

**Bundesforschungsanstalt für Forst- und Holzwirtschaft  
Hamburg**

Leuschnerstraße 91, 21031 Hamburg

**Arbeitsbericht**

aus dem

**Institut für Holzphysik und mechanische Technologie des Holzes**

**Nr. 2002/02**

**November 2002**

**EINFLUSS DER STAPPELLAGERUNG  
AUF DIE EIGENSCHAFTEN  
VON HOLZWERKSTOFFPLATTEN  
UNTER BERÜCKSICHTIGUNG VERSCHIEDENER  
LEIMSYSTEME UND PROZESSPARAMETER**

von

M. Ohlmeyer und K. Kruse

**Bundesforschungsanstalt  
für Forst- und Holzwirtschaft**

und die

Ordinariate für Holzbiologie,  
Holztechnologie und Weltforstwirtschaft der

**UNIVERSITÄT HAMBURG**



E-Mail: [ohlmeyer@holz.uni-hamburg.de](mailto:ohlmeyer@holz.uni-hamburg.de)  
Tel: 040 / 739 62-601  
Fax: 040 / 739 62-480





---

Dieses Forschungsvorhaben (Fördernummer: AiF 12185N) wurde gefördert durch die AiF (Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen) aus Mitteln des BMWi (Bundesministerium für Wirtschaft) über die DGfH (Deutsche Gesellschaft für Holzforschung).



<b>1 Zusammenfassung</b> .....	<b>1</b>
<b>2 Einleitung</b> .....	<b>3</b>
<b>3 Kenntnisstand</b> .....	<b>4</b>
3.1 Veränderungsvorgänge von Spanplatten nach dem Heißpressen.....	4
3.1.1 Temperatur .....	4
3.1.2 Feuchte.....	9
3.1.3 Chemische Veränderungen.....	11
3.1.4 Elastomechanische Eigenschaften.....	14
3.2 Zusammenfassende Bewertung der Literaturstudie.....	23
3.3 Problemstellung .....	24
<b>4 Forschungsziel, Ergebnisse und Lösungsweg</b> .....	<b>25</b>
4.1 Forschungsziel.....	25
4.2 Angestrebte Forschungsergebnisse .....	25
4.3 Lösungsweg.....	25
<b>5 Voruntersuchungen</b> .....	<b>26</b>
5.1 Ermittlung der Randbedingungen.....	26
5.1.1 Material .....	26
5.1.2 Methoden.....	27
5.1.3 Temperatur im Plattenstapel .....	27
5.1.4 Feuchteverteilung im Plattenstapel.....	28
5.2 Stapelsimulation unter Laborbedingungen .....	29
<b>6 Hauptversuche im Labor</b> .....	<b>33</b>
6.1 Material .....	33
6.1.1 Spanmaterial.....	33
6.1.2 Klebharze.....	34
6.2 Methoden.....	38
6.2.1 Herstellung der Spanplatten .....	38
6.2.2 Lagerung.....	39
6.2.3 Probennahme .....	40
6.2.4 Prüfmethoden .....	41
6.2.5 Anpassungen für MUF-, MUPF- und PF-Platten.....	42
6.3 Ergebnisse .....	44
6.3.1 Temperatur und Plattenfeuchte .....	44
6.3.2 UF-Platten.....	46
6.3.3 MUF- und MUPF-Harze .....	61
6.3.4 PF-Harze.....	68
6.4 Zusammenfassung der Laboruntersuchungen .....	75

<b>7 Hauptversuche in der Industrie .....</b>	<b>78</b>
7.1 Zielsetzungen und Fragestellungen.....	78
7.2 Material .....	80
7.2.1 UF-Spanplatten .....	80
7.2.2 MUF-Spanplatten .....	80
7.2.3 MUPF-Spanplatten.....	81
7.2.4 PF-Spanplatten .....	82
7.2.5 PMDI-Spanplatten .....	82
7.2.6 MDF-Platten .....	83
7.3 Methoden .....	84
7.3.1 Probennahme.....	84
7.3.2 Prüfmethode.....	87
7.3.3 Temperaturmessung .....	87
7.4 Ergebnisse .....	88
7.4.1 UF-Spanplatten .....	88
7.4.2 MUF-Spanplatten .....	95
7.4.3 MUPF-Spanplatten.....	99
7.4.4 PF-Spanplatten .....	102
7.4.5 PMDI-Spanplatten .....	113
7.4.6 MDF-Platten .....	116
7.5 Zusammenfassung der Industrieuntersuchungen.....	118
<b>8 Zusammenfassung.....</b>	<b>122</b>
8.1 Grundsätzliche Erkenntnisse .....	122
8.2 Bedeutung der Temperatur für die Stapellagerung .....	124
8.3 Konsequenzen für die industrielle Praxis.....	125
<b>9 Literatur.....</b>	<b>127</b>
<b>10 Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>132</b>
<b>11 Tabellenverzeichnis .....</b>	<b>138</b>

# **Einfluss der Stapellagerung auf die Eigenschaften von Holzwerkstoffplatten unter Berücksichtigung verschiedener Leimsysteme und Prozessparameter**

## **1 Zusammenfassung**

Holzwerkstoffplatten verlassen die Presse mit einem ausgeprägten Feuchte- und Temperaturprofil. Die Eigenschaften der Platten sind zu diesem Zeitpunkt noch nicht vollständig ausgeprägt. Phenolharzgebundene Platten werden mit hohen Temperaturen gestapelt, um ohne unwirtschaftliche Verlängerung der Presszeit eine Fortführung der Aushärtung des Klebstoffes im Stapel zu erzielen. Derzeit werden harnstoffharzverleimte Platten hingegen in Sternwendern auf unter 70°C vor dem Einstapeln gekühlt, um eine Degradierung der Leimfestigkeit zu vermeiden. Bisherige Handlungsanweisungen für diesen Produktionsabschnitt beruhen auf Erkenntnissen aus Untersuchungen, die weit über 30 Jahre zurückliegen. Die Produktionstechnologie hat sich seit dieser Zeit stark verändert (z.B. kontinuierliche Pressensysteme und formaldehydarme UF-Harze). Um die Stapellagerung für die Optimierung der Platteneigenschaften unter heutigen Produktionsbedingungen zu nutzen, sind genaue Kenntnisse hinsichtlich des Einflusses der Produktionsfaktoren auf die Eigenschaftsentwicklung erforderlich.

Ziel des Forschungsprojekts war die Identifikation der Produktionsparameter, unter denen die Stapellagerung zur Optimierung der Platteneigenschaften gezielt genutzt werden kann.

Die Untersuchungen wurden am Institut für Holzphysik und mechanische Technologie der Bundesforschungsanstalt für Forst- und Holzwirtschaft an Laborspanplatten sowie an Industriespanplatten in verschiedenen Produktionsanlagen durchgeführt. Für die Laboruntersuchung wurde die Funktion und Steuerung eines Klimagerätes an industrielle Stapelbedingungen angepasst. Im Labor wurden dreischichtige Spanplatten hergestellt, eingestapelt und hinsichtlich der Änderung ihrer Eigenschaften geprüft. Hierbei wurden sowohl Herstellparameter (z.B. 6 Klebstoffe, 3 Presszeiten, 3 Mattenfeuchten, 3 Härteranteile) als auch die Einstapelung (Einstapeltemperatur, Stapeldauer) variiert. In der Industrie wurden Platten aus eigens errichteten Stapeln entnommen und geprüft. Dabei wurden 5 Klebstoffsysteme (UF, MUF, MUPF, PF und MDI) unter verschiedenen Einstapel- und Produktionsbedingungen (v.a. Presszeit) untersucht.

Durch die Stapellagerung werden deutliche Verbesserungen bei allen Platten und Klebstoffen im Labor und in der Industrie hinsichtlich Dickenquellung, Formaldehydgehalt bzw. -Emission und Ausgleichsfeuchte erzielt. Eine höhere Temperatur wirkt sich dabei positiv auf die Eigenschaftsentwicklung während der Stapellagerung aus. Die Querkzugfestigkeit wird, ausgenommen beim UF-Harz, in jedem Fall verbessert. Bei zu langer Einwirkung einer zu hohen Temperatur besteht allerdings für Aminoplaste (UF, MUF und MUPF) die Gefahr der Hydrolyse. Die Biegeeigenschaften (Biegefestigkeit und Biege-Elastizitätsmodul) werden durch die Stapellagerung nicht nennenswert beeinflusst. Die Temperatur hat eine herausragende Bedeutung für Veränderungen der physikalisch-technologischen und chemischen Platteneigenschaften während der Stapellagerung. Es konnte in dieser Untersuchung gezeigt werden, dass die Stapeltemperatur im Prozessablauf gezielt beeinflusst werden kann: Bildung von Zwischenstapeln vor dem Sternwender, Anzahl der Wender, Zeitpunkt des Schleifens, Stapelhöhe und Lagerdauer.

Mit Hilfe der Stapellagerung kann die Erfüllung von Norm-/Kundenanforderungen massiv unterstützt werden. Die Stapeltemperatur sollte so hoch wie möglich gewählt werden. Die Lagertemperatur ist aber in jener Höhe begrenzt, bei der die eingesetzten Harze hydrolysieren und unerwünschte Farbveränderungen (und ggf. auch Geruchsbelästigungen) auftreten.

## 2 Einleitung

Die Herstellung von Holzwerkstoffplatten erfolgt durch das Verpressen von beleimten Partikeln bei etwa 220°C Pressplattentemperatur in diskontinuierlich oder kontinuierlich arbeitenden Pressen. Die Matten werden aus Partikeln mit Holzfeuchten zwischen 8% und 12% nach der Beleimung bei Klebstoffanteilen von etwa 7% bis 12% auf ein Formband gestreut. Als Klebstoffe werden überwiegend Harnstoff-Formaldehyd-Harze und bei wasserfesten Verklebungen Phenol-Formaldehyd-Harze verwendet. Seit einigen Jahren werden zunehmend melaminverstärkte Harze, Melaminmischharze und MDI-Kleber eingesetzt. Phenol- und Melaminformaldehydharze sowie MDI-Kleber härten im Vergleich zu Harnstoffharzen deutlich langsamer aus. Zur Kompensation wird teilweise mit höheren Presstemperaturen und mit speziellen Härtern gearbeitet.

Die Erzielung gewünschter Platteneigenschaften wird zudem durch eine dreischichtige Streuung der Matten aus feinen Deckschichtspänen (DS) und größeren Mittelschichtspänen (MS) sowie durch die gezielte Einstellung von Spanfeuchte in Deck- bzw. Mittelschicht, Presstemperatur und Pressdruck erreicht. Bei Kontakt der Deckschicht mit der heißen Pressplatte steigt deren Temperatur rasch an, die äußeren Späne werden plastifiziert und das Wasser in der Deckschicht beginnt zu verdampfen. Durch den Pressdruck werden die plastifizierten Deckschichtspäne verdichtet. Gleichzeitig strömt der Dampf aufgrund des Druckgefälles in das Platteninnere. Der Wasserdampf kondensiert in den weiter innen liegenden kühleren Schichten, wodurch hier Feuchte und Temperatur ansteigen. Die fortgesetzte Energiezufuhr führt zu einer weiteren Verdampfung und zu einer erneuten Kondensation, womit sich der Dampf als Siedewelle in Richtung Mattenmitte bewegt. Schließlich ist ein Großteil der Feuchte in der Mattenmitte konzentriert und wird dort auch teilweise verdampft. Unter Überwindung des in Mattenmitte vorliegenden Strömungswiderstandes entweicht Dampf über die Mattenkante. Bei Pressenöffnung weist also die Deckschicht eine niedrigere Feuchte und höhere Temperatur auf als die Mittelschicht. Die gesamte Feuchte der Matte ist geringer als vor dem Verpressen.

Die üblicherweise eingesetzten Kondensationsharze vernetzen erst oberhalb von 100°C in wirtschaftlich vertretbarer Zeit. Folglich ist die Aushärtung der Harze vorrangig von der Dauer des Überschreitens der Mindesttemperatur abhängig. Durch Variation von Mattenfeuchte, Presstemperatur und -druck kann die Durchwärmung in starkem Maße beeinflusst werden. Für den Verlauf der Aushärtung des Klebstoffs, und damit für die erforderliche Presszeit, spielt die Zusammensetzung des Klebstoffs eine entscheidende Rolle. Am Ende des Pressvorganges ist das Harz in den einzelnen Schichten unterschiedlich stark vernetzt. Von Bedeutung ist vor allem die noch nicht vollständige Vernetzung in der Mittelschicht. So kommt es, dass in der industriellen Fertigung aufgrund der kurz zu haltenden Presszeiten die

Eigenschaften der Platten nach dem Verlassen der Heißpresse noch nicht vollständig ausgebildet sind. Untersuchungen im Rahmen des AiF-Projektes 10774N ("Prozesskontrolle nach der Presse") zeigten, dass im Labor und in der Industrie hergestellte Spanplatten (harnstoffharzverleimt) unmittelbar nach dem Heißpressen einen Wert von etwa 70% bis 80% der bei freier Auskühlung nach 24 Stunden erreichten Werte aufweisen.

Für den Ausgleich der Temperatur- und Feuchteunterschiede erfolgt eine Konditionierung der Platten. Zu diesem Zweck werden in der industriellen Produktion Sternwender eingesetzt, in denen die Platten in kurzer Zeit auf 60 bis 80°C abgekühlt werden. Eine ausreichende Kühlung ist vor allem bei harnstoffharzverleimten Platten unbedingt erforderlich, um eine nachträgliche Hydrolyse des Klebstoffes zu vermeiden (Ginzel 1973). Phenolharzgebundene Platten werden dagegen in der industriellen Praxis üblicherweise mit höheren Temperaturen gestapelt, um ohne unwirtschaftliche Verlängerung der Presszeit eine Fortführung der Aushärtung des Klebstoffes im Stapel zu erzielen.

### 3 Kenntnisstand

#### 3.1 Veränderungsvorgänge von Spanplatten nach dem Heißpressen

Nach Kehr und Grabitzki (1965) wird unter "Ausreifen" für Spanplatten die Abkühlung auf Raumtemperatur, ein Feuchteausgleich innerhalb und zwischen den Platten sowie dem damit verbundenen Spannungsausgleich, ein Nachhärten des Bindemittels und auch eine nachträgliche Formaldehydabspaltung verstanden.

##### 3.1.1 Temperatur

Am Ende des Pressvorgangs weisen Holzwerkstoffplatten ein ausgeprägtes Temperaturprofil auf. Die Plattendeckschichten erreichen nahezu die Temperatur der Heizplatten, hierbei sind Temperaturen bis 200°C möglich (Deppe und Ernst 1991). Die Temperatur in der Mittelschicht liegt in der Regel über 100°C, da sich ein Dampfdruck in der Platte einstellt, der über dem Normaldruck liegt. Der Dampfdruck resultiert aus dem Verdampfen des Wassers

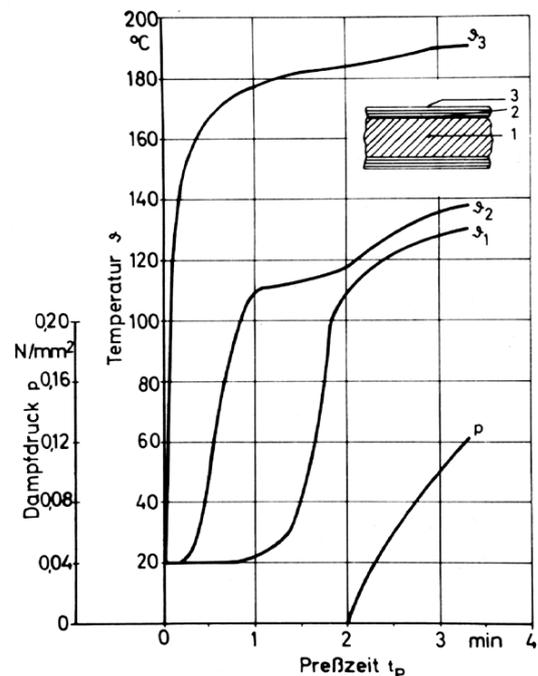


Abbildung 1: Temperatur und Dampfdruck in einer Laborspanplatte in Abhängigkeit von der Presszeit.

- 1: Temperatur in Plattenmitte
- 2: zwischen Deck- und Mittelschicht
- 3: auf der Deckschicht
- 4: Dampfdruck in Plattenmitte (Lamberts und Pungs 1978)

während des Pressvorgangs und der geringen Permeabilität der Platte, so dass der Druck nicht unmittelbar abgebaut werden kann (v.Haas 1998).

Der Dampfdruck wird von der Temperatur in der Mittelschicht bestimmt, die sich während des Pressvorgangs in der Platte einstellt. Je höher die Temperatur in der Platte während des Verpressens ist, um so größer ist der Dampfdruck (Lambert und Pungs 1978). Die Autoren wiesen Temperaturen zwischen 110°C und 130°C in Abhängigkeit vom Dampfdruck in der Mitte von Laborspanplatten (Dicke: 20 mm) nach.

Nach dem Verlassen der Heißpresse kühlen die Platten ab. Die Wärmeenergie der Plattendeckschichten wird konvektiv an die umgebende Luft abgeführt. Die Änderung der Temperatur innerhalb der Platte nach der Zeit kann mit Hilfe der allgemeinen Differentialgleichung für die instationäre Wärmeleitung nach Fourier (Gleichung 1) beschrieben werden.

$$\frac{d}{dT} \vartheta = a \cdot \frac{d^2}{dx^2} \vartheta \quad (1)$$

Dabei ist  $a$  die Temperaturleitfähigkeit, sie ist definiert als Quotient aus der Wärmeleitfähigkeit und der spezifischen Wärmekapazität sowie der Dichte (Gleichung 2).

$$a = \frac{l}{c \cdot r} \quad (2)$$

wobei

$a$	Temperaturleitfähigkeit	$m^2 / h$
$l$	Wärmeleitfähigkeit	$W / (mEK)$
$c$	spezifische Wärmekapazität	$kJ / (kgEK)$
$r$	Dichte	$kg / m^3$

### 3.1.1.1 Abkühlung frei luftumspülter Platten

Holzwerkstoffplatten verlassen die Heißpresse in der Regel mit Temperaturen von 180°C bis 200°C in den Deckschichten und über 100°C in der Mittelschicht. Werden die Platten nach dem Verpressen bei freier Luftumspülung gelagert, wie es im Sternwender oder für Platten, die der Laborprüfung zugeführt werden, üblich ist, kühlen diese rasch ab. Die Temperatur in den verschiedenen Plattenschichten gleichen sich während der Abkühlung an und erreichen nach etwa 60 bis 100 Minuten Raumtemperatur (Deppe und Ernst 1964, Stegmann und Bismarck 1967, Kiosseff 1974).

Die Abnahme der Temperatur von Holzwerkstoffplatten lässt sich nach Deppe und Ernst (1964) folgendermaßen beschreiben: Ausgehend von einer Temperatur der Deck- und Mittelschicht von ca. 105°C nach etwa 3 Minuten nach dem Verpressen der Platten sinkt die Deckschichttemperatur deutlich schneller als die der Mittelschicht auf Raumtemperatur ab. In diesem Fall ist eine 19 mm-Spanplatte nach etwa 60 Minuten auf Raumtemperatur abgekühlt.

Untersuchungen von Stegmann und Bismarck (1967) zeigten den Temperaturverlauf in der Mittelschicht von einschichtigen Spanplatten mit einer Dicke von 20 mm während des Pressvorgangs und der Abkühlung auf. Nach Beendigung des Pressvorgangs ist eine weitere Temperaturerhöhung bis wenige Minuten nach dem Verlassen der Presse zu verzeichnen. Dieses Verhalten kann aus den Beschreibungen nicht hinreichend erklärt werden. Nach Erreichen des Maximums in der Mittelschicht von etwa 140°C fällt die Temperatur degressiv ab bis sie nach etwa 100 Minuten Umgebungstemperatur erreicht.

Arbeiten von Shukow et al. (1971) und Kiosseff (1971) beschrieben rechnerisch und experimentell die Abkühlungsdynamik von Spanplatten in Abhängigkeit von der Luftgeschwindigkeit, der die Platten ausgesetzt wurden. Die Abkühlungsgeschwindigkeit von Platten mit einer Dicke von 19 mm und einer Dichtevariation zwischen 500 bis 800 kg/m<sup>3</sup> konnte bei Erhöhung der Luftgeschwindigkeit von 1 auf 3 m/s halbiert werden. Eine Luftgeschwindigkeit von etwa 8 m/s wurde unter den gegebenen Bedingungen als optimal betrachtet, da mit einer weiteren Erhöhung keine nennenswerte Verringerung der Abkühlzeit erreicht werden konnte. Die Ergebnisse zeigen, dass Platten mit einer höheren Dichte langsamer abkühlen als Platten niedrigerer Dichte. Bei einer geringen Luftgeschwindigkeit war die Abkühlzeit von Platten der Dichte 800 kg/m<sup>3</sup> nahezu doppelt so lang wie die von Platten mit einer Dichte von 500 kg/m<sup>3</sup>. Mit Zunahme der Luftgeschwindigkeit minderte sich dieses Verhältnis deutlich. Diese Untersuchungen wurden im Zuge der Entwicklung von Konditionierungskammern durchgeführt. Hierbei sollten Spanplatten nach dem Verpressen in kurzer Zeit auf die gewünschte Temperatur mit Hilfe von gezielter Luftzirkulation abgekühlt werden (Kiosseff 1974).

Deppe und Ernst (1964) legten die Auswirkungen einer ungleichmäßigen Abkühlung von 38 mm- und 8 mm-Spanplatten nach dem Verpressen dar. Die zu dieser Zeit eingesetzten Kühlkanäle führten dazu, dass der Temperaturgradient der vertikal gelagerten Platten zwischen oberer und unterer Plattenkante etwa 15°C betrug. In Verbindung mit einer ungeeigneten Temperaturverteilung kam es zu einer Spannungsverteilung innerhalb der Platte, die sich bei einer weiteren Bearbeitung ungünstig auswirkte.

Auch nach Untersuchungen von Kehr und Grabitzki (1965) muss das Kühlen über die Fläche und über den Querschnitt gleichmäßig erfolgen, damit keine Temperaturunterschiede und damit einhergehend Spannungen in der Platte entstehen. Probleme bereiten variierende

Luftgeschwindigkeiten während der Abkühlung über der Plattenfläche, da sie zu unterschiedlichen Auskühlungsgeschwindigkeiten führen. Dies kann zu einer variablen Feuchteverteilung und Spannungsverteilung innerhalb der Platte führen, weswegen eine gleichmäßige Verteilung der Platteneigenschaften und die Maßhaltigkeit der Platten nach dem Auftrennen nicht mehr gewährleistet ist.

Der Verlauf der Temperatur nach dem Verpressen während der Abkühlung wurde von Greubel (1989) berechnet. Der Autor differenzierte mehrere Schichten einer 20 mm dicken Spanplatte. Angaben über die Dichte oder das Rohdichteprofil werden nicht gemacht. Es wird davon ausgegangen, dass die Temperatur zu Beginn über den gesamten Querschnitt einheitlich 100°C beträgt.

Kruse (1997) beschreibt das Auskühlverhalten anhand von Laborspanplatten mit einer Dichtevariation von 400 bis 800 kg/m<sup>3</sup> (Abbildung 2). Die Platten verließen die Heißpresse mit einer Deckschichttemperatur von 160°C und einer Mittelschichttemperatur von etwa 110°C. Die Temperaturen der Deck- und Mittelschichten von Platten mit einer mittleren Dichte von 600 kg/m<sup>3</sup> glichen sich nach etwa 40 Minuten auf einem Niveau von 40°C einander an und kühlten innerhalb von weiteren 20 Minuten auf Umgebungstemperatur ab. Die Temperaturen der Deckschichten sinken sehr schnell ab, und bereits nach wenigen Minuten wird die Temperatur der Mittelschicht unterschritten. Erkennbar ist auch

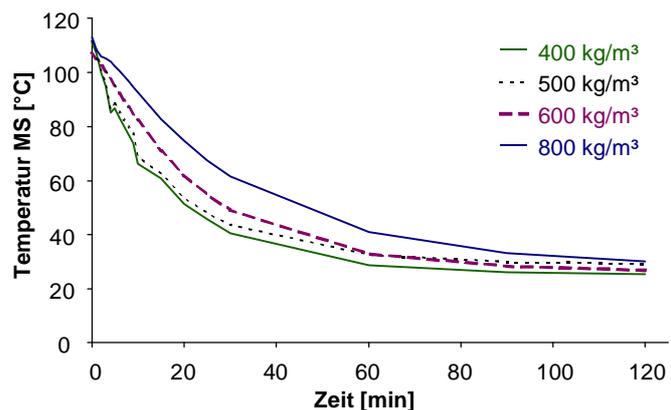


Abbildung 2: Änderung der Temperatur der Mittelschicht nach dem Heißpressen von Spanplatten unterschiedlicher Dichte (Kruse 1997).

hier ein deutlicher Einfluss der Rohdichte auf das Abkühlverhalten. Platten höherer Dichte kühlen merklich langsamer ab als Platten mit einer geringeren Dichte.

Bei der industriellen Kühlung der Platten im Sternwender verläuft die Temperaturabnahme vergleichsweise langsamer. Die Umgebungsluft ist durch die große Menge an Platten aufgeheizt. Deshalb ist die Differenz zwischen Plattentemperatur und Umgebungstemperatur wesentlich geringer als beim Abkühlen einer einzelnen Platte.

Berechnungen und experimentelle Laboruntersuchungen legten Lu und Pizzi (1998) ihren Aussagen über das Abkühlverhalten zugrunde. Hierbei wurden vier Messpunkte über den Querschnitt einer 14 mm-Spanplatte berücksichtigt. Die Dichte der untersuchten Platten lag

um 660 kg/m<sup>3</sup>. Das beschriebene Abkühlverhalten unterschiedlicher Schichten der Platten dieser Untersuchung deckt sich mit den Erkenntnissen der vorgenannten Autoren.

Der Einfluss der Umgebungstemperatur auf die Abkühlungsgeschwindigkeit von Holzwerkstoffplatten nach dem Heißpressen ist in der Literatur nicht beschrieben. Es werden von verschiedenen Autoren zwar unterschiedliche Raumlufttemperaturen<sup>1</sup> angegeben, allerdings variieren zudem andere Parameter wie beispielsweise die Rohdichte und Presstemperaturen, so dass eine direkte Vergleichsmöglichkeit nicht gegeben ist.

### 3.1.1.2 Abkühlung stapelgelagerter Platten

Werden Holzwerkstoffplatten bei erhöhter Temperatur im Stapel eingelagert, kühlen die Platten langsamer auf die Umgebungstemperatur ab als bei freier Luftumspülung. Deppe und Ernst (1964) stellten den Temperaturverlauf in Stapelmitte und am Stapelrand ausgehend von einer Plattentemperatur während der Einstapelung von 100°C dar. Am Rand des Stapels sank die Temperatur der 19 mm-Platten nach etwa drei Tagen auf 65°C ab. In der Stapelmitte hingegen betrug die Temperatur nach 14 Tagen noch 60 bis 70°C. Über die Größe des Stapels sind der Publikation keine Informationen zu entnehmen.

Der Temperaturverlauf in Plattenmitte von stapelgelagerten Spanplatten wurde von Shukow und Michailow (1970) sowie Kiosseff (1971) beschrieben. Die Autoren verfolgten den Temperaturverlauf von Spanplatten (in der Mitte, im Außenbereich und in den Zwischenlagen des Stapels) über einen Zeitraum von fünf Tagen. Ausgehend von einer Temperatur um 105°C sanken die Plattentemperaturen im Außenbereich und in den Zwischenlagen innerhalb von 24 Stunden auf etwa 70°C ab. Die Temperatur in der Mitte des Stapels lag nach dem selben Zeitraum bei 85°C. Nach 48 Stunden lagen die Temperaturen zwischen 40 bis 60°C und nach nahezu vier Tagen hatten alle Bereiche des Stapels die Umgebungstemperatur erreicht. Angaben, die für die Beurteilung des Abkühlungsverhaltens im Stapel von Bedeutung wären, wie beispielsweise die Größe der Platten und der Stapelhöhe, werden nicht gemacht.

Harnstoffharzverleimte Spanplatten müssen nach dem Pressvorgang abgekühlt werden, um Hydrolyseeffekte zu vermeiden (Allan und Polovtseff 1961a). Nach Untersuchungen von Kehr und Grabitzki (1965) muss das Kühlen gleichmäßig über die Fläche und über den Querschnitt erfolgen, damit keine Temperaturunterschiede und damit einhergehende Spannungen in der Platte entstehen. Holzwerkstoffplatten sollen auf 70°C abgekühlt werden, um der Hydrolyse des Harnstoffharzes vorzubeugen. Eine schnelle Abkühlung der Platten

---

<sup>1</sup> Deppe und Ernst (1964): Umgebungstemperatur 15°C  
Kruse (1997): Umgebungstemperatur 29°C  
Lu und Pizzi (1998): Umgebungstemperatur 16,7°C

wird im industriellen Produktionsprozess mit Hilfe von Kühlkanälen oder Konditionierungskammern (Kiosseff 1974) oder durch Sternwender (Heller 1995) erreicht. Die damit möglicherweise einhergehenden Probleme wurden bereits oben erläutert.

### 3.1.2 Feuchte

Nach dem Verpressen liegt eine Feuchteverteilung senkrecht zur Plattenoberfläche vor, die im besonderen Maß von der Feuchte der Matte vor dem Heißpressen, der Presszeit und dem Strömungswiderstand abhängig ist. Berechnungen von Bolton et al. (1989a) ergeben, dass die Feuchte einer Laborplatte, ausgehend von einer homogenen Feuchte von 16% vor dem Verpressen, am Ende des Pressens in der Deckschicht einen Wert um 3% annimmt, während die Feuchte in der Mittelschicht auf etwa 18% ansteigt (Abbildung 3). Untersuchungen an industriell hergestellten Platten zeigten ähnliche Ergebnisse für die Deckschicht (ca. 3%), jedoch deutlich geringere Feuchten in der Mittelschicht (ca. 5,5%) (Kruse und Ohlmeyer 1999).

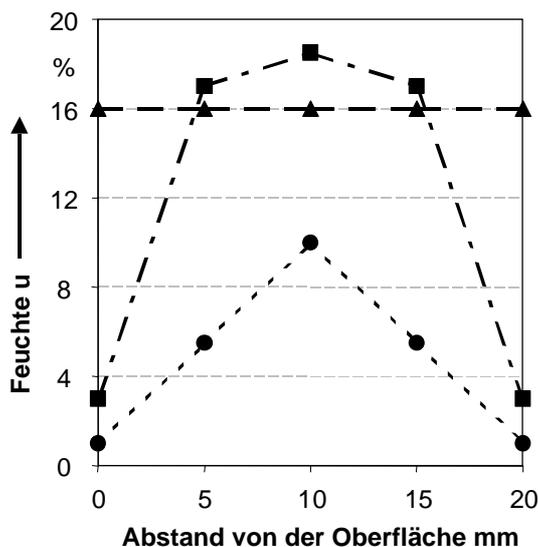


Abbildung 3: Variation der berechneten Feuchte einer 20 mm dicken Laborplatte während des Verpressens ( $650 \text{ kg/m}^3$ ).  
 ▲ : Beginn – Pressen;  
 ■ : Beginn – Periode konstanter Temperaturen in der Mittelschicht;  
 ● : Beginn des nachfolgenden, allmählichen Temperaturanstiegs (Bolton et al. 1989a)

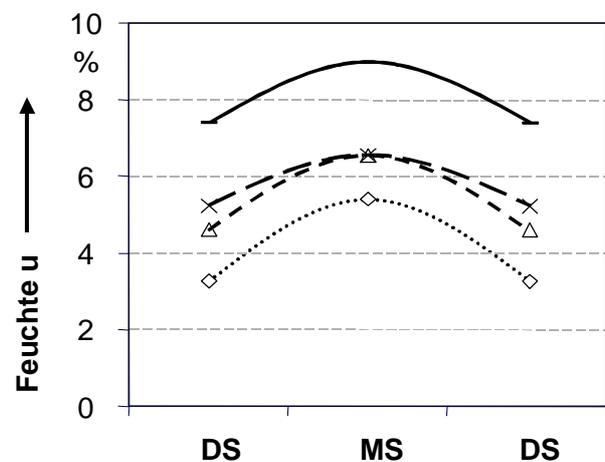


Abbildung 4: Änderung der Feuchte in Deck- und Mittelschichten einer Industriespanplatte während der Abkühlung.  
 ◆ : 6 min nach Verlassen der Heißpresse;  
 ▲ : 120 min nach Verlassen der Heißpresse;  
 x : 24 h nach Verlassen der Heißpresse;  
 – : nach Klimatisierung bei  $20^\circ\text{C}/65\%$  rel. LF (Kruse und Ohlmeyer 1999)

Nach Kehr und Grabitzki (1965) schwankt das Feuchteprofil in einer Spanne zwischen 3% bis 5% (Deckschicht) und 9% bis 13% (Mittelschicht). Bei kurzen Presszeiten und hohen Spanfeuchten vor dem Heißpressen werden die Feuchtedifferenzen verstärkt, besonders in

den Fällen, in denen große Feuchteunterschiede zwischen Deck- und Mittelschicht vor dem Heißpressen vorliegen. Nach Kehr und Grabitzki (1965) kommt es selbst bei langer Lagerung zu keinem vollständigen Ausgleich. In Versuchen wurde der Feuchteausgleich von frei abkühlenden und von gestapelt abkühlenden Platten untersucht. Die Autoren kamen zu dem Ergebnis, dass sich die Feuchte in den gestapelten Spanplatten sehr langsam ausgleicht. Dabei liegt die Gleichgewichtsfeuchte niedriger als bei Vollholz (Seifert 1970).

Im Laufe der Konditionierung der Platten nimmt die relativ trockene Deckschicht Feuchte aus der Mittelschicht und der Umgebung auf und quillt dabei. In der Mittelschicht dagegen wird der Feuchtestau abgebaut, so dass sie trocknet und damit schwindet (Abbildung 4). Als Folge kommt es zu kleineren Dickendifferenzen und zu Schubspannungen in Plattenebene, die bei Asymmetrie zum Verwerfen führen können (Neußer und Schall 1970). Wesentliche Einflussfaktoren der Feuchteänderung sind das Umgebungsklima (relative Luftfeuchte, Lufttemperatur, Luftgeschwindigkeit), die mittlere Feuchte der Spanplatte nach der Presse und die Dimensionen der Platte.

Greubel (1989) stellte einen berechneten Verlauf der Feuchteänderungen abkühlender Spanplatten über eine Zeitspanne von 5 Stunden vor (Abbildung 5), der weitgehend mit den Ergebnissen von Kehr und Grabitzki (1965) übereinstimmt. Jedoch sind nach Greubel (1989) insbesondere in der ersten halben Stunde nach der Presse deutlichere Änderungen des Feuchteprofils zu beobachten.

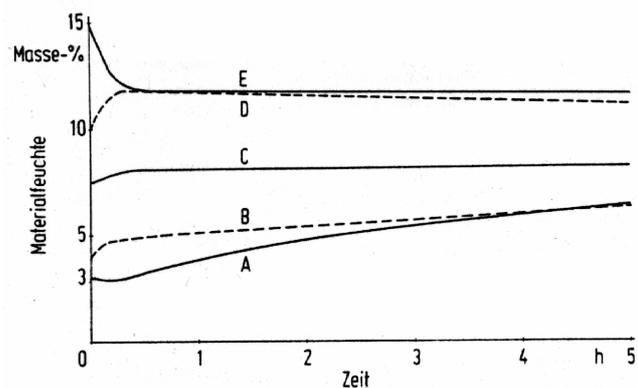


Abbildung 5: Berechneter Verlauf der Materialfeuchte nach dem Pressen während der Abkühlung (Greubel 1989).

Deppe und Ernst (1964) stellen die Feuchteverteilung über die Plattenbreite von 38 mm- und 8 mm-Spanplatten nach dem Verpressen unter verschiedenen Lagerbedingungen vor. Bei dickeren Platten mit geringer Dichte ist die Feuchte nahezu gleichmäßig über die Fläche verteilt und kann mit Hilfe eines Kühl- bzw. Klimatisierungskanals rasch verändert werden. 8 mm-Platten mit höherer Dichte weisen eine deutliche Feuchteverteilung mit höheren Werten in der Mitte und mit rund 3% niedrigeren Werten im Randbereich der Platte auf. Nach einem Durchlaufen durch die beschriebenen Kühlkanäle kann die Feuchtedifferenz auf 2% reduziert werden.

In der Untersuchung von Kehr und Grabitzki (1965) wurde die Feuchteänderung von Deck- und Mittelschicht von Spanplatten über einen mehrtägigen Lagerzeitraum betrachtet. Eine Änderung der Gesamtfeuchte während der Stapellagerung war nicht zu verzeichnen. Die Deckschichten nahmen zwischen dem Zeitpunkt unmittelbar nach dem Verpressen bis nach

16 Tagen um etwa 3% Feuchte zu, während die Feuchte der Mittelschicht über den gleichen Zeitraum um rund 1% Feuchte verlor. Somit lässt sich festhalten, dass sich im Zuge der Stapellagerung die Feuchte der Deck- und Mittelschichten angleicht. Allerdings findet kein vollständiger Ausgleich zwischen den Schichten statt, auch nach längerer Lagerung bleibt eine Feuchtedifferenz von 1% bis 2% zwischen Deck- und Mittelschicht.

Nachteilig wirken sich bei der Lagerung die Temperatur- und Feuchteunterschiede zwischen Platten in der Mitte und Platten am Rand des Stapels auf die mechanisch-technologischen Eigenschaften aus. Es kommt hierdurch zu einer unzulässigen Streuung der Eigenschaften (Lambert und Pungs 1978).

Es ist somit folgendes festzuhalten:

- ✓ Horizontale Feuchtegradienten im Stapel sind zu vermeiden, um die Plattenqualität nicht zu vermindern. Dies gilt auch für die vertikale Feuchteverteilung im gesamten Stapel.
- ✓ Vertikale Feuchtegradienten innerhalb der Platte werden während der Lagerung weitestgehend ausgeglichen. Zu einem vollständigen Feuchteausgleich zwischen Deck- und Mittelschicht kommt es allerdings nicht. In der Literatur werden keine exakten Angaben über die Geschwindigkeit des Feuchteausgleichs und die Beeinflussung desselben gegeben. Es werden auch keine Angaben darüber gemacht, wie die Feuchtedifferenz und damit mögliche Spannungen zwischen Deck- und Mittelschicht so weit wie möglich reduziert werden können.

### **3.1.3 Chemische Veränderungen**

#### **3.1.3.1 Klebstoffe**

Die überwiegend in der Produktion von Span- und Faserplatten verwendeten Polykondensationsharze setzen sich aus Formaldehyd einerseits und Harnstoff, Phenol und Melamin andererseits in wässriger Lösung zusammen. Beim Aushärten der Harze wird der größte Teil des eingesetzten Formaldehyds chemisch gebunden. Harnstoff-Formaldehyd-Harze und Mischharze auf Harnstoffbasis härten im sauren Milieu aus. Reine Phenol-Formaldehyd-Harze hingegen werden im alkalischen Bereich ausgehärtet.

##### *Harnstoff-Formaldehyd-Harz*

Auskondensierte Harnstoff-Formaldehyd-Harze hydrolysieren unter bestimmten Bedingungen (Blomquist und Olson 1957, Allan und Polovtseff 1961b). Unter Hydrolyse wird die chemische Reaktion verstanden, bei der eine Verbindung durch Einwirkung von Wasser gespalten wird (Römpf 1995). Die Hydrolyse in harnstoffharzverleimten Spanplatten tritt verstärkt bei erhöhter Temperatur sowie Feuchte auf und wird durch die Dauer der

Temperatureinwirkung bestimmt (Kehr et al. 1964, Zmijewski 1964). Nach Untersuchungen von Plath (1967, 1968) steigt die Formaldehydabspaltung in den Deckschichten an, wenn harnstoffharzverleimte Spanplatten heiß eingestapelt werden. Die Formaldehydabgabe von Spanplatten ist bedingt durch die Hydrolyse des Klebstoffes (Christensen 1972). Neußer und Schall (1970) stellten vor, dass unterhalb einer Plattentemperatur von 75°C nur noch ein geringer hydrolytischer Abbau stattfindet. Die Autoren beschreiben zudem zunehmenden hydrolytischen Abbau mit steigendem Molverhältnis zwischen Formaldehyd zu Harnstoff. Die Hydrolyse wird ebenfalls verstärkt bei hohem Härteranteil in der Leimflotte (Neußer und Schall 1970). Roux und Gilles (1971) führen diesen Umstand auf einen unmittelbaren Zusammenhang zwischen Hydrolyse und Säuregehalt zurück. Untersuchungen von Petersen et al. (1974) belegen ebenfalls, dass die verwendete Härterart und -menge die Hydrolyse beeinflussen kann.

Nach Robitschek und Christensen (1976) finden während des Pressvorgangs von Spanplatten zwei Reaktionen gleichzeitig statt. Einerseits wird freier Formaldehyd während der Polymerisation oder Verkettung eingebunden und ein Teil des Formaldehyds aus der Platte ausgetrieben. Auf der anderen Seite hydrolysiert auch ein geringer Teil des Vorkondensats bereits während des Heißpressens. Mit steigender Mattenfeuchte und Presszeit wird dieser Anteil erhöht. Die Degradierung des Leimes kann nach dem Verpressen in Abhängigkeit von der Temperatur und Feuchte der Platten weiter andauern.

Mit der Hydrolyse geht eine Verschlechterung der mechanischen Eigenschaften einher (Allan und Polovsteff 1961a, Roux und Gilles 1971). Um eine Verschlechterung der Platteneigenschaften zu vermeiden, werden harnstoffharzverleimte Spanplatten daher in Sternwendern auf eine Temperatur von 60 bis 70°C vor dem Einstapeln abgekühlt (Deppe und Ernst 1991, Heller 1995).

Während des Gebrauchs der Spanplatten kann es unter bestimmten Bedingungen zu einer nachträglichen Formaldehydabspaltung kommen (Wittmann 1962). Nach Roffael (1978) kann das Formaldehydabgabepotential während der Lagerung bereits erheblich vermindert werden. Der Autor beschreibt zudem, dass das Ausmaß der Verminderung der Formaldehydabgabe von Spanplatten von dem Molverhältnis zwischen Harnstoff und Formaldehyd abhängig ist. Lu und Pizzi (1998) schildern, dass moderne UF-Harze mit einem geringen Molverhältnis zwischen Harnstoff und Formaldehyd ein anderes Nachreifungsverhalten zeigen, als die in der vorgenannten Literatur vornehmlich beschriebenen "E3"-Klebstoffe. In modernen Klebstoffen werden weniger Methylen-Ether-Bindungen während der Aushärtung gebildet. Im Zuge einer Nachhärtung können diese Methylen-Ether-Bindungen in stabilere Methylen-Bindungen umgelagert werden. Die damit korrespondierende Festigkeitszunahme während einer Nachreifung konnte nachgewiesen werden.

### *Phenol-Formaldehyd-Harz*

Bei phenolharzverleimten Platten ist keine Hydrolyse des Leimes feststellbar (Allan und Polovtseff 1961a, Cherubim 1976). PF-verleimte Platten sind hydrolysebeständig aufgrund der stabilen C-C-Bindung zwischen dem aromatischen Ring und der Methylenbrücke (Dunky 1999b). Phenol-Formaldehyd-Harze können hingegen unter geeigneten Bedingungen nach dem Pressvorgang weiter polymerisieren (Roux und Gilles 1971). Phenolharzgebundene Platten werden in der industriellen Praxis üblicherweise unmittelbar nach der Presse bei hohen Temperaturen eingestapelt, um nach kurzen Presszeiten eine Fortführung der Aushärtung des Klebstoffes im Stapel zu erzielen (Deppe und Ernst 1991).

### *MUPF- und MUF-Harz*

Wissenschaftliche Untersuchungen, die sich mit Eigenschaftsänderungen von MUPF- oder MUF-Harz-verleimten Holzwerkstoffplatten nach dem Verpressen beschäftigen, liegen nicht vor.

### *Isocyanate*

Roffael und Rauch (1973) stellten Untersuchungen über den Einfluss der thermischen Nachbehandlung auf Platteneigenschaften von Diisocyanat-gebundenen Spanplatten vor. Die Autoren leiteten aus dem damaligen Kenntnisstand ab, dass bei der Verwendung von Diisocyanaten keine physikalische Adhäsion vorliegt, sondern dass es auch zu einer echten chemischen Bindung zwischen dem Kleber und der Cellulose des Holzes kommt.

Aus den Ergebnissen von Roffael und Rauch (1973) lässt sich dem Grunde nach ableiten, dass es bei Isocyanat-verklebten Holzwerkstoffplatten während einer warmen Lagerung zu einer Änderung des Klebers kommen kann. Allerdings wurden die Eigenschaftsänderung der untersuchten Platten nicht auf chemischer Basis interpretiert.

## **3.1.3.2 Holz**

Unter den Stapelbedingungen der Spanplatten finden nicht nur Änderungen in der Struktur des Klebstoffes statt. Gleichzeitig kann es auch zu Veränderungen des Holzmaterials kommen. Nach Roux und Gilles (1971) spielt die Hydrolyse des Holzes bei der Verschlechterung von Platteneigenschaften bei hoher Feuchte, insbesondere bei stärker säurehaltigen Holzarten, eine wichtige Rolle. Die Verfärbung von Platten, die sich während einer Lagerung im Stapel einstellen kann, wurde von Roux und Gilles (1971) auf eine Hydrolyse der Cellulose zurückgeführt. Diese Verfärbungen können bei längerer Lagerung bei höheren Temperaturen auftreten. Ginzel (1973) legte dar, dass die auftretenden Verfärbungen nicht auf die Hydrolyse des Holzes zurückzuführen sind, sondern auf eine Verschiebung des pH-Wertes in den alkalischen Bereich als Folge der Bildung von Aminen

und Ammoniak bei der hydrolytischen Spaltung des Harnstoff-Formaldehyd-Harzes. Dabei werden primär akzessorische Bestandteile des Holzes verfärbt. Ein messbarer hydrolytischer Abbau des Holzes und insbesondere der Cellulose tritt erst bei wesentlich extremeren Bedingungen auf, als sie unter gewöhnlichen Stapelbedingungen vorliegen (Ginzel 1973).

### 3.1.4 Elastomechanische Eigenschaften

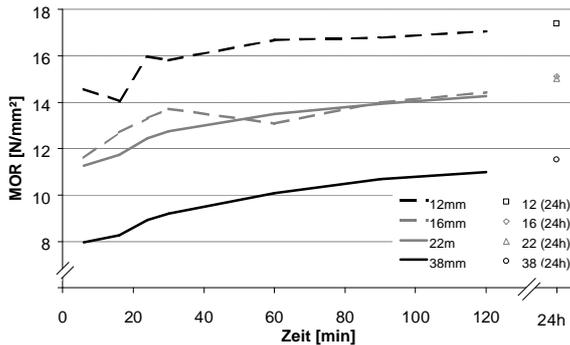
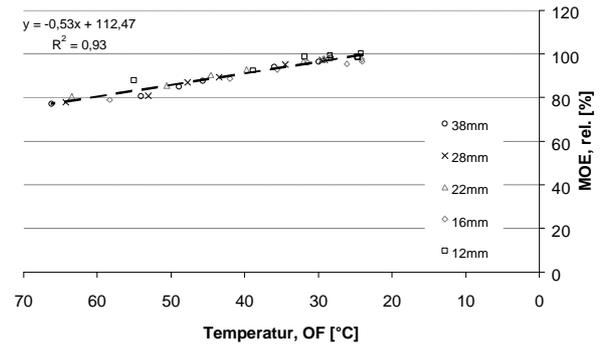
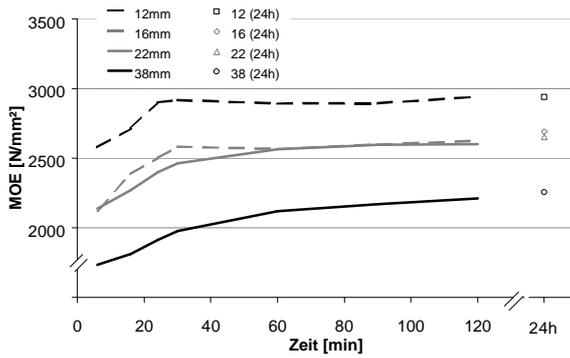
#### 3.1.4.1 Änderung der Eigenschaften von Platten bei freier Luftumspülung

Die Festigkeiten der Holzwerkstoffplatten sind nach dem Verlassen der Heißpresse noch nicht vollständig ausgeprägt (Frühwald et al. 1999). Shukow und Michailow (1970) sowie Kiosseff (1971) zeigen eine Zunahme der Biegefestigkeit um 30% innerhalb von 48 Stunden auf. Nach eigenen Untersuchungen (AiF 10774N) beträgt der Biege-E-Modul nach dem Heißpressen nur knapp 80% des nach 24 Stunden bei freier Auskühlung erreichten Wertes (Abbildung 6). Während dieser Zeit nimmt der Biege-E-Modul degressiv zu (vgl. auch Greubel 1989). Darüber hinaus wird ein signifikanter Einfluss der Rohdichte und der Plattendicke auf die Zunahme des Biege-E-Moduls und der Biegefestigkeit festgestellt. Auch die Feuchte scheint die Zunahme zu beeinflussen. Des Weiteren wird ein strenger linearer Zusammenhang zwischen der Temperatur der Platten und dem Biege-E-Modul bzw. der Biegefestigkeit ermittelt. Danach nimmt der Biege-E-Modul um ca. 0,5% je Grad Celsius Abkühlung zu.

Für die Prüfung der Verleimungsqualität der schwächsten Schicht der Platte kann die Querkzugfestigkeit oder die Scherfestigkeit bestimmt werden (Noack und Schwab 1972, Gressel 1975). Bei der Herstellung von Holzwerkstoffen ist in der Regel die Verleimungsqualität der Mittelschicht die limitierende Größe für die Produktionsgeschwindigkeit. In älteren Untersuchungen wurde bei harnstoffharzverleimten Spanplatten keine oder nur eine sehr geringe Zunahme der Querkzugfestigkeit nach dem Heißpressen beobachtet (Plath 1963, Stegmann und Bismarck 1967, Kiosseff 1971). Demgegenüber zeigte sich bei eigenen Untersuchungen eine deutliche Verbesserung der Scherfestigkeit<sup>2</sup> nach dem Heißpressen (Abbildung 7). Bei frei auskühlenden harnstoffharzverleimten Spanplatten beträgt die Zunahme etwa 20% bis 30% und ist damit noch etwas größer als die Zunahme von Biege-E-Modul und Biegefestigkeit. Auch die Scherfestigkeit zeigt einen strengen linearen Zusammenhang mit der Plattentemperatur.

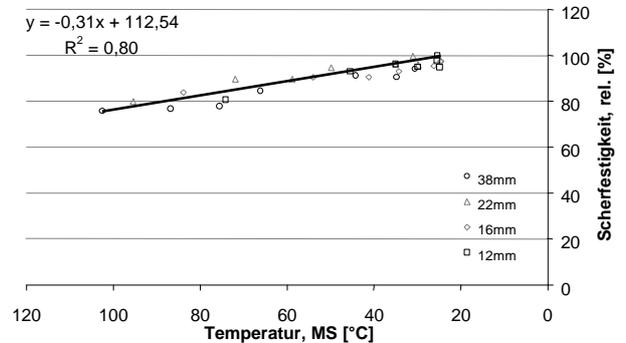
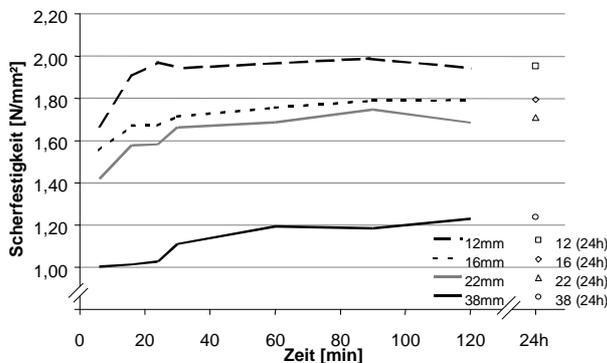
---

<sup>2</sup> Im AiF-Projekt 10774N sollte die Verleimungsqualität in kurzen Zeitintervallen festgestellt werden. Zu diesem Zweck wurde die Scherfestigkeit geprüft, da deren Prüfung wesentlich schneller durchgeführt werden kann als die der Querkzugfestigkeit.



MOE: Biege-E-Modul  
MOR: Biegefestigkeit  
Temperatur, OF: Oberflächentemperatur  
MOE rel.: relativer Biege-E-Modul  
(Messwert nach 24 h = 100%).

Abbildung 6: Biege-E-Modul und Biegefestigkeit nach dem Heißpressen (Industrie).  
oben links: Biege-E-Modul über Zeit; oben rechts: Biege-E-Modul über Temperatur;  
unten links: Biegefestigkeit über Zeit (Frühwald et al. 1999)



Änderung der Scherfestigkeit nach dem Heißpressen; verschiedene Plattentypen.

Zusammenhang zwischen der Scherfestigkeit verschiedener Plattentypen und der Mittelschichttemperatur

Abbildung 7: Scherfestigkeit nach dem Heißpressen (Industrie).

links: Scherfestigkeit über Zeit      rechts: Scherfestigkeit über Temperatur (Frühwald et al. 1999)

### 3.1.4.2 Änderung der Eigenschaften stapelgelagerter Platten

Die Platteneigenschaften sind unmittelbar nach dem Verpressen noch nicht vollständig ausgeprägt. Es wurde bereits ausgeführt, dass durch die Veränderungen des Klebstoffes und des Holzes bei einer Lagerung unter bestimmten Bedingungen auch die Platteneigenschaften beeinflusst werden können.

#### **Querzugfestigkeit**

##### *Harnstoff-Formaldehyd-Harz*

Unter Lagerbedingungen mit hoher Temperatur und Feuchte kommt es bei Harnstoff-Formaldehydharz-verleimten Spanplatten zu einer Abnahme der Verklebungsfestigkeit (Hann et al. 1963). Diese Abnahme wird von den Autoren auf einen Abbau des Harzes sowie unterschiedliche Quell - und Schwindbewegungen des Spanverbundes bei Änderungen der Feuchte erklärt.

Nach Untersuchungen von Shukow und Michailow (1970) sowie Kiosseff (1971) kommt es bei Platten, die aus den inneren Schichten eines direkt nach der Heißpresse gebildeten Stapels entnommen werden, zu einer Reduzierung der Querzugfestigkeit um etwa 40% innerhalb von vier Tagen Lagerzeit. Bei den Untersuchungen wurden Stapel aus 13 bis 15 Spanplatten (Dicke: 19 mm) gebildet. Der untersuchte Stapel war somit kleiner als die in der Industrie heute üblichen Stapel. Die stärksten Verluste der Festigkeit waren an den Platten aus der Mitte des Stapels zu erkennen. Die Platten aus den äußeren Bereichen des Stapels zeigten eine geringere Abnahme der Querzugfestigkeit.

Hohe Feuchtigkeit, hohe Temperaturen und ein saures Milieu wirken beschleunigend auf die Hydrolyse. Die Verklebungsfestigkeit von Harnstoff-Formaldehyd-Harzen nimmt mit höherer Temperatur und längerer Einwirkungszeit ab. Ebenso sinkt die Festigkeit mit Zunahme der Feuchte, diese Zusammenhänge haben Neußer und Schall (1970) mit Hilfe von Scherzugversuchen an verleimten Buchenfurnierblättchen nachgewiesen. Die Verklebungsfestigkeit von Harnstoffharzen nimmt mit einem zunehmenden Molverhältnis zwischen Harnstoff und Formaldehyd stärker ab. Ein Einfluss der Härtermenge auf die Abnahme der Verklebungsfestigkeit wurde nicht bewiesen.

Ginzel (1973) simulierte den Temperaturverlauf im Stapel mittels in Folie eingeschweißter Spanplattenstreifen, die im Wärmeschränk auf 100°C erhitzt und dann abgekühlt wurden. Die Abkühlung wurde stufenweise in Anlehnung an eine in der Industrie in einem Spanplattenstapel gemessenen Abkühlungskurve vollzogen.

Tabelle 1: Bestimmung des unlöslichen Anteils von Harnstoffharz in Holzspanplatten sowie Veränderung der Querzugfestigkeit nach Wärmebehandlung (Ginzel 1973).

Plattenart	Feuchte	unlösliche Harzanteile (%) nach 1 h in 60°C Wasser		Verlust an Querzugfestigkeit
		unbehandelt	wärmebehandelt	
Holzspanplatte Gruppe 2	8%	90,2%	63,2%	18,4%
Holzspanplatte Gruppe 1	15%	90,2%	54,1%	40,8%

Die wärmebehandelten Platten zeigten eine deutliche Zunahme des in Wasser löslichen Harzanteils (Tabelle 1). Diese Zunahme war auf eine hydrolytische Zersetzung des UF-Harzes zurückzuführen, die neben der Temperatur auch von der Ausgangsfeuchte der eingestapelten Platten abhängt (Ginzel 1973). Die Untersuchungen zeigten, dass bei den eingestapelten Platten die Querzugfestigkeit abnahm.

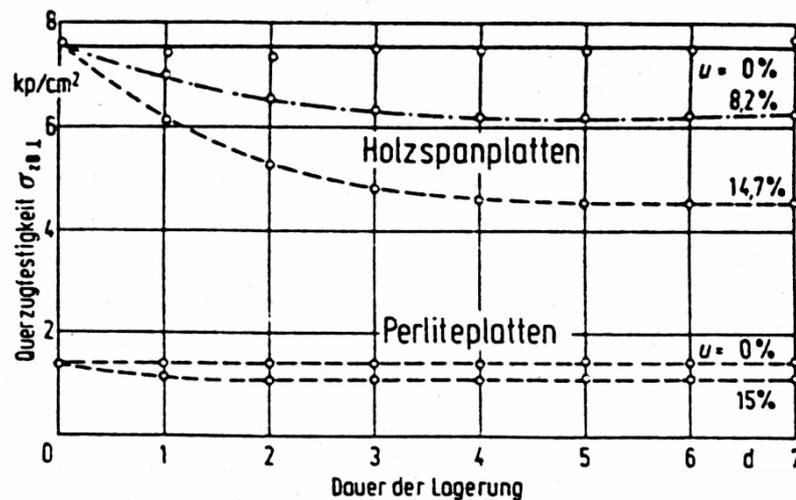


Abbildung 8: Querzugfestigkeit von Holzspanplatten und Harnstoffharzgebundenen Perliteplatten bei unterschiedlichen Temperaturen und bei Temperatureinwirkung (Ginzel 1973).

Den Rückgang der Querzugfestigkeit führte Ginzel (1973) nicht ausschließlich auf die Hydrolyse zurück, sondern zu einem erheblichen Teil auch auf die Quellung und Schwindbewegungen innerhalb des Spanverbundes. Diesen Bewegungen kann das im auskondensierten Zustand sehr spröde Harnstoffharz nicht folgen. Auf diesem Weg entstehen Brüche innerhalb des Span-Leim-Verbundes. Die daraus resultierende schlechtere Verleimungsqualität wirkte sich ebenfalls negativ auf die Querzugfestigkeit aus.

Untersuchungen von Robitschek und Christensen (1976) stellen den Zusammenhang zwischen Abnahme der Querzugfestigkeit und den Lagerbedingungen dar. Bei Temperaturen oberhalb von 105°C nahm die Verklebungsfestigkeit während einer mehrtägigen Stapellagerung merklich ab. Je höher die Temperatur und je höher die Feuchte, umso rascher erfolgte die Abnahme der Querzugfestigkeit (Abbildung 9). Es lag auch ein

Einfluss der Härtermenge vor, der sich allerdings in der Änderung der Festigkeit nicht so stark widerspiegelt, wie die vorgenannten Faktoren. Je höher die Härtermenge, umso größer und umso schneller war die Festigkeitsabnahme bei Lagerbedingungen von 65°C und 70% relativer Luftfeuchte. Der Zeitraum, in der die Querkzugfestigkeit der Platten von der Anfangsfestigkeit ( $\sim 1,7 \text{ N/mm}^2$ ) auf etwa  $0,2 \text{ N/mm}^2$  abnahm, erstreckte sich bis auf nahezu 40 Wochen (Abbildung 10).

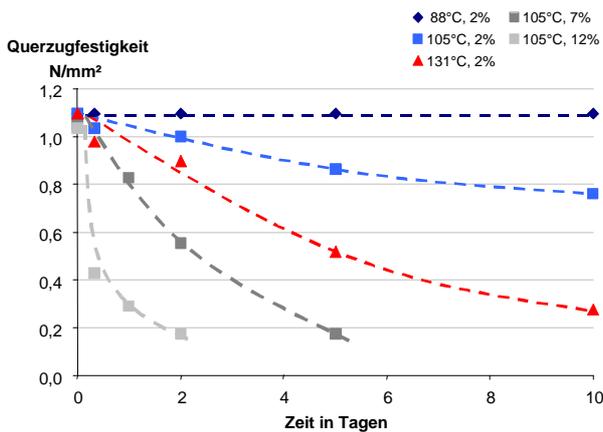


Abbildung 9: Abnahme der Querkzugfestigkeit während mehrtägiger Stapellagerung in Abhängigkeit von der Temperatur und der Feuchte (nach Robitschek und Christensen 1976).

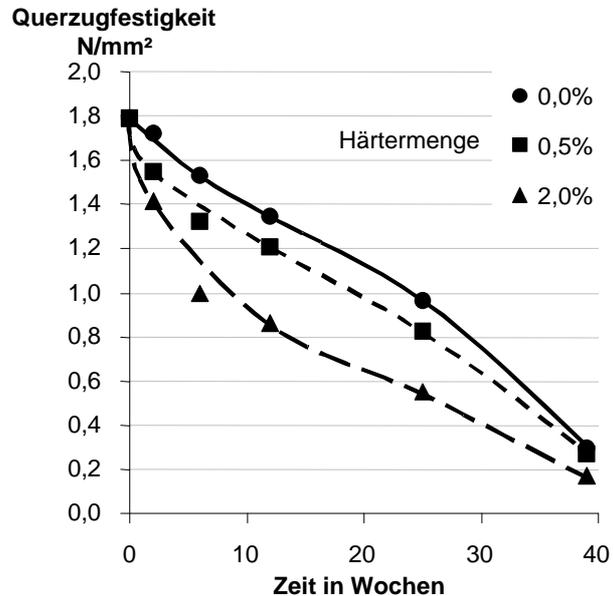


Abbildung 10: Abnahme der Querkzugfestigkeit während mehrwöchiger Stapellagerung in Abhängigkeit von der Härtermenge (nach Robitschek und Christensen 1976).

Aus orientierenden Untersuchungen des Vorgängerprojektes (AiF 10774N) sind folgende Ergebnisse festzuhalten: In einem nach Durchlaufen von Sternwendern gebildeten Stapel (mit etwa  $60^\circ\text{C}$  = "normal eingestapelt") aus 38 mm starken Platten zeigte die Querkzugfestigkeit einen langsamen aber ständigen Anstieg bis zum 5. Tag um ca. 10%. Die eingestapelten Platten mit einer Dicke von 22 mm erreichten bereits innerhalb von 24 Stunden ihr Maximum, das 12% über dem Anfangswert lag. Bei einer warmen Einstapelung (mit etwa  $90^\circ\text{C}$ ) war für beide Plattenstärken innerhalb des ersten Tages eine deutliche Abnahme der Querkzugfestigkeit zu verzeichnen. Danach ließ sich jeweils eine weitgehende Konstanz der Werte beobachten (Abbildung 11).

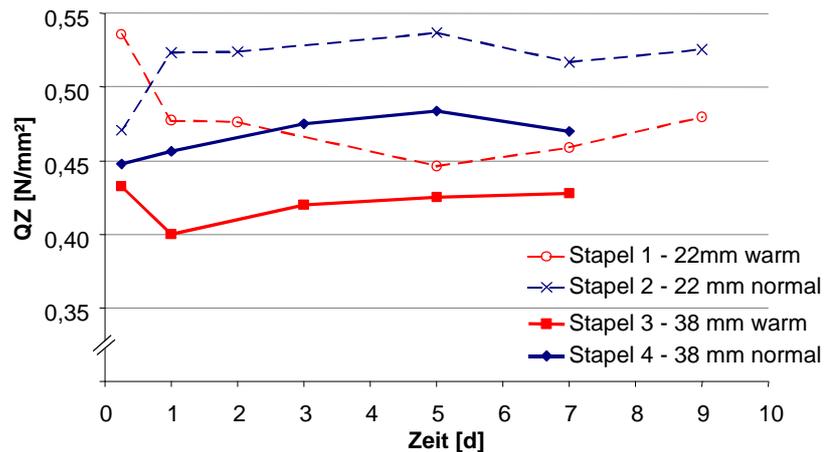


Abbildung 11: Änderung der Querkzugfestigkeit während der Stapellagerung harnstoffharzverleimter Platten (Frühwald et al. 1999).

### *Phenol-Formaldehyd-Harz*

Nach May (1979) ist bei PF-Harz-verleimten Platten durch eine Lagerung bei mindestens 100°C Plattentemperatur eine Erhöhung der Querkzugfestigkeit zu erreichen, da das PF-Harz oberhalb von 100°C weiter auskondensiert. Auch Lambert und Pungs (1978) ermittelten eine Zunahme der Querkzugfestigkeit von phenolharzverleimten Platten bei einer heißen Lagerung im Stapel. Die Zunahme betrug in beiden Fällen 10% bis 20%. Es wurde allerdings darauf hingewiesen, dass die Festigkeitswerte durch die unterschiedlichen Temperaturen über den Stapelquerschnitt sowie vom Rand zur Mitte des Stapels hin in einem unzulässigen Rahmen streuen. Insofern kann nicht von einer gesteuerten Vergütung der Platten gesprochen werden.

### *MUPF- und MUF-Harz*

Wissenschaftliche Untersuchungen, die sich mit der Änderung der Verklebungsfestigkeit von MUPF- oder MUF-Harz-verleimten Holzwerkstoffplatten nach dem Verpressen beschäftigen, liegen nicht vor.

### *Isocyanate*

Roffael und Rauch (1973) haben eine Abnahme der Querkzugfestigkeit von rund 10% innerhalb einer Stunde Lagerung bei 200°C festgestellt. Die V100-Prüfwerte hingegen konnten unter gleichen Bedingungen geringfügig erhöht werden.

### **Abhebefestigkeit**

Nach EN 311 ist die Abhebefestigkeit als die Festigkeit der Deckschicht gegen eine Abhebekraft oder die Bindefestigkeit zwischen den Spänen an der Plattenoberfläche und dem darunter liegenden Material definiert.

In dieser Definition wird deutlich, dass im Prinzip zwei Festigkeiten geprüft werden, die kaum getrennt voneinander zu ermitteln sind: zum einen die Festigkeit der Deckschichtspäne untereinander und zum anderen der Verbund zwischen Deckschicht und Mittelschicht der Spanplatten. Die Decklagenfestigkeit hat einen unmittelbaren Einfluss auf das Stehvermögen von Spanplatten. Bei mangelndem Stehvermögen von Spanplatten kommt es zu Verwerfungen der Platten, z. B. dem Schüsseln. Diesen Verwerfungen können aufgebrauchte Beschichtungen zum Teil nicht folgen und es kommt zum Ablösen des Beschichtungsmaterials. Ist der Verbund zwischen Deck- und Mittelschicht nicht stark genug, kann es zu Ablösungen der Beschichtung mit anhaftender Deckschicht kommen.

Sennebogen (1991) stellte fest, dass die Abhebefestigkeit mit zunehmender Rohdichte und steigendem Feingutanteil in der Deckschicht anstieg, wobei der Einfluss der Rohdichte wesentlich stärker war als der Einfluss des Feingutanteils.

Speziell für Möbelspanplatten, die zu einem sehr großen Teil bei der Weiterverarbeitung mit unterschiedlichen Materialien beschichtet werden, ist die Abhebefestigkeit von großer Bedeutung. Daher gehört die Abhebefestigkeit in der industriellen Produktion zu den im Rahmen der Qualitätskontrolle durchgeführten Tests.

### **Dickenquellung**

Das Maß der Dickenquellung nach 2h erlaubt eine Beurteilung des kurzfristigen Feuchtigkeitsschutzes durch das Hydrophobierungsmittel (Amthor 1972, zitiert in Marutzky und Ranta 1980). Die Ermittlung der Quellung nach 24h dient der Beurteilung der Feuchtebeständigkeit von Spanplatten. Im Rahmen der Produktionsüberwachung werden beide Werte ermittelt. Während der Prüfung wird durch den Quellungsdruck der Späne die Verbindung zwischen Spänen und Leim einer Belastung ausgesetzt. Je nach Güte der Verleimung wird durch diese Belastung die Festigkeit der Spanplatten mehr oder weniger gemindert, somit kommt es zu einer mehr oder weniger starken Quellung des Plattenmaterials.

#### *Harnstoff-Formaldehyd-Harz*

Nach Kehr und Grabitzki (1965) können Spannungen in den Platten durch Temperatureinwirkung abgebaut werden. Spannungen, die durch das Verpressen des Spanmaterials eingeschlossen werden, wirken sich senkrecht zur Plattenebene in Form einer höheren Dickenquellung nach Wasserlagerung aus. In Plattenebene können diese

Spannungen zu Schubspannungen in den Deckschichten oder zwischen Deck- und Mittelschicht führen. Diese Spannungen äußern sich in einer bleibenden Krümmung der Platten (Neußer und Schall 1970).

Während einer Lagerung im Plattenstapel können die Quellwerte von Spanplatten um bis 50% abnehmen (Albrecht 1968). Gleichzeitig war eine Abnahme der Wasserabsorption zu verzeichnen. Nach Albrecht (1968) war die warme Einstapelung von Spanplatten der entscheidende Faktor zur Verminderung der Dickenquellung vor der Zugabe von Paraffinen.

Die Dickenquellung UF-Harz-verleimter Platten ist zu einem Teil auf die Sprödigkeit der Harze zurückzuführen. Durch Quell- und Schwindbewegungen des Holzes während des Feuchteausgleichs können die spröden Leimfugen mechanisch zerstört werden (Ginzel 1973).

Nach Bolton et al. (1989b) haben auch die eingeschlossenen Spannungen in der Platte einen großen Einfluss auf die Dickenquellung. Der Autor kam zu dem Schluss, dass die Dickenquellung um so größer ist je mehr Spannungen in der Spanplatte durch das Verpressen eingeschlossen wurden. Bei einer warmen Lagerung von eingestapelten Platten kann es in Abhängigkeit von der Plattenfeuchte zu einem Spannungsabbau kommen. Dieser Effekt führt zu einer Abnahme der Dickenquellung (Neußer und Schall 1970).

#### *Phenol-Formaldehyd-Harz*

Durch die Einstapelung von PF-Harz-verleimten Platten mit einer Temperatur über 100°C dauert die Vernetzung des Leims bei diesen Platten während der Stapellagerung noch an. Diese fortgesetzte Vernetzung des Harzes führt zu einer Verbesserung der Verleimungsqualität und lässt auf eine Verbesserung der Werte für die Quellung bei einer heißen Lagerung schließen. Lamberts und Pungs (1978) berichteten über eine Abnahme der Dickenquellung um 10% bis 20% bei heißer Einstapelung von Spanplatten und anschließender Lagerdauer im Stapel von 6 Tagen.

#### *MUPF- und MUF-Harz*

Wissenschaftliche Untersuchungen, die sich mit der Änderung der Verklebungsfestigkeit von MUPF- oder MUF-Harz-verleimten Holzwerkstoffplatten nach dem Verpressen beschäftigen, liegen nicht vor.

#### *Isocyanate*

Die Dickenquellung sowohl nach 2 Stunden als auch nach 24 Stunden Diisocyanat verklebter Spanplatten konnte während einer einstündigen Lagerung bei 200°C im Rahmen von Untersuchungen durch Roffael und Rauch (1973) deutlich verringert werden.

### ***Biegeeigenschaften***

### *Harnstoff-Formaldehyd-Harz*

Parallel zur Querkzugfestigkeit untersuchten Shukow und Michailow (1970) sowie Kiosseff (1971) auch die Biegefestigkeit während der Stapellagerung von Spanplatten. In den ersten 24 Stunden stieg die Biegefestigkeit in allen Bereichen des Stapels gleichförmig um etwa 15% an. Danach blieb diese Platteneigenschaft nahezu konstant und nahm nach vier Tagen Lagerzeit für die Platten aus der Mitte des Stapels wiederum ab.

In einer weiteren Untersuchung schilderte Kiosseff (1975), dass die Biegefestigkeit von Spanplatten bereits bei einer kurzzeitigen Einwirkung von hohen Temperaturen bei hoher relativer Luftfeuchte erheblich reduziert wurde. Darüber hinaus stieg die Biegefestigkeit mit zunehmender Konditionierungsdauer bis zu einer gewissen Grenze an.

Untersuchungen von Lu und Pizzi (1998) zeigten, dass der Biegeelastizitätsmodul unabhängig von der Lagertemperatur (zwischen 60 und 100°C) innerhalb von 15 Minuten um 25% anstieg. Änderungen der Biegefestigkeit waren bei höheren Temperaturen nicht erkennbar. Bei einer Lagertemperatur von 60°C wurde die Biegefestigkeit nach Angaben der Autoren innerhalb von 30 Minuten um etwa 12% erhöht.

### *Phenol-Formaldehyd-Harz*

May (1979) wies nach, dass der Einfluss der Zeitspanne zwischen dem Verlassen der Heißpresse und der Einstapelung einen Effekt auf die Biegefestigkeit hat. Die Einstapelung mit höheren Temperaturen führte zu einer deutlichen Erhöhung der Biegefestigkeit. Der Einfluss einer mehr oder weniger starken Abkühlung war bei dem Biege-E-Modul uneinheitlich und von geringer Bedeutung.

### *MUPF- und MUF-Harz*

Wissenschaftliche Untersuchungen, die sich mit der Änderung der Verklebungsfestigkeit von MUPF- oder MUF-Harz-verleimten Holzwerkstoffplatten nach dem Verpressen beschäftigen, liegen nicht vor.

### *Isocyanate*

Nach Untersuchungen von Roffael und Rauch (1973) wurde die Biegefestigkeit von Diisocyanat-verklebten Spanplatten während einer 200°C heißen Lagerung geringfügig negativ beeinflusst.

### 3.2 Zusammenfassende Bewertung der Literaturstudie

- ✓ Die Plattentemperatur im Stapel nimmt recht langsam ab; sie ist insbesondere abhängig von der Einstapeltemperatur und der Stapelgröße. Hohe Temperaturen können auf diese Weise unter besonderen Umständen über einen Zeitraum von einer Woche und länger auf die Platten einwirken.
  
- ✓ Während der Stapellagerung ändert sich die Gesamtfeuchte nicht nennenswert. Die Feuchten der Deck- und Mittelschichten gleichen sich an. Allerdings findet kein vollständiger Ausgleich zwischen den Schichten statt. Selbst nach längerer Lagerung bleibt eine Feuchtedifferenz von 1% bis 2% zwischen Deck- und Mittelschicht bestehen.
  
- ✓ Im allgemeinen ist anzunehmen, dass die Festigkeitseigenschaften der Platten, die mit Harnstoff-Formaldehydharz verleimt sind, während einer Stapellagerung bei erhöhten Temperaturen vermindert werden. Dies ist auf die Hydrolyse zurückzuführen, die auf das Harz bei hohen Temperaturen wirkt. Die Hydrolyse wirkt verstärkt bei hoher Feuchte, Lagerdauer und Säuregrad. Aus diesem Grund werden Harnstoff-Formaldehydharz-verleimte Platten vor dem Einstapeln auf eine Temperatur von 60°C bis 70°C abgekühlt.
  
- ✓ Phenol-Formaldehydharz-verleimte Spanplatten werden mit hoher Temperatur eingestapelt, um eine weitere Vernetzung des Harzes nach dem Verpressen der Platte zu erzielen, um so die Festigkeitswerte ohne hohen wirtschaftlichen Aufwand zu erhöhen.
  
- ✓ Die Werte der Dickenquellung werden sowohl für harnstoff- als auch für phenol-formaldehydharzverleimte Platten durch eine Lagerung im Stapel deutlich vermindert.
  
- ✓ Wissenschaftliche Untersuchungen über MUF- oder MUPF-Harze unter Lagerbedingungen liegen derzeit nicht vor.

### 3.3 Problemstellung

- ✓ Grundlegende Untersuchungen zu dem Thema "Stapellagerung von Holzwerkstoffen" liegen über 30 Jahre zurück.
  
- ✓ Die Produktionstechnologie hat sich seit dieser Zeit stark verändert. Beispielsweise sei die Entwicklung und der Einsatz von kontinuierlichen Pressensystemen zu nennen, mit deren Hilfe viel höhere Produktionsgeschwindigkeiten erreicht werden können. Mit kürzeren Presszeiten ändert sich gleichzeitig der Zustand der Platte nach dem Verpressen (z.B. Kondensation, Verdichtung), somit ist auch ein verändertes Nachreifungsverhalten während der Stapellagerung zu erwarten.
  
- ✓ In der heutigen Zeit werden Leimsysteme mit einer anderen Zusammensetzung eingesetzt. Das Molverhältnis der Harnstoff-Formaldehydharze ist merklich vermindert worden. Es werden strengere Anforderungen an die Formaldehydemissionen gestellt. Für spezielle Plattentypen werden Anteile an Melamin den Harnstoffharzen zugegeben. Auch die Phenol-Formaldehydharze wurden weiterentwickelt, um eine schnellere Aushärtung in der Presse zu erreichen.
  
- ✓ Veränderungen durch die Stapellagerung von anderen Holzwerkstoffen als Spanplatten sind nicht in der Literatur beschrieben. Handlungsanweisungen für MDF und OSB beruhen dementsprechend auf wissenschaftlichen Untersuchungen an Spanplatten.

## **4 Forschungsziel, Ergebnisse und Lösungsweg**

### **4.1 Forschungsziel**

Ziel des Forschungsvorhabens ist es, die Verbesserung der Platteneigenschaften durch die Stapellagerung nach dem Heißpressen systematisch zu untersuchen und im Hinblick auf eine gezielte Nutzung zu optimieren.

### **4.2 Angestrebte Forschungsergebnisse**

Das Verhalten verschiedener Klebstoffsysteme während der Stapellagerung wird eingehend untersucht, wobei besonderes Augenmerk auf "neue" Klebstoffsysteme (z.B. Harnstoff-Formaldehydharze mit geringem Molverhältnis und Melaminmischharze sowie modifizierte Phenolformaldehydharze) und auf die Entwicklung der durch die Mittelschicht beeinflussten Eigenschaften (v.a. Querkzugfestigkeit, Dickenquellung) gerichtet wird.

Im Rahmen von Voruntersuchungen wird ein Gerät entwickelt, mit dem im Labormaßstab ein Industriestapel nachgestellt werden kann.

Der Einfluss wichtiger Rohstoff- und Prozessparameter auf die Nachreifung wird durch Variation von Mattenfeuchte, Festharzgehalt, Härteranteil und Pressfaktor untersucht.

Die Bedingungen der Einstapelung werden in größeren Spannweiten variiert. Hierdurch kann festgelegt werden, welche maximalen Temperaturen bei der Stapelung vorherrschen dürfen, um Hydrolyse zu vermeiden. Des Weiteren kann festgestellt werden, welche Temperaturen und welche Dauer der Stapelung zu einer maximalen Verbesserung der Platteneigenschaften führen.

Mit Hilfe der erzielten Untersuchungsergebnisse werden konkrete Vorschläge für Anpassungen der genannten Faktoren zur gezielten Nachreifung im Plattenstapel, insbesondere für langsam härtende Klebstoffe (z.B. Phenolharz, MUF, MUPF), erarbeitet.

### **4.3 Lösungsweg**

Zur Untersuchung einer großen Variation von Klebstoffsystemen, Prozessparametern und Stapelbedingungen werden zunächst Laborversuche durchgeführt, um wesentliche Einflussfaktoren für die Industrierversuche einzuschränken. Im Anschluss werden zur Verifizierung der Ergebnisse und zur gezielten Nachreifung im Plattenstapel umfangreiche Versuche in der Industrie durchgeführt.



### 5.1.2 Methoden

Über einen Zeitraum von einer Woche wurden in definierten Abständen Proben aus dem Stapel entnommen. Parallel wurde die Temperatur innerhalb der Stapel an mehreren Stellen aufgezeichnet. Dazu wurden Thermoelemente in verschiedenen Positionen des Stapels jeweils zwischen zwei Platten eingebracht.

Über einen Zeitraum von mehr als einer Woche wurden in definierten Abständen Probestreifen aus dem Stapel entnommen. Aus diesen Probestreifen, die quer zur Produktionsrichtung orientiert waren, wurden bis zu fünf Proben zur Feuchtebestimmung ausgeformt. Die Position der Proben war gleichmäßig über die Breite der Platten verteilt. Die Proben wurden mit Hilfe eines scharfen Messers unmittelbar nach der Entnahme in zwei Deck- sowie eine Mittelschicht aufgespaltet. An den einzelnen Schichten wurde die Feuchte mittels Darrmethode (EN 322) ermittelt.

### 5.1.3 Temperatur im Plattenstapel

In Abbildung 13 sind die Temperaturen der mit normaler sowie erhöhter Temperatur eingestapelten UF-Platten (22 mm und 38 mm) über einen Zeitraum von einer Woche dargestellt. Zu Beginn der Einstapelung liegt die Temperatur in Stapelmitte für die bei normaler Temperatur eingestapelten Platten zwischen 60°C und 70°C. Innerhalb von sieben Tagen kühlt der Stapel langsam ab, die Temperatur sinkt währenddessen in der Stapelmitte um ca. 30°C. Im oberen Bereich des Stapels erreicht die Temperatur bereits nach etwa 48 Stunden die Umgebungstemperatur. Werden die Platten mit einer Temperatur von 90 bis 100°C eingestapelt, so liegt die Temperatur noch nach einer Woche bei über 45°C. Im oberen Bereich des Stapels unterscheiden sich die Temperaturverläufe nur geringfügig.

Die Kurven (Abbildung 13) zeigen zu Beginn der Lagerung zunächst einen Anstieg der Temperatur in der Mitte des Stapels. Dies ist auf folgenden Umstand zurückzuführen: Die Deckschicht kühlt deutlich rascher als die Mittelschicht ab, nachdem die Platten die Heißpresse verlassen haben (Ohlmeyer 1997). Bereits beim Einstapelvorgang liegt die Deckschichttemperatur unter der Temperatur der Mittelschicht. Die Kontaktthermoelemente wurden zwischen den Platten in den Stapel eingebracht. Daher wird hier auch die Erwärmung der kühleren Deckschicht durch die wärmere Mittelschicht erfasst.

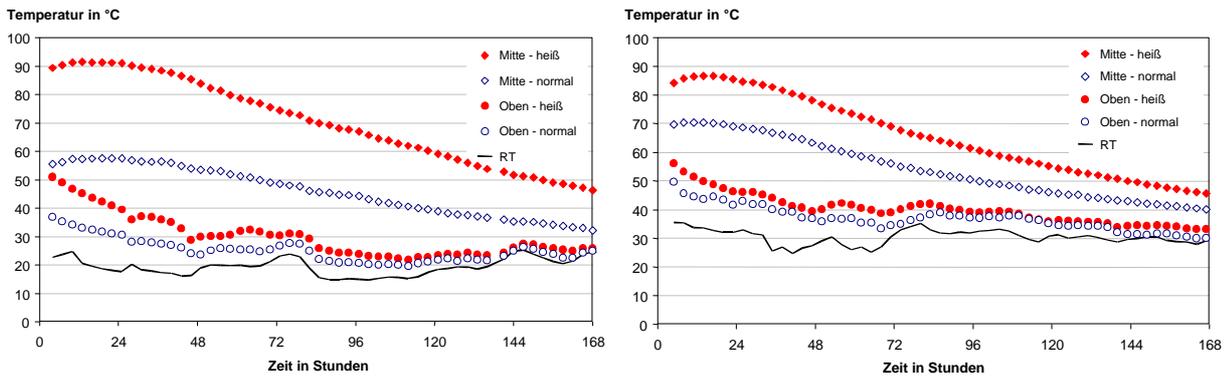


Abbildung 13: Temperaturen während der Stapellagerung (UF-Platten bei normaler und hoher Einstapeltemperatur).

links: 22 mm Platten

rechts: 38 mm Platten

#### 5.1.4 Feuchteverteilung im Plattenstapel

In Abbildung 14 ist die Änderung der Feuchte der UF-Platten (22 mm und 38 mm) während der Stapellagerung über einen Zeitraum von einer Woche dargestellt. Ausgehend von einer Gesamtfeuchte um 5% unmittelbar nach Verlassen der Heißpresse, nimmt die Feuchte auf etwa 6% bis zur ersten Entnahme der Proben nach sechs Stunden aus dem Stapel zu. Während der weiteren Lagerung erfolgt nur noch eine geringfügige Änderung der Gesamtfeuchte.

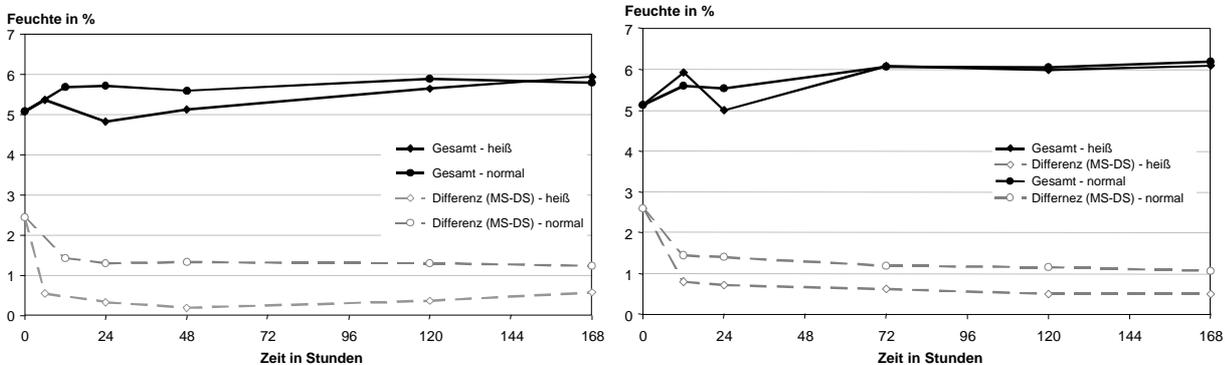


Abbildung 14: Änderung der Feuchte von UF-Platten während der Lagerung.

links: 22 mm

rechts: 38 mm

Bevor die Platten eingestapelt wurden, betrug die Differenz zwischen Deck- und Mittelschichtfeuchte etwa 2,5%. Bei den 22 mm-Platten nahm diese Differenz bereits nach 12 Stunden Lagerzeit auf 0,5% (heiß eingestapelt) und auf 1,5% (normal eingestapelt) ab. Im weiteren Verlauf der Lagerung war keine signifikante Änderung der Differenz nachweisbar. Die 38 mm-Platten wiesen ein ähnliches Verhalten auf: Die Feuchtedifferenz zwischen Deck- und Mittelschicht sank bei heißer Einstapelung auf 0,9% und bei normaler Einstapelung auf 1,5%. Darüber hinaus reduzierte sich die Differenz deutlich langsamer auf einen Wert von etwa 0,5% bzw. 1%.

## 5.2 Stapelsimulation unter Laborbedingungen

Für die Simulation der Stapellagerung im Labor wurde einem Wärmeschrank ähnliches Behältnis benutzt. Um eine gezielte Temperaturführung zu erreichen, ist die Apparatur mit regelbaren Heizelementen versehen. Es können Platten in Abmessungen bis zu 500 x 500 mm<sup>2</sup> eingebracht werden. Die maximale Stapelhöhe beträgt 550 mm. Mit Hilfe einer Beschwerung können Stapelhöhen bis zu 1 m simuliert werden.

### **Überprüfung und Adaption der Apparatur**

Um nachzuweisen, dass eine industrielle Stapellagerung mit der Apparatur simuliert werden kann, wurden in Vorversuchen vergleichende Untersuchungen an Industriestapeln und der Stapelsimulation durchgeführt. Für die Untersuchungen wurden phenolharzverleimte Spanplatten gewählt, da diese deutliche Eigenschaftsveränderungen während der Stapellagerung zeigen und somit besonders für diese Zwecke geeignet sind.

Bei diesem Versuch mussten die Eigenschaftsschwankungen von Spanplatten quer zur Produktionsrichtung eliminiert werden. Zu diesem Zweck wurden 500 x 500 mm<sup>2</sup> große Probepplatten in Längsrichtung der Produktion entnommen. Es ist bekannt, dass die Eigenschaftsschwankungen längs der Produktionsrichtung kleiner sind als quer zur Produktionsrichtung. Die Probepplatten wurden 500 mm vom Produktionsrand aus drei direkt aufeinander folgenden Platten (Größe: 5.200 x 2.070 mm<sup>2</sup>) entnommen. Die produktionsbedingten Schwankungen der Platteneigenschaften wurden so auf einen Bereich von 15 m längs der Produktionsrichtung beschränkt. Zwei der Platten wurden in der Apparatur gelagert und für die Stapelsimulation genutzt, während die dritte Platte im Produktionsprozess verblieb und im industriellen Stapel gelagert wurde.

Die im Prozess verbliebene Platte lagerte in der Mitte eines 70 cm hohen Stapels, wobei deren Temperatur über einen Zeitraum von sechs Tagen nach dem Pressen aufgezeichnet wurde. Aus diesem Stapel wurden nach jeweils 12, 24, 48, 96 und 144 Stunden Proben entnommen, an denen die Dickenquellung, die Querkzugfestigkeit und die Feuchte ermittelt wurden.

Zeitgleich zu dem untersuchten Industriestapel wurden die in der Apparatur eingelagerten Platten geprüft. Die Temperatur des Industriestapels wurde kontinuierlich mit Thermoelementen erfasst. Es wurde versucht, die Temperatur des Industriestapels in der Apparatur nachzufahren. In Abbildung 15 sind die jeweiligen Temperaturverläufe gegenübergestellt, wobei sich die Temperaturniveaus um maximal 9°C unterscheiden. Die Temperaturunterschiede wurden in nachfolgenden Untersuchungen minimiert und betragen dann maximal 2°C.

Von den in der Apparatur eingelagerten Platten wurden nach zwei, vier und sechs Tagen Proben entnommen, an denen ebenfalls die Dickenquellung, die Querkzugfestigkeit und die Feuchte ermittelt wurde.

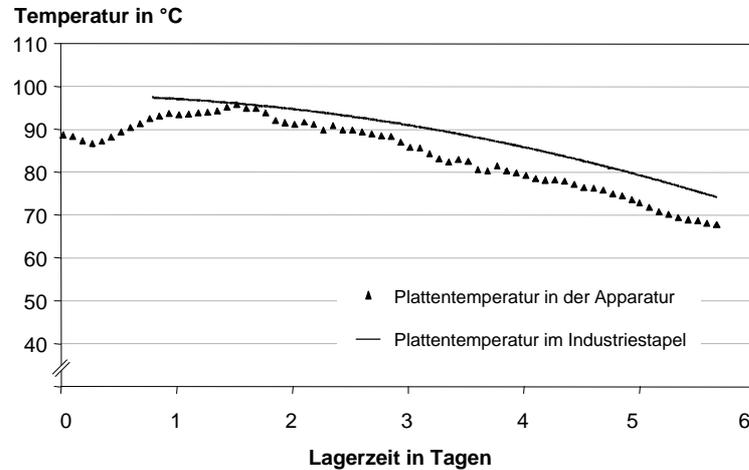


Abbildung 15: Änderung der Plattentemperatur im Industriestapel und im simulierten Stapel.

Die Ergebnisse zeigen, dass in der Apparatur gelagerte Platten ähnliche Änderungen der Eigenschaften aufweisen, wie die im Industriestapel gelagerte Platte (Abbildung 16). Insbesondere ist bei der Querkzugfestigkeit in beiden Fällen ein nahezu identischer Anstieg über sechs Tage zu verzeichnen. Auch die Dickenquellung zeigt unter beiden Lagerbedingungen eine deutliche Verbesserung. Allerdings ist die Abnahme der Dickenquellung der Platten in der Apparatur nicht so deutlich ausgeprägt. Diese Abweichung ist auf die unterschiedliche Entwicklung der Feuchte bei den beiden Lagerarten zurückzuführen, da die Proben ohne Klimatisierung unmittelbar nach der Entnahme geprüft wurden: Während die Feuchte der Platten aus dem Industriestapel nahezu konstant um 6% verblieb, nahm die Plattenfeuchte in der Apparatur während der Lagerung um etwa 1,5% ab. Im Zuge der weiteren Untersuchung wurden Maßnahmen ergriffen, den Feuchteverlust der Platten während der Lagerung in der Apparatur zu minimieren.



Aufgrund der Ergebnisse der Vorversuche und der Tatsache, dass es möglich war, die Platten in den simulierten Stapelbedingungen auszusetzen, die zu einer Hydrolyse des Leims führten, wird geschlossen, dass in der Apparatur und in einem Industriestapel vergleichbare Zustände herrschen. Somit können im Labor Holzwerkstoffplatten einer industrienahen Stapellagerung ausgesetzt werden.

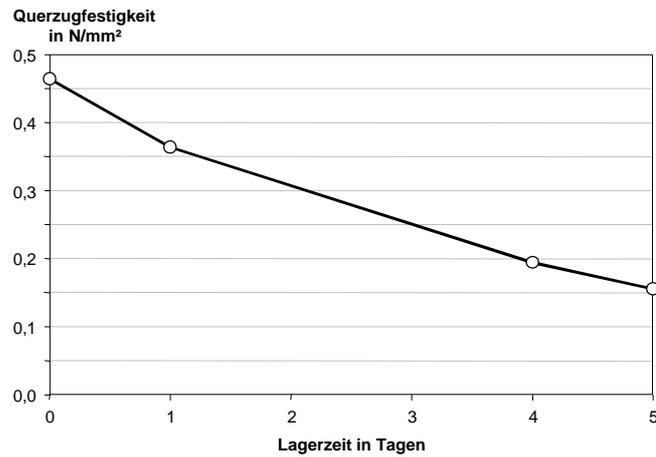


Abbildung 17: Abnahme der Querzugfestigkeit unter extremen Lagerbedingungen.

## 6 Hauptversuche im Labor

Im Rahmen der Labor-Hauptversuche wurden dreischichtige Spanplatten in vier Versuchsreihen hergestellt. In der ersten und zweiten Versuchsreihe wurden Spanplatten mit verschiedenen UF-Harzen analysiert. Die dritte Versuchsreihe bestand aus jeweils einem Sortiment an MUF- und MUPF-Leimen. In der vierten Versuchsreihe fanden zwei PF-Harzkompositionen Verwendung.

### 6.1 Material

In der ersten Versuchsreihe wurden Spanplatten mit einem konventionellen E1-Standardleim verpresst. In einer zweiten Versuchsreihe wurden Spanplatten mit einem Versuchsleim hergestellt, der ein Molverhältnis zwischen Harnstoff und Formaldehyd von 1 : < 1,0 aufwies. Die übrigen Herstellparameter waren gleich. Im Labor wurden insgesamt 60 UF-verklebte Spanplatten angefertigt und anschließend einer Stapellagerung unterzogen.

Eine weitere Versuchsreihe wurde mit konventionellem MUF- und MUPF-Harzen durchgeführt. Zudem fanden zwei PF-Harzkompositionen Verwendung. Es wurden insgesamt 8 MUF-, 8 MUPF- und 12 PF-verklebte Spanplatten angefertigt und anschließend einer Stapellagerung unterzogen.

#### 6.1.1 Spanmaterial

Für die Laborspanplatten wurde industriell hergestelltes Spanmaterial verwendet. Im Prozess des Herstellers wurde als Rohstoff sowohl Frisch- als auch Altholz eingesetzt. Die Späne wurden nach der Trocknung, jedoch vor der Beileimung, entnommen.

Zur näheren Charakterisierung der Späne wurde eine Siebfraktionierung für das Deck- und Mittelschichtmaterial durchgeführt. Die dargestellten Ergebnisse sind Mittelwerte aus drei Messungen. Dabei wurde eine für industriell hergestelltes Spanmaterial charakteristische Häufigkeitsverteilung festgestellt (Abbildung 18).

Die Feuchte der Deckschichtspäne betrug vor der Beileimung im Mittel 3%, die der Mittelschichtspäne 2%. Aus den beiden Spansortimenten wurden dreischichtige Platten (Solldichte 650 kg/m<sup>3</sup>) hergestellt.

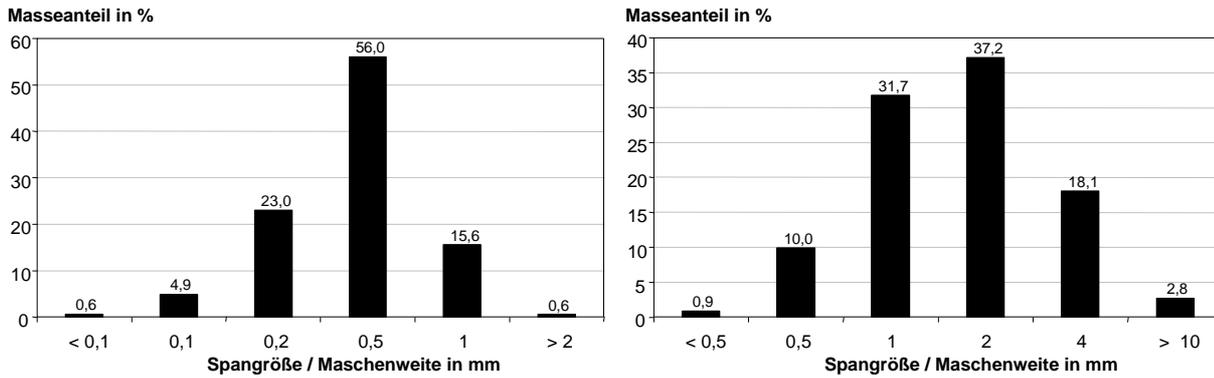


Abbildung 18: Siebfraktionen des verwendeten Spanmaterials.

links: Deckschichtspäne

rechts: Mittelschichtspäne

## 6.1.2 Klebharze

### 6.1.2.1 UF-Harze

In der ersten Versuchsreihe wurde ein industriell etabliertes E1-Standardharz eingesetzt. Die Kenndaten der verwendeten Charge sind Tabelle 3 zu entnehmen.

Tabelle 3: Analytische Kenndaten des Standardharzes.

Molverhältnis	F:U > 1
Dichte	1,3 g/cm <sup>3</sup>
Viskosität bei 20°C	500 mPa s
Feststoffgehalt	68%

In einer zweiten Versuchsreihe wurde ein formaldehydreduziertes Versuchsharz verwendet (Molverhältnis F:U < 1). Dieses Harz wurde speziell für diese Untersuchung produziert. Es war mit dem Standardprodukt hinsichtlich der übrigen Parameter direkt vergleichbar. In Tabelle 4 sind die Kenndaten dieses Produkts aufgeführt.

Tabelle 4: Analytische Kenndaten des Versuchsharzes.

Molverhältnis	F:U < 1
Dichte	1,3 g/cm <sup>3</sup>
Viskosität bei 20°C	423 mPa s
Feststoffgehalt	68%

Alle folgenden Konzentrationsangaben beziehen sich auf Gewichtsverhältnisse. Die Leimmenge wird angegeben in Festharzmenge bezogen auf das absolut trockene (atro) Spangewicht. Die Paraffinzugabe bezieht sich ebenfalls auf atro Späne. Die Härtermenge bezieht sich auf den Trockengehalt des Leims.

Bei der Beleimung der Deckschicht wurden dem Leim 0,5% Ammoniumnitrat als Härter zugegeben. Die Härtermenge der Mittelschicht wurde zwischen 0,5% und 1,5% variiert. Der

Deckschicht und der Mittelschicht wurden jeweils 0,5% Paraffinemulsion (Mobilcer 730) als Hydrophobierungsmittel zugegeben (Tabelle 5).

Variiert wurde die Mattenfeuchte der Deckschicht vor dem Verpressen in den Stufen 10, 14 und 18% sowie der Presszeitfaktor zwischen 7, 9 und 12 s/mm. Die Temperatur zu Beginn der Stapelung wurde mit 60°C und 75°C gewählt (Tabelle 6).

Tabelle 5: Konstante Herstellparameter der UF-Platten.

<b>Konstante Parameter</b>	<b>Einstellung</b>
Mittelschichtfeuchte	8 %
Festharzgehalt DS	10 %
Festharzgehalt MS	8 %
Härter in der DS	0,5 %
Presstemperatur	220°C
Nenn-dichte	650 kg/m <sup>3</sup>
Paraffinzugabe DS und MS	0,5 %

Tabelle 6: Variierte Herstellparameter der UF-Platten.

<b>Varierte Parameter</b>	<b>Stufen</b>
Deckschichtfeuchte	10%, 14%, 18 %
Härter in der MS	0,5%, 1,5%, 3 %
Presszeitfaktor	7 s/mm, 9 s/mm, 12 s/mm
Einstapeltemperatur	60°C, 75°C

### 6.1.2.2 MUF- und MUPF-Harze

Für diese Versuchsreihe wurde ein MUF- sowie ein MUPF-Harz verwendet. Die analytischen Kenndaten der verwendeten Chargen sind in Tabelle 7 dargestellt. Bei beiden Harzen handelt es sich um in der Industrie etablierte Produkte.

Tabelle 7: Analytische Kenndaten des MUF- und MUPF-Harzes.

Dichte	1,3 g/cm <sup>3</sup>
Viskosität bei 20°C	300 mPa s
Feststoffgehalt, MUF	65%
Feststoffgehalt, MUPF	64,5%

Bei der Beleimung der Deckschicht wurden dem jeweiligen Leim 0,5% Ammoniumnitrat als Härter zugegeben. Die Härtermenge der Mittelschicht wurde zwischen 2% und 4% variiert. Der Deckschicht und der Mittelschicht wurden jeweils 0,5% Paraffin in Form einer Emulsion (Mobilcer 730) als Hydrophobierungsmittel zugegeben.

Der Presszeitfaktor wurde zwischen 7 und 9 Sekunden je Millimeter Plattenstärke variiert, die Einstapeltemperatur wurde auf 75°C und 100°C festgelegt (Tabelle 8 und Tabelle 9).

Tabelle 8: Konstante Herstellparameter der MUF- und MUPF-Platten.

<b>Konstante Parameter</b>	<b>Einstellung</b>
Mittelschichtfeuchte	9%
Deckschichtfeuchte	12%
Festharzgehalt DS	10%
Festharzgehalt MS	8%
Presstemperatur	220°C
Nennichte	650 kg/m <sup>3</sup>
Paraffinzugabe DS und MS	0,5%

Tabelle 9: Variierte Herstellparameter der MUF- und MUPF-Platten.

<b>Varierte Parameter</b>	<b>Stufen</b>
Härter in der MS	2%, 4%
Presszeitfaktor	7 s/mm, 9 s/mm
Einstapeltemperatur	75°C, 100°C

### 6.1.2.3 PF-Harze

Für die Herstellung von PF-verklebten Spanplatten wurden zwei Harzkombinationen ausgewählt: Die erste Harzkombination (1) bestand aus einem konventionellen Deckschichtharz und einem unmodifizierten PF-Harz als Leim für die Mittelschicht. Die zweite Harzkombination (2) setzte sich aus dem gleichen Deckschichtharz und einem modifizierten Harz für die Mittelschicht zusammen. Diese PF-Harze sind aktuelle Produkte der industriellen Spanplattenproduktion. Die Analysenwerte der verwendeten Chargen sind Tabelle 10, Tabelle 11 und Tabelle 12 zu entnehmen.

Tabelle 10: Analytische Kenndaten des PF-Deckschichtharzes.

Alkaligehalt	2,8%
Dichte	1,2 g/cm <sup>3</sup>
Viskosität bei 20°C	250 mPa s
Feststoffgehalt	45%

Tabelle 11: Analytische Kenndaten des unmodifizierten PF-Mittelschichtharzes.

Alkaligehalt	8,3%
Dichte	1,23 g/cm <sup>3</sup>
Viskosität bei 20°C	800 mPa s
Feststoffgehalt	48%

Tabelle 12: Analytische Kenndaten des modifizierten PF-Mittelschichtharzes.

Alkaligehalt	5,2 %
Dichte	1,3 g/cm <sup>3</sup>
Viskosität bei 20°C	300 mPas
Feststoffgehalt	58,5%

Dem Deckschichtharz wurde kein Härter zugegeben. Dem Mittelschichtharz der Kombination (1) wurde 5% Pottasche als Beschleuniger beigelegt. Das Mittelschichtharz der Kombination (2) wurde mit 5% Pottasche und 9,2% Natronlauge versetzt. Der Deckschicht und der Mittelschicht wurden jeweils 1% Paraffin in Form einer Emulsion (Mobilcer 730) als Hydrophobierungsmittel zugegeben (Tabelle 13).

Variiert wurde der Presszeitfaktor zwischen 9 und 12 Sekunden je Millimeter Plattenstärke sowie die Einstapeltemperatur zwischen 80°C und 110°C. Alle übrigen Parameter blieben konstant (Tabelle 14).

Tabelle 13: Konstante Herstellparameter der PF-Platten.

<b>Konstante Parameter</b>	<b>Einstellung</b>
Mittelschichtfeuchte	10%
Deckschichtfeuchte	12%
Festharzgehalt DS	10%
Festharzgehalt MS (1)	8%
Härter in der MS (1)	5% Pottasche
Festharzgehalt MS (2)	9,2%
Härter in der MS (2)	5% Pottasche 8% Natronlauge
Pressplattentemperatur	220°C
Nennichte	650 kg/m <sup>3</sup>
Paraffinzugabe DS und MS	1%

Tabelle 14: Variierte Herstellparameter der PF-Platten.

<b>Varierte Parameter</b>	<b>Stufen</b>
Presszeitfaktor	9 s/mm, 12 s/mm
Einstapeltemperatur	80°C, 95°C, 110°C

## 6.2 Methoden

### 6.2.1 Herstellung der Spanplatten

Um eine gleichmäßige Durchwärmung auch des Randbereichs zu erreichen, wurde mit einem überstreuten Rand gearbeitet. Um den Spankuchen herum wurde ein 2 cm breiter Rand aus beleimten Deckschichtspänen gestreut. Durch eine höhere Dichte in dieser Zone wurde der Wärmeverlust am Rand des Spankuchens minimiert. Dadurch konnte ein größerer Teil der Platte für Probenzwecke genutzt werden.

Es wurden Platten mit einer Dicke von 19 mm und in der Abmessung 700 x 550 mm<sup>2</sup> hergestellt. Diese Platten wurden unmittelbar nach dem Verpressen in sechs gleiche Segmente geteilt. Um eine undefinierbare Temperaturbeeinflussung der Platten bei einer Aufteilung mit einer Säge zu verhindern, wurden beim Streuen der Platten Hartfaserstreifen eingelegt, durch die Sollbruchstellen erzeugt wurden. Die Platten konnten auf diese Weise direkt nach dem Pressen innerhalb kurzer Zeit entlang der Hartfaserstreifen gebrochen werden (Abbildung 19).

Um sicherzustellen, dass die 6 Teilplatten tatsächlich untereinander vergleichbar sind, wurde in Vorversuchen eine Platte hergestellt, deren 6 Teilplatten vollständig in 50 x 50 mm<sup>2</sup> große Proben aufgeteilt wurden. An diesen Proben wurde die Verteilung der Rohdichte über die Platte ermittelt. Dabei wurde festgestellt, dass die Variationskoeffizienten der einzelnen Teilplatten

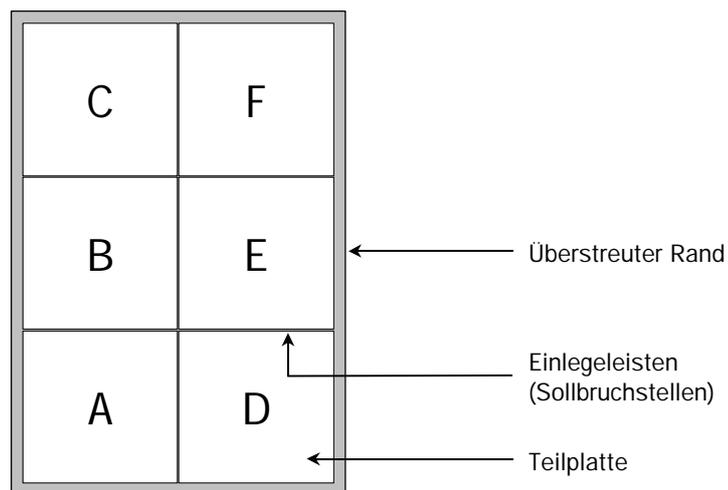


Abbildung 19: Aufteilung der Platten mit überstreutem Rand.

mit einem Wert unter 5% in einer akzeptablen Größenordnung lagen. Eine Betrachtung der Gesamtplatte ergab eine Streuung der Dichtewerte in der selben Größenordnung. Es war festzustellen, dass die Rohdichte auch in den Randbereichen der jeweiligen Teilplatten nicht absank und auch nicht stärker variierte als über die gesamte Platte.

### 6.2.2 Lagerung

Die im Labor hergestellten Spanplatten wurden direkt nach dem Pressen mit zwei unterschiedlichen Temperaturen in der Apparatur eingelagert. Mit gleichen Herstellparametern gefertigte Platten wurden bei 60°C und 75°C Einstapeltemperatur gelagert. Während der maximal 72 Stunden dauernden Lagerung wurde in der Apparatur die Abkühlkurve eines Industriestapels imitiert. Die Temperaturkurve einer simulierten Stapellagerung ist in Abbildung 20 dargestellt. Um eine größere Auslastung der Apparatur zu erreichen, wurden zunächst die Platten mit einer Einstapeltemperatur von 75°C eingelagert. Nach 48 Stunden betrug die Temperatur im Plattenstapel 60°C. Zu diesem Zeitpunkt wurden dann die Platten mit einer Einstapeltemperatur von 60°C in die Apparatur eingebracht.

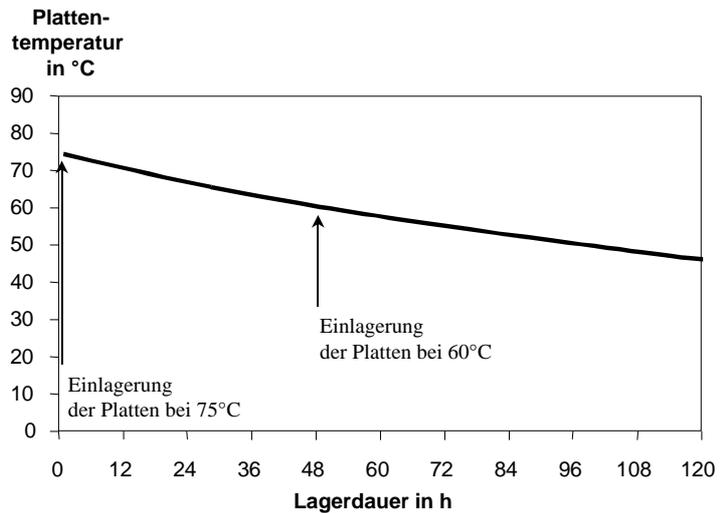


Abbildung 20: Temperaturkurve der simulierten Stapellagerung.

Für die jeweiligen Entnahmezeitpunkte ergaben sich folgende Temperaturen:

Tabelle 15: Plattentemperaturen bei Entnahme aus dem simulierten Stapel.

<i>Lagerdauer in Stunden</i>	<i>Einstapeltemperatur 75°C Plattentemperatur bei der Entnahme in °C</i>	<i>Einstapeltemperatur 60°C Plattentemperatur bei der Entnahme in °C</i>
6	73	58
12	70	57
24	67	55
72	57	47

### 6.2.3 Probennahme

Die Teilplatte A wurde unmittelbar nach dem Pressen bei freier Luftumspülung innerhalb von 60 Minuten auf Raumtemperatur abgekühlt, die Proben laut Schnittplan ausgeformt (Abbildung 21) und dann geprüft. Wie Ohlmeyer (1997) nachwies, besteht während der Abkühlung nach dem Verpressen ein enger Zusammenhang zwischen der Plattentemperatur und den Platteneigenschaften. Dadurch, dass die Platten immer auf die gleiche Weise auf Raumtemperatur abgekühlt wurden, konnte ausgeschlossen werden, dass die Prüfergebnisse durch unterschiedliche Temperaturen der Proben beeinflusst wurden. Die Sofortprüfungen umfassten die Ermittlung der Deck- und Mittelschichtfeuchte sowie der Querkzugfestigkeit, der Dickenquellung nach 24 Stunden Wasserlagerung und des Rohdichteprofiles. Für die Soforttests wurde ein fester Zeitplan eingehalten, so dass die Vergleichbarkeit der Werte nicht durch unterschiedliche Abkühlzeiten beeinträchtigt wurde. Die Teilplatte B wurde ohne vorherige Stapellagerung klimatisiert. Die übrigen Platten wurden nach folgendem Schema aus dem Stapel entnommen:

Tabelle 16: Entnahmezeitpunkte der UF-Platten

<i>Teilplatte</i>	<i>Lagerdauer in Stunden</i>
A	Soforttest
B	0
C	6
D	12
E	24
F	72

Nach der Entnahme aus der Apparatur wurden die Platten im Normklima bis zur Gewichtskonstanz klimatisiert und dann gemäß Schnittplan zu Proben ausgeformt und geprüft (Abbildung 21).

<b>Ab 1</b>	<b>QZ 1</b>	<b>u 1</b>	<b>QZ 1</b>
<b>u 2</b>	<b>Ab 2</b>	<b>QZ 2</b>	<b>FA</b> <b>Q1</b>
<b>FA Q3</b>	<b>FA</b>	<b>FA Q3</b>	<b>FA</b>
<b>QZ 4</b>	<b>Ab 3 DP</b>	<b>u 3</b>	<b>QZ 5</b>

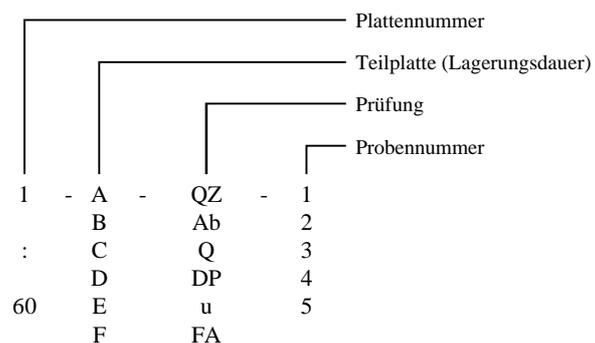


Abbildung 21: Schnittplan (links) und Probenbezeichnung (rechts) für UF-Platten.

wobei:

Ab:	Abhebefestigkeit
QZ:	Querzugfestigkeit
u:	Feuchte
Q:	Dickenquellung
FA:	Formaldehydprüfung
DP:	Rohdichteprofil

#### 6.2.4 Prüfmethoden

Die Querzugfestigkeit wurde in Anlehnung an EN 319 ermittelt. Die Abhebefestigkeit wurde in Anlehnung an EN 311, die Quellung nach 24 Stunden in Anlehnung an DIN 52 364 bestimmt.

Der Formaldehydgehalt wurde in Anlehnung an EN 120 nach der Perforatormethode photometrisch ermittelt. Aufgrund des begrenzten Probenmaterials wurde für die Prüfungen anstatt der in EN 120 geforderten Menge von 110g pro Bestimmung nur eine Probenmasse von durchschnittlich 70 g genutzt.

Die Rohdichteprofile wurden mit Hilfe eines Dichtemessgerätes der Firma Raytec (Gammastrahler) ermittelt.

## 6.2.5 Anpassungen für MUF-, MUPF- und PF-Platten

### 6.2.5.1 Herstellung der Spanplatten

Die Platten wurden mit einer Dicke von 19 mm nach dem gleichen Prinzip hergestellt, wie es in Kapitel 6.2.1 beschrieben wurde. Lediglich das Plattenmaß (750 x 550 mm<sup>2</sup>) und die Abmessung der Teilplatten (250 x 275 mm<sup>2</sup>) wurden vergrößert. Der Schnittplan wurde entsprechend angepasst (Abbildung 22).

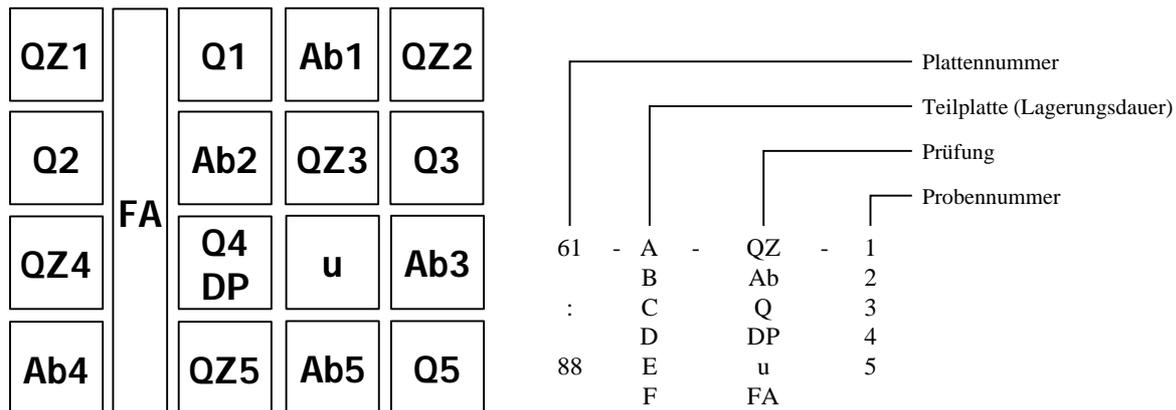


Abbildung 22: Schnittplan (links) und Probenbezeichnung (rechts) für MUF-, MUPF und PF-Platten.

wobei:

- Ab: Abhebefestigkeit
- QZ: Querzugfestigkeit
- u: Feuchte
- Q: Dickenquellung
- FA: Formaldehydprüfung
- DP: Rohdichteprofil

### 6.2.5.2 Lagerung

Die MUF- und MUPF-verklebten Spanplatten wurden bei sonst gleichen Herstellparametern bei Temperaturen von 75°C und 100°C. Die PF verklebten Platten wurden bei Temperaturen von 80°C, 95°C und 110°C gestapelt und bis maximal 168 Stunden gelagert.

### 6.2.5.3 Probennahme

Die Teilplatten wurden nach 3, 6, 24, 72 und 168 Stunden der Lagerung entnommen (Tabelle 17). Die Teilplatte A wurde den Lagerbedingungen nicht ausgesetzt, sondern als Referenzprobe unmittelbar nach dem Verpressen entnommen. Nach der Entnahme wurden die Platten für etwa eine Stunde auf Raumtemperatur abgekühlt und gemäß Schnittplan zu Proben ausgeformt (Abbildung 22). Im Normklima wurden die Proben anschließend bis zur Gewichtskonstanz klimatisiert.

Tabelle 17: Entnahmezeitpunkte der MUF-, MUPF- und PF-Platten.

<b>Teilplatte</b>	<b>Lagerdauer in Stunden</b>
A	0
B	3
C	6
D	24
E	72
F	168

#### 6.2.5.4 Prüfmethode

Die Querzugfestigkeit wurde nach EN 319 ermittelt. Für die Prüfung wurden Aluminiumjoche eingesetzt. Die Abhebefestigkeit wurde gemäß EN 311, die Dickenquellung nach 24 Stunden gemäß EN 317 bestimmt. Nach Entnahme und Abkühlung der Proben auf Raumtemperatur wurde an den Quellungsproben zusätzlich die Masse bestimmt. Nach der Quellungsprüfung wurden die Proben für 24h bei 103°C gedarrt und anschließend wurde wiederum die Masse erfasst. Auf diese Weise konnte die ursprüngliche Gesamtfeuchte mit hinreichender Genauigkeit kontrolliert werden.

Für die Ermittlung der Deck- und Mittelschichtfeuchte wurde je Entnahmezeitpunkt eine Probe mit einem Spaltmesser in zwei Deckschichten (ca. 2 mm) und eine Mittelschicht aufgeteilt. Die Feuchte der einzelnen Schichten wurde nach der Darmmethode gemäß EN 322 bestimmt.

Die Formaldehydemission wurde nach der Flaschenmethode gemäß EN 717-3 ermittelt.

Zur Bestimmung der pH-Werte des Plattenmaterials wurde zum Entnahmezeitpunkt eine Probe mit einem Spaltmesser in zwei Deckschichten (ca. 2 mm) und eine Mittelschicht aufgeteilt. Der pH-Wert der einzelnen Schichten wurde an Kaltwasserextrakten ermittelt. Dazu wurde das Probenmaterial in einer Schwingmühle gemahlen und 5g Probenmaterial in 150 ml destilliertem und CO<sub>2</sub>-freiem Wasser für 24 Stunden extrahiert.

## 6.3 Ergebnisse

### 6.3.1 Temperatur und Plattenfeuchte

#### Temperatur

In Abbildung 23 sind die nachgestellten Temperaturbedingungen von Spanplatten in der Apparatur am Beispiel von UF-Platten mit einer Ausgangstemperatur von 75°C und 60°C aufgetragen. Parallel sind auch Temperaturwerte aus Industriestapeln mit annähernd gleicher Anfangstemperatur dargestellt. Der Vergleich zeigt einen weitgehend übereinstimmenden Verlauf der Temperatur während der Lagerung. Die Temperaturkurven der Industriestapel steigen zunächst an, bevor diese Temperaturen während der Lagerung allmählich absinken. Der Temperaturanstieg ist auf die Positionierung der Thermoelemente zurückzuführen. Einzelheiten dazu sind in Kapitel 5.1.3 ausführlich erläutert.

Die relativen Fehler der Einzelwerte zwischen den Temperaturen in der Apparatur und denen in den Industriestapeln liegen bei einer Einstapeltemperatur von 60°C nicht über 10%, von 75°C bei maximal 7%. Die absoluten Temperaturunterschiede betragen maximal 5°C.

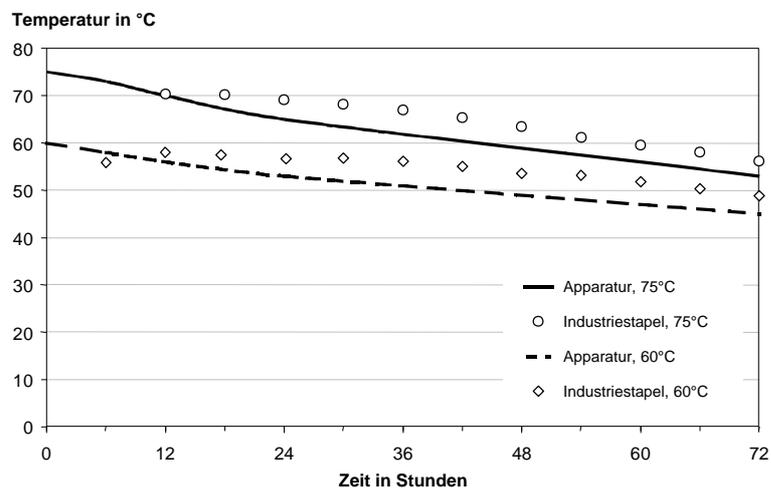


Abbildung 23: Vergleich der Temperaturen von Labor- und Industriestapeln (Einstapeltemperaturen 60°C und 75°C).

#### Plattenfeuchte

Abbildung 24 ist zu entnehmen, dass die Feuchte der Platten nach dem Verpressen in Abhängigkeit von den Herstellparametern variiert. Durch die Produktionsparameter wird also die Plattenfeuchte während der Stapellagerung entsprechend beeinflusst. Bei einer Feuchte der Deckschichtspäne vor dem Verpressen von 18% liegt die Feuchte der gesamten Platte nach dem Verpressen mit 5,9% um etwa 1% höher als bei einer Platte, die mit einer DS-Spanfeuchte von 10% verarbeitet wurde. Entsprechend werden Platten mit einem Presszeitfaktor von 7 s/mm mit einer um 1% höheren Feuchte eingestapelt als Platten mit einem Presszeitfaktor von 12 s/mm.

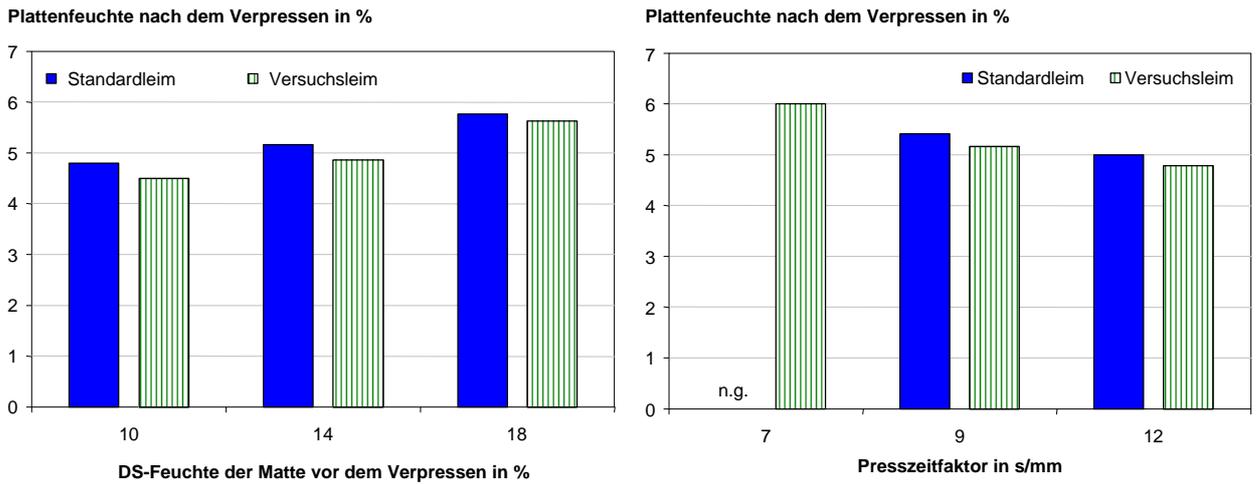


Abbildung 24: Plattenfeuchte der UF-Platten nach dem Verpressen in Abhängigkeit von Mattenfeuchte und Presszeitfaktor.

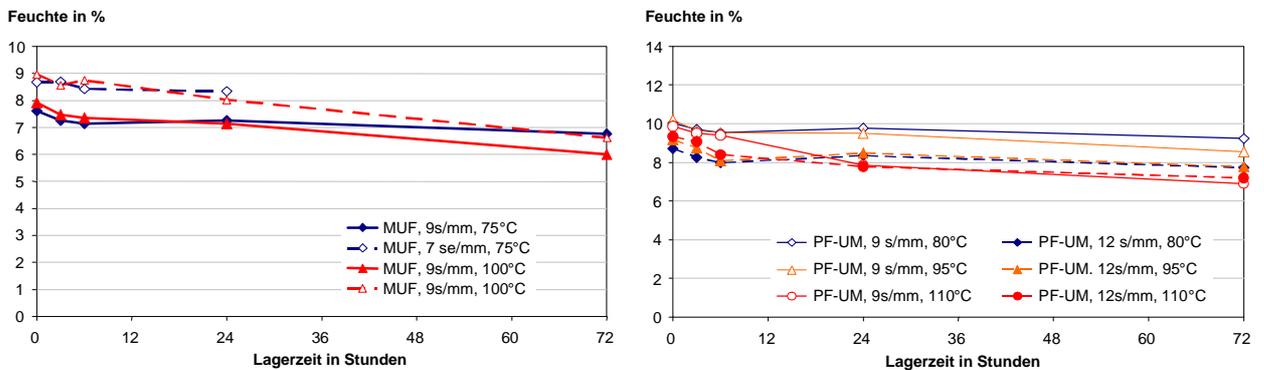


Abbildung 25: Änderung der Plattenfeuchte MUF-Platten (links) und der PF-Platten (rechts) nach dem Verpressen in Abhängigkeit vom Presszeitfaktor.

Die Änderung der Plattenfeuchte der MUF- und PF-Platten während der Lagerung ist in Abbildung 25 dargestellt. Durch die angewandte Methodik (siehe Kapitel 5.2) ist gewährleistet, dass die Platten während der Lagerung entsprechend der realen Bedingungen im Plattenstapel auch bei hohen Temperaturen nicht austrocknen.

## 6.3.2 UF-Platten

### 6.3.2.1 Querzugfestigkeit

In Abbildung 26 ist die Entwicklung der Querzugfestigkeit während der Stapellagerung bei 60 und 75°C für das Standard- und das Versuchsharz dargestellt. In dieser Darstellung sind die Mittelwerte aus allen Einzelwerten für den jeweiligen Harztyp aufgetragen. Es wird ersichtlich, dass Platten mit dem Standardharz (und ansonsten gleichen Parametern) auf einem deutlich höheren Niveau liegen als die Platten mit dem Versuchsharz. Das Anfangsniveau der Standard-UF-Platten liegt etwa bei 0,40 N/mm<sup>2</sup> und das der Versuchs-UF-Platten bei 0,27 N/mm<sup>2</sup>.

In dieser Darstellung ist keine nennenswerte Änderung der Querzugfestigkeit für die Standard-UF-Platten während einer Stapellagerung über den Zeitraum von 72 Stunden erkennbar. Ebenso ist bei einer Stapeltemperatur von 60°C für die Versuchs-UF-Platten keine Änderung der Querzugfestigkeit zu verzeichnen, allerdings wird bei einer Stapeltemperatur von 75°C eine positive Tendenz erkennbar.

#### Querzugfestigkeit in N/mm<sup>2</sup>

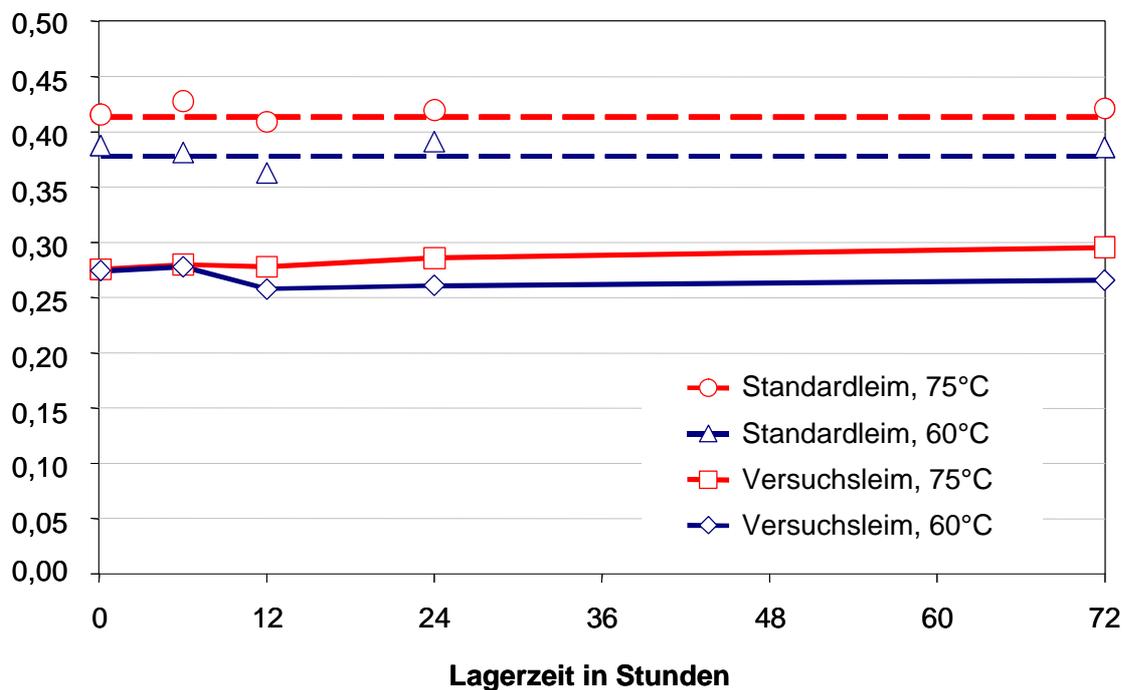


Abbildung 26: Entwicklung der Querzugfestigkeit für UF-Platten während der Stapellagerung bei 60 und 75°C.

In Abbildung 27 und Abbildung 28 erfolgt eine Differenzierung der Ergebnisse bezüglich der verwendeten Presszeitfaktoren. Es ist den Graphen zu entnehmen, dass die Querzugfestigkeit vor der Lagerung zum Zeitpunkt 0 für beide Harztypen erwartungsgemäß

mit einem höheren Presszeitfaktor auf einem höheren Niveau liegt (0,41 N/mm<sup>2</sup> für 12 s/mm und 0,35 N/mm<sup>2</sup> für 9 s/mm). Die Querkzugfestigkeiten der Platten, die mit dem Versuchsharz verpresst wurden, betragen bei einem Presszeitfaktor von 9 s/mm ca. 0,25 N/mm<sup>2</sup> und bei einem Presszeitfaktor von 12 s/mm ca. 0,30 N/mm<sup>2</sup>.

An den Platten, die mit dem Standardharz verarbeitet wurden, ist während der Lagerung im Stapel über einen Zeitraum von 72 Stunden kein Einfluss des Presszeitfaktors und der Lagertemperatur auf die Querkzugfestigkeit feststellbar (Abbildung 27).

Bei dem Versuchsharz ist mit einer Stapeltemperatur von 60°C unabhängig vom Presszeitfaktor keine Änderung der Querkzugfestigkeit feststellbar. Dies gilt auch für 75°C Lagertemperatur und einen Presszeitfaktor von 12 s/mm. Lediglich bei niedrigerem Presszeitfaktor von 9 s/mm und 75°C Stapeltemperatur nimmt die Querkzugfestigkeit der Platten signifikant zu (+28%). Im Zuge der Stapellagerung verbessert sich die Querkzugfestigkeit auf das gleiche Niveau der Platten, die mit einem hohen Presszeitfaktor hergestellt wurden. Die Verbesserung der Querkzugfestigkeit ist bereits innerhalb der ersten 6 bis 12 Stunden der Lagerung abgeschlossen. Darüber hinaus ist keine weitere Änderung der Festigkeitswerte feststellbar (Abbildung 28).

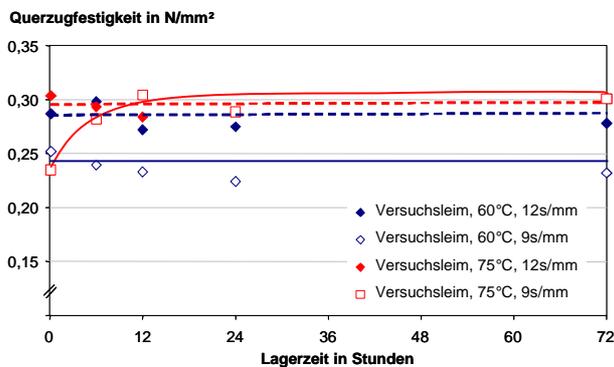


Abbildung 27: Entwicklung der Querkzugfestigkeit für UF-Platten (Versuchsharz) hergestellt mit unterschiedlichen Presszeitfaktoren während der Stapellagerung bei 60 und 75°C.

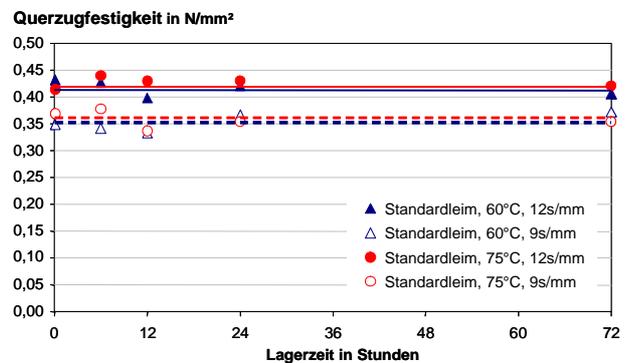


Abbildung 28: Entwicklung der Querkzugfestigkeit für UF-Platten (Standardharz) hergestellt mit unterschiedlichen Presszeitfaktoren während der Stapellagerung bei 60 und 75°C.

In Tabelle 18 sind die prozentualen Änderungen der Querkzugfestigkeit zwischen dem Anfangswert vor der Lagerung und dem Wert nach 72-stündiger Lagerung im Stapel für beide Leimtypen in Abhängigkeit von den Herstellparametern aufgetragen. Es wird erkennbar, dass unter bestimmten Bedingungen eine deutliche Verbesserung der Querkzugfestigkeit erreicht werden kann. Bei keinem der hier gewählten Parameter kommt es zu einer signifikanten Abnahme dieser Eigenschaft. Es kann somit festgehalten werden, dass eine Stapeltemperatur von 75°C für diese Leimsysteme keine negativen Auswirkungen hat.

Tabelle 18: Prozentuale Änderung der Querkzugfestigkeit zwischen 0 und 72 Stunden Lagerzeit mit Angabe des Signifikanzniveaus<sup>3</sup>.

Querkzugfestigkeit	Versuchsleim		Standardleim	
	60°C	75°C	60°C	75°C
alle	-3%	+7%	±0%	+2%
DS-Feuchte	10%	+2%	-5%	-3%
	14%	+4%	-8%	+2%
	18%	+16% +	+14% ++	+6% +
MS-Härter	0,5%	-12%	-1%	-1%
	1,5%	+28% +++	±0%	-1%
	3,0%	-1%	-	+9%
Presszeit	7 s/mm	+22% ++	-	-
	9 s/mm	+28% ++	-7%	-3%
	12 s/mm	±0%	-6%	+2%

Besonders positiv wird das Standardharz bei Einsatz einer hohen DS-Mattenfeuchte und kurzer Presszeit beeinflusst. Bei dem Versuchsharz bewirkt eine hohe DS-Mattenfeuchte (18%), ein MS-Härtereinsatz von 1,5% und eine niedrige Presszeit in Verbindung mit der höheren Stapeltemperatur eine deutliche Verbesserung der Querkzugfestigkeit. Die Entwicklung der Querkzugfestigkeit dieser Parameterkombination ist in Abbildung 29 dargestellt. Unter diesen Bedingungen tritt eine Verbesserung der Querkzugfestigkeit um mehr als 100% auf. Somit können diese unter dem Aspekt einer Nachreifung im Stapel als optimal bezeichnet werden. Es ist festzuhalten, dass die wesentliche Änderung der Querkzugfestigkeit bereits nach den ersten 12 Stunden abgeschlossen ist.

<sup>3</sup> Angabe des Signifikanzniveaus in der folgenden Form:

- ++++ Signifikanzniveau > 99,9%
- +++ Signifikanzniveau > 99%
- ++ Signifikanzniveau > 95%
- + Signifikanzniveau > 90%
- + - Signifikanzniveau > 85%

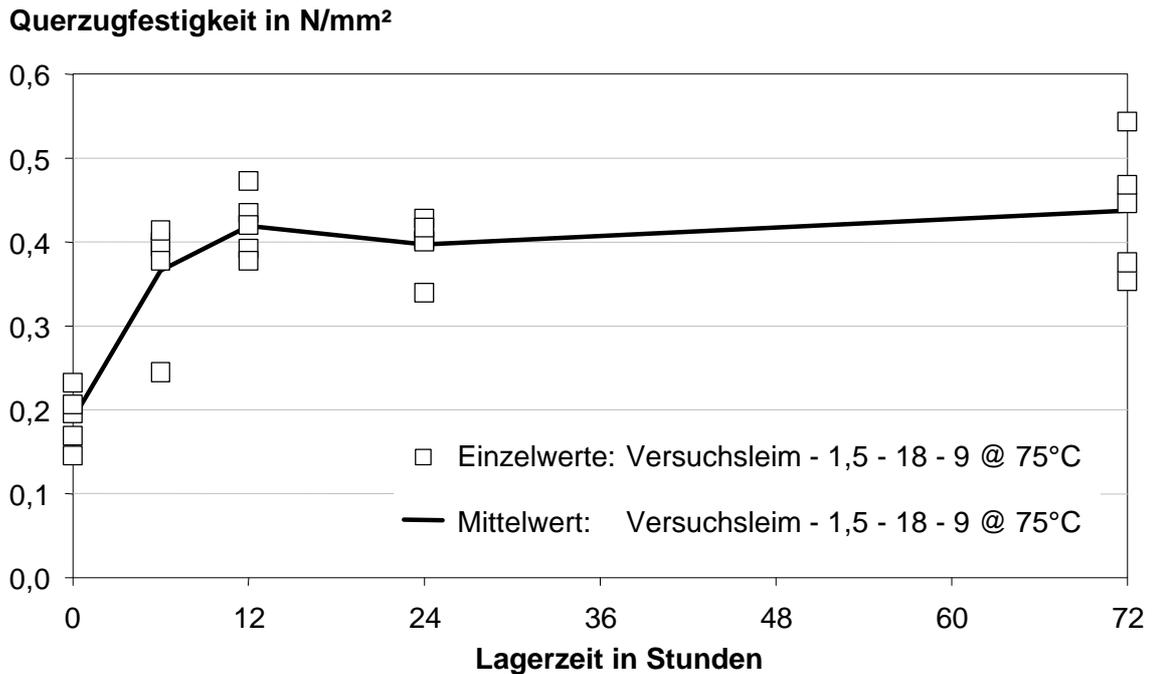


Abbildung 29: Entwicklung der Querzugfestigkeit unter optimalen Bedingungen für das Versuchsharz während der Stapellagerung.

Der deutliche Unterschied hinsichtlich des Festigkeitsniveaus der beiden untersuchten Harze begründet sich darin, dass die Aushärtungsgeschwindigkeit eines formaldehydarmen Harzes reduziert ist, da mit sinkendem Molverhältnis (F:U) der Gehalt an freiem Formaldehyd und an Methylol-Gruppen sinkt (Dunky 1985). Die Reaktionsgeschwindigkeit des Leimes ist durch die Menge an freiem Formaldehyd und von endständigen reaktiven Gruppen neben dem pH-Milieu und der Temperatur bestimmt. Somit ist erklärbar, dass mit dem Versuchsharz, bei gleichen Pressbedingungen wie des Standardharzes, deutlich geringere Festigkeiten ausgebildet werden.

### **Erkenntnisse**

Die vorliegenden Ergebnisse zeigen, dass bei einer geringeren Presszeit das Defizit des Versuchsharzes hinsichtlich der Querzugfestigkeit zu einem bestimmten Maß durch die Stapellagerung ausgeglichen werden kann.

Als Ursache für die Änderung der Querzugfestigkeit können verschiedene Erklärungsansätze angeführt werden:

1. Fortgeführte Kondensation: Es findet eine Fortsetzung der Kondensation des Harzes während der Stapellagerung statt. Dies ist bisher für Harnstoffharze nicht belegt, sondern konnte bisher nur für PF-Harze dokumentiert werden (Roffael et al. 1973). Nach Stegmann und v.Bismarck (1967) sei es nicht möglich, eine einmal unterbrochene Kondensation eines Harnstoffharzes weiterzuführen.

2. Reorganisation: Nach Lu und Pizzi (1998) soll es durch Reorganisation von Dimethylenetherbrücken-Bindungen zu Methylenbrücken-Bindungen in dem kondensierten Harz kommen, wodurch ein festeres Netzwerk entsteht und auf diese Art eine Verbesserung der Verleimungsgüte erreicht wird.
3. Spannungsabbau: Beim Verpressen des Spankuchens entstehen Spannungen, die in der fertigen Platte eingeschlossen werden und so die Festigkeitseigenschaften beeinträchtigen (Bolton et al. 1989b). Werden nach dem Pressen diese Spannungen oder zumindest Teile davon abgebaut, kann von einer Zunahme der Querkzugfestigkeit ausgegangen werden. Der Abbau von Spannungen steht in engem Zusammenhang mit der Feuchte und der Temperatur der Platten. Mit steigender Temperatur und Feuchte können mehr Spannungen abgebaut werden (Kiosseff 1975).
4. Hydrolyse: Eine Hydrolyse des Leims und der Holzsubstanz, die zu einer Abnahme der Querkzugfestigkeit führt (Kehr und Grabitzki 1965), konnte hier nicht festgestellt werden. Bei Neußer und Schall (1970) war bei einer Probenfeuchte von 9% erst über 75°C ein Festigkeitsabfall infolge von Hydrolyse der Leimkomponente feststellbar. Die eingesetzten UF-Harze hatten allerdings ein beträchtlich höheres Molverhältnis F:U als die Harze, die in der vorliegenden Untersuchung Verwendung fanden.

Die Festigkeitszunahme des Versuchsharzes mit einem Molverhältnis F:U < 1 ist in den meisten Fällen so groß, dass sie nur auf eine "echte" Nachreifung (= weitergeführte Kondensation) zurückzuführen ist. Dies erscheint plausibel, da die Reaktionsgeschwindigkeit des Harzes so gering ist, dass in der Presse nur relativ schwache Bindungen ausgebildet werden. Eine Lagerung unterhalb der kritischen Temperatur, bei der Hydrolyse auftreten kann, bewirkt somit innerhalb weniger Stunden eine Anhebung des Festigkeitsniveaus. In diesem Zusammenhang erscheint eine DS-Feuchte vor dem Verpressen von 18% und eine eingesetzte Härtermenge von 1,5% bei einem Presszeitfaktor von 9 s/mm im Labor für dieses Leimsystem als optimal.

Bei dem eingesetzten Standardharz kam es unter keinen Bedingungen zu einer Verschlechterung der Querkzugfestigkeit. Es besteht lediglich hinsichtlich bei erhöhter DS-Feuchte ein gewisses Verbesserungspotential. Da es bei höherer Feuchte in Verbindung mit einer Temperatureinwirkung zu einem Spannungsabbau innerhalb der Holzverbundes kommen und diese zu einer Verbesserung der Eigenschaften führen kann (Bolton et al. 1989), ist in diesem Fall davon auszugehen, dass die Festigkeitszunahme auf diesen Spannungsabbau zurückzuführen ist.

### 6.3.2.2 Abhebefestigkeit

Bei der Abhebefestigkeit ist keine eindeutige Entwicklung während der Stapellagerung erkennbar (Abbildung 30). Bei dem Versuchsharz scheint diese Platteneigenschaft in den ersten sechs Stunden der Lagerung (beide Einstapeltemperaturen) geringfügig anzusteigen. Die Änderungen sind allerdings für eine Einstapeltemperatur von 60°C nicht signifikant. Für das Standardharz fällt auf, dass kein einheitlicher Trend der Eigenschaftsentwicklung während der Stapellagerung zu erkennen ist. Zudem unterscheiden sich die Anfangswerte vor der Lagerung deutlich, obwohl die Platten unter gleichen Parametern hergestellt wurden. Andere Faktoren (z.B. Mattenstreuung) scheinen daher einen größeren Einfluss auf die Ausprägung der Abhebefestigkeit zu haben.

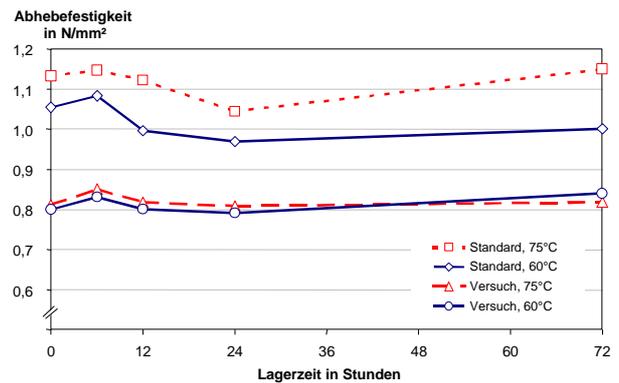


Abbildung 30: Änderung der Abhebefestigkeit während der Lagerung.

In Tabelle 19 sind die prozentualen Änderungen der Abhebefestigkeit zwischen dem Anfangswert vor der Lagerung und dem Wert nach 72-stündiger Lagerung im Stapel für die beiden Leimsysteme in Abhängigkeit von den Herstellparametern aufgetragen. Eine signifikante Änderung dieser Eigenschaft war lediglich für das Versuchsharz bei einem geringen Presszeitfaktor von

Tabelle 19: Prozentuale Änderung der Abhebefestigkeit zwischen 0 und 72 Stunden Lagerzeit mit Angabe des Signifikanzniveaus.

<b>Abhebefestigkeit</b>		<i>Versuchsharz</i>		<i>Standardharz</i>	
		60°C	75°C	60°C	75°C
alle		+4%	+2%	+5%	+4%
DS-Feuchte	10%	+12%	+3%	+6%	+4%
	14%	-2%	-1%	+12%	+12%
	18%	+1%	+2%	-2%	-2%
Presszeit	7 s/mm	+21% **	+13% **	-	-
	9 s/mm	+1%	-2%	+5%	+5%
	12 s/mm	+6% +	+4%	+4%	-2%

7 s/mm zu verzeichnen. Für beide Stapeltemperaturen wird eine Verbesserung der Abhebefestigkeit von ca. 20 bzw. 13% erzielt. Auch hier kommt es, wie bereits bei der Querkzugfestigkeit (Kapitel 6.3.2.1), in keinem Fall zu einer nennenswerten Verschlechterung der Festigkeitswerte.

### 6.3.2.3 Formaldehydgehalt

In Abbildung 31 ist die Änderung des Formaldehydgehalts der Spanplatten während der Stapellagerung aufgezeigt. In dieser Darstellung sind jeweils 12 Einzelwerte nach den Parametern Harztyp und Einstapeltemperatur gruppiert und gemittelt. Es wird erkennbar, dass der Formaldehydgehalt des Versuchsharzes deutlich unter dem des Standardharzes liegt. Vor der Stapellagerung weist der Versuchslack einen Anfangswert um 4,4 mg/100g und der Standardlack einen Wert von 6,2 mg/100g auf. Einzelne Werte des Standardharzes überschreiten zunächst die Anforderung gemäß EN 312-1.

#### Formaldehydgehalt in mg/100g

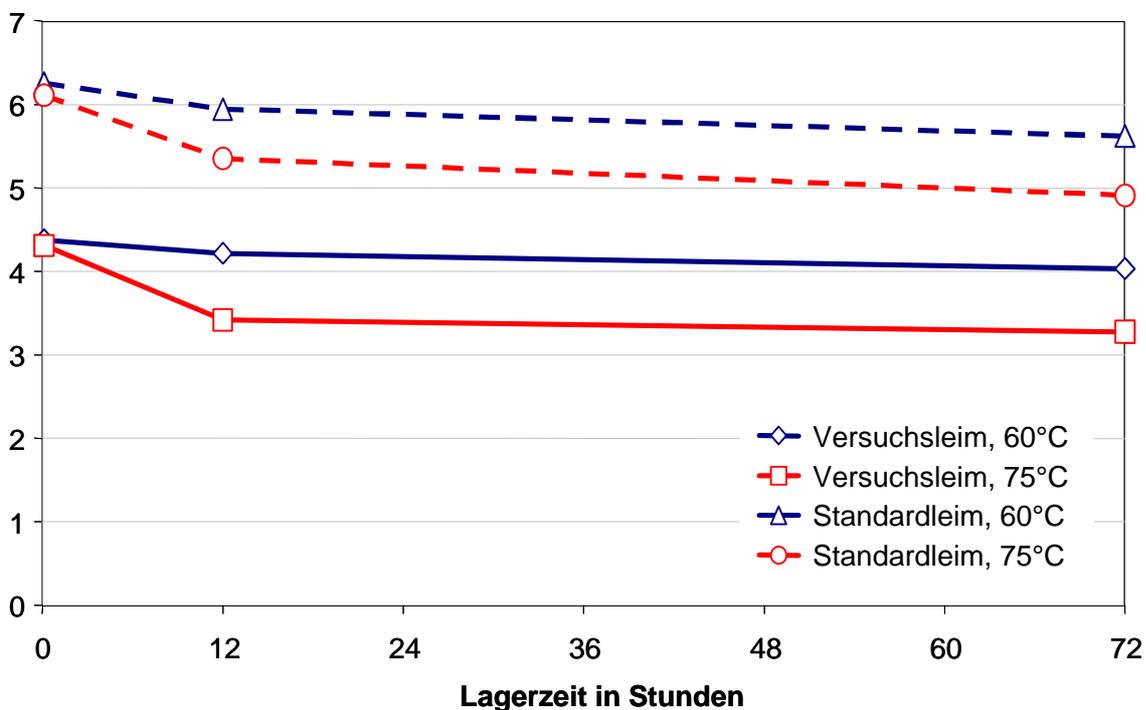


Abbildung 31: Entwicklung des Formaldehydgehalts für UF-Platten während der Stapellagerung bei 60 und 75°C.

Während der Lagerung werden die Perforatorwerte für beide verwendeten Leime wesentlich reduziert. Dadurch wird die Anforderung gemäß Norm auch für den Standardlack deutlich unterschritten. Bei einer Temperatur von 75°C ist die Eigenschaftsverbesserung für beide Harze größer als bei einer Einstapeltemperatur von 60°C.

Bei der niedrigeren Stapeltemperatur wird der Perforatorwert innerhalb von drei Tagen um 8% (Versuchsharz) bzw. 10% (Standardharz) gesenkt. Mit der höheren Temperatur (75°C) kann sogar eine Minderung des Formaldehydgehalts für das Versuchsharz um 24% und für das Standardharz um 20% erreicht werden.

Die Perforatorwerte nehmen bei einer Einstapeltemperatur von 60°C für beide Leime über den untersuchten Zeitraum nahezu linear ab. Werden die Platten mit einer Temperatur von 75°C eingestapelt, ist der größte Teil der Abnahme bereits zu Beginn der Lagerung innerhalb von 12 Stunden abgeschlossen. Zwischen 12 und 72 Stunden ändert sich der Formaldehyd Gehalt dann nur noch marginal.

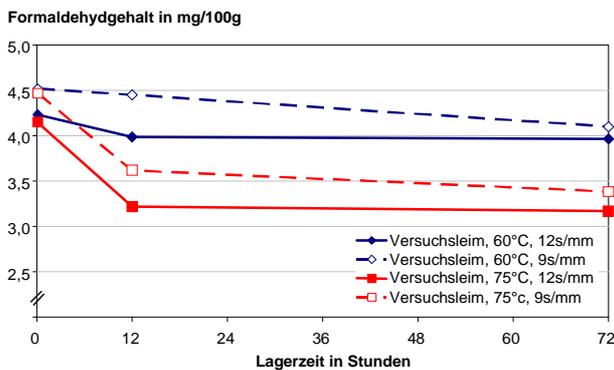


Abbildung 32: Entwicklung des Formaldehyd Gehalts für das Versuchsharz während der Stapellagerung bei 60 und 75°C für verschiedene Presszeitfaktoren.

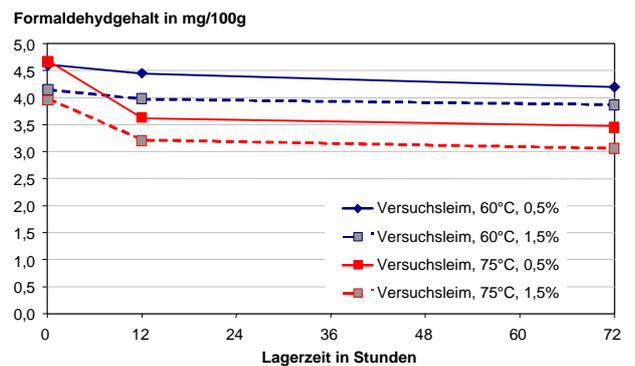


Abbildung 33: Entwicklung des Formaldehyd Gehalts für das Versuchsharz während der Stapellagerung bei 60 und 75°C für verschiedene Härtermengen.

In Abbildung 32 ist die Änderung des Formaldehyd Gehaltes für das Versuchsharz während der Stapellagerung für verschiedene Presszeitfaktoren dargestellt. Der Anfangswert vor der Stapellagerung liegt für Platten mit einem Presszeitfaktor von 9 s/mm bei 4,5 mg/100g, mit dem höheren Presszeitfaktor von 12 s/mm liegt der Anfangswert bei 4,2 mg/100g. Auch hier wird die deutlich stärkere Abnahme bei der höheren Stapeltemperatur bestätigt. Ein Unterschied der Abnahme des Formaldehyd Gehaltes hinsichtlich des Presszeitfaktors ist hingegen nicht erkennbar. Auch bezüglich der eingesetzten Härtermenge ist kein Unterschied bei der Entwicklung des Formaldehyd Gehaltes zu erkennen (Abbildung 33).

In Tabelle 20 sind die prozentualen Änderungen des Formaldehydgehalts zwischen dem Anfangswert vor der Lagerung und dem Wert nach 72-stündiger Lagerung im Stapel für die beiden Leimsysteme in Abhängigkeit von den Herstellparametern aufgetragen. Für alle Parameter ist eine Abnahme des Perforatorwertes zu verzeichnen. Die Signifikanz liegt dabei lediglich bei der höheren Stapeltemperatur von 75°C auf einem hohen Niveau.

Tabelle 20: Prozentuale Änderung des Formaldehydgehalts zwischen 0 und 72 Stunden Lagerzeit mit Angabe des Signifikanzniveaus.

<b>Formaldehydgehalt</b>	<i>Versuchsleim</i>		<i>Standardleim</i>	
	60°C	75°C	60°C	75°C
alle	-8%	-24%	-10%	-20%
DS-Feuchte	10%	-4%	-10%	-20% +
	14%	-9% +	-9%	-18%
	18%	-7%	-13%	-16% +
MS-Härter	0,5%	-9% +	-9%	-20%
	1,5%	-7% +	-10%	-19%
	3,0%	-	-	-
Presszeit	9 s/mm	-10%	-13%	-20%
	12 s/mm	-6% +	-6%	-28% ++

Bei dem Versuchsharz ist bei einer Stapeltemperatur von 75°C erkennbar, dass mit zunehmender DS-Feuchte (10% auf 18%) vor dem Verpressen der Platte und somit mit einer höheren Feuchte im Stapel eine größere Abnahme (21% auf 30%) während der Lagerung erzielt wird. Für alle übrigen Parameter sind keine eindeutigen Tendenzen bestimmbar.

Es ist festzuhalten, dass bei höheren Stapeltemperaturen eine signifikante Abnahme des Formaldehydgehalts nachgewiesen werden konnte. Andere Herstellparameter der Platten spielen in diesem Zusammenhang eine untergeordnete Rolle.

### **Erkenntnisse**

Aufgrund des geringen Molverhältnisses F:U > 1 des Versuchsharzes befindet sich weniger Formaldehyd als Harnstoff in diesem Leimsystem. Daher ist auch das Formaldehydabgabepotenzial nach dem Verpressen dieses Harzes merklich geringer als bei einem Harz mit einem höheren Formaldehydgehalt (Roffael 1978).

Deppe und Ernst (1965) wiesen nach, dass mit höherer Presszeit und höherem Härtereinsatz die Formaldehydemission vermindert wird. Dies erklären die in Abbildung 32 und Abbildung 33 dargestellten Zusammenhänge.

Dass die Formaldehydemission im Zuge der Lagerung vermindert werden kann, wurde auch von Deppe und Ernst (1965) sowie von Roffael (1978) nachgewiesen. Als mögliche Ursachen für eine Änderung des Gehalts an freiem Formaldehyd der Platten während der Lagerung können folgende Ursachen genannt werden:

1. Fortgeführte Kondensation: Die Kondensation des Harzes schreitet während der Lagerung bei erhöhter Temperatur weiter fort.
2. Ausdampfen: Formaldehyd kann aus den Schmalflächen der Platten während der Lagerung ausdampfen (Roffael 1980).
3. Bindung an Holz: Es besteht die Möglichkeit, dass Formaldehyd von Holz aufgenommen und gebunden wird (Ginzel 1973).

Da der Formaldehydgehalt des Versuchsharzes unter gleichen Bedingungen um einen größeren Betrag abnimmt wie der des Standardharzes, obwohl der Anfangswert bereits deutlich geringer ist, lässt sich auch hier vermuten, dass neben anderen Ursachen vor allem eine weiterführende Kondensation des Harzes die Abnahme während der Stapellagerung bewirkt. Weil die Querkzugfestigkeit der Platten, die mit dem Standardharz verklebt wurden, während der Lagerung nicht verändert wird, muss die Verminderung an freiem Formaldehyd hauptsächlich auf ein Ausdampfen aus den Schmalflächen der Platten zurückgeführt werden. Bei höherer Temperatur ist die Abnahme deutlich stärker, dies ist durch die höhere Molekularbewegung mit höherer Temperatur und dem damit einhergehenden schnelleren Konzentrationsausgleich begründet.

Die hergestellten und gelagerten Laborplatten hatten eine geringe Fläche, wodurch der Schmalflächenanteil recht groß ist. Hierdurch wird das Ausdampfen stark begünstigt. Es muss daher an Platten mit industriellen Abmessungen überprüft werden, ob diese Größenordnung der Formaldehydabgabe bestätigt werden kann.

### 6.3.2.4 Dickenquellung

Abbildung 34 zeigt die Änderung der Dickenquellung während der Lagerung über einen Zeitraum bis zu 72 Stunden für das Standard- und Versuchsharz. Ausgehend von einem nahezu identischen Anfangswert nach dem Pressen ist bei dem Versuchsharz eine deutliche Verbesserung der Dickenquellung während der Lagerung zu verzeichnen. Bei dem Standardharz ist zwar auch eine Abnahme der Dickenquellung erkennbar, allerdings fällt diese wesentlich geringer aus als beim Versuchsharz.

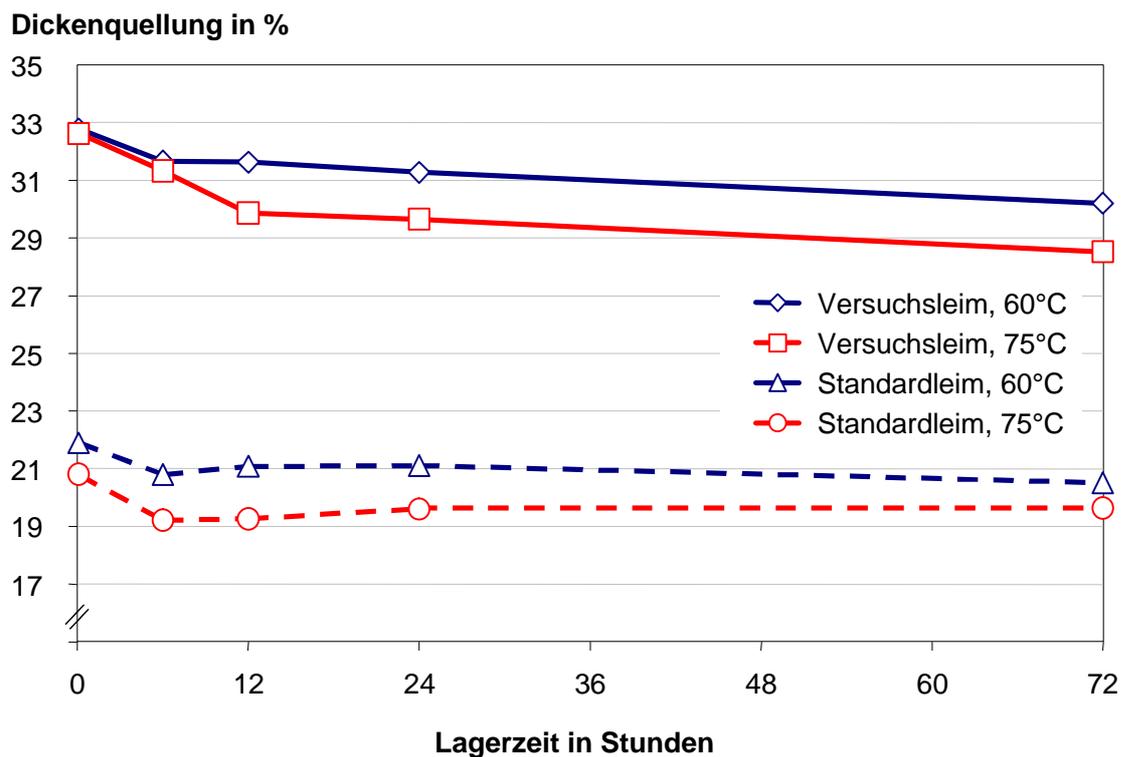


Abbildung 34: Entwicklung der Dickenquellung für UF-Platten während der Stapellagerung bei 60 und 75°C.

In Abbildung 35 ist die Änderung der Dickenquellung für das Versuchsharz während der Stapellagerung bei den Temperaturen von 60 und 75°C über einen Zeitraum von 72 Stunden hinsichtlich verschiedener Presszeitfaktoren aufgetragen. Es ist zu erkennen, dass die Anfangswerte der Dickenquellung bei der höheren Presszeit um 34% und bei der niedrigeren Presszeit um 31% liegen. Dieser Zusammenhang lässt sich aus dem Umstand erklären, dass es durch die kürzere Presszeit nach dem Verpressen zu einem deutlich größeren Spring-Back kommt: So beträgt die Plattendicke für den Presszeitfaktor von 12 s/mm im Mittel 19,5 mm, für den Presszeitfaktor von 9 s/mm etwa 19,8 mm und für 7 s/mm etwa 20,3 mm. Dadurch wird ein Großteil der Spannungen, die während des Pressvorgangs in der Platte eingeschlossen werden, bereits unmittelbar nach dem Verlassen der Presse durch das Rückfedern der Platte abgebaut. Der Anteil der Spannungen, die während der

Wasserlagerung zur Prüfung der Dickenquellung abgebaut werden können, vermindert sich entsprechend. Somit ist es erklärlich, dass die Dickenquellung der Platten mit einer geringeren Presszeit niedriger ist. Im Verlauf der Lagerung nimmt die Quellung deutlich ab. Mit höherer Stapeltemperatur ist die Abnahme stärker. Es ist zudem ersichtlich, dass die Quellung bei den Platten mit höherem Presszeitfaktor stärker reduziert wird.

Platten mit einer höheren (18%) DS-Mattenfeuchte vor dem Verpressen liegen auf einem niedrigeren Niveau als Platten mit einer geringeren DS-Mattenfeuchte (Abbildung 36). Die Verbesserung der Dickenquellung während der Lagerung ist allerdings nur geringfügig stärker bei Platten mit einer höheren Feuchte.

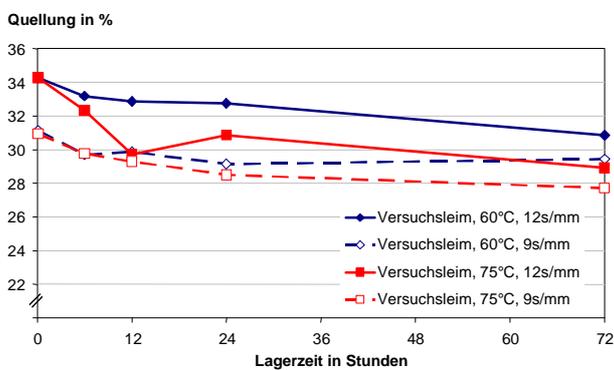


Abbildung 35: Entwicklung der Dickenquellung für UF-Platten (Versuchsharz) während der Stapellagerung bei 60 und 75°C für verschiedene Presszeitfaktoren.

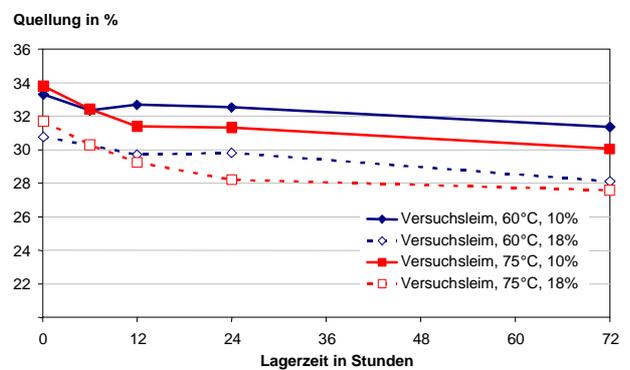


Abbildung 36: Entwicklung der Dickenquellung für UF-Platten (Versuchsharz) während der Stapellagerung bei 60 und 75°C für verschiedene DS-Feuchten vor dem Verpressen.

In Tabelle 21 sind die prozentualen Änderungen der Dickenquellung zwischen dem Anfangswert vor der Lagerung und dem Wert nach 72-stündiger Lagerung im Stapel für die beiden Leimsysteme in Abhängigkeit von den Herstellparametern aufgetragen. Es ist ersichtlich, dass es unter allen Parametern zu einer Verbesserung der Eigenschaft kommt. Die Verbesserung ist zumeist bei der höheren Stapeltemperatur stärker.

Tabelle 21: Prozentuale Änderung der Dickenquellung zwischen 0 und 72 Stunden Lagerzeit mit Angabe des Signifikanzniveaus.

Quellung	Versuchsleim		Standardleim	
	60°C	75°C	60°C	75°C
alle	-8%	-13%	-6%	-3%
DS-Feuchte	10%	-6%	-11% ****	-10% **
	14%	-10% ***	-13% ***	-6%
	18%	-9% **	-13% ****	-6%
MS-Härter	0,5%	-9% ***	-12% ****	-8% **
	1,5%	-7%	-14% ****	-3%
	3,0%	-7%	-12% **	-
Presszeit	7 s/mm	-4%	-9% +	-
	9 s/mm	-6% +	-10% ***	-3%
	12 s/mm	-10% ****	-16% ****	-11% **

### Erkenntnisse

Je geringer das Molverhältnis F:U (je geringer also der Formaldehydgehalt) des Harzes, umso höher ist auch die Dickenquellung nach 24 Stunden Wasserlagerung der daraus hergestellten Spanplatten (Marutzky und Ranta 1980).

Die folgenden Effekte können dem Grunde nach zu einer Änderung der Dickenquellung während der Lagerung führen:

1. Fortgeführte Kondensation: Eine weitere Kondensation des Harzes bewirkt eine Erhöhung der Klebfestigkeit. Dadurch wird das Rückhaltevermögen des Span-Klebstoff-Verbundes gegenüber der Quellung der Späne vergrößert. Somit kann dadurch die Quellung vermindert werden.
2. Reorganisation: Eine Reorganisation der chemischen Bindungstypen (Etherbrücken-Bindungen zu Methylenbrücken-Bindungen) innerhalb des kondensierten Harzes bildet ein festeres Netzwerk, welches nach Lu und Pizzi (1998) eine Verbesserung der Verleimungsgüte bewirken kann.
3. Thermische Modifikation: Mit einer thermischen Modifikation des Holzes geht eine verminderte Wasseraufnahme einher (Kollmann und Schneider 1963). Mit einer verminderten Feuchte- und Wasseraufnahme wird auch die Dickenquellung reduziert.
4. Spannungsabbau: Ein Spannungsabbau durch Lagerung unter Druck, Temperatur und Feuchte reduziert den Abbau von eingeschlossenen Spannungen während der Wasserlagerung (Bolton et al. 1989b).

5. Hydrolyse: Eine Hydrolyse des UF-Harzes bewirkt eine Verminderung der Klebfestigkeit und somit auch eine Verminderung des Rückhaltevermögens des Klebharzes während des Quellvorgangs im Zuge der Wasserlagerung. Eine Hydrolyse würde somit zu einer Erhöhung der Quellung führen.

Für das Versuchsharz ist wiederum eine weitergeführte Kondensation des Harzes zu vermuten, da die Änderungen mit zum Teil über 15% sehr deutlich sind. Bei beiden Harzen (auch beim Standardharz) wird die Dickenquellung in Abhängigkeit von der Temperatur reduziert. Daher ist anzunehmen, dass diese Eigenschaft insbesondere durch die Veränderung der Holzkomponente in der Spanplatte vermindert wird.

Prinzipiell ist die stärkere Verminderung auch mit Erhöhung der Feuchte erkennbar. Mit höherer DS-Feuchte der Matte ist auch die Gesamtfeuchte der Platte nach dem Verpressen erhöht. Mit höherer Feuchte werden unter Temperatureinfluss Spannungen im Holz stärker abgebaut, damit wird auch die Dickenquellung bei höherer Feuchte stärker reduziert.

### 6.3.2.5 Ausgleichsfeuchte

Im Zuge der Lagerung der Platten im Stapel wird die Ausgleichsfeuchte bei 20°C und 65% rel. LF reduziert. In Abbildung 37 ist die absolute Änderung der Ausgleichsfeuchte für die eingesetzten Leimtypen bei den beiden Stapeltemperaturen 60°C und 75°C dargestellt. Es ist deutlich erkennbar, dass die Abnahme bei der höheren Stapeltemperatur deutlicher

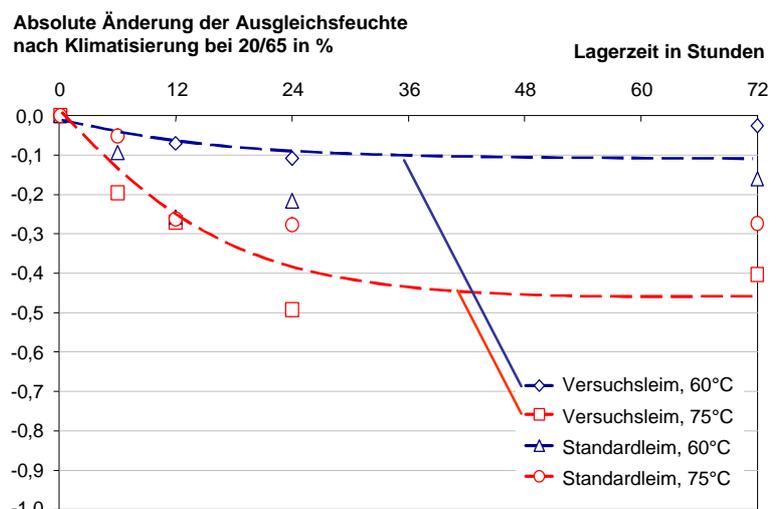


Abbildung 37: Abnahme der Ausgleichsfeuchte bei 20°C und 65% relativer Luftfeuchte für UF-Platten während der Stapellagerung bei 60 und 75°C.

ausgeprägt ist. Innerhalb der ersten 24 Stunden der Lagerung wird die Ausgleichsfeuchte um bis zu 0,5% auf 7,2% reduziert.

### **Erkenntnisse**

Die Verminderung der Ausgleichsfeuchte während der Stapellagerung bei den angegebenen Temperaturen kann ausschließlich auf eine thermische Modifizierung des Holzes zurückgeführt werden. Eine erkennbare Verminderung der Ausgleichsfeuchten wurde von Kollmann und Schneider (1963) an Vollholz ab 100°C beobachtet. Da bereits die Ausgleichsfeuchte der Platten aufgrund des Temperatureinflusses während des Heißpressvorgangs reduziert wird, wird dieser Vorgang bei höheren Stapeltemperaturen fortgeführt. Die Feuchtebedingungen, die während der Lagerung konstant um Feuchten von 5% bis 6% liegen, wirken sich verstärkend auf die Verminderung der Sorptionseigenschaften des Holzes aus.

#### **6.3.2.6 Konsequenzen für die industrielle Praxis**

Während der Stapellagerung bis zu einer Temperatur von 75°C können die Eigenschaften von UF-verklebten Platten verbessert werden. Eine Verbesserung kann für alle UF-Harze hinsichtlich der Dickenquellung, des Formaldehydgehalts und der Ausgleichsfeuchte erzielt werden. Bei einem UF-Harz mit einem Molverhältnis von F:U < 1 wird zudem auch die Querszugfestigkeit zum Teil beträchtlich erhöht.

Um die Nachreifung im Plattenstapel optimal auszunutzen, sind die Produktionsparameter so zu wählen, dass ein hydrolytischer Abbau des Harzes und des Holzes vermieden wird. Weit höhere Stapeltemperaturen als 75°C sind nicht ratsam, da über dieser Temperatur eine Hydrolyseresistenz der UF-Harze nicht gegeben ist. Zudem kann es bei einer höheren Temperatur zu einer unerwünschten Farbveränderung der Platten kommen, die sich bei späterer Beschichtung oder anderer Oberflächenbehandlung nachteilig auswirken kann. Solche Verfärbungen der Plattenoberfläche können in Abhängigkeit von der Feuchte ab Temperaturen um 75°C bis 80°C auftreten.

### 6.3.3 MUF- und MUPF-Harze

#### 6.3.3.1 Querzugfestigkeit

In Abbildung 38 ist die Entwicklung der Querzugfestigkeit für MUF-Platten während der Stapellagerung bei 75°C und 100°C über einen Zeitraum von 168 Stunden dargestellt. Es ist erkennbar, dass die Festigkeit, ausgehend von einem Ausgangswert um 0,65 N/mm<sup>2</sup>, bei der Lagerung mit 75°C innerhalb von 24 Stunden auf 0,69 N/mm<sup>2</sup> ansteigt. Nach einem geringen Anstieg innerhalb von 3 Stunden fällt die Querzugfestigkeit bei einer Stapeltemperatur von 100°C hingegen im weiteren Verlauf deutlich ab. Nach 168 Stunden ist nur noch eine Festigkeit von 0,56 N/mm<sup>2</sup> feststellbar.

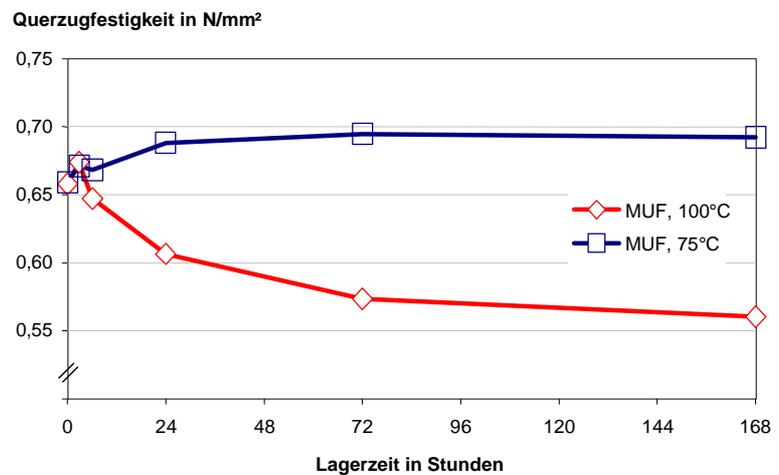


Abbildung 38: Entwicklung der Querzugfestigkeit für MUF-Platten während der Stapellagerung bei 75 und 100°C.

Das Anfangsniveau der Querzugfestigkeit der MUPF-Platten liegt bei sonst gleichen Herstellparametern mit etwa 0,70 N/mm<sup>2</sup> höher als das der MUF-Platten (Abbildung 39). Bei einer Stapeltemperatur von 75°C ist ein Anstieg der Querzugfestigkeit innerhalb der ersten 3 Stunden der Lagerung auf etwa 0,75 N/mm<sup>2</sup> zu verzeichnen. Im weiteren Verlauf der Lagerung kann bei dieser Temperatur keine weitere nennenswerte Änderung erfasst werden. Auch bei einer Stapeltemperatur von 100°C kommt es innerhalb der ersten Stunden zu einer Zunahme der Festigkeit, allerdings fällt die Querzugfestigkeit darüber hinaus bis 168 Stunden auf etwa 0,65 N/mm<sup>2</sup> ab.

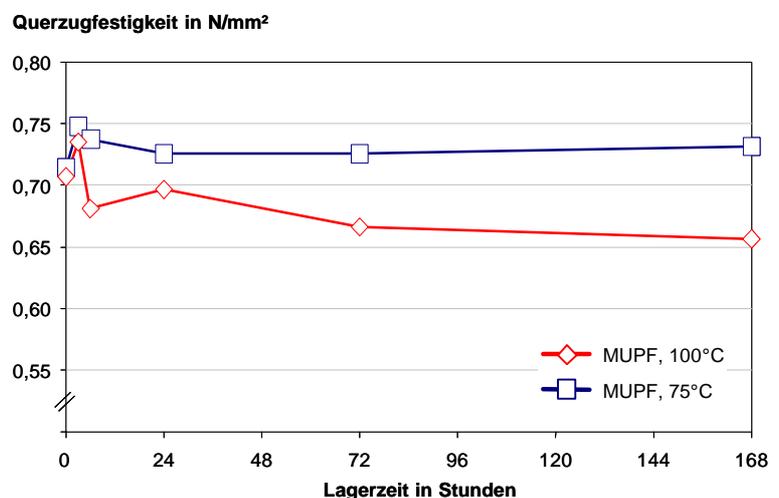


Abbildung 39: Entwicklung der Querzugfestigkeit für MUPF-Platten während der Stapellagerung bei 75 und 100°C.

Es kann festgehalten werden, dass für beide Harztypen hinsichtlich der Querkzugfestigkeit eine Lagertemperatur von 75°C grundsätzlich einen positiven Einfluss hat. Eine Stapeltemperatur von 100°C allerdings wirkt sich dagegen deutlich negativ auf die Festigkeit aus. Diese Temperatur ist deutlich zu hoch.

### **Erkenntnisse**

Die Festigkeit und auch die Beständigkeit gegenüber Feuchteeinfluss ist bei melaminhaltigen Harzen höher als bei reinen UF-Harzen. Dies liegt in der chemischen Struktur des Melamins begründet. Jedes Melaminmolekül hat bis zu sechs Kontaktstellen, um ein dreidimensionales Netzwerk während der Aushärtung mit Formaldehyd auszubilden. Beim Harnstoff gibt es hingegen lediglich zwei Kontaktstellen, so dass nur linear angeknüpft werden kann (Pizzi 1983). Ein Anteil von Phenol kann das Festigkeitsniveau des Harzes zusätzlich erhöhen.

Die Eigenschaftsveränderungen der Melaminharze während der Lagerung können bei den Melaminharzen auf die gleichen Ursachen zurückgeführt werden wie bei den UF-Harzen, zumal Melamin und Harnstoff die gleichen chemischen Bindungen ausbilden (Pizzi 1983). Die Unterschiede liegen lediglich in dem höheren Festigkeitsniveau und der besseren Feuchtebeständigkeit der Melaminharze. Die Festigkeitseinbußen, zu denen es bei einer Lagerung mit einer Temperatur von 100°C bereits nach kurzer Zeit kommt, können somit möglicherweise auf einen hydrolytischen Abbau des Harzes zurückgeführt werden.

Da der Phenolanteil im Harz sehr gering ist, scheint sich diese Komponente auf die Änderung während der Lagerung nicht gravierend auszuwirken. Es wird lediglich ein höheres Festigkeitsniveau erreicht.

### 6.3.3.2 Dickenquellung

In Abbildung 40 und Abbildung 41 ist die Änderung der Dickenquellung für MUF- bzw. MUPF-Platten während der Stapellagerung bei 75°C und 100°C über einen Zeitraum von 168 Stunden dargestellt. Die Dickenquellung der MUF-Platten nimmt bei einer Stapeltemperatur von 75°C ausgehend von 8,6% auf etwa 6,5% ab. Die Abnahme ist nach 72 Stunden abgeschlossen, darüber hinaus erfolgt keine nennenswerte Änderung. Bei einer Stapeltemperatur von 100°C ist eine deutliche Verminderung von 9,2% auf 6,5% innerhalb der ersten 24 Stunden festzustellen. Im weiteren Verlauf der Lagerung bis 168 Stunden Lagerzeit verschlechtert sich die Dickenquellung wiederum auf nahezu den Ausgangswert.

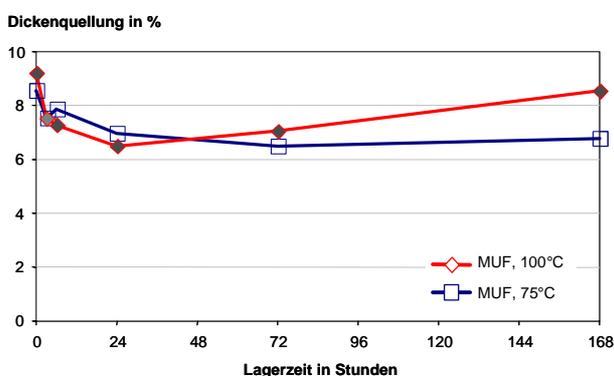


Abbildung 40: Entwicklung der Dickenquellung für MUF-Platten während der Stapellagerung bei 75 und 100°C.

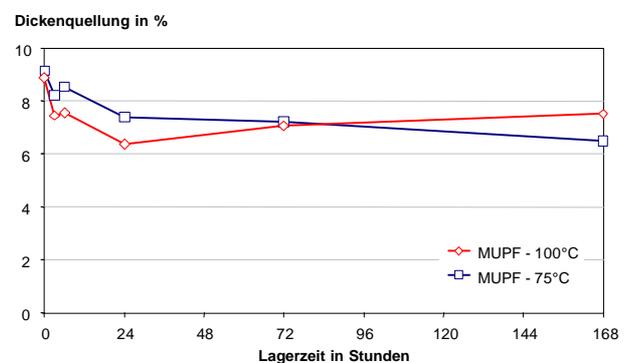


Abbildung 41: Entwicklung der Dickenquellung für MUPF-Platten während der Stapellagerung bei 75 und 100°C.

Bei den MUPF-Platten wird die Dickenquellung während der Lagerung ausgehend von rund 9,0% bei einer Stapeltemperatur von 75°C über den gesamten Lagerzeitraum auf 6,5% abgesenkt. Bei 100°C kann zwar ebenfalls eine Minderung auf 6,4% innerhalb von 24 Stunden erzielt werden, allerdings verschlechtert sich auch hier im weiteren Verlauf der Lagerung der Quellwert auf 7,5%.

### Erkenntnisse

Die höhere Feuchtebeständigkeit der MUF- und MUPF-Harze gegenüber UF-Harzen zeigt sich hier in den geringen Quellwerten. Dabei ist die Dickenquellung der MUPF-Platten nur geringfügig niedriger als die Werte der MUF-verklebten Platten. Da die relative Abnahme der Dickenquellung bei einer Temperatur von 75°C für die MU(P)F-Platten wesentlich größer ist als bei den UF-Platten, ist davon auszugehen, dass neben dem Spannungsabbau und der thermischen Veränderung des Holzes auch eine Vergütung eintritt, die auf Veränderungen des Harzes zurückzuführen ist. Auf der anderen Seite zeigt sich bei einer Lagertemperatur von 100°C eine Zunahme der Quellwerte, die zeitlich versetzt zu der Abnahme der

Querzugfestigkeit einsetzt, sodass in diesem Fall das Harz dieser Belastung nicht standhalten kann.

### 6.3.3.3 Abhebefestigkeit

In Abbildung 42 ist die Entwicklung der Abhebefestigkeit für MUF-Platten während der Stapellagerung bei 75°C und 100°C dargestellt. Ausgehend von 1,80 N/mm<sup>2</sup> unmittelbar nach dem Verpressen treten bei einer Stapeltemperatur von 75°C nur unwesentliche Änderungen auf. Bei 100°C wird die Abhebefestigkeit innerhalb von 168 Stunden signifikant auf 1,53 N/mm<sup>2</sup> vermindert.

Bei den MUPF-Platten wird bei einer Temperatur von 75°C die Abhebefestigkeit von 1,52 N/mm<sup>2</sup> auf 1,65 N/mm<sup>2</sup> erhöht. Bei 100°C hingegen vermindert sich der Wert von 1,72 N/mm<sup>2</sup> auf 1,50 N/mm<sup>2</sup>.

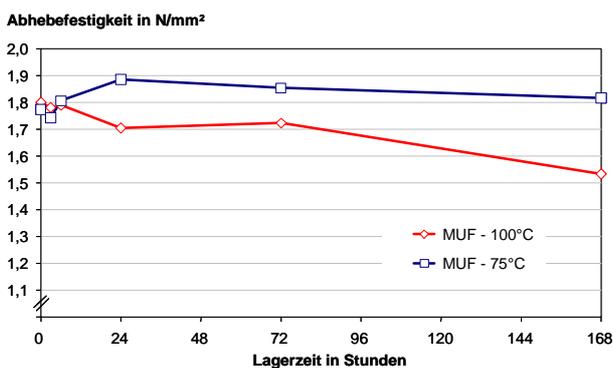


Abbildung 42: Entwicklung der Abhebefestigkeit für MUF-Platten während der Stapellagerung bei 75 und 100°C.

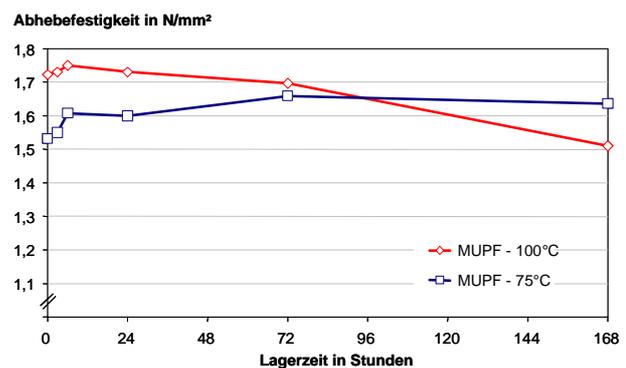


Abbildung 43: Entwicklung der Abhebefestigkeit für MUPF-Platten während der Stapellagerung bei 75 und 100°C.

### Erkenntnisse

Grundsätzlich muss festgehalten werden, dass es unter Laborbedingungen schwierig ist, die Vielzahl der Einflussfaktoren auf die Abhebefestigkeit konstant zu halten, um vergleichbare Ergebnisse zu erzielen. Als wesentlicher Einfluss sei beispielsweise die manuelle Streuung des Spanmaterials genannt. Dies spiegelt sich hier insbesondere in den Ergebnissen der MUPF-Platten wider: Die Werte der Platten unmittelbar nach dem Pressen liegen auf einem deutlich unterschiedlichen Niveau.

Dennoch ist der Einfluss der Stapeltemperatur auf die Abhebefestigkeit erkennbar: Analog zu dem Verhalten der Querzugfestigkeit kann eine leichte Zunahme der Abhebefestigkeit bei einer Lagertemperatur von 75°C und eine deutliche Verminderung der Festigkeit bei 100°C verzeichnet werden. Der Einfluss eines möglichen Spannungsabbaus auf die Verbesserung

der Eigenschaft kann aufgrund der geringeren Spangröße in der Deckschicht als nachrangig eingestuft werden. Damit kann nur eine Veränderung der Leimkomponente für die Zunahme der Abhebefestigkeit ursächlich sein. Die Abnahme der Festigkeit ist analog zur Verschlechterung der Querkzugfestigkeit und der Dickenquellung auf eine hydrolytische Degradierung des Harzes zurückzuführen.

### 6.3.3.4 Formaldehydemission

Während der Stapellagerung wird die Formaldehydemission der MUF- (Abbildung 44) und MUPF-Platten (Abbildung 45) sowohl bei 75°C als auch bei 100°C deutlich vermindert. Unmittelbar nach dem Verpressen weist die Formaldehydemission der MUF-Platten etwa 1,0 mg/kg (Flaschenmethode) auf, dies entspricht etwa einer Größenordnung von 5 mg/100g nach der Perforatormethode. Im Verlauf der Stapellagerung wird die Formaldehydemission auf 0,4 mg/kg bei 75°C und auf 0,2 mg/kg bei 100°C über einen Zeitraum von 168 Stunden vermindert. Die größten Änderungen finden in den ersten 72 Stunden statt, darüber hinaus waren die Änderungen nur noch marginal.

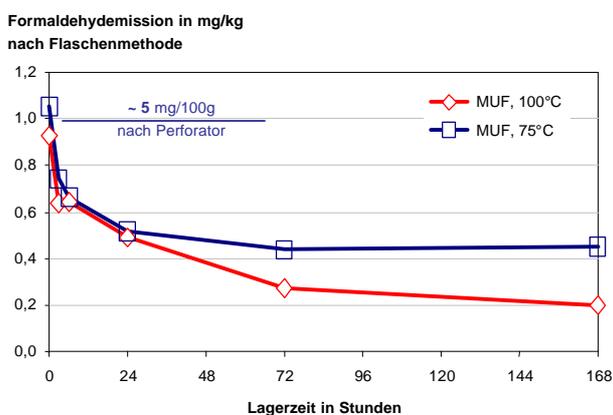


Abbildung 44: Entwicklung der Formaldehydemission für MUF-Platten während der Stapellagerung bei 75 und 100°C.

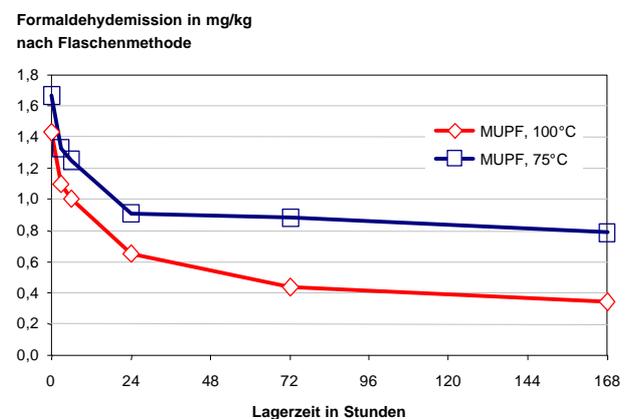


Abbildung 45: Entwicklung der Formaldehydemission für MUPF-Platten während der Stapellagerung bei 75 und 100°C.

Bei den MUPF-Platten wird die Formaldehydemission von 1,6 mg/kg auf 0,8 mg/kg bei 75°C und von 1,4 auf 0,4 mg/kg bei 100°C Stapeltemperatur gesenkt. Auch hier sind die Änderungen nach 72 Stunden abgeschlossen.

### Erkenntnisse

Die Abnahme der Formaldehydemission kann sowohl auf eine weitere Aushärtung des Harzes als auch auf das Ausdampfen des freien Formaldehyds aus den kleinformatischen

Laborplatten zurückgeführt werden. Daher müssen Untersuchungen an Platten mit industriellen Abmessungen durchgeführt werden, um eine genauere Aussage über das Verhalten der Formaldehydemission während der Lagerung zu treffen.

### 6.3.3.5 Ausgleichsfeuchte

Die Ausgleichsfeuchte bei 20°C und 65% relativer Luftfeuchte wird unter allen Bedingungen sowohl für MUF- (Abbildung 46) als auch für MUPF-Platten (Abbildung 47) vermindert. Ausgehend von einem Anfangswert um 11% nimmt die Ausgleichsfeuchte bei einer Stapeltemperatur von 100°C innerhalb von 168 Stunden für beide Harztypen auf 9% ab. Bei 75°C wird eine Ausgleichfeuchte von 9,5% für die MUF-Platten und 9,8% für MUPF-Platten erreicht. Die größten Änderungen finden für alle Parameter indes innerhalb der ersten 24 Stunden statt. Darüber hinaus werden die Änderungen deutlich geringer.

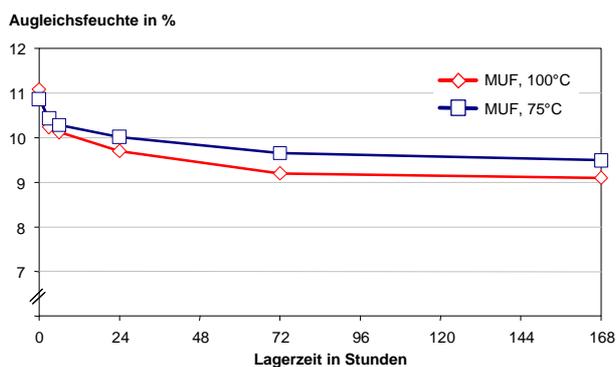


Abbildung 46: Entwicklung der Ausgleichsfeuchte bei 20°C und 65% rel.LF für MUF-Platten während der Stapellagerung bei 75 und 100°C.

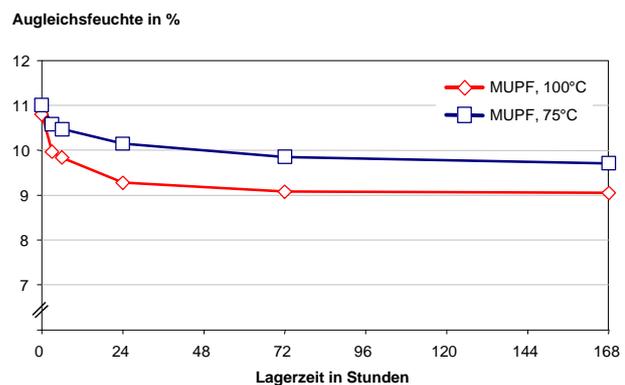


Abbildung 47: Entwicklung der Ausgleichsfeuchte bei 20°C und 65% rel.LF für MUPF-Platten während der Stapellagerung bei 75 und 100°C.

### Erkenntnisse

Die Abnahme der Ausgleichsfeuchte ist durch die thermische Vergütung des Holzes begründet. Die Sorptionsfähigkeit des Holzes nimmt durch Temperatur- und Feuchteinfluss ab (Weichert 1963). Je höher die Temperatur, desto stärker wird die Sorptionsisotherme vermindert (Kollmann und Schneider 1963).

### 6.3.3.6 Konsequenzen für die industrielle Praxis

Es ist bei MUF- und MUPF-Harzen von einer geringfügigen Verbesserung der Querkzugfestigkeit während der Stapellagerung auszugehen. Wie auch bei UF-Harzen ist die Lagertemperatur begrenzt. Stapeltemperaturen von 100°C und mehr, wie sie bei PF-Harzen angewendet werden, sind für Harze auf Harnstoff- und Melaminbasis deutlich zu hoch und führen zu einem gravierenden Festigkeitsabfall. Andererseits wird die Dickenquellung gerade bei einer Stapeltemperatur von 100°C bis zu einer Lagerzeit von 24 Stunden deutlich vermindert. Auch die Formaldehydemission und die Ausgleichsfeuchte werden bei höherer Stapeltemperatur stärker vermindert.

Mit Hilfe der Stapellagerung ist es möglich, Platten mit einer geringeren Dickenquellung herzustellen, wenn die Lagerbedingungen entsprechend ausgewählt werden. Die Platteneigenschaften werden im Stapel beeinflusst, wie es in der Presse nicht möglich sondern nur durch Zugabe von kostenintensiven Zuschlagstoffen erreicht werden kann. Als Beispiel sei hier die Formaldehydemission oder die Ausgleichsfeuchte genannt, diese Eigenschaften können während der Lagerung deutlich reduziert werden, unter ungünstigen Bedingungen zum Teil allerdings auf Kosten der Querkzugfestigkeit.

Es muss berücksichtigt werden, für welche Dauer die Platten den hohen Temperaturen ausgesetzt werden, denn bereits eine kurzzeitige Lagerung bis zu 3 Stunden wirkt sich positiv auf alle Eigenschaften aus.

Die vorliegenden Ergebnisse zeigen, wie bedeutsam es ist, die Temperatur während der Lagerung gleichmäßig auf den gesamten Stapel einwirken zu lassen, damit die positiven Effekte nicht nur im Kernbereich des Stapel erzielt werden. Werden die Stapel auf konventionelle Art gestapelt, so wird der Rand von etwa 20 cm (s.o.) von diesem Einfluss ausgespart. Dies führt dazu, dass es in der Platte einen vergüteten Kernbereich und einen kaum vergüteten Randbereich gibt. Gleichzeitig muss davon ausgegangen werden, dass auch die äußeren Platten des Stapels nicht der Temperatur ausgesetzt sind. Soll der Temperatureffekt ausgenutzt werden, müssen Maßnahmen getroffen werden, um Temperatur und auch Feuchte gleichmäßig im Stapel zu verteilen.

### 6.3.4 PF-Harze

#### 6.3.4.1 Querzugfestigkeit

In Abbildung 48 ist die Entwicklung der Querzugfestigkeit für Platten mit einem unmodifizierten PF-Harz in der Mittelschicht, während der Stapellagerung bei Temperaturen von 80°C, 95°C und 110°C dargestellt. Der Anfangswert vor der Lagerung liegt für diese drei Versuchsreihen zwischen 0,40 und 0,44 N/mm<sup>2</sup>. Während der Lagerung über einen Zeitraum von 168 Stunden wird die Querzugfestigkeit in allen Fällen deutlich gesteigert. Mit höherer Temperatur ist die Zunahme stärker ausgeprägt. Die höchsten Festigkeitswerte und somit auch die größte Zunahme während der Lagerung werden an den Platten erzielt, die mit einer Stapeltemperatur von 110°C gelagert wurden. Die Zunahme in diesem Fall beträgt rund 55%. Bei einer Lagertemperatur von 80°C wird noch ein Zugewinn von über 40% erzielt.

In Abbildung 49 ist die Zunahme der Querzugfestigkeit für Platten mit modifiziertem PF-Harz während der Stapellagerung aufgetragen. Die Anfangsfestigkeit vor der Lagerung liegt für dieses Harz mit 0,54 bis 0,59 N/mm<sup>2</sup> deutlich höher als bei dem unmodifizierten Harz. Es findet zwar ebenfalls eine merkliche Zunahme während der Lagerung statt, allerdings ist das maximale Festigkeitsniveau bei 0,70 N/mm<sup>2</sup> bereits nach etwa 3 Stunden erreicht. Dies entspricht einer relativen Zunahme von etwa 25%. Eine Differenzierung hinsichtlich der Stapeltemperatur ist nicht möglich. Der Temperatureinfluss hinsichtlich der Festigkeitszunahme erscheint für das modifizierte PF-Harz von untergeordneter Bedeutung zu sein.

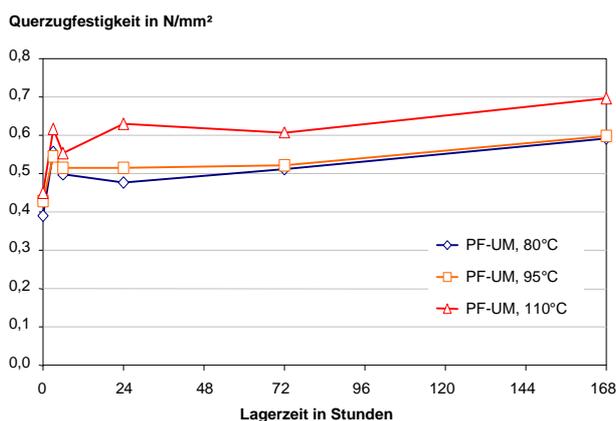


Abbildung 48: Entwicklung der Querzugfestigkeit für PF-Platten (unmodifiziert) während der Stapellagerung bei 80, 95 und 110°C.

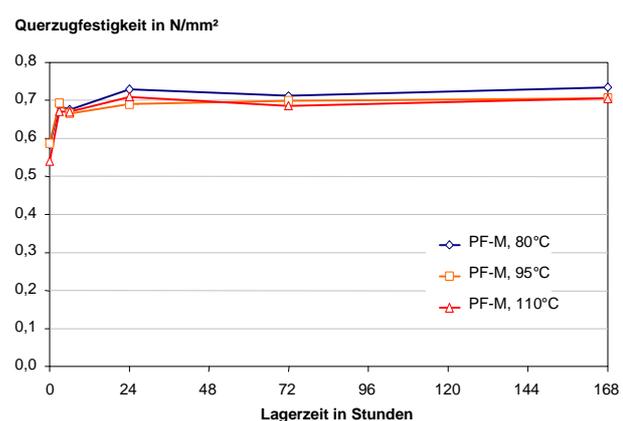


Abbildung 49: Entwicklung der Querzugfestigkeit für PF-Platten (modifiziert) während der Stapellagerung bei 80, 95 und 110°C.

Abbildung 50 und Abbildung 51 zeigen den Einfluss des Presszeitfaktors bezüglich der Eigenschaftsentwicklung der verwendeten Harze. Für beide Harze ist erkennbar, dass mit einem geringeren Presszeitfaktor erwartungsgemäß die Anfangsfestigkeit vor der Lagerung deutlich niedriger ist. Für das unmodifizierte PF-Harz liegen die Werte nach dem Verpressen

bei einem Presszeitfaktor von 9 s/mm bei 0,30 N/mm<sup>2</sup> und bei 12 s/mm über 0,50 N/mm<sup>2</sup>. Das modifizierte PF-Harz weist Anfangswerte um 0,50 N/mm<sup>2</sup> bei einem Presszeitfaktor von 9 s/mm und in Höhe von 0,60 N/mm<sup>2</sup> bei 12 s/mm auf. Während der Lagerung ist eine größere Zunahme der Eigenschaft bei kürzerer Presszeit zu verzeichnen. Bei dem unmodifizierten Harz ist der Zugewinn an Querkzugfestigkeit mit höherer Temperatur größer. Für das modifizierte Harz wiederum ist der Temperatureinfluss nicht erkennbar.

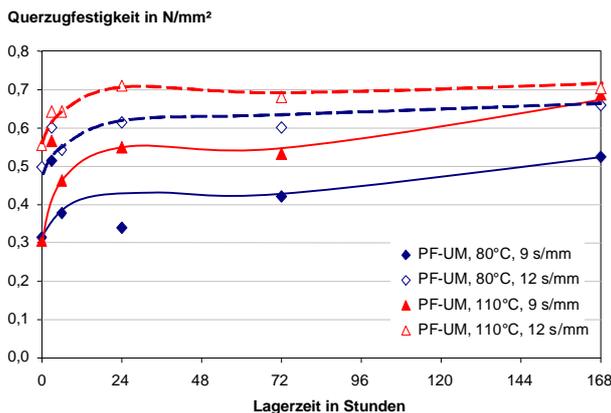


Abbildung 50: Entwicklung der Querkzugfestigkeit für PF-Platten (unmodifiziert) während der Stapellagerung bei 80 und 110°C bei unterschiedlichen Presszeitfaktoren.

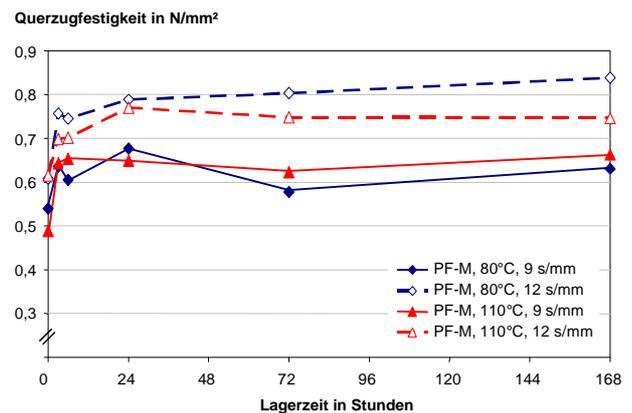


Abbildung 51: Entwicklung der Querkzugfestigkeit für PF-Platten (modifiziert) während der Stapellagerung bei 80 und 110°C bei unterschiedlichen Presszeitfaktoren.

Bei sonst gleichen Herstellungsbedingungen liegt die Anfangsfestigkeit für das modifizierte Harz auf einem deutlich höheren Niveau. Dies ist auf den Umstand zurückzuführen, dass das modifizierte PF-Harz höher vorkondensiert ist. Durch die Modifikation des Harzes mit Harnstoff wird die Viskosität auf einen Wert herabgesetzt, bei dem eine sinnvolle Verarbeitung gewährleistet ist. Gleichzeitig wird durch die Modifikation der Feststoffgehalt des Harzes erhöht, um zu vermeiden, dass mit dem Harz eine zu große Menge an Wasser in die Matten vor dem Verpressen eingebracht wird, was zu einer verstärkten Gefahr von Dampfplatzern führen würde. Das modifizierte Harz eignet sich besonders für den Einsatz in kontinuierlichen Pressensystemen, da mit ihnen aus den oben genannten Gründen eine schnellere Produktion ermöglicht wird als mit dem unmodifizierten Harz.

### Erkenntnisse

Es ist bekannt, dass Phenolharze bei erhöhter Stapeltemperatur nach der Presse weiter aushärten. Im Zuge dieser "Nachhärtung" werden die physikalisch-technologischen Eigenschaften verbessert (Deppe und Ernst 1965, Roffael et al. 1973). Hier kann eine strenge Temperaturabhängigkeit für das Nachreifverhalten während der Lagerung des unmodifizierten PF-Harzes dargelegt werden. Für das modifizierte Harz ist die Temperaturabhängigkeit nicht erkennbar. Dies lässt sich darauf zurückführen, dass die

Differenz des Kondensationsgrades unmittelbar nach dem Verpressen und dem maximal möglichen Kondensationsgrad des Harzes deutlich geringer ist. Das Harz ist in der Presse schon viel weiter ausgehärtet; dies spiegelt sich im Festigkeitsniveau wider. Somit macht es für diese Harze keinen gravierenden Unterschied, bei welcher Temperatur nachgetempert wird.

Die Prüfung der Querkzugfestigkeit nach Kochprüfung konnte aufgrund mangelnder Probenanzahl nicht durchgeführt werden. Daher wird durch Untersuchungen an industriell gefertigten PF-Spanplatten gezeigt, welchen Einfluss die Stapeltemperatur während der Lagerung auf die Querkzugfestigkeit nach Kochprüfung hat (siehe Kapitel 7.4.4.3).

### 6.3.4.2 Abhebefestigkeit

Die Entwicklung der Abhebefestigkeit während der Stapellagerung bei 80°C, 95°C und 110°C ist in Abbildung 52 dargestellt. Ausgehend von einem Anfangswert nach dem Verpressen über 1,6 N/mm<sup>2</sup> kann ein Anstieg der Abhebefestigkeit auf etwa 1,9 N/mm<sup>2</sup> innerhalb der ersten 6 Stunden der Lagerung festgestellt werden. Auf diesem Niveau verbleibt die Festigkeit bis zu 72 Stunden. Darüber hinaus bis zur abschließenden Messung nach 168 Stunden wird eine negative Tendenz bei der Entwicklung der Abhebefestigkeit erfasst.

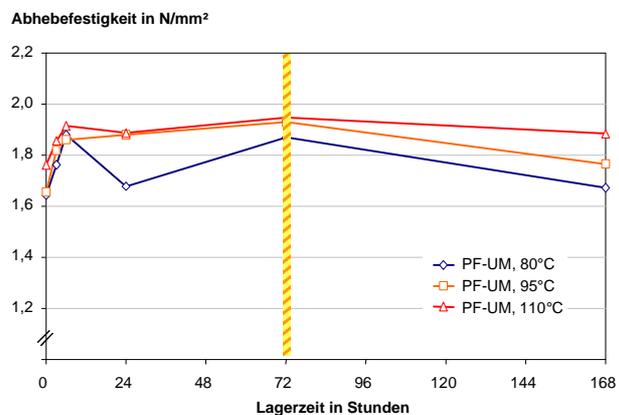


Abbildung 52: Entwicklung der Abhebefestigkeit für PF-Platten während der Stapellagerung bei 80, 95 und 110°C.

Auch in den Deckschichten kommt es zu einer weiteren Aushärtung des Harzes; dies zeigt sich in einer deutlichen Erhöhung der Festigkeit innerhalb von 6 Stunden. Analog zur Querkzugfestigkeit sind diese Änderungen in dem Bereich zwischen 80°C und 110°C nicht temperaturabhängig.

### 6.3.4.3 Dickenquellung

Die Entwicklung der Dickenquellung während der Stapellagerung bei 80°C, 95°C und 110°C ist für Platten mit unmodifiziertem PF-Harz in Abbildung 53 und mit dem modifizierten PF-Harz in Abbildung 54 dargestellt. Ausgehend von einem Anfangswert nach dem Verpressen um 13% wird die Dickenquellung der Platten mit dem unmodifizierten PF-Harz im Laufe der Lagerung im Stapel drastisch vermindert. Diese Verbesserung der Eigenschaft ist eindeutig

abhängig von der Temperatur: Je höher die Stapeltemperatur, umso größer ist die Verminderung der Quellung. Bei einer Temperatur von 80°C wird eine Quellung von 7%, bei 95°C ein Wert von 5,5% und bei 110°C wird eine Dickenquellung von nahezu 4% erzielt. Die deutlichsten Änderungen finden innerhalb der ersten 72 Stunden der Lagerung statt, darüber hinaus ergibt sich keine nennenswerte Veränderung mehr (Abbildung 53).

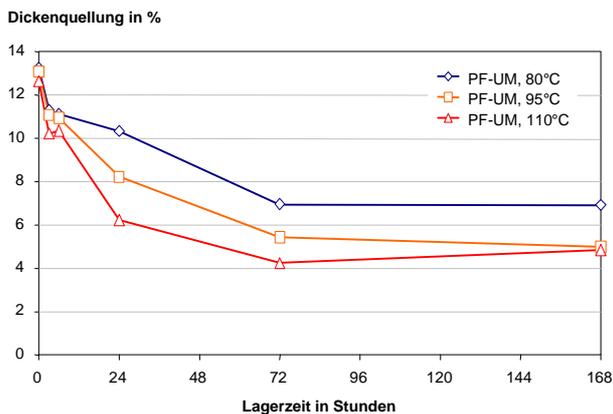


Abbildung 53: Entwicklung der Dickenquellung für PF-Platten (unmodifiziert) während der Stapellagerung bei 80, 95 und 110°C.

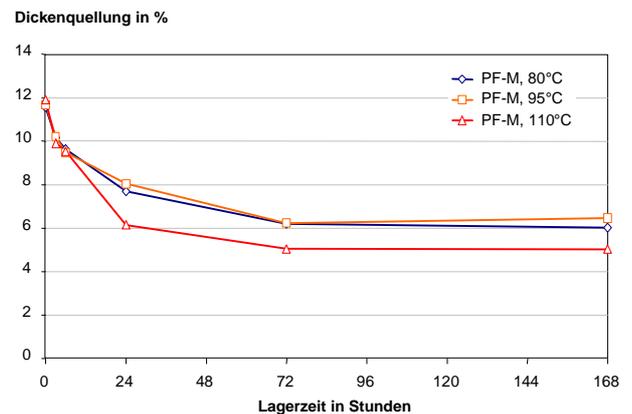


Abbildung 54: Entwicklung der Dickenquellung für PF-Platten (modifiziert) während der Stapellagerung bei 80, 95 und 110°C.

Die Dickenquellung der PF-Platten mit modifiziertem Harz liegt vor der Stapellagerung bei 12%. Auch hier werden die Werte während der Lagerung deutlich auf bis zu 5% vermindert. Allerdings erscheint, vergleichbar mit der Querkzugfestigkeit, der Temperatureinfluss nicht so stark ausgeprägt, wie bei dem unmodifizierten Harz. Es ist kein Unterschied zwischen der Lagerung bei 80°C und 95°C erkennbar, nach 72 Stunden wird hierbei ein Wert von 6% erreicht. Lediglich bei der sehr hohen Lagertemperatur von 110°C kann dieser Wert noch unterschritten werden. Auch hier ist nach 72 Stunden keine Änderung mehr feststellbar (Abbildung 54).

### Erkenntnisse

Das Zusammenspiel einer fortgesetzten Aushärtung der PF-Harze, des Spannungsabbaus innerhalb des Spangefüges sowie einer thermischen Vergütung des Holzes während der Lagerung bei hohen Temperaturen führt dazu, dass die Dickenquellung mehr als halbiert wird. Wie schon bei der Entwicklung der Querkzugfestigkeit während der Stapellagerung ist auch hier festzustellen, dass die Temperatur einen geringeren Einfluss auf das modifizierte PF-Harz hat. Es ist dennoch erkennbar, dass mit höherer Temperatur die Verbesserung der Dickenquellung größer ist. Der Temperatureinfluss auf die Änderung der Holzeigenschaften wird dadurch deutlich erkennbar, denn die Vergütung des Holzes ist mit höheren Temperaturen größer.

#### 6.3.4.4 pH-Wert

In Abbildung 55 und Abbildung 56 ist die Änderung der pH-Werte der Deck- und Mittelschichten für die untersuchten PF-Platten während der Stapellagerung über 168 Stunden bei 80°C und 110°C dargestellt. Es ist erkennbar, dass der Anfangs-pH-Wert vor der Stapellagerung für die Deckschichten mit 7,0 bis 7,1 unter dem der Mittelschichten mit 7,3 bis 7,6 liegt. Dies liegt aufgrund des deutlich niedrigeren Alkaligehaltes des Deckschichtharzes auch nahe. In Anbetracht der Tatsache, dass auch der Alkaligehalt des modifizierten MS-Harzes geringer ist als der des unmodifizierten Harzes, ist auch ein geringerer pH-Wert unmittelbar nach dem Verpressen des modifizierten PF-Harzes zu erwarten. Diese Erwartung trifft bei den vorliegenden Versuchen nur für den Vergleich der Messungen bei höherer Lagertemperatur zu (Abbildung 56). Möglicherweise beeinflusst hier der Holzarten-Mix die Ergebnisse in starkem Maße.

Während der Lagerung ist eine merkliche Verminderung des pH-Wertes zu erkennen. Die pH-Werte der Deckschichten werden auf 6,6 bei 110°C bzw. auf 6,8 bei 80°C Stapeltemperatur vermindert. Auch in der Mittelschicht der Platten werden Werte deutlich unter pH 7 erzielt: Bei einer Temperatur von 110°C wird der pH-Wert des unmodifizierten MS-Harzes auf 6,4 und des modifizierten Harzes auf 6,6 abgesenkt. Die korrespondierenden Werte bei einer Lagertemperatur von 80°C liegen um etwa je 0,2 darüber.

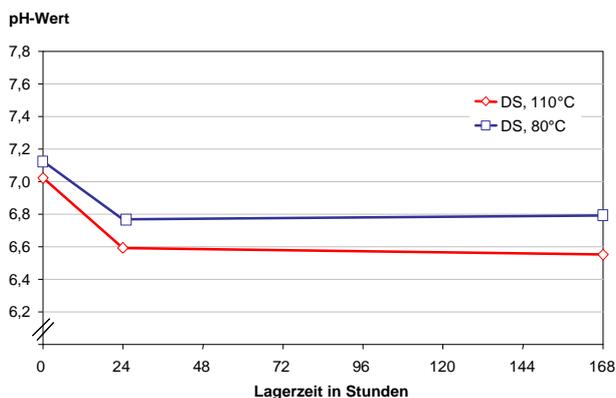


Abbildung 55: Entwicklung des pH-Wertes für PF-Platten in den Deckschichten während der Stapellagerung bei 80 und 110°C.

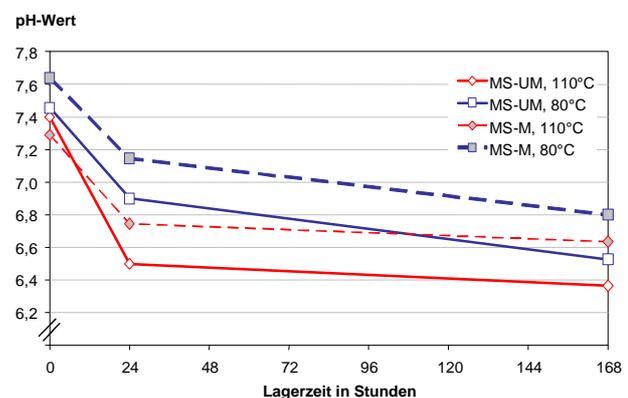


Abbildung 56: Entwicklung des pH-Wertes für PF-Platten (modifiziert und unmodifiziert) in der Mittelschicht während der Stapellagerung bei 80 und 110°C.

Der pH-Wert der Deckschichten ist geringer als der der jeweiligen Mittelschichten, da der Alkaligehalt des Deckschichtharzes mit 2,8% gegenüber 5,2 und 8,3% der Mittelschichtharze deutlich niedriger ist. Zudem wurde die Deckschicht nicht mit alkalischen Komponenten

(Natronlauge und Pottasche) zur Aushärtungsbeschleunigung versetzt, wie dies bei den MS-Harzen der Fall ist.

### Erkenntnisse

Bei Temperaturexposition über einen längeren Zeitraum werden Säuren (Ameisensäure etc.) aus dem Holz abgespalten. Die Säureabspaltung ist größer mit höherer Temperatur und höherer Feuchte des Holzes. Dies führt dazu, dass der hohe pH-Wert der PF-Harzgebundenen Spanplatten während der Lagerung merklich absinkt.

#### 6.3.4.5 Ausgleichsfeuchte

Die Ausgleichsfeuchte bei 20°C und 65% relativer Luftfeuchte wird unter allen Bedingungen für beide PF-Harze (unmodifiziert – Abbildung 57 und modifiziert – Abbildung 58) vermindert. Ausgehend von einem Anfangswert um 13% nimmt die Ausgleichsfeuchte bei einer Stapeltemperatur von 100°C innerhalb von 168 Stunden für das unmodifizierte Harz auf etwa 10% ab. Bei 80°C wird eine Ausgleichfeuchte von 11% erreicht. Bei dem modifizierten Harz liegt der Ausgangswert bei etwa 14% und wird bei einer Temperatur von 110°C auf unter 11% und bei 80°C auf 11,5% vermindert.

Die größten Änderungen finden für alle Parameter innerhalb der ersten 24 Stunden statt. Darüber hinaus werden die Änderungen deutlich geringer.

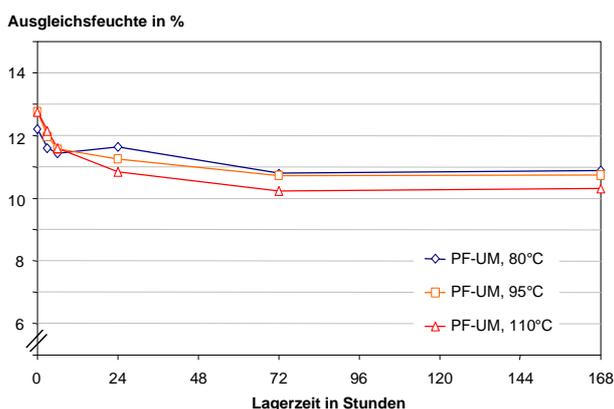


Abbildung 57: Entwicklung der Ausgleichsfeuchte bei 20°C und 65% rel.LF für PF-Platten (unmodifiziert) während der Stapellagerung bei 80, 95 und 110°C.

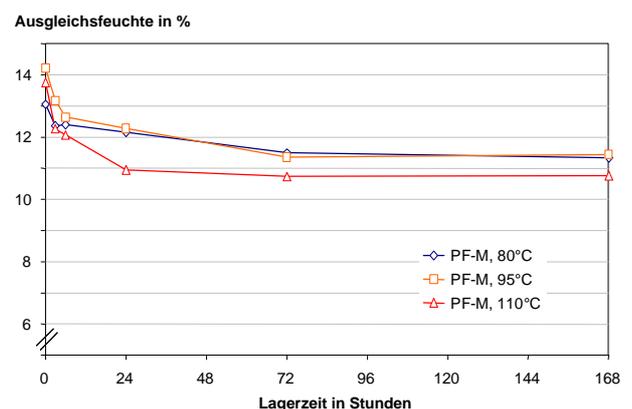


Abbildung 58: Entwicklung der Ausgleichsfeuchte bei 20°C und 65% rel.LF für PF-Platten (modifiziert) während der Stapellagerung bei 80, 95 und 110°C.

Die Änderung der Ausgleichsfeuchte ist ausschließlich durch die Veränderung der Holzeigenschaften hervorgerufen (s.o.). Dadurch wird die thermische Veränderung des

Holzes während der Lagerung deutlich. Es ist erkennbar, dass diese Veränderung mit höherer Temperatur ansteigt, wie dies weiter oben bereits beschrieben wurde.

#### **6.3.4.6 Konsequenzen für die industrielle Praxis**

Für PF-Harze gilt: Je länger die Platten nach dem Verpressen einer möglichst hohen Temperatur ausgesetzt sind, umso besser werden die physikalisch-technologischen und chemischen Eigenschaften ausgeprägt. Die Exposition der Platten einer möglichst hohen Temperatur wirkt sich durchweg positiv auf die Eigenschaften aus. Allerdings muss auch hier eine mögliche Farbveränderung berücksichtigt werden. Die extrem hohen Temperaturen um 100°C wirken sich gravierend auf die natürliche Farbe aus. Mit längerer Lagerung bei hohen Temperaturen wird die Färbung der Platten zunehmend dunkler. Im Hinblick auf eine nachfolgende Oberflächenbehandlung und zunehmende Kundenforderung nach helleren Platten ist eine dunkle Färbung nicht immer erwünscht.

Die Wahl der Lagerbedingungen (v.a. der Temperatur) kann daher auch bei den PF-Harzen nur ein Kompromiss sein, der sich aus den speziellen Anforderungen der Platten in ihrer Anwendung ergibt.

## 6.4 Zusammenfassung der Laboruntersuchungen

- ✓ Im Vorfeld der Untersuchungen wurden die grundsätzlichen Bedingungen hinsichtlich Temperatur und Feuchte im Plattenstapel ermittelt.
- ✓ Es ist prinzipiell möglich, die industriellen Stapelbedingungen nachzustellen. Dabei können folgende Parameter kontrolliert bzw. eingestellt werden: Stapeltemperatur, Plattenfeuchte und Stapelhöhe.
- ✓ Erst dadurch wurde es möglich, eine große Zahl verschiedener Produktionsparameter bezüglich ihres Einflusses auf die Eigenschaftsentwicklung der Spanplatten während der Stapellagerung im Labor zu untersuchen.

### **UF-Harze**

- ✓ Die Querkzugfestigkeit bleibt beim Standardharz während der hier untersuchten Stapelbedingungen unverändert. Es kommt weder zu einer nennenswerten Zunahme, noch wird die Querkzugfestigkeit vermindert.
- ✓ Die Querkzugfestigkeit kann beim Versuchsharz (mit einem Molverhältnis  $F : U < 1$ ) unter bestimmten Bedingungen deutlich verbessert werden. Eine hohe Mattenfeuchte, mittlere Härterdosierung sowie ein Presszeitfaktor von 9 s/mm sind im vorliegenden Fall optimal.
- ✓ Die Dickenquellung wird während der Lagerung prinzipiell vermindert. Der Effekt ist bei höherer Temperatur merklich größer (Versuchsharz).
- ✓ Der Formaldehydgehalt sowie die Ausgleichsfeuchte werden vermindert. Bei höherer Temperatur wird auch dieser Effekt größer.
- ✓ Als Ursachen für die Eigenschaftsänderungen kann die Veränderung des Holzes (thermische Vergütung und Spannungsabbau) herangezogen werden. Für das Versuchsharz kann der Eigenschaftszunahme zusätzlich eine Nachhärtung des Klebers ursächlich zugeschrieben werden.

**MUF- und MUPF-Harze**

- ✓ Eine Lagertemperatur von 100°C ist für MUF- und MUPF-Harze eindeutig zu hoch. Bei Temperaturen um 75°C können während der Lagerung zum Teil deutliche Eigenschaftsverbesserungen erzielt werden. Dabei verhalten sich die beiden Leimsysteme prinzipiell ähnlich.
- ✓ Die Zunahme der Querkzugfestigkeit der MUF- und MUPF-Platten beträgt bei einer Stapeltemperatur von 75°C unter 10%. Bei 100°C Lagertemperatur wird die Festigkeit innerhalb 168 Stunden um bis zu 15% reduziert.
- ✓ Zunächst wird die Dickenquellung bei beiden Stapeltemperaturen reduziert. Bis zu einer Lagerzeit von 24 Stunden ist die Abnahme der Quellwerte bei einer Temperatur von 100°C sogar größer, aber im weiteren Verlauf verschlechtern sich die Werte wieder. Hier wirkt sich die verminderte Verklebungsfestigkeit merklich auf die Dickenquellung aus.
- ✓ Die Formaldehydemission sowie die Ausgleichsfeuchte werden vermindert. Die Stapeltemperatur hat einen entscheidenden Einfluss auf diese Eigenschaften: Je höher die Temperatur, umso stärker werden die Formaldehydemission und die Ausgleichsfeuchte vermindert.

### **PF-Harze**

- ✓ Das modifizierte PF-Harz ist gegenüber dem unmodifizierten Harz unter gleichen Verfahrensbedingungen am Ende des Heißpressvorgangs weiter auskondensiert. Daraus resultierten merklich höhere Festigkeits- und geringere Quellwerte.
- ✓ Die Eigenschaften der PF-Platten werden während der Stapellagerung deutlich verbessert. Für das unmodifizierte Harz gilt: Je höher die Temperatur, umso besser entwickeln sich die Eigenschaften. Bei dem modifizierten Harz ist der Temperatureinfluss nicht ausgeprägt.
- ✓ Die Querkzugfestigkeit der Platten aus unmodifiziertem PF-Harz wurde in Abhängigkeit von der Temperatur um über 50% erhöht. Bei dem modifizierten PF-Harz liegt die maximale Festigkeit auf dem gleichen Niveau. Während der Lagerung ist das Nachreif-Potenzial geringer. Eine geringe Festigkeit, die aus einer niedrigen Presszeit resultiert, kann während der Lagerung (v.a. bei hohen Temperaturen) in jedem Fall auf das gleiche Festigkeitsniveau angehoben werden, wie es für die Platten mit einer längeren Presszeit erreicht wurde.
- ✓ Analog zu den Ausführungen der Querkzugfestigkeit wird die Dickenquellung der verschiedenen PF-Platten beträchtlich vermindert. In Abhängigkeit von der Temperatur werden die Quellwerte von etwa 12% bzw. 13% auf bis zu 4% gesenkt. Hier hat neben der fortgesetzten Kondensation des Harzes die thermische Vergütung des Holzes einen entscheidenden Anteil an der Verbesserung dieser Eigenschaft.
- ✓ Die thermische Modifikation spiegelt sich in der Entwicklung des pH-Wertes und der Ausgleichsfeuchte wider. Diese Eigenschaften werden insbesondere in Abhängigkeit von der Stapeltemperatur merklich vermindert.

## **7 Hauptversuche in der Industrie**

### **7.1 Zielsetzungen und Fragestellungen**

#### ***für Untersuchungen an UF-Spanplatten***

1. Können mit Hilfe der Stapellagerung bei erhöhter Temperatur in der industriellen Produktion die Platteneigenschaften verbessert werden?
2. Ist es möglich, ein deutlich geringeres Formaldehydniveau mit Hilfe der Stapellagerung zu erreichen?
3. Kann mit Hilfe der Stapellagerung das gleiche Eigenschaftsniveau (v.a. Querkzugfestigkeit) nach einer deutlich verkürzten Presszeit erreicht werden wie mit einer längeren Presszeit?

#### ***für Untersuchungen an MUF- und MUPF-Spanplatten***

1. Kann der positive Trend der Eigenschaftsentwicklung bei einem moderaten Temperaturniveau aus den Ergebnissen der Laboruntersuchung an industriell gefertigten Platten bestätigt werden.?
2. Welche Größenordnungen an Eigenschaftszunahmen (v.a. Dickenquellung und Querkzugfestigkeit) sind industriell möglich?
3. Welche Lagerbedingungen sind im konventionellen Produktionsprozess realisierbar? Wie ist die Temperatur der Platten beeinflussbar?
4. Welchen Einfluss hat die Stapellagerung insbesondere auf die Feuchtebeständigkeit der Platten (v.a. Dickenquellung sowie Querkzugfestigkeit nach Kochprüfung)?

#### ***für Untersuchungen an PF-Spanplatten***

1. Wie stark ist der Temperatureinfluss auf die Änderung der PF-verleimten Spanplatten unter industriellen Bedingungen?
2. Wie wirkt sich die unterschiedliche Platzierung der Platten im Stapel auf ihre Temperatur und damit auf ihre Eigenschaften aus?

***für Untersuchungen an PMDI-Spanplatten***

1. Wie kann die Temperaturentwicklung durch unterschiedliche Einstapelbedingungen beeinflusst werden?
2. Welchen Einfluss haben unterschiedliche Stapeltemperaturen prinzipiell auf die Eigenschaften von PMDI-gebundenen Spanplatten?

***für Untersuchungen an MDF-Platten***

1. Wie ist die Eigenschaftsentwicklung von MDF im Stapel? Unterscheiden sich MDF-Platten diesbezüglich prinzipiell von Spanplatten?
2. Können mit Hilfe der Stapellagerung bei erhöhter Temperatur in der industriellen Produktion die Platteneigenschaften grundsätzlich verbessert werden?

## 7.2 Material

### 7.2.1 UF-Spanplatten

In einer industriellen Produktionsanlage wurden insgesamt vier Stapel UF-verleimter Platten untersucht, die unter verschiedenen Produktionsbedingungen hergestellt wurden. Die Abmessungen der Platten betragen 4.120 x 2.650 mm<sup>2</sup>. Die Platten hatten eine Rohdicke von 18,5 mm sowie eine Nettodicke von 17,9 mm nach dem Schleifen; die Zieldichte war 645 kg/m<sup>3</sup>.

Die Deckschicht wurde mit 10% (Festharz auf atro Spanmaterial) eines konventionellen Harnstoffharzes, die Mittelschicht mit 8% des selben Harzes beleimt und in einer kontinuierlichen Presse verpresst. Bei der Produktion der Platten und bei der Errichtung der Stapel wurden die folgenden Parameter variiert: Der Presszeitfaktor wurde in zwei Stufen mit 4,1 und 4,7 Sekunden je Millimeter Plattenstärke eingestellt. Nach dem Verpressen wurden die Platten auf unterschiedliche Temperaturen gekühlt, indem sie entweder durch zwei oder vier Kühlsternwender befördert wurden. Nach den Sternwendern wurden die Platten abgestapelt. Nach genau zwei Stunden wurden diese Stapel der Schleifstraße zugeführt, die Platten auf die Nettodicke geschliffen und wiederum eingestapelt. Die Stapel bestanden aus 40 Platten (Höhe etwa 70 cm). Die variablen Parameter sind in Tabelle 22 mit den dazugehörigen Probennummern

dargestellt. Die Stapel wurden anschließend so manipuliert, dass unmittelbar nach dem Schleifen sowie nach 6, 24, 48 und 72 Stunden Lagerzeit ein Probe-streifen zur Prüfung entnommen werden konnte.

Tabelle 22: Variable Produktionsparameter der UF-Platten.

<b>Stapel Nr.</b>	<b>Harz Typ</b>	<b>PZF s/mm</b>	<b>Wender Anzahl</b>
1	UF	4,7	4
2	UF	4,7	2
3	UF	4,1	4
4	UF	4,1	2

### 7.2.2 MUF-Spanplatten

In einer industriellen Produktionsanlage wurden insgesamt drei Stapel aus MUF-verleimten Platten untersucht, die unter verschiedenen Produktionsbedingungen hergestellt wurden. Die Abmessungen der Platten betragen 5.350 x 2.650 mm<sup>2</sup>. Die Platten hatten eine Rohdicke von 18,5 mm; die Zieldichte lag bei etwa 700 kg/m<sup>3</sup>.

Tabelle 23: Variable Produktionsparameter der MUF-Platten.

<b>Stapel Nr.</b>	<b>Harz Typ</b>	<b>Wender Anz.</b>	<b>Lagerung in h</b>
1	MUF	4	2
2	MUF	2	2
3	MUF	2	3

Die Deckschicht wurde mit 14% (Festharz auf atro Spanmaterial) eines Melamin-Harnstoffharzes und die Mittelschicht mit 14,5% des selben Harzes beleimt und in einer kontinuierlichen Presse verpresst. Die Platten des ersten Stapels wurden in vier Sternwendern gekühlt und nach zwei Stunden Lagerung im Zwischenlager der Schleifstraße zugeführt. Die Platten des zweiten und dritten Stapels wurden nach Durchlauf von nur zwei Wendern mit einer deutlich höheren Temperatur abgestapelt. Der zweite Stapel wurde nach zwei Stunden und der dritte nach sechs Stunden auf die Nettodicke von 17,9 mm geschliffen. Nach dem Schleifen wurden die Platten wieder eingestapelt. Die Stapel bestanden aus 40 Platten und hatten somit eine Höhe von etwa 70 cm. Die variablen Parameter sind in Tabelle 23 mit den dazugehörigen Probennummern dargestellt. Die Stapel wurden so manipuliert, dass unmittelbar nach dem Schleifen sowie nach 6, 24, 48 und 72 Stunden Lagerzeit ein Probestreifen entnommen werden konnte.

### **7.2.3 MUPF-Spanplatten**

In der industriellen Produktion wurden zwei verschiedene Plattentypen einer MUPF-Verleimung untersucht. Es wurden zunächst Platten mit einer Nenndicke von 17,5 mm und einer Dichte von  $840 \text{ kg/m}^3$  für 24 Stunden im Stapel gelagert, nachdem die Platten konventionell die Sternwender durchlaufen hatten. Die Einstapeltemperatur betrug etwa  $70^\circ\text{C}$ . In einer zweiten Versuchsreihe wurden Platten mit einer Dicke von 20,5 mm (Dichte ebenfalls  $840 \text{ kg/m}^3$ ) unmittelbar nach dem Verpressen zu 30 Platten eingestapelt. Die Stapeltemperatur (Temperatur zwischen zwei Platten) betrug dabei etwa  $95^\circ\text{C}$ . Nach 1, 2 und 3 Stunden wurden die Platten durch den Sternwender geführt, dadurch gekühlt und wiederum eingestapelt.

### 7.2.4 PF-Spanplatten

In einer Produktionsanlage wurden mehrere Stapel PF-verleimter Spanplatten untersucht. Die Platten wurden nach dem Verpressen in einer kontinuierlich arbeitenden Heißpresse zunächst für wenige Stunden in "Großstapeln" mit ca. 200 Platten (Höhe: etwa 3,8 m) gelagert. Anschließend wurden die Platten geschliffen und in kleineren Stapeln mit 40 Platten (Höhe: etwa 0,76 m) eingelagert. Die Abmessungen der PF-Platten betragen  $5.650 \times 2.070 \times 19 \text{ mm}^3$ . Die mittlere Dichte lag bei  $740 \text{ kg/m}^3$ . Es wurden insgesamt vier Großstapel gebildet, die vor dem Schleifen für 2, 8, 24 oder 48 Stunden gelagert wurden.

#### Lagerung der Großstapel vor dem Schleifen: 2h, 8h, 24h und 48h

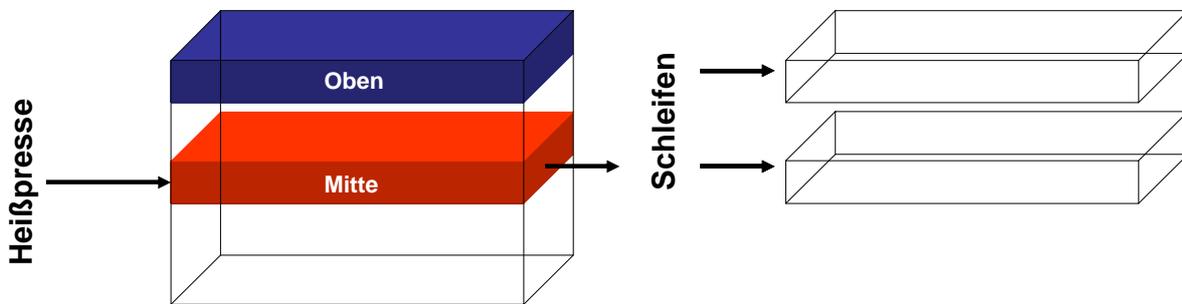


Abbildung 59: Ablaufschema für die Errichtung der Stapel aus PF-Platten in der Produktion.

Nach dem Schleifvorgang wurden wiederum Stapel, diesmal zu je 40 Platten, gebildet. Es wurden diejenigen Stapel für weitere Untersuchungen bereitgestellt, die jeweils aus den obersten Platten und aus den Platten aus der Mitte des vorherigen Großstapels gebildet wurden (Abbildung 59). Die übrigen Herstellparameter der Platten waren konstant. Die Stapel wurden so manipuliert, dass unmittelbar nach dem Schleifen sowie nach 48, 96 und 144 Stunden Lagerzeit nach dem Schleifen ein Probestreifen aus dem Stapel entnommen werden konnte.

### 7.2.5 PMDI-Spanplatten

In einer Produktionsanlage wurden mehrere Stapel PMDI-verleimter Spanplatten untersucht. Die Platten wurden nach dem Verpressen in einer Mehretagenpresse zunächst in Stapeln mit 58 Platten (Höhe: etwa 0,9 m) gelagert. Es wurden insgesamt drei Stapel gebildet, die vor dem Schleifen für 3, 24 oder 48 Stunden gelagert wurden. Anschließend wurden die Platten auf das Nettomaß von 13 mm geschliffen und wieder eingestapelt. Die Abmessungen der Platten betragen  $8.560 \times 2.280 \text{ mm}^2$ . Die mittlere Dichte war  $745 \text{ kg/m}^3$ . Die übrigen Produktionsparameter der Platten waren konstant.

### **7.2.6 MDF-Platten**

In einer industriellen Produktionsanlage wurden die Änderungen von MDF-Platten im Plattenstapel untersucht. Dabei handelte es sich um ein typisches Plattensortiment für Laminatfußböden, die Rohdicke betrug 8,1 mm und die Dichte 870 kg/m<sup>3</sup>. Die Abmessungen der Platten betragen 2.800 x 2.040 mm<sup>2</sup>, sie wurden mit einem UF-Harz in einer kontinuierlichen Presse hergestellt und nach dem Pressvorgang in Sternwendern vor der Lagerung im Stapel heruntergekühlt. Es wurden zwei Stapel mit je 120 Platten (Höhe: 972 mm) gebildet: der erste aus Platten, die zwei Sternwender durchliefen. Daraus resultierte eine Abkühlzeit von etwa 10 Minuten für jede Platte. Der zweite Stapel wurde aus Platten gebildet, die drei Sternwender in 15 Minuten durchliefen.

## 7.3 Methoden

### 7.3.1 Probennahme

#### 7.3.1.1 UF-Platten

Es wurde jeweils eine Nullprobe bezogen auf Probenpaare 1 und 2, 3 und 4 sowie 5 und 6 (vgl. Tabelle 22) vor der Stapellagerung entnommen. Diese Nullproben wurden aus der "Laborschnitt"-Vorrichtung der Diagonaltrennsägen unmittelbar nach der Heißpresse aus dem Prozess entnommen. Damit die Vergleichbarkeit dieser Proben mit den später geschliffenen Platten gewährleistet ist, wurden auch diese "Laborschnitte" in der Schleifstraße unter gleichen Bedingungen auf die Nettodicke geschliffen.

Die Stapel aus den geschliffenen Platten wurden anschließend so manipuliert, dass unmittelbar nach dem Schleifen sowie nach 6, 24, 48 und 72 Lagerzeit ein Probestreifen zur Prüfung entnommen werden konnte. Die obere Hälfte des Stapels wurde mit Hilfe eines Gabelstaplers angehoben, und der zentrale Bereich der Platte aus der Mitte des Stapels wurde mit einer Handkreissäge in 40 cm breite Streifen geschnitten (Abbildung 60). Um eine weitere Auskühlung dieser Platte zu vermeiden, wurde der Arbeitsschritt so organisiert, dass der Stapel in schnellst möglicher Zeit wieder zusammengeführt werden konnte. Nach den vorgesehenen Entnahmezeitpunkten konnten durch diese Vorbereitung die Probestreifen aus den Querseiten des Stapels gezogen werden, ohne dass der Stapel wieder "geöffnet" werden musste. Die Ränder des Stapels wurden lediglich mit Keilen angelupft. Anstelle des Probestreifens wurde ein

vorgewärmter "Dummy" in den Stapel eingelegt. Damit wurde vermieden, dass es zu einer ungleichmäßigen Temperaturverteilung und Lastverteilung innerhalb des Stapels kam.

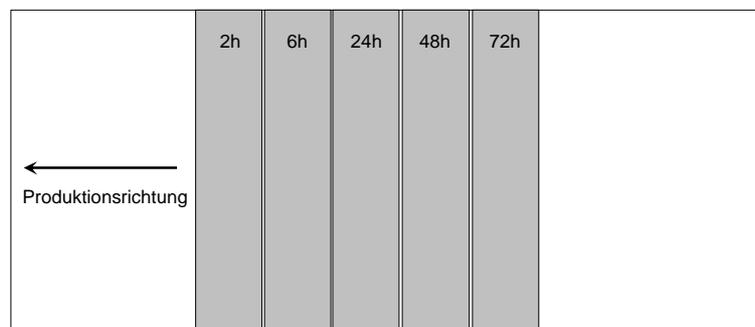


Abbildung 60: Einschnittplan für die Probennahme aus dem Stapel.

Auf diese Weise wurde es ermöglicht, Proben zu unterschiedlichen Zeitpunkten zu entnehmen, ohne die Feuchte- und Temperaturbedingungen der Platten im Stapel gravierend zu verändern.

Aus den Streifen wurden anschließend die Proben senkrecht zur ursprünglichen Produktionsrichtung gleichmäßig verteilt ausgeformt und den Prüfungen zugeführt (siehe Kapitel 7.3.2).

### **7.3.1.2 MUF-Platten**

Es wurde eine Nullprobe vor der Stapellagerung aus der "Laborschnitt"-Vorrichtung der Diagonaltrennsägen unmittelbar nach der Heißpresse aus dem Prozess entnommen. Damit die Vergleichbarkeit dieser Probe mit den später geschliffenen Platten gewährleistet ist, wurde auch der "Laborschnitt" in der Schleifstraße unter gleichen Bedingungen auf die Nettodicke geschliffen.

Die Stapel aus den geschliffenen Platten wurden anschließend, wie im vorstehenden Abschnitt beschrieben, manipuliert, dass unmittelbar nach dem Schleifen sowie nach 6, 24, 48 und 72 Stunden Lagerzeit ein Probestreifen zur Prüfung entnommen werden konnte.

### **7.3.1.3 MUPF-Platten**

Es wurde eine Nullprobe vor der Stapellagerung unmittelbar nach der Heißpresse aus dem Prozess entnommen. Die Platte wurde nach 24-stündiger Stapellagerung unmittelbar nach dem Schleifvorgang entnommen.

In der zweiten Versuchsreihe wurde als Vergleichswert ein Stapel aus Platten gebildet, die den Produktionsprozess konventionell durchliefen. Aus diesem Stapel wurde eine Platte nach 24-stündiger Lagerzeit entnommen. Die Platten, die unmittelbar nach dem Verpressen eingestapelt wurden, wurden zu den o.g. Zeitpunkten zurück in den Prozess eingeschleust und nach wiederum 24-stündiger Lagerzeit entnommen und geprüft.

### **7.3.1.4 PF-Platten**

Auch hier wurde eine Nullprobe vor der Stapellagerung aus der "Laborschnitt"-Vorrichtung unmittelbar nach der Heißpresse aus dem Prozess entnommen und entsprechend auf die Nettodicke geschliffen. Nach den verschiedenen Lagerzeiten der Großstapel wurden die Kleinstapel nach dem Schleifen so gebildet, dass aus den Platten des oberen und mittleren Großstapelbereichs je ein Kleinstapel entstand (Abbildung 61). Die Stapel aus den geschliffenen Platten wurden vergleichbar der Beschreibung in Kapitel 7.3.1.1 manipuliert, dass unmittelbar nach dem Schleifen sowie nach 2, 4 und 6 Tagen Lagerzeit jeweils ein Probestreifen zur Prüfung entnommen werden konnte. Hier wurden zusätzlich die äußeren Bereiche berücksichtigt, indem nicht nur die Platte aus der Mitte des Stapels zur Probennahme aufbereitet wurde, sondern zudem auch die zweite Platte von oben (Stapel aus den Platten, die sich vormals in der Mitte des Großstapels befanden) und die zweite Platte von unten (Stapel aus den Platten, die vormals oben im Großstapel waren). Auf diese Weise konnten Platten betrachtet werden, die während ihrer Stapellagerung unterschiedlichen Stapeltemperaturen ausgesetzt waren.

### Lagerung der Großstapel vor dem Schleifen: 2h, 8h, 24h und 48h

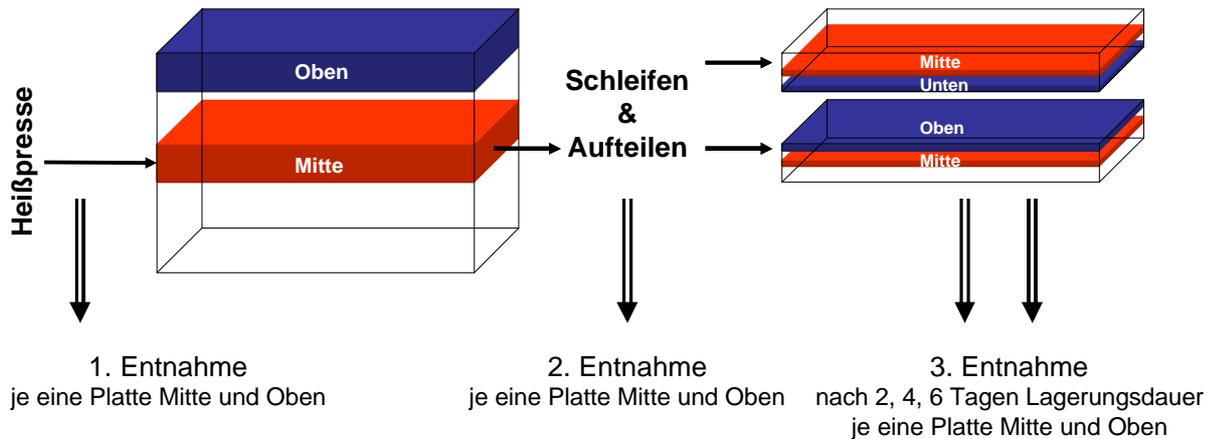


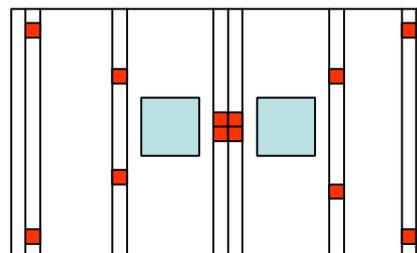
Abbildung 61: Entnahmeschema für die PF-Platten aus der industriellen Produktion.

#### 7.3.1.5 PMDI-Platten

Entsprechend der Beschreibung in Kapitel 7.3.1.1 wurden die PMDI-Platten in Stapel aufgeteilt und die Probestreifen unmittelbar nach dem Schleifen sowie nach 3, 16, 24, 48 und 183 Stunden Lagerzeit aus der Mitte und aus dem oberen Bereich (zweite Platte von oben) entnommen.

#### 7.3.1.6 MDF-Platten

24, 48, 96 und 120 Stunden nach dem Verpressen wurden jeweils drei ganze Platten aus dem Stapel (2., 20. und 60. Platte von oben) entnommen sowie Proben nach dem in Abbildung 62 dargestellten Schema entnommen und der Prüfung zugeführt.



■ Dickenquellung, Querkzugfestigkeit, Feuchte, Rohdichte, Dicke

■ Formaldehydgehalt

Abbildung 62: Probennahme für die MDF-Platten.

### 7.3.2 Prüfmethoden

Die Querzugfestigkeit wurde in Anlehnung an EN 319 und die Querzugfestigkeit nach Kochprüfung an den PF- und PMDI-Platten gemäß EN 1087-1 bestimmt. Die Abhebefestigkeit wurde in Anlehnung an EN 311 ermittelt. Die Quellung wurde sowohl nach 2 und 24 Stunden in Anlehnung an DIN 52 364 als auch nach EN 317 bestimmt. Die Biegefestigkeit und der Biege-Elastizitätsmodul wurden gemäß EN 310 bestimmt.

Der Formaldehydgehalt wurde sowohl in Anlehnung an EN 120 nach der Perforatormethode als auch nach der Flaschenmethode gemäß EN 717-3 ermittelt.

Für die Ermittlung der Deck- und Mittelschichtfeuchte wurde je Entnahmezeitpunkt eine Probe mit einem Spaltmesser in zwei Deckschichten (ca. 2 mm) und eine Mittelschicht aufgeteilt. Die Feuchte der einzelnen Schichten wurde nach der Darmmethode gemäß EN 322 bestimmt. Die Ausgleichsfeuchte wurde nach Klimatisierung der Proben bei 20°C und 65% relativer Luftfeuchte bestimmt.

### 7.3.3 Temperaturmessung

Die Stapel wurden nach dem in Abbildung 63 dargestellten Schema mit Thermoelementen (Typ K) bestückt. Die Thermoelemente wurden jeweils zwischen zwei Platten im Stapel eingebracht. Die Aufzeichnung der Daten erfolgte mit einem Mehrkanal-Datenlogger.

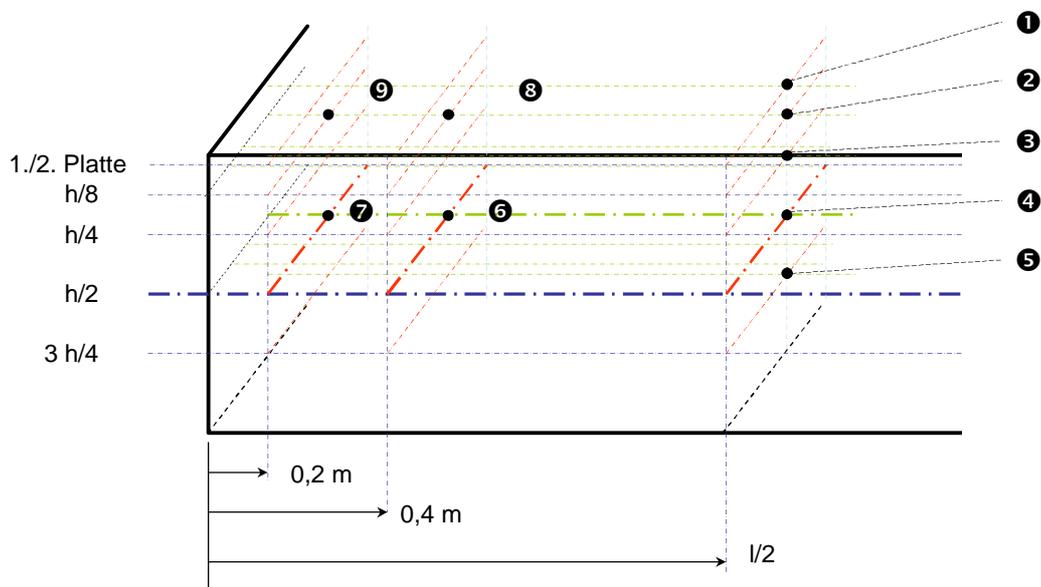


Abbildung 63: Temperaturmessstellen für die Stapel in der industriellen Produktion.

wobei	h/8:	1/8 der Gesamthöhe des Stapels (zwischen 5. und 6. Platte von oben)
	h/4:	1/4 der Höhe (zwischen 10. und 11. Platte von oben)
	h/2:	1/2 der Höhe (zwischen 20. und 21. Platte von oben)
	3 h/4:	3/4 der Höhe (zwischen 30. und 31. Platte von oben)
	l/2:	1/2 der Gesamtlänge des Stapels

## 7.4 Ergebnisse

### 7.4.1 UF-Spanplatten

#### 7.4.1.1 Temperatur und Feuchte

##### Temperatur

Die Temperaturbedingungen in den Stapeln sind in Abbildung 64 und Abbildung 65 aufgeführt. Es ist zudem die Temperatur und die relative Luftfeuchte der Umgebungsluft dargestellt, der die Stapel während der Lagerung ausgesetzt waren. Die Umgebungstemperatur schwankte zwischen 25°C und 30°C. Ebenso variierte die relative Luftfeuchte zwischen 35% und 55%. Diese Variationen resultieren aus den Schwankungen des Tageszeitenklimas.

Die Temperatur in der Mitte des Stapels, dessen Platten durch zwei Sternwender nach dem Verpressen gekühlt wurden (Stapel 2), beträgt nach dem Schleifvorgang etwa 80°C. Die entsprechende Temperatur für die gestapelten Platten, die in vier Wendern gekühlt wurden (Stapel 1), liegt bei 67°C. Eine kürzere Presszeit hat einen geringen Einfluss auf die Stapeltemperatur bei sonst gleichen Bedingungen, hier liegt die Temperatur bei etwa 70°C (Stapel 3). Dies liegt darin begründet, dass eine kürzere Presszeit in einer höheren Taktrate (mehr Platten je Zeiteinheit) resultiert; dadurch ist die Verweildauer in den Sternwendern vermindert. Bei einem Presszeitfaktor von 4,7 s/mm beträgt die Verweildauer in vier Sternwendern etwa 26 Minuten; bei einem Presszeitfaktor von 4,1 s/mm hingegen ist die Verweilzeit in den Wendern um 4 Minuten kürzer.

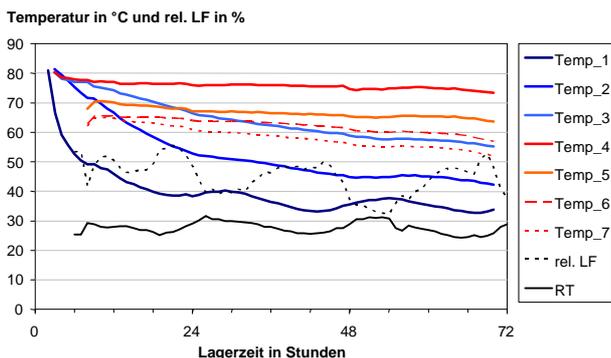


Abbildung 64: Änderung der Temperaturen für verschiedene Messstellen im Stapel 2.

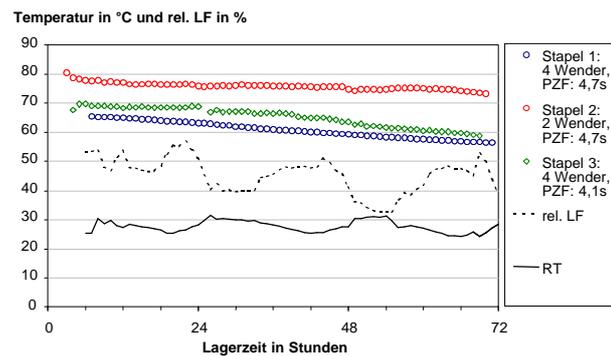


Abbildung 65: Entwicklung der Temperaturen in der Mitte der Stapel 1 bis 3.

In der Mitte des Stapels nimmt die Temperatur um 8°C bis 10°C während einer Lagerung über drei Tage ab. In den Randbereichen wird die Temperatur wesentlich stärker reduziert. In der Mitte der Platten unter der 5. Platte (Temp\_2) von oben ist die Temperatur von 80°C auf 45°C abgesenkt. Zwischen den ersten beiden Platten (Temp\_1) von oben liegt die

Temperatur bereits nach 30 Stunden unterhalb von 40°C (Abbildung 64). Auch die horizontale Temperaturverteilung des Stapels wird in dieser Abbildung deutlich. Die Temperatur sinkt in der mittleren Ebene des Stapels bei einem Abstand zum Rand von 40 cm innerhalb 72 Stunden Lagerzeit auf 57°C ab; die Temperatur wird im gleichen Zeitraum bei einem Abstand zum Rand von 20 cm auf etwa 50°C reduziert.

### Feuchte

Die Feuchte der Platten, die mit einem Presszeitfaktor (PZF) von 4,7 s/mm produziert wurden, beträgt 4,9% während der Lagerung. Die Platten mit einem Presszeitfaktor von 4,1 s/mm haben eine Feuchte von 5,2% während der Stapellagerung. Die Gesamtfeuchte änderte sich über den untersuchten Zeitraum von 72 Stunden nicht nennenswert.

### Ausgleichsfeuchte

In Abbildung 66 ist die Änderung der Ausgleichsfeuchte der UF-Proben (mit PZF = 4,1) nach Klimatisierung bei 20°C und 65% relativer Luftfeuchte dargestellt. Ausgehend von 10,5% vor der Lagerung nimmt die Ausgleichsfeuchte auf 10,0% bei geringerer bzw. auf 9,7% bei höherer Stapeltemperatur ab. Die Ausgleichsfeuchte der Platten, die mit einem Presszeitfaktor von 4,7 s/mm hergestellt wurden, beträgt unmittelbar nach dem Verpressen 10,3%. Die Abnahme während der Stapellagerung über 72 Stunden liegt in der gleichen Größenordnung wie bei den übrigen Platten.

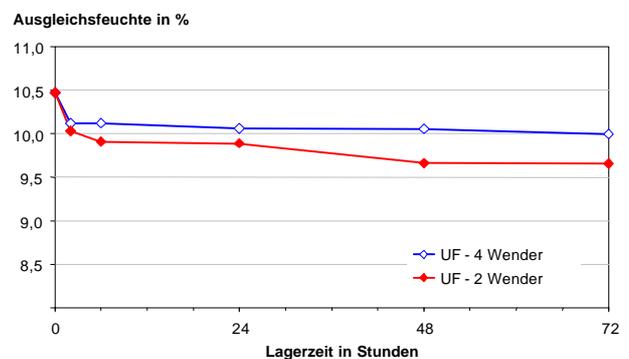


Abbildung 66: Änderung der Ausgleichsfeuchte der UF-Platten (PZF = 4,1 s/mm) während einer Stapellagerung über 72 Stunden.

### 7.4.1.2 Querkzugfestigkeit

Die Entwicklung der Querkzugfestigkeit von UF-Platten mit verschiedenen Herstellparametern während der Stapellagerung über 72 Stunden ist in Abbildung 67 dargestellt. Es wird deutlich, dass das Anfangsniveau der Platten mit geringerer Presszeit ( $0,38 \text{ N/mm}^2$ ) niedriger ist als das der Platten mit höherem Presszeitfaktor ( $0,45 \text{ N/mm}^2$ ). Während der Lagerung nimmt die Querkzugfestigkeit beider Plattentypen zu, wenn die Platten nach zwei Sternwendern und somit bei erhöhter Temperatur eingestapelt werden. Die Querkzugfestigkeit nimmt innerhalb von 6 Stunden nach dem Verpressen um rund 10% zu (95% Signifikanz). Eine positive Tendenz innerhalb der ersten Stunden der Lagerung ist auch bei den anderen Parametern erkennbar (Abbildung 68).

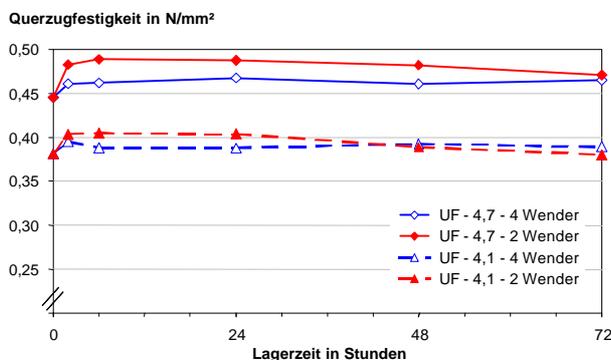


Abbildung 67: Entwicklung der Querkzugfestigkeit von UF-Platten während der Stapellagerung über 72 Stunden.

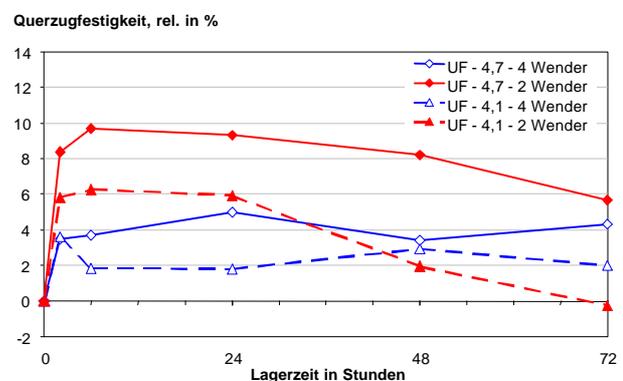


Abbildung 68: Entwicklung der Querkzugfestigkeit von UF-Platten während der Stapellagerung über 72 Stunden, relative Darstellung.

Allerdings ist auch zu erkennen, dass die Festigkeit bei den Platten, die mit höherer Temperatur gelagert wurden, nach einem Zeitraum von 24 Stunden wieder abnimmt. Die Querkzugfestigkeit kann nicht auf dem erhöhten Niveau gehalten werden. Nach 72 Stunden ist der Wert der Platten mit der kürzeren Presszeit wieder auf den Ausgangswert abgesunken.

### Erkenntnisse

Es ist festzustellen, dass auch hier die Mechanismen greifen, die bereits oben diskutiert wurden (Kapitel 6.3.2.1). Zunächst kommt es bei den UF-Platten zu einer Zunahme der Querkzugfestigkeit – insbesondere bei einer Lagerung mit hoher Temperatur (hier:  $\sim 80^\circ\text{C}$ ). Da die Platten mit einem Presszeitfaktor von  $4,1 \text{ s/mm}$  nicht annähernd das Niveau der Querkzugfestigkeit erreichen wie die Platten mit  $4,7 \text{ s/mm}$ , ist eine weitere Kondensation des Harzes als Ursache für die Zunahme auszuschließen. Die Platten mit der längeren Presszeit haben sogar eine größere relative Zunahme als die Platten mit geringerem Presszeitfaktor. Die Zunahme der Querkzugfestigkeit wird daher auf eine Reorganisation der Bindungstypen

im Harz (Lu und Pizzi 1998) und auf einen möglichen Spannungsabbau der Spanstruktur innerhalb der Platte zurückgeführt. Diese Effekte sind bei höherer Temperatur größer und wirken sich somit positiv auf die Platteneigenschaft aus.

Bei länger anhaltender Lagerzeit mit hoher Temperatur setzt ein negativer Trend ein. Hier erfolgt eine Degradierung der Holz-Leim-Matrix, wie es für Temperaturen oberhalb von 75°C von Neußer und Schall (1970) beschrieben ist.

Es ist denkbar, dass beide – positive wie negative – Effekte parallel in der Spanplatte während der Stapellagerung auftreten. In Abhängigkeit von der Lagerdauer überwiegen zunächst die positiven Effekte. Da diese aber nach einer gewissen Zeit abklingen (siehe v.a. Laborergebnisse der Dickenquellung), dominiert im weiteren Verlauf der Lagerung der hydrolytische Einfluss des Harzes auf die Entwicklung der Querkzugfestigkeit.

#### **7.4.1.3 Dickenquellung**

Während der Stapellagerung nimmt die Dickenquellung nach 24-stündiger Wasserlagerung bei allen untersuchten Platten ab (Abbildung 69). Die Werte vor der Stapellagerung liegen bei 18,9% für die Platten mit dem Presszeitfaktor 4,7 s/mm und bei 20,8% für die Platten mit dem kürzeren Presszeitfaktor von 4,1 s/mm. Über den Lagerzeitraum von 72 Stunden nimmt die Dickenquellung der Platten, die nach zwei Wendern eingestapelt wurden, stärker ab. Die Werte werden um etwa ein Viertel auf 14,2% (PZF = 4,7 s/mm) bzw. 15,5% (PZF = 4,1 s/mm) reduziert. Auch bei einer geringeren Stapeltemperatur wird die Quellung verbessert, allerdings werden hierbei die Werte lediglich auf ein Niveau von 17% abgesenkt.

In Abbildung 70 ist die Änderung der Wasseraufnahme während der Lagerung der Platten mit einem Presszeitfaktor von 4,1 s/mm exemplarisch für beide Stapeltemperaturen dargestellt. Es ist erkennbar, dass die Wasseraufnahme von etwa 60% bei Lagerung der Platten nach dem Durchlaufen von vier Wendern auf 45% und nach zwei Wendern auf 42% abnimmt.

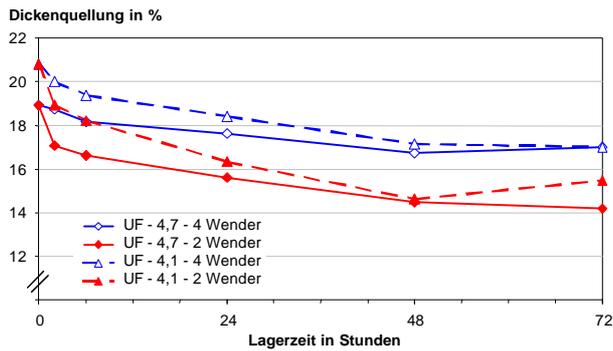


Abbildung 69: Entwicklung der Dickenquellung nach 24 Stunden Wasserlagerung (nach EN) von UF-Platten während der Stapellagerung.

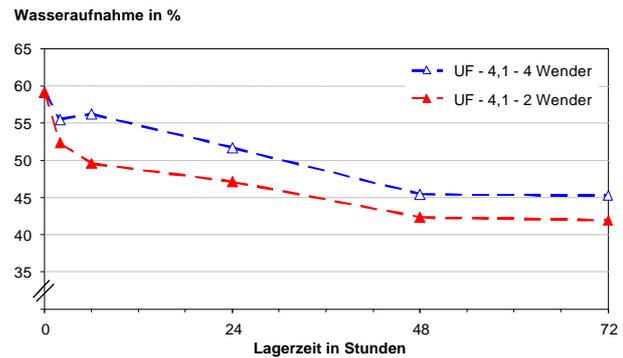


Abbildung 70: Entwicklung der Wasseraufnahme nach 24 Stunden Wasserlagerung von UF-Platten während der Stapellagerung.

### Erkenntnisse

Die Dickenquellung der UF-verleimten Platten nimmt während der Stapellagerung, insbesondere bei höheren Temperaturen, deutlich ab, da die Spannungen im Holz während der Lagerung abgebaut werden. Gleichzeitig wird auch die Wasseraufnahme der Quellungssproben vermindert. Die Dickenquellung korreliert<sup>4</sup> gut mit der Wasseraufnahme der Quellungssproben. Dies kann folgendermaßen begründet werden: Wenn eine Spanplattenprobe quillt, werden die Hohlräume zwischen den Spanpartikeln größer, in die das Wasser eindringen kann. Ist die Quellung aufgrund der beschriebenen Ursachen geringer, dann ist auch das Hohlraumvolumen kleiner. Somit dringt weniger Wasser in die Probe während der Wasserlagerung ein. Auf diese Weise wird die Wasseraufnahme in der Konsequenz vermindert.

<sup>4</sup> Der Korrelationskoeffizient zwischen der Dickenquellung und der Wasseraufnahme beträgt bei den vorliegenden Daten  $r = 0,81$ .

#### 7.4.1.4 Formaldehydgehalt

Die Entwicklung des Gehalts an freiem Formaldehyd der Platten (ermittelt mit der Perforatormethode) während der Lagerung im Stapel über einen Zeitraum von 72 Stunden ist in Abbildung 72 dargestellt. Der Ausgangswert beträgt vor der Stapellagerung durchschnittlich 5,0 mg/100g absolut trockenes Plattenmaterial, dabei unterscheiden sich die beiden Plattentypen nur geringfügig. Im Zuge der Lagerung wird der Perforatorwert merklich reduziert. Die Abnahme des Formaldehydgehalts wird bei höherer Stapeltemperatur stärker beeinflusst, so werden die Perforatorwerte der Platten, die nach vier Sternwendern eingestapelt wurden, auf 3,7 bzw. 4,3 mg/100g vermindert. Damit wird der Perforatorwert unter diesen Bedingungen um 15% bis 30% verbessert. Die Platten, die durch lediglich zwei Wender gekühlt wurden, haben nach 72 Stunden nur noch einen Perforatorwert von 3,2 mg/100g. Dies entspricht einer relativen Abnahme bezogen auf den Anfangswert von nahezu 40% (Abbildung 71).

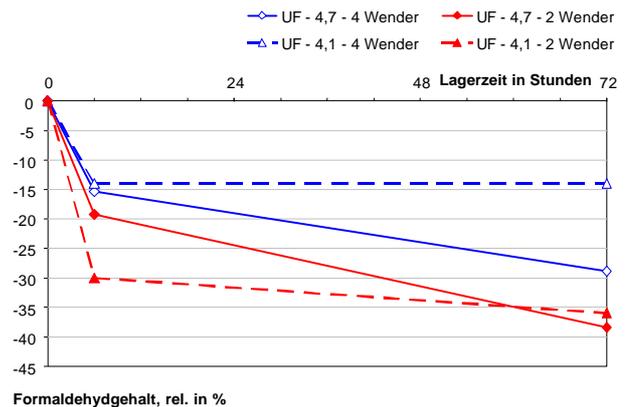


Abbildung 71: Abnahme des Formaldehydgehalts von UF-Platten während der Stapellagerung über 72 Stunden – relative Darstellung.

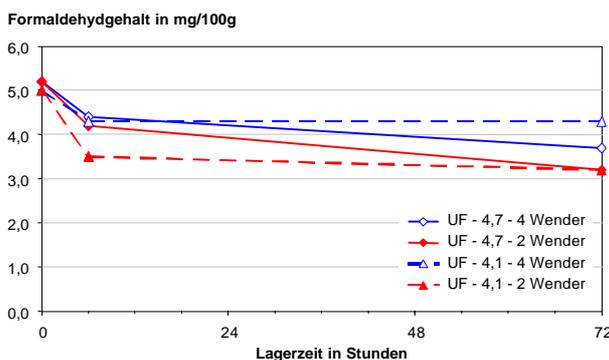


Abbildung 72: Abnahme des Formaldehydgehalts von UF-Platten während der Stapellagerung über 72 Stunden.

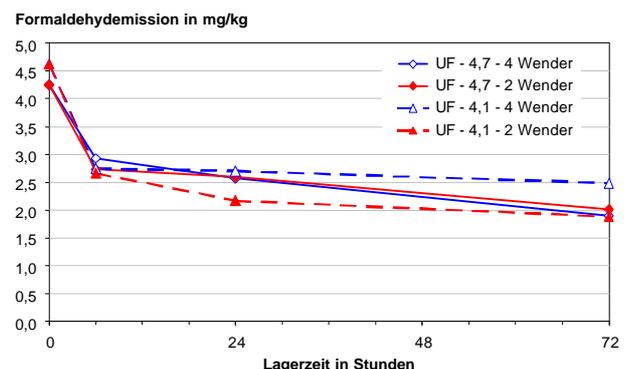


Abbildung 73: Abnahme der Formaldehydemission von UF-Platten während der Stapellagerung über 72 Stunden.

Das Verhalten dieser Platteneigenschaft wird auch durch die Messung der Formaldehydemission (Flaschenmethode) prinzipiell bestätigt (Abbildung 73). Allerdings ist der Unterschied bei den Platten mit dem Presszeitfaktor von 4,7 s/mm hinsichtlich der Stapelbedingungen nicht so deutlich ausgeprägt.

### **Erkenntnisse**

Die Abnahme des Formaldehydgehaltes übertrifft unter annähernd gleichen Temperaturbedingungen im Stapel die Ergebnisse der Laboruntersuchungen. Es wurde auf Basis von Untersuchungen (Roffael 1980) vermutet, dass ein Großteil des freien Formaldehyds aus den Laborplatten ausdampft, da das Verhältnis der Schmalflächen bei kleinformatigen Platten besonders groß ist. Das Verhältnis der Schmalfläche zum Volumen ( $SF : V$ ) der Platte beträgt bei den Laborplatten  $SF : V = 0,017$  und bei den industriell gefertigten Platten 0,0012. Das Verhältnis von Schmalfläche zu Volumen ist somit bei den Laborplatten etwa 15-mal größer als das der Industriespanplatten. Dennoch ist die absolute Formaldehydabnahme der Industrieplatten größer.

Es ist anzunehmen, dass hierbei der Einfluss der Harnstoffzugabe als Formaldehydfänger dazu führt, dass der Formaldehydgehalt während der Lagerung gravierend vermindert wird. Eine Zugabe von Harnstoff erfolgte im Labor nicht.

#### **7.4.1.5 Biegeeigenschaften**

Bei den vorliegenden Ergebnissen sind keine nennenswerten Änderungen des Biege-Elastizitätsmoduls und der Biegefestigkeit während der Stapellagerung über die betrachteten Zeiträume feststellbar.

## 7.4.2 MUF-Spanplatten

### 7.4.2.1 Temperatur und Feuchte

#### Temperatur

Die Stapeltemperaturen wurden unmittelbar nach dem Schleifen aufgenommen. Bei den MUF-Platten, die vier Sternwender nach dem Pressen durchlaufen haben und 2 Stunden vor dem Schleifen im Stapel gelagert wurden, beträgt die Temperatur in der Mitte des Stapels 50°C. Der Stapel der Platten, die in zwei Wendern gekühlt wurden und 2 Stunden vor dem Schleifen im Stapel lagerten, hat eine Temperatur von 70°C. Die Platten, die vor dem Schleifvorgang 6 Stunden gelagert wurden, haben eine Temperatur von etwa 75°C (Tabelle 24).

Tabelle 24: Stapeltemperaturen der MUF-Stapel.

Platten-Nr.	Parameter	Stapeltemperatur nach dem Schleifen
1	MUF – 4 Wender – 2h	50°C
2	MUF – 2 Wender – 2h	70°C
3	MUF – 2 Wender – 6h	75°C

#### Feuchte

Die Feuchte der MUF-Platten beträgt während der Lagerung im Stapel 6,5%. Eine nennenswerte Veränderung der Gesamtfeuchte findet über den untersuchten Zeitraum von 72 Stunden nicht statt.

#### Ausgleichsfeuchte

Die Abnahme der Ausgleichsfeuchte nach Klimatisierung bei 20°C und 65% relativer Luftfeuchte während der 72-stündigen Lagerung von MUF-Platten unter den verschiedenen Stapelbedingungen ist in Abbildung 74 dargestellt. In Abhängigkeit von der Stapeltemperatur nimmt die Ausgleichsfeuchte ausgehend von 10,4% unmittelbar nach dem Verpressen auf 9,7% (bei 50°C Stapeltemperatur), 9,4% (bei 70°C) oder 9,3% (bei 75°C) ab.

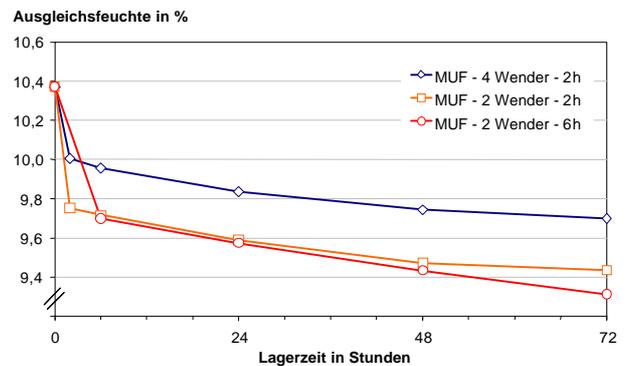


Abbildung 74: Abnahme der Ausgleichsfeuchte der MUF-Platten während der Lagerung über 72 Stunden.

### 7.4.2.2 Querkzugfestigkeit

In Abbildung 75 ist die Entwicklung der Querkzugfestigkeit der MUF-Platten während der Stapellagerung über 72 Stunden unter verschiedenen Bedingungen dargestellt. Es ist erkennbar, dass in Abhängigkeit von den Lagerbedingungen die Querkzugfestigkeit beginnend mit einem Wert nach dem Verpressen von 0,95 N/mm<sup>2</sup> um bis zu 6,5% auf 1,01 N/mm<sup>2</sup> zunehmen kann. Diese Verbesserung tritt bei der höchsten Lagertemperatur auf und ist signifikant (99%-Niveau). Bei der Lagertemperatur von 70°C ist ebenfalls eine positive Tendenz hinsichtlich der Entwicklung der Querkzugfestigkeit erkennbar; eine Lagerung bei 50°C erbringt keine Änderung der Festigkeit.

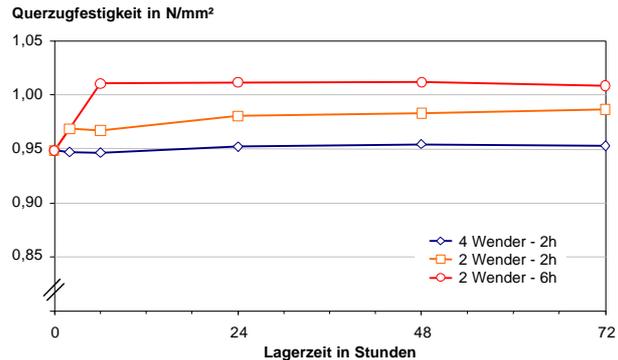


Abbildung 75: Entwicklung der Querkzugfestigkeit der MUF-Platten während der Lagerung über 72 Stunden.

### Erkenntnisse

Je höher die Temperatur (bis 75°C) während der Lagerung, umso größer ist die Querkzugfestigkeit. Ein Festigkeitsgewinn für MUF-Platten hat sich für diese Temperatur bereits in den Laborergebnissen angedeutet und kann hier bestätigt werden.

### 7.4.2.3 Dickenquellung

Die Änderung der Dickenquellung von MUF-Platten während der Stapellagerung über einen Zeitraum von 72 Stunden ist in Abbildung 76 und Abbildung 77 dargestellt. Der Wert der Dickenquellung nach 2 Stunden Wasserlagerung beträgt vor einer Stapellagerung 1,6% und nach 24 Stunden Wasserlagerung 7,2%. Beide Eigenschaftswerte werden im betrachteten Zeitraum unter allen Lagerbedingungen verbessert bzw. vermindert.

Nach 72 Stunden beträgt die 2 Stunden-Quellung bei einer Einstapeltemperatur von 50°C um 1,4%, bei einer Temperatur von 70°C 1,1% und bei 75°C 1,0%. Am Ende der Lagerung wird bei geringster Stapeltemperatur ein 24 Stunden-Quellwert von 6,7%, bei mittlerer Stapeltemperatur 6,3% und bei höchster Temperatur 5,8% erreicht (Abbildung 77).

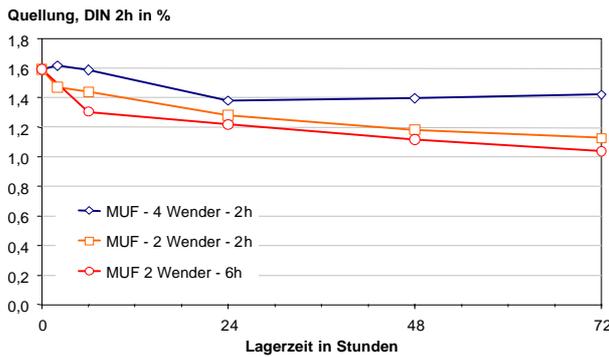


Abbildung 76: Entwicklung der Dickenquellung nach 2 Stunden Wasserlagerung (nach DIN).

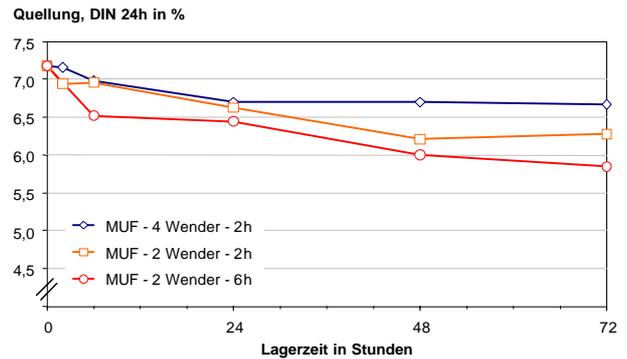


Abbildung 77: Entwicklung der Dickenquellung nach 24 Stunden Wasserlagerung (nach DIN).

### Erkenntnisse

Die Erhöhung der Querszugfestigkeit und die weiteren positiven Effekte der Stapellagerung (z.B. Spannungsabbau) führen dazu, dass auch an diesen Platten die Quellwerte vermindert werden. Der Temperatureinfluss ist wiederum deutlich zu erkennen.

#### 7.4.2.4 Formaldehydgehalt

In Abbildung 78 ist die Änderung des Formaldehydgehalts (Perforatormethode) und in Abbildung 79 die Formaldehydemission (Flaschenmethode) der MUF-Platten während der dreitägigen Stapellagerung dargestellt. Der Anfangswert des Formaldehydgehalts beträgt 4,3 mg/100g. Im Zuge der Lagerung wird der Perforatorwert unter allen Bedingungen vermindert. Die Werte liegen nach 72 Stunden zwischen 2,4 und 2,8 mg/100g.

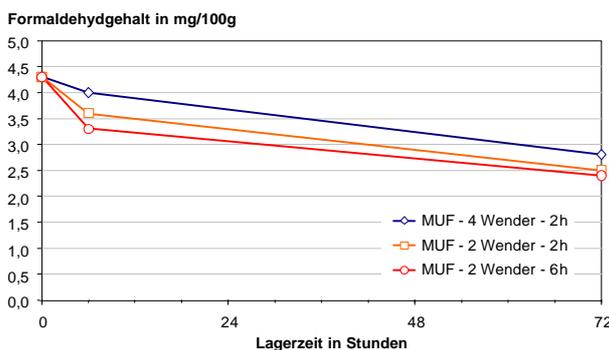


Abbildung 78: Entwicklung des Gehalts an freiem Formaldehyd von MUF-Platten während der Stapellagerung.

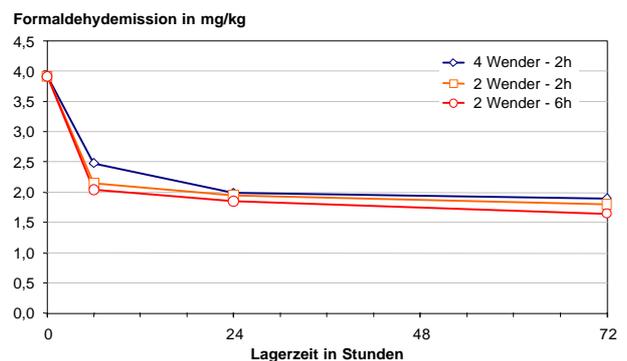


Abbildung 79: Entwicklung der Formaldehydemission von MUF-Platten während der Stapellagerung.

## Erkenntnisse

Grundsätzlich wird der Formaldehydgehalt während der Lagerung beträchtlich vermindert. Der Temperatureinfluss ist hier zwar vorhanden, aber nicht sonderlich stark ausgeprägt. Bei der Formaldehydemission ist der Einfluss der Stapeltemperatur kaum noch erkennbar.

### 7.4.2.5 Biegeigenschaften

An dieser Stelle ist exemplarisch dargestellt, in welchem geringen Umfang die Biegeigenschaften durch die Lagerung im Plattenstapel beeinflusst werden. Sowohl dem Biege-Elastizitätsmodul (Abbildung 80) als auch der Biegefestigkeit (Abbildung 81) widerfährt unter keiner der untersuchten Bedingungen eine signifikante Änderung. Der in Abbildung 80 erkennbare geringe Anstieg des Biege-Elastizitätsmoduls muss allerdings auf die unterschiedlichen Bedingungen zurückgeführt werden, unter denen die jeweiligen Proben geschliffen wurden. Sowohl die Platten, die eingestapelt wurden, als auch der Laborschnitt, aus dem die Proben vor der Stapellagerung ausgeformt wurden, konnten unter den gleichen Einstellungen der Maschine geschliffen werden. Allerdings wurden die Proben aus den Stapeln quer zur Schleifrichtung entnommen und der Laborschnitt musste senkrecht zur eigentlichen Produktionsrichtung geschliffen werden. Dadurch können sich die geringen Abweichungen (Größenordnung: 5%) in den Eigenschaften ergeben.

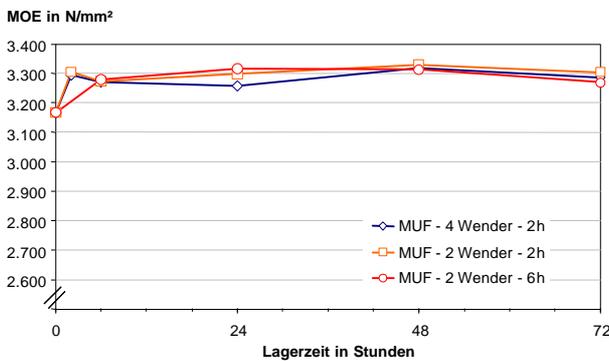


Abbildung 80: Entwicklung des Biege-Elastizitätsmoduls der MUF-Platten während der 72-stündigen Stapellagerung.

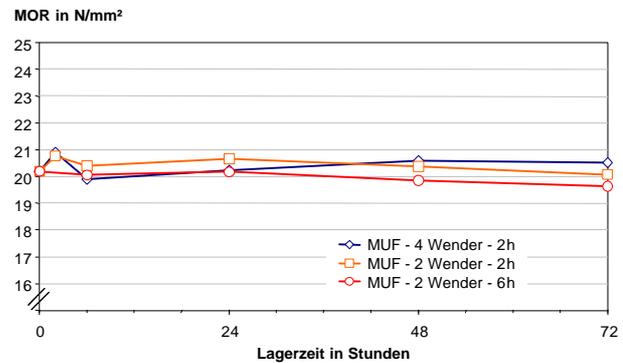


Abbildung 81: Entwicklung der Biegefestigkeit der MUF-Platten während der 72-stündigen Stapellagerung.

### 7.4.3 MUPF-Spanplatten

#### 7.4.3.1 Temperatur und Feuchte

Die 17,5 mm dicken MUPF-Platten hatten eine Temperatur bei der Einstapelung von etwa 70°C. Die Feuchte betrug 8,2%.

Die Platten mit einer Dicke von 20,5 mm wurden für 1, 2 und 3 Stunden bei etwa 95°C gelagert, bevor sie dann im Sternwender auf 70°C gekühlt wurden. Die Plattenfeuchte lag bei 8,3%.

#### 7.4.3.2 Querzugfestigkeit und Kochquerzugfestigkeit

In Abbildung 82 ist die Änderung der Querzugfestigkeiten der 17,5 mm MUPF-Platten vor und nach 24-stündiger Stapellagerung dargestellt. Es ist erkennbar, dass sowohl die Querzugfestigkeit nach EN 319 als auch die Querzugfestigkeit nach Kochprüfung während der Lagerung im Stapel deutlich ansteigt. Die Querzugfestigkeit nimmt um 13% auf 1,83 N/mm<sup>2</sup> und die Kochquerzugfestigkeit um 11% auf 0,44 N/mm<sup>2</sup> nach der Lagerung zu.

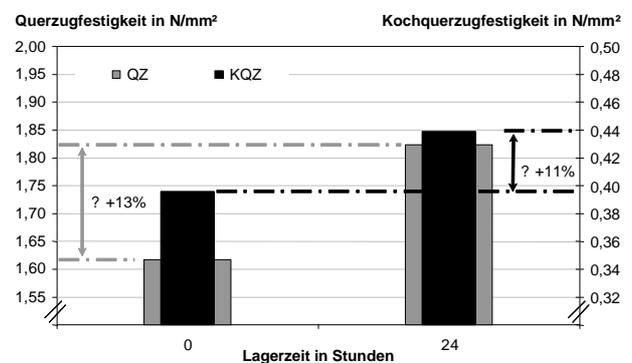


Abbildung 82: Entwicklung der Querzugfestigkeiten während einer 24-stündigen Lagerung der 17,5 mm Platten.

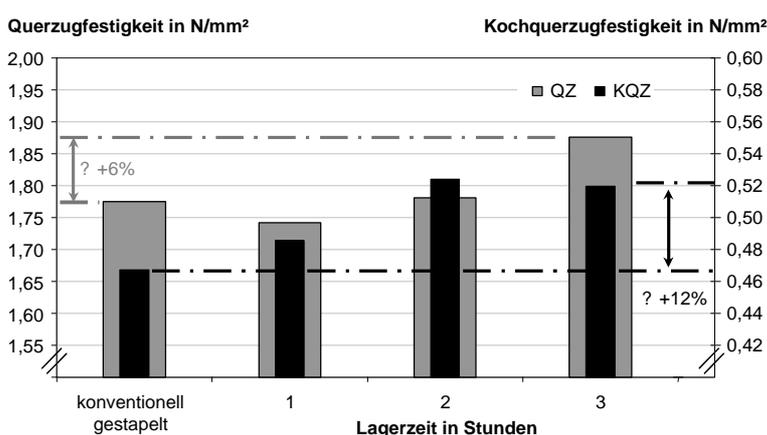


Abbildung 83: Entwicklung der Querzugfestigkeit und der Querzugfestigkeit nach Kochprüfung während der Lagerung unmittelbar nach dem Verpressen der 20,5 mm Platten.

In Abbildung 83 ist die Entwicklung der Querzugfestigkeit der 20,5 mm MUPF-Platten dargestellt, die unmittelbar nach dem Verpressen für 1, 2 und 3 Stunden eingestapelt wurden. Es wird deutlich, dass die Querzugfestigkeit innerhalb dieser Zeit auf einen Wert von 1,88 N/mm<sup>2</sup> ansteigt. Dieser Wert ist um 6% höher als bei den Platten, die den Prozess

konventionell durchlaufen haben. Auch die Querzugfestigkeit nach Kochprüfung nimmt unter diesen Stapelbedingungen um 12% gegenüber der konventionellen Lagerung über

24 Stunden zu. Das Maximum liegt bei 0,52 N/mm<sup>2</sup> und ist bereits nach 2 Stunden Lagerzeit erreicht.

### Erkenntnisse

Es ist an MUPF-Platten möglich, mit Hilfe einer direkten Einstapelung unmittelbar nach dem Verpressen die Eigenschaftszunahme aus einer konventionellen 24-stündigen Lagerung noch zu übertreffen. Der kurzzeitige hohe Temperatureinfluss (95°C für 3 Stunden) wirkt sich positiv auf die Querkzugfestigkeit und noch deutlicher auf die Querkzugfestigkeit nach Kochprüfung aus.

#### 7.4.3.3 Dickenquellung

Abbildung 84 zeigt die Änderung der Dickenquellung der 17,5 mm MUPF-Platten vor und nach einer 24-stündigen Lagerung im Stapel. Die Quellwerte wurden unter diesen Bedingungen von 5,1% auf 3,8% reduziert, dies entspricht einer relativen Verminderung um 24%. In Abbildung 85 ist die Entwicklung der Dickenquellung der 20,5 mm Platten aufgezeigt. Im Stapel, der unmittelbar nach dem Verpressen gebildet wurde, wird der Quellwert innerhalb von 3 Stunden auf 3,4% vermindert. Dies entspricht einer relativen Verbesserung dieser Eigenschaft um 7% in Bezug auf den Quellwert von 3,7% bei einer konventionellen 24-stündigen Stapellagerung.

Dickenquellung in %

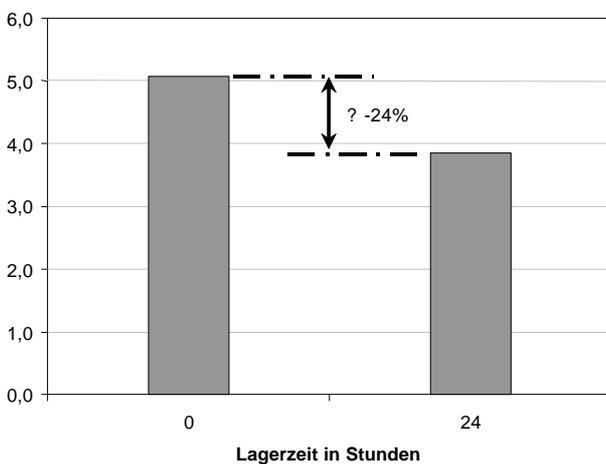


Abbildung 84: Entwicklung der Dickenquellung während einer 24-stündigen Lagerung der 17,5 mm Platten.

Dickenquellung in %

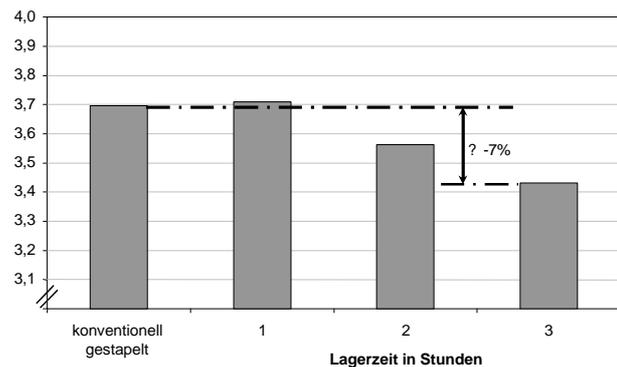


Abbildung 85: Entwicklung der Dickenquellung während der Lagerung unmittelbar nach dem Verpressen der 20,5 mm Platten.

## Erkenntnisse

Auf die Dickenquellung wirkt sich der Temperatureinfluss wiederum positiv aus. Mit höherer Temperatur und zunehmender Lagerdauer nimmt die Dickenquellung ab.

### 7.4.3.4 Biegeeigenschaften

Die Biegeeigenschaften der MUPF-Platten verändern sich während einer Lagerung im Stapel nur geringfügig. Es ist eine negative Tendenz während der ersten 2 Stunden bei einer Lagerung mit einer Temperatur um 95°C erkennbar. Allerdings beträgt die Abnahme lediglich um 4,0% für die Biegefestigkeit und 5,5% für den Biege-Elastizitätsmodul.

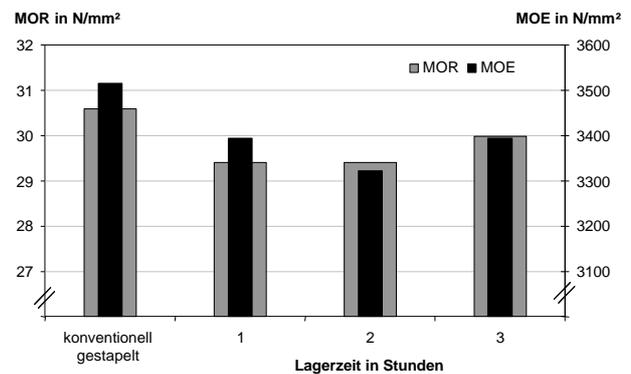


Abbildung 86: Entwicklung der Biegefestigkeit (MOR) und des Biege-Elastizitätsmoduls (MOE) während der Lagerung unmittelbar nach dem Verpressen der 20,5 mm Platten.

## Erkenntnisse

Wie in allen anderen bisherigen Ergebnissen beeinflussen die Stapelbedingungen die Biegeeigenschaften nur geringfügig.

## 7.4.4 PF-Spanplatten

### 7.4.4.1 Temperatur und Feuchte

#### Temperatur

In Abbildung 87 ist die Änderung der Temperaturen in der Mitte der Stapel dargestellt, deren Platten 2, 24 und 48 Stunden nach der Herstellung geschliffen und dann in kleinere Pakete abgestapelt wurden. Der Zeitpunkt des Schleifens ist in der Abbildung mit einer schraffierten Fläche gekennzeichnet. Die Anfangstemperatur liegt bei etwa 100°C. Es ist ein geringfügiger Anstieg der Temperatur zu erkennen, der darauf zurückzuführen ist, dass die Thermoelemente zwischen den Platten platziert wurde. Zum Zeitpunkt der Einstapelung sind die Deckschichten bereits um einige Grad abgekühlt. Während der Lagerung werden die Deckschichten von den wärmeren Mittelschichten wieder erwärmt. Die aufgezeichnete Erwärmung um etwa 3°C belegt die stattfindende Homogenisierung der Temperaturen im Plattenstapel. Nach dem Schleifen erfolgt eine stetige Abnahme der Temperatur in der Mitte der Stapel. Es wird ersichtlich, dass der Stapel, der bereits 2 Stunden nach der Produktion geschliffen wurde, deutlich schneller abkühlt als die Stapel, die zum späteren Zeitpunkt geschliffen wurden. Der Stapel, nach 2 Stunden geschliffen, erreicht nach insgesamt 6 Tagen (144 Stunden) 60°C. Beim Stapel hingegen, der nach 48 Stunden geschliffen wurde, dauert es mehr als 24 Stunden länger, bis diese Temperatur erreicht ist. Der Schleifzeitpunkt der Platten nach dem Verpressen hat somit bei sonst gleichen Umgebungsbedingungen einen entscheidenden Einfluss auf die Abkühlungsgeschwindigkeit der Stapel.

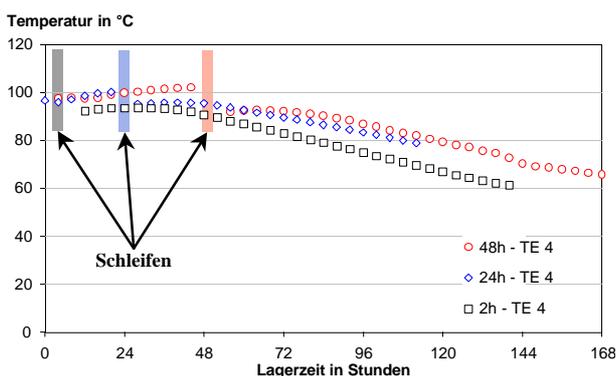


Abbildung 87: Änderung der Temperaturen in Stapeln aus PF-Platten in Abhängigkeit vom Zeitpunkt des Schleifens.

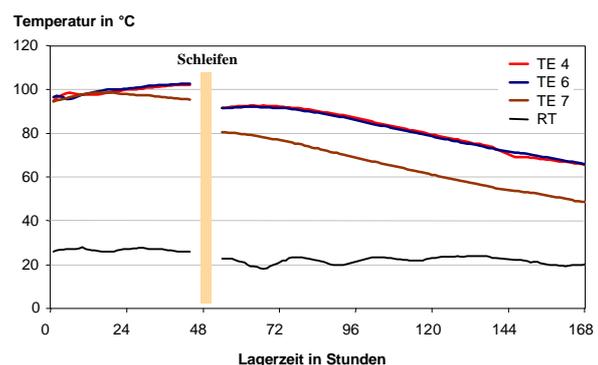


Abbildung 88: Änderung der Temperaturen in Stapeln aus PF-Platten an verschiedenen Messstellen.

Abbildung 88 stellt den Temperaturverlauf in der mittleren Ebene (zwischen der 19. und 20. Platte von oben) des Stapels dar, der nach 48 Stunden Lagerzeit geschliffen wurde. Der Messkanal "TE 4" zeichnete die Temperaturwerte in der Mitte der Platte (2.600 mm vom Rand) auf, Position "TE 6" liegt etwa 1.000 mm vom Rand und Position "TE 7" ist 300 mm vom Rand entfernt. Es ist erkennbar, dass kein Temperaturunterschied zwischen Position "TE 4" und "TE 6" vorliegt. Bereits nach 24 Stunden stellt sich ein messbarer Temperaturunterschied zwischen der Position "TE 7" und den mittleren Positionen ein. Nach 7 Tagen Lagerzeit beträgt die Temperaturdifferenz etwa 15°C. Es ist bemerkenswert, dass die Temperaturverteilung innerhalb der mittleren Ebene des Stapels relativ gleichmäßig ist. Der Großteil der Fläche hatte nach 24-stündiger Lagerzeit ein Temperaturniveau von über 90°C. In Richtung des Randes fällt die Temperatur über einen kleinen Bereich von etwa 200 mm unter eine Temperatur von 70°C (Abbildung 89).

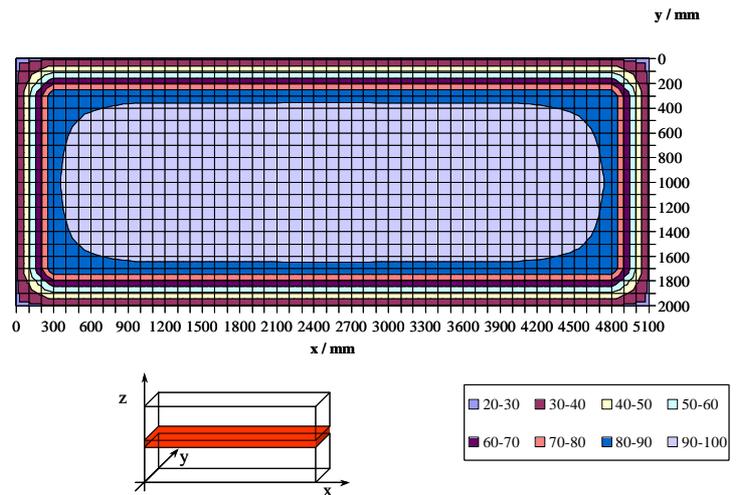


Abbildung 89: Temperaturverteilung nach 24-stündiger Stapellagerung einer PF-Platte bei einer Ausgangstemperatur der Mittelschicht von etwa 105°C.

Dies deckt sich mit den Erkenntnissen von Roux und Gilles (1971), die temperaturbedingte Farbveränderungen an stapelgelagerten Platten feststellten. Die Dunkelfärbung reichte bis etwa 15 cm an den Rand des Stapels im Kernbereich der Platten heran.

In Tabelle 25 ist eine Momentaufnahme der Stapeltemperaturen jeweils drei Tage nach dem Verpressen aufgestellt, um die Temperaturniveaus der Stapel mit verschiedenen Herstellungsbedingungen einfach zu charakterisieren. Es sind die Temperaturen in der Mitte der Stapel dargestellt, die für 2, 24 und 48 Stunden vor dem Schleifen gelagert und danach in kleinere Stapel umgebildet wurden. Das höchste Temperaturniveau wird in der Mitte des Stapels erreicht, der aus der Mitte des "48-Stunden-Großstapel" stammt. Das geringste Temperaturniveau von unter 40°C

Tabelle 25: Momentaufnahme der Temperaturen bei verschiedenen Herstellungsbedingungen und an verschiedenen Positionen der Stapel jeweils 3 Tage nach dem Verpressen.

Stapel-Temperaturen 3d nach Presse			kleiner Stapel nach Schleifen	
			Mitte	Oben bzw. Unten
2h	großer Stapel nach Presse	Oben	58 °C	37 °C
		Mitte	82 °C	37 °C
	24h	Oben	85 °C	43 °C
		Mitte	89 °C	45 °C
	48h	Oben	85 °C	52 °C
		Mitte	92 °C	60 °C

Das geringste Temperaturniveau von unter 40°C

stellt sich in den Außenbereichen (zwischen der 3. und 4. Platte – entspricht etwa 57 mm – von oben) des Stapels ein, der aus dem oberen Bereich des "2-Stunden-Großstapels" entnommen wurde. Es ist auffallend, dass die Temperaturunterschiede zwischen dem Mittenbereich und den äußeren Bereichen des Stapels mit etwa 30 bis 40°C sehr groß sind.

### Feuchte

In Abbildung 90 ist die Entwicklung der Gesamtfeuchte und die Feuchteverteilung zwischen Deck- und Mittelschicht in der Mitte der Stapel dargestellt. Abbildung 91 zeigt die Änderung der Feuchtebedingungen in den Außenbereichen der Stapel. Der Schleifvorgang im Prozess wird in dieser Darstellung auf der Abszissenachse in den Zeitpunkt Null gelegt. Die Lagerzeit im Großstapel ist somit negativ.

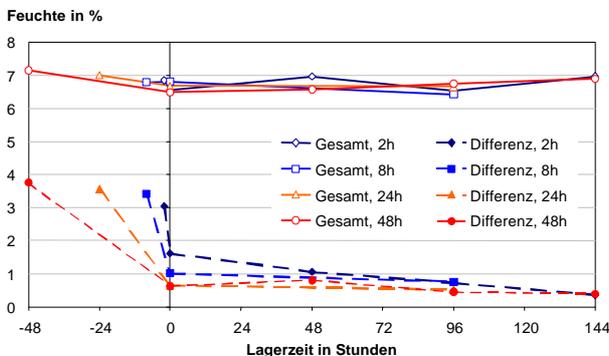


Abbildung 90: Entwicklung der Feuchteverteilung zwischen Deck- und Mittelschicht in der Mitte der Stapel.

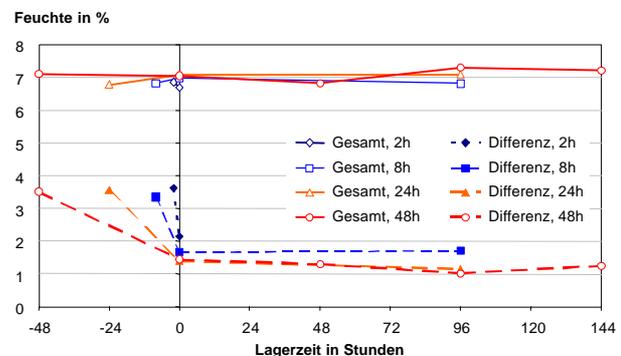


Abbildung 91: Entwicklung der Feuchteverteilung zwischen Deck- und Mittelschicht in den Randbereichen der Stapel.

Die Gesamtfeuchte ändert sich während der Lagerung nicht, sie liegt unter allen Bedingungen bei 7,0%. Die Feuchte der Mittelschichten unmittelbar nach dem Verpressen beträgt etwa 8,5% und die Feuchte der Deckschichten um 5,0%. Daraus ergibt sich als Anfangswert eine Differenz zwischen Deck- und Mittelschicht von etwa 3,5% (Abbildung 90 und Abbildung 91). Bis zum Zeitpunkt des Schleifens wird die Differenz merklich vermindert. Je länger die Platten vor dem Schleifen gelagert wurden, umso geringer ist der Wert zu diesem Zeitpunkt. Nach einer Lagerzeit von 2 Stunden liegt in der Mitte des Großstapels eine Feuchtedifferenz zwischen Deck- und Mittelschicht von 1,5% vor, und nach einer Lagerzeit von 48 Stunden im Großstapel ist der Wert auf 0,7% abgesenkt (Abbildung 90). Auch im weiteren Verlauf der Lagerung nach dem Schleifen wird dieser Wert noch weiter vermindert, allerdings kommt es nicht zu einem vollständigen Feuchteausgleich zwischen Deck- und Mittelschicht. Der minimale Wert nach der Lagerung von 144 Stunden im Stapel nach dem Schleifvorgang beträgt 0,4%.

Zu einem gänzlichen Ausgleich des Feuchteprofils in einer Holzwerkstoffplatte kommt es auch nach längerer Klimatisierung nicht (Kehr und Grabitzki 1965), da die Deckschichten mit einem höheren Beleimungsgrad beaufschlagt sind als die Mittelschicht. In Verbindung mit einer mehr als doppelt so hohen Verdichtung ist somit die für Wasser zugängliche Oberfläche des Deckschichtspanmaterials geringer. Gleichzeitig werden die Deckschichten in der Heißpresse einer höheren Temperatur (ca. 200°C)<sup>5</sup> über die gesamte Presszeit (100 bis 150 Sekunden) ausgesetzt als die Mittelschichten. In der Mittelschicht liegt eine Temperatur von etwa 105°C über einen Zeitraum von etwa 40 Sekunden vor. Hierbei kann es zu einer thermischen Vergütung des Holzes kommen und dadurch zu einer Verminderung der Sorption (Kollmann, Schneider 1963). Dies führt dazu, dass die Gleichgewichtsfeuchte der Deckschichten einer Spanplatte geringer ist als die der Mittelschicht.

---

<sup>5</sup> Die Temperatur der verschiedenen Heizkreise in der Presse betrug bis 240°C.

### 7.4.4.2 Querzugfestigkeit

In Abbildung 92 ist die Entwicklung der Querzugfestigkeit für PF-Platten unter verschiedenen Stapelbedingungen über einen Zeitraum bis zu 192 Stunden dargestellt. Die vorgestellten Eigenschaftswerte wurden an den Platten ermittelt, die nach einer Lagerung von 8, 24 oder 48 Stunden aus dem mittleren ("Mitte -") oder dem oberen ("Oben -") Bereich des Großstapels sowie nach dem Schleifvorgang aus der Mitte oder dem Randbereich ("- Oben" bzw. "- Unten") des Stapels entnommen wurden.

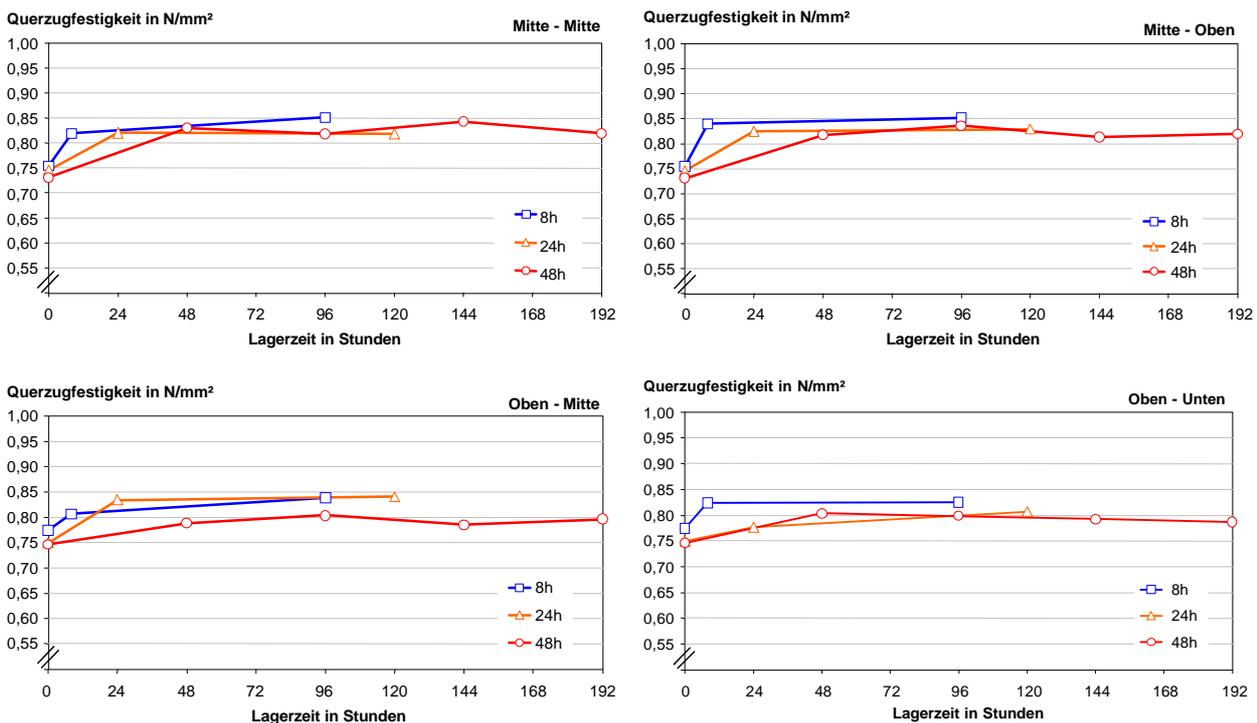


Abbildung 92: Entwicklung der Querzugfestigkeit über eine Lagerdauer im Stapel bis zu 192 Stunden.

Oben links: In der Mitte des Großstapels & in der Mitte des Stapels nach dem Schleifen

Oben rechts: In der Mitte des Großstapels & im oberen Bereich des Stapels nach dem Schleifen

Unten links: Im oberen Bereich des Großstapels & in der Mitte des Stapels nach dem Schleifen

Unten rechts: Im oberen Bereich des Großstapels & im unteren Bereich des Stapels nach dem Schleifen

Die Querzugfestigkeit unmittelbar nach dem Verpressen und vor der Stapellagerung beträgt etwa 0,75 N/mm<sup>2</sup>. In allen Fällen ist eine Zunahme zu verzeichnen. Die maximal erreichte Festigkeit liegt bei 0,85 N/mm<sup>2</sup>. Zu den größten Änderungen kommt es im Großstapel, darüber hinaus wird die Eigenschaft im kleineren Stapel nach dem Schleifen nur noch marginal verändert.

Die relative Darstellung in Abbildung 93 verdeutlicht den Temperatureinfluss auf die Entwicklung der Eigenschaft, der durch die unterschiedlichen Stapelbedingungen eingestellt wird. Hier werden die Bedingungen gegenübergestellt, aus der die höchsten und die geringsten Plattentemperaturen im Stapel resultieren. Die Platten aus der Mitte des Großstapels und aus der Mitte des Stapels nach dem Schleifen haben nach 72 Stunden

Lagerung eine Temperatur von bis zu 92°C. Die Platten aus dem oberen Bereich des Großstapels und aus dem unteren Bereich des Stapels nach dem Schleifvorgang haben zum selben Zeitpunkt eine Temperatur von etwa 40°C (Tabelle 25). Es ist erkennbar, dass mit höherem Temperatureinfluss die Zunahme der Eigenschaft größer wird. Die größte Eigenschaftszunahme von etwa 15% wird in der Mitte des Stapels erzielt, der vor dem Schleifen für 48 Stunden gelagert wurde und in dem das höchste Temperaturniveau ermittelt wurde (Abbildung 93 - links). In den Randbereichen des Stapels (jeweils zweite Platte von oben bzw. unten), in denen die Temperatur am geringsten war, wird eine Eigenschaftszunahme von 7% nicht überschritten (Abbildung 93 - rechts).

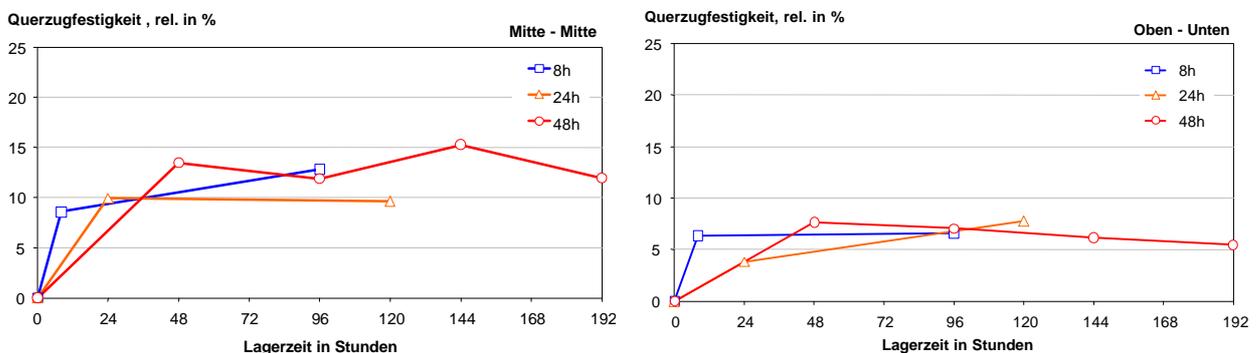


Abbildung 93: Entwicklung der Querkzugfestigkeit über eine Lagerdauer im Stapel bis zu 192 Stunden, relative Darstellung.

Links: In der Mitte des Großstapels & in der Mitte des Stapels nach dem Schleifen

Rechts: Im oberen Bereich des Großstapels & im unteren Bereich des Stapels nach dem Schleifen

Auch hinsichtlich der horizontalen Position der Platten im Stapel wird der Temperatureinfluss auf die Querkzugfestigkeit erkennbar. In Abbildung 94 ist die Zunahme der Querkzugfestigkeit der zweiten Platte von oben, der 10. Platte von oben und der mittleren Platte in dem Stapel, der nach 48 Stunden geschliffen wurde, über eine Lagerdauer von 8 Tagen relativ bezogen auf den Wert vor der Lagerung dargestellt. Es wird ersichtlich, dass je höher die Stapeltemperatur ist, umso größer ist auch die Eigenschaftszunahme.

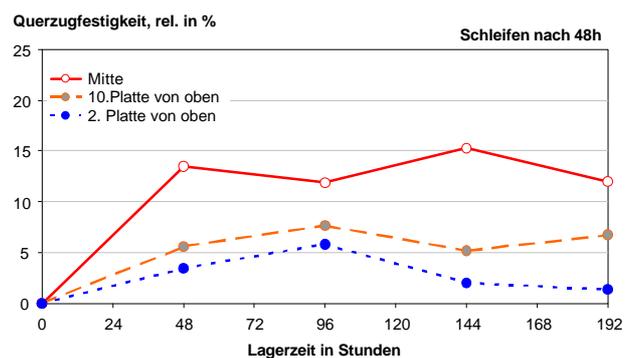


Abbildung 94: Entwicklung der Querkzugfestigkeit des Stapels (nach 48 Stunden geschliffen) in verschiedenen Positionen im Stapel, relative Darstellung.

**Erkenntnisse**

Durch diese Untersuchung konnten die Laborergebnisse prinzipiell bestätigt werden. Auch bei industriell gefertigten Platten ist der deutliche positive Temperatureinfluss auf Platten mit einem modifizierten PF-Harz erkennbar. Allerdings ist bei den Industrieergebnissen eine Abstufung nach der Höhe der Temperatur feststellbar. Dies ist aber darauf zurückzuführen, dass die Temperaturdifferenzen, die sich in den unterschiedlichen Bereichen der Stapel einstellen, wesentlich größer waren als die gewählten Temperaturen im Laborstapel. Es kann unter industriellen Bedingungen zu einer Verbesserung der Querkzugfestigkeit bis zu 15% kommen; diese tritt bei den Platten auf, die dem höchsten Temperaturniveau ausgesetzt waren.

### 7.4.4.3 Querzugfestigkeit nach Kochprüfung

Die Entwicklung der Querzugfestigkeit nach Kochprüfung der PF-Platten während der Stapellagerung ist in Abbildung 95 dargestellt. Unmittelbar nach dem Pressen und vor einer Lagerung im Stapel beträgt die Querzugfestigkeit nach Kochprüfung 0,21 N/mm<sup>2</sup>. Die Anforderung gemäß Norm EN 312-5 ist somit bereits erfüllt. Die Werte liegen allerdings noch unter der Anforderung der EN 312-7. Es ist erkennbar, dass die Festigkeit unter den Stapelbedingungen eindeutig gesteigert wird. In den meisten Fällen wird die Anforderung nach EN 312-7 zum Teil deutlich überschritten. Auch hier ist der Temperatureinfluss auf die Zunahme der Eigenschaft hervorzuheben, da maximale Werte von 0,30 N/mm<sup>2</sup> an den Platten gemessen werden, die für 48 Stunden in der Mitte des Großstapels vor dem Schleifen gelagert wurden und somit der höchsten Temperatur ausgesetzt waren. Unter Stapelbedingungen mit einem geringeren Temperatureinfluss ist die Zunahme deutlich geringer ausgeprägt.

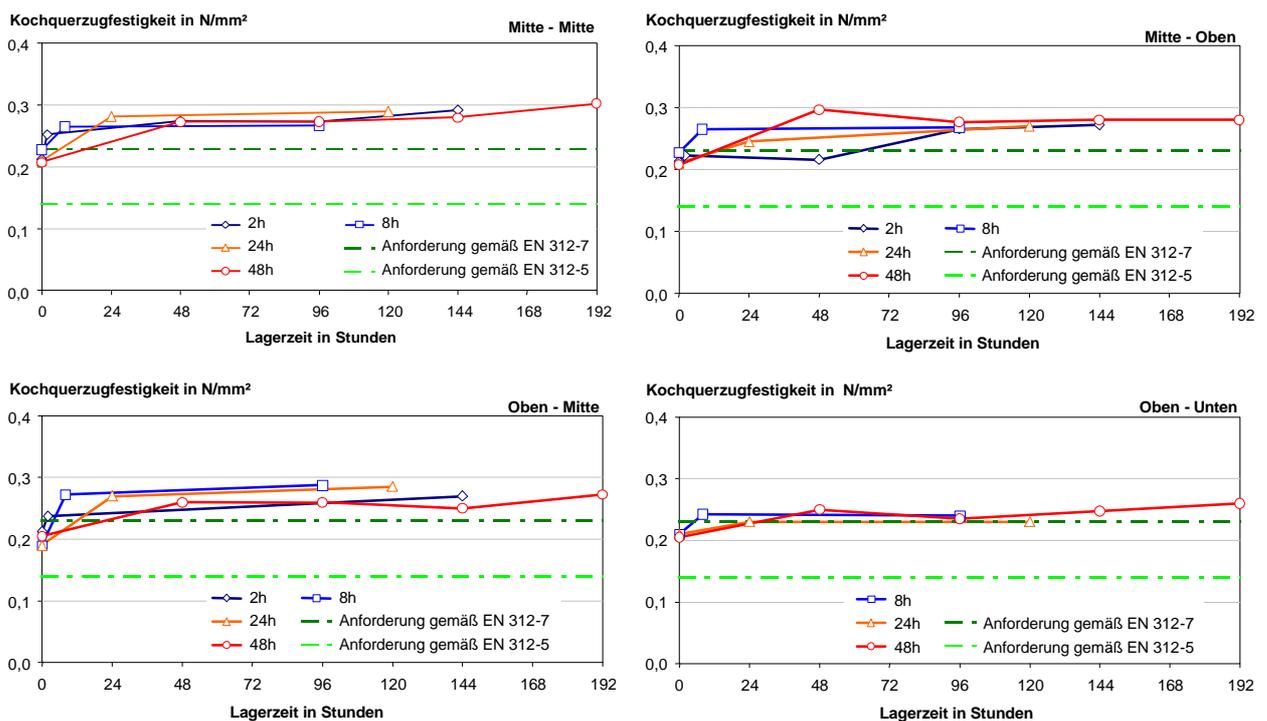


Abbildung 95: Entwicklung der Querzugfestigkeit nach Kochprüfung über eine Lagerdauer im Stapel bis zu 192 Stunden.

- Oben links: In der Mitte des Großstapels & in der Mitte des Stapels nach dem Schleifen
- Oben rechts: In der Mitte des Großstapels & im oberen Bereich des Stapels nach dem Schleifen
- Unten links: Im oberen Bereich des Großstapels & in der Mitte des Stapels nach dem Schleifen
- Unten rechts: Im oberen Bereich des Großstapels & im unteren Bereich des Stapels nach dem Schleifen

Zur Verdeutlichung ist in Abbildung 96 eine relative Darstellung der Ergebnisse bezogen auf den Ausgangswert vor der Lagerung gewählt. Bei dem höchsten Temperaturniveau der Platten, welches sich in der Mitte der Stapel einstellt, die für 48 Stunden vor dem Schleifen

gelagert wurden, nimmt die Querzugfestigkeit nach Kochprüfung um 45% zu. In der Mitte der "24 Stunden-Stapel" wird eine Zunahme von 38%, in der Mitte der "8 Stunden-Stapel" nur noch ein Zugewinn von 18% erzielt. In den Randbereichen (jeweils zweite Platte von oben) ist die Steigerung deutlich geringer. Im "48 Stunden-Stapel" kann noch eine Erhöhung der Festigkeit von 27% gemessen werden. Unter den übrigen Lagerbedingungen wird eine Zunahme von 15% nicht überschritten.

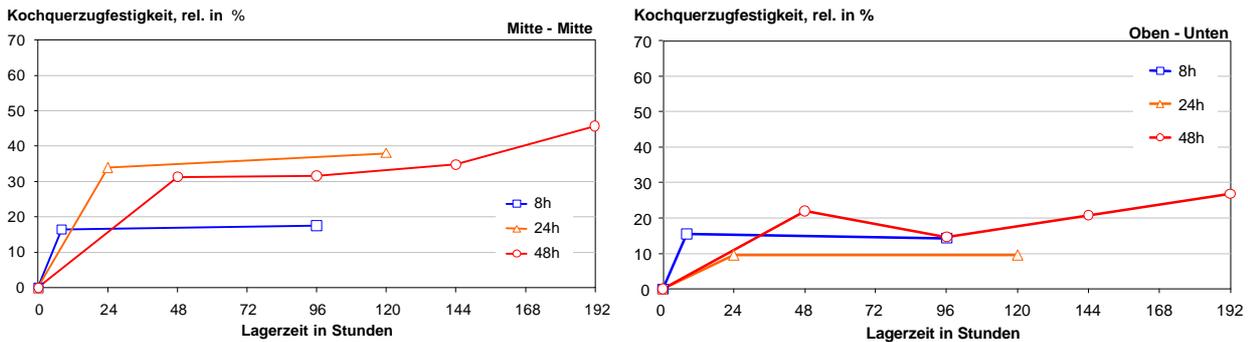


Abbildung 96: Entwicklung der Querzugfestigkeit nach Kochprüfung über eine Lagerdauer im Stapel bis zu 192 Stunden, relative Darstellung.

Links: In der Mitte des Großstapels & in der Mitte des Stapels nach dem Schleifen

Rechts: Im oberen Bereich des Großstapels & im unteren Bereich des Stapels nach dem Schleifen

### Erkenntnisse

Auch die Querzugfestigkeit nach Kochprüfung wird während der Lagerung merklich erhöht. Ebenso ist die Abhängigkeit von der Stapeltemperatur klar erkennbar. Im Vergleich zur Querzugfestigkeit (trocken) ist die relative Zunahme der Querzugfestigkeit nach Kochprüfung mit bis zu 45% deutlich höher. Dies ist darauf zurückzuführen, dass nicht nur die Verklebungsfestigkeit während der Stapellagerung bei hohen Temperaturen für PF-Platten erhöht wird, sondern es wird damit einhergehend auch die Feuchtebeständigkeit des Leimes erhöht und vor allem wird auch die Beständigkeit des Holzes in diesem Temperaturspektrum gravierend verbessert. Die Ausgleichsfeuchte (siehe Kapitel 6.3.4.5) und auch das Quellvermögen (siehe Kapitel 7.4.4.4) des Holzes nehmen deutlich ab. Diese Effekte wirken sich neben der Festigkeit des Klebers wesentlich auf die Querzugfestigkeit nach Kochprüfung aus.

Grundsätzlich muss somit nicht nur Ziel sein, Platten mit einer entsprechenden Klebfestigkeit herzustellen. Vielmehr können mit Hilfe einer thermischen Vergütung der Holzspäne die Eigenschaften der Platten optimiert werden, die die Feuchtebeständigkeit der Platten charakterisieren; dazu zählen vor allem die Querzugfestigkeit nach Kochprüfung, die Dickenquellung und auch die Ausgleichfeuchte.

#### 7.4.4.4 Dickenquellung

Abbildung 97 stellt die Entwicklung der Dickenquellung nach 24-stündiger Wasserlagerung für verschiedene Bedingungen über einen Lagerzeitraum von 144 Stunden in der Mitte der Stapel dar. In Abbildung 98 ist die Änderung der Quellung der Platten illustriert, die in der Mitte der Großstapel und im oberen Bereich des Stapels (zweite Platte von oben) nach dem Schleifvorgang gelagert waren.

Die Dickenquellung vor der Stapellagerung beträgt ca. 13,5% für alle untersuchten Platten. Der Wert liegt somit deutlich oberhalb der in EN 312-5 geforderten Höhe von 10%. Es kann beobachtet werden, dass die Quellung im Zuge der Lagerung unter optimalen Bedingungen mehr als halbiert wird. Je höher die Temperatur der Stapel, desto geringer wird die Quellung. Bereits während der Lagerung in der Mitte des Großstapels werden die Werte deutlich vermindert. Schon nach 2-stündiger Lagerung nimmt die Quellung auf 9,8% ab. Nach einer 8-stündigen Lagerung beträgt der Wert 9,2%, nach 24-stündiger Lagerung 9,3% und nach 48 Stunden im Großstapel lediglich 8,4%. Auch in der Mitte des Stapels wird die Dickenquellung noch weiter reduziert. Nach 96-stündiger Lagerung haben alle Platten die Anforderung gemäß EN 312-7 (8%) erfüllt (Abbildung 97). Bei der höchsten Stapeltemperatur wird eine Dickenquellung von 5,5% erreicht.

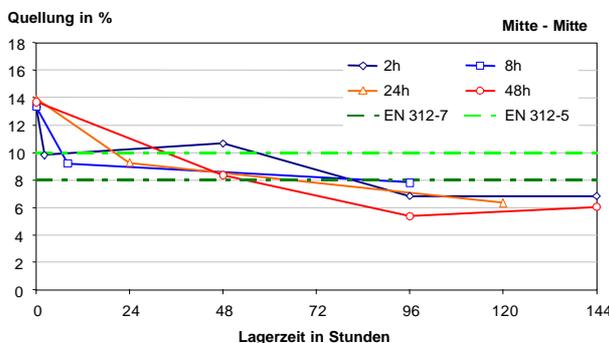


Abbildung 97: Entwicklung der Dickenquellung in der Mitte der Stapel in Abhängigkeit vom Zeitpunkt des Scheifens.

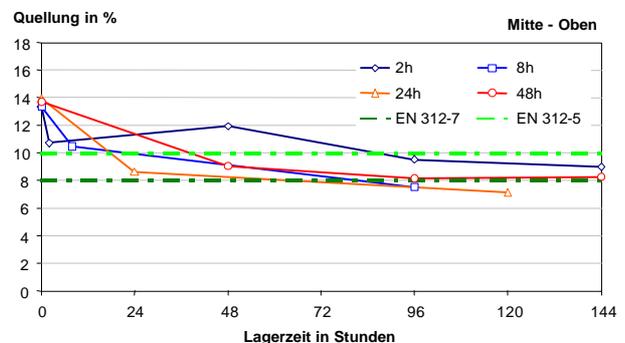


Abbildung 98: Entwicklung der Dickenquellung in der Mitte des Großstapels und nach dem Schleifen im oberen Bereich der Stapel.

Die Proben, die nach dem Schleifen aus dem oberen Randbereich des Stapels entnommen wurden, wobei die Plattentemperatur um etwa 30°C geringer als in der Mitte war, zeigen nur noch eine geringe Verbesserung, so dass die Werte nach Abschluss der Lagerung zwischen 7% und 9% betragen (Abbildung 98).

Die Proben, die aufgrund der Lagerbedingungen dem geringsten Temperatureinfluss (zwischen 37°C und 52°C) ausgesetzt waren, erreichen nur in Ausnahmefällen die Anforderung der EN 312-5 von 10% (Abbildung 99).

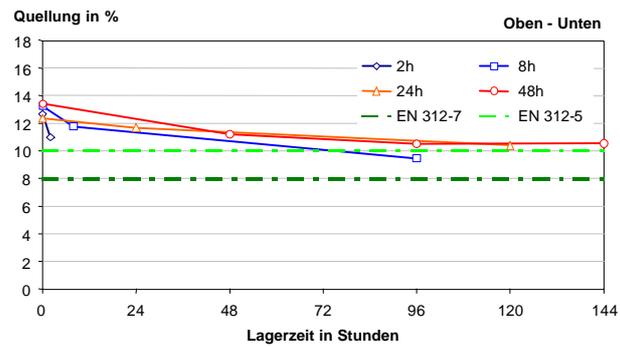


Abbildung 99: Entwicklung der Dickenquellung in den Außenbereichen der Stapel in Abhängigkeit vom Zeitpunkt des Scheifens.

### Erkenntnisse

Auch in dieser Untersuchung bestätigt sich der Einfluss der Stapellagerung auf die Dickenquellung. Analog zur Querkzugfestigkeit (Kapitel 7.4.4.2) wirkt sich der Temperatureinfluss noch stärker aus als bei den Laborplatten (Kapitel 6.3.4.3).

Wie bereits oben beschrieben, ist der Stapel ein wichtiges Instrument, um optimale Platteneigenschaften zu erzielen. Das Aufnahmevermögen von Wasser ist durch die Lagerung der Platten bei erhöhten Temperaturen deutlich vermindert. Daraus resultiert eine entsprechend verbesserte Dickenquellung.

#### 7.4.4.5 Biegeeigenschaften

Bei den vorliegenden Ergebnissen sind keine nennenswerten Änderungen des Biege-Elastizitätsmoduls und der Biegefestigkeit während der Stapellagerung über die betrachteten Zeiträume feststellbar.

## 7.4.5 PMDI-Spanplatten

### 7.4.5.1 Temperatur und Feuchte

#### **Temperatur**

In Abbildung 100 ist der Temperaturverlauf in der Mitte der drei untersuchten Stapel aufgetragen. Es ist erkennbar, dass die unterschiedlichen Zeitpunkte des Schleifvorgangs die Abkühlungsgeschwindigkeit beeinflussen. So haben die Platten des Stapels, die bereits drei Stunden nach der Produktion geschliffen wurden, am dritten Tag der Lagerung lediglich eine Temperatur in der Mitte von 49°C. Die Platten, die 24 Stunden nach der Herstellung geschliffen wurden, haben eine Temperatur von 53°C und die Platten, nach 48 Stunden geschliffen, eine Temperatur von 55°C. Die Zeitdifferenz, bis der wärmste Stapel die Temperatur des Stapels mit der geringsten Temperatur angenommen hatte, beträgt etwa 48 Stunden.

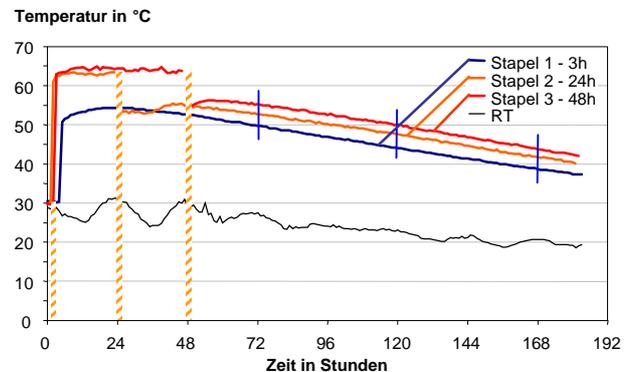


Abbildung 100: Entwicklung der Temperatur in der Mitte der Stapel.

#### **Feuchte**

Während der Lagerung beträgt die mittlere Feuchte der Platten 6,5%. Eine Änderung dieses Wertes ist über den betrachteten Lagerzeitraum nicht feststellbar.

#### **Ausgleichsfeuchte**

Die Ausgleichsfeuchte bei Normklima (20°C und 65% relative Luftfeuchte) sinkt unter diesen Temperaturbedingungen über den Zeitraum von 168 Stunden von 10,3% auf 9,9% ab.

### 7.4.5.2 Querkzugfestigkeit

Die Querkzugfestigkeit der PMDI-Platten unmittelbar nach dem Verpressen beträgt 0,96 N/mm<sup>2</sup>. Während der Lagerung über einen Lagerzeitraum von 7 Tagen ist keine signifikante Änderung der Querkzugfestigkeit feststellbar.

### 7.4.5.3 Querkzugfestigkeit nach Kochprüfung

Die Querkzugfestigkeit nach Kochprüfung beträgt ca. 0,23 N/mm<sup>2</sup>. Eine Änderung während der Lagerung im Stapel ist nicht feststellbar.

#### 7.4.5.4 Dickenquellung

In Abbildung 101 und Abbildung 102 ist die Änderung der Dickenquellung der PMDI-Platten während der Stapellagerung über einen Zeitraum von 7 Tagen dargestellt. Der Anfangswert der Quellung nach 2-stündiger Wasserlagerung beträgt maximal 2,9%. Während der Stapellagerung wird die Dickenquellung in der Mitte des Stapels reduziert. Der minimale Wert wird in der Mitte des Stapels erreicht, dessen Platten nach 24 Stunden geschliffen wurden (ca. 1,8%). Im oberen Bereich des Stapels wird während des gleichen Lagerzeitraums eine Quellung von lediglich 2,2% erzielt.

Die Dickenquellung nach 24-stündiger Wasserlagerung wird in der Mitte des Stapels von 9% auf minimal 7,3% vermindert. Der geringste Wert wird bei der höchsten Stapeltemperatur ermittelt. Die Quellung der zweiten Platte von oben erreicht einen Wert von etwa 8,0%; die Verbesserung der Dickenquellung fiel somit in der Mitte der Stapel deutlich größer aus als in den Randbereichen, die einem eindeutig geringeren Temperatureinfluss ausgesetzt waren.

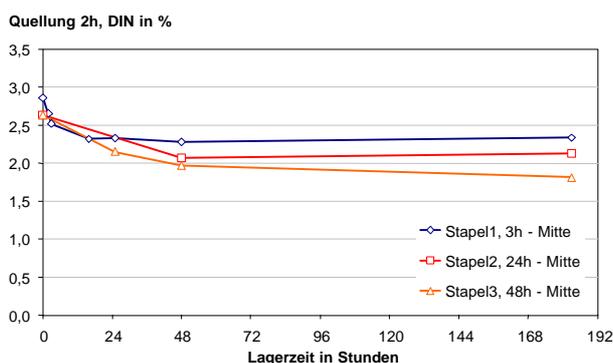


Abbildung 101: Entwicklung der Dickenquellung nach 2 Stunden (DIN) der PMDI-Platten während der Stapellagerung.

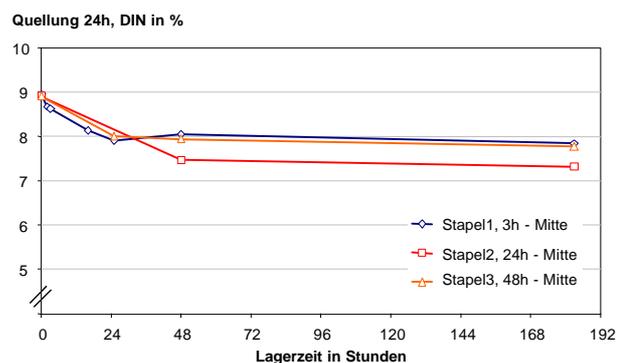


Abbildung 102: Entwicklung der Dickenquellung nach 24 Stunden (DIN) der PMDI-Platten während der Stapellagerung.

#### Erkenntnisse

Obwohl es zu keinen erkennbaren Änderungen der Festigkeiten während der Lagerung im Stapel kommt, nimmt dennoch die Dickenquellung merklich ab. Dies bestätigt die bereits mehrfach getroffene Annahme, dass die Änderung der Quellung auch allein durch Veränderung der Holzkomponente hervorgerufen werden kann. Verglichen mit vorgenannten Ergebnissen ist hier die Abnahme der Quellung relativ gering; dies ist auf das geringe Temperaturniveau von unter 60°C zurückzuführen.

### 7.4.5.5 Abhebefestigkeit

Die Entwicklung der Abhebefestigkeit während der Stapellagerung ist in Abbildung 103 dargestellt. Der Anfangswert unmittelbar nach dem Verpressen und vor der Lagerung der Platten liegt nicht vor, da diese Platten nicht unter den gleichen Bedingungen geschliffen werden konnten, wie die gelagerten Platten. Ein manueller Schliff hätte nicht zu vergleichbaren Bedingungen geführt, daher wurde von einer Berücksichtigung dieser Proben Abstand genommen. Dennoch wird erkennbar, dass der Anfangswert etwa um 1,5 N/mm<sup>2</sup> gelegen haben muss, denn unmittelbar nach dem Schleifen nach 3 Stunden beträgt der Wert lediglich 1,62 N/mm<sup>2</sup>. Im weiteren Verlauf der Lagerung stieg die Abhebefestigkeit merklich auf 1,94 N/mm<sup>2</sup> an. Nach etwa 16 Stunden ist keine nennenswerte Änderung mehr messbar. Die Proben der anderen Stapel liegen auf gleichem Eigenschaftsniveau.

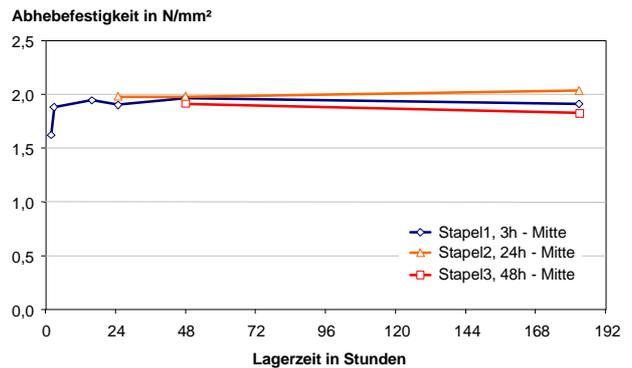


Abbildung 103: Entwicklung der Abhebefestigkeit der PMDI-Platten während der Stapellagerung.

### 7.4.5.6 Biegeeigenschaften

Die Änderung des Biege-Elastizitätsmoduls und der Biegefestigkeit der PMDI-Platten ist in Abbildung 104 und Abbildung 105 dargestellt. Auch hier werden die Proben, die unmittelbar nach dem Verpressen entnommen wurden, nicht berücksichtigt. Auch bei der Betrachtung des Eigenschaftsniveaus muss berücksichtigt werden, dass die Platten nicht mit den exakt gleichen Einstellungen auf das Nettomaß geschliffen wurden. Es ist aber trotzdem eine leicht positive Tendenz in der Entwicklung der Eigenschaften erkennbar.

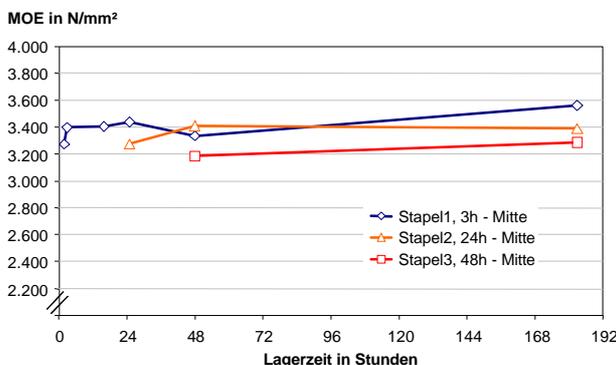


Abbildung 104: Entwicklung des Biege-Elastizitätsmoduls der PMDI-Platten während der Stapellagerung.

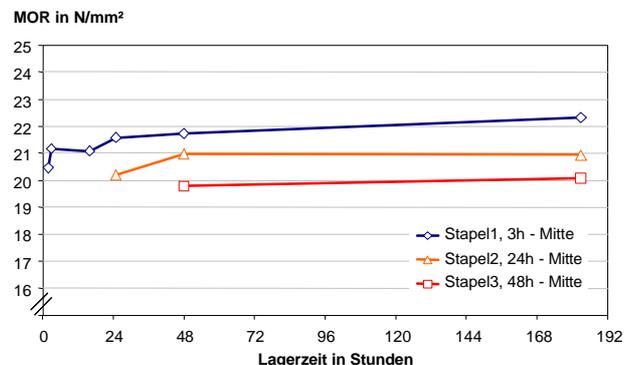


Abbildung 105: Entwicklung der Biegefestigkeit der PMDI-Platten während der Stapellagerung.

### 7.4.6 MDF-Platten

#### 7.4.6.1 Temperatur und Feuchte

##### Temperatur

In Abbildung 106 und Abbildung 107 sind die Temperaturänderungen der untersuchten Stapel dargestellt. Es ist erkennbar, dass die Einstapeltemperatur für die Platten, die durch zwei Wender gekühlt wurden, etwa 60°C beträgt. Die Temperatur in der Mitte des Stapels sinkt innerhalb von 90 Stunden auf rund 50°C ab; die zweite Platte von oben hatte bereits nach 6 Stunden die Umgebungstemperatur von etwa 20°C erreicht. Werden die Platten durch drei Wender nach dem Pressen heruntergekühlt, so liegt die Einstapeltemperatur bei 45°C. Innerhalb von 90 Stunden sinkt die Temperatur in der Mitte des Stapels auf 40°C ab.

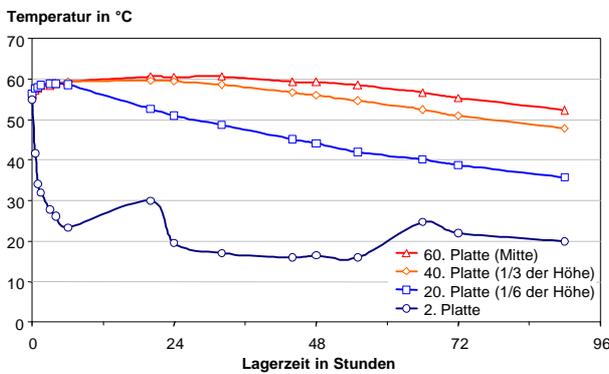


Abbildung 106: Abnahme der Temperatur der MDF-Platten (nach zwei Wendern eingestapelt) während der Stapellagerung.

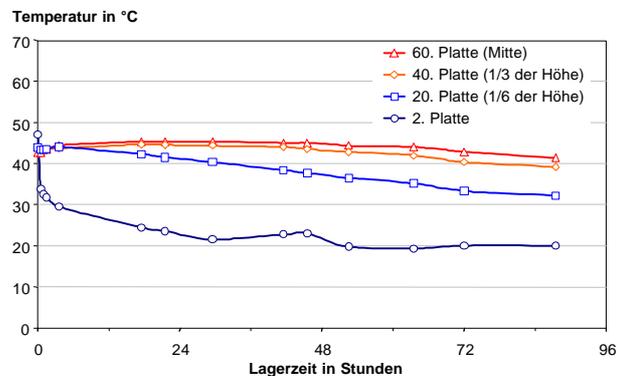


Abbildung 107: Abnahme der Temperatur der MDF-Platten (nach drei Wendern eingestapelt) während der Stapellagerung.

##### Feuchte

Unmittelbar nach dem Verpressen haben die Platten eine Feuchte von etwa 4,0%. In Abbildung 108 ist die Verteilung der Feuchte von der Mitte bis zum Rand in den verschiedenen Schichten des

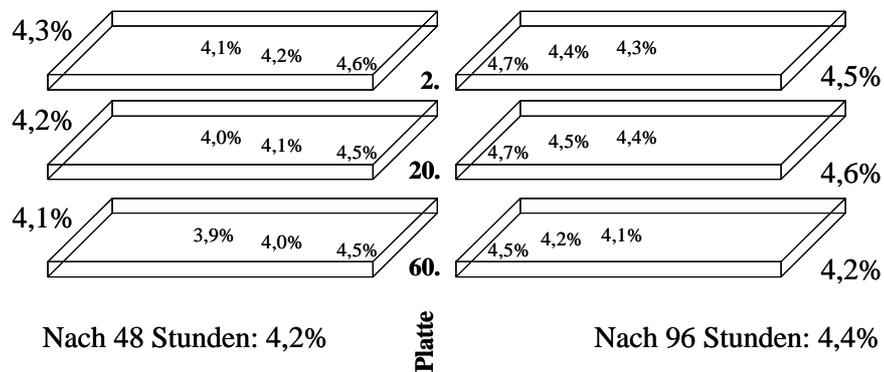


Abbildung 108: Entwicklung der Feuchte der MDF-Platten während der Stapellagerung.

Stapels (zwei Sternwender) nach 48 und 96 Stunden Lagerzeit dargestellt. Es wird

ersichtlich, dass die Plattenfeuchte während der Lagerung im Mittel auf 4,4% ansteigt. In den Randbereichen der horizontalen und vertikalen Ebene wird die Feuchte am stärksten erhöht. Während im Innersten des Stapels auch nach 96 Stunden noch eine Feuchte von 4,1% vorliegt, so ist die Feuchte an der äußersten Ecke des Stapels bereits auf 4,7% angestiegen.

### **Erkenntnisse**

Im Gegensatz zu den Ergebnissen an Spanplatten ist hier eine Änderung der Plattenfeuchte zu erkennen. Dabei muss berücksichtigt werden, dass die Feuchte unmittelbar nach dem Verpressen besonders niedrig und somit die Differenz zur Ausgleichsfeuchte (etwa 8% bei dem Umgebungsklima 25°C und 45% relative Luftfeuchte) relativ groß ist. Der Ausgleich der Feuchte erfolgt von außen nach innen im Stapel, wie es in Abbildung 108 erkennbar ist.

#### **7.4.6.2 Querkzugfestigkeit**

Ein gravierender Einfluss der Stapelbedingungen auf die Entwicklung der Querkzugfestigkeit kann nicht ermittelt werden. Über den betrachteten Zeitraum schwankt die Festigkeit nicht signifikant um 1,80 N/mm<sup>2</sup> (für die Platten des Stapels nach zwei Wendern) bzw. 1,90 N/mm<sup>2</sup> (für die Platten des Stapels nach drei Wendern).

#### **7.4.6.3 Dickenquellung**

Auch bei der Dickenquellung treten nur geringfügige Änderungen während der Lagerung im Plattenstapel auf. Im Mittel beträgt die Dickenquellung in Folge 24-stündiger Lagerung in der Mitte der Stapel 9,2% (3 Sternwender) bzw. 8,8% (2 Sternwender). Die geringe Temperaturdifferenz scheint auch bei MDF einen geringfügigen positiven Effekt auf die Dickenquellung ausgeübt zu haben.

#### **7.4.6.4 Formaldehydgehalt**

Nach 72 Stunden Lagerzeit im Stapel nimmt der Perforatorwert der Platten aus der Mitte der Stapel ab. Der Wert der Platten, die mit einer Temperatur von 60°C eingestapelt wurden (zwei Wender), beträgt 3,9 mg/100g und für die Platten, die mit 45°C eingestapelt wurden (drei Wender), etwa 4,5 mg/100g. Auch hinsichtlich des Formaldehydgehalts wird der Einfluss der Temperatur im Stapel deutlich.

## 7.5 Zusammenfassung der Industrieuntersuchungen

### UF-Spanplatten

- ✓ Die Stapeltemperatur wird neben der Abkühlung im Sternwender auch durch die Herstellbedingungen der Platten beeinflusst. Bei Änderung des Presszeitfaktors ändert sich die Taktrate und damit die Verweildauer der einzelnen Platte im Sternwender. Die Anzahl der durchlaufenden Sternwender vor der Einstapelung und auch die Lagerdauer im Großstapel vor dem Schleifen beeinflusst die Stapeltemperatur.
- ✓ Die Feuchte der Platten unterliegt im Stapel keiner Veränderung und beträgt hier um 5%.
- ✓ Eine Zunahme der Querzugfestigkeit bis zu 10% ist bei höherer Temperatur (~80°C) möglich. Allerdings wird die Zunahme bei längerer Lagerung als 24 Stunden mit mehr als 75°C allmählich wieder eliminiert.
- ✓ Eine Abnahme der Dickenquellung von ca. 21% auf unter 15% ist bei höherer Temperatur möglich. Bei niedrigerer Temperatur ist die Verbesserung der Quellung geringer.
- ✓ Eine Änderung der Biegeeigenschaften ist nicht feststellbar.
- ✓ Die Abnahme des Formaldehydgehalts ist bei höherer Temperatur geringfügig besser (Abnahme von 5 auf fast 3 mg/100g).
- ✓ Die Ausgleichsfeuchte nimmt im günstigsten Fall während einer dreitägigen Lagerung von 10,5% auf unter 9,7% ab.

### MUF-Spanplatten

- ✓ Die Beeinflussung der Stapeltemperatur durch Anzahl der Sternwender und Lagerdauer vor dem Schleifen konnte an diesen Platten nachgewiesen werden.
- ✓ Die Feuchte liegt hier auf einem Niveau von 6,5%, wobei während der Stapellagerung über 3 Tage keine Änderung erkennbar ist.
- ✓ Die Lagerung der Platten im Stapel bewirkt eine Abnahme der Ausgleichsfeuchte von 10,4% auf 9,3% (höchste Stapeltemperatur) bzw. auf 9,7% (geringste Stapeltemperatur).
- ✓ Eine Erhöhung der Querzugfestigkeit um 6,5% findet während der Lagerung bei höchster Stapeltemperatur statt. Bei einer Stapeltemperatur von 50°C ist keine Änderung feststellbar.

- ✓ Die Dickenquellung wird in Abhängigkeit von der Stapeltemperatur von 1,6% auf 1,0% (nach 2 Stunden Wasserlagerung) und von 7,2% auf 5,8% (nach 24 Stunden Wasserlagerung) reduziert.
- ✓ Hinsichtlich der Biegeeigenschaften sind keine signifikanten Änderungen feststellbar.
- ✓ Die Formaldehydemission wird von 4,3 auf 2,5 mg/100g reduziert.

### **MUPF-Spanplatten**

- ✓ Die Stapeltemperatur wird durch die beschriebene Stapelmethode gravierend beeinflusst. Durch das sofortige Einstapeln der Platten nach der Heißpresse ist es möglich, die Platten für einen definierten Zeitraum einer deutlich höheren Temperatur auszusetzen, wenn die Möglichkeit gegeben ist, die Platten nach der Lagerung wiederum zu kühlen.
- ✓ Während der Lagerung wird die Feuchte der Platten nicht verändert; sie beträgt bei beiden Lagerbedingungen etwa 8,5%.
- ✓ Die Querzugfestigkeit der MUPF-Platten ist nach 24-stündiger konventioneller Lagerung im Stapel um etwa 13% erhöht. Gegenüber der konventionellen Durchführung des Produktionsabschnittes "Kühlung und Abstapelung" wird bei bis zu dreistündiger Lagerung ohne vorherige Kühlung im Sternwender die Querzugfestigkeit nur um ca. 6% erhöht.
- ✓ Ebenso ist die Kochquerzugfestigkeit nach Lagerung im Stapel (24 Stunden) um 11% erhöht. Gegenüber einer konventionellen Lagerung wird die Querzugfestigkeit nach Kochprüfung durch eine Lagerung (bis zu 3 Stunden) unmittelbar nach dem Verpressen um 12% verbessert.
- ✓ Im Zuge der konventionellen Stapelung wird die Dickenquellung innerhalb von 24 Stunden um etwa ein Viertel auf 3,9% vermindert. Im Vergleich zur konventionellen Stapelung wird während der Lagerung vor dem Sternwender die Quellung um 7% (relativ) auf 3,4% reduziert.
- ✓ Hinsichtlich der Biegeeigenschaften sind nur geringe Änderungen feststellbar; diese folgen allerdings einem negativen Trend.

**PF-Spanplatten**

- ✓ Die Stapeltemperatur wird durch die Lagerdauer vor dem Schleifen und die damit einhergehende Vereinzelnung der Platten deutlich beeinflusst. Je eher die Platten in einen kleineren Stapel gelagert werden, umso schneller kühlen sie aus. Der Randbereich, über den die Temperatur stark abfällt, kann mit 20 bis 30 cm angenommen werden; im übrigen Bereich der Platte ist die Temperatur nahezu konstant.
- ✓ Das Niveau der Gesamtfeuchte beträgt während der gesamten Lagerung unverändert um 7,0%. Die Feuchtedifferenz wird bereits innerhalb kurzer Zeit (2 Stunden) vermindert. Ein vollständiger Ausgleich zwischen Deck- und Mittelschicht findet hingegen nicht statt.
- ✓ Hinsichtlich der Querzugfestigkeit sind Verbesserungen bis zu 15% möglich. Deutliche Zunahmen sind bereits nach 8 Stunden Lagerung im Großstapel gegeben, eine weitere Lagerung von 48 Stunden erbrachte aber die maximale Zunahme der Querzugfestigkeit. Die Verbesserung der Eigenschaft ist in der Mitte der Stapel stärker ausgeprägt als in den Randbereichen. Je höher die Temperatur, umso stärker wird die Querzugfestigkeit verbessert.
- ✓ Auch für die Querzugfestigkeit nach Kochprüfung wird der deutliche Temperatureinfluss ersichtlich, da neben der weitergeführten Kondensation des Harzes auch die thermische Vergütung und somit eine höhere Beständigkeit des Holzes gegenüber Wasser zum Tragen kommt.
- ✓ Dieser Zusammenhang ist auch hinsichtlich der Dickenquellung deutlich. Je höher die Temperatur während der Lagerung, desto stärker wird die Quellung reduziert.
- ✓ Die Biegeeigenschaften, sowohl die Biegefestigkeit als auch der Biege-Elastizitätsmodul, scheinen durch die Stapellagerung nicht beeinflusst zu werden.

### **PMDI-Spanplatten**

- ✓ Die Stapeltemperatur kann durch die Art der Stapelbildung (v.a. durch die Wahl des Schleifzeitpunkts) beeinflusst werden.
- ✓ Die Feuchte ändert (ca. 6,5%) sich im Stapel nicht.
- ✓ Die Ausgleichsfeuchte wird geringfügig von 10,3 auf 9,9% reduziert.
- ✓ Es findet unter diesen Stapelbedingungen keine nennenswerte Änderung der Querzugfestigkeit statt. Hinsichtlich der Abhebefestigkeit scheint eine positive Tendenz innerhalb der ersten Stunden der Lagerung vorhanden zu sein.
- ✓ Die Dickenquellung nach 24-stündiger Wasserlagerung wurde von 9 auf 7,5% reduziert. Hier machen sich selbst geringe Temperaturen und Temperaturunterschiede bemerkbar: Die Quellung der Platten mit dem höchsten Temperatureinfluss nimmt am stärksten ab.
- ✓ Die Biegeeigenschaften werden nicht nennenswert verändert.

### **MDF-Platten**

- ✓ Die Stapeltemperatur der MDF-Platten beträgt in den vorliegenden Untersuchungen in Abhängigkeit von der durchlaufenen Sternwenderzahl maximal 60°C bzw. 45°C.
- ✓ Die Feuchte wird während der Lagerung erhöht, wobei die Randbereiche der Platten stärker zunehmen. Zwischen dem Rand und dem Kernbereich des Stapels besteht konsequent eine Feuchtedifferenz von 0,5%.
- ✓ Bei dem vorliegenden Temperaturniveau tritt keine Änderung der Querzugfestigkeit auf. Auch die Dickenquellung wird nur unwesentlich beeinflusst.
- ✓ Es ist erkennbar, dass der Formaldehydgehalt während der Lagerung bei höherer Temperatur stärker abnimmt. Aufgrund des geringen Temperaturniveaus sind diese Änderungen nur geringfügig.

## 8 Zusammenfassung

### 8.1 Grundsätzliche Erkenntnisse

- ↳ Durch die Stapellagerung werden deutliche Verbesserungen bei allen Platten und Klebstoffen im Labor und in der Industrie hinsichtlich Ausgleichsfeuchte, Dickenquellung und Formaldehydgehalt/-Emission erzielt. Diese Verbesserungen sind wesentlich durch Veränderungen des Holzes bedingt. Eine höhere Temperatur wirkt sich dabei positiv auf die Eigenschaftsentwicklung während der Stapellagerung aus: Je höher die Temperatur im Stapel, desto stärker werden die Ausgleichsfeuchte, Quellung und Formaldehydwerte reduziert bzw. verbessert.
- ↳ Die Querzugfestigkeit wird, ausgenommen beim UF-Harz, in jedem Fall verbessert. Bei zu langer Einwirkung einer zu hohen Temperatur besteht allerdings die Gefahr der Hydrolyse für Aminoplasten (UF, MUF und MUPF). Wird die Klebfestigkeit merklich reduziert, kann dies auch negative Auswirkungen auf die Dickenquellung haben.
- ↳ Die Biegeeigenschaften (Biegefestigkeit und Biege-Elastizitätsmodul) werden durch die Stapellagerung nicht beeinflusst.
- ↳ Die Feuchte des gesamten Stapels ändert sich im Prinzip nicht. Lediglich bei den untersuchten MDF-Platten (Ausgangsfeuchte: ~4%) kann eine langsame Änderung der Feuchte beobachtet werden.
- ↳ Der pH-Wert von PF-Platten wird im Zuge einer 7-tägigen Stapellagerung merklich reduziert.

**Um optimale Verbesserungen während einer Stapellagerung zu erreichen,  
sind folgende spezifische Gegebenheiten zu beachten:**

Die Stapeltemperaturen sind für die verschiedenen Harze individuell zu wählen. Bei Temperaturen um 100°C wird die Querkzugfestigkeit von MUF- und MUPF-Harzen reduziert. Für ein UF-Harz ist eine Temperatur von 85°C bereits deutlich zu hoch (vgl. Abbildung 17). Bei Temperaturen darunter wurde für diese Harze eine Verbesserung der Querkzugfestigkeit erzielt. Für PF-Harze kann die Stapeltemperatur nicht zu hoch gewählt werden. Sie wird außerdem durch die Presstemperatur und -zeit begrenzt. Eine Limitierung der Stapeltemperatur stellt sicherlich die mit steigender Temperatur einhergehende Verfärbung der Platte dar, die zu Beeinträchtigungen bei der Weiterverarbeitung (Beschichtung, leichte helle Papiere/Filme) führen kann. Auch kann es bei hohen Temperaturen zu Geruchsbelästigungen kommen. Die Farb- und Geruchsveränderungen sind im wesentlichen auf die thermische Veränderung des Holzes bei hohen Temperaturen zurückzuführen.

Eine gleichmäßige Temperaturverteilung ist anzustreben, um die Variation der Eigenschaften vom Rand zur Plattenmitte so gering wie möglich zu halten und zudem keine Spannungen zu implementieren (Probleme bei Weiterverarbeitung).

Die Plattenfeuchte hat im untersuchten Bereich (5% bis 8,5%) keinen erkennbaren Einfluss auf die Änderung der Eigenschaften. Hinweise aus Laboruntersuchungen deuten bei höheren Feuchten eine Beeinflussung an. Diese wären bei Bedarf noch zu präzisieren. Eine höhere Feuchte kann zu einem Spannungsabbau und damit zu einer Verbesserung der Eigenschaften (v.a. Dickenquellung und Querkzugfestigkeit) beitragen.

## 8.2 Bedeutung der Temperatur für die Stapellagerung

Die Temperatur hat eine herausragende Bedeutung für Änderungen der physikalisch-technologischen und chemischen Platteneigenschaften während der Stapellagerung. Es konnte in dieser Untersuchung gezeigt werden, dass die Stapeltemperatur im Prozessablauf gezielt beeinflusst werden kann: Bildung von Zwischenstapeln vor dem Sternwender, Anzahl der Wender, Zeitpunkt des Schleifens, Stapelhöhe und Lagerdauer. Daneben können saisonale Schwankungen (Sommer-Winter) des Umgebungsklimas (Temperatur und Luftfeuchte) einen – schwer kontrollierbaren – Einfluss auf die Auskühlungsgeschwindigkeit der einzelnen Platten und des gesamten Stapels haben.

Es sind konkrete Kenntnisse der tatsächlichen Plattentemperaturen für die maximale Ausschöpfung des Verbesserungspotentials "Stapellagerung" notwendig.

Neben der Beeinflussung der nach Norm geforderten Eigenschaften ist die Plattentemperatur auch für die Weiterverarbeitung und Auslieferung von großer Bedeutung:

- ✓ Die Produktionsprozesse Lackierung und Beschichtung reagieren äußerst sensibel auf Temperaturunterschiede der Platten (Verdunstung, Aushärtung etc.). Dadurch ist oftmals bei der Lagerung der Platten die Plattentemperatur die limitierende Größe. Die Entwicklung der Eigenschaften ist dabei nachrangig. Allerdings ist die Kenntnis der Temperatur bzw. der Abkühlungsgeschwindigkeit für die zeitliche Produktionsplanung von hoher Bedeutung.
- ✓ Lagerkapazitäten stehen entweder zwecks Minimierung der Investitionskosten und / oder aufgrund steigender Produktionskapazitäten durch Prozessoptimierungen nur begrenzt zur Verfügung. Hier ist also eine "gut organisierte" Lagerhaltung erforderlich. Dies kann durch Kenntnis und Vorhersage der Temperatur bzw. der Abkühlungsgeschwindigkeit der Platten optimiert werden.

Aufgrund der großen Bedeutung der Temperatur wurde im Rahmen dieser Arbeit der Versuch unternommen, die Temperatur an Stapeln und frei auskühlenden Platten mittels einer Software zu simulieren. Eine exakte Modellierung der Platten- bzw. Stapeltemperatur war aufgrund der im Schrifttum ungenügend beschriebenen physikalischen Kenngrößen und Zusammenhänge für Holzwerkstoffplatten nicht möglich. Insbesondere fehlten zuverlässige Kenntnisse hinsichtlich der Abhängigkeiten der Wärmeleitfähigkeit und spezifischen Wärme von der Dichte, Feuchte, Spangrößen und Temperatur.

### 8.3 Konsequenzen für die industrielle Praxis

- ↪ Mit Hilfe der Stapellagerung kann die Erfüllung der Anforderungen bezüglich des Formaldehydgehaltes bzw. der Formaldehydemission massiv unterstützt werden. Durch eine Stapellagerung bei entsprechenden Temperaturen kann somit in Bereiche besonders hoher Anforderungen unter Berücksichtigung des gesamten Eigenschaftsprofils vorgedrungen werden.
- ↪ Die Stapeltemperatur sollte so hoch wie möglich gewählt werden. Sie ist aber auf die Höhe begrenzt, bei der die eingesetzten Harze hydrolysieren und unerwünschte Farbveränderungen (und ggf. auch Geruchsbelästigungen) auftreten.
- ↪ Aufgrund der deutlichen Verminderung der Dickenquellung besteht ein Einsparpotenzial hinsichtlich der Einsatzmenge von Paraffinen als Hydrophobierungsmittel.
- ↪ Mit Hilfe einer thermischen Vergütung der Holzspäne kann die Feuchtebeständigkeit der Platten optimiert werden; dazu zählen vor allem die Querkzugfestigkeit nach Kochprüfung, die Dickenquellung und auch die Ausgleichsfeuchte.
- ↪ Die ungleichmäßige Feuchteverteilung innerhalb der Plattenebene, die an MDF-Platten ermittelt wurde, kann insbesondere für Platten problematisch sein, die für die weitere Bearbeitung zu Laminat-Fußbodenplatten hergestellt werden. Eine unterschiedliche Feuchteverteilung innerhalb der Plattenebene kann zu Verformungen beim Aufteilen der beschichteten Platten ('Bananeneffekt') und damit zum Ausschuss der Ware führen. Um diese Probleme zu vermeiden, müssen die Platten vor einer Weiterverarbeitung so lange zur Klimatisierung gelagert werden, bis die Feuchtedifferenzen zwischen dem Inneren und dem Randbereich des Stapels weitgehend egalisiert sind.
- ↪ Werden Platten auf konventionelle Art gestapelt, so ergibt sich ein Randeffect von etwa 20 cm, da die Stapeltemperatur über diesen Bereich stark abfällt. Dies führt dazu, dass es in den Platten einen vergüteten Kernbereich und einen kaum vergüteten Randbereich gibt. Gleichzeitig muss davon ausgegangen werden, dass auch die äußeren Platten des Stapels nicht der Temperatur ausgesetzt sind. Soll der Temperatureffekt ausgenutzt werden, müssen Maßnahmen getroffen werden, um Temperatur und auch Feuchte gleichmäßig im Stapel zu verteilen. Um das Temperaturniveau in den Platten gleichmäßig einzuhalten, sind verschiedene Maßnahmen denkbar:

1. Mit Hilfe von geeignetem Isolationsmaterial kann eine Auskühlung der Randbereiche (äußere Platten und Ränder der Platten) vermieden werden.
  2. In der Vergangenheit hat es in großtechnischer Anwendung bereits Versuche gegeben, die Platten einzeln durch so genannte Konditionierungskammern nach dem Verpressen zu konditionieren (Kiosseff 1974). Dies konnte sich in der Praxis jedoch nicht durchsetzen, da eine gleichmäßige Temperatur- und Feuchteverteilung nicht gewährleistet werden konnte, wodurch es zu nicht akzeptablen Verwerfungen der Platten kam. Der Plattenstapel bietet optimale Bedingungen für den Ausgleich von Temperatur, Feuchte und Spannungen. Da diese Vorgänge relativ langsam (in Stunden) ablaufen, kommt es zu einem gleichmäßigen Spannungsabbau.
- ↳ Um die möglichen Optimierungspotenziale während der Stapellagerung nutzen zu können, bedarf es einer maximalen Flexibilität im Bereich des Plattenhandlings nach dem Verpressen. Es sollten folgende Möglichkeiten für die Manipulation der Platten nach der Presse zur Verfügung stehen:
- ✓ Abstapelmöglichkeit unmittelbar nach der Heißpresse mit der Möglichkeit, die Platten zu definierten Zeiten erneut in den Prozess einzuschleusen und im Sternwender zu kühlen.
  - ✓ Variable Verweildauer der Platten im Sternwender oder Klimatisierung der Sternwender, um die Einstapeltemperatur exakt einstellen zu können.
  - ✓ Reifelager nach der Kühlung mit definierten Umgebungsbedingungen und entsprechender Kapazität.

## 9 Literatur

- Albrecht, J.W. 1968: The use of wax emulsion in particleboard production.  
Proceedings of the Washington State University Particleboard Symposium, Pullman,  
WA, USA 2: 31-54
- Allan, D.; Polovtseff, B. 1961a: Der Einfluss der Hydrolyse auf die Eigenschaften der  
Holzspanplatte. Referate gehalten auf der 6. Sitzung der Technischen Kommission  
der FESYP am 16./17.3.1961 in Kopenhagen
- Allan, D.; Polovtseff, B. 1961b: Die Wirkung der Nachpresskonditionierung auf das  
Stehvermögen der Holzspanplatte. Referate gehalten auf der 6. Sitzung der  
Technischen Kommission der FESYP am 16./17.3.1961 in Kopenhagen
- Blomquist, R.E; Olson, W.Z. 1957: Durability of urea-resin glues at elevated temperatures.  
Forest Products Journal: 226-272
- Bolton, A. J.; Humphrey, P.; Kavvouras P. K. 1989a: The hot pressing of dry-formed wood  
based composites. Part IV: Predicted variation of mattress moisture content with  
time. *Holzforschung* 43: 345-349
- Bolton, A. J.; Humphrey, P. E.; Kavvouras, P. K. 1989b: The hot pressing of dry-formed  
wood- based composites, Part VI: 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
- Cherubim, M. 1976: Zur Hydrolyse und Formaldehydabspaltung aus Holzspanplatten.  
*Holz als Roh- und Werkstoff* 34: 449-452
- Christensen, R.L. 1972: Test for measuring formaldehyde emission from formaldehyde  
resin bonded particleboards and plywood.  
*Forest Products Journal* 22 (4): 17-20
- Deppe, H.-J.; Ernst, K. 1964: Technologie der Spanplatten.  
Stuttgart: Holz-Zentralblatt Verlags-GmbH, 283 Seiten
- Deppe, H.-J.; Ernst, K. 1965: Probleme der Presszeitverkürzung bei der Herstellung von  
Holzspanplatten. *Holz als Roh- und Werkstoff* 53: 441-445
- Deppe, H.-J.; Ernst, K. 1973: Fortschritte der Spanplattentechnik.  
Stuttgart: DRW-Verlags-GmbH, 149 Seiten
- Deppe, H.-J.; Ernst, K. 1991: Taschenbuch der Spanplattentechnik.  
Leinfelden-Echterdingen: DRW-Verlag, 467 Seiten
- DIN 52 364 (1965): Prüfung von Holzspanplatten, Bestimmung der Dickenquellung.
- DIN EN 120 (1992): Holzwerkstoffe, Bestimmung des Formaldehydgehaltes,  
Extraktionsverfahren genannt Perforatormethode.
- DIN EN 310 (1993): Holzwerkstoffe, Bestimmung des Biege-Elastizitätsmoduls und der  
Biegefestigkeit.
- DIN EN 311 (1993): Spanplatten, Abhebefestigkeit von Spanplatten, Prüfverfahren.

- DIN EN 312 (1996/1997): Spanplatten, Anforderungen – Teil 1 bis 7.
- DIN EN 317 (1993): Spanplatten und Faserplatten, Bestimmung der Dickenquellung nach Wasserlagerung.
- DIN EN 319 (1993): Spanplatten und Faserplatten, Bestimmung der Zugfestigkeit senkrecht zur Plattenebene ("Querzugfestigkeit").
- DIN EN 322 (1993): Holzwerkstoffe, Bestimmung des Feuchtegehaltes.
- DIN EN 717-3 (1996): Holzwerkstoffe, Bestimmung der Formaldehydabgabe, Teil 3: Formaldehydabgabe nach der Flaschen-Methode.
- DIN EN 1087-1 (1995): Spanplatten, Bestimmung der Feuchtebeständigkeit, Teil 1: Kochprüfung.
- Dunky, M. 1985: Harnstoff-Formaldehyd-Leime: Einfluss des Molverhältnisses auf die Eigenschaften der Leime und die erreichten Bindefestigkeiten bei Sperrholzverleimungen. *Holzforschung und Holzverwertung* 37: 75-82
- Frühwald, A.; Kruse, K.; Ohlmeyer, M: 1999: Eigenschaftsveränderungen von Spanplatten nach dem Heißpressen und deren Berücksichtigung bei der Prozesskontrolle. Abschlussbericht AiF 10774N, 91 Seiten
- Ginzel, W. 1973: Zur Frage der Hydrolyse harnstoffharzgebundener Holzspanplatten. *Holz als Roh- und Werkstoff* 31: 18-24
- Graser, M. 1962: Temperaturverlauf in industriell gefertigten Spanplatten. *Holz-Zentralblatt, Beilage Moderne Holzverarbeitung* 137
- Greubel, D. 1989: Untersuchungen zur zerstörungsfreien Prüfung von Spanplatten. *Holz als Roh- und Werkstoff* 47: 273-277
- Haas, G.v. 1998: Untersuchungen zur Heißpressung von Holzwerkstoffmatten unter besonderer Berücksichtigung des Verdichtungsverhaltens, der Permeabilität, der Temperaturleitfähigkeit und der Sorptionsgeschwindigkeit. Dissertation Universität Hamburg, 264 Seiten
- Hann, R.A.; Black, J.M.; Blomquist, R.F. 1963: How durable is particleboard? Part 2: The effect of temperature and humidity. *Forest Products Journal*: 169-173
- Heller, W. 1995: Die Spanplatten-Fibel - vom Baum zur Spanplatte. Hameln: Selbstverlag
- Humphrey, P. E. 1991: Pressing issues in panel manufacture: internal behavior during pressing and it's impact on time minimization, properties and profit. *Proceedings, Particleboard Symposium*, 99-108
- Kehr, E.; Grabitzki, K.-H. 1965: Untersuchungen zur Konditionierung von Spanplatten. *Holztechnologie* 6 (2): 81-87
- Kiosseff, H. 1971: Einfluss der Konditionierungsdauer auf die Festigkeit der Spanplatten und deren Abkühlungsgeschwindigkeit nach dem Pressvorgang. *Holzindustrie* (11): 341-342
- Kiosseff, H. 1974: Technische Neuerungen - Konditionierungskammern für Spanplatten. *Holzindustrie* (5): 144

- Kiosseff, H. 1975: Über die optimalen Konditionierungsbedingungen von Spanplatten. Holztechnologie (10): 315-316
- Kruse, K. 1997: Entwicklung eines Verfahrens der berührungslosen Ermittlung von Schallgeschwindigkeiten zur zerstörungsfreien Bestimmung mechanischer Eigenschaften an Holzwerkstoffplatten und dessen Integration in die Prozesskontrolle. Dissertation Universität Hamburg, 195 Seiten
- Kruse, K.; Ohlmeyer, M. 1999: Quality control after hot pressing. Proceedings of the third Panel Products Symposium, Llandudno, Wales, UK: 247-254
- Kollmann, F.; Schneider, A. 1963: Über das Sorptionsverhalten wärmebehandelter Hölzer. Holz als Roh- und Werkstoff 21: 77-85
- Lambert, K.; Pungs, L. 1978: Modelluntersuchungen über die Nachhärtung phenolharzgebundener Holzspanplatten in Hochfrequenzfeld. Holz als Roh- und Werkstoff 36: 299-304
- Lu, X.; Pizzi, A. 1998: Curing conditions effects on the characteristics of thermosetting adhesives-bonded wood joints, Part 2: Hot postcuring improvement of UF particleboards and its temperature-forecasting model. Holz als Roh- und Werkstoff 56: 393-401
- Maku, T.; Hamada, R.; Sasaki, H. 1958: Studies on particle board, Report 4: Temperature and moisture distribution in particleboard during hot pressing. Journal of Japan Wood Research Society 21, Nr. 34, S. 34-46
- Marutzky, R.; Ranta, L. 1979: Die Eigenschaften formaldehydarker HF-Leimharze und daraus hergestellter Holzspanplatten, 1. Mitteilung: Einfluss des Molverhältnisses auf die Eigenschaften der Rohleimharze. Holz als Roh- und Werkstoff 37: 389-393
- Marutzky, R.; Ranta, L. 1980: Die Eigenschaften formaldehydarker HF-Leimharze und daraus hergestellter Holzspanplatten, 2. Mitteilung: Einfluss des Molverhältnisses auf die Eigenschaften der Holzspanplatten. Holz als Roh- und Werkstoff 38: 217-223
- May, H.-A. 1979: Optimierung des Pressvorganges bei der Herstellung von phenolharzverleimten Spanplatten unter Berücksichtigung der Reaktivität der verwendeten Phenolharze und Holzarten. WKI-Bericht 10: 1-71
- Neußner, H.; Schall, W. 1970: Versuche zur Erfassung von Hydrolyseerscheinungen in Spanplatten. Holzforschung und Holzverwertung 22 (6): 116-120
- Noack, D.; Schwab, E. 1972: Die Scherfestigkeit von Holzspanplatten als Kriterium des Spanverbundes. Holz als Roh- und Werkstoff 30: 440-444
- Ohlmeyer, M. 1997: Änderung physikalisch-technologischer Eigenschaften abkühlender Holzwerkstoffplatten. Hamburg: Diplomarbeit Universität Hamburg (unveröffentlicht), 105 Seiten
- Petersen, H.; Reuther, W.; Eisele, W.; Wittmann, O. 1974: Zur Formaldehydabspaltung bei der Spanplattenerzeugung mit Harnstoff-Formaldehyd-Bindemitteln. Holz als Roh- und Werkstoff 32: 402-410

- Pizzi, A. (ed) 1983: Wood Adhesives: Chemistry and Technology. Marcel Dekker Inc., New York and Basel, 364 Seiten
- Plath, E. 1963: Die Betriebskontrolle in der Spanplattenindustrie. Springer-Verlag
- Plath, L. 1968: Versuche über die Formaldehyd-Abspaltung aus Spanplatten, 5. Mitteilung: Einfluss der Härtingsbeschleunigung und Reifezeit auf die Formaldehyd-Abspaltung. Holz als Roh- und Werkstoff 26 (4): 125-128
- Robitschek, P.; Christensen, R.L. 1976: Degradation phenomena in urea-formaldehyde resin-bonded particleboard. Forest Products Journal 26 (12): 43-46
- Römpf 1995: Chemie Lexikon auf CD-ROM. Stuttgart, New York: Thieme
- Roffael, E.; Rauch, W. 1973: Einfluss von Temperatur und thermischer Nachbehandlung auf einige physikalische Eigenschaften von Diisocyanat-gebundenen Spanplatten. Holz als Roh- und Werkstoff 31 (10): 402-405
- Roffael, E.; Rauch, W. and Schaller, K. 1973: Zur Fertigung von Phenolharz-Spanplatten – Teil 3: Über Ablauf und Wirkung der thermischen Nachbehandlung bei Platte mit hoher Dichte. Holz-Zentralblatt 93 (73): 1429-1431
- Roffael, E. 1978: Einfluss der Lagerung von harnstoff-formaldehydharzgebundenen Spanplatten auf ihre Formaldehydabgabe. Adhäsion: 180-182
- Roffael, E.; Greubel, D.; Mehlhorn, L. 1980: Verfahren zur Herstellung von Holzspanplatten mit niedrigem Formaldehydabgabepotential. WKI-Mitteilung 307/1980
- Roffael, E. 1982: Die Formaldehydabgabe von Spanplatten und anderen Werkstoffen. Stuttgart: DRW-Verlag, 154 Seiten
- Roffael E. und Dix B. 1991: Neuere Entwicklungen bei Holzbindemitteln, Teil 1. Adhäsion (10): 36-39.
- Roffael E. und Dix B. 1992: Neuere Entwicklungen bei Holzbindemitteln; Teil 2. Adhäsion (5): 25-26.
- Roux, J.L.; Gilles, F. 1971: Hydrolyse in Spanplatten. FESYP-Bericht: 105-114
- Seifert, J.H. 1970: Untersuchung über Sorption und Quellung von Holz und Holzwerkstoffen. Dissertation Universität München, 263 Seiten
- Sennebogen, L. 1991: Abhebefestigkeit und Folienabschälfestigkeit von Spanplatten in Abhängigkeit von Spangrößenverteilung und Beleimungsfaktoren der Deckschicht. Diplomarbeit Berufsakademie Mosbach
- Shukow, W.P.; Michailow, N.A. 1970: Die Festigkeit der Spanplatte beim Konditionierungsvorgang [russ. Original]. Derevoobr. prom. 6: 2-4
- Shukow, W.P.; Michailow, N.A.; Ostapenko, N.J. 1971: Die Abkühlung der Spanplatte nach dem Pressvorgang [russ. Original]. Derevoobr. prom. 7: 3-4
- Simunic B. 1980: Zerstörungsfreie Feuchtigkeitsmessung bei den zementgebundenen Holzspanplatten (HZ-Platten); 6. Holztechnologisches Kolloquium, Tagungsband: XXII-1 - XXII-9

Stegmann, G.; Bismarck, C.v. 1967: Zur Presszeitverkürzung bei der Herstellung harnstoffharzgebundener Spanplatten, 1. Mitteilung: Einfluss spezieller Pressbedingungen für die Anwendung kurzer Presszeiten. *Holzforschung und Holzverwertung* 19 (4): 53-59

Weichert, L. 1963: Untersuchungen über das Sorptinos- und Quellungsverhalten von Fichte, Buche und Buchen-Preßvollholz bei Temperaturen zwischen 20 und 100°C. *Holz als Roh- und Werkstoff* 21 (8): 290-300

Zmijewski, K. 1964: Einfluss der Temperatur auf die mechanischen Eigenschaften von Spanplatten [polnisches Original]. *Przemysl Drzewny* 15 (7): 16-17

**10 Abbildungsverzeichnis**

<i>Abbildung 1: Temperatur und Dampfdruck in einer Laborspanplatte in Abhängigkeit von der Presszeit.....</i>	<i>4</i>
<i>Abbildung 2: Änderung der Temperatur der Mittelschicht nach dem Heißpressen von Spanplatten unterschiedlicher Dichte (Kruse 1997).....</i>	<i>7</i>
<i>Abbildung 3: Variation der berechneten Feuchte einer 20 mm dicken Laborplatte während des Verpressens (650 kg/m<sup>3</sup>).....</i>	<i>9</i>
<i>Abbildung 4: Änderung der Feuchte in Deck- und Mittelschichten einer Industriespanplatte während der Abkühlung.....</i>	<i>9</i>
<i>Abbildung 5: Berechneter Verlauf der Materialfeuchte nach dem Pressen während der Abkühlung (Greubel 1989).....</i>	<i>10</i>
<i>Abbildung 6: Biege-E-Modul und Biegefestigkeit nach dem Heißpressen (Industrie). .....</i>	<i>15</i>
<i>Abbildung 7: Scherfestigkeit nach dem Heißpressen (Industrie). .....</i>	<i>15</i>
<i>Abbildung 8: Querzugfestigkeit von Holzspanplatten und Harnstoffharz- gebundenen Perliteplatten bei unterschiedlichen Temperaturen und bei Temperatureinwirkung (Ginzel 1973).....</i>	<i>17</i>
<i>Abbildung 9: Abnahme der Querzugfestigkeit während mehrtägiger Stapellagerung in Abhängigkeit von der Temperatur und der Feuchte (nach Robitschek und Christensen 1976).....</i>	<i>18</i>
<i>Abbildung 10: Abnahme der Querzugfestigkeit während mehrwöchiger Stapellagerung in Abhängigkeit von der Härtermenge (nach Robitschek und Christensen 1976).....</i>	<i>18</i>
<i>Abbildung 11: Änderung der Querzugfestigkeit während der Stapellagerung harnstoffharzverleimter Platten (Frühwald et al. 1999).....</i>	<i>19</i>
<i>Abbildung 12: Abmessung und Aufbau der Plattenstapel.....</i>	<i>26</i>
<i>Abbildung 13: Temperaturen während der Stapellagerung (UF-Platten bei normaler und hoher Einstapeltemperatur).....</i>	<i>28</i>
<i>Abbildung 14: Änderung der Feuchte von UF-Platten während der Lagerung.....</i>	<i>28</i>
<i>Abbildung 15: Änderung der Plattentemperatur im Industriestapel und im simulierten Stapel.....</i>	<i>30</i>
<i>Abbildung 16: Entwicklung der Platteneigenschaften während der Lagerung im Industriestapel und in der Apparatur. ....</i>	<i>31</i>
<i>Abbildung 17: Abnahme der Querzugfestigkeit unter extremen Lagerbedingungen. ....</i>	<i>32</i>
<i>Abbildung 18: Siebfraktionen des verwendeten Spanmaterials. ....</i>	<i>34</i>
<i>Abbildung 19: Aufteilung der Platten mit überstreutem Rand. ....</i>	<i>38</i>
<i>Abbildung 20: Temperaturkurve der simulierten Stapellagerung. ....</i>	<i>39</i>
<i>Abbildung 21: Schnittplan (links) und Probenbezeichnung (rechts) für UF-Platten.....</i>	<i>41</i>

Abbildung 22: Schnittplan (links) und Probenbezeichnung (rechts) für MUF-, MUPF und PF-Platten.....	42
Abbildung 23: Vergleich der Temperaturen von Labor- und Industriestapeln (Einstapeltemperaturen 60°C und 75°C).....	44
Abbildung 24: Plattenfeuchte der UF-Platten nach dem Verpressen in Abhängigkeit von Mattenfeuchte und Presszeitfaktor.....	45
Abbildung 25: Änderung der Plattenfeuchte MUF-Platten (links) und der PF-Platten (rechts) nach dem Verpressen in Abhängigkeit vom Presszeitfaktor.....	45
Abbildung 26: Entwicklung der Querkzugfestigkeit für UF-Platten während der Stapellagerung bei 60 und 75°C.....	46
Abbildung 27: Entwicklung der Querkzugfestigkeit für UF-Platten (Versuchsharz) hergestellt mit unterschiedlichen Presszeitfaktoren während der Stapellagerung bei 60 und 75°C.....	47
Abbildung 28: Entwicklung der Querkzugfestigkeit für UF-Platten (Standardharz) hergestellt mit unterschiedlichen Presszeitfaktoren während der Stapellagerung bei 60 und 75°C.....	47
Abbildung 29: Entwicklung der Querkzugfestigkeit unter optimalen Bedingungen für das Versuchsharz während der Stapellagerung. ....	49
Abbildung 30: Änderung der Abhebefestigkeit während der Lagerung.....	51
Abbildung 31: Entwicklung des Formaldehydgehalts für UF-Platten während der Stapellagerung bei 60 und 75°C.....	52
Abbildung 32: Entwicklung des Formaldehydgehalts für das Versuchsharz während der Stapellagerung bei 60 und 75°C für verschiedene Presszeitfaktoren.....	53
Abbildung 33: Entwicklung des Formaldehydgehalts für das Versuchsharz während der Stapellagerung bei 60 und 75°C für verschiedene Härtermengen.....	53
Abbildung 34: Entwicklung der Dickenquellung für UF-Platten während der Stapellagerung bei 60 und 75°C.....	56
Abbildung 35: Entwicklung der Dickenquellung für UF-Platten (Versuchsharz) während der Stapellagerung bei 60 und 75°C für verschiedene Presszeitfaktoren.....	57
Abbildung 36: Entwicklung der Dickenquellung für UF-Platten (Versuchsharz) während der Stapellagerung bei 60 und 75°C für verschiedene DS-Feuchten vor dem Verpressen..	57
Abbildung 37: Abnahme der Ausgleichsfeuchte bei 20°C und 65% relativer Luftfeuchte für UF-Platten während der Stapellagerung bei 60 und 75°C.....	59
Abbildung 38: Entwicklung der Querkzugfestigkeit für MUF-Platten während der Stapellagerung bei 75 und 100°C.....	61
Abbildung 39: Entwicklung der Querkzugfestigkeit für MUPF-Platten während der Stapellagerung bei 75 und 100°C.....	61
Abbildung 40: Entwicklung der Dickenquellung für MUF-Platten während der Stapellagerung bei 75 und 100°C.....	63

Abbildung 41: Entwicklung der Dickenquellung für MUPF-Platten während der Stapellagerung bei 75 und 100°C. ....	63
Abbildung 42: Entwicklung der Abhebefestigkeit für MUF-Platten während der Stapellagerung bei 75 und 100°C. ....	64
Abbildung 43: Entwicklung der Abhebefestigkeit für MUPF-Platten während der Stapellagerung bei 75 und 100°C. ....	64
Abbildung 44: Entwicklung der Formaldehydemission für MUF-Platten während der Stapellagerung bei 75 und 100°C. ....	65
Abbildung 45: Entwicklung der Formaldehydemission für MUPF-Platten während der Stapellagerung bei 75 und 100°C. ....	65
Abbildung 46: Entwicklung der Ausgleichsfeuchte bei 20°C und 65% rel.LF für MUF-Platten während der Stapellagerung bei 75 und 100°C. ....	66
Abbildung 47: Entwicklung der Ausgleichsfeuchte bei 20°C und 65% rel.LF für MUPF-Platten während der Stapellagerung bei 75 und 100°C. ....	66
Abbildung 48: Entwicklung der Querkzugfestigkeit für PF-Platten (unmodifiziert) während der Stapellagerung bei 80, 95 und 110°C. ....	68
Abbildung 49: Entwicklung der Querkzugfestigkeit für PF-Platten (modifiziert) während der Stapellagerung bei 80, 95 und 110°C. ....	68
Abbildung 50: Entwicklung der Querkzugfestigkeit für PF-Platten (unmodifiziert) während der Stapellagerung bei 80 und 110°C bei unterschiedlichen Presszeitfaktoren. ....	69
Abbildung 51: Entwicklung der Querkzugfestigkeit für PF-Platten (modifiziert) während der Stapellagerung bei 80 und 110°C bei unterschiedlichen Presszeitfaktoren. ....	69
Abbildung 52: Entwicklung der Abhebefestigkeit für PF-Platten während der Stapellagerung bei 80, 95 und 110°C. ....	70
Abbildung 53: Entwicklung der Dickenquellung für PF-Platten (unmodifiziert) während der Stapellagerung bei 80, 95 und 110°C. ....	71
Abbildung 54: Entwicklung der Dickenquellung für PF-Platten (modifiziert) während der Stapellagerung bei 80, 95 und 110°C. ....	71
Abbildung 55: Entwicklung des pH-Wertes für PF-Platten in den Deckschichten während der Stapellagerung bei 80 und 110°C. ....	72
Abbildung 56: Entwicklung des pH-Wertes für PF-Platten (modifiziert und unmodifiziert) in der Mittelschicht während der Stapellagerung bei 80 und 110°C. ....	72
Abbildung 57: Entwicklung der Ausgleichsfeuchte bei 20°C und 65% rel.LF für PF-Platten (unmodifiziert) während der Stapellagerung bei 80, 95 und 110°C. ....	73
Abbildung 58: Entwicklung der Ausgleichsfeuchte bei 20°C und 65% rel.LF für PF-Platten (modifiziert) während der Stapellagerung bei 80, 95 und 110°C. ....	73
Abbildung 59: Ablaufschema für die Errichtung der Stapel aus PF-Platten in der Produktion.	82
Abbildung 60: Einschnittplan für die Probennahme aus dem Stapel. ....	84

Abbildung 61: Entnahmeschema für die PF-Platten aus der industriellen Produktion.....	86
Abbildung 62: Probennahme für die MDF-Platten.....	86
Abbildung 63: Temperaturmessstellen für die Stapel in der industriellen Produktion.....	87
Abbildung 64: Änderung der Temperaturen für verschiedene Messstellen im Stapel 2. ....	88
Abbildung 65: Entwicklung der Temperaturen in der Mitte der Stapel 1 bis 3.....	88
Abbildung 66: Änderung der Ausgleichsfeuchte der UF-Platten ( $PZF = 4,1$ s/mm) während einer Stapellagerung über 72 Stunden.....	89
Abbildung 67: Entwicklung der Querkzugfestigkeit von UF-Platten während der Stapellagerung über 72 Stunden. ....	90
Abbildung 68: Entwicklung der Querkzugfestigkeit von UF-Platten während der Stapellagerung über 72 Stunden, relative Darstellung. ....	90
Abbildung 69: Entwicklung der Dickenquellung nach 24 Stunden Wasserlagerung (nach EN) von UF-Platten während der Stapellagerung.....	92
Abbildung 70: Entwicklung der Wasseraufnahme nach 24 Stunden Wasserlagerung von UF-Platten während der Stapellagerung. ....	92
Abbildung 71: Abnahme des Formaldehydgehalts von UF-Platten während der Stapellagerung über 72 Stunden – relative Darstellung. ....	93
Abbildung 72: Abnahme des Formaldehydgehalts von UF-Platten während der Stapellagerung über 72 Stunden. ....	93
Abbildung 73: Abnahme der Formaldehydemission von UF-Platten während der Stapellagerung über 72 Stunden. ....	93
Abbildung 74: Abnahme der Ausgleichsfeuchte der MUF-Platten während der Lagerung über 72 Stunden. ....	95
Abbildung 75: Entwicklung der Querkzugfestigkeit der MUF-Platten während der Lagerung über 72 Stunden. ....	96
Abbildung 76: Entwicklung der Dickenquellung nach 2 Stunden Wasserlagerung (nach DIN). ....	97
Abbildung 77: Entwicklung der Dickenquellung nach 24 Stunden Wasserlagerung (nach DIN). ....	97
Abbildung 78: Entwicklung des Gehalts an freiem Formaldehyd von MUF-Platten während der Stapellagerung.....	97
Abbildung 79: Entwicklung der Formaldehydemission von MUF-Platten während der Stapellagerung.....	97
Abbildung 80: Entwicklung des Biege-Elastizitätsmoduls der MUF-Platten während der 72-stündigen Stapellagerung.....	98
Abbildung 81: Entwicklung der Biegefestigkeit der MUF-Platten während der 72-stündigen Stapellagerung.....	98

Abbildung 82: Entwicklung der Querkzugfestigkeiten während einer 24-stündigen Lagerung der 17,5 mm Platten.....	99
Abbildung 83: Entwicklung der Querkzugfestigkeit und der Querkzugfestigkeit nach Kochprüfung während der Lagerung unmittelbar nach dem Verpressen der 20,5 mm Platten. ....	99
Abbildung 84: Entwicklung der Dickenquellung während einer 24-stündigen Lagerung der 17,5 mm Platten.....	100
Abbildung 85: Entwicklung der Dickenquellung während der Lagerung unmittelbar nach dem Verpressen der 20,5 mm Platten. ....	100
Abbildung 86: Entwicklung der Biegefestigkeit (MOR) und des Biege-Elastizitätsmoduls (MOE) während der Lagerung unmittelbar nach dem Verpressen der 20,5 mm Platten.	101
Abbildung 87: Änderung der Temperaturen in Stapeln aus PF-Platten in Abhängigkeit vom Zeitpunkt des Schleifens. ....	102
Abbildung 88: Änderung der Temperaturen in Stapeln aus PF-Platten an verschiedenen Messstellen.....	102
Abbildung 89: Temperaturverteilung nach 24-stündiger Stapellagerung einer PF-Platte bei einer Ausgangstemperatur der Mittelschicht von etwa 105°C.....	103
Abbildung 90: Entwicklung der Feuchteverteilung zwischen Deck- und Mittelschicht in der Mitte der Stapel.....	104
Abbildung 91: Entwicklung der Feuchteverteilung zwischen Deck- und Mittelschicht in den Randbereichen der Stapel.....	104
Abbildung 92: Entwicklung der Querkzugfestigkeit über eine Lagerdauer im Stapel bis zu 192 Stunden.....	106
Abbildung 93: Entwicklung der Querkzugfestigkeit über eine Lagerdauer im Stapel bis zu 192 Stunden, relative Darstellung.....	107
Abbildung 94: Entwicklung der Querkzugfestigkeit des Stapels (nach 48 Stunden geschliffen) in verschiedenen Positionen im Stapel, relative Darstellung. ....	107
Abbildung 95: Entwicklung der Querkzugfestigkeit nach Kochprüfung über eine Lagerdauer im Stapel bis zu 192 Stunden. ....	109
Abbildung 96: Entwicklung der Querkzugfestigkeit nach Kochprüfung über eine Lagerdauer im Stapel bis zu 192 Stunden, relative Darstellung. ....	110
Abbildung 97: Entwicklung der Dickenquellung in der Mitte der Stapel in Abhängigkeit vom Zeitpunkt des Scheifens. ....	111
Abbildung 98: Entwicklung der Dickenquellung in der Mitte des Großstapels und nach dem Schleifen im oberen Bereich der Stapel. ....	111
Abbildung 99: Entwicklung der Dickenquellung in den Außenbereichen der Stapel in Abhängigkeit vom Zeitpunkt des Scheifens.....	112
Abbildung 100: Entwicklung der Temperatur in der Mitte der Stapel. ....	113

<i>Abbildung 101: Entwicklung der Dickenquellung nach 2 Stunden (DIN) der PMDI-Platten während der Stapellagerung.....</i>	<i>114</i>
<i>Abbildung 102: Entwicklung der Dickenquellung nach 24 Stunden (DIN) der PMDI-Platten während der Stapellagerung.....</i>	<i>114</i>
<i>Abbildung 103: Entwicklung der Abhebefestigkeit der PMDI-Platten während der Stapellagerung.....</i>	<i>115</i>
<i>Abbildung 104: Entwicklung des Biege-Elastizitätsmoduls der PMDI-Platten während der Stapellagerung. ....</i>	<i>115</i>
<i>Abbildung 105: Entwicklung der Biegefestigkeit der PMDI-Platten während der Stapellagerung.....</i>	<i>115</i>
<i>Abbildung 106: Abnahme der Temperatur der MDF-Platten (nach zwei Wendern eingestapelt) während der Stapellagerung.....</i>	<i>116</i>
<i>Abbildung 107: Abnahme der Temperatur der MDF-Platten (nach drei Wendern eingestapelt) während der Stapellagerung.....</i>	<i>116</i>
<i>Abbildung 108: Entwicklung der Feuchte der MDF-Platten während der Stapellagerung. ...</i>	<i>116</i>

**11 Tabellenverzeichnis**

<i>Tabelle 1: Bestimmung des unlöslichen Anteils von Harnstoffharz in Holzspanplatten sowie Veränderung der Querkzugfestigkeit nach Wärmebehandlung (Ginzel 1973).</i>	16
<i>Tabelle 2: Parameter einer UF-Platte zwecks Hydrolyse.</i>	31
<i>Tabelle 3: Analytische Kenndaten des Standardharzes.</i>	34
<i>Tabelle 4: Analytische Kenndaten des Versuchsharzes.</i>	34
<i>Tabelle 5: Konstante Herstellparameter der UF-Platten.</i>	35
<i>Tabelle 6: Variierte Herstellparameter der UF-Platten.</i>	35
<i>Tabelle 7: Analytische Kenndaten des MUF- und MUPF-Harzes.</i>	35
<i>Tabelle 8: Konstante Herstellparameter der MUF- und MUPF-Platten.</i>	36
<i>Tabelle 9: Variierte Herstellparameter der MUF- und MUPF-Platten.</i>	36
<i>Tabelle 10: Analytische Kenndaten des PF-Deckschichtharzes.</i>	36
<i>Tabelle 11: Analytische Kenndaten des unmodifizierten PF-Mittelschichtharzes.</i>	36
<i>Tabelle 12: Analytische Kenndaten des modifizierten PF-Mittelschichtharzes.</i>	37
<i>Tabelle 13: Konstante Herstellparameter der PF-Platten.</i>	37
<i>Tabelle 14: Variierte Herstellparameter der PF-Platten.</i>	37
<i>Tabelle 15: Plattentemperaturen bei Entnahme aus dem simulierten Stapel.</i>	39
<i>Tabelle 16: Entnahmezeitpunkte der UF-Platten.</i>	40
<i>Tabelle 17: Entnahmezeitpunkte der MUF-, MUPF- und PF-Platten.</i>	43
<i>Tabelle 18: Prozentuale Änderung der Querkzugfestigkeit zwischen 0 und 72 Stunden Lagerzeit mit Angabe des Signifikanzniveaus.</i>	48
<i>Tabelle 19: Prozentuale Änderung der Abhebefestigkeit zwischen 0 und 72 Stunden Lagerzeit mit Angabe des Signifikanzniveaus.</i>	51
<i>Tabelle 20: Prozentuale Änderung des Formaldehydgehalts zwischen 0 und 72 Stunden Lagerzeit mit Angabe des Signifikanzniveaus.</i>	54
<i>Tabelle 21: Prozentuale Änderung der Dickenquellung zwischen 0 und 72 Stunden Lagerzeit mit Angabe des Signifikanzniveaus.</i>	58
<i>Tabelle 22: Variable Produktionsparameter der UF-Platten.</i>	80
<i>Tabelle 23: Variable Produktionsparameter der MUF-Platten.</i>	80
<i>Tabelle 24: Stapeltemperaturen der MUF-Stapel.</i>	95
<i>Tabelle 25: Momentaufnahme der Temperaturen bei verschiedenen Herstellungsbedingungen und an verschiedenen Positionen der Stapel jeweils 3 Tage nach dem Verpressen.</i>	103