsreihe zur Nachbehandlung wurden die Platten bei Temperaturen von 120°C, 140°C und 160°C für eine Dauer von 24 und 48 Stunden im beheizten Stapelsimulator eingelagert. Im Gegensatz zum ersten Ansatz wurde die Presszeit der jeweils angestrebten Stapeltemperatur angepasst. Mittels Thermoelementen wurde die Presszeit bestimmt, die notwendig war, um die jeweilige Stapeltemperatur im Plattenkern zu erreichen. Ausgedrückt als spezifischer Presszeitfaktor (PZF) in s/mm Plattendicke ergab sich für eine

Stapeltemperatur von 120°C ein PZF von 24 s/mm, für 140°C 30 s/mm und für 160°C 36 s/mm. Um den Einfluss der unterschiedlichen Presszeitfaktoren zu erfassen, wurden zum Vergleich Platten mit den gleichen PZF hergestellt, aber auf eine Nachbehandlung verzichtet (Stapeldauer 0 Stunden). Als Referenz wurden Platten mit einem PZF von 12 s/mm verpresst und nicht im Stapel nachbehandelt. Für diesen Ansatz der Nachbehandlung wurde ausschließlich PMDI als Bindemittel eingesetzt, die Referenzplatten sowohl mit als auch ohne Paraffinzusatz hergestellt. Von jedem Plattentyp wurden zwei Platten mit einer Dicke von 16 mm hergestellt, der Probenumfang belief sich somit auf 22 Platten.

6.1.7 Prüfmethoden

Die Platten wurden auf ihre Feuchteaufnahme (EN 322 (1993)) und Dickenquellung (EN 317 (1993)) sowie ihre mechanischen Eigenschaften (Querzugfestigkeit (EN 319 (1993), EN 1087-1 (1995)), Biegeeigenschaften (EN 310 (1993)) untersucht. Darüber hinaus wurden Witterungsbeständigkeit (BAM-Zyklus, Tabelle 24) und Dauerhaftigkeit (EN 12038) der Platten bestimmt; die Prüfmethoden sind im Einzelnen in Abschnitt 4.2 aufgeführt.

6.2 Ergebnisse und Diskussion – Kombinationsverfahren SINA

6.2.1 Gleichgewichtsfeuchte und Dickenquellung

In Abbildung 59 und Abbildung 60 ist die Gleichgewichtsfeuchte bei 20°C und 65% relative Luftfeuchte dargestellt. Die Referenzplatten erreichen unabhängig des Klebstoffes eine Ausgleichsfeuchte von 8%. Durch die Nachbehandlung im Stapel für 24 Stunden sinkt die Feuchteaufnahme der MUPF-gebundenen Platten um 10%; ein Einfluss der Plattenfeuchte und Stapeltemperatur ist nicht erkennbar, sondern erst mit Anheben der Stapeldauer auf 72 Stunden. Bei den MUPF-gebundenen Platten, die bei 160°C nachbehandelt wurden, sinkt die Gleichgewichtsfeuchte gegenüber der Behandlung für 24 Stunden nur gering auf etwa 7%, die etwas geringere Ausgleichsfeuchte bei höherer Plattenfeuchte (6%) ist statistisch nicht signifikant. Die Stapeltemperatur von 180°C führt zu einer Abnahme der Gleichgewichtsfeuchte um 14% bis etwa 16% gegenüber der Referenz. Die stärkere Abnahme wird dabei durch die Platten mit höher eingestellter Plattenfeuchte erreicht; der Unterschied ist statistisch signifikant.

Die PMDI-gebundenen OSB weisen nach 24stündiger Stapellagerung bei 160°C und 180°C eine um 8% bis 10% geringere Gleichgewichtsfeuchte auf als die Referenz. Der geringe, aber signifikante Unterschied ist dabei auf die Plattenfeuchte zurückzuführen. Unabhängig der Stapeltemperatur weisen die Platten, deren Feuchte vor der Nachbehandlung auf 6% eingestellt worden war, eine um drei Prozentpunkte geringere Gleichgewichtsfeuchte auf als OSB mit einer Plattenfeuchte von 4%. In Verbindung mit einem Anheben der Stapeldauer auf 72 Stunden zeigt sich neben der Plattenfeuchte auch ein Einfluss der Temperatur auf das Ergebnis. Eine Nachbehandlung bei 160°C führt in Verbindung mit einer Plattenfeuchte von 6% zu einer maximalen Reduzierung der Feuchteaufnahme um 16% gegenüber der Referenz; eine Plattenfeuchte von 4% führt zu geringfügig, aber statistisch signifikant höheren Werten. Durch eine Stapeltemperatur von 180°C und einer Plattenfeuchte von 6% lässt sich die Gleichgewichtsfeuchte um maximal 20% reduzieren; mit einer Plattenfeuchte von 4% liegt die Reduzierung bei rund 18%.

Anhand der Ergebnisse lässt sich der Einfluss der Plattenfeuchte auf das Resultat einer thermischen Modifizierung ableiten. Insbesondere in Verbindung mit höheren Temperaturen tritt dieser Parameter in den Vordergrund. Dabei ist zu beachten, dass die angestrebte Plattenfeuchte von 4% bzw. 6% wahrscheinlich niedriger ausfiel. In Vorversuchen wurde die Plattenfeuchte bestimmt, um festzustellen, ob die rechnerisch ermittelte Wassermenge ausreicht, um die jeweilige Zielfeuchte einzustellen. Im Ergebnis lag die angestrebte Feuchte

von 6% nur bei 3%, und sank bereits nach vierstündiger Stapellagerung bei 180°C auf 2%. Daher wurde die aufzubringende Wassermenge um 20% erhöht, sowohl für die angestrebte Plattenfeuchte von 6% als auch von 4%.

Die Proben wurden mit Aluminiumfolie verpackt, deshalb lässt sich die Stapelbehandlung in dieser Form als geschlossenes System betrachten. Durch die simulierten Stapelbedingungen wird zudem Druck auf die Platten ausgeübt, sodass sich dieser Prozess prinzipiell an das FWD-Verfahren nach Burmester (1974) anlehnt. Bei der thermischen Zersetzung von Holz werden durch den Abbau der thermisch instabilen Polyosen Carbonsäuren (v.a. Essigsäure) freigesetzt. Diese katalysieren die Umsetzung der Polyosen zu einem hydrophoben, polykondensierten Netzwerk. Durch das geschlossene System wird vermieden, dass diese Katalysatoren ihren Wirkungsraum verlassen können. Zudem werden durch den Druck die Zellumina verdichtet, so dass die gasförmigen Abbauprodukte in der Zellwand verbleiben und dort zu hydrophoben Polykondensaten reagieren können, wie aus den Arbeiten von Runkel (1951) sowie Runkel und Wilke (1951) über die thermische Modifizierung von Sägespänen aus Buche und Fichte bei Temperaturen zwischen 140°C und 195°C hervorgeht, die auf 0,7 bis 1,35 g/cm³ verdichtet wurden.

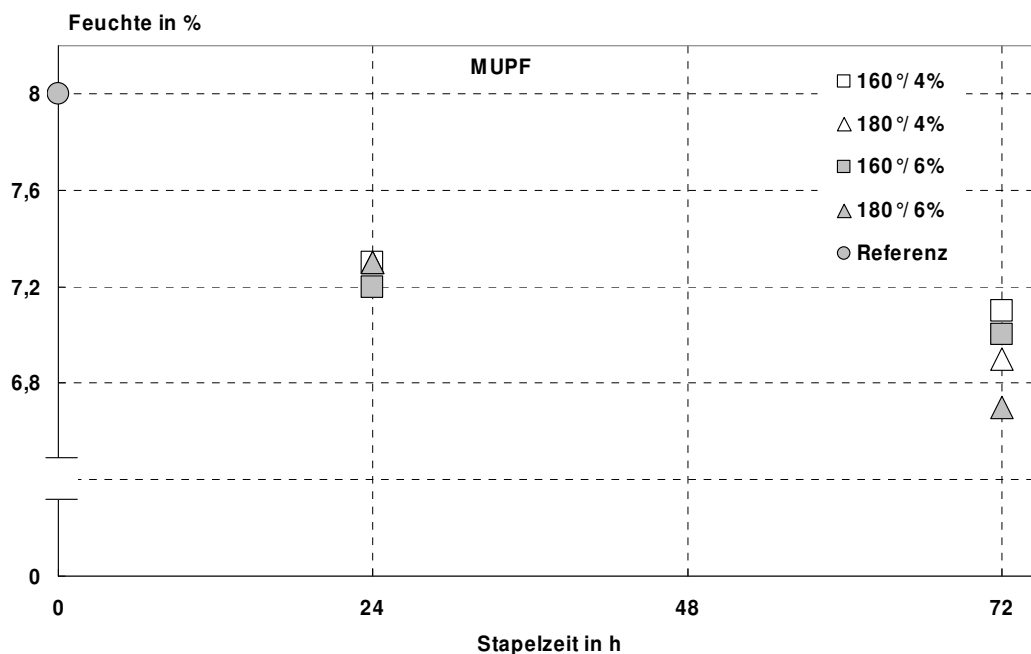


Abbildung 59: Gleichgewichtsfeuchte bei 20°C und 65% r. Lf. MUPF-gebundener OSB infolge Nachbehandlung im Stapel im Vergleich zur Referenz.

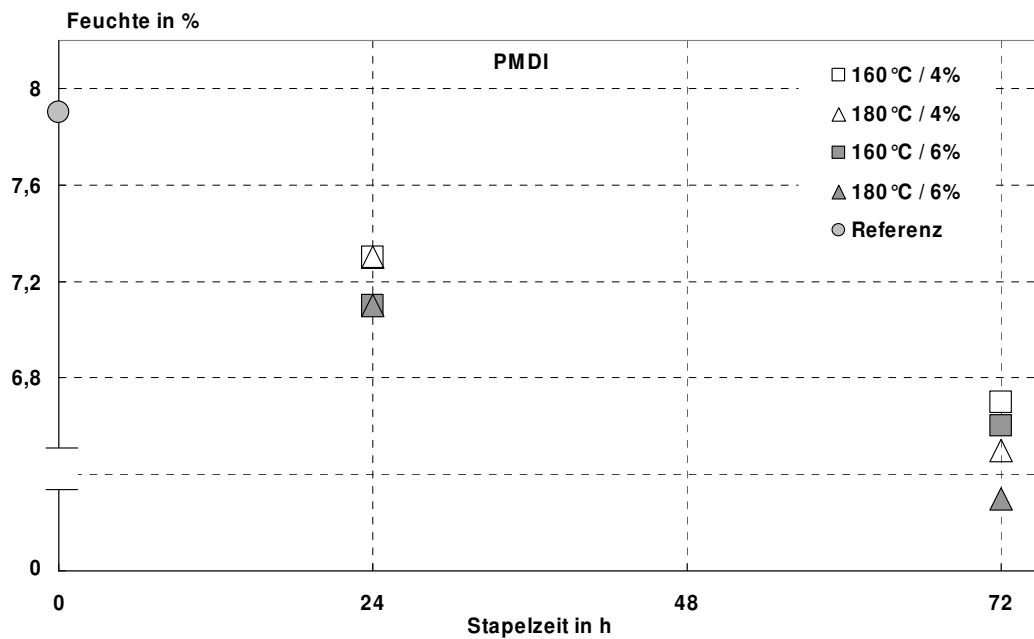


Abbildung 60: Gleichgewichtsfeuchte bei 20°C und 65% r. Lf. PMDI-gebundener OSB infolge Nachbehandlung im Stapel im Vergleich zur Referenz.

Die Dickenquellung der MUPF-gebundenen OSB nach 24 und 72 Stunden Wasserlagerung ist den Abbildung 61 bis Abbildung 64 zu entnehmen. Die Referenzplatte wies eine Dickenquellung von 16% nach 24stündiger Wasserlagerung und rund 19% nach 72 Stunden auf. Nach einer Stapelzeit von 24 Stunden bei 160°C und einer Plattenfeuchte von 4% lag die Dickenquellung nach 24 Stunden Wasserlagerung bei 15% und nach 72stündiger Wasserlagerung bei rund 18% (Abbildung 61). Damit liegt die Dickenquellung geringfügig, statistisch aber nicht signifikant unter der Referenz. Die erhöhte Plattenfeuchte (6%) führt zu einer Abnahme der Dickenquellung, die nach 24stündiger Wasserlagerung mit rund 14% und nach 72stündiger Wasserlagerung mit einer Dickenzunahme von rund 17% statistisch signifikant um cirka 14% unter der Referenz liegt. Die auf 72 Stunden ausgedehnte Stapelzeit resultiert in erhöhter Dickenquellung MUPF-gebundener OSB gegenüber der Referenz (Abbildung 62). Zudem wirkt sich die höhere Plattenfeuchte negativ auf das Ergebnis aus; die Dickenquellung nach 72stündiger Wasserlagerung liegt mit 28% um 45% über der Referenz.

Ein Anheben der Behandlungstemperatur auf 180°C führt nach 24stündiger Nachbehandlung zu einer Dickenquellung von etwa 16% nach 24 und zwischen 18% und 19% nach 72 Stunden Wasserlagerung, wenn die Plattenfeuchte auf 4% bzw. 6% eingestellt wurde (Abbildung 63). Damit führen diese Prozessbedingungen zu keiner Verbesserung der Dickenquellung. Die Nachbehandlung für eine Dauer von 72 Stunden (Abbildung 64) führt zu

deutlich erhöhter Dickenquellung im Vergleich zur Referenz. Bei einer Plattenfeuchte von 4% liegt die Dickenquellung nach 24 Stunden bei 26% und nach 72 Stunden bei 29%. Damit übersteigen die Platten die Referenz um bis zu 65% (nach 24stündiger Wasserlagerung). Bei einer eingestellten Plattenfeuchte von 6% liegt die Dickenquellung zwar ebenfalls deutlich über der Referenz, das Ausmaß ist allerdings geringer als bei den Platten mit einer Feuchte von 4%. Mit einer Dickenquellung von 23% nach 24 Stunden Wasserlagerung übersteigt die nachbehandelte Platte die Referenz um 45%, nach 72 Stunden Wasserlagerung liegt der Wert um 35% über der Referenz (Dickenquellung 26%).

Mit den hier angewandten Prozessparametern lies sich für MUPF-gebundene OSB eine maximale Verbesserung der Dickenquellung um 14% erreichen, wenn die Temperatur 160°C sowie eine Stapeldauer von 24 Stunden nicht überstieg und in Verbindung mit erhöhter Plattenfeuchte. Ein Anheben der Stapeltemperatur und –dauer führte zu einer Verschlechterung der Dickenquellung. Dieses Ergebnis ist wesentlich auf die geringe Hydrolysebeständigkeit des MUPF zurückzuführen (Dunky 2002).

Zwar lag die Dickenquellung nach Behandlung bei 180°C für 72 Stunden deutlich über der Referenz, aber dennoch ist auch hier der positive Einfluss der Plattenfeuchte auf das Vergütungsresultat erkennbar. Die Dickenquellung der 6%-Platten fiel geringer aus als bei den Platten, deren Feuchte auf 4% eingestellt worden war. Dieses Ergebnis ist auf die bereits beschriebene hydrolytische Umsetzung der Abbauprodukte der Polyosen verbunden, die in Anwesenheit von Feuchte schneller erfolgt.

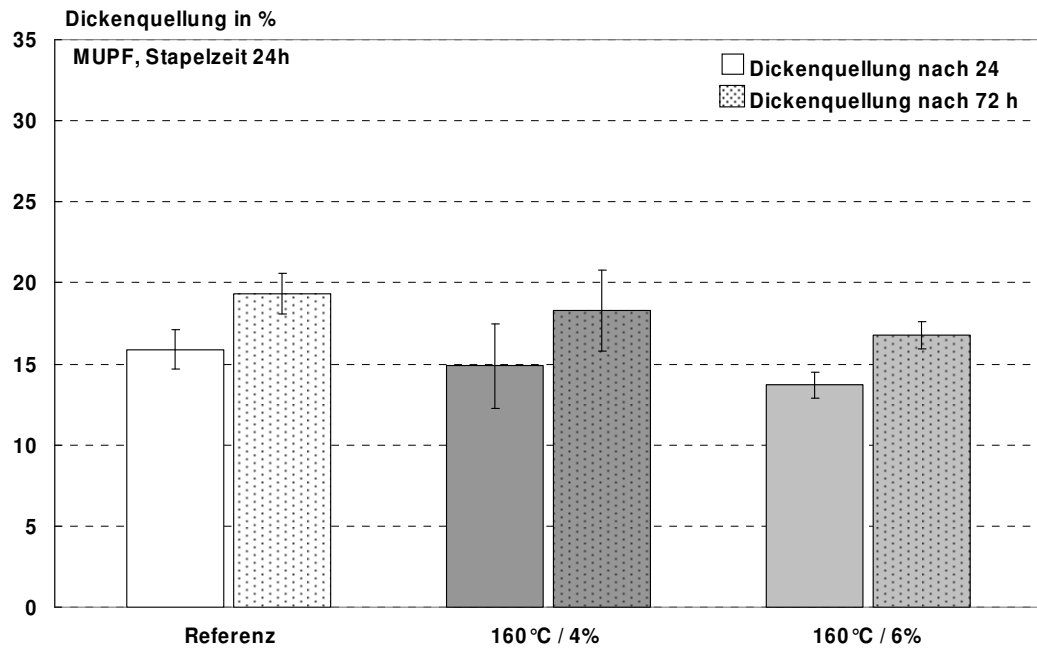


Abbildung 61: Dickenquellung nach 24 und 72 Stunden Wasserlagerung von MUPF-gebundenen Platten, die für 24 Stunden bei 160°C nachbehandelt wurden; die Feuchte der Platten war auf 4% bzw. 6% eingestellt.

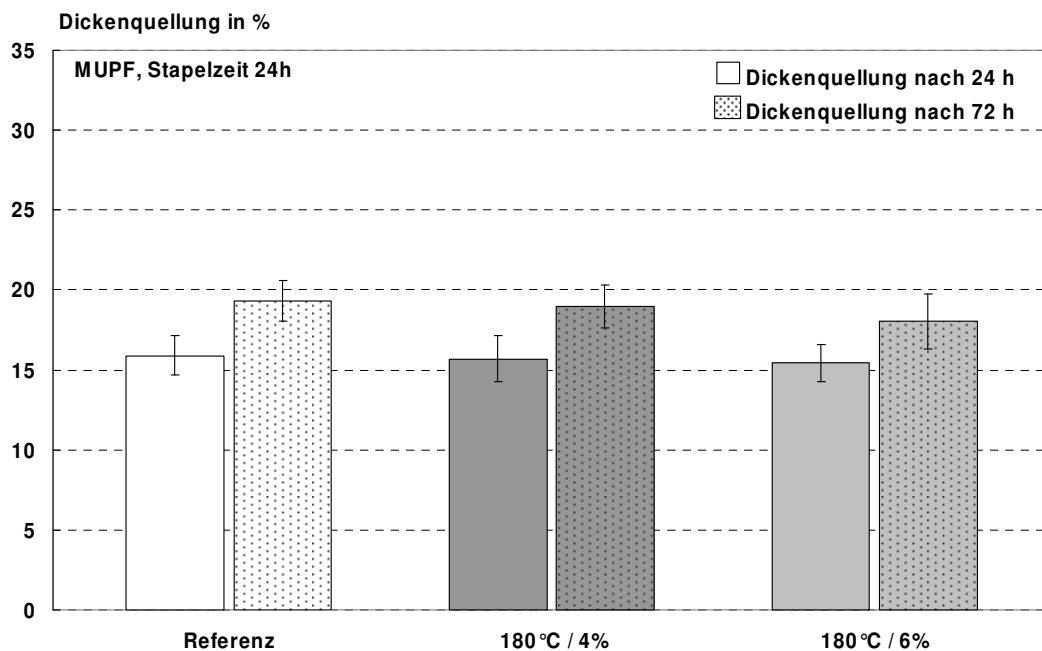


Abbildung 62: Dickenquellung nach 24 und 72 Stunden Wasserlagerung von MUPF-gebundenen Platten, die für 24 Stunden bei 180°C nachbehandelt wurden; die Feuchte der Platten war auf 4% bzw. 6% eingestellt.

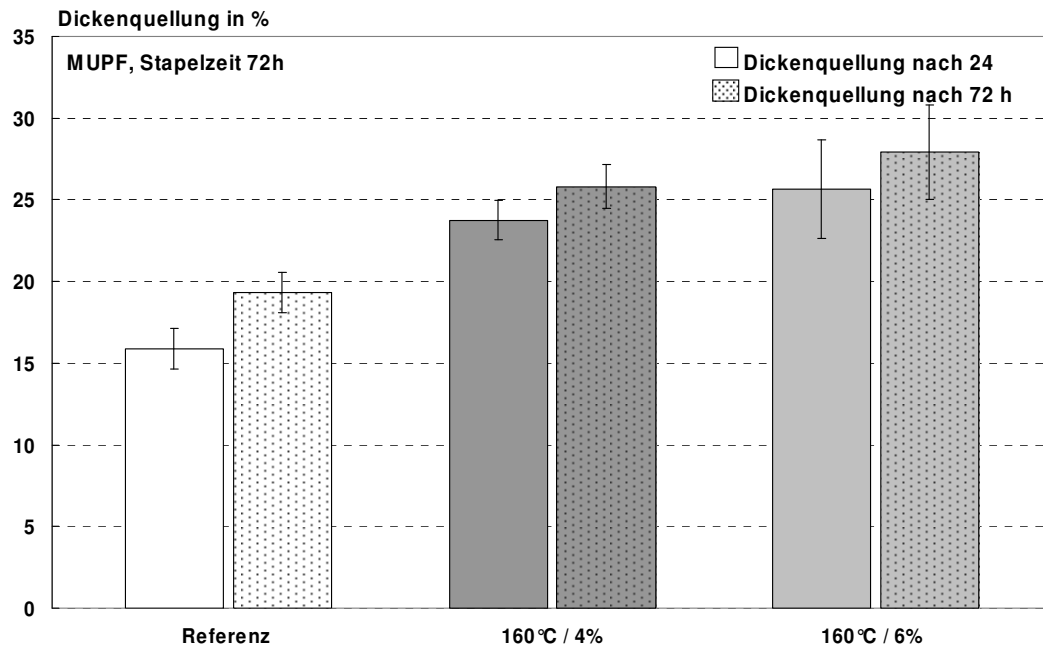


Abbildung 63: Dickenquellung nach 24 und 72 Stunden Wasserlagerung von MUPF-gebundenen Platten, die für 72 Stunden bei 160°C nachbehandelt wurden; die Feuchte der Platten war auf 4% bzw. 6% eingestellt.

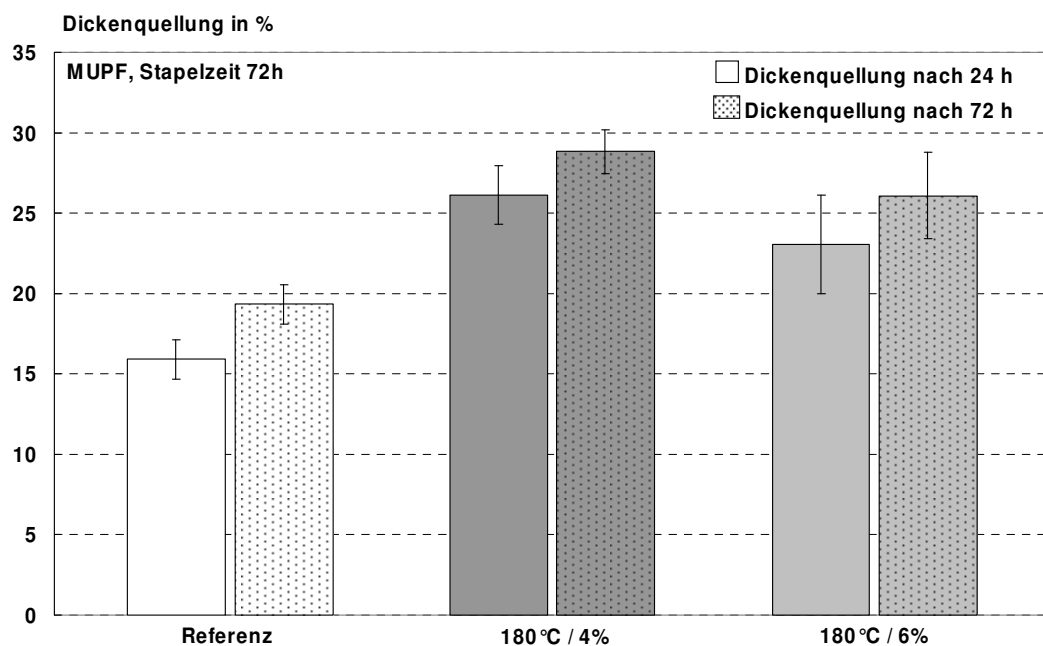


Abbildung 64: Dickenquellung nach 24 und 72 Stunden Wasserlagerung von MUPF-gebundenen Platten, die für 72 Stunden bei 180°C nachbehandelt wurden; die Feuchte der Platten war auf 4% bzw. 6% eingestellt.

Die Dickenquellung der PMDI-gebundenen Platten ist in Abbildung 65 bis Abbildung 68 dargestellt. Die Referenzplatten erreichen eine Dickenquellung von etwa 5% nach 24 Stunden, die auf maximal 12% nach 72 Stunden steigt. Durch Nachbehandlung im Stapel bei 160°C für 24 Stunden, verbunden mit einer Plattenfeuchte von 4% liegt die Dickenquellung nach 24 Stunden durchschnittlich um etwa 10% unter dem Referenzwert (Abbildung 65). Nach 72stündiger Wasserlagerung erreicht die Dickenquellung mit durchschnittlich 11% einen um 7% geringeren Wert als die entsprechende Referenz (statistisch aber nicht signifikant). Die Erhöhung der Plattenfeuchte auf 6% führt zu einer statistisch signifikanten Reduzierung der Dickenquellung um 30% nach 24 Stunden (rund 3,5% Dickenquellung) bzw. 16% nach 72 Stunden Wasserlagerung (10% Dickenquellung). Die Erhöhung der Stapeldauer bei 160°C auf 72 Stunden wirkt sich in einer weiteren Reduzierung der Dickenquellung aus (Abbildung 67); die Dickenzunahme nach 24 (3%) bzw. 72 Stunden (7%) liegt statistisch signifikant um 40% bis 45% unter der Referenz; ein Einfluss der Plattenfeuchte ist dabei nicht erkennbar.

Nach 24stündiger Stapeldauer bei 180°C wird die Dickenquellung nach 24 Stunden Wasserlagerung auf 4,3% bzw. 3,5% reduziert (Abbildung 66), wenn die Plattenfeuchte auf 4% bzw. 6% eingestellt worden war. Damit liegt die Dickenquellung um 17% bis 30% unter der Referenz. Die Dickenzunahme nach 72stündiger Wasserlagerung ist um 13% bis 25% gegenüber der Referenz reduziert. Im Gegensatz zu einer Nachbehandlung bei 160°C, ist der Einfluss der Plattenfeuchte signifikant. Die Stapelbehandlung für eine Dauer von 72 Stunden bei 180°C resultiert in einer Reduzierung der Dickenzunahme nach 24 bzw. 72stündiger Wasserlagerung um 50% gegenüber der Referenz (Abbildung 68). Bei Erhöhung der Behandlungsdauer von 24 auf 72 Stunden ist kein signifikanter Einfluss der Plattenfeuchte festzustellen.

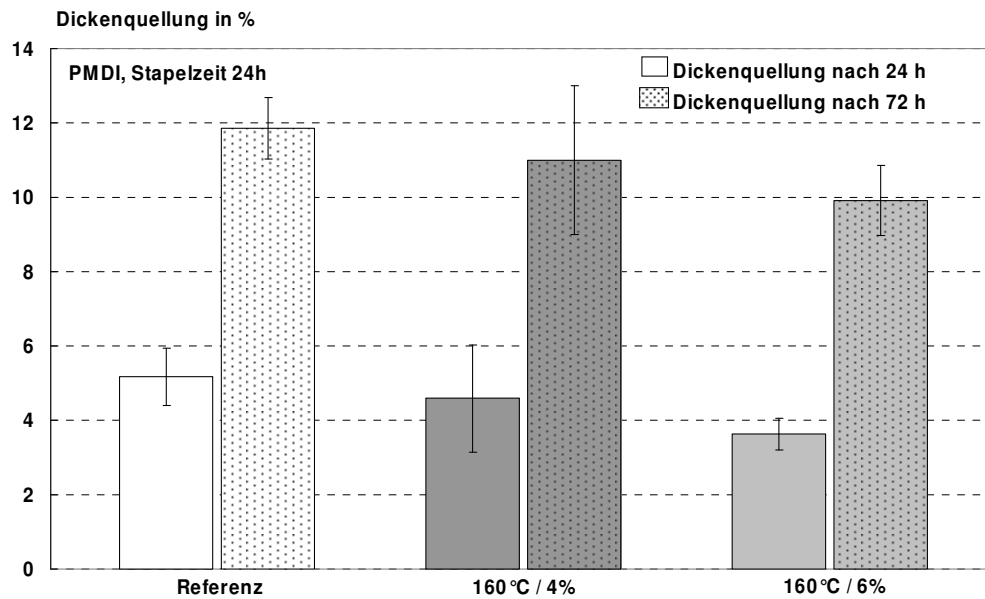


Abbildung 65: Dickenquellung nach 24 und 72 Stunden Wasserlagerung von PMDI-gebundenen Platten, die für 24 Stunden bei 160°C nachbehandelt wurden; die Feuchte der Platten war auf 4% bzw. 6% eingestellt.

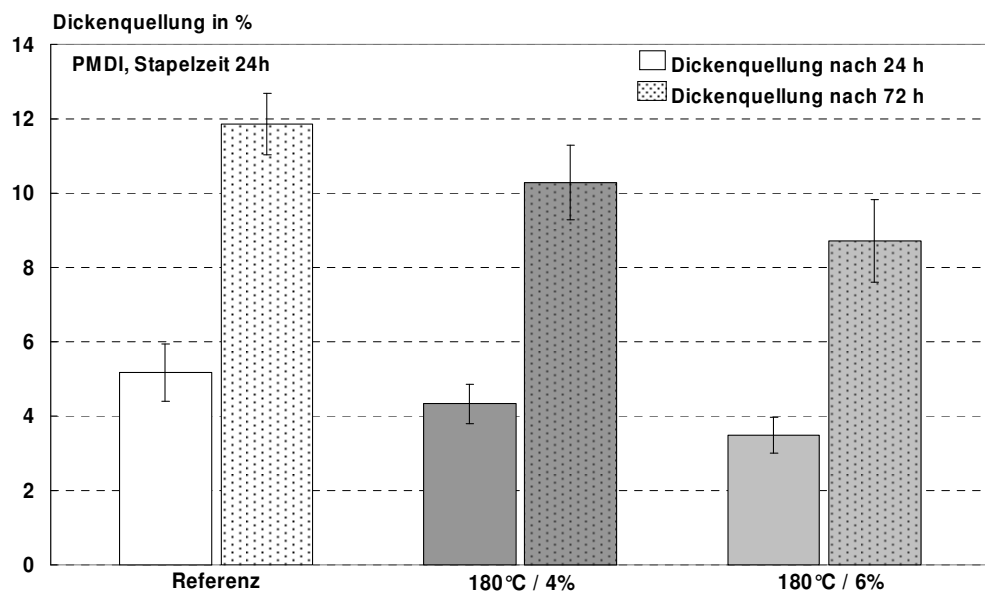


Abbildung 66: Dickenquellung nach 24 und 72 Stunden Wasserlagerung von PMDI-gebundenen Platten, die für 24 Stunden bei 180°C nachbehandelt wurden; die Feuchte der Platten war auf 4% bzw. 6% eingestellt.

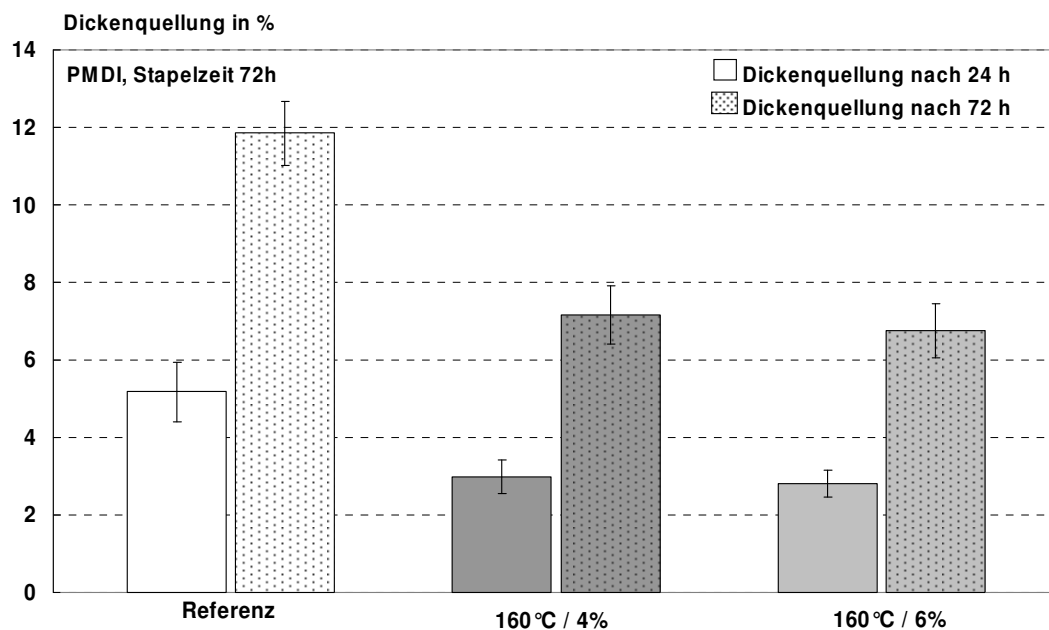


Abbildung 67: Dickenquellung nach 24 und 72 Stunden Wasserlagerung von PMDI-gebundenen Platten, die für 72 Stunden bei 160°C nachbehandelt wurden; die Feuchte der Platten war auf 4% bzw. 6% eingestellt.

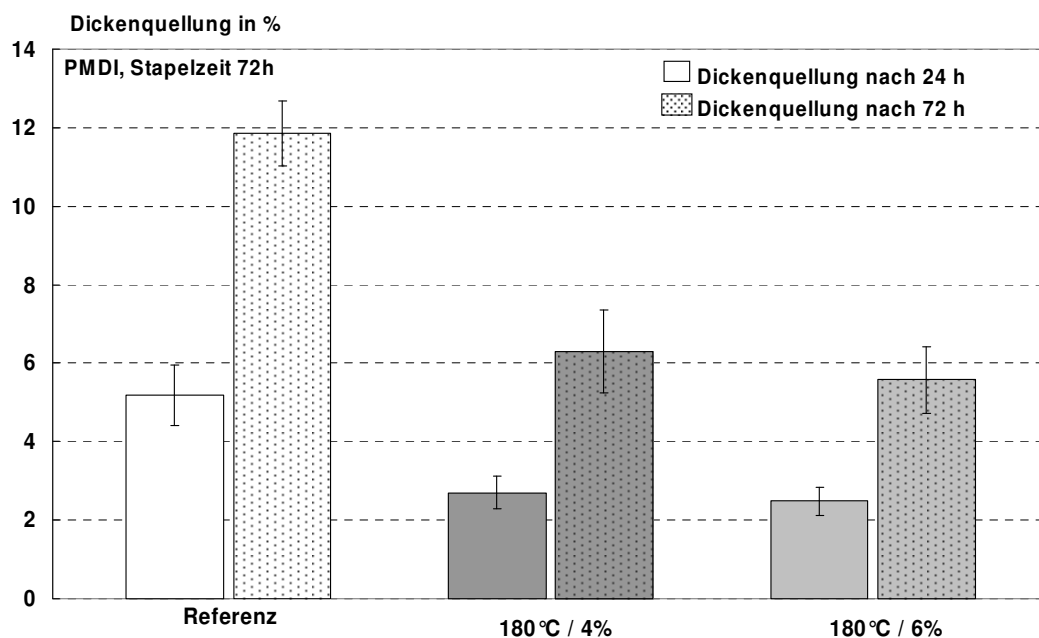


Abbildung 68: Dickenquellung nach 24 und 72 Stunden Wasserlagerung von PMDI-gebundenen Platten, die für 72 Stunden bei 180°C nachbehandelt wurden; die Feuchte der Platten war auf 4% bzw. 6% eingestellt.

Durch die Deformation der Holzzellen werden beim Verpressen des Werkstoffes Spannungen in die Platte eingebracht (Bolton *et al.* 1989), die bei einem Wiederbefeuchten freigesetzt werden können. Der Spannungsabbau resultiert in einer Dickenzunahme. Eine Verbesserung des Quellverhaltens kann durch einen gezielten Spannungsabbau erreicht werden. Die geringe Dickenquellung der PMDI-gebundenen Referenzplatten zeigt, dass bereits durch die langen Presszeiten ein Spannungsabbau erfolgt ist. Durch dieses Ergebnis wird die Wirksamkeit einer Simultanbehandlung deutlich. Die anschließende Nachbehandlung im Stapel führt mit zunehmender Dauer der Behandlung zu einem weiteren Spannungsabbau, so dass die Dickenquellung nach 72stündiger Stapellagerung um 50% reduziert werden kann. Zudem zeigte sich bei den Platten, die für 24 Stunden nachbehandelt wurden, ein Einfluss der Plattenfeuchte. Nach Becker und Reiter (1970) erfolgt insbesondere bei erhöhten Temperaturen unter Feuchteinfluss mit zunehmender Zeit ein Abbau der Spannungen im Holz. Ohlmeyer (2002) fand, dass mit dem Spannungsabbau bei höherer Feuchte und unter Temperatureinfluss auch die Dickenquellung stärker reduziert werden kann.

Die Zugabe von Paraffin als Hydrophobierungsmittel verringert nur kurzzeitig die Wasseraufnahme und damit die Dickenquellung des Werkstoffes. Mit zunehmender Dauer der Wasserlagerung (24 Stunden) verliert Paraffin seine Schutzfunktion (Dunky und Niemz 2002).

Zusammenfassend folgt aus den Ergebnissen, dass die Feuchteaufnahme durch die Nachbehandlung im Stapel herabgesetzt werden kann, das Ausmaß hängt dabei wesentlich von der Stapeldauer und der eingestellten Plattenfeuchte ab; mit höherer Plattenfeuchte und längerer Behandlungsdauer fällt die Feuchteaufnahme geringer aus. Der Einfluss der Temperatur ist hierbei weniger gravierend. Für die Dickenquellung gilt grundsätzlich der gleiche Zusammenhang, allerdings hat der verwendete Klebstoff wesentlichen Einfluss auf das Ergebnis. Bei Verwendung hydrolyseunbeständiger Kondensationsharze führt die Nachbehandlung im Stapel insbesondere in Verbindung mit langer Stapeldauer zu einer Verschlechterung der Dickenquellung. Für die praktische Umsetzung bedeutet dies, dass sich für diese Form der thermischen Modifizierung nur hydrolysebeständige Klebstoffsysteme eignen.

6.2.2 Querzugfestigkeit und Biegeeigenschaften

Die Querzugfestigkeit der MUPF-gebundenen Referenzplatten liegt bei 0,5 N/mm²; die Platten, die bei 160°C für eine Dauer von 24 Stunden behandelt worden waren, weisen keine Änderung der Querzugfestigkeit gegenüber der Referenz auf (Abbildung 69). Nach dem Kochtest beträgt die Querzugfestigkeit für die Referenz sowie die der nachbehandelten Platte

0,05 N/mm²; die Plattenfeuchte hat dabei keinen Einfluss auf das Ergebnis.

Die Erhöhung der Stapeldauer auf 72 Stunden führt zu einer deutlichen Abnahme der Querkzugfestigkeit; in Verbindung mit höherer Plattenfeuchte ist die Abnahme stärker. Bei einer Plattenfeuchte von 4% liegt die Querkzugfestigkeit um 65%, mit Anheben der Plattenfeuchte auf 6% um 78% unter dem Referenzwert. Die Querkzugfestigkeit nach Kochtest konnte für die Platten, deren Stapeldauer 72 Stunden betrug, nicht bestimmt werden, da bereits die Kochung zu einer Zerstörung der Probekörper führte.

In Abbildung 70 ist die Querkzugfestigkeit nach Stapelbehandlung bei 180°C dargestellt. Die Auswirkung der angehobenen Stapeltemperatur hat bei 24stündiger Behandlungsdauer nur geringe Auswirkung auf die Querkzugfestigkeit. Unabhängig der Plattenfeuchte fällt die Querkzugfestigkeit um 10% geringer aus als die Referenz bzw. nach Behandlung bei 160°C. In Verbindung mit einer höheren Stapeldauer (72 Stunden), führt eine Behandlungstemperatur von 180°C zu einem Verlust der Querkzugfestigkeit gegenüber der Nachbehandlung bei 160°C um etwa 40% und liegt damit um bis zu 85% unter dem Referenzwert.

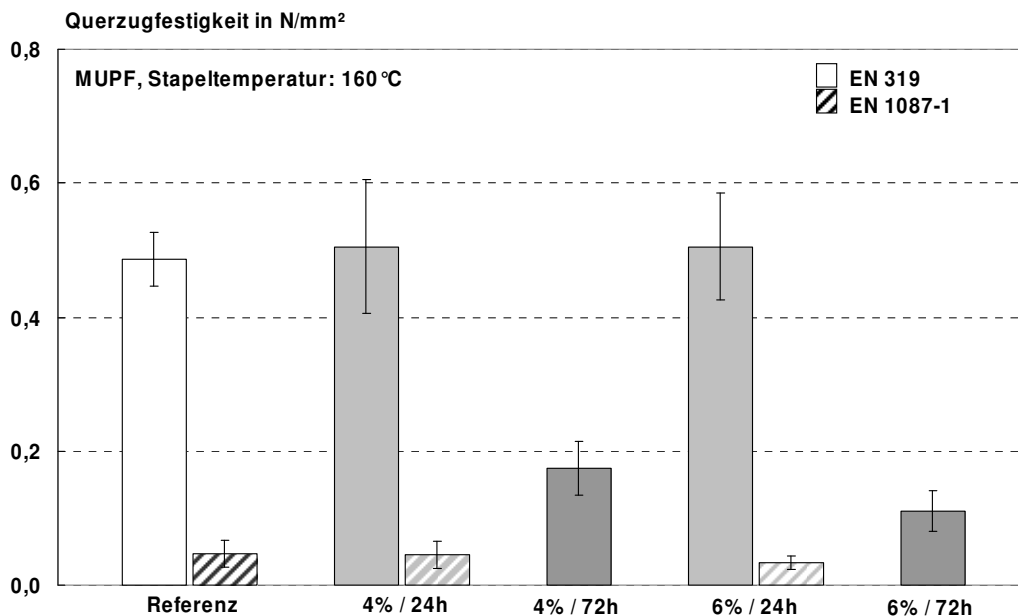


Abbildung 69: Querkzugfestigkeit trocken (EN 319) sowie nach Kochtest (EN 1087-1) von MUPF-gebundenen Platten, die bei 160°C für 24 bzw. 72 Stunden im Stapel nachbehandelt wurden; die Feuchte der Platten war auf 4% bzw. 6% eingestellt.

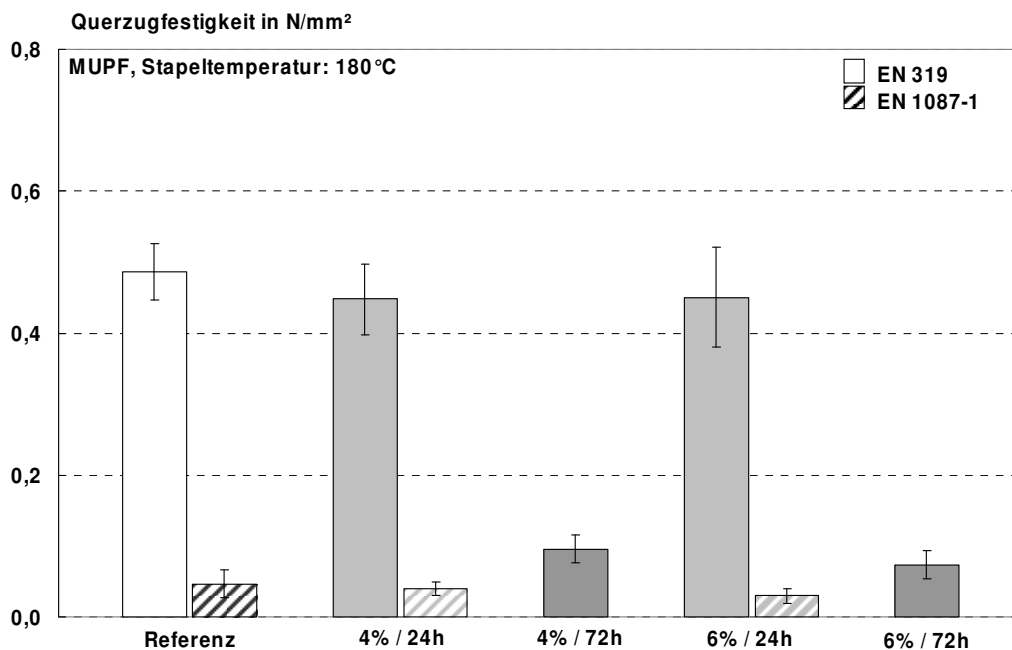


Abbildung 70: Querzugfestigkeit trocken (EN 319) sowie nach Kochtest (EN 1087-1) von MUPF-gebundenen Platten, die bei 180°C für 24 bzw. 72 Stunden im Stapel nachbehandelt wurden; die Feuchte der Platten war auf 4% bzw. 6% eingestellt.

Der Einsatz von PMDI als Klebstoffsystem führt zu deutlich höheren Querzugfestigkeiten (Abbildung 71). Die Referenz erreicht einen Wert von 0,85 N/mm²; nach dem Kochtest beträgt die Querzugfestigkeit 0,4 N/mm². Die Nachbehandlung im Stapel bei 160°C führt unabhängig der Plattenfeuchte und Behandlungsdauer zu keiner signifikanten Veränderung der Querzugfestigkeit.

Mit Anheben der Temperatur im Stapelsimulator auf 180°C, bleibt die Querzugfestigkeit der Platten, die für eine Dauer von 24 Stunden behandelt worden waren, unverändert (Abbildung 72). Mit Anheben der Stapelzeit auf 72 Stunden, sinkt die Querzugfestigkeit auf 0,75 N/mm² und liegt damit um etwa 13% unter dem Referenzwert. Die Plattenfeuchte hat keinen Einfluss auf die Querzugfestigkeit.

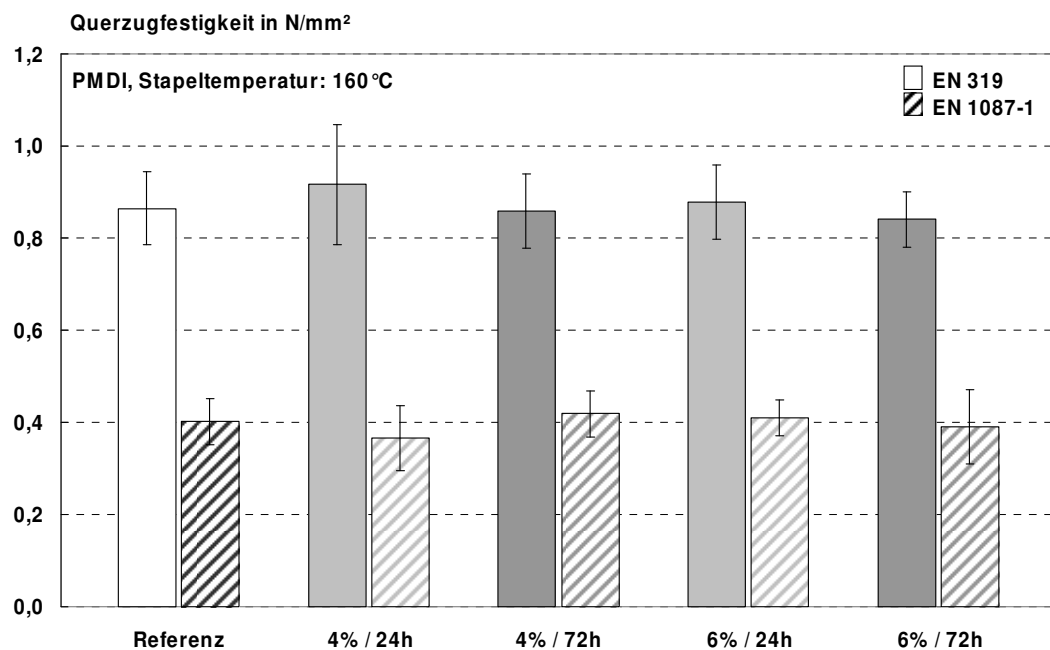


Abbildung 71: Querzugfestigkeit trocken (EN 319) sowie nach Kochtest (EN 1087-1) von PMDI-gebundenen Platten, die bei 160°C für 24 bzw. 72 Stunden im Stapel nachbehandelt wurden; die Feuchte der Platten war auf 4% bzw. 6% eingestellt.

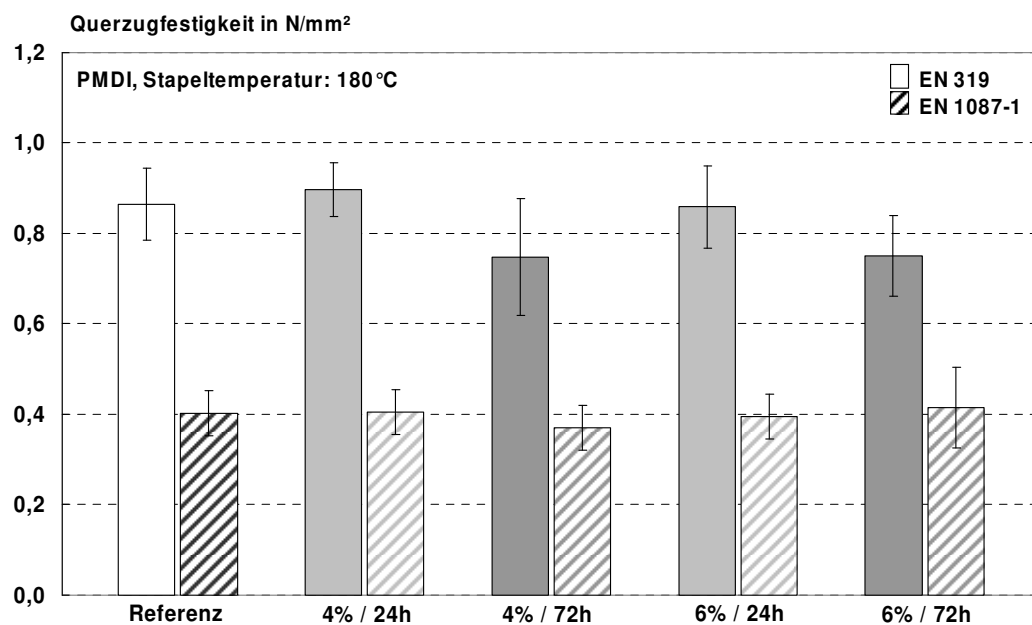


Abbildung 72: Querzugfestigkeit trocken (EN 319) sowie nach Kochtest (EN 1087-1) von PMDI-gebundenen Platten, die bei 180°C für 24 bzw. 72 Stunden im Stapel nachbehandelt wurden; die Feuchte der Platten war auf 4% bzw. 6% eingestellt.

Die unveränderte Querkzugfestigkeit der mit PMDI gebundenen OSB ist auf die thermische Stabilität dieses Klebstoffsystems zurückzuführen. So konnte Ohlmeyer (2002) an PMDI-gebundenen Spanplatten auch nach drei Tagen Stapellagerung bei Temperaturen von 80 bis 100°C keine Veränderung der Klebfestigkeit feststellen. Zudem führt die Stapellagerung zu einem Abbau der Spannungen, die beim Verpressen in die Platten eingebracht werden und zu Einbußen der Festigkeiten führen können (Bolton *et al.* 1989). Werden diese Spannungen nach dem Verpressen abgebaut, sollten keine Festigkeitsverluste auftreten. Ein Spannungsabbau hängt mit Plattenfeuchte und -temperatur zusammen, so dass die Bedingungen der Stapellagerung zum Spannungsabbau beitragen. Bei den MUPF-Platten führte die 72stündige Stapelbehandlung zu starken Einbußen der Querkzugfestigkeit. Als Ursache gilt die geringe Hydrolysebeständigkeit; insbesondere bei hohen Temperaturen und in Verbindung mit Feuchte tritt Hydrolyse verstärkt auf, woraus nach Roux und Gilles (1971) Festigkeitsverluste resultieren. Das bedeutet, durch die eingestellte Plattenfeuchte wird die hydrolytische Zersetzung beschleunigt. Ohlmeyer (2002) konnte in seiner Arbeit den hydrolytischen Abbau des MUPF-Harzes in stapelgelagerten Spanplatten feststellen. Bei einer Stapeltemperatur von 100°C nahm die Querkzugfestigkeit nach 7 Tagen um 10% ab. Da die Mittelschichttemperatur der OSB in dieser Versuchsreihe oberhalb 100°C lag, ist ein hydrolytischer Abbau des MUPF wahrscheinlich. Der Einfluss der geringen Hydrolysebeständigkeit wird jedoch erst nach längerer Stapelzeit deutlich. Nach 24stündiger Stapellagerung treten noch keine Festigkeitsverluste auf. Da es sich in dieser Versuchsreihe um ein Kombinationsverfahren handelt, geht der eigentlichen Nachbehandlung im Stapel bereits eine lange Presszeit voraus, in deren Folge die Temperatur in der Mittelschicht auf 210°C steigt. Nach Robitschek und Christensen (1976) tritt während des Verpressens harnstoffharzverleimter Spanplatten neben der Kondensation auch Hydrolyse des Vorkondensates auf, wodurch es bereits während des Verpressens zu einer Beeinträchtigung der Querkzugfestigkeit gekommen sein kann, insbesondere durch die lange Presszeit. Daher kann angenommen werden, dass die anschließende Nachbehandlung für 24 Stunden noch keine entscheidenden Auswirkungen auf die Querkzugfestigkeit hat. Erst mit Anheben der Behandlungsdauer auf 72 Stunden, verbunden mit einem Temperaturanstieg durch zunehmende Austrocknung der Platten, resultiert eine stärkere hydrolytische Zersetzung des MUPF.

Die Biegeeigenschaften der MUPF-Platten sind in den Abbildung 73 bis Abbildung 76 dargestellt. Der Biege-E-Modul (Abbildung 73, Abbildung 74) nimmt infolge der Behandlung nur leicht gegenüber der Referenz ab. Ein signifikanter Einfluss auf das Ergebnis ist bezüglich einer Erhöhung der Temperatur und Feuchte nicht zu erkennen, die Werte liegen mit etwa

3000 bis 3500 N/mm² im Bereich der Referenz. Die Behandlungsdauer wirkt sich insbesondere in Verbindung mit höheren Temperaturen allerdings in einer Abnahme des Biege-E-Moduls aus, mit Anheben der Stapelzeit von 24 auf 72 Stunden bei 180°C sinkt der Wert auf etwa 2250 bis 2500 N/mm², bei der 160°C-Behandlung ist diese Abnahme mit Heraufsetzen der Dauer geringer. Für die Biegefestigkeit sind die gleichen Tendenzen wie beim Biege-E-Modul zu erkennen (Abbildung 75, Abbildung 76). Ein Anheben der Behandlungstemperatur von 160°C auf 180°C hat keinen Einfluss auf die Biegefestigkeit, die mit etwa 16 N/mm² und maximal 19 N/mm² gegenüber der Referenz (18 N/mm²) nahezu unverändert bleibt. Die Plattenfeuchte beeinflusst die Biegefestigkeit überhaupt nicht. Mit Erhöhung der Behandlungsdauer von 24 auf 72 Stunden nimmt die Biegefestigkeit jedoch deutlich ab, in Verbindung mit höheren Temperaturen ist diese Abnahme stärker, so fällt die Festigkeit auf 10 bis 12 N/mm² bei 160°C bzw. 8 N/mm² bei 180°C ab.

Die Biegeeigenschaften der PMDI-gebundenen OSB sind in den Abbildung 77 bis Abbildung 80 dargestellt. Der Biege-E-Modul (Abbildung 77, Abbildung 78) wird durch die thermische Behandlung im Stapel bei 160°C nicht wesentlich beeinflusst. Eine leichte Abnahme um maximal 300 N/mm² auf 3.300 N/mm² ist bei Anheben der Stapeltemperatur auf 180°C zu erkennen. Die Biegefestigkeit wird durch die Behandlung stärker beeinflusst (Abbildung 79, Abbildung 80). Insbesondere eine erhöhte Stapeltemperatur in Verbindung mit langen Behandlungszeiten wirkt sich in einer Abnahme der Biegefestigkeit aus. Die Referenzplatte erreichte eine Biegefestigkeit von 26 N/mm², die bei 160°C nachbehandelten OSB Werte zwischen 22 und 24 N/mm²; die Nachbehandlung bei 180°C resultierte in Biegefestigkeiten von 18 bis 24 N/mm², wobei die jeweils niedrigsten Festigkeiten nach 72stündiger Behandlung gemessen wurden. Zudem führen bereits verlängerte Presszeiten zu einer Reduzierung der Biegefestigkeit, wie es durch Goroyias und Hale (2002 a) bei Untersuchungen an OSB gefunden werden konnte.

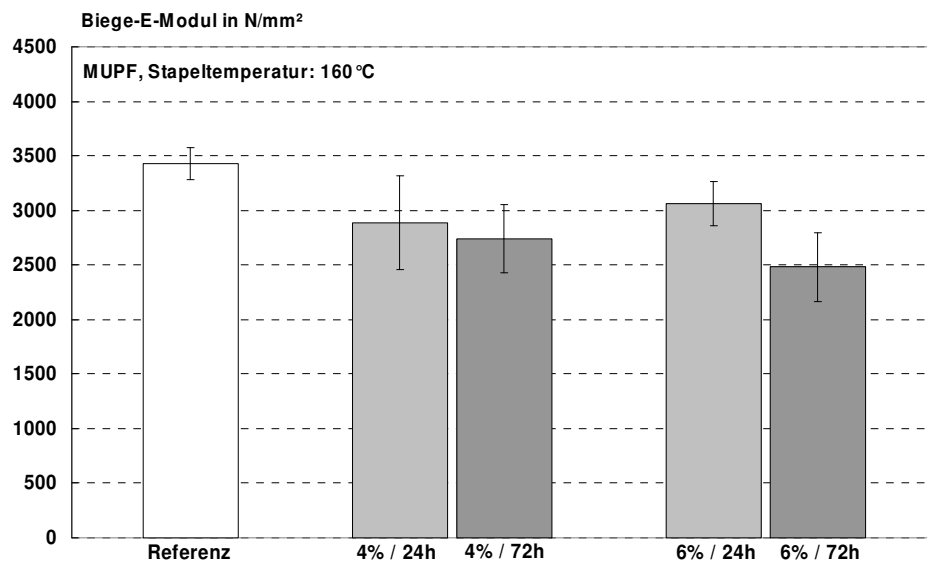


Abbildung 73: Biege-E-Modul von MUPF-gebundenen Platten, die bei 160°C für 24 bzw. 72 Stunden im Stapel nachbehandelt wurden; die Feuchte der Platten war auf 4% bzw. 6% eingestellt.

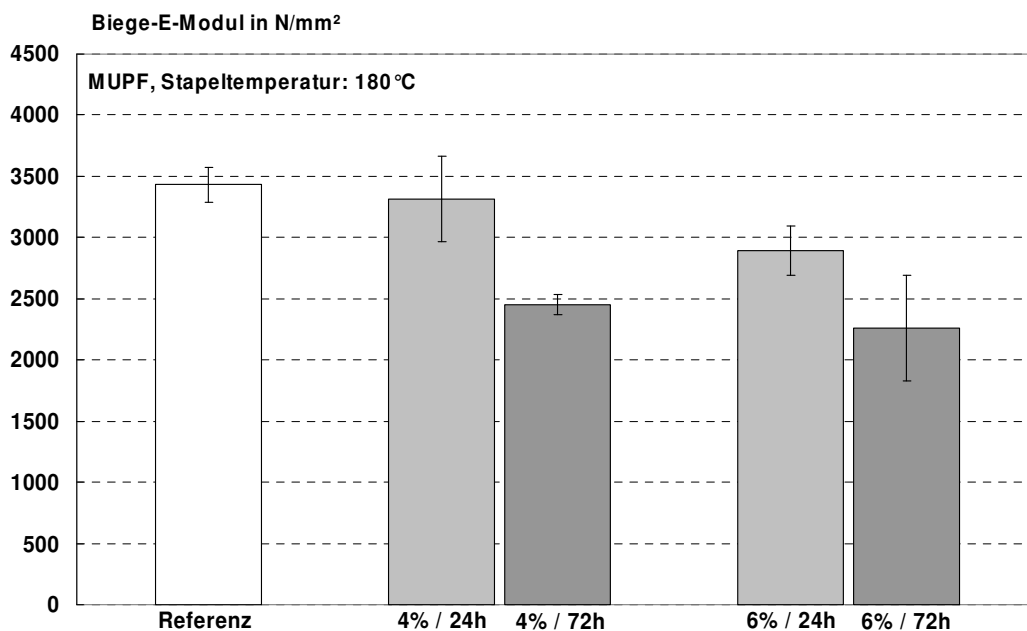


Abbildung 74: Biege-E-Modul von MUPF-gebundenen Platten, die bei 180°C für 24 bzw. 72 Stunden im Stapel nachbehandelt wurden; die Feuchte der Platten war auf 4% bzw. 6% eingestellt.

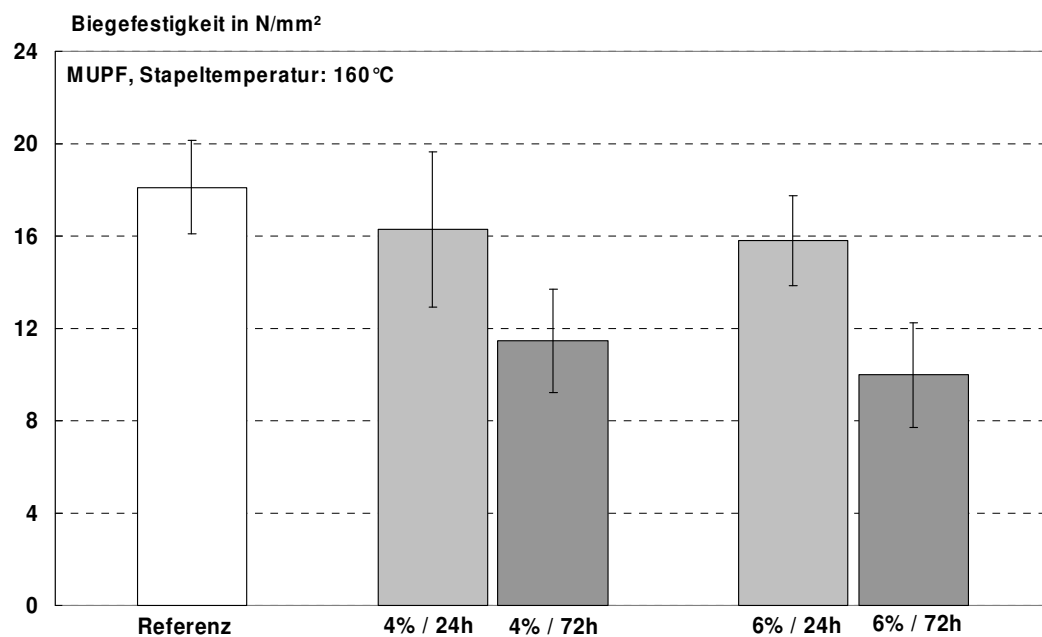


Abbildung 75: Biegefestigkeit von MUPF-gebundenen Platten, die bei 160°C für 24 bzw. 72 Stunden im Stapel nachbehandelt wurden; die Feuchte der Platten war auf 4% bzw. 6% eingestellt.

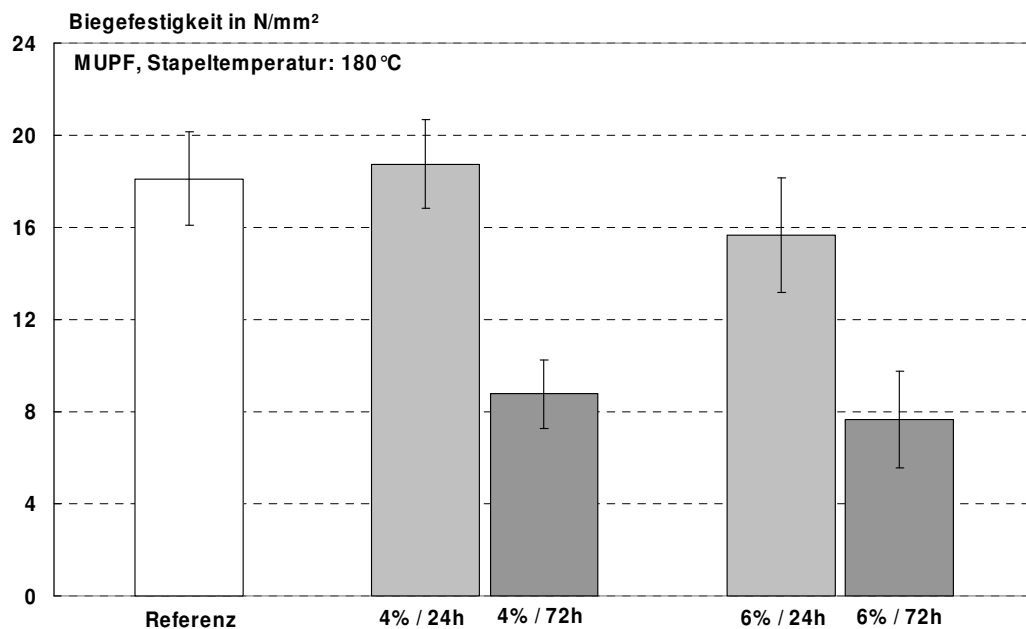


Abbildung 76: Biegefestigkeit von MUPF-gebundenen Platten, die bei 180°C für 24 bzw. 72 Stunden im Stapel nachbehandelt wurden; die Feuchte der Platten war auf 4% bzw. 6% eingestellt.

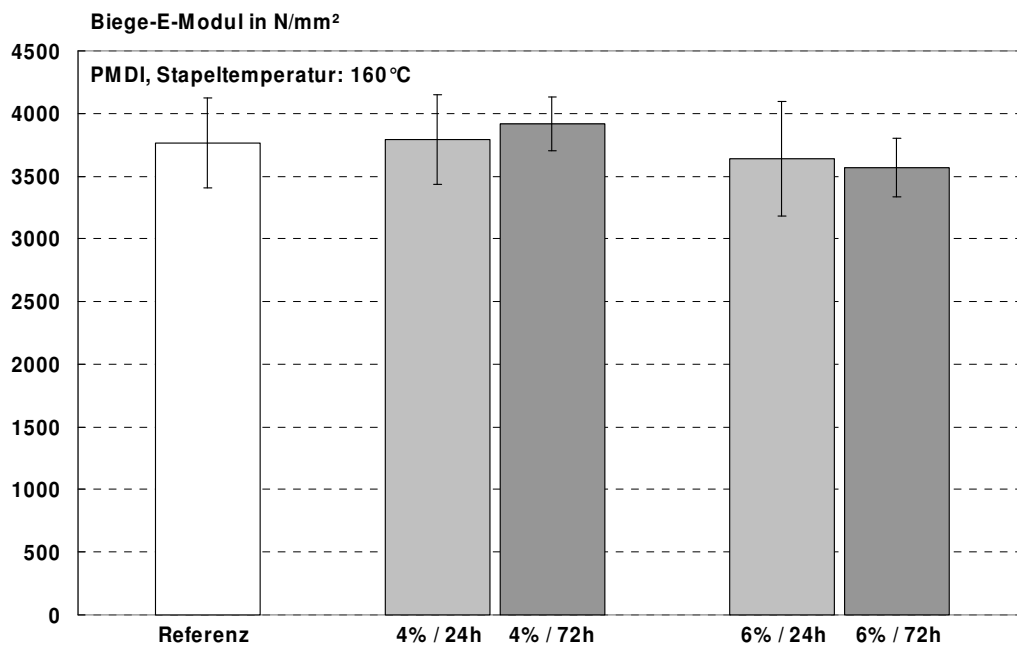


Abbildung 77: Biege-E-Modul von PMDI-gebundenen Platten, die bei 160°C für 24 bzw. 72 Stunden im Stapel nachbehandelt wurden; die Feuchte der Platten war auf 4% bzw. 6% eingestellt.

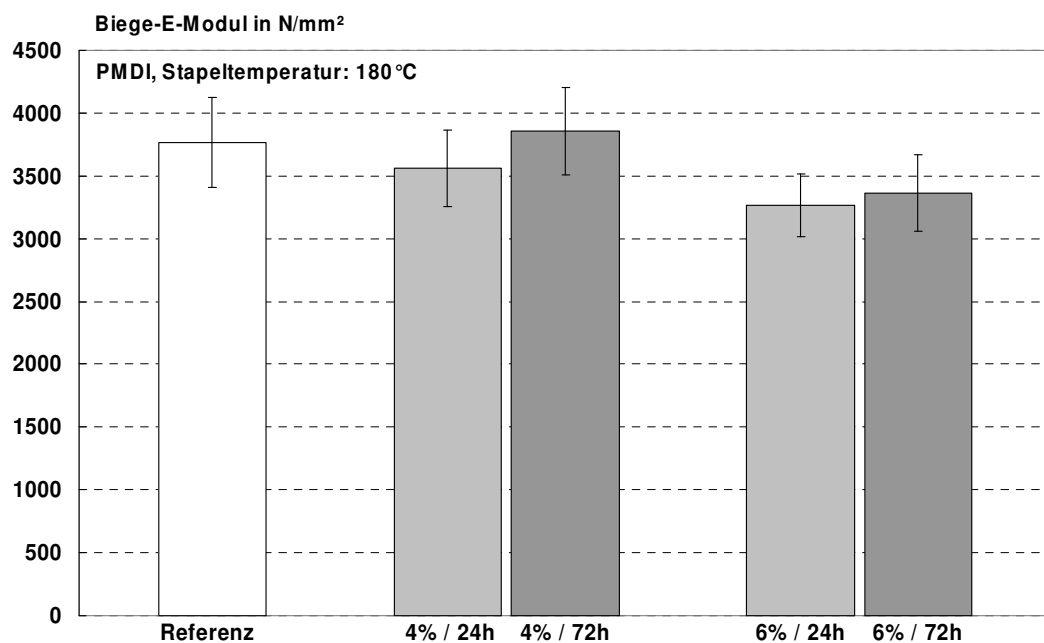


Abbildung 78: Biege-E-Modul von PMDI-gebundenen Platten, die bei 180°C für 24 bzw. 72 Stunden im Stapel nachbehandelt wurden; die Feuchte der Platten war auf 4% bzw. 6% eingestellt.

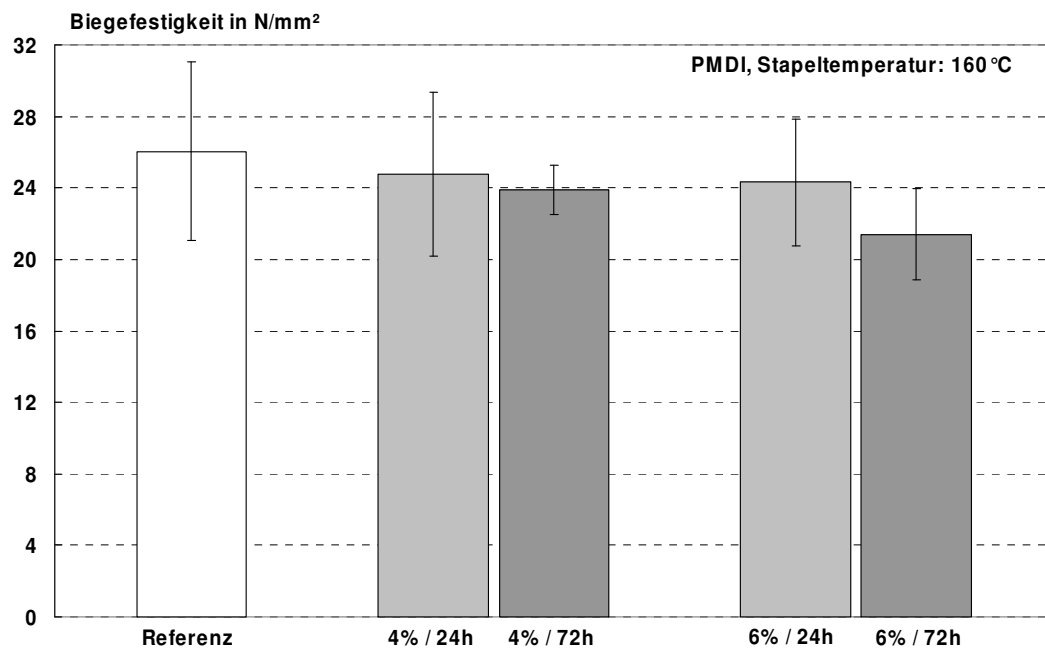


Abbildung 79: Biegefestigkeit von PMDI-gebundenen Platten, die bei 160°C für 24 bzw. 72 Stunden im Stapel nachbehandelt wurden; die Feuchte der Platten war auf 4% bzw. 6% eingestellt.

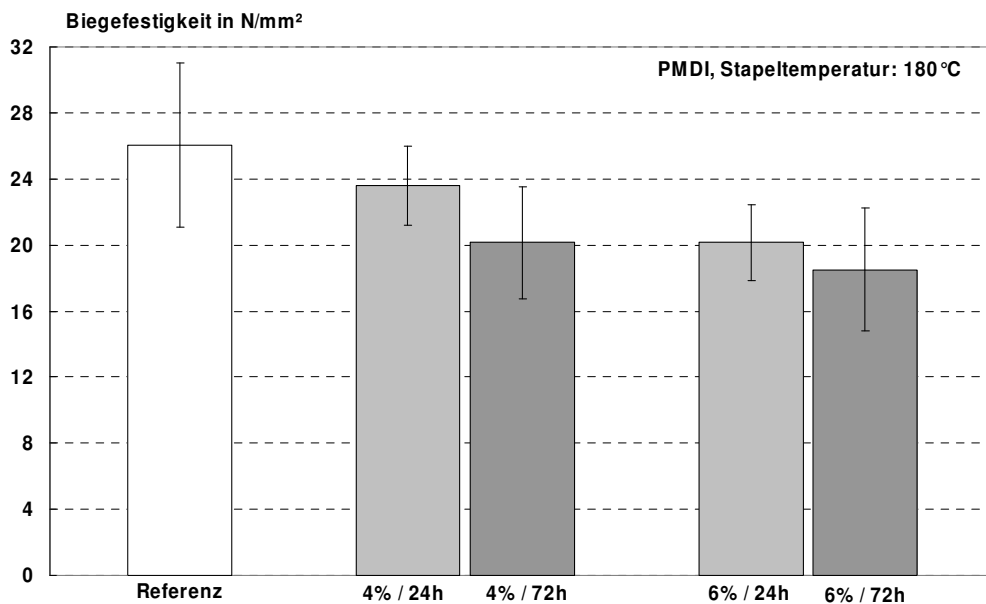


Abbildung 80: Biegefestigkeit von PMDI-gebundenen Platten, die bei 180°C für 24 bzw. 72 Stunden im Stapel nachbehandelt wurden; die Feuchte der Platten war auf 4% bzw. 6% eingestellt.

Bei Prüfung der Biegeeigenschaften konnte eine Abnahme durch die Stapelbehandlung festgestellt werden. Die Festigkeiten einer Platte hängen nach Keylwerth (1958) vor allem von den Festigkeiten der Deckschicht ab, woraus ein Beplankungseffekt resultiert, der wesentlich zu der Gesamtfestigkeit einer Platte beiträgt. Wenn die Festigkeiten der Deckschicht abnehmen, nimmt somit auch die Gesamtbiegefestigkeit ab. Die Festigkeit einer Deckschicht wiederum wird durch die Festigkeit des Holzes und der Klebfestigkeit bestimmt. Kommt es zu einer Abnahme von einer oder beiden Festigkeiten, sinkt die Festigkeit der Deckschicht und damit die Gesamtfestigkeit der Platte. Für die PMDI-verklebten OSB ist davon auszugehen, dass die Festigkeitsabnahme auf einen Verlust der Holzfestigkeit zurückgeht. Die Klebfestigkeit des PMDI wird durch die Stapelbehandlung nicht beeinträchtigt. Die thermische Zersetzung von Holz bei hohen Temperaturen wird zusätzlich durch lange Verweildauer und hohe Feuchten unterstützt (Kollmann und Schneider 1963, Burmester 1973). Die thermische Zersetzung ist mit einer Masseabnahme verbunden, die im Temperaturbereich zwischen 100°C und 180°C vor allem auf den Abbau niedermolekularer Polyosen zu flüchtigen Bestandteilen zurückzuführen ist (Kollmann und Fengel 1965). Die Masseabnahme wiederum führt zu einer geringeren Rohdichte, und damit zu einem Festigkeitsverlust. Diese Zusammenhänge lassen sich auf die Versuchsergebnisse übertragen. Mit zunehmender Stapeldauer sowie unter feuchten Bedingungen nimmt die thermische Zersetzung zu und die Biegefestigkeit ab. Die höhere Plattenfeuchte führt zu einem stärkeren Rückgang der Biegefestigkeit. Mit der Annahme, dass die Erhöhung der Plattenfeuchte vor allem zu einem Anstieg der Deckschichtfeuchte geführt hat, muss es gerade in diesen Bereichen zu Festigkeitseinbußen gekommen sein, aus denen folglich eine Abnahme der Gesamtbiegefestigkeit resultiert.

Dass die Festigkeitsverluste auf dem Abbau der Polyosen beruhen, lässt sich durch die Ergebnisse aus der Bestimmung der Feuchteaufnahme unterstützen. So konnte Burmester (1970) bei einer Verringerung der Quellung infolge Hitzebehandlung in einem geschlossenen System unter Luftabschluss um 50% eine Festigkeitsabnahme von bis zu 30% feststellen. Der gleiche Zusammenhang ergibt sich auch aus den Ergebnissen in dieser Versuchsreihe; die Quellung konnte um 54% verringert werden, die Festigkeit nahm dagegen um 29% ab. Die starke Abnahme der Biegefestigkeit bei den MUPF-gebundenen OSB wird zusätzlich durch die hydrolytische Zersetzung des MUPF bedingt.

Zusammenfassend folgt, dass die Querkzugfestigkeit wesentlich vom verwendeten Klebstoff abhängt. Besonders in Verbindung mit höheren Temperaturen führt die Nachbehandlung bei Verwendung hydrolyseunbeständiger Kondensationsharze zu starken Einbußen der Querkzugfestigkeit, die nach dem Kochtest zu einem Versagen des Probekörpers führt. Bei Verwendung von PMDI als Klebstoff treten Festigkeitsverluste erst bei hohen Temperaturen in Verbindung mit langer Stapeldauer auf; die Festigkeitsabnahme ist dabei eher auf einen Verlust der Holzfestigkeit als auf ein Versagen des Klebstoffes zurückzuführen. Daraus folgt, wie bereits bei der Dickenquellung bemerkt, dass die thermische Modifizierung in Form einer Nachbehandlung nur für hydrolysebeständige Klebstoffsysteme geeignet ist. Die Biegeeigenschaften nehmen durch die Nachbehandlung ebenfalls ab, das Ausmaß ist auch hierbei klebstoffabhängig; die Verringerung der Biegefestigkeit geht mit der Verbesserung der Dickenquellung durch eine thermische Modifizierung einher. In praktischer Hinsicht sind diesen Zusammenhängen Rechnung zu tragen. Wie bei allen Hitzebehandlungsverfahren muss ein Kompromiss zwischen Verbesserung der Dickenquellung und Verlust der mechanischen Eigenschaften getroffen werden.

6.2.3 Witterungsbeständigkeit

Die Witterungsbeständigkeit wurde mittels BAM-Zyklus bestimmt. Nach Durchlaufen der 14tägigen künstlichen Bewitterung gemäß Tabelle 24 wurden analog zu den Versuchen zur Vorbehandlung die irreversible Dickenquellung sowie die Querkzugfestigkeit bestimmt. In Abbildung 81 und Abbildung 82 sind die Ergebnisse der MUPF-gebundenen OSB dargestellt. Dabei konnten nur die Proben ausgewertet werden, die für maximal 24 Stunden im Stapel nachbehandelt worden waren. Die Proben aus der 72stündigen Stapelbehandlung hatten unabhängig der Stapeltemperatur infolge der künstlichen Bewitterung mechanisch versagt. Die bereits erwähnte hydrolytische Zersetzung des MUPF durch die Nachbehandlung selbst kann durch den Feuchteinfluss in Verbindung mit hohen Temperaturen bei der künstlichen Bewitterung weiter fortschreiten.

Die MUPF-gebundene Referenz weist eine irreversible Dickenquellung von etwa 19,5% auf (Abbildung 81). Durch die Nachbehandlung kann eine Verbesserung um etwa 20% bei 160°C im Stapeltemperatur und durchschnittlich 15% bei 180°C erreicht werden. Die Platten, deren Feuchte auf 6% eingestellt worden war, weisen tendenziell etwas höhere Werte auf, woraus der Einfluss der Feuchte auf den hydrolytischen Abbau des MUPF ersichtlich wird. Die Querkzugfestigkeit der MUPF-gebundenen OSB nach dem Zyklustest ist Abbildung 82 zu entnehmen. Die Referenz hat nach künstlicher Bewitterung eine Querkzugfestigkeit von

0,13 N/mm². Die verbliebene Querkzugfestigkeit der SINA-behandelten Platten nimmt gegenüber der Referenz nach Behandlung bei 160°C um rund 7,5% bzw. 15% ab, wobei die niedrigere Festigkeit für die Platten bestimmt wurde, deren Feuchte auf 6% eingestellt worden war. Die Stapelbehandlung bei 180°C führt zu einem Verlust der Querkzugfestigkeit von etwa 40%. Der Festigkeitsverlust ist dabei vor allem auf die geringe Hydrolysebeständigkeit des Klebstoffes zurückzuführen. Die Dickenquellung konnte gegenüber der Referenz vermindert werden, so dass der Deformationsrückgang als Ursache für eine Schwächung der Klebverbindung und damit Festigkeitseinbußen ausgeschlossen wird.

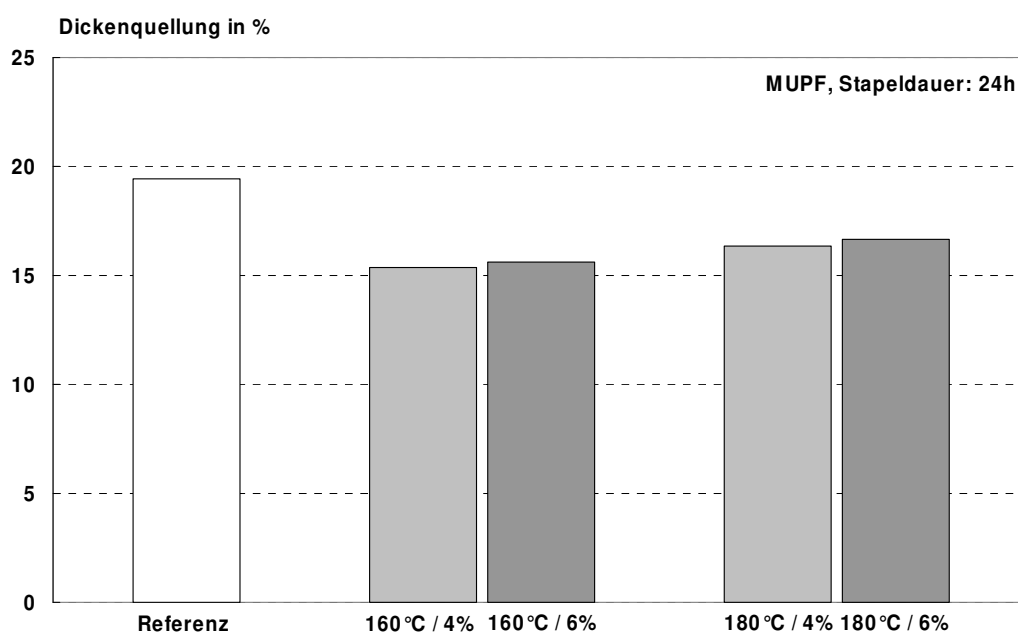


Abbildung 81: Irreversible Dickenquellung nach künstlicher Bewitterung und Klimatisierung bei 20°C und 65% r. Lf. von MUPF-gebundenen Platten, die bei 160°C bzw. 180°C für 24 Stunden im Stapel nachbehandelt wurden; die Feuchte der Platten war auf 4% bzw. 6% eingestellt.

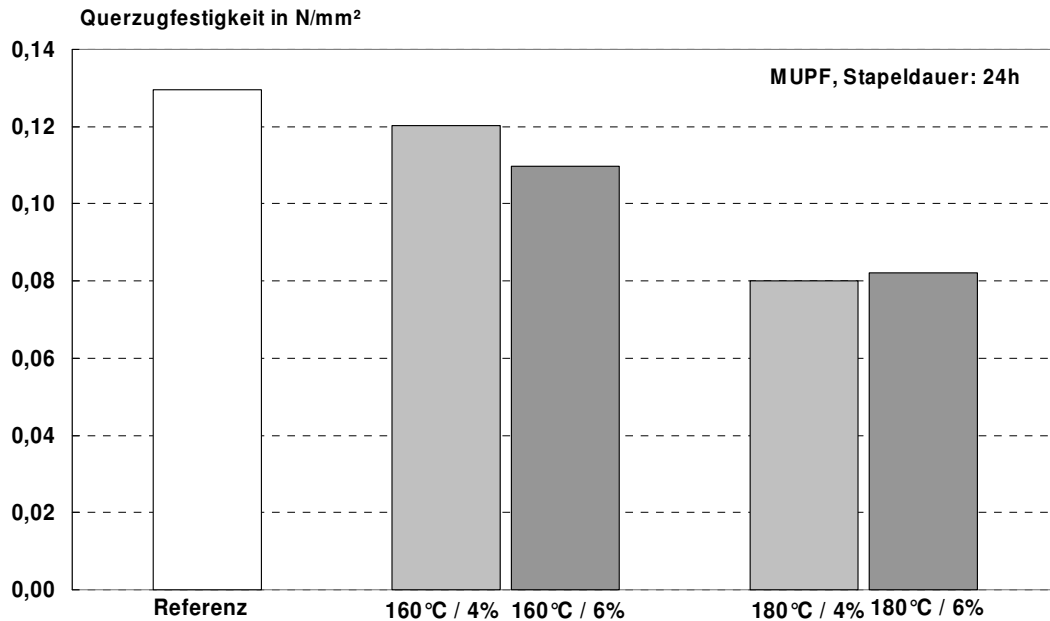


Abbildung 82: Querzugfestigkeit nach künstlicher Bewitterung von MUPF-gebundenen Platten, die bei 160°C bzw. 180°C für 24 Stunden im Stapel nachbehandelt wurden; die Feuchte der Platten war auf 4% bzw. 6% eingestellt.

Die irreversible Dickenquellung der PMDI-gebundenen OSB ist den Abbildung 83 und Abbildung 84 zu entnehmen. Die Referenzplatte weist eine verbliebene Dickenzunahme von rund 9% auf. Durch die Nachbehandlung bei 160°C ist die irreversible Dickenquellung in Abhängigkeit der Stapeldauer sowie der Plattenfeuchte um mindestens 12% nach 24stündiger Stapelzeit bei einer Plattenfeuchte von 4% und maximal 45% nach 72 Stunden Stapellagerung und einer Feuchte von 6% reduziert (Abbildung 83).

Die Erhöhung der Stapeltemperatur auf 180°C hat vor allem in Verbindung mit einer angehobenen Dauer der Nachbehandlung auf 72 Stunden positiven Einfluss auf die irreversible Dickenquellung nach künstlicher Bewitterung (Abbildung 84). Im Vergleich zu den bei 160°C nachbehandelten Platten kann durch Anheben der Temperatur auf 180°C die Dickenquellung um 30% bis 35% nach 72stündiger Stapeldauer reduziert werden. Gegenüber der Referenz bedeutet dies eine Verminderung der irreversiblen Dickenquellung um maximal 60%. Nach 24stündiger Stapellagerung ist die Dickenquellung gegenüber der Behandlung bei 160°C nur gering um etwa 3% bis 7% reduziert. Wie bereits bei der Dickenquellung nach Wasserlagerung wird der Einfluss von Plattenfeuchte und erhöhter Temperatur auf die Reduzierung der Dickenzunahme deutlich. Da die Nachbehandlung in einem nahezu geschlossenen System stattfand, konnten die freigesetzten Carbonsäuren die Umsetzung der Polyosen zu einem hydrophoben, polykondensierten Netzwerk katalysieren. Zudem werden durch den Druck bei

der Stapellagerung die Zellumina verdichtet, so dass nach Runkel (1951) sowie Runkel und Wilke (1951) die gasförmigen Abbauprodukte in der Zellwand verbleiben, dort zu hydrophoben Polykondensaten reagieren und zur Reduzierung der Dickenquellung beitragen.

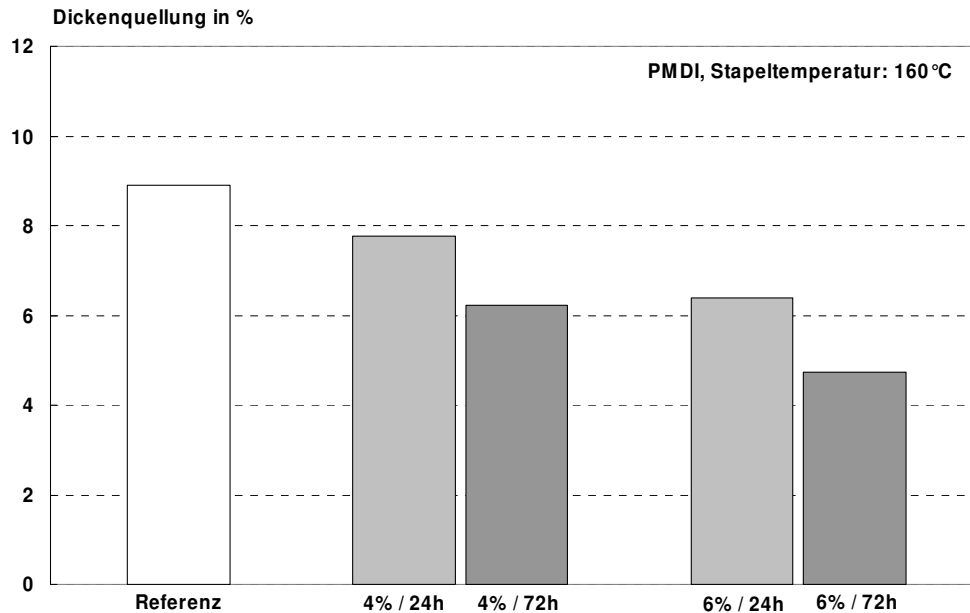


Abbildung 83: Irreversible Dickenquellung nach künstlicher Bewitterung und Klimatisierung bei 20°C und 65% r. Lf. von PMDI-gebundenen Platten, die bei 160°C für 24 bzw. 72 Stunden im Stapel nachbehandelt wurden; die Feuchte der Platten war auf 4% bzw. 6% eingestellt.

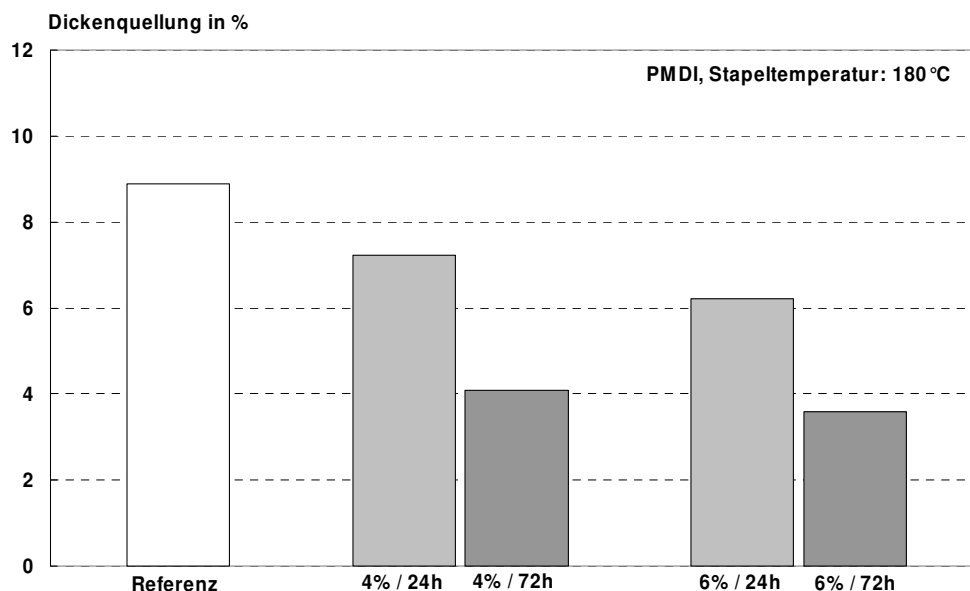


Abbildung 84: Irreversible Dickenquellung nach künstlicher Bewitterung und Klimatisierung bei 20°C und 65% r. Lf. von PMDI-gebundenen Platten, die bei 180°C für 24 bzw. 72 Stunden im Stapel nachbehandelt wurden; die Feuchte der Platten war auf 4% bzw. 6% eingestellt.

Die Querkzugfestigkeit nach künstlicher Bewitterung liegt infolge der Nachbehandlung bei 160°C um etwa 15% über dem Referenzwert mit 0,55 N/mm² (Abbildung 85). dabei ist ein leichter Anstieg der Festigkeit mit zunehmender Stapeldauer und Plattenfeuchte zu erkennen. Mit Anheben der Temperatur auf 180°C (Abbildung 86) bleibt die Querkzugfestigkeit der für 24 Stunden nachbehandelten Platten unverändert, während die Stapellagerung für 72 Stunden zu einer Abnahme führt, die um etwa 10% unter der Querkzugfestigkeit nach Behandlung bei 160°C für 72 Stunden liegt. Die relativ höhere Querkzugfestigkeit der nachbehandelten Platten gegenüber der Referenz steht in Zusammenhang mit der reduzierten Dickenquellung. Trotz der Feuchtwechsel und den damit einhergehenden Quellungs- und Schwindungsspannungen bleibt dadurch die Belastung auf die Klebstoffbrücken gering. Die leichte Abnahme der Querkzugfestigkeit nach 72stündiger Behandlung bei 180°C gegenüber der Nachbehandlung bei 160°C für die gleiche Dauer resultiert trotz geringerer Dickenquellung aus der thermischen Zersetzung des Holzes. Daher fiel unter diesen Behandlungsparametern auch die Gleichgewichtsfeuchte am geringsten aus (Abbildung 60).

Grundsätzlich fällt die Querkzugfestigkeit nach künstlicher Bewitterung für alle Platten deutlich geringer aus als die Querkzugfestigkeit gemäß EN 319 (1993) (Abbildung 69 bis Abbildung 72). Durch die häufigen Feuchtwechsel und den damit verbundenen Quellungs- und Schwindungsspannungen kommt es nach Liiri (1961) und Gressel (1969) zu einer mechanischen Belastung der Klebstoffbrücken zwischen den einzelnen Partikeln, woraus eine Verminderung der Plattenfestigkeit resultiert.

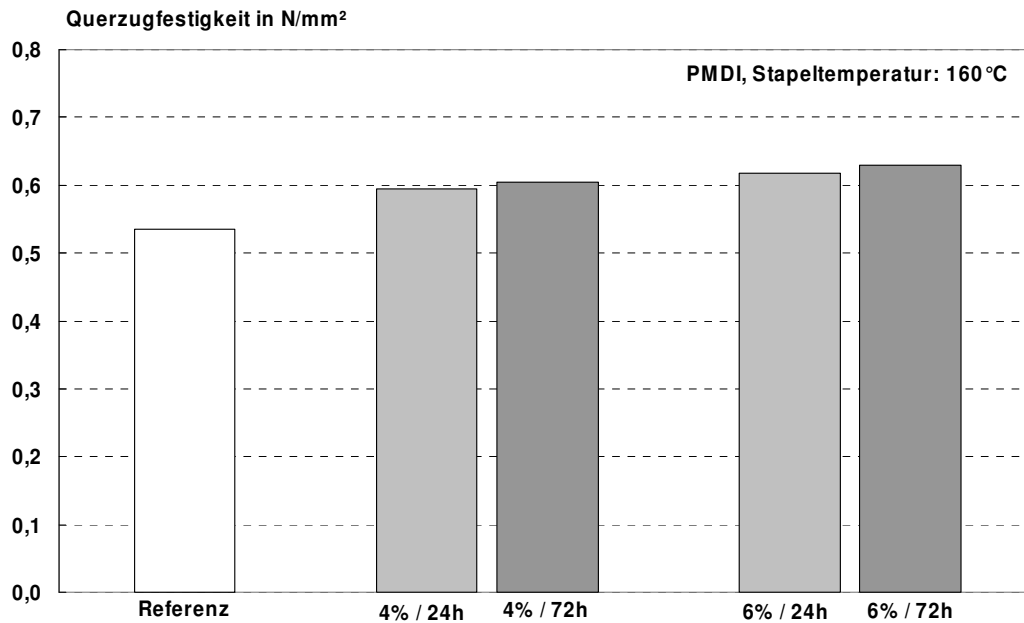


Abbildung 85: Querzugfestigkeit nach künstlicher Bewitterung von PMDI-gebundenen Platten, die bei 160°C für 24 bzw. 72 Stunden im Stapel nachbehandelt wurden; die Feuchte der Platten war auf 4% bzw. 6% eingestellt.

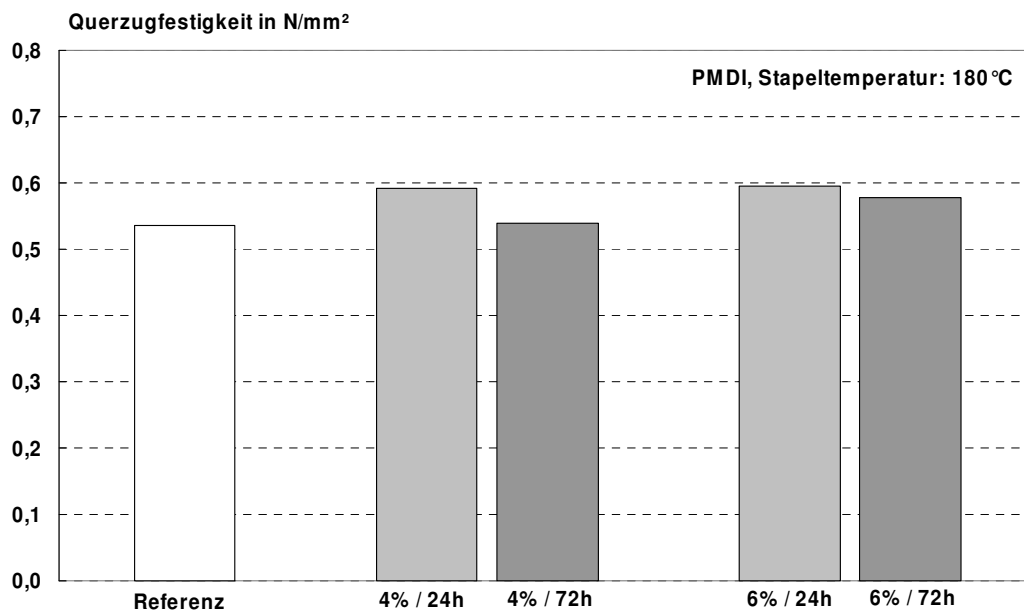


Abbildung 86: Querzugfestigkeit nach künstlicher Bewitterung von PMDI-gebundenen Platten, die bei 180°C für 24 bzw. 72 Stunden im Stapel nachbehandelt wurden; die Feuchte der Platten war auf 4% bzw. 6% eingestellt.

Aus den Ergebnissen wird ein weiteres Mal ersichtlich, dass die Verwendung hydrolyseunbeständiger Klebstoffe für eine Nachbehandlung bei hohen Temperaturen und unter feuchten Bedingungen eher ungeeignet ist. Zum anderen wird bei den PMDI-gebundenen OSB der Zusammenhang zwischen Dickenquellung und Querkzugfestigkeit deutlich. Eine geringere Dickenquellung führt zu weniger Belastungen auf die Klebstoffbrücken, so dass in der Folge die Querkzugfestigkeit weniger beeinträchtigt wird.

6.2.4 Dauerhaftigkeit

Die Dauerhaftigkeit gegen Pilzabbau wurde nach ENV 12038 (1996) bestimmt, die Ergebnisse sind Abbildung 87 und Abbildung 88 zu entnehmen. Die Messkontrollen (MK) aus Kiefernspaltholz werden durch *Coniophora puteana* (Cp) am stärksten abgebaut, mit Masseverlusten bis 45%. Die Masseverluste durch *Poria placenta* (Pp) und *Pleurotus ostreatus* (Po) fallen mit rund 18% bzw. 14% geringer aus. Zur Beurteilung der Dauerhaftigkeit wird jeweils der höchste Masseverlust herangezogen, aus dem sich dann zusammen mit dem jeweiligen Wert der Messkontrolle der DSI bestimmen lässt, wie unter 4.2.9 beschrieben. Die Ergebnisse für die MUPF-gebundenen OSB (Abbildung 87) haben gezeigt, dass bei allen Platten kein Abbau durch den Brautfäuleerreger *Poria placenta* stattfindet. Dies konnte bereits bei den MUPF-gebundenen OSB und Spanplatten aus den Versuchen zur Vorbehandlung gefunden werden (Abbildung 56, Abbildung 57). Die Ursache könnte auf eine Empfindlichkeit des Prüfpilzes gegenüber dem Phenolanteil im Klebstoff zurückzuführen sein. So konnten Leithoff und Peek (2000) bei der Dauerhaftigkeitsprüfung PF-gebundenen Sperrholzes eine Empfindlichkeit des Brautfäuleerregers *Coniophora puteana* gegenüber dem Phenolharz feststellen.

Die Referenz weist den stärksten Abbau mit 42% durch *Coniophora puteana* auf, woraus ein DSI von rund 92 resultiert, wie in Tabelle 16 aufgeführt. Wie für die Referenz fällt der Masseverlust durch *Coniophora puteana* für die Platten am höchsten aus, die bei 160°C für eine Dauer von 24 Stunden nachbehandelt wurden und deren Feuchte auf 4% eingestellt worden war. Der Masseverlust liegt mit 43% etwas über dem der Referenz, entsprechend ergibt sich ein DSI von 95. Bei gleicher Stapeldauer, aber einer Erhöhung der Plattenfeuchte von 4% auf 6%, nimmt die Anfälligkeit gegenüber dem Abbau durch *Coniophora puteana* für die 160°C-Platten ab; der Masseverlust sinkt auf 17,5% und entspricht etwa dem Masseverlust durch *Pleurotus ostreatus* (18%). Da der Masseverlust durch *Pleurotus ostreatus* aber den durch *Coniophora puteana* übersteigt, wird dieser zur Berechnung des DSI zugrunde gelegt. Die Masseabnahme der Messkontrolle durch *Pleurotus ostreatus* liegt bei rund 14%,

demnach ergibt sich ein DSI von 128. Mit Anheben der Stapeldauer auf 72 Stunden findet kein nennenswerter Abbau mehr durch *Coniophora puteana* statt, die höchsten Masseverluste werden durch *Pleurotus ostreatus* verursacht und liegen bei 16% (DSI = 116) bzw. 14,5% (DSI = 105) bei Plattenfeuchten von 4% bzw. 6%. Für die bei 180°C nachbehandelten Platten ist der Abbau durch *Pleurotus ostreatus* am höchsten, wobei der Abbaugrad mit steigender Stapeldauer und Plattenfeuchte abnimmt, der berechnete DSI nimmt von 135 nach 24 Stunden Stapelbehandlung auf 76 nach 72 Stunden ab. Nach 24stündiger Nachbehandlung findet bei den 180°C-Platten noch ein Abbau durch *Coniophora puteana* statt, der mit Anheben der Behandlungsdauer auf 72 Stunden ausbleibt.

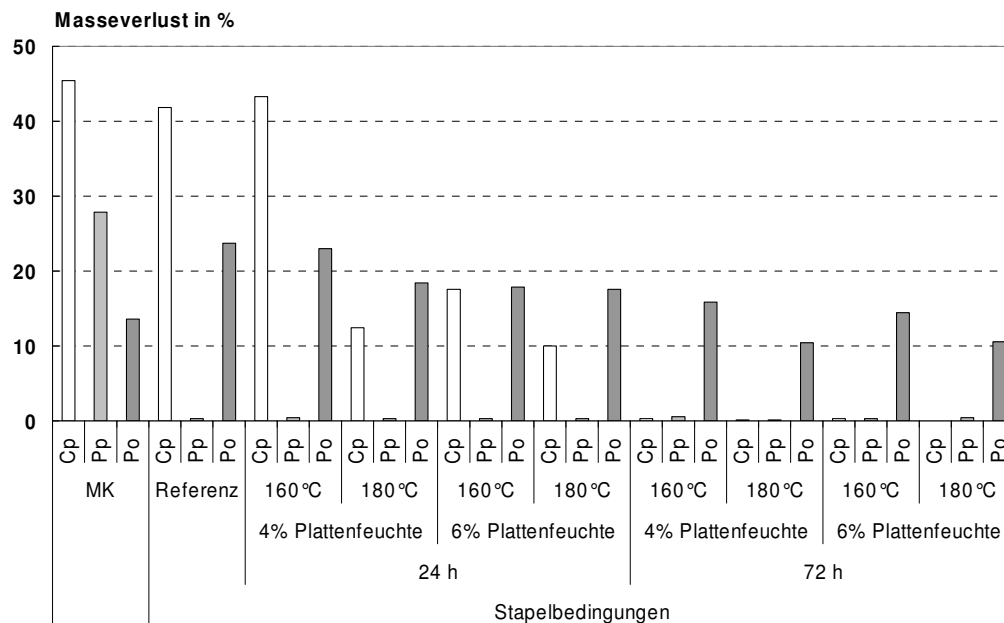


Abbildung 87: Masseverlust durch *Coniophora puteana* (Cp), *Pleurotus ostreatus* (Po) und *Poria placenta* (Pp) nach 16wöchiger Inkubationszeit von MUPF-gebundenen OSB aus Kiefer. Die Platten einer Feuchte von 4% bzw. 6% wurden durch Nachbehandlung im Stapel bei 160°C bzw. 180°C für 24 und 72 Stunden modifiziert.

Tabelle 16: Dauerhaftigkeit nach ENV 12038, angegeben als DSI (Decay Susceptibility Index), MUPF-gebundener OSB, die durch Nachbehandlung im Stapel bei 160°C bzw. 180°C für 24 bzw. 72 Stunden modifiziert wurden und deren Plattenfeuchte auf 4% bzw. 6% eingestellt wurde, im Vergleich zur unbehandelten Referenz

Probe	DSI	Pilz	DH (Klasse)
Referenz MUPF	91,92	Cp	5
160°C / 4% / 24 h	95,17	Cp	5
180°C / 4% / 24 h	134,84	Po	5
160°C / 6% / 24 h	128,58	Po	5
180°C / 6% / 24h	128,76	Po	5
160°C / 4% / 72 h	116,30	Po	5
180°C / 4% / 72 h	76,31	Po	4
160°C / 6% / 72 h	105,51	Po	5
180°C / 6% / 72 h	77,61	Po	4

In Abbildung 88 sind die Ergebnisse der PMDI-gebundenen OSB dargestellt. Im Gegensatz zu den MUPF-Platten (Abbildung 87) führen bei den PMDI-gebundenen OSB alle Prüfpilze zu einem Abbau, dessen Ausmaß zwar unterschiedlich ist, im Verhältnis zueinander jedoch konstant bleibt. So führt der Abbau durch *Coniophora puteana* bei alle Platten zu den höchsten Masseverlusten, gefolgt von *Poria placenta* und schließlich *Pleurotus ostreatus*. Der DSI der Referenz liegt bei 106 (Tabelle 17). Die Nachbehandlung bei 160°C führt zu einer Abnahme des DSI mit steigender Plattenfeuchte und Stapeldauer. Eine 24stündige Nachbehandlung bei einer Feuchte von 4% resultiert in einem DSI von 104, der auf 91 nach 72 Stunden bei 160°C und einer Feuchte von 6% sinkt. Ein Anheben der Temperatur auf 180°C führt zu geringeren Masseverlusten gegenüber der Nachbehandlung bei 160°C; der DSI erreicht 98 nach 24stündiger Nachbehandlung und einer Plattenfeuchte von 4% und sinkt auf 85 nach 72 Stunden und einer Plattenfeuchte von 6%.

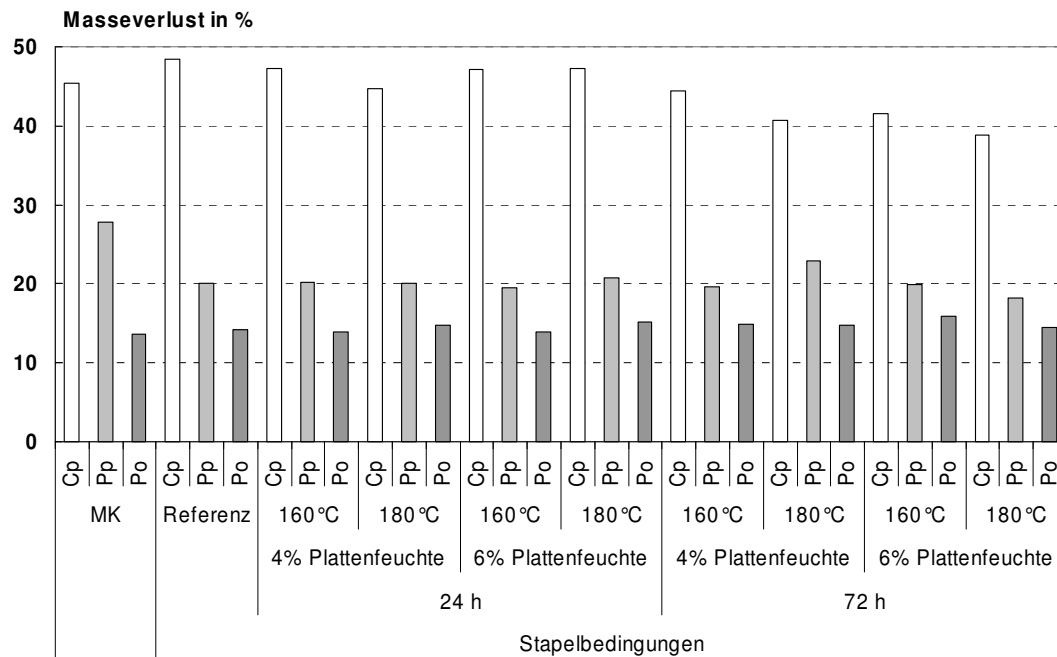


Abbildung 88: Masseverlust durch *Coniophora puteana* (Cp), *Pleurotus ostreatus* (Po) und *Poria placenta* (Pp) nach 16wöchiger Inkubationszeit von PMDI-gebundenen OSB aus Kiefer. Die Platten einer Feuchte von 4% bzw. 6% wurden durch Nachbehandlung im Stapel bei 160°C bzw. 180°C für 24 und 72 Stunden modifiziert.

Tabelle 17: Dauerhaftigkeit nach ENV 12038, angegeben als DSI (Decay Susceptibility Index), PMDI-gebundener OSB, die durch Nachbehandlung im Stapel bei 160°C bzw. 180°C für 24 bzw. 72 Stunden modifiziert wurden und deren Plattenfeuchte auf 4% bzw. 6% eingestellt wurde, im Vergleich zur unbehandelten Referenz

Probe	DSI	Pilz	DH (Klasse)
Referenz PMDI	106,60	Cp	5
160°C / 4% / 24 h	104,00	Cp	5
180°C / 4% / 24 h	98,29	Cp	5
160°C / 6% / 24 h	103,60	Cp	5
180°C / 6% / 24h	103,91	Cp	5
160°C / 4% / 72 h	97,79	Cp	5
180°C / 4% / 72 h	89,43	Cp	4
160°C / 6% / 72 h	91,27	Cp	5
180°C / 6% / 72 h	85,35	Cp	4

Die Ergebnisse haben gezeigt, dass die Nachbehandlung zu keiner Verbesserung der Dauerhaftigkeit führt. Gemessen am DSI lag die Dauerhaftigkeit der MUPF-gebundenen OSB unter dem Referenzwert. Eine Verbesserung der Dauerhaftigkeit konnte nur bei den Platten festgestellt werden, die bei 180°C und für 72 Stunden nachbehandelt wurden. Bei den PMDI-gebundenen OSB führte die Stapellagerung für alle Behandlungsparameter zu DSI-Werten, die unter dem Referenzwert lagen; die größte Verbesserung der Dauerhaftigkeit zeigte sich aber auch hier nach Behandlung bei 180°C für 72 Stunden.

Wie für die Proben aus der Vorbehandlung mittels HPLC gezeigt werden konnte, stieg die Dauerhaftigkeit mit zunehmendem Anteil des Hydrolyserückstandes und abnehmendem Xyloseanteil (Tabelle 4). Gleichzeitig äußert sich der Abbau der Polyosen durch sinkende Feuchteaufnahme. Aus den Versuchen zur Gleichgewichtsfeuchte (Abbildung 59 und Abbildung 60) ging hervor, dass die Feuchteaufnahme nach Stapellagerung bei 180°C für eine Dauer von 72 Stunden minimal war. Das bedeutet, unter den angewandten Stapelbedingungen führte die Nachbehandlung bei 180°C zum stärksten Abbau der Polyosen und damit zu der höchsten Verbesserung der Dauerhaftigkeit.

6.2.5 Zusammenfassung

In Tabelle 18 sind die relativen Veränderungen der Eigenschaften für die einzelnen Versuchsparameter im Vergleich zur Referenz aufgeführt. Die Feuchteaufnahme wird deutlicher durch die Stapeldauer als durch die Temperatur beeinflusst. Die Dickenquellung lässt sich nur bei Verwendung von PMDI deutlich verbessern, die geringe Hydrolysebeständigkeit des MUPF wirkt sich unter den Stapelbedingungen negativ aus. Dementsprechend weist die Querkzugfestigkeit der MUPF-gebundenen OSB starke Einbußen auf, nach Kochtest kommt es nach langer Stapeldauer bis zu einem Versagen der Probekörper. Die Biegeeigenschaften sind reduziert, wobei das Ausmaß für die PMDI-gebundenen OSB geringer ausfällt. Die biologische Dauerhaftigkeit konnte nur unter den schärfsten Behandlungsparametern und Verwendung von PMDI geringfügig erhöht werden, entspricht aber immer noch Dauerhaftigkeitsklasse 4.

Tabelle 18: Relative Veränderung der Eigenschaften im Vergleich zur Referenz, Angaben in Prozent; Dauerhaftigkeit (DH) in Anlehnung an EN 350 in Dauerhaftigkeitsklasse angegeben

Probe	Feuchte (20°C / 65%)	Dicken- quellung (24 h)	Querzugfestigkeit		MOE	MOR	DH (Klasse)
			trocke n	nach Kochtest			
160°C, 4%, 24 h, MUPF	-8,7	-6,4	4,1	0,0	-15,7	-10,0	5
160°C, 4%, 72 h, MUPF	-11,3	49	-65,0	-	-20,2	-36,8	5
160°C, 6%, 24 h, MUPF	-10,0	-14,0	4,1	-40,0	-10,8	-12,8	5
160°C, 6%, 72 h, MUPF	-12,5	61,0	-77,5	-	-27,7	-44,8	5
180°C, 4%, 24 h, MUPF	-8,7	-1,3	-8,2	-20,0	-3,3	3,5	5
180°C, 4%, 72 h, MUPF	-13,7	64,4	-80,0	-	-28,5	-51,6	4
180°C, 6%, 24 h, MUPF	-8,7	-2,8	-8,2	-40,0	-15,7	-13,5	5
180°C, 6%, 72 h, MUPF	-16,3	45,0	-85,7	-	-34,2	-57,8	4
160°C, 4%, 24 h, PMDI	-7,6	-11,2	7,0	-7,5	0,6	-4,8	5
160°C, 4%, 72 h, PMDI	-15,2	-42,0	0,0	5,0	4,0	-8,3	5
160°C, 6%, 24 h, PMDI	-10,0	-30,0	2,3	2,5	-3,3	-6,7	5
160°C, 6%, 72 h, PMDI	-16,5	-45,6	-2,3	-2,5	-5,2	-17,8	5
180°C, 4%, 24 h, PMDI	-7,6	-16,0	4,6	0,0	-5,5	-9,4	5
180°C, 4%, 72 h, PMDI	-17,7	-48,0	-12,8	-7,5	2,4	-22,6	4
180°C, 6%, 24 h, PMDI	-10,0	-32,5	0,0	0,0	-13,4	-22,6	5
180°C, 6%, 72 h, PMDI	-20,3	-52,0	-12,8	2,5	-10,7	-28,9	4

6.3 Ergebnisse und Diskussion – Nachbehandlung

6.3.1 Gleichgewichtsfeuchte und Dickenquellung

In Abbildung 89 ist die Gleichgewichtsfeuchte nach Klimatisierung bei 20°C und 65% r. Lf. dargestellt. Der Feuchtegehalt der Referenzplatten liegt bei 9,2%, unabhängig des Paraffinzusatzes. Die Zugabe von Paraffin als Hydrophobierungsmittel vermindert die Aufnahme von Wasser aus der flüssigen, nicht aus der gasförmigen Phase.

Die Nachbehandlung bei 120°C hat keinen Einfluss auf die Gleichgewichtsfeuchte; weder die um das zweifache verlängerte Presszeit gegenüber der Referenz, noch die anschließende Nachbehandlung im Stapel. Eine weitere Verlängerung der Presszeit auf das 2,5fache der Referenz bei der 140°C-Behandlung führt ebenfalls zu keiner Reduzierung der Gleichgewichtsfeuchte. Erst durch die Nachbehandlung verringert sich die Feuchteaufnahme gegenüber der Referenz auf 8,5%; die Dauer der Nachbehandlung hat keinen Einfluss auf das Ergebnis. Dagegen zeigt sich bei der Nachbehandlung bei 160°C bereits ein Einfluss der um das dreifache angehobenen Presszeit gegenüber der Referenz, um die Temperatur der sich anschließenden Nachbehandlung einzustellen. Die Gleichgewichtsfeuchte liegt um 10% unter den Referenzwerten. Die Nachbehandlung führt zu einer weiteren Reduzierung der Feuchteaufnahme. Mit etwa 7,6% liegt der Wert um rund 18% unter der Referenz. Ein Einfluss der Behandlungszeit besteht nicht. Dieses Ergebnis unterstreicht den größeren Einfluss der Temperatur auf die Eigenschaftsänderung.

Im Gegensatz zur Gleichgewichtsfeuchte wird bei der Dickenquellung nach 24stündiger Wasserlagerung der Paraffinanteil deutlich (Abbildung 90). Die mit Paraffin versetzte Referenzplatte hat eine um 50% geringere Dickenquellung als die Referenz ohne Paraffinzusatz (21,5%). Bei den Platten für die Nachbehandlung ist bereits ein Einfluss der Presszeit auf das Ergebnis zu erkennen. Der Nachbehandlung bei 120°C geht eine doppelt so lange Presszeit im Vergleich zur Referenz voraus, die Dickenquellung fällt durchschnittlich um 10% geringer aus. Die anschließende Stapellagerung führt zu einer weiteren Reduzierung um durchschnittlich 18% bis 25% unter den Referenzwert der Platte ohne Paraffin. Durch Anheben der Behandlungstemperatur auf 140°C nimmt die Dickenquellung nach 48stündiger Nachbehandlung gegenüber der Referenz um maximal 30% ab; bereits infolge der 2,5fachen Presszeit liegt die Dickenquellung durchschnittlich um 25% unter der Referenz.; die durchschnittlich größere Dickenquellung nach Behandlung für 24 Stunden ist statistisch nicht signifikant. Ein Grund für die Schwankungsbreite der Messwerte kann die inhomogene Oberfläche der Prüfkörper sein. Zur Bestimmung der Dickenquellung wird der Messpunkt in der

Mitte auf der Probenoberfläche markiert, um die Dickenzunahme nach der Wasserlagerung an derselben Stelle bestimmen zu können. Liegt der Messpunkt nun beispielsweise auf der Grenzfläche zweier Strands, können durch das Quellen einzelne Strands aus der Probenebene herausragen, so dass lokal starke Überhöhungen resultieren.

Bei der 160°C-Behandlung ist die Dickenquellung nach dem Verpressen ohne Nachbehandlung um 15% reduziert; die Nachbehandlung führt zu einer statistisch signifikanten Verminderung der Dickenquellung um etwa 35%, unabhängig der Behandlungsdauer. Die Ergebnisse der Dickenquellung nach Wasserlagerung haben gezeigt, dass erst mit hohen Temperaturen eine signifikante Reduzierung der Dickenquellung erreicht werden kann. Basierend auf den Ergebnissen zur Gleichgewichtsfeuchte, kann davon ausgegangen werden, dass die reduzierte Dickenquellung bei dieser Versuchsreihe wesentlich auf den Spannungsabbau in der Platte zurückzuführen ist. Erst durch die verdreifachte Presszeit gegenüber der Referenz und 48ständiger Nachbehandlung im Stapel wurde die Feuchtaufnahme um maximal 18% reduziert (Abbildung 89). Im Vergleich hierzu erbrachte die Behandlung nach dem SINA-Verfahren eine Reduzierung um maximal 20% (Abbildung 60) und durch Vorbehandlung bei 240°C um 27% (Abbildung 15).

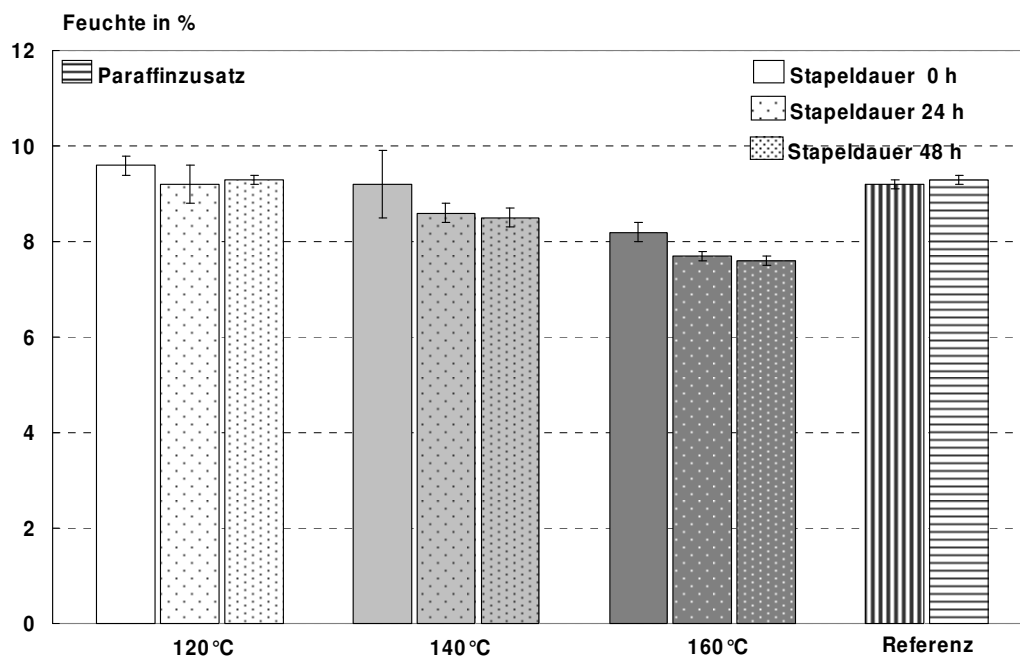


Abbildung 89: Gleichgewichtsfeuchte bei 20°C und 65% r. Lf. von OSB, die bei 120°C, 140°C bzw. 160°C für 24 bzw. 48 Stunden im Stapel nachbehandelt wurden im Vergleich zur Referenz. Die Presszeit hing von der angestrebten Stapeltemperatur ab (Stapeldauer 0 h).

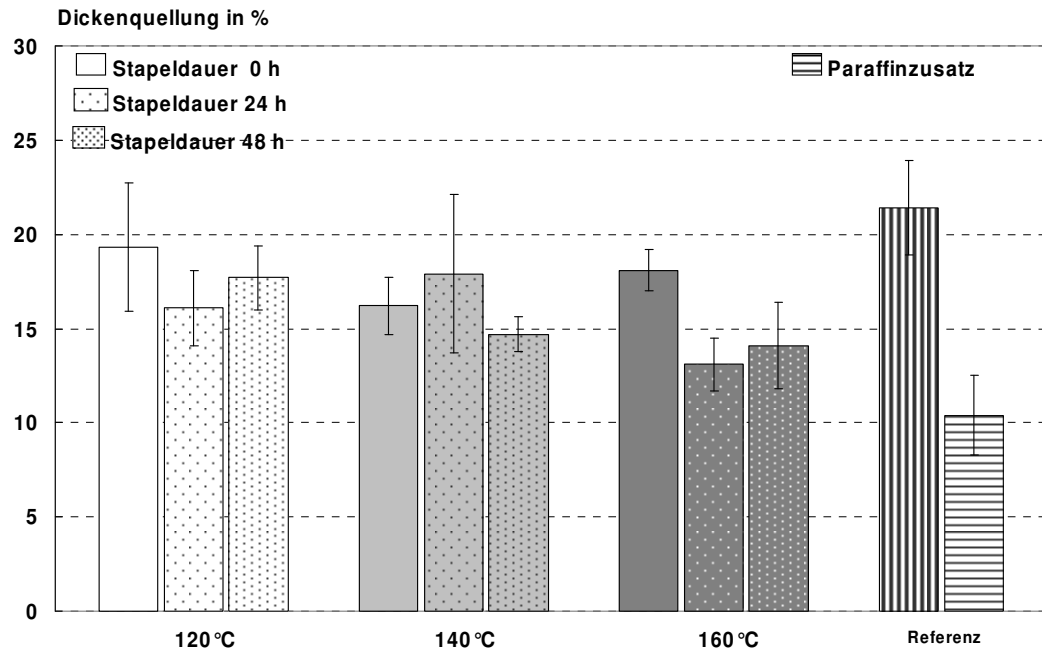


Abbildung 90: Dickenquellung nach 24 Stunden Wasserlagerung von OSB, die bei 120°C, 140°C bzw. 160°C für 24 bzw. 48 Stunden im Stapel nachbehandelt wurden im Vergleich zur Referenz. Die Presszeit hing von der angestrebten Stapeltemperatur ab (Stapeldauer 0 h).

6.3.2 Querzugfestigkeit und Biegeeigenschaften

Die Querzugfestigkeit der Referenzplatten liegt bei 1,2 bis 1,3 N/mm² (Abbildung 91). Die statistisch nicht signifikante, aber geringere Querzugfestigkeit der Platten mit Paraffinanteil lässt sich auf die demzufolge etwas hydrophobere Oberfläche der Strands zurückführen. Damit kann die Benetzbarkeit durch das Bindemittel eingeschränkt sein.

Die Querzugfestigkeit der Platten zur Nachbehandlung liegt nach dem Verpressen geringfügig unter dem Referenzwert. Durch die Stapelbehandlung nimmt die Querzugfestigkeit in Abhängigkeit der Temperatur unterschiedlich stark ab. Bei der 120°C-Behandlung ist eine Abnahme erst in Verbindung mit angehobener Behandlungsdauer auf 48 Stunden deutlich; die Querzugfestigkeit liegt mit 0,9 N/mm² um 25% unter dem Referenzwert. Durch Behandlung bei 140°C führt bereits die 24stündige Nachbehandlung zu einer Abnahme der Querzugfestigkeit, die mit zunehmender Stapeldauer bis 48 Stunden konstant bleibt. Gegenüber der Referenz sinkt die Querzugfestigkeit um etwa 25%. Einen deutlichen Einfluss der Behandlungsdauer auf die Querzugfestigkeit zeigt sich erst durch Nachbehandlung bei 160°C. Nach dem Verpressen liegt der Wert mit 1,15 N/mm² um circa 7% unter der Referenz. Die Nachbehandlung für 24 Stunden resultiert in einer Abnahme der Querzugfestigkeit, die um 20% unter dem Referenzwert liegt; nach 48 Stunden im Stapel ist die Querzugfestigkeit auf

0,8 N/mm² gesunken, was einem Festigkeitsverlust von 35% gegenüber einer unbehandelten Platte entspricht. Die Festigkeitsabnahme mit steigender Behandlungstemperatur beruht auf Festigkeitsverlusten des Holzes und nicht auf einem Versagen der Klebfuge.

Johansson und Morén (2006) konnten durch ihre Arbeit zeigen, dass die Scherfestigkeit von Vollholz durch thermische Behandlung abnimmt, wobei die Festigkeitsverluste mit steigender Temperatur höher ausfallen. Die Bruchbilder der Querkzugproben wiesen Holzbruch auf und aufgrund der hohen Temperaturbeständigkeit des PMDI bei den hier auftretenden Temperaturen bis 160°C kann eine thermische Zersetzung des Klebstoffes ausgeschlossen werden.

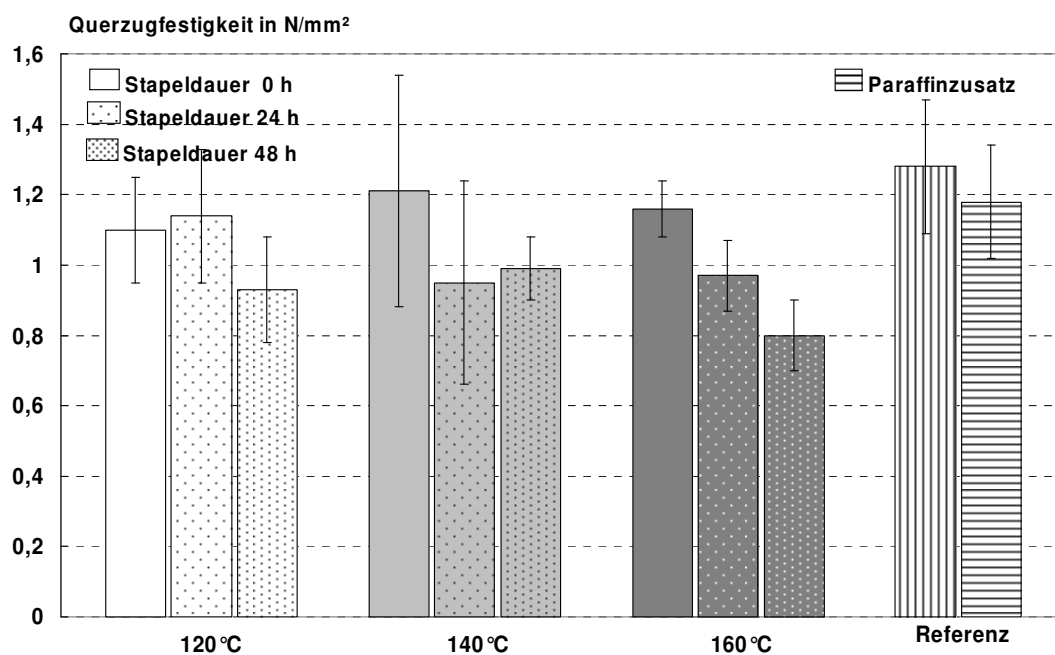


Abbildung 91: Querzugfestigkeit nach EN 319 von OSB, die bei 120°C, 140°C bzw. 160°C für 24 bzw. 48 Stunden im Stapel nachbehandelt wurden im Vergleich zur Referenz.

Nach dem Kochtest sinkt die Querzugfestigkeit der Referenzen auf 0,4 bis 0,5 N/mm² (Abbildung 92); dies entspricht einer Abnahme gegenüber vor dem Kochtest um 60 bis 65%. Die Abnahme der Querzugfestigkeit nach dem Kochtest der nachbehandelten Platten fällt mit 40 bis 50% gegenüber dem trocken bestimmten Querzug geringer aus. Der Einfluss der Verfahrensparameter Temperatur und Zeit auf die Kochquerzugfestigkeit entspricht dem Verlauf, der auch bei der Querzugfestigkeit festgestellt werden kann. Bei der 120°C-Behandlung ist kein Einfluss der Nachbehandlung gegenüber der nicht im Stapel behandelten Platte zu erkennen. Die Querzugfestigkeit der für 24 Stunden behandelten Platte liegt mit

durchschnittlich $0,65 \text{ N/mm}^2$ über den Werten der anderen Platten; diese Abweichung lässt sich aber weniger auf die Verfahrensparameter als auf Einflüsse durch die Probenvorbereitung zurückführen. So kann beispielsweise die Kontaktfläche zwischen Probekörper und Zugjoch durch ungleichmäßigen Abschleiß vor der Verklebung unterschiedlich groß sein. Die 140°C -Behandlung zeigt eine Abnahme der Querkzugfestigkeit mit steigender Dauer der Nachbehandlung. Der Wert fällt nach 24 Stunden Nachbehandlung im Vergleich zur Platte, die nach dem Verpressen nicht nachbehandelt wurde, um 30%. Das Anheben der Behandlungsdauer auf 48 Stunden führt durchschnittlich zu einer weiteren, aber nicht signifikanten Abnahme der Kochquerkzugfestigkeit, die 40% geringer ausfällt im Vergleich zu der nicht eingestapelten Platte. Ein statistisch signifikanter Einfluss der Behandlungsdauer auf das Ergebnis konnte erst durch Nachbehandlung bei 160°C festgestellt werden. Nach dem Verpressen lag die Kochquerkzugfestigkeit bei rund $0,5 \text{ N/mm}^2$ und änderte sich auch nach 24stündiger Stapelbehandlung nicht. Die Verlängerung der Nachbehandlung auf 48 Stunden führte zu einer Abnahme der Querkzugfestigkeit um 25%. Die relativ geringere Abnahme der Kochquerkzugfestigkeit nachbehandelter Platten gegenüber den Referenzen lässt sich durch das Verhältnis von Kochquerkzugfestigkeit zu Trocken-Querkzugfestigkeit veranschaulichen (Tabelle 19). Je kleiner die Verhältniszahl, desto größer ist die Abnahme der Querkzugfestigkeit nach Kochtest im Vergleich zur trocken bestimmten Querkzugfestigkeit. Die Ursache für die relativ höhere verbliebene Festigkeit liegt in der reduzierten Dickenquellung begründet. Dadurch bleibt trotz Kochens die Belastung auf die Klebstoffbrücken infolge einer Dickenzunahme geringer.

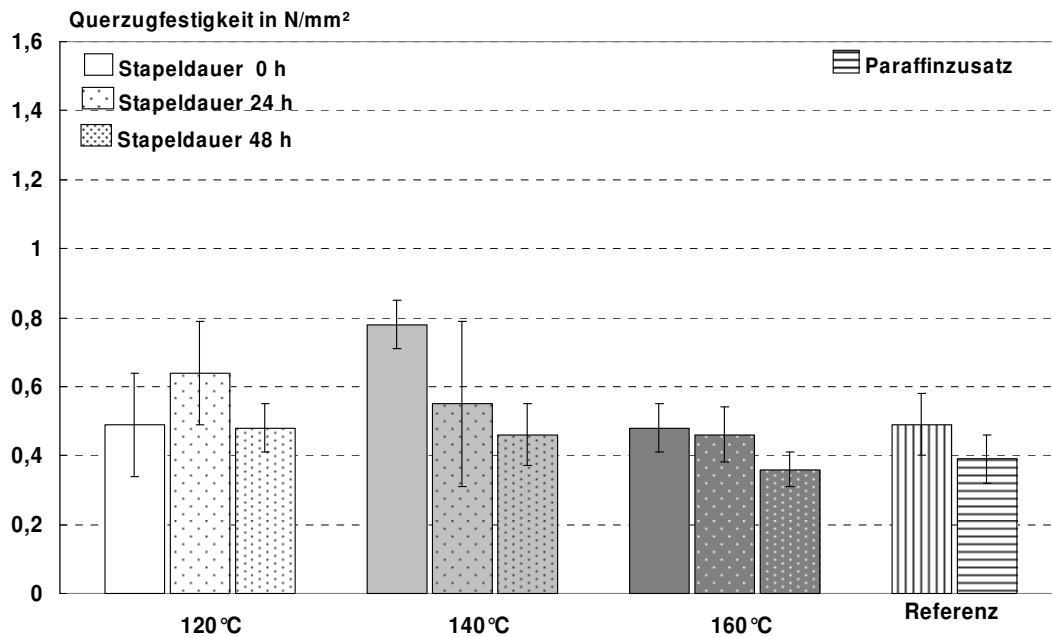


Abbildung 92: Querzugfestigkeit nach Kochtest (EN 1087-1) von OSB, die bei 120°C, 140°C bzw. 160°C für 24 bzw. 48 Stunden im Stapel nachbehandelt wurden im Vergleich zur Referenz. Die Presszeit hing von der angestrebten Stapeltemperatur ab (Stapeldauer 0 h).

Tabelle 19: Verhältnis der Querzugfestigkeit nach Kochtest (EN 1087-1) zur trocken bestimmten Querzugfestigkeit (EN 319) gemäß Abbildung 91 und Abbildung 92

Probe (T / h)	EN 1087-1 / EN 319 (N/mm²)
Referenz (Paraffin)	0,38 (0,33)
120 / 0	0,44
120 / 24	0,56
120 / 48	0,51
140 / 0	0,64
140 / 24	0,57
140 / 48	0,46
160 / 0	0,41
160 / 24	0,47
160 / 48	0,45

Der Biege-E-Modul (Abbildung 93) wird durch die Nachbehandlung bzw. erhöhte Presszeit im Vergleich zur Referenz nicht verändert, während die Biegefestigkeit abnimmt (Abbildung 94). Dabei ist die Abnahme gegenüber der Referenz erst ab 140°C und einer Behandlungsdauer von 48 Stunden signifikant. Nach 48stündiger Nachbehandlung bei 160°C ist der Festigkeitsverlust mit etwa 25% gegenüber der Referenz maximal. Bei niedrigeren Temperaturen bzw. geringerer Behandlungsdauer kann durch die hohe Streuung einiger Werte keine eindeutige Aussage über den Einfluss der Prozessparameter auf die Biegefestigkeit getroffen werden. Ein Grund für die große Schwankungsbreite der Messwerte kann die manuelle Streuung der Platte sein, wodurch die Strands in Plattenebene nicht orientiert ausgerichtet sind, was wesentlichen Einfluss auf die Biegefestigkeit hat. Erst die zunehmende Temperatur und steigende Dauer der Nachbehandlung wirkt sich deutlich auf eine Abnahme der Biegefestigkeit aus. Die einsetzende thermische Zersetzung der Polyosen führt zu Einbußen der Elastizität des Holzes, die insbesondere bei Biegebeanspruchung in den Vordergrund treten.

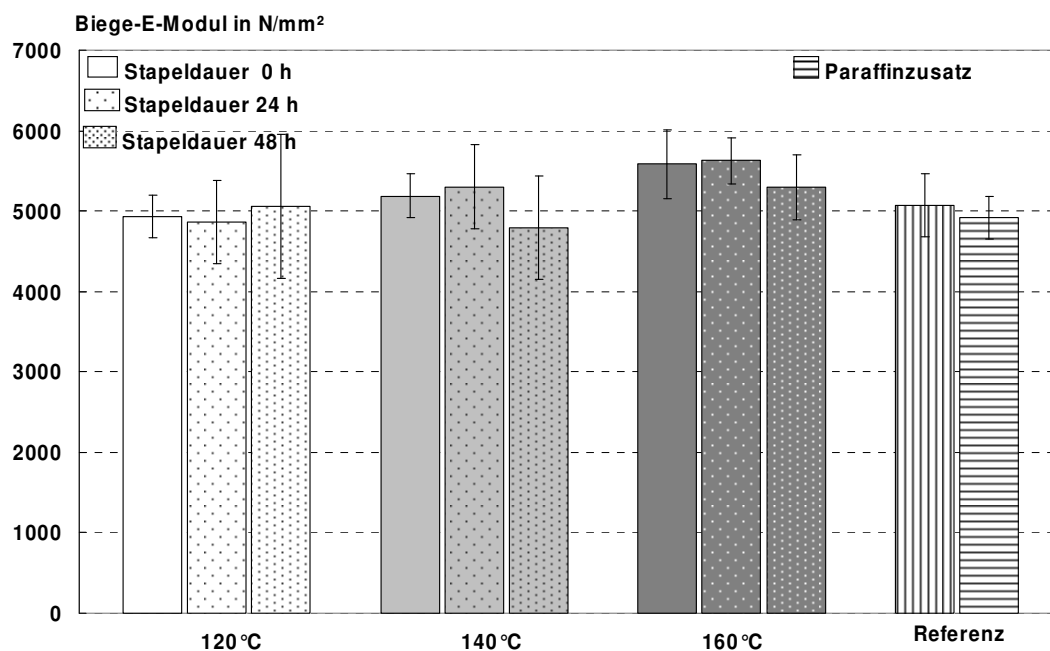


Abbildung 93: Biege-E-Modul von OSB, die bei 120°C, 140°C bzw. 160°C für 24 bzw. 48 Stunden im Stapel nachbehandelt wurden im Vergleich zur Referenz. Die Presszeit hing von der angestrebten Stapeltemperatur ab (Stapeldauer 0 h).

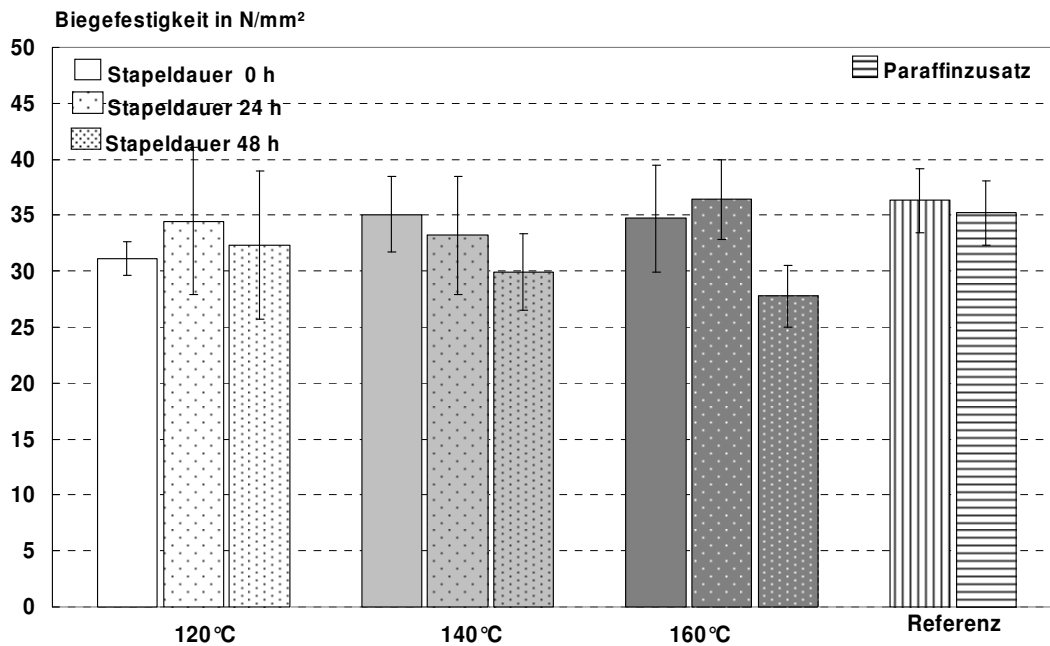


Abbildung 94: Biegefestigkeit von OSB, die bei 120°C, 140°C bzw. 160°C für 24 bzw. 48 Stunden im Stapel nachbehandelt wurden im Vergleich zur Referenz. Die Presszeit hing von der angestrebten Stapeltemperatur ab (Stapeldauer 0 h).

6.3.3 Zusammenfassung

In Tabelle 20 sind die Prüfergebnisse in einer Übersicht dargestellt. Die einzelnen Werte geben die relative Veränderung der Eigenschaften gegenüber der unbehandelten Referenz wieder. Bezüglich der Feuchtaufnahme und Dickenquellung konnte erst ab einer Temperatur von 140°C eine Reduzierung gemessen werden. Der Einfluss der Behandlungsdauer wird bei hohen Temperaturen deutlicher. Die Querkzugfestigkeit nimmt um maximal 38,5% ab; nach Kochtest liegt die Querkzugfestigkeit teilweise über und unter der Referenz. Die Einbußen der Biegefestigkeit fallen mit maximal 23,5% nach Behandlung bei 160°C vergleichsweise gering aus; der Biege-E-Modul bleibt unverändert bzw. nimmt leicht zu. In Bezug auf Feuchtaufnahme und Dickenquellung haben die Ergebnisse gezeigt, dass eine Nachbehandlung insbesondere ab 160°C zu verminderter Feuchtaufnahme und reduzierter Dickenquellung führen. Mit der Reduzierung der Dickenquellung geht aber gleichzeitig ein Verlust der Querkzugfestigkeit einher. Dadurch wird zum Ausdruck gebracht, dass wie bei allen Hitzebehandlungsverfahren ein Kompromiss zwischen Verbesserung der Dickenquellung und Verlust der mechanischen Eigenschaften getroffen werden muss.

Tabelle 20: Relative Veränderung der Eigenschaften im Vergleich zur Referenz, Angaben in Prozent

Probe	Feuchte (20°C / 65%)	Dicken- quellung (24 h)	Querzugfestigkeit		MOE	MOR
			trocken	Kochtest		
120°C, 0h, PMDI	4,3	-9,8	-15,4	0,0	-2,7	-14,3
120°C, 24h, PMDI	0,0	-24,8	-12,3	30,5	-4,0	-5,0
120°C, 48h, PMDI	-3,2	-17,3	-28,5	-2,0	0,0	-11,0
140°C, 0h, PMDI	0,0	-24,3	-7,0	59,0	2,3	-3,5
140°C, 24h, PMDI	-6,5	-16,4	-27,0	12,0	4,5	-8,6
140°C, 48h, PMDI	-7,6	-31,3	-23,8	-6,0	-5,5	-17,5
160°C, 0h, PMDI	-10,8	-15,4	-10,7	-2,0	10,0	-4,4
160°C, 24h, PMDI	-16,3	-38,8	-25,4	-6,0	11,0	0,0
160°C, 48h, PMDI	-17,4	-34,0	-38,5	-26,5	4,3	-23,5

7 Vergleichende Diskussion und Schlussfolgerung

In diesem Abschnitt sollen die vorgestellten Verfahren anhand ausgewählter Platteneigenschaften bewertet und miteinander verglichen werden. Das primäre Ziel, durch eine thermische Modifizierung die Feuchtaufnahme und Dickenquellung zu reduzieren, konnte durch alle Verfahren erreicht werden, das Ausmaß fiel jedoch sehr unterschiedlich aus. Auch haben die jeweiligen Verfahrensparameter einen Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften.

Um eine bessere Vergleichbarkeit zu gewährleisten, werden die Platten, für die das jeweils beste Ergebnis bezüglich einer reduzierten Dickenquellung erreicht werden konnte, mit einer Referenzplatte in Beziehung gesetzt. Dabei ist zu beachten, dass die in diesem Abschnitt zugrunde gelegte Referenz nicht den Referenzproben der jeweiligen Versuchsreihen aus obigen Untersuchungen entspricht. Durch Unterschiede in Dicke und Rohdichte zwischen den Platten der einzelnen Versuchsreihen ist eine direkte Vergleichbarkeit nicht sinnvoll; die hier diskutierten Ergebnisse dienen vielmehr dazu, entscheidende Tendenzen aufzuzeigen als Absolutwerte zu vergleichen.

7.1 Platteneigenschaften

Maßgeblich für den Vergleich der Verfahren untereinander sind die Prozessparameter, die jeweils zu besten Ergebnissen der Dickenquellung geführt haben:

Durch die Vorbehandlung unter Sauerstoff für 15 Stunden ließ sich das beste Ergebnis bei einer Temperatur von 180°C erreichen; in sauerstoffreduzierter Atmosphäre war die Dickenquellung nach 10 Minuten bei 240°C minimal. Für die Nachbehandlung nach dem SINA-Verfahren ergab sich das beste Ergebnis nach Behandlung bei 180°C für eine Dauer von 72 Stunden und einer Plattenfeuchte von 6%. Da bereits die Presszeit deutlichen Einfluss auf das Ergebnis hat, wird in dieser Betrachtung auch die Simultanbehandlung als Einzelparаметer betrachtet, in den Abbildungen als „Simultan“ bezeichnet, unter Angabe des Presszeitfaktors (PZF). Beim zweiten Ansatz zur Nachbehandlung wurden die besten Ergebnisse nach 48stündiger Behandlung bei 160°C erreicht. Zum Vergleich der Verfahren werden ausschließlich OSB aus Kiefer mit PMDI als Klebstoff herangezogen.

In Abbildung 95 ist die Gleichgewichtsfeuchte der Platten bei 20°C und 65% r. Lf. dargestellt. Die größte Reduzierung der Feuchtaufnahme (um ca. 30%) wird durch das SINA-Verfahren erreicht. Eine vorhergehende Simultanbehandlung reduziert die Feuchtaufnahme um 15%. Danach folgt die Platte aus der Vorbehandlung bei 240°C, die Ausgleichsfeuchte liegt um 25% unter dem Referenzwert. Die geringste Verbesserung mit

15% bringt die Vorbehandlung unter Sauerstoff bei 180°C und entspricht damit der Wirkung einer Simultanbehandlung.

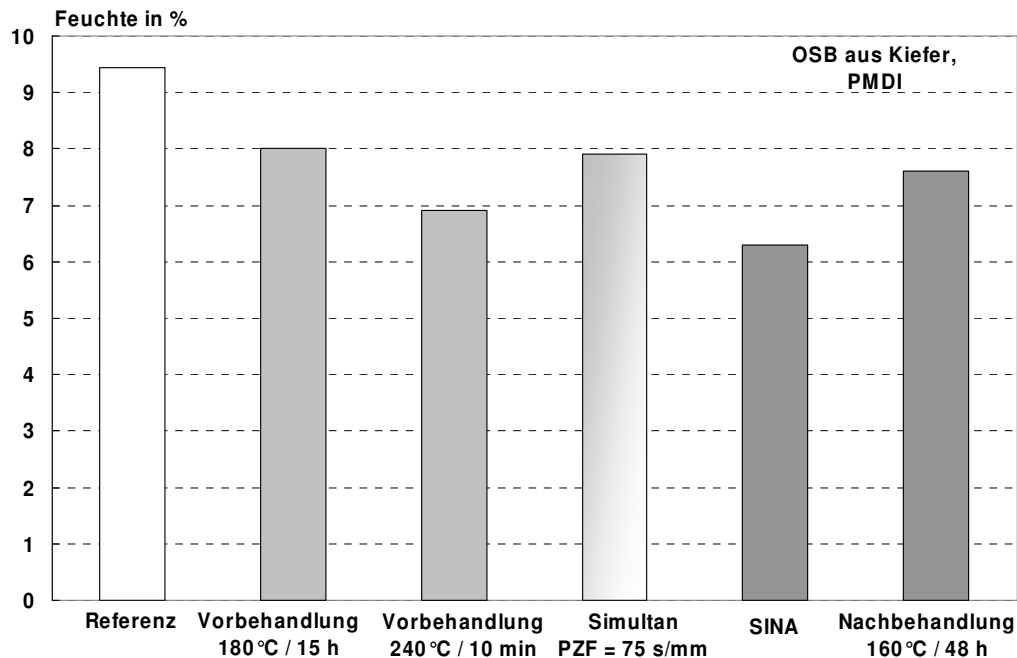


Abbildung 95: Gleichgewichtsfeuchte bei 20°C und 65% r. Lf. PMDI-gebundener OSB aus Kiefer, hergestellt nach verschiedenen Verfahren zur thermischen Modifizierung.

Die Dickenquellung nach 24 Stunden Wasserlagerung beträgt für die Platte nach dem SINA-Verfahren 3,5% und liegt damit um rund 80% unter der Referenz (Abbildung 96). Allein die Simultanbehandlung resultiert bereits in einer Reduzierung der Dickenquellung um circa 75%. Durch die Vorbehandlung lässt sich die Dickenquellung unabhängig vom Verfahren um rund 50% reduzieren. Die geringste Verbesserung der Dickenquellung wird durch die Nachbehandlung bei 160°C erreicht.

Für die Querkzugfestigkeit nach EN 319 (1993) ergab sich für die Platte aus dem SINA-Verfahren die größte Abnahme (Abbildung 97), der Wert lag um 30% unter der Referenz; keine Abnahme wies die Platte aus der Vorbehandlung unter Sauerstoff auf. Die Einbußen in der Querkzugfestigkeit betrugen für die anderen Platten zwischen 15% und 25%. Nach dem Kochtest entsprach die Querkzugfestigkeit der modifizierten Platten dem Referenzwert bzw. lag für die Platten aus der Vorbehandlung geringfügig darüber.

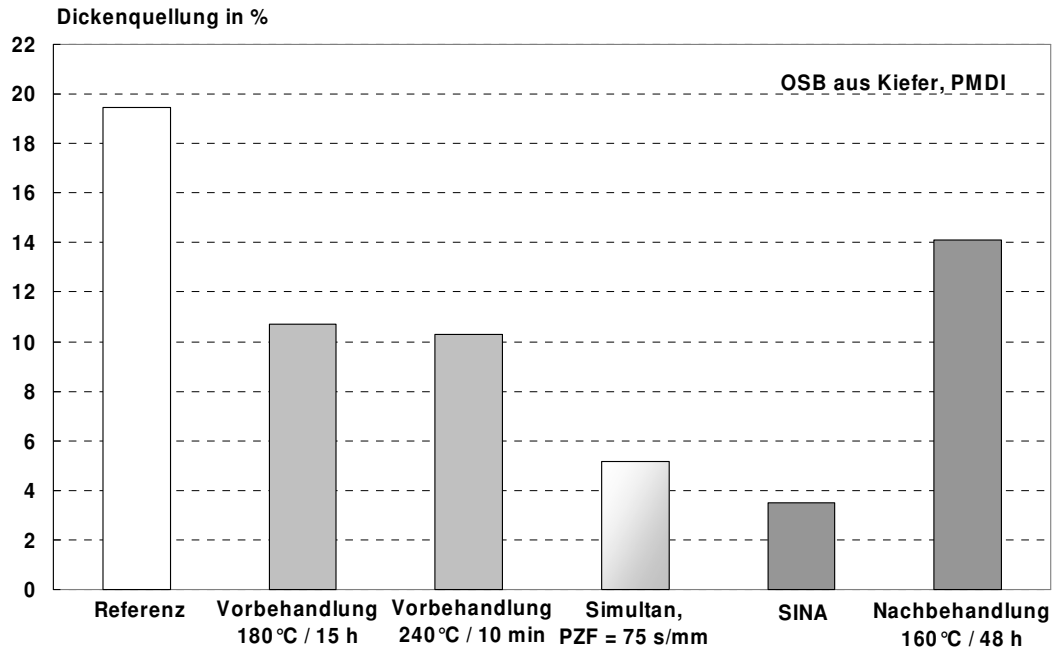


Abbildung 96: Dickenquellung nach 24 Stunden Wasserlagerung PMDI-gebundener OSB aus Kiefer, hergestellt nach verschiedenen Verfahren zur thermischen Modifizierung.

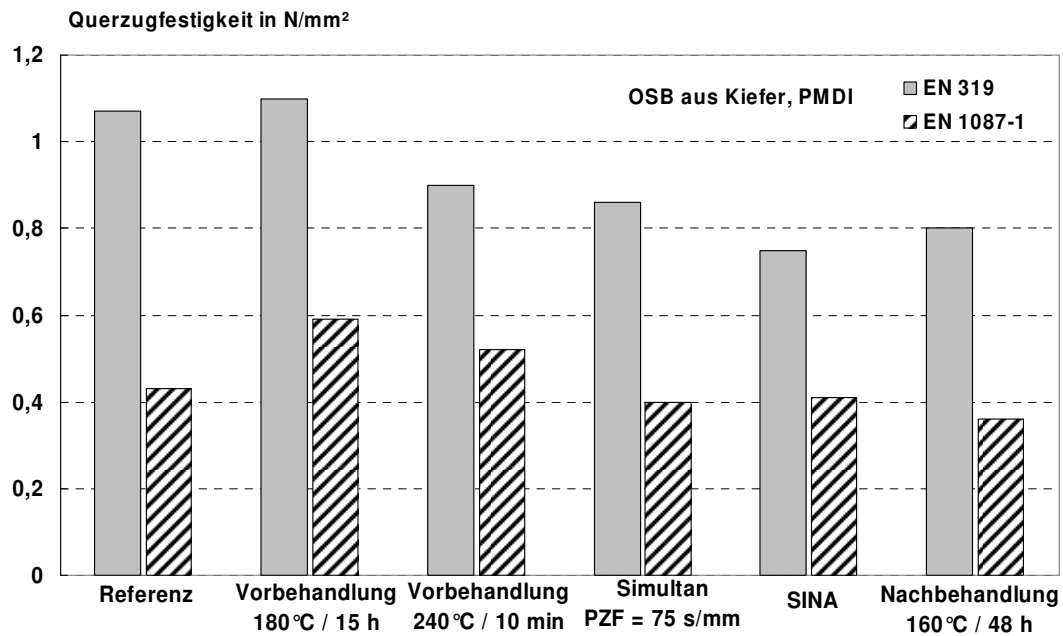


Abbildung 97: Querzugfestigkeit nach EN 319 und EN 1087-1 PMDI-gebundener OSB aus Kiefer, hergestellt nach verschiedenen Verfahren zur thermischen Modifizierung.

Um den Einfluss des Verfahrens auf die Verklebungseigenschaft zu veranschaulichen, werden den oben aufgeführten PMDI-gebundenen OSB MUPF-gebundene OSB gegenübergestellt. Um die Übertragbarkeit der Verfahren auf ein Klebstoffsystem zu untersuchen, sind die Verfahrensbedingungen der thermischen Modifizierung für die MUPF-gebundenen OSB die gleichen wie bei der Verwendung von PMDI.

In Abbildung 98 ist die Dickenquellung nach 24 Stunden Wasserlagerung gezeigt. Die Ergebnisse der PMDI-gebundenen Platten sind bereits erläutert worden; die deutlichste Reduzierung der Dickenquellung wird durch das SINA-Verfahren erreicht, und bereits die Simultanbehandlung wirkt sich positiv aus. Die Verbesserung der Dickenquellung nach Vorbehandlung fällt mit 50% am geringsten aus. MUPF als Klebstoff führt generell zu stärkerer Dickenquellung, wie an der Referenz ersichtlich. Das Verhältnis von Dickenquellung nach Vorbehandlung zur Referenz bleibt trotz absolut höheren Werte gleich; das bedeutet eine Verbesserung der Dickenquellung um 50%, unabhängig des verwendeten Klebstoffes. Dagegen beträgt die Verbesserung nach der Simultanbehandlung mit MUPF als Klebstoff noch 30%, durch die anschließende Nachbehandlung wird keine Verbesserung der Dickenquellung erreicht.

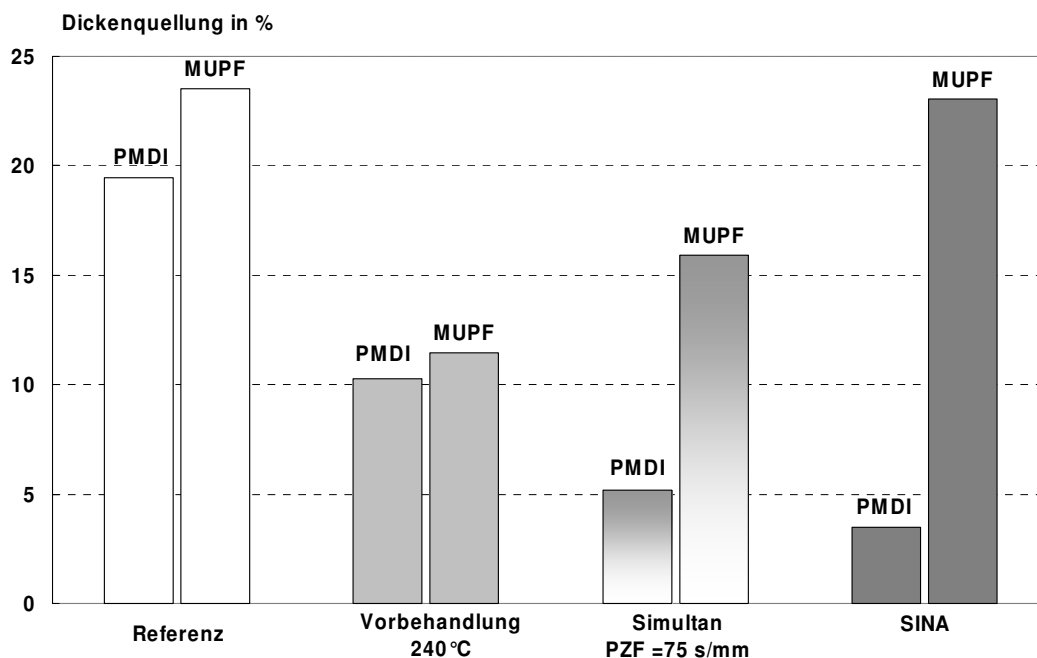


Abbildung 98: Dickenquellung nach 24 Stunden Wasserlagerung MUPF- und PMDI-gebundener OSB aus Kiefer, hergestellt nach verschiedenen Verfahren zur thermischen Modifizierung.

Die Querkzugfestigkeit nach EN 319 (1993) der PMDI-gebundenen Platten nimmt durch die Modifizierung ab und liegt zwischen 15% und 30% unter der Referenz; die größte Abnahme wird durch das SINA-Verfahren verursacht (Abbildung 99). Bei den MUPF-gebundenen Platten dagegen liegt die Abnahme der Querkzugfestigkeit nach EN 319 (1993) bei 15% bis maximal 85%; die höchste Abnahme geht aus dem SINA-Verfahren hervor.

Nach dem Kochtest bleibt die Querkzugfestigkeit der PMDI-gebundenen OSB gegenüber der Referenz unverändert bzw. übersteigt sie bis zu 25%. Die MUPF-gebundenen OSB weisen nach dem Kochtest mit Ausnahme der Probe aus dem SINA-Verfahren, die mechanisch infolge der Heißwasserlagerung vollständig versagt, keine Abnahme gegenüber der Referenz auf.

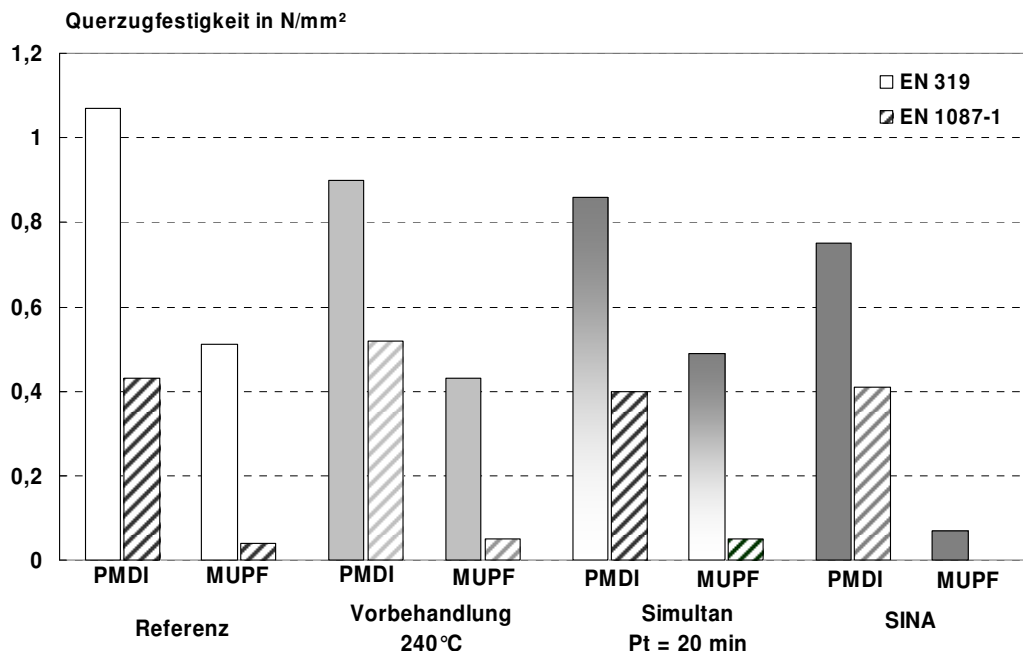


Abbildung 99: Querkzugfestigkeit nach EN 319 und EN 1087-1 MUPF- und PMDI-gebundener OSB aus Kiefer, hergestellt nach verschiedenen Verfahren zur thermischen Modifizierung.

7.2 Schlussfolgerung

In nachstehender Tabelle 21 sind die Ergebnisse aus dem Vergleich der Platteneigenschaften als relative Änderung gegenüber der Referenz aufgeführt.

Tabelle 21: Relative Eigenschaftsänderung PMDI-gebundener OSB aus Kiefer aus verschiedenen Verfahren zur thermischen Modifizierung

Verfahren	Feuchte (20°C / 65% r. Lf.)	Dickenquellung (24 h)	Querzugfestigkeit	
			trocken	nach Koch- test
Vorbehandlung 180°C / 15 h	-15%	-45%	±0%	+35%
Vorbehandlung 240°C / 10 min	-25%	-50%	-15%	+20%
Simultan (PZF= 75 s/mm)	-15%	-75%	-20%	-7%
SINA (180°C / 72h / 6%)	-30%	-80%	-30%	±0%
Nachbehandlung (160°C / 48 h)	-20%	-30%	-25%	-15%

Zusammenfassend folgt, dass unabhängig der Prozessparameter die Feuchteaufnahme und Dickenquellung am wirkungsvollsten durch das SINA-Verfahren verbessert werden kann. Dabei hat die vorausgehende Simultanbehandlung bereits deutlichen Einfluss auf das Ergebnis. Im Gegenzug führen diese Verfahren aber zu höheren Einbußen der Querzugfestigkeit und unterstreichen dadurch den Kompromiss, der bei Verfahren einer thermischen Modifizierung oftmals zwischen verbesserter Dickenquellung und Festigkeitsverlusten eingegangen werden muss.

Bei dem Vergleich der Verfahren dürfen bei Betrachtung der Wirksamkeit auf die Eigenschaftsverbesserung aber nicht die Verfahrensparameter außer Acht gelassen werden, wie beispielsweise die Behandlungszeit. So konnte die Dickenquellung zwar um bis zu 80% verringert werden, allerdings bedurfte es hierzu einer Behandlung der Platte im Stapel bei 180°C für eine Dauer von 72 Stunden, die zudem mit einem Presszeitfaktor von rund 75 s/mm verpresst worden war. Allerdings bewirkte bereits die Simultanbehandlung eine Reduzierung der Dickenquellung und der Nachbehandlung im Stapel bei 160°C ging ebenfalls

ein erhöhter Presszeitfaktor voraus (36 s/mm), um die angestrebte Stapeltemperatur zu erreichen, wie unter Abschnitt 6.1.6 beschrieben. Die Dickenquellung war nach dieser Presszeit bereits um 15% reduziert, so dass diese Ergebnisse Aufschluss darüber geben, wie sich durch Variation der Presszeit die Dickenquellung reduzieren lässt.

Neben dem Einfluss von Temperatur und Dauer der Nachbehandlung auf die Platteneigenschaften wurde anhand der Ergebnisse des SINA-Verfahrens auch der Effekt der Plattenfeuchte deutlich; eine höhere Plattenfeuchte übte sich positiv auf die Dickenquellung aus.

Dennoch ist die Methodik der Simultan- bzw. Nachbehandlung sehr zeitintensiv, so dass es fraglich bleibt, ob eine praktische Umsetzung sinnvoll ist. Darüber hinaus wird sich eine Umsetzung auf großformatige Werkstoffe schwierig oder zumindest energieintensiv gestalten, wenn die Zieltemperatur von 180°C über einen Zeitraum von bis zu 72 Stunden gehalten werden soll; die Platten in diesen Untersuchungen hatten eine Fläche von lediglich etwa 0,25 m². Außerdem wächst mit zunehmender Plattengröße die Gefahr der Bildung von Dampfplatzern, wenn der entstehende Dampfdruck während der langen Presszeiten nicht entweichen kann, beispielsweise über die Kantenflächen.

Im Vergleich zur Nachbehandlung konnte durch Vorbehandlung unter Sauerstoff nach 15 Stunden die Dickenquellung um 45% reduziert werden, bei geringern Festigkeitseinbußen. In Hinblick auf die Verfahrenstechnik ist bei diesem Ansatz zur Vorbehandlung als nachteilig zu beurteilen, dass der erzielte Effekt bei Temperaturen oberhalb 160°C erreicht wurde, ab denen das Brandrisiko zunimmt. Dies liegt an einsetzenden exothermen Reaktionen, die zum Temperaturanstieg führen können. Dadurch, dass die Behandlung an ruhenden Spanmassen durchgeführt wurde, konnten sich auf diese Weise Hitzenester im Inneren des Spangutes bilden. Das führt neben der erwähnten Gefahr des Entzündens zu einem inhomogenen Behandlungsergebnis, da sich ein Temperaturgradient innerhalb des Spangutes ausbilden kann. Besonders die Strands, die auf diese Weise bei 180°C behandelt worden waren, wiesen vereinzelt bereits Spuren von Abbrand auf.

Durch die Vorbehandlung in sauerstoffreduzierter Atmosphäre sollte vor allem durch die Möglichkeit einer Behandlung bei Temperaturen oberhalb 200°C die Behandlungsdauer drastisch gekürzt werden können. Darüber hinaus wurde die Verfahrenstechnik derart gestaltet, dass das Spangut während der Behandlung bewegt werden konnte, um eine homogene Durchwärmung zu ermöglichen. Anhand von Vorversuchen wurde der Einfluss von Temperatur und Behandlungszeit auf ausgewählte Eigenschaften untersucht, um ideale Prozessbedingungen zu finden. Somit konnte bereits nach zehnminütiger Behandlung nach Er-

reichen der Zieltemperatur von 240°C eine Reduzierung der Dickenquellung von 50% erreicht werden; die Gesamtdauer der Behandlung lag bei etwa einer Stunde. Damit bietet die Vorbehandlung das günstigste Verhältnis von notwendiger Behandlungsdauer zu erreichter Eigenschaftsverbesserung.

Nicht nur aufgrund der kürzeren Behandlungsdauer, sondern auch in Hinblick auf eine Umsetzung in die Praxis erscheint die Vorbehandlung in sauerstoffreduzierter Atmosphäre viel versprechend. Durch die Anlehnung des Verfahrens an einen industriellen Trocknungsprozess, ließe sich die Modifizierung direkt daran anschließen. Zum einen, weil das Spangut vor der Modifizierung ohnehin technisch vorgetrocknet worden war und zum anderen erlaubt dies einen kontinuierlichen Prozess. Bezüglich der technischen Realisation sollten Trocknung und Modifizierung allerdings räumlich voneinander getrennt durchgeführt werden, um eine sauerstoffreduzierte Atmosphäre in der Modifizierungstrommel gewährleisten zu können. Zum anderen ergeben sich Unterschiede bezüglich Verweildauer und Temperaturen während der Trocknung bzw. der thermischen Modifizierung. Darüber hinaus sind bei der technischen Umsetzung die freiwerdenden Emissionen aufgrund der teilweisen thermischen Zersetzung und die Staubentwicklung zu berücksichtigen.

In Bezug auf die Klebstoffsysteme haben die Ergebnisse gezeigt, dass sich eine Simultan- bzw. Nachbehandlung für eine Verwendung nicht-hydrolysebeständiger Kondensationsharze grundsätzlich nicht eignet (Tabelle 22). Durch eine Vorbehandlung dagegen entstehen prinzipiell keine Einschränkungen hinsichtlich der Klebstoffauswahl, auch wenn sich in Abhängigkeit der eingesetzten Holzart, der Behandlungsparameter und des Plattentyps ein bestimmtes Klebstoffsystem vorteilhafter erweist. Die Bedingungen während der Simultanbehandlung bzw. des SINA-Verfahrens fördern die hydrolytische Zersetzung des MUPF-Harzes, so dass sich für diese Form der thermischen Modifizierung nur hitze- und hydrolysebeständige Klebstoffe anbieten, wie PMDI oder PF-Harz.

Tabelle 22: Relative Eigenschaftsänderung PMDI- und MUPF-gebundener OSB aus Kiefer aus verschiedenen Verfahren zur thermischen Modifizierung

Verfahren	Dickenquellung (24 h)		Querzugfestigkeit trocken		Querzugfestigkeit nach Kochtest	
	PMDI	MUPF	PMDI	MUPF	PMDI	MUPF
Vorbehandlung	-50%	-50%	-15%	-15%	+25%	0%
Simultan	-75%	-30%	-20%	-4%	-7%	0%
SINA	-80%	0%	-30%	-85%	0%	-100%

Des Weiteren konnte durch Versuche gezeigt werden, dass die Vorbehandlung in sauerstoff-reduzierter Atmosphäre auf weitere Holzarten und Partikel übertragbar ist, in Tabelle 23 als Übersicht dargestellt. Die Vorbehandlung wurde gleichsam bei 220°C für eine Dauer von 30 Minuten durchgeführt, als Klebstoff wurde PMDI eingesetzt. Relativ gegenüber der jeweiligen Referenz konnte die Feuchteaufnahme um 20% bis 25% reduziert werden, die Dickenquellung zwischen 45% und 65%. Die Querzugfestigkeit war unverändert bzw. hatte um bis zu 20% abgenommen

Aufgrund von Unterschieden in der chemischen Zusammensetzung der Hölzer ergeben sich unter den gleichen Behandlungsparametern unterschiedliche Eigenschaften. So resultiert die Behandlung von Laubholz im Vergleich zu Nadelholz zu höheren Masseabnahmen aufgrund des höheren Polyosengehaltes. Damit erklärt sich auch die relativ größte Abnahme von Feuchte und Dickenquellung einerseits und der Festigkeiten andererseits.

Tabelle 23: Relative Eigenschaftsänderung verschiedener PMDI-gebundener Plattenwerkstoffe aus Kiefer, Fichte und Pappel, die für 30 Minuten bei 220°C in sauerstoffreduzierter Atmosphäre vorbehandelt wurden

Werkstoff	Feuchte	Dickenquellung (24 h)	Querzugfestigkeit	
	(20°C / 65% r. Lf.)		trocken	nach Kochtest
OSB Kiefer	-20%	-45%	-15%	+25%
FPY Fichte	-20%	-50%	0%	+10%
OSB Pappel	-25%	-65%	-20%	-25%

Daneben konnten durch die Vorversuche wichtige Zusammenhänge zwischen verfahrensbedingter Masseabnahme, reduzierter Feuchteaufnahme und gesteigerter Dauerhaftigkeit gefunden werden. Unabhängig der Behandlungstemperatur oberhalb 200°C und –dauer erreichte die Gleichgewichtsfeuchte ab einer bestimmten Masseabnahme einen konstanten Wert. Ab diesem Wert konnte bei den Proben eine Zunahme der Dauerhaftigkeit festgestellt werden. Nach diesem Schema lassen sich für jede Form der Hitzebehandlung die geeigneten Verfahrensparameter finden und eine Einschätzung der Dauerhaftigkeit vornehmen. Die Gültigkeit dieser Zusammenhänge konnte an den Pappel-Strands verdeutlicht werden. In Vorversuchen wurde die temperaturabhängige Masseabnahme mit der Gleichgewichtsfeuchte in Beziehung gesetzt und anhand des erreichten konstanten Wertes für die Gleichgewichtsfeuchte die geeignete Vorbehandlung festgelegt.

Dennoch konnte durch keines der vorgestellten Verfahren eine Dauerhaftigkeit der Platten besser als Dauerhaftigkeitsklasse 4, in Anlehnung an EN 350-1 (1994) erreicht werden; lediglich durch Vorbehandlung unter Sauerstoff bei 180°C und bei der Pappel-OSB nach Vorbehandlung in sauerstoffreduzierter Atmosphäre ließ sich Klasse 3 erreichen. Dennoch lassen sich anhand der DSI-Werte klare Tendenzen aufzeigen (Tabelle 14, Tabelle 16 und Tabelle 17). Die höchste Dauerhaftigkeit nach dem SINA-Verfahren erreichte einen DSI von 85, die Vorbehandlung in sauerstoffreduzierter Atmosphäre 61 und bei 180°C unter Sauerstoff 56. Die PMDI-gebundene Pappel-OSB lag mit einem DSI von 38 an der Grenze zur nächst besseren Dauerhaftigkeitsklasse. Trotzdem sind die Platten für eine Verwendung in Bereichen ständigen Feuchte- oder Bodenkontaktes ohne zusätzliche Schutzmittel nicht geeignet.

In Hinblick auf die formulierte Zielsetzung, vor allem Feuchteaufnahme und Dickenquellung zu reduzieren, konnten geeignete Verfahren vorgestellt werden. Unabhängig davon, ob eines der vorgestellten Verfahren in die Praxis umgesetzt werden kann, bieten die Ergebnisse wichtige Erkenntnisse, um durch Veränderung einzelner Verfahrensparameter Einfluss auf Feuchteaufnahme und Dickenquellung zu nehmen. Das heißt, eine thermische Modifizierung kann als zusätzliches Tool eingesetzt werden, und muss nicht zwingend die Substitution herkömmlicher Holzwerkstoffplatten bedeuten. Dies konnte unter anderem durch die Nebenversuche zur Biegefestigkeit (Abschnitt 5.3.6) anhand des Verbundwerkstoffes aus unbehandelten und modifizierten Spänen veranschaulicht werden. Als Verbund lassen sich durch Variation des Mischungsverhältnisses Platten mit veränderbaren Eigenschaften bei gleich bleibendem Klebstoffanteil herstellen. Denkbar wäre durch diesen Ansatz eine Kompensation höherer Klebstoffanteile, um verbesserte Feuchteaufnahme und Dickenquellung zu erreichen

8 Zusammenfassung

In der Arbeit werden Verfahren vorgestellt, um eine thermische Modifizierung von Holzwerkstoffen zu realisieren, mit dem Ziel, die Dimensionsstabilität und Dauerhaftigkeit zu verbessern. Bisher wird der hohen Dickenquellung und damit einer geringen Dimensionsstabilität durch höheren Klebstoffanteil, zusätzliche Beschichtungsmaterialien oder den Zusatz von Hydrophobierungsmitteln begegnet. Ein höherer Klebstoffanteil bedeutet zusätzliche Kosten und eine Beschichtung ist nur wirksam, solange sie unbeschädigt bleibt. Ansonsten besteht vor allem die Gefahr einer Wasseraufnahme über die Kanten, wodurch es zu einem starken Aufquellen kommt. Dadurch verliert der Werkstoff nicht nur seine Dimensionsstabilität, sondern es kann zudem durch die Quellspannungen zu einer Beschädigung des Beschichtungsmaterials kommen. Darüber hinaus führt der Beschichtungsstoff in seiner wasserabweisenden Funktion dazu, dass bereits eingedrungenes Wasser im Werkstoff verbleiben kann. In der Folge können Feuchtenester entstehen, wodurch die Gefahr eines Pilzbefalls zunimmt. Hydrophobierungsmittel wirken nur kurzzeitig einer Dickenquellung entgegen und haben somit keine nachhaltige Schutzfunktion.

Aus diesen Gründen ist es wünschenswert, Holzwerkstoffe so weiterzuentwickeln, dass diese verbesserte Eigenschaften bezüglich Dickenquellung und damit Dimensionsstabilität sowie erhöhter Dauerhaftigkeit aufweisen. Hierzu wurden in dieser Arbeit Methoden angewandt, die zum Ziel haben, die genannten Eigenschaften bleibend zu verbessern und die in eine industrielle Fertigung integriert werden können. Dabei wurde eine thermische Modifizierung als Verfahrensschritt gewählt, die in Form einer Vorbehandlung auf das Spanmaterial bzw. als Nachbehandlung auf den verpressten Werkstoff angewandt wurde. Außerdem wurde das SINA-Verfahren als Kombination einer Nachbehandlung, der bereits eine Simultanbehandlung während des Verpressens vorausgeht, entwickelt. Das Prinzip verbesserter Holzeigenschaften infolge thermischer Modifizierung beruht wesentlich auf dem teilweisen Abbau und Veränderungen der Polyosen. Durch ihren großen Anteil an der Sorption sinkt demnach das Feuchteaufnahmevermögen des Holzes, und als Hauptnahrungsquelle holzerstörender Pilze führt ein Abbau zu eingeschränkter Befallsaktivität. Durch den Abbau der Polyosen nimmt weiterhin die Kompressibilität des Holzes zu, ein Effekt, der besonders bei der Herstellung von Holzwerkstoffplatten von Bedeutung ist. Die Dickenquellung von Holzwerkstoffplatten hängt neben der Quellung des Holzes auch vom Deformationsrückgang der komprimierten Holzpartikel ab. Beim Pressvorgang werden durch das Verdichten der Partikel Spannungen in die Platte eingebracht, die besonders bei einem Feuchtwerden des Werkstoffes abgebaut

werden und damit zu einem Quellen der Platte beitragen. Dieser Anteil an der Dickenquellung übersteigt den der holzeigenen Hygroskopizität und ist im Gegensatz dazu irreversibel. Neben den positiven Aspekten der teilweisen thermischen Zersetzung des Holzes gehen mit dem Abbau der Holzmatrix auch Festigkeitseinbußen einher, so dass bei jedem Prozess zur thermischen Modifizierung ein Kompromiss zwischen reduzierter Feuchteaufnahme bzw. Dickenquellung und Festigkeitsverlusten eingegangen werden muss.

Bei den Verfahren zur Nachbehandlung hat sich besonders das SINA-Verfahren bezüglich reduzierter Dickenquellung als optimal erwiesen, damit gingen aber auch die höchsten Einbußen der Querkzugfestigkeit einher. In Hinblick auf eine Umsetzung in industrielle Maßstäbe erscheint eine Simultan- und / oder Nachbehandlung allerdings problematisch. Zum einen wächst durch lange Presszeiten das Risiko der Entstehung von Dampfplatzern, insbesondere bei industriell üblichen Plattenabmessungen, wenn der Dampfdruck beispielsweise nicht über die Plattenkanten entweichen kann und zum anderen sind diese Verfahren sehr zeit- und energieintensiv.

Gemessen am Verhältnis von Behandlungsdauer zu Vergütungseffekt, zeigte die Vorbehandlung in sauerstoffreduzierter Atmosphäre das größte Potential. Zudem bietet diese Form der thermischen Modifizierung den Vorteil, unabhängig des Klebstoffsystems einsetzbar zu sein. Unter diesem Aspekt eignet sich die Nachbehandlung bei Verwendung hydrolyseunbeständiger Kondensationsharze nicht. Die Ergebnisse haben gezeigt, dass die Verklebbarkeit durch die Vorbehandlung nicht wesentlich eingeschränkt wird, Einbußen der Querkzugfestigkeit sind vielmehr auf die Abnahme der holzeigenen Festigkeit zurückzuführen. Darüber hinaus konnte in Nebenversuchen gezeigt werden, dass auch die Verklebung thermisch modifiziertem mit unbehandeltem Spanmaterial möglich ist. Daraus ergeben sich vielfältige Möglichkeiten, z.B. ohne Veränderung des Klebstoffanteils, sondern nur über das Mischungsverhältnis Platten mit veränderbaren Eigenschaften herzustellen. Daher scheint die Vorbehandlung in Hinblick auf eine industrielle Umsetzung am ehesten geeignet. Bezüglich der Dauerhaftigkeit konnte durch die Verfahren keine Dauerhaftigkeit besser als Klasse 3 (in Anlehnung an EN 350-1 (1994)) erreicht werden.

Die Arbeit stellt unterschiedliche Verfahren zur Verbesserung von Dickenquellung, Feuchteaufnahme und Dauerhaftigkeit von Holzwerkstoffen vor. Neben einer vollständigen Integration in die industrielle Praxis, ist es möglich, auch nur einzelne Aspekte der thermischen Modifizierung als zusätzliche Verfahrenstools zu übertragen. Damit eröffnet sich die Möglichkeit, über die Verfahrenstechnik Holzwerkstoffe mit verbesserten Eigenschaften herzustellen, ohne zusätzliche Hilfsstoffe oder höheren Klebstoffanteil.

9 Literaturverzeichnis

- Abatzoglou, N.; Chornet, E.; Belkacemi, K.; Overend, R.P. (1992): Phenomenological kinetics of complex systems: the development of a generalized severity parameter and its application to lignocellulosics fractionation. *Chemical Engineering Science* 47: 1109-1122
- Alén, R.; Rytönen, S.; McKeough, P. (1995): Thermogravimetric behaviour of black liquors and their organic constituents. *J. Anal. Appl. Pyrolysis* 31: 1-13
- Alén, R.; Kuoppala, E.; Oesch, P. (1996): Formation of the main degradation compound groups from wood and its components during pyrolysis. *J. Anal. Appl. Pyrolysis* 36: 137-148
- Alén, R.; Kotilainen, R.; Zaman, A. (2002): Thermochemical behavior of Norway Spruce (*Picea abies*) at 180-225°C. *Wood Science and Technology* 36: 163-171
- Antal, M.J., Jr. (1983): Biomass pyrolysis: A review of the literature, Part 1 – Carbohydrate pyrolysis. *Advanced Solar Energy* 1: 61-110
- Aoyama, M.; Seki, K.; Saito, N. (1995): Solubilization of bamboo grass xylan by steaming treatment. *Holzforschung* 49: 193-196
- Atherton, G.H.; Welty, J.R. (1972): Drying rates of veneer in superheated steam at temperatures to 800°F. *Wood Science* 4 (4): 209-218
- Becker, H.; Reiter, L. (1970): Über den Einfluss von Temperatur und Holzfeuchtigkeit auf die Relaxation der Biegespannungen in Rotbuchenholz. *Holz als Roh- und Werkstoff* 28: 264-270
- Bengtsson, C.; Jermer, J.; Brem, F. (2002): Bending strength of heat-treated spruce and pine timber. The International Research Group on Wood Preservation, Document No. IRG/WP 02-40242
- Bhuiyan, M.T.R.; Hirai, N.; Sobue, N. (2000): Changes of crystallinity in wood cellulose by heat treatment under dried and moist conditions. *Journal of Wood Science* 46: 431-436
- Biermann, C.J.; Schultz, T.P.; McGinnis, G.D. (1984): Rapid steam hydrolysis/ extraction of mixed hardwoods as a biomass pre-treatment. *Journal of Wood Chemistry and Technology* 4: 111-128
- Björkman, A. (1981): Significance of pyrolysis for gasification/combustion. *Proceeding of the*
-

International Conference on Recovery of Pulping Chemicals. Technical University of Denmark, Lyngby, Denmark: 3-7

Blanchette, R.A. (1991): Delignification by wood-decay fungi. *Ann. Rev. Phytopathol.* 29: 381-398

Bobleter, O.; Binder, H. (1980): Dynamischer hydrothormaler Abbau von Holz. *Holzforschung* 34: 48-51

Börås, L.; Gatenholm, P. (1999): Surface Composition and Morphology of CTMP Fibres. *Holzforschung* 53: 188-194

Bolton, A.J.; Humphrey, P.E.; Kavvouras, P.K. (1989): The hot pressing of dry-formed wood-based composites, Part IV: The importance of stresses in the pressed mattress and their relevance to the minimisation of pressing time, and the variability of board properties. *Holzforschung* 43: 406-410

Bonn, G.; Concin, R.; Bobleter, O. (1983): Hydrothermolysis- a new process for the utilization of biomass. *Wood Science and Technology* 17: 195-202

Boonstra, M.J.; Tjeerdsma, B.F.; Groeneveld, H.A.C. (1998): Thermal modification of non-durable wood species. Part 1. The PLATO technology: thermal modification of wood. International Research Group on Wood Preservation, Document no. IRG/WP 98-40123

Bourgois, J.; Guyonnet, R. (1988): Characterization and analysis of torrefied wood. *Wood Science and Technology* 22: 143-155

Brumbaugh, J. (1960): Effect of flake dimension on properties of particleboards. *Forest Products Journal* 10 (5): 243-246

Burmester, A. (1970): Formbeständigkeit von Holz gegenüber Feuchtigkeit – Grundlagen und Vergütungsverfahren. BAM Bericht Nr. 4, 180 Seiten

Burmester, A. (1973): Einfluss einer Wärme- Druck- Behandlung halbtrockenen Holzes auf seine Formbeständigkeit. *Holz als Roh- und Werkstoff* 31: 237-243

Burmester, A.; Deppe, H.J. (1973): Versuche zur Dimensionsstabilisierung von Spanplatten durch Spänebehandlung nach dem FWD-Verfahren. *Holzbearbeitung* 20 (7): 24-30

Burmester, A. (1974): Erfolgreiche Quellungsvergütung mit einfachen Mitteln, Teil 1 und 2. *Holz- und Kunststoffverarbeitung* 8 und 9: 534-538 und 610-617

Buro, A. (1954): Die Wirkung von Hitzebehandlungen auf die Pilzresistenz von Kiefern- und Buchenholz. *Holz als Roh- und Werkstoff* 12: 297-304

- Burstcher, E.; Bobleter, O.; Schwald, W.; Concin, R.; Binder, H. (1987): Chromatographic analysis of biomass reaction products by hydrothermolysis of poplar wood. *Journal of Chromatography* 390: 401-412
- Byrne, C.E.; Nagle, D.C. (1997): Carbonization of Wood for Advanced Materials Applications. *Carbon* 35 No. 2: 259-266
- Carrasco, F. (1989): Fundamentos del fraccionamiento de la biomasa. *Afinidad*. 46: 425-429
- Carrasco, J.E.; Sáiz, M.C.; Navarro, A.; Soriano, P.; Sáez, F.; Martinez, J.M. (1994): Effects of dilute acid and steam pretreatments on the cellulose structure and kinetics of cellulosic fraction hydrolysis by dilute acids in lignocellulosic materials. *Applied Biochemistry and Biotechnology* 45/46: 23-34
- Chow S.Z. (1971): Infrared Spectral Characteristics and Surface Inactivation of Wood at High Temperatures. *Wood Science and Technology* 5: 27-39
- Chow, S.Z.; Pickles, K.J. (1971): Thermal softening of wood and bark. *Wood and Fibre* 3: 166-178
- Christiansen, A.W. (1990): How Overdrying Wood Reduces its Bonding to Phenol-Formaldehyde Adhesives: A Critical Review of the Literature. Part 1. Physical Responses. *Wood and Fibre Science* 22 (3): 441-459
- Conner, A.H. (1984): Kinetic modelling of hardwood prehydrolysis. Part I: Xylan removal by water prehydrolysis. *Wood and Fiber Science* 18: 248-263
- Dekker, R.F.H.; Wallis, A.F.A. (1983): Autohydrolysis-explosion as pre-treatment for the enzymatic saccharification of sunflower seed hulls. *Biotechnology Letter* 5: 311-316
- Del Menezzi, C.H.S.; Tomaselli, I.: (2006): Contact thermal post-treatment of oriented strandboard to improve dimensional stability: A preliminary study. *Holz als Roh- und Werkstoff* 64 (3): 212-217
- Dirol, D.; Guyonnet, R. (1993): The improvement of wood durability by retification process. International Research Group on Wood Preservation, Section 4 – Process. 24th Annual Meeting, Orlando, USA, May 16-21: 1-11
- Dorris, G.M.; Gray, D.G. (1978): The surface analysis of paper and wood fibres by ESCA (Electron Spectroscopy for Chemical Analysis). Part 1 Application to cellulose and lignin. *Cellulose Chemistry and Technology* 12: 9-23
- Dunky, M. (2002): COST E 13 WG 1 (Wood Adhesives and Bonding Process) State-of-the-Art-Report Chapter 2.1 Formaldehyde resins
-

-
- Dunky, W.; Niemz, P. (2002): Holzwerkstoffe und Leime. Technologie und Einflussfaktoren. Springer-Verlag: 438 Seiten
- EN 300 (1997): Oriented Strand Boards. Definitions, Classification and Specifications.
- EN 310 (1993): Wood-Based Panels. Determination of Modulus of Elasticity in Bending and of Bending Strength.
- EN 317 (1993): Particleboards and Fibreboards. Determination of Swelling in Thickness after Immersion in Water.
- EN 319 (1993): Particleboards and Fibreboards. Determination of Tensile Strength Perpendicular to the Plane of the Board.
- EN 322 (1993): Wood-Based Panels. Determination of Moisture Content
- EN 350-1 (1994): Durability of Wood and Wood Based Products – Natural Durability of Solid Wood – Part 1: Guidance to the Principles of Testing and Classification of the Natural Durability of Wood.
- EN 1087-1 (1995): Particleboards. Determination of Moisture Resistance - Part 1: Boil Test
- ENV 12038 (1996): Durability of wood and wood based products – Wood based panels – Method of test determining the resistance against wood destroying basidiomycetes.
- Ernst, K. (1967): Möglichkeiten zur Verminderung der Quellung bei Spanplatten. Holztechnologie 8: 41-47
- Faix, O.; Jakab, E.; Till, F.; Székely, T. (1988): Study on low mass thermal degradation products of milled wood lignins by thermogravimetry-mass-spectroscopy. Wood Science and Technology 22: 323-334
- Fengel, D.; Wegener, G. (1989): Wood – Chemistry, Ultrastructure, Reactions. Walter de Gruyter, Berlin, New York, 613 Seiten
- Garrote, G.; Dominguez, H.; Parajo, J.C. (1999): Hydrothermal processing of lignocellulosic materials. Holz als Roh- und Werkstoff 57: 191-202
- Garrote, G.; Dominguez, H.; Parajo, J.C. (2001): Study on the deacetylation of hemicelluloses during the hydrothermal processing of Eucalyptus wood. Holz als Roh- und Werkstoff 59: 53-59
- Gatchell, C.J.; Heebink, B.G.; Hefty, F.V. (1966): Influence of component variables on the properties of particleboard for exterior use. Forest Products Journal 16 (4): 46-59
- Giebeler, E. (1983): Dimensionsstabilisierung von Holz durch eine Feuchte/Wärme/Druck-
-

Behandlung. Holz als Roh- und Werkstoff 41: 87-94

Giebeler, E. (1986): Feuchte-Wärme-Druck-Vergütung von Holz. In: Vorträge der 17. Holzschutz-Tagung der DGfH, Berlin, 13 Seiten

Gohar, P.; Guyonnet, R. (1998): Development of wood retification process at the industrial stage. International Research Group on Wood Preservation: Proceedings of the 4th International Symposium. 2-3 Feb., Cannes Mandelieu, France, Doc. No. IRG/WP 98 50101: 173-183

Goroyias, G.J.; Hale, M.D. (2002 a): The Effect of High Temperature and Long Pressing Time on the Dimensional Stability and Decay Resistance of OSB. Paper prepared for the 33rd Annual Meeting of the International Research Group on Wood Preservation in Cardiff, Wales

Goroyias, G.J.; Hale, M.D. (2002 b): Heat Treatment of Wood Strands for OSB Production: Effect on the Mechanical Properties, Water Absorption and Dimensional Stability. 33rd Annual Meeting of the International Research Group on Wood Preservation in Cardiff, Wales

Gray, V.R. (1962): The wettability of wood. Forest Products Journal 12 (9): 452-461

Gressel, P. (1969): Weitere Untersuchungen an freibewitterten Holzspanplatten. Holz als Roh- und Werkstoff 27 (10): 366-371

Grunwald, D. (2002): COST E 13 WG 1 (Wood Adhesives and Bonding Process) State-of-the-Art-Report Chapter 2.2 Polyurethane Adhesives

Halligan, A.F. (1970): A Review of Thickness Swelling in Particleboard. Wood Science and Technology 4: 301-312

Hancock, W.V. (1964): The influence of native fatty acids on the formation of glue bonds with heat-treated wood. Ph.D. thesis, University of British Columbia, Vancouver, Canada, 176 Seiten

Haskell, H.H.; Bair, W.M.; Donaldson, W. (1966): Progress and problems in the southern pine plywood industry. Forest Products Journal 16 (4): 19-24

Heebink, B.G.; Hefty, F.V. (1969): Treatment to reduce thickness swelling of phenolic bonded particleboard. Forest Products Journal 19 (11): 17-29

Heitz M.; Carrasco, F.; Rubio, M.; Chauvette, G.; Chornet, E.; Jaulin, L.; Overend, R.P. (1986): Generalized correlations for the aqueous liquefaction of lignocellulosics. Canadian Journal of Chemical Engineering 64: 647-650

-
- Heitz M.; Capek-Ménard, E.; Koeberle, P.G.; Gagné, J.; Chornet, E.; Overend, R.P.; Taylor, J.D.; Yu, E. (1991): Fractionation of *Populus tremuloides* at the pilot plant scale: optimization of steam pre-treatment conditions using the STAKE II technology. *Biores. Technology* 35: 23-32
- Herczeg, A. (1965): Wettability of wood. *Forest Products Journal* 11: 499-505
- Highley, T.L. (1987): Changes in chemical components of hardwood and softwood by brown-rot fungi. *Material und Organismen* 22 (1): 39-45
- Hörmeyer, H.F.; Schwald, W.; Bonn, G.; Bobleter, O. (1988): Hydrothermolysis of birch wood as pretreatment for enzymatic saccharification. *Holzforschung* 42: 95-98
- Hse, C.-Y.; Kuo, M.-L. (1988): Influence of extractives on wood gluing and finishing- a review. *Forest Products Journal* 38 (1): 52-56
- Hsu, W.; Schwald, W.; Schwald, J.; Shields, J.A. (1988): Chemical and physical changes required for producing dimensionally stable wood-based composites. Part 1. Steam pre-treatment. *Wood Science and Technology* 22: 281-289
- Jämsä, S.; Viitaniemi, P. (2001): COST E 22. Heat Treatment of Wood- Better Durability without Chemicals. Review on Heat Treatments of Wood. Herausgeber: Rapp, A.O. Proceedings of Special Seminar in Antibes, France
- Johansson, L.-S.; Campbell, J.M.; Koljonen, K.; Stenius, P. (1999): Evaluation of surface lignin on cellulose fibers with XPS. *Applied Surface Science* 144 (1): 92-95
- Johansson, D.; Morén, T. (2006): The potential of colour measurement for strength prediction of thermally treated wood. *Holz als Roh- und Werkstoff* 64: 104-110
- Jordan, D.L.; Wellons, J.D. (1977): Wettability of Dipterocarp veneers. *Wood Science* 10 (1): 22-27
- Jorgensen, R.M.; Odell, R.L. (1961): Dimensional stability of oak flakeboard as affects by particle geometry and resin spread. *Forest Products Journal* 11: 463-466
- Jung, B.; Roffael, E. (2002): Über die Acidität einheimischer Hölzer. *Holz als Roh- und Werkstoff* 60: 154
- Kadlec, K.M. (1980): Wetting as a predictor of surface inactivation for platen dried Douglas-fir veneers. M.S. thesis, Oregon State University, Corvallis, OR, 64 Seiten
- Kamdem D.P.; Pizzi, A.; Guyonnet, R.; Jermannaud, A. (1999): International Research Group on Wood Preservation. Doc. No. IRG/WP 99-40145
-

- Kamdem, D.P.; Pizzi, A.; Triboulot, M.C. (2000): Heat-Treated Timber: Potentially Toxic Byproducts Presence and Extent of Wood Cell Wall Degradation. Holz als Roh- und Werkstoff 58: 253-257
- Kamdem D.P.; Pizzi, A.; Jermannaud, A. (2002): Durability of Heat-Treated Wood. Holz als Roh- und Werkstoff 60: 1-6
- Kennedy, R.W. (1958): Strength Retention in Wood Decayed to Small Weight Losses. Forest Products Journal 8: 308-314
- Keylwerth, R. (1958): Zur Mechanik der mehrschichtigen Spanplatte. Holz als Roh- und Werkstoff 16 (11): 419-430
- Khan, S.; Chui, Y.H.; Schneider, M.H.; Barry, A.O. (2004): Wettability of treated flakes of selected species with commercial adhesive resins. Journal of the Institute of Wood Science 16 (5): 258-265
- Kirk, T.K.; Cowling, E.B. (1984) in: The chemistry of solid wood. Rowell, R.M., ed. American Chemical Society, Washington D.C., 614 Seiten
- Klauditz, W. (1954): Untersuchungen über die Quellungsvorgänge und die Herabsetzung der Quellung bei Holzspanplatten. Holz als Roh- und Werkstoff 12 (3): 115
- Klauditz, W.; Stegmann, G. (1955): Beiträge zur Kenntnis des Ablaufes und der Wirkung thermischer Reaktionen bei der Bildung von Holzwerkstoffen. Holz als Roh- und Werkstoff 13 (11): 434-440
- Koch, P. (1964): Techniques for drying thick southern pine veneer. Forest Products Journal 14 (9): 382-386
- Kollmann, F.; Schneider, A. (1963): Über das Sorptionsverhalten wärmebehandelter Hölzer. Holz als Roh- und Werkstoff 21: 77-85
- Kollmann, F.; Fengel, D. (1965): Änderungen der chemischen Zusammensetzung von Holz durch thermische Behandlung. Holz als Roh- und Werkstoff 23: 461-468
- Kotilainen, R. (2000): Chemical changes in wood during heating at 150-260°C. PhD-Thesis, Jyväskylä University, Research Report 80, Finland.
- Kubikova, J.; Zemann, A.; Krkoska, P.; Bobleter, O. (1996): Hydrothermal pretreatment of wheat straw for the production of pul and paper. TAPPI Journal 79: 163-169
- Kubinsky, E. (1971): Der Einfluss des Dämpfens auf die Holzeigenschaften. Holzforschung und Holzverwertung 23 (1): 1-11

-
- Kubojima, Y.; Okano, T.; Ohta, M. (1998): Vibrational properties of sitka spruce heat treated in nitrogen gas. *Journal of Wood Science* 44: 73-77
- Kubojima, Y.; Okano, T.; Masamitsu, O. (2000): Bending strength and toughness of heat-treated wood. *Journal of Wood Science* 46: 8-15
- Lehmann, W.F. (1964): Retarding dimensional changes in particleboards. Information Circular 20 Oregon State University, Corvallis
- Leithoff, H.; Peek, R.-D. (1998): Hitzebehandlung – eine Alternative zum chemischen Holzschutz. Tagungsband zur 21. Holzschutz-Tagung der DGfH in Rosenheim: 97-108
- Leithoff, H.; Peek, R.-D. (2000): Durability of plywood made from soft- and hardwoods assessed according to ENV 12038 after artificial and natural ageing. Paper prepared for the 31st Annual Meeting of the International Research Group on Wood Preservation in Kona Hawaii, USA, May 14-19
- Le Van, S.L. (1989): Thermal degradation. In: Schniewind, A.P. (Hrsg.): Concise Encyclopaedia of Wood and Wood-Based Materials. Exeter, England, Pergamon Press: 271-273
- Liiri, O. (1961): Untersuchungen über Dauerbefeuchtung von Spanplatten und die Wirkung von Feuchtigkeitsschwankungen auf ihre Eigenschaften. *Paperi ya Puu* 43: 737-748
- Lora, J.H.; Wayman, M. (1978): Delignification of hardwoods by autohydrolysis and extraction. *TAPPI Journal* 61: 47-50
- Lukowsky, D.; Böttcher, P. (2001): Beschichtung von hitzevergütetem Holz. (Technischer Bericht 2323/2001. In: Burk, R. (2002): Evaluierung technischer Eigenschaften von hitzevergütetem Holz unter besonderer Berücksichtigung der Entwicklung hochwärmegedämmter Holzfenster, Abschlussbericht des FuE-Vorhabens Kap. 0810, Titel 682 01-04. FH Kaiserslautern/ Pirmasens). 31 Seiten
- Maku, T.; Sasaki, H. (1956): Some factors which affect swelling properties of chipboard. *Composite Wood* 3: 135-139
- Matsuoka, Y.; Ohmura, W.; Fujiwara, S.; Kanagawa, Y. (2002): Durability of Sugi Wood treated in high temperature liquid paraffine (*Cryptomeria japonica* D. DoN). International Research Group on Wood Preservation. Doc. No. IRG/WP 02-40221
- Mayes, D.; Oksanen, O. (2002): ThermoWood Handbook. Herausgeber: Finish Thermowood Association
- Mazela, B.; Zakrzewski, R.; Grześkowiak, W.; Cofta, G.; Bartkowiak, M. (2004): Resistance of
-

- thermally modified wood to basidiomycetes. *Electronic Journal of Polish Agricultural Universities, Wood Technology*, Vol. 7, Issue 1
- Mildenstein, M.v. (1965): Wetterfeste Anstriche für Holzspanplatten. *Holz-Zentralblatt* 91 (37), Beilage Nr. 65: 347-348
- Militz, H.; Tjeerdsma, B. (2000): Heat Treatment of Wood by the Plato Process. *Nordic Wood Seminar om varmebehandlet tre*, Scandic Hotel Triaden, Lorenskog, 22. Nov.: 71-80
- Militz, H.; Tjeerdsma, B. (2001): COST E 22. Heat Treatment of Wood by the Plato Process. *Review on Heat Treatments of Wood*, Herausgeber: Rapp, A.O. *Proceedings of Special Seminar in Antibes, France*
- Miller, G.L.; Blum, R. (1960): Measurement of Carboxymethyl Cellulase Activity. *Analytical Biochemistry* 2: 127-132
- Montané, D.; Salvadó, J.; Farriol, X.; Jollez, P.; Chornet, E. (1994): Phenomenological kinetics of wood delignification: application of a time-dependent rate constant and a generalized severity parameter to pulping and correlation of pulp properties. *Wood Science and Technology* 28: 387-402
- Mottet, A.L. (1967): The particle geometry factor in particleboard manufacture. *Proceeding, 1st Washington State University Particleboard Symposium Pullman*, 23-73
- Muzzy, J.D.; Roberts, R.S.; Fieber, C.A.; Faass, G.S.; Mann, T.M. (1983): Pretreatment of hardwood by continuous steam hydrolysis. *Wood and Agricultural Residues*. Academic Press, New York: 351-368
- Nearn, W.T. (1974): Application of the ultrastructure concept in industrial wood Products research. *Wood Science* 6 (3): 285-293
- Neußer, H.; Krames, U.; Haidinger, K. (1965): Das Verhalten von Spanplatten gegenüber Feuchtigkeit unter besonderer Berücksichtigung der Quellung. *Holzforschung und Holzverwertung* Part 1. 17:43-53. Part 2. 17:57-69
- Niemz, P. (2002): Thermisch vergütetes Fichtenholz. *Holzforschung Schweiz* 1: 28-29
- Nuopponen, M.; Vuorinen, T.; Jämsä, S.; Viitaniemi, P. (2003): The effects of a heat treatment on the behaviour of extractives in softwood studied by FTIR spectroscopy methods. *Wood Science and Technology* 37: 109-115
- Ohlmeyer, M. (2002): Untersuchung über die Eigenschaftsentwicklung von Holzwerkstoffen nach dem Heißpressen. *Dissertation Universität Hamburg*, 228 Seiten
- Ohlmeyer, M.; Lukowsky, D. (2004): *Wood-Based Panels Produced from Thermal Treated*

Wood – Properties and Perspectives. Wood-Frame Housing Durability and Disaster Issues Conference. October 4-6, 2004, Las Vegas, USA

Okkonen, E.A.; River, B.H. (1996): Outdoor aging of wood-based panels and correlation with laboratory aging: Part 2. Forest Products Journal 46 (3): 68-74

Overend, R.P.; Chornet, E. (1987): Fractionation of lignocellulosics by steam-aqueous pre-treatment. Phil. Trans. R. Soc. Lond. A 321:523-536

Patzelt, M.; Stingl, R.; Teischinger, A. (2002): Thermische Modifikation von Holz und deren Einfluss auf ausgewählte Holzeigenschaften. In: Modifiziertes Holz: Eigenschaften und Märkte. Lignovisionen. Schriftenreihe des Institutes für Holzforschung (ihf) und dem Verband Holzwirte Österreichs (VHÖ) der Universität für Bodenkultur Wien, Band 3: 101-147

Paul, W.; Ohlmeyer, M. (2005): Optimisation of wood based panel properties by heat pre-treatment. Proceedings of the Ninth European Panel Product Symposium, October 5-7 2005, Llandudno, UK

Perkitny, T.; Szymankiewicz, H. (1963): Verlauf und Geschwindigkeit von Feuchtigkeitsänderungen in Holz und Spanplatten in Abhängigkeit von der Differenz zwischen Anfangs- und Ausgleichsfeuchtigkeit. Holztechnologie 4: 17-22

Pizzi, A. (1994): Advanced Wood Adhesives Technology. Marcel Dekker, New York

Popper, R.; Niemz, P.; Eberle, G. (2005): Untersuchungen zum Sorptions- und Quellungsverhalten von thermisch behandeltem Holz. Holz als Roh- und Werkstoff 63: 135-148

Rackwitz, G. (1963): Der Einfluss der Spanabmessungen auf einige Eigenschaften von Holzspanplatten. Holz als Roh- und Werkstoff 21: 200-209

Rapp, A.O.; Sailer, M. (2000): Heat Treatment in Germany- State of the Art. Nordic Wood Seminar om varmebehandlet tre, Scandic Hotel Triaden, Lorenskog, 22. Nov.: 81-95

Rapp, A.O.; Sailer, M. (2001): COST E 22. Oil Heat Treatment of Wood in Germany- State of the Art, Review on Heat Treatments of Wood, Herausgeber: Rapp, A.O. Proceedings of Special Seminar in Antibes, France

Robitschek, P.; Christensen, R.L. (1976): Degradation phenomena in urea-formaldehyd resin-bonded particleboard. Forest Products Journal 26 (12): 43-46

Römpf (2005): Lexikon Chemie, Version 2.9, Georg-Thieme Verlag. Stuttgart, New York

Roffael, E.; Schneider, T.; Dix, B.; Buchholz, T. (2005): Zur Hydrophobierung von

- mitteldichten Faserplatten (MDF) mit Paraffinen Teil 1: Einfluss der chemischen Zusammensetzung des Paraffins und des Emulgatortyps auf die Hydrphobierung von MDF. Holz als Roh- und Werkstoff 63: 192-203
- Roux, J.L.; Gilles, F. (1971): Hydrolyse in Spanplatten. FESYP-Bericht: 105-114
- Rubio, M.; Tortosa, J.F.; Gómez, D.; Miñana, A.; Soler, A. (1994): El fraccionamiento de los materiales vegetales mediante procesos combinados de autohidrólisis-organosolvólisis. Afinidad. 51: 95-102
- Runkel, R. (1951): Zur Kenntnis des thermoplastischen Verhaltens von Holz. 1. Mitteilung. Holz als Roh- und Werkstoff 9: 41-53
- Runkel, R.; Wilke, D. (1951): Zur Kenntnis des thermoplastischen Verhaltens von Holz. 2. Mitteilung. Holz als Roh- und Werkstoff 9: 260-270
- Ruyter, H.P. (1989): European Patent Appl. No. 89-203170.9
- Sailer, M.; Rapp, A.O.; Leithoff, H. (2000): International Research Group on Wood Preservation. Doc. No. IRG/WP 00-40162
- Sandermann, W.; Augustin, H. (1963): Chemische Untersuchungen über die thermische Zersetzung von Holz. Teil I und II. Holz als Roh- und Werkstoff 21: 256-265 und 305-315
- Sandermann, W.; Augustin, H. (1964): Chemische Untersuchungen über die thermische Zersetzung von Holz. Teil III. Holz als Roh- und Werkstoff 22: 377-385
- Scheikl, M.; Dunky, M.; Resch, H. (1996): Wettability of European soft- and hardwoods by urea-formaldehyd adhesives. In: Wood adhesives 1995. Proceedings of a symposium sponsored by USDA Forest Products Society. Herausgeber: Christiansen, A. W.; Connor, A. H. Forest Products Society. Proceedings No. 7296: 43-46
- Schmid, J.; Illner, M.; Schwarz, B.; Stetter, K.; Militz, H. (2004): Einheimisches dimensionsstabilisiertes Holz für den Fenster- und Fassadenbau. Abschlussbericht, DGfH München, 170 Seiten
- Schneider, A. (1971): Untersuchungen über den Einfluss von Wärmebehandlung im Temperaturbereich von 100 bis 200°C auf Elastizitätsmodul, Druckfestigkeit und Bruchschlagarbeit von Kiefern-Splint- und Buchenholz. Holz als Roh- und Werkstoff 29 (11): 431-440
- Schultz, T.P.; Biermann, C.J.; McGinnis, G.D. (1983): Steam explosion of mixed hardwoods chips as a biomass pre-treatment. Ind. Eng. Prod. Res. Dev. 22: 344-348
-

-
- Seborg, R.M.; Tarkow, H.; Stamm, A.J. (1953): Effect of heat upon the dimensional stabilisation of wood. *Journal of Forest Products Research Society* 3: 59-67
- Sekino, N.; Inoue, M.; Irle, M.A. (1997): Thickness swelling and internal bond strength of particles made of steam-pretreated particles. *Mokuzai Gakkaishi* 43(12):1009-1015
- Šernek, M.; Kamke, A.F.; Glasser, W.G. (2004): Comparative analysis of inactivated wood surface. *Holzforschung* 58: 22-31
- Shafizadeh, F. (1985): Pyrolytic reactions and products of biomass. In: Overend, P.P.; Milne, T.A.; Mudge, L.K. (Hrsg.): *Fundamentals of Thermochemical Biomass Conversion*. New York, Elsevier: 183-217
- Shen, Q.; Mikkola, P.; Rosenholm, J.B. (1998): Quantitative characterization of the subsurface acid-base properties of wood by XPS and Fowke theory. *Colloids and Surfaces A: Physiochemical and Engineering Aspects* 145: 235-241
- Shimizu, K.; Sudo, K.; Ono, H.; Fujii, T. (1989): Total utilisation of wood components by steam explosion treatment. In: *Wood Processing and Utilisation*. Hrsg.: Ellis Horwood Limited. Chichester: 407-412
- Sivonen, H.; Maunu, S.L.; Sundholm, F.; Jämsä, S.; Viitaniemi, P. (2002): Magnetic Resonance Studies of Thermally Modified Wood. *Holzforschung* 56: 648-654
- Stamm, A.J.; Burr, H.K.; Kline, A.A. (1946): Heat Stabilized Wood (Staybwood). *Forest Products Laboratory Madison (USA), Rep. No. R. 1621*
- Stamm, A.J.; Baechler, R.H. (1960): Durability and dimensional stability of five modified woods. *Forest Products Journal* 1: 22-26
- Stingl, R.; Patzelt, M.; Teischinger, A. (2002): Ein- und Rückblick in ausgewählte Verfahren der thermischen Modifizierung. *Modifiziertes Holz: Eigenschaften und Märkte. Lignovisionen Band 3*, BOKU Wien, 260 Seiten
- Subramanian, R.V. (1984) in: *The chemistry of solid wood*. Rowell, R.M., ed. American Chemical Society, Washington D.C., 614 Seiten
- Suchsland, O.; Enlow, R.C. (1968): Heat treatment of exterior particleboard. *Forest Products Journal* 18 (8): 24-28
- Suchsland, O.; Stevens, R.R. (1968): Gluability of southern pine veneer dried at high temperatures. *Forest Products Journal* 18 (1): 38-42
- Suchsland, O. (1972): Linear hygroscopic expansion of selected commercial particleboards. *Forest Products Journal* 22 (11): 28-32
-

- Syrjänen, T. (2001): COST E 22. Production and Classification of Heat Treated Wood in Finland. Review on Heat Treatments of Wood. Herausgeber: Rapp, A.O. Proceedings of Special Seminar in Antibes, France
- Tjeerdsma, B.F.; Boonstra, M.; Pizzi, A.; Tekely, P.; Militz, H. (1998): Characterisation of thermally modified wood: molecular reasons for wood performance improvement. Holz als Roh- und Werkstoff 56: 149-153
- Tjeerdsma, B.F.; Stevens, M.; Militz, H.; Acker v.; J. (2002): Effect of process conditions on moisture content and decay resistance of hydro-thermally treated wood. Holzforschung und –verwertung 5: 94-99
- Tjeerdsma, B.F.; Militz, H. (2005): Chemical Changes in Hydrothermal Treated Wood: FTIR Analysis of Combined Hydrothermal and Dry Heat-Treated Wood. Holz als Roh- und Werkstoff 63: 102-111
- Tomek, A. (1966): Die Heißvergütung von Holzspänen, ein neues Verfahren zum Hydrophobieren von Spanplatten. Holztechnologie 7 (3): 157-160
- Tomimura, Y.; Matsuda, T. (1986): Particleboard made of steamed flakes. Mokuzai Gakkaishi 32(3): 170-175
- Tortosa, J.F.; Rubio, M.; Demetrio, G. (1995): Autohidrólisis de tallo de maíz en suspensión acuosa. Afinidad. 52: 181-188
- Vernois, M. (2001): Heat Treatment of Wood in France- State of the Art. Review on Heat Treatments of Wood. Herausgeber: Rapp, A.O. Proceedings of Special Seminar in Antibes, France
- Wagenführ, R. (1989): Holzatlas. 3. Auflage. Fachbuchverlag Leipzig.
- Wang, J.Y.; Cooper, P.A. (2005): Effect of oil type, temperature and time on moisture properties of hot oil-treated wood. Holz als Roh- und Werkstoff 63: 417-422
- Weiland, J.J.; Guyonnet, R. (2003): Study of Chemical Modifications and Fungi Degradation of Thermally Modified Wood Using DRIFT-Spectroscopy. Holz als Roh- und Werkstoff 61: 216-220
- Wikberg, H.; Maunu, S.L. (2004): Characterisation of thermally modified hard- and softwoods by ¹³C CPMAS NMR. Carbohydrate Polymers 58: 461-466
- Williams, P.T.; Besler, S. (1994): Thermogravimetric analysis of the components of biomass. In: Bridgwater, A.V. (Hrsg.): Advances in Thermochemical Biomass Conversion, Vol. 2, Pyrolysis. 1. Auflage. Blackie Academic & Professional: 771-783
-

10 Anhang

Tabelle 24: Programm der künstlichen Bewitterung (BAM-Zyklus)

Tag	Dauer In Stunden	Temperatur			Regen	UV-Strahlung
		- 15°C	20°C	55°C		
1	8		*		*	
	6	*				
	10		*			*
2	8		*		*	
	16		*			*
3	6	*				
	18		*			*
4	8		*		*	
	6	*				
	10		*			*
5	8		*		*	
	16		*			*
6	8		*		*	
	16		*			*
7	8		*		*	
	16		*			*
8	8		*		*	
	16		*			*
9	8		*		*	
	16		*			*
10	6		*		*	
	18			*		*
11	6		*		*	
	18			*		*
12	6		*		*	
	18			*		*
13	6		*		*	
	18			*		*
14	6		*		*	
	18			*		*
Gesamt	336 h	18 h	228 h	90 h	94 h	224 h

Legende: * Bewitterung ist aktiv

Tabelle 25: Programm des Zyklustests nach Industrievorgabe

	Temperatur in °C	Dauer in Stunden	
Warmwasserlagerung	70	5	1 Tag
Einfrieren	-18	19	
Warmwasserlagerung	70	5	3 Tage
Klimalagerung in Folie	60	67	
Trocknen	60	72	

11 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Gleichgewichtsfeuchte bei 20°C und 65% r. Lf. von OSB-Strands aus Kiefer, die bei 140°C bis 180°C in Luftatmosphäre vorbehandelt wurden, sowie daraus gefertigter Platten.....	34
Abbildung 2: Dickenquellung und Wasseraufnahme nach 24 Stunden Wasserlagerung von OSB aus Kiefer, deren Strands bei 140°C bis 180°C in Luftatmosphäre vorbehandelt wurden.....	36
Abbildung 3: Querzugfestigkeit vor (EN 319) und nach Kochtest (EN 1087-1) PMDI-gebundener Kiefer-OSB, deren Strands bei 140°C bis 180°C thermisch modifiziert wurden.....	37
Abbildung 4: Biegefestigkeit PMDI-gebundener Kiefer-OSB, deren Strands bei 140°C bis 180°C thermisch modifiziert wurden.....	39
Abbildung 5: Biege-E-Modul PMDI-gebundener Kiefer-OSB, deren Strands bei 140°C bis 180°C thermisch modifiziert wurden.....	39
Abbildung 6: Dauerhaftigkeit gegen Pilzabbau PMDI-gebundener Kiefer-OSB, deren Strands bei 160°C und 180°C thermisch modifiziert wurden.	41
Abbildung 7: Mittels Teflonband gebündelte OSB-Strands aus Kiefer zur Prüfung der Dauerhaftigkeit nach EN 350.	45
Abbildung 8: Masseabnahme von Kiefern-Strands durch thermische Modifizierung bei Temperaturen von 180°C bis 240°C in Abhängigkeit der Behandlungsdauer.	49
Abbildung 9: Gleichgewichtsfeuchte bei 20°C und 65% r. Lf. von Kiefer-Strands in Abhängigkeit der Masseabnahme infolge thermischer Modifizierung gemäß Abbildung 8.	51
Abbildung 10: Masseverlust von Kiefern-Strands durch Pilzabbau (<i>Poria placenta</i>) in Abhängigkeit der Masseabnahme durch thermische Modifizierung gemäß Abbildung 8.....	52
Abbildung 11: Masseverlust von Kiefern-Strands durch Pilzabbau (<i>Poria placenta</i>) in Abhängigkeit der Gleichgewichtsfeuchte bei 20°C / 65% gemäß Abbildung 9.....	54
Abbildung 12: Masseabnahme von Pappel-Strands durch thermische Modifizierung bei 200°C bis 240°C in Abhängigkeit der Behandlungsdauer.....	55
Abbildung 13: Gleichgewichtsfeuchte bei 20°C / 65% von Pappel-Strands in	

Abhängigkeit der Masseabnahme durch thermische Modifizierung gemäß Abbildung 12.....	56
Abbildung 14: Titrationskurven zur Bestimmung der Pufferkapazität von Strands aus Kiefer und Fichtespänen nach Vorbehandlung bei 220°C bzw. 240°C im Vergleich zur unbehandelten Referenz.	61
Abbildung 15: Gleichgewichtsfeuchte bei 20°C und 65% r. Lf.. von OSB aus Kiefer. Die bei 220°C und 240°C vorbehandelten Strands sowie unbehandelte Referenzstrands wurden mit MUPF, PF und PMDI zu Platten verpresst.	68
Abbildung 16: Dickenquellung (DQ) nach 2, 24 und 168 Stunden Wasserlagerung von OSB aus Kiefer. Die bei 220°C und 240°C vorbehandelten Strands sowie unbehandelte Referenzstrands wurden mit MUPF, PF und PMDI zu Platten verpresst.	69
Abbildung 17: Wasseraufnahme (WA) nach 2, 24 und 168 Stunden Wasserlagerung von OSB aus Kiefer. Die bei 220°C und 240°C vorbehandelten Strands sowie unbehandelte Referenzstrands wurden mit MUPF, PF und PMDI zu Platten verpresst.	70
Abbildung 18: Irreversible Dickenquellung (IDQ) nach 168 Stunden Wasserlagerung von OSB aus Kiefer. Die bei 220°C und 240°C vorbehandelten Strands sowie unbehandelte Referenzstrands wurden mit MUPF, PF und PMDI zu Platten verpresst.	73
Abbildung 19: Gleichgewichtsfeuchte bei 20°C und 65% r. Lf. von Spanplatten aus Fichte. Die bei 220°C vorbehandelten Späne sowie unbehandelte Referenzspäne wurden mit MUPF und PMDI zu Platten verpresst.	74
Abbildung 20: Dickenquellung (DQ) nach 2, 24 und 168 Stunden Wasserlagerung von Spanplatten aus Fichte. Die bei 220°C vorbehandelten Späne sowie unbehandelte Referenzspäne wurden mit MUPF und PMDI zu Platten verpresst.	74
Abbildung 21: Wasseraufnahme (WA) nach 2, 24 und 168 Stunden Wasserlagerung von Spanplatten aus Fichte. Die bei 220°C vorbehandelten Späne sowie unbehandelte Referenzspäne wurden mit MUPF und PMDI zu Platten verpresst.	75
Abbildung 22: Irreversible Dickenquellung (IDQ) nach 168 Stunden Wasserlagerung von Spanplatten aus Fichte. Die bei 220°C vorbehandelten Späne sowie unbehandelte Referenzspäne wurden mit MUPF und PMDI zu Platten verpresst.	77

Abbildung 23: Gleichgewichtsfeuchte bei 20°C und 65% r. Lf. von OSB aus Pappel. Die bei 220°C vorbehandelten Strands sowie unbehandelte Strands wurden mit PMDI zu Platten verpresst.	78
Abbildung 24: Dickenquellung (DQ) nach 2, 24 und 168 Stunden Wasserlagerung von OSB aus Pappel. Die bei 220°C vorbehandelten Strands sowie unbehandelte Referenzstrands wurden mit PMDI zu Platten verpresst.	79
Abbildung 25: Wasseraufnahme (WA) nach 2, 24 und 168 Stunden Wasserlagerung von OSB aus Pappel. Die bei 220°C vorbehandelten Strands sowie unbehandelte Referenzstrands wurden mit PMDI zu Platten verpresst.	79
Abbildung 26: Irreversible Dickenquellung (IDQ) nach 168 Stunden Wasserlagerung von OSB aus Pappel. Die bei 220°C vorbehandelten Strands sowie unbehandelte Referenzstrands wurden mit PMDI zu Platten verpresst.	81
Abbildung 27: Querkzugfestigkeit (QZ) trocken (EN 319) und nach Kochtest (EN 1087-1) von OSB aus Kiefer. Die bei 220°C und 240°C vorbehandelten Strands sowie unbehandelte Referenzstrands wurden mit MUPF, PF und PMDI zu Platten verpresst.	89
Abbildung 28: Querkzugfestigkeit (QZ) trocken (EN 319) und nach Kochtest (EN 1087-1) von Spanplatten aus Fichte. Die bei 220°C vorbehandelten Späne sowie unbehandelte Referenzspäne wurden mit MUPF und PMDI zu Platten verpresst.	90
Abbildung 29: Querkzugfestigkeit (QZ) trocken (EN 319) und nach Kochtest (EN 1087-1) von OSB aus Pappel. Die bei 220°C vorbehandelten Strands sowie unbehandelte Referenzstrands wurden mit PMDI zu Platten verpresst.	90
Abbildung 30: Querkzugfestigkeit trocken (EN 319) sowie nach Kochtest (EN 1087-1) von Kieferspanplatten aus modifizierten Spänen im Vergleich zur unbehandelten Referenz. Die Platten aus vorbehandelten Spänen wurden 1 bzw. 168 Stunden nach der Vorbehandlung mit PF zu Platten verpresst.	96
Abbildung 31: Biege-Elastizitätsmodul von OSB aus Kiefer. Die bei 220°C und 240°C vorbehandelten Strands sowie unbehandelte Referenzstrands wurden mit MUPF, PF und PMDI zu Platten verpresst.	98
Abbildung 32: Biegefestigkeit von OSB aus Kiefer. Die bei 220°C und 240°C vorbehandelten Strands sowie unbehandelte Referenzstrands wurden mit MUPF, PF und PMDI zu Platten verpresst.	99

Abbildung 33: Biege-Elastizitätsmodul von Spanplatten aus Fichte. Die bei 220°C vorbehandelten Späne sowie unbehandelte Referenzspäne wurden mit MUPF und PMDI zu Platten verpresst.....	100
Abbildung 34: Biegefestigkeit von Spanplatten aus Fichte. Die bei 220°C vorbehandelten Späne sowie unbehandelte Referenzspäne wurden mit MUPF und PMDI zu Platten verpresst.	100
Abbildung 35: Biege-Elastizitätsmodul von OSB aus Pappel. Die bei 220°C vorbehandelten Strands sowie unbehandelte Referenzstrands wurden mit PMDI zu Platten verpresst.....	101
Abbildung 36: Biegefestigkeit von OSB aus Pappel. Die bei 220°C vorbehandelten Strands sowie unbehandelte Referenzstrands wurden mit PMDI zu Platten verpresst.....	101
Abbildung 37: Biege-E-Modul MUPF- und PMDI-gebundener Fichtespanplatten aus unbehandelten und thermisch modifizierten Spänen, die zusätzlich mit Deckfurnieren aus Kiefer beschichtet wurden.	105
Abbildung 38: Biegefestigkeit MUPF- und PMDI-gebundener Fichtespanplatten aus unbehandelten und thermisch modifizierten Spänen, die zusätzlich mit Deckfurnieren aus Kiefer beschichtet wurden.	106
Abbildung 39: Biege-E-Modul PMDI-gebundener Fichtespanplatten aus unbehandelten und thermisch modifizierten Spänen sowie aus einem Verbund beider Spantypen...	107
Abbildung 40: Biegefestigkeit PMDI-gebundener Fichtespanplatten aus unbehandelten und thermisch modifizierten Spänen sowie aus einem Verbund beider Spantypen...	107
Abbildung 41: Querkzugfestigkeit PMDI-gebundener Fichtespanplatten aus unbehandelten und thermisch modifizierten Spänen sowie aus einem Verbund beider Spantypen...	108
Abbildung 42: Feuchteaufnahme bei 20°C und 65% r. Lf. PMDI-gebundener Fichtespanplatten aus unbehandelten und thermisch modifizierten Spänen sowie einem Verbund aus beiden Spantypen.	109
Abbildung 43: Dickenquellung nach zwei, 24 und 168 Stunden Wasserlagerung PMDI-gebundener Fichtespanplatten aus unbehandelten und thermisch modifizierten Spänen sowie einem Verbund aus beiden Spantypen.	109
Abbildung 44: Irreversible Dickenquellung nach BAM-Zyklus von OSB aus Kiefer. Die bei 220°C und 240°C vorbehandelten Strands sowie unbehandelte Referenzstrands	

wurden mit MUPF, PF und PMDI zu Platten verpresst.....	111
Abbildung 45: Querkzugfestigkeit nach BAM-Zyklus von OSB aus Kiefer. Die bei 220°C und 240°C vorbehandelten Strands sowie unbehandelte Referenzstrands wurden mit MUPF, PF und PMDI zu Platten verpresst.	111
Abbildung 46: Irreversible Dickenquellung nach Zyklustest (2) von OSB aus Kiefer. Die bei 220°C und 240°C vorbehandelten Strands sowie unbehandelte Referenzstrands wurden mit MUPF, PF und PMDI zu Platten verpresst.....	113
Abbildung 47: Querkzugfestigkeit nach Zyklustest (2) von OSB aus Kiefer. Die bei 220°C und 240°C vorbehandelten Strands sowie unbehandelte Referenzstrands wurden mit MUPF, PF und PMDI zu Platten verpresst.	114
Abbildung 48: Irreversible Dickenquellung nach BAM-Zyklus von Spanplatten aus Fichte. Die bei 220°C vorbehandelten Späne sowie unbehandelte Referenzspäne wurden mit MUPF und PMDI zu Platten verpresst.....	115
Abbildung 49: Querkzugfestigkeit nach BAM-Zyklus von Spanplatten aus Fichte. Die bei 220°C vorbehandelten Späne sowie unbehandelte Referenzspäne wurden mit MUPF und PMDI zu Platten verpresst.....	115
Abbildung 50: Irreversible Dickenquellung nach Zyklustest (2) von Spanplatten aus Fichte. Die bei 220°C vorbehandelten Späne sowie unbehandelte Referenzspäne wurden mit MUPF und PMDI zu Platten verpresst.	116
Abbildung 51: Querkzugfestigkeit nach Zyklustest (2) von Spanplatten aus Fichte. Die bei 220°C vorbehandelten Späne sowie unbehandelte Referenzspäne wurden mit MUPF und PMDI zu Platten verpresst.....	117
Abbildung 52: Irreversible Dickenquellung nach BAM-Zyklus von OSB aus Pappel. Die bei 220°C vorbehandelten Strands sowie unbehandelte Referenzstrands wurden mit PMDI zu Platten verpresst.	118
Abbildung 53: Querkzugfestigkeit nach BAM-Zyklus von OSB aus Pappel. Die bei 220°C vorbehandelten Strands sowie unbehandelte Referenzstrands wurden mit PMDI zu Platten verpresst.	118
Abbildung 54: Irreversible Dickenquellung nach Zyklustest (2) von OSB aus Pappel. Die bei 220°C vorbehandelten Strands sowie unbehandelte Referenzstrands wurden mit PMDI zu Platten verpresst.....	119
Abbildung 55: Querkzugfestigkeit nach Zyklustest (2) von OSB aus Pappel. Die bei 220°C	

vorbehandelten Strands sowie unbehandelte Referenzstrands wurden mit PMDI zu Platten verpresst.....	120
Abbildung 56: Masseverlust durch <i>Coniophora puteana</i> , <i>Pleurotus ostreatus</i> und <i>Poria placenta</i> nach 16wöchiger Inkubationszeit von OSB aus Kiefer. Die bei 220°C und 240°C vorbehandelten Strands sowie unbehandelte Referenzstrands wurden mit MUPF, PF und PMDI zu Platten verpresst.....	124
Abbildung 57: Masseverlust durch <i>Coniophora puteana</i> , <i>Pleurotus ostreatus</i> und <i>Poria placenta</i> nach 16wöchiger Inkubationszeit von Spanplatten aus Fichte. Die bei 220°C vorbehandelten Späne sowie unbehandelte Referenzspäne wurden mit MUPF und PMDI zu Platten verpresst.	125
Abbildung 58: Masseverlust durch <i>Coniophora puteana</i> , <i>Pleurotus ostreatus</i> und <i>Poria placenta</i> nach 16wöchiger Inkubationszeit von OSB aus Pappel. Die bei 220°C vorbehandelten Strands sowie unbehandelte Referenzstrands wurden mit PMDI zu Platten verpresst.....	125
Abbildung 59: Gleichgewichtsfeuchte bei 20°C und 65% r. Lf. MUPF-gebundener OSB infolge Nachbehandlung im Stapel im Vergleich zur Referenz.....	135
Abbildung 60: Gleichgewichtsfeuchte bei 20°C und 65% r. Lf. PMDI-gebundener OSB infolge Nachbehandlung im Stapel im Vergleich zur Referenz.....	136
Abbildung 61: Dickenquellung nach 24 und 72 Stunden Wasserlagerung von MUPF-gebundenen Platten, die für 24 Stunden bei 160°C nachbehandelt wurden; die Feuchte der Platten war auf 4% bzw. 6% eingestellt.....	138
Abbildung 62: Dickenquellung nach 24 und 72 Stunden Wasserlagerung von MUPF-gebundenen Platten, die für 24 Stunden bei 180°C nachbehandelt wurden; die Feuchte der Platten war auf 4% bzw. 6% eingestellt.....	138
Abbildung 63: Dickenquellung nach 24 und 72 Stunden Wasserlagerung von MUPF-gebundenen Platten, die für 72 Stunden bei 160°C nachbehandelt wurden; die Feuchte der Platten war auf 4% bzw. 6% eingestellt.....	139
Abbildung 64: Dickenquellung nach 24 und 72 Stunden Wasserlagerung von MUPF-gebundenen Platten, die für 72 Stunden bei 180°C nachbehandelt wurden; die Feuchte der Platten war auf 4% bzw. 6% eingestellt.....	139
Abbildung 65: Dickenquellung nach 24 und 72 Stunden Wasserlagerung von PMDI-gebundenen Platten, die für 24 Stunden bei 160°C nachbehandelt wurden; die	

Feuchte der Platten war auf 4% bzw. 6% eingestellt.	141
Abbildung 66: Dickenquellung nach 24 und 72 Stunden Wasserlagerung von PMDI-gebundenen Platten, die für 24 Stunden bei 180°C nachbehandelt wurden; die Feuchte der Platten war auf 4% bzw. 6% eingestellt.	141
Abbildung 67: Dickenquellung nach 24 und 72 Stunden Wasserlagerung von PMDI-gebundenen Platten, die für 72 Stunden bei 160°C nachbehandelt wurden; die Feuchte der Platten war auf 4% bzw. 6% eingestellt.	142
Abbildung 68: Dickenquellung nach 24 und 72 Stunden Wasserlagerung von PMDI-gebundenen Platten, die für 72 Stunden bei 180°C nachbehandelt wurden; die Feuchte der Platten war auf 4% bzw. 6% eingestellt.	142
Abbildung 69: Querkzugfestigkeit trocken (EN 319) sowie nach Kochtest (EN 1087-1) von MUPF-gebundenen Platten, die bei 160°C für 24 bzw. 72 Stunden im Stapel nachbehandelt wurden; die Feuchte der Platten war auf 4% bzw. 6% eingestellt....	144
Abbildung 70: Querkzugfestigkeit trocken (EN 319) sowie nach Kochtest (EN 1087-1) von MUPF-gebundenen Platten, die bei 180°C für 24 bzw. 72 Stunden im Stapel nachbehandelt wurden; die Feuchte der Platten war auf 4% bzw. 6% eingestellt....	145
Abbildung 71: Querkzugfestigkeit trocken (EN 319) sowie nach Kochtest (EN 1087-1) von PMDI-gebundenen Platten, die bei 160°C für 24 bzw. 72 Stunden im Stapel nachbehandelt wurden; die Feuchte der Platten war auf 4% bzw. 6% eingestellt....	146
Abbildung 72: Querkzugfestigkeit trocken (EN 319) sowie nach Kochtest (EN 1087-1) von PMDI-gebundenen Platten, die bei 180°C für 24 bzw. 72 Stunden im Stapel nachbehandelt wurden; die Feuchte der Platten war auf 4% bzw. 6% eingestellt....	146
Abbildung 73: Biege-E-Modul von MUPF-gebundenen Platten, die bei 160°C für 24 bzw. 72 Stunden im Stapel nachbehandelt wurden; die Feuchte der Platten war auf 4% bzw. 6% eingestellt.	149
Abbildung 74: Biege-E-Modul von MUPF-gebundenen Platten, die bei 180°C für 24 bzw. 72 Stunden im Stapel nachbehandelt wurden; die Feuchte der Platten war auf 4% bzw. 6% eingestellt.	149
Abbildung 75: Biegefestigkeit von MUPF-gebundenen Platten, die bei 160°C für 24 bzw. 72 Stunden im Stapel nachbehandelt wurden; die Feuchte der Platten war auf 4% bzw. 6% eingestellt.	150
Abbildung 76: Biegefestigkeit von MUPF-gebundenen Platten, die bei 180°C für 24 bzw.	

72 Stunden im Stapel nachbehandelt wurden; die Feuchte der Platten war auf 4% bzw. 6% eingestellt.....	150
Abbildung 77: Biege-E-Modul von PMDI-gebundenen Platten, die bei 160°C für 24 bzw. 72 Stunden im Stapel nachbehandelt wurden; die Feuchte der Platten war auf 4% bzw. 6% eingestellt.....	151
Abbildung 78: Biege-E-Modul von PMDI-gebundenen Platten, die bei 180°C für 24 bzw. 72 Stunden im Stapel nachbehandelt wurden; die Feuchte der Platten war auf 4% bzw. 6% eingestellt.....	151
Abbildung 79: Biegefestigkeit von PMDI-gebundenen Platten, die bei 160°C für 24 bzw. 72 Stunden im Stapel nachbehandelt wurden; die Feuchte der Platten war auf 4% bzw. 6% eingestellt.....	152
Abbildung 80: Biegefestigkeit von PMDI-gebundenen Platten, die bei 180°C für 24 bzw. 72 Stunden im Stapel nachbehandelt wurden; die Feuchte der Platten war auf 4% bzw. 6% eingestellt.....	152
Abbildung 81: Irreversible Dickenquellung nach künstlicher Bewitterung und Klimatisierung bei 20°C und 65% r. Lf. von MUPF-gebundenen Platten, die bei 160°C bzw. 180°C für 24 Stunden im Stapel nachbehandelt wurden; die Feuchte der Platten war auf 4% bzw. 6% eingestellt.	155
Abbildung 82: Querkzugfestigkeit nach künstlicher Bewitterung von MUPF-gebundenen Platten, die bei 160°C bzw. 180°C für 24 Stunden im Stapel nachbehandelt wurden; die Feuchte der Platten war auf 4% bzw. 6% eingestellt.	156
Abbildung 83: Irreversible Dickenquellung nach künstlicher Bewitterung und Klimatisierung bei 20°C und 65% r. Lf. von PMDI-gebundenen Platten, die bei 160°C für 24 bzw. 72 Stunden im Stapel nachbehandelt wurden; die Feuchte der Platten war auf 4% bzw. 6% eingestellt.....	157
Abbildung 84: Irreversible Dickenquellung nach künstlicher Bewitterung und Klimatisierung bei 20°C und 65% r. Lf. von PMDI-gebundenen Platten, die bei 180°C für 24 bzw. 72 Stunden im Stapel nachbehandelt wurden; die Feuchte der Platten war auf 4% bzw. 6% eingestellt.....	157
Abbildung 85: Querkzugfestigkeit nach künstlicher Bewitterung von PMDI-gebundenen Platten, die bei 160°C für 24 bzw. 72 Stunden im Stapel nachbehandelt wurden; die Feuchte der Platten war auf 4% bzw. 6% eingestellt.	159

Abbildung 86: Querzugfestigkeit nach künstlicher Bewitterung von PMDI-gebundenen Platten, die bei 180°C für 24 bzw. 72 Stunden im Stapel nachbehandelt wurden; die Feuchte der Platten war auf 4% bzw. 6% eingestellt.....	159
Abbildung 87: Masseverlust durch <i>Coniophora puteana</i> (Cp), <i>Pleurotus ostreatus</i> (Po) und <i>Poria placenta</i> (Pp) nach 16wöchiger Inkubationszeit von MUPF-gebundenen OSB aus Kiefer. Die Platten einer Feuchte von 4% bzw. 6% wurden durch Nachbehandlung im Stapel bei 160°C bzw. 180°C für 24 und 72 Stunden modifiziert.....	161
Abbildung 88: Masseverlust durch <i>Coniophora puteana</i> (Cp), <i>Pleurotus ostreatus</i> (Po) und <i>Poria placenta</i> (Pp) nach 16wöchiger Inkubationszeit von PMDI-gebundenen OSB aus Kiefer. Die Platten einer Feuchte von 4% bzw. 6% wurden durch Nachbehandlung im Stapel bei 160°C bzw. 180°C für 24 und 72 Stunden modifiziert.....	163
Abbildung 89: Gleichgewichtsfeuchte bei 20°C und 65% r. Lf. von OSB, die bei 120°C, 140°C bzw. 160°C für 24 bzw. 48 Stunden im Stapel nachbehandelt wurden im Vergleich zur Referenz. Die Presszeit hing von der angestrebten Stapeltemperatur ab (Stapeldauer 0 h).....	167
Abbildung 90: Dickenquellung nach 24 Stunden Wasserlagerung von OSB, die bei 120°C, 140°C bzw. 160°C für 24 bzw. 48 Stunden im Stapel nachbehandelt wurden im Vergleich zur Referenz. Die Presszeit hing von der angestrebten Stapeltemperatur ab (Stapeldauer 0 h).....	168
Abbildung 91: Querzugfestigkeit nach EN 319 von OSB, die bei 120°C, 140°C bzw. 160°C für 24 bzw. 48 Stunden im Stapel nachbehandelt wurden im Vergleich zur Referenz.....	169
Abbildung 92: Querzugfestigkeit nach Kochtest (EN 1087-1) von OSB, die bei 120°C, 140°C bzw. 160°C für 24 bzw. 48 Stunden im Stapel nachbehandelt wurden im Vergleich zur Referenz. Die Presszeit hing von der angestrebten Stapeltemperatur ab (Stapeldauer 0 h).....	171
Abbildung 93: Biege-E-Modul von OSB, die bei 120°C, 140°C bzw. 160°C für 24 bzw. 48 Stunden im Stapel nachbehandelt wurden im Vergleich zur Referenz. Die Presszeit hing von der angestrebten Stapeltemperatur ab (Stapeldauer 0 h).....	172
Abbildung 94: Biegefestigkeit von OSB, die bei 120°C, 140°C bzw. 160°C für 24 bzw. 48 Stunden im Stapel nachbehandelt wurden im Vergleich zur Referenz. Die	

Presszeit hing von der angestrebten Stapeltemperatur ab (Stapeldauer 0 h).	173
Abbildung 95: Gleichgewichtsfeuchte bei 20°C und 65% r. Lf. PMDI-gebundener OSB aus Kiefer, hergestellt nach verschiedenen Verfahren zur thermischen Modifizierung.	176
Abbildung 96: Dickenquellung nach 24 Stunden Wasserlagerung PMDI-gebundener OSB aus Kiefer, hergestellt nach verschiedenen Verfahren zur thermischen Modifizierung.	177
Abbildung 97: Querkzugfestigkeit nach EN 319 und EN 1087-1 PMDI-gebundener OSB aus Kiefer, hergestellt nach verschiedenen Verfahren zur thermischen Modifizierung.	177
Abbildung 98: Dickenquellung nach 24 Stunden Wasserlagerung MUPF- und PMDI- gebundener OSB aus Kiefer, hergestellt nach verschiedenen Verfahren zur thermischen Modifizierung.	178
Abbildung 99: Querkzugfestigkeit nach EN 319 und EN 1087-1 MUPF- und PMDI- gebundener OSB aus Kiefer, hergestellt nach verschiedenen Verfahren zur thermischen Modifizierung.	179

12 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: DSI-Werte und in Anlehnung an EN 350 entsprechende Dauerhaftigkeitsklasse PMDI-gebundener Kiefer-OSB, deren Strands bei 160°C und 180°C thermisch modifiziert wurden.....	41
Tabelle 2: Relative Änderung der Eigenschaften in Prozent gegenüber der jeweiligen Referenz; Angabe der Dauerhaftigkeit (DH) gegen Pilzbefall in Anlehnung an EN 350-1	42
Tabelle 3: Einteilung in Dauerhaftigkeitsklassen nach EN 350 (1994)	45
Tabelle 4: Relativwerte der Zuckerbestimmung nach zweistufiger Hydrolyse mittels HPLC für thermisch modifizierte Proben und unbehandelte Referenzen (Ref.), Angaben in Prozent.....	58
Tabelle 5: pH-Werte thermisch modifizierter Proben sowie unbehandelter Referenzen.....	60
Tabelle 6: Ergebnisse der Kontaktwinkelmessung thermisch modifizierter Proben und unbehandelter Referenzen (Ref.)	63
Tabelle 7: Mittels ESCA bestimmte Elementzusammensetzung der Oberfläche thermisch modifizierter Proben und unbehandelter Referenzen (Ref.), Angaben der absoluten Anteile in Prozent	64
Tabelle 8: Verhältnis der Dickenquellung (DQ) nach 2 zu 24 und 24 zu 168 Stunden Wasserlagerung von OSB aus Kiefer - die bei 220°C und 240°C vorbehandelten Strands sowie unbehandelte Referenzstrands wurden mit MUPF, PF und PMDI verpresst	71
Tabelle 9: Verhältnis der Wasseraufnahme (WA) nach 2 zu 24 und 24 zu 168 Stunden Wasserlagerung von OSB aus Kiefer - die bei 220°C und 240°C vorbehandelten Strands sowie unbehandelte Referenzstrands wurden mit MUPF, PF und PMDI zu Platten verpresst	72
Tabelle 10: Verhältnis der Dickenquellung (DQ) nach 2 zu 24 und 24 zu 168 Stunden Wasserlagerung von Spanplatten aus Fichte; die bei 220°C vorbehandelten Späne sowie unbehandelte Referenzspäne wurden mit MUPF und PMDI verpresst	76
Tabelle 11: Verhältnis der Wasseraufnahme (WA) nach 2 zu 24 und 24 zu 168 Stunden Wasserlagerung von Spanplatten aus Fichte; die bei 220°C vorbehandelten Späne sowie unbehandelte Referenzspäne wurden mit MUPF und PMDI zu Platten verpresst	76

Tabelle 12: Verhältnis der Dickenquellung (DQ) nach 2 zu 24 und 24 zu 168 Stunden Wasserlagerung von OSB aus Pappel - die bei 220°C vorbehandelten Strands sowie unbehandelte Referenzstrands wurden mit PMDI zu Platten verpresst	80
Tabelle 13: Verhältnis der Wasseraufnahme (WA) nach 2 zu 24 und 24 zu 168 Stunden Wasserlagerung von OSB aus Pappel - die bei 220°C vorbehandelten Strands sowie unbehandelte Referenzstrands wurden mit PMDI zu Platten verpresst	80
Tabelle 14: Dauerhaftigkeit nach ENV 12038, angegeben als DSI (Decay Susceptibility Index) von Platten aus unbehandeltem (Ref.) und durch Vorbehandlung bei 220°C bzw. 240°C modifiziertem Spanmaterial	126
Tabelle 15: Relative Veränderung der Eigenschaften im Vergleich zur Referenz, Angaben in Prozent; Dauerhaftigkeit (DH) in Anlehnung an EN 350 in Dauerhaftigkeitsklasse angegeben	130
Tabelle 16: Dauerhaftigkeit nach ENV 12038, angegeben als DSI (Decay Susceptibility Index), MUPF-gebundener OSB, die durch Nachbehandlung im Stapel bei 160°C bzw. 180°C für 24 bzw. 72 Stunden modifiziert wurden und deren Plattenfeuchte auf 4% bzw. 6% eingestellt wurde, im Vergleich zur unbehandelten Referenz.....	162
Tabelle 17: Dauerhaftigkeit nach ENV 12038, angegeben als DSI (Decay Susceptibility Index), PMDI-gebundener OSB, die durch Nachbehandlung im Stapel bei 160°C bzw. 180°C für 24 bzw. 72 Stunden modifiziert wurden und deren Plattenfeuchte auf 4% bzw. 6% eingestellt wurde, im Vergleich zur unbehandelten Referenz.....	163
Tabelle 18: Relative Veränderung der Eigenschaften im Vergleich zur Referenz, Angaben in Prozent; Dauerhaftigkeit (DH) in Anlehnung an EN 350 in Dauerhaftigkeitsklasse angegeben	165
Tabelle 19: Verhältnis der Querkzugfestigkeit nach Kochtest (EN 1087-1) zur trocken bestimmten Querkzugfestigkeit (EN 319) gemäß Abbildung 91 und Abbildung 92.....	171
Tabelle 20: Relative Veränderung der Eigenschaften im Vergleich zur Referenz, Angaben in Prozent.....	174
Tabelle 21: Relative Eigenschaftsänderung PMDI-gebundener OSB aus Kiefer aus verschiedenen Verfahren zur thermischen Modifizierung	180
Tabelle 22: Relative Eigenschaftsänderung PMDI- und MUPF-gebundener OSB aus Kiefer aus verschiedenen Verfahren zur thermischen Modifizierung	183
Tabelle 23: Relative Eigenschaftsänderung verschiedener PMDI-gebundener	

Plattenwerkstoffe aus Kiefer, Fichte und Pappel, die für 30 Minuten bei 220°C in sauerstoffreduzierter Atmosphäre vorbehandelt wurden.....	183
Tabelle 24: Programm der künstlichen Bewitterung (BAM-Zyklus).....	200
Tabelle 25: Programm des Zyklustests nach Industrievorgabe	201