

Untersuchung über die Eigenschaftsentwicklung von Holzwerkstoffplatten nach dem Heißpressen

DISSERTATION

zur Erlangung des Doktorgrades
an der Universität Hamburg
Fachbereich Biologie

vorgelegt von
Martin Ohlmeyer
aus Hamm (Westf.)

Hamburg 2002

Genehmigt vom
Fachbereich Biologie der
Universität Hamburg
auf Antrag von Herrn Professor Dr. A. Frühwald

Weitere Gutachter der Dissertation:
Herr Professor Dr. R. Marutzky

Tag der Disputation: 06. Februar 2002

Hamburg, den 23. Januar 2002



A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Udo Wienand'.

Professor Dr. U. Wienand
Dekan

Danksagung

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

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr. A. Frühwald für die Anleitung meiner Arbeit. Er gab mir wichtige Anregungen, die Unterstützung aber auch die Freiheit, das Themengebiet selbstständig zu erarbeiten.

Bei Herrn Prof. Dr. R. Marutzky möchte ich mich für die freundliche Übernahme des Koreferats bedanken.

Ich danke Herrn Dr. K. Kruse für die gute Zusammenarbeit. Seine ständige Diskussionsbereitschaft war sehr hilfreich bei der Projektierung und Durchführung der Arbeit.

Für die hervorragende Unterstützung bei der Durchführung der industriellen Untersuchungen möchte ich mich bei allen beteiligten Partnern bedanken. Mein besonderer Dank geht an Frau C. Beyer, Herrn R. Stracke und Herrn P. Beckert von der Firma Pfeleiderer, die Herren V. Gotsmann und G. Thielecke von der Firma Kronotex sowie an Dr. P. Wulzinger von der Firma Kunz.

Ich danke Herrn Dr. F. Wolf von der Firma BASF und Herrn Dr. M. Lattekamp von der Firma Bakelite für die Lieferung der Klebharze und die hilfreichen Diskussionen über die Fragen der Klebstofftechnologie.

Bedanken möchte ich mich auch bei den Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Instituts für Holzphysik sowie der Institute für Holzbiologie und Holzchemie, die mich durch zahlreiche anregende Diskussionen und Gespräche unterstützt haben.

Für ihre tatkräftige Mitarbeit im Rahmen ihrer Diplomarbeiten danke ich den Herren T. Eikmeyer und B. Rochet. Bei der Durchführung der praktischen Arbeiten haben mich die Frauen D. Bielenberg, K. Gembruch, M. Nesselrode und die Herren J. Hasener, J. Fischer und M. Hirschberg unterstützt. Ohne ihre Mithilfe wäre die Bewältigung der umfangreichen Untersuchungen nicht möglich gewesen. Vielen Dank!

1	Einleitung	1
2	Kenntnisstand und Problemstellung	3
2.1	Veränderungen an Spanplatten nach dem Heißpressen	3
2.1.1	Temperatur	3
2.1.2	Feuchte	8
2.1.3	Chemische Eigenschaften.....	11
2.1.4	Elastomechanische Eigenschaften	14
2.2	Zusammenfassende Bewertung der Literaturstudie	22
2.3	Zielsetzungen	23
3	Eigenschaftsänderung an frei auskühlenden MDF und Spanplatten	26
3.1	Zielsetzung und Fragestellungen	26
3.2	Material	26
3.2.1	Spanplatten	26
3.2.2	Faserplatten (MDF und HDF)	29
3.3	Methodik	29
3.3.1	Zerstörungsfreie Prüfungen	29
3.3.2	Zerstörende Prüfmethoden.....	33
3.4	Ergebnisse und Diskussion	34
3.4.1	Spanplatten	34
3.4.2	Faserplatten.....	49
3.5	Vergleich von Span- und Faserplatten	57
3.6	Zusammenfassung	60
4	Voruntersuchung zur Ermittlung der Randbedingungen bei der Stapellagerung	63
4.1	Zielsetzung und Fragestellung	63
4.2	Ermittlung der Randbedingungen	63
4.2.1	Material.....	63
4.2.2	Methoden	63
4.2.3	Temperatur im Plattenstapel.....	64
4.2.4	Feuchteverteilung im Plattenstapel	65
4.3	Stapelsimulation unter Laborbedingungen	65
4.4	Zusammenfassung	68
5	Eigenschaftsänderung von Holz unter Stapelbedingungen	69
5.1	Zielsetzung und Fragestellung	69
5.2	Material	69
5.3	Methodik	69
5.3.1	Versuchsablauf	69

5.3.2	Einstellung der Lagerbedingungen.....	70
5.3.3	Sorptionseigenschaften.....	72
5.3.4	pH-Wert und Pufferkapazität	73
5.3.5	Formaldehydemission.....	73
5.4	Ergebnisse und Diskussion	74
5.4.1	Sorption.....	74
5.4.2	pH-Werte und Pufferkapazität	75
5.4.3	Formaldehydemission.....	78
5.5	Zusammenfassung.....	79
6	Eigenschaftsänderung von Klebstoffen unter Stapelbedingungen	80
6.1	Zielsetzung und Fragestellung	80
6.2	Material.....	80
6.2.1	Holz.....	80
6.2.2	Klebstoffe.....	80
6.3	Methodik	81
6.3.1	Versuchsablauf.....	81
6.3.2	Zugscherfestigkeit.....	82
6.3.3	Zugscherfestigkeit nach Wasserlagerung	82
6.3.4	Formaldehydemission.....	83
6.3.5	Statistische Auswertung.....	83
6.4	Ergebnisse und Diskussion	84
6.4.1	UF-Harz.....	84
6.4.2	UFm-Harz	93
6.4.3	MUF-Harz.....	96
6.5	Zusammenfassung.....	98
7	Eigenschaftsänderung von stapelgelagerten Spanplatten im Labor.....	100
7.1	Zielsetzung und Fragestellung	100
7.2	Material.....	100
7.2.1	Spanmaterial	101
7.2.2	Klebharze.....	101
7.3	Methodik	106
7.3.1	Herstellung der Spanplatten.....	106
7.3.2	Lagerung	107
7.3.3	Probennahme	108
7.3.4	Prüfmethoden.....	108
7.3.5	Anpassungen für MUF-, MUPF- und PF-Platten	110

7.3.6	Statistische Auswertung.....	111
7.4	Ergebnisse und Diskussion	112
7.4.1	Temperatur und Feuchte	112
7.4.2	UF-Platten.....	114
7.4.3	MUF- und MUPF-Harze.....	127
7.4.4	PF-Harze	133
7.5	Zusammenfassung der Laboruntersuchungen.....	139
8	Eigenschaftsänderung von stapelgelagerten Span- und Faserplatten in der industriellen Produktion.....	141
8.1	Zielsetzungen und Fragestellungen	141
8.2	Material.....	143
8.2.1	UF-Spanplatten	143
8.2.2	MUF-Spanplatten	143
8.2.3	MUPF-Spanplatten.....	144
8.2.4	PF-Spanplatten.....	144
8.2.5	PMDI-Spanplatten.....	145
8.2.6	Faserplatten.....	145
8.3	Methodik	146
8.3.1	Probennahme	146
8.3.2	Prüfmethoden.....	149
8.3.3	Temperaturmessung.....	150
8.4	Ergebnisse und Diskussion	151
8.4.1	UF-Spanplatten	151
8.4.2	MUF-Spanplatten	159
8.4.3	MUPF-Spanplatten.....	163
8.4.4	PF-Spanplatten.....	166
8.4.5	PMDI-Spanplatten.....	178
8.4.6	Faserplatten.....	180
8.5	Zusammenfassung der Industrieuntersuchungen	182
9	Kostenabschätzung für die gezielte Nutzung der Stapellagerung	186
10	Diskussion der Ergebnisse und Bewertung.....	189
10.1	Temperatur.....	189
10.2	Feuchte.....	190
10.3	Querzugfestigkeit.....	191
10.4	Dickenquellung.....	193
10.5	Querzugfestigkeit nach Kochprüfung	194
10.6	Formaldehydemission.....	195

10.7	Konsequenzen für die industrielle Praxis	196
11	Zusammenfassung	199
12	Literatur.....	203
13	Anhang.....	214
13.1	Verteilung des Pressdruckes in Spanplatten.....	214
13.2	Daten	215
13.2.1	Geliezeiten.....	215
13.2.2	Wasserlöslichkeit von Aminoplast-Harzen.....	215
13.2.3	Nachreifung.....	216
13.2.4	Stapellagerung	217
14	Abbildungsverzeichnis	219
15	Tabellenverzeichnis.....	226
16	Abkürzungsverzeichnis	228

1 Einleitung

Holzwerkstoffe sind Produkte aus zerkleinertem Holz, das meist zu plattenförmigen Teilen wieder verbunden wird; dazu zählen vor allem: Spanplatten, Mitteldichte Faserplatten (MDF), Oriented Strand Board (OSB) und Sperrholz. Holzwerkstoffe sind vielseitig einsetzbar. Spanplatten sind zumeist im Möbel- oder Konstruktionsbereich (Decken und Wände) zu finden. Faserplatten werden als Möbel, als Trägerplatte für Laminatfußboden (HDF), Formteile oder im Innenausbau eingesetzt. Die Haupteinsatzbereiche für OSB sind Konstruktionen und industrielle Verpackungen.

Die Produktionsmenge von Holzwerkstoffplatten in Europa ist in den vergangenen vier Jahren um rund 30% gestiegen. Es werden derzeit in Europa etwa 51 Mio. m³ Holzwerkstoffplatten produziert, dabei entfielen im Jahr 2000 71% auf Spanplatten, 18% auf MDF und etwa 2% auf OSB. Bis zum Ende des Jahres 2002 wird zudem ein deutlicher Ausbau der OSB-Produktionskapazitäten auf etwa 3 Mio. m³ erwartet. Die in Deutschland hergestellten Spanplatten und

Europäische Jahresproduktion

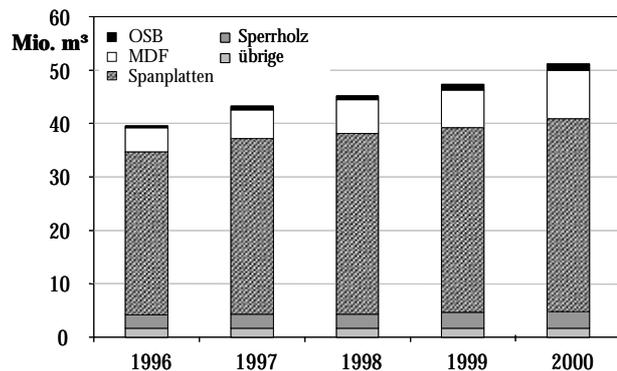


Abbildung 1: Produktion von Holzwerkstoffplatten in Europa (nach EPF 2001).

MDF machen etwa ein Drittel der in Europa produzierten Platten aus. In der Europäischen Holzwerkstoffindustrie finden derzeit etwa 77.000 Personen Beschäftigung (EPF 2001).

Die Herstellung von Holzwerkstoffplatten erfolgt durch Verpressung von beleimten Partikeln bei etwa 220°C bis 240°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.

Die Erzielung gewünschter Eigenschaften von Spanplatten wird zudem durch eine dreischichtige Streuung der Matten aus feinen Deckschichtspänen (DS) und gröberen 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 verdampft. 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 von Wasser und in tiefer liegenden Schichten 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 Gesamtfeuchte der Platte ist geringer als die der Matte 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 der 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 ausgehärtet. Von Bedeutung ist vor allem die noch nicht vollständige Aushärtung in der Mittelschicht.

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 etwa 70°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.

Handlungsanweisungen für das Plattenhandling nach dem Heißpressen beruhen auf Untersuchungen, die zum Teil weit über 30 Jahre zurückliegen. Seit dieser Zeit wurden die Leim- und Pressensysteme in starkem Maße weiterentwickelt. Daher wird in dieser Arbeit das Verhalten der Holzwerkstoffe nach der Presse unter aktuellen Gesichtspunkten der Prozesstechnologie und Leimtypen analysiert.

2 Kenntnisstand und Problemstellung

2.1 Veränderungen an 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.

2.1.1 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 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.

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

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

Dieser stoffbezogene Kennwert ist bedeutsam für die Beurteilung des Aufheiz- und Abkühlverhaltens von Holzwerkstoffplatten. Die Temperaturleitfähigkeit ist proportional zur Wärmeleitfähigkeit und umgekehrt proportional zur Wärmekapazität sowie zur Dichte. Die Temperaturleitfähigkeit ist abhängig von der Temperatur, der Materialfeuchte und der Dichte.

MacLean (1941) und Kollmann (1982) sind für Vollholz folgende Zusammenhänge zu entnehmen: Je niedriger die Dichte des Holzes, um so größer ist die Temperaturleitfähigkeit. Mit zunehmender Feuchte sinkt die Temperaturleitfähigkeit.

Von v.Haas (1998) wird ergänzt, dass die Temperaturleitfähigkeit von Bauspanplatten von der Dichte bis 500 kg/m^3 beeinflusst wird. Mit einer weiteren Zunahme der Rohdichte zeigt sich kein weiterer Einfluss auf die Temperaturleitfähigkeit. Kühlmann (1960) stellt den Einfluss der Temperatur und Feuchte auf die Temperaturleitfähigkeit differenziert dar: Die Temperaturleitfähigkeit sinkt bei einer Temperatur bis etwa 60°C mit zunehmender Feuchte. Bei einer Temperatur von über 80°C hingegen nimmt der a -Wert von Spanplatten mit ansteigender Feuchte zu.

Bei hoher Feuchte von etwa 20% steigt die Temperaturleitfähigkeit von Spanplatten oberhalb des Gefrierpunktes bei zunehmender Temperatur; bei niedriger Feuchte hingegen sinkt der a -Wert mit steigender Temperatur (Kühlmann 1960).

Nach Schmid (1976) gilt die Gleichung (2) für die Bestimmung der Temperaturleitfähigkeit unter Berücksichtigung der Holzfeuchte zwischen 0% bis 20%, der Temperatur zwischen 10°C bis 90°C und der Dichte. Auch aus dieser Berechnung, die für Vollholz gilt, wird ersichtlich, dass im Temperaturbereich über 60°C die Temperaturleitfähigkeit mit zunehmender Feuchte ansteigt.

$$a = \frac{\left(\frac{I_{0,0}}{1,163} + 0,000075 \cdot J \right) \cdot (1 + 1,2 \cdot u) \cdot (1 + 0,00084 \cdot u \cdot r_0)}{r_0 \cdot (u + 0,266 + 0,00166 \cdot J)} \quad (2)$$

wobei

a	Temperaturleitfähigkeit	m^2 / h
$\hat{U}_{0,0}$	Wärmeleitfähigkeit bei $u = 0\%$ und 0°C	$\text{W} / (\text{mEK})$
\hat{e}	Temperatur	$^\circ\text{C}$
\hat{a}_0	Dichte bei $u = 0\%$	g/cm^3
u	Feuchte	-

Aufgrund des unterschiedlichen Einflusses der thermischen Eigenschaften von Holz senkrecht und parallel zur Faser, ist die allgemeine Differentialgleichung nach Fourier für den dreidimensionalen Fall zu erweitern (Gleichung 3).

$$\frac{dJ}{dT} = a_{\parallel} \cdot \frac{d^2J}{dx^2} + a_{\perp} \cdot \left(\frac{d^2J}{dy^2} + \frac{d^2J}{dz^2} \right) \quad (3)$$

wobei

a_t	Temperaturleitfähigkeit parallel zur Faser	m ² / h
a_u	Temperaturleitfähigkeit senkrecht zur Faser	m ² / h
\hat{e}	Temperatur	°C
T	Zeit	h
x, y, z	Koordinaten	

Es ist festzuhalten, dass die fundamentalen Arbeiten lediglich die thermischen Eigenschaften des Vollholzes betrachten. Nur wenige Untersuchungen (v.a. Kühlmann 1960, v.Haas 1998) beschäftigten sich mit den Eigenschaften der Holzwerkstoffe. Für eine qualitative Abschätzung sind auch die Erkenntnisse aus dem Bereich des Vollholzes auf die Holzwerkstoffe anwendbar. Für eine exakte Beschreibung der Temperaturbedingungen in den Platten allerdings sind die Ergebnisse nur bedingt nutzbar, da vor allem der Klebstoffkomponente, der Span- bzw. Faserstruktur und der veränderten Anisotropie der Holzwerkstoffe nicht ausreichend Rechnung getragen wird.

2.1.1.1 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 mit freier Luftumspülung zu allen Seiten 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 v.Bismarck 1967, Kiosseff 1974).

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

Untersuchungen von Stegmann und v.Bismarck (1967) zeigen 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 in der Mitte der Platte bis wenige Minuten nach dem Verlassen der Presse zu verzeichnen. Dieses Verhalten kann aus den Ergebnissen 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 die Umgebungstemperatur erreicht. Die Temperaturen der Plattenoberflächen oder Deckschichten wurden nicht angegeben.

Arbeiten von Shukow et al. (1971) und Kiosseff (1971) beschreiben numerisch 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 kg/m³ bis 800 kg/m³ konnte bei Erhöhung der Luftgeschwindigkeit von 1 m/s auf 3 m/s halbiert werden. Eine Luftgeschwindigkeit von etwa 8 m/s kann unter den gegebenen Bedingungen als optimal angenommen werden, da mit einer weiteren Erhöhung keine nennenswerte Verringerung der Abkühlzeit erreicht werden kann. Die Ergebnisse zeigen auf, dass Platten mit einer höheren Dichte langsamer abkühlen, als Platten niedrigerer Dichte. Bei einer geringen Luftgeschwindigkeit ist Abkühlzeit von Platten der Dichte 800 kg/m³ nahezu doppelt so groß als von Platten mit einer Dichte von 500 kg/m³. Mit Zunahme der Luftgeschwindigkeit vermindert sich diese Verhältnis deutlich. Diese Untersuchungen resultieren in der Entwicklung von Konditionierungskammern, in denen Spanplatten nach dem Verpressen auf die gewünschte Temperatur mit Hilfe von gezielter Luftzirkulation in kurzer Zeit abgekühlt werden (Kiosseff 1974).

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

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 einhergehende Spannungen in der Platte entstehen. Probleme bereiten allerdings variierende Luftgeschwindigkeiten während der Abkühlung über der Plattenfläche, die zu einer unterschiedlichen Auskühlungsgeschwindigkeit führen. Dies wiederum kann zu einer variablen Feuchteverteilung und Spannungsverteilung innerhalb der Platte führen. Somit ist eine gleichmäßige Verteilung der Platteneigenschaften und Maßhaltigkeit der Platten nach dem Auftrennen nicht mehr gewährleistet.

Der Verlauf der Temperatur nach dem Verpressen während der Abkühlung wurde von Greubel (1989) berechnet. Er differenziert dabei mehrere Schichten einer 20 mm dicken Spanplatte. Angaben über die Dichte oder das Rohdichteprofil werden nicht gemacht. Es wurde zur Vereinfachung davon ausgegangen, dass die Temperatur über den gesamten Querschnitt einheitlich 100°C beträgt. Dennoch ist anhand dieses Modells deutlich die Abkühlung der unterschiedlichen Schichten innerhalb der Platten zu erkennen. Während die Temperatur der Mittelschicht noch etwa 75°C aufweist, ist die Temperatur der äußersten Deckschicht auf unter 50°C vermindert. Die Zeit für die vollständige Auskühlung beträgt etwa 90 Minuten.

Kruse (1997) beschreibt das Auskühlverhalten anhand von Laborspanplatten mit einer Dichtevariation von 400 bis 800 kg/m³ (Abbildung 2). Die Platten verlassen 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/m³ gleichen sich nach etwa 40 Minuten auf einem Niveau von 40°C einander an und kühlen innerhalb von weiteren 20 Minuten auf die Umgebungstemperatur an. Es wird erläutert, dass die Temperaturen der Deckschichten sehr schnell absinken und bereits nach wenigen Minuten die der Mittelschicht unterschreiten. Erkennbar ist auch hier ein deutlicher Einfluss der Rohdichte auf das Abkühlverhalten. Platten höherer Dichte kühlen merklich langsamer ab als Platten mit einer geringeren Dichte. Dies deckt sich mit den Erkenntnissen aus der Definition der Wärmeleitfähigkeit.

Temperatur der MS

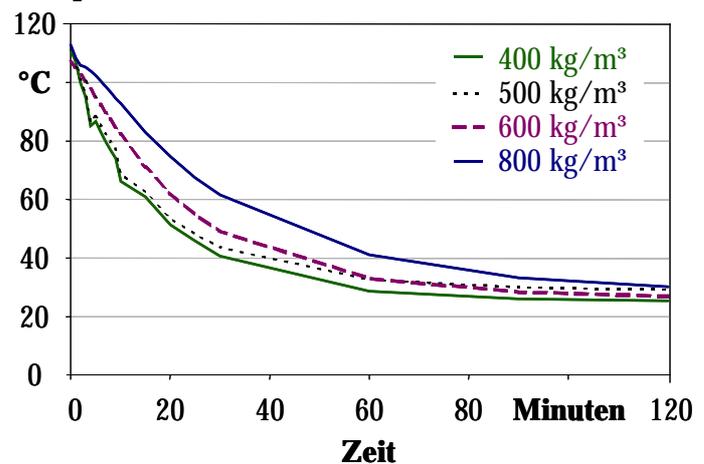


Abbildung 2: Änderung der Temperatur der Mittelschicht nach dem Heißpressen von Spanplatten unterschiedlicher Dichte (Kruse 1997).

Bei der 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 der Umgebungstemperatur wesentlich geringer als beim Abkühlen einer einzelnen Platte.

Berechnungen und experimentelle Untersuchungen legen Lu und Pizzi (1998) ihren Aussagen über das Auskühlverhalten zugrunde. Hierbei werden vier Messpunkte über den Querschnitt einer 14 mm-Spanplatte berücksichtigt. Die Dichte der untersuchten Platten liegt um 660 kg/m³. 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 Raumlufttemperaturen¹ angegeben, allerdings variieren zudem andere Parameter wie beispielsweise die Rohdichte und Presstemperaturen, so dass eine direkte Vergleichsmöglichkeit nicht gegeben ist.

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

2.1.1.2 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) stellen den Temperaturverlauf in Stapelmitte und am Stapelrand ausgehend von einer Plattentemperatur während der Einstapelung von 100°C dar. Am Rand des Stapels sinkt die Temperatur der 19 mm-Platten nach etwa drei Tagen auf 65°C ab. In der Stapelmitte hingegen kann die Temperatur nach 14 Tagen noch 60 bis 70°C betragen. Über die Größe des Stapels sind der Publikation keine Informationen zu entnehmen.

Der Temperaturverlauf in der Plattenmitte von stapelgelagerten Spanplatten wurden von Shukow und Michailow (1970) sowie Kiosseff (1971) beschrieben. Die Autoren verfolgen den Temperaturverlauf von Spanplatten, die in der Mitte, im Außenbereich und in den Zwischenlagen des Stapels gelagert werden, über einen Zeitraum von fünf Tagen. Ausgehend von einer Temperatur um 105°C sinken die Plattentemperaturen in dem Außenbereich und in den Zwischenlagen innerhalb von 24 Stunden bereits auf etwa 70°C ab. Die Temperatur in der Mitte des Stapels liegt nach dem selben Zeitraum bei 85°C. Nach 48 Stunden liegen die Temperaturen zwischen 40 bis 60°C und nach nahezu vier Tagen haben 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 über die Fläche und über den Querschnitt gleichmäßig erfolgen, damit keine Temperaturunterschiede und damit einhergehende Spannungen in der Platte entstehen. Die Platten sollen auf 70°C abgekühlt werden, um der Hydrolyse des Harnstoffharzes vorzubeugen. Eine schnelle Abkühlung der Platten wird im industriellen Produktionsprozess mit Hilfe von Kühlkanälen oder Konditionierungskammern (Kiosseff 1974) oder durch Sternwender erreicht. Die möglichen damit einhergehenden Probleme wurden bereits oben erläutert.

2.1.2 Feuchte

Nach dem Verpressen liegt eine Feuchteverteilung senkrecht zur Plattenoberfläche vor, die im besonderen Maß von der Feuchte der Matte vor dem Heißpressen und der Presszeit abhängig ist. Nach Bolton et al. (1989a) erreicht die Feuchte einer Platte ausgehend von einer homogenen Feuchte um 16% vor dem Verpressen in der Deckschicht einen Wert um 3% während die Feuchte in der Mittelschicht auf etwa 18% ansteigt (Abbildung 3).

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. Als Folge kommt es zu kleineren Dickendifferenzen und zu Schubspannungen in Plattenebene, die bei Asymmetrie zum Verwerfen führen kann (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.

Nach Kehr und Grabitzki (1965) schwankt das Feuchteprofil dabei 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 schon vor dem Heißpressen vorliegen. Nach Kehr und Grabitzki (1965) kommt es selbst bei langen Lagerzeiten zu keinem vollständigen Ausgleich. In Versuchen wurde der Feuchteausgleich von frei abkühlenden und von gestapelten 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). Greubel (1989) stellte einen berechneten Verlauf der Feuchteänderungen senkrecht zur Plattenoberfläche abkühlender Spanplatten über eine Zeitspanne von 5 Stunden vor (Abbildung 4), der weitgehend mit den Ergebnissen von Kehr und Grabitzki (1965) übereinstimmt. Jedoch sind nach Greubel (1989) insbesondere in der ersten halben Stunde nach dem Verpressen deutlichere Änderungen des Feuchteprofils zu beobachten: Die äußersten Deckschichten (A) weisen unmittelbar nach dem Heißpressen eine geringere Feuchte auf als die Zwischenschichten (B-D) und die Mittelschicht der Platte (E). Während der Abkühlung der Platten nimmt die Feuchte der Deck- und Zwischenschichten (A-D) in unterschiedlicher Größenordnung zu und die Feuchte der Mittelschicht (E) sinkt ab. Die unterschiedliche Ausprägung der Feuchtezunahme liegt darin begründet, dass die Zwischenschichten lediglich die Feuchte aufnehmen können, die durch den Konzentrationsausgleich mit den benachbarten Schichten zur Verfügung steht. Von der Deckschicht (A) jedoch wird zusätzlich Feuchte aus dem umgebenden Raumluft aufgenommen.

Feuchte

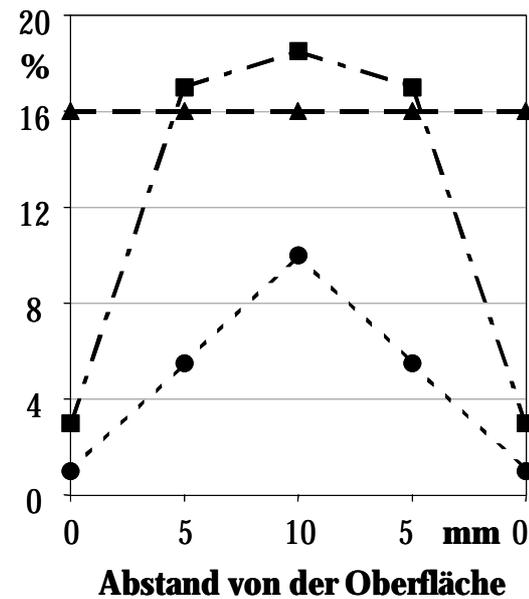


Abbildung 3: Variation der beobachteten Feuchte einer 20 mm dicken Laborplatte (650 kg/m^3).
 ▲ : Beginn – Presse;
 ■ : Beginn – Periode konstanter Temperaturen in der Mittelschicht;
 ● : Beginn des nachfolgenden, allmählichen Temperaturanstiegs (Bolton et al. 1989a)

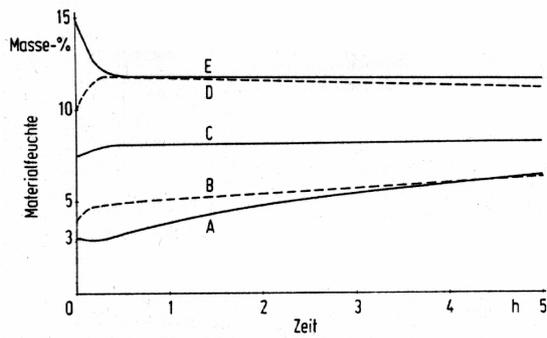


Abbildung 4: Berechneter Verlauf der Materialfeuchte nach dem Pressen während der Abkühlung (Greubel 1989).

Die Positionen haben den folgenden Abstand zur Oberfläche einer 20 mm dicken Spanplatte

- A: 1 mm
- B: 2 mm
- C: 4 mm
- D: 7 mm
- E: 10 mm

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. Platten mit einer Dicke von 8 mm und 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 einer Untersuchung von Kehr und Grabitzki (1965) wird die Feuchteänderung der Deck- und Mittelschicht von Spanplatten über einen mehrtägigen Lagerzeitraum betrachtet. Eine Änderung der Gesamtfeuchte während der Stapellagerung ist nicht zu verzeichnen. Die Deckschichten nehmen zwischen dem Zeitpunkt sofort 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 verliert. 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 (etwa 14 Tage) bleibt eine Feuchtedifferenz von 1% bis 2% zwischen Deck- und Mittelschicht bei einer mittleren Feuchte der Platte um 10%.

Nachteilig wirken sich bei der Stapellagerung 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 unerwünschten 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.

2.1.3 Chemische Eigenschaften

2.1.3.1 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 (Römpp 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 wenig 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).

2.1.3.2 Holz

Unter den Bedingungen, bei denen Spanplatten eingestapelt werden, finden nicht nur Änderungen in der Struktur des Klebstoffes statt. Gleichzeitig kann es auch zu Veränderungen des Holzmaterials kommen.

Sorption des Holzes

Durch das Erwärmen kann eine Veränderung der Sorptionseigenschaften von Holz erreicht werden. Kollmann und Schneider (1963) berichten von einer Sorptionsvergütung ab Temperaturen von 70°C. Mit zunehmender Temperatur und Einwirkungsdauer wird die Gleichgewichtsfeuchte bei einem definiertem Klima stärker herabgesetzt. Die Autoren machen für diesen Effekt den Abbau von Hemicellulosen und Cellulose verantwortlich. Bei Temperaturbehandlungen von Kiefern- und Buchenholz ab 175°C kommt es daher zu einer merklichen Masseabnahme (Buro 1955).

Aus der Änderung der Sorptionseigenschaften folgt in der Regel ein verändertes Quellungsverhalten des Holzes. Mantanis et al. (1994, 1995) stellten den Zusammenhang zwischen dem maximalen Quellmaß von Holz und dem von Cellulose in verschiedenen organischen Lösungsmitteln auf. Daraus wurde geschlossen, dass der Hauptanteil für die Quellung von der Cellulose getragen wird.

Aus Untersuchungen von Fengel (1966) geht hervor, dass der Abbau von Hemicellulosen bei einer thermischen Behandlung von 24 Stunden an Fichte bei Temperaturen über 130°C und von Cellulose bei Temperaturen über 120°C einsetzt. Ergebnisse von Kürschner und Melcerová (1965) an Buchenholz zeigen jedoch, dass der Anteil an Holocellulose nach 14-tägiger Lagerung bei bereits 80°C um 3,5% sinken kann. Der Anteil des Lignins steigt bei Temperaturen unter 100°C merklich an und sinkt deutlich nach mehrtägiger Behandlung über 100°C. Nach Burmester (1974) führt allein der Abbau von Hemicellulosen und Cellulose nicht zu einer Dimensionstabilisierung. Nach der Meinung des Autors kann es erst durch die Bildung neuer Bindungen zwischen den Molekülen (v.a. Halbacetale) zu einer Verminderung von Quellung und Schwindung kommen. Ab einer Temperatur von 110°C nimmt mit zunehmender Behandlungsdauer und -temperatur unter Druck die feuchtebedingte Verformung von Holz zu; diese erreicht dabei bereits nach etwa 12 Stunden ihr Maximum (Burmester 1973).

Die Verminderung der Quellung kann im allgemeinen auf eine Zunahme von Quervernetzungen und der Umwandlung der chemischen Zusammensetzung des Holzes zurückgeführt werden (Jämsä und Viitaniemi 2000, Tjeerdsma et al. 1998).

Acidität des Holzes

Die Acidität beschreibt den Anteil an Säuren, die frei und gebunden im Holz vorkommen können. Als Maß für die Acidität des Holzes kann der pH-Wert und die Pufferkapazität der Kalt- oder Heißwasserextrakte angegeben werden (Roffael 1989). Im Holz können folgende flüchtige Säuren die Acidität bestimmen: Ameisen-, Essig- und Propionsäure (Runkel und Wilke 1951).

Daneben wurden auch Butter-, Oxal- und Milchsäure im Holz nachgewiesen (Sandermann et al. 1970).

Schäfer (1996) hat einen umfassenden Überblick über den Kenntnisstand der Einflussfaktoren auf die Acidität des Holzes aufgestellt. Demnach wird die Holzacidität von der Holzart und von nahezu allen biologischen Faktoren des Holzwachstums beeinflusst. Nach Untersuchungen von Choon und Roffael (1990) kann durch den Einfluss höherer Temperaturen die Säureabspaltung erhöht werden. Je höher die Temperatur und je länger diese auf das Holz einwirkt, desto stärker werden Säuren freigesetzt. Die Säuren werden aus den Acetylgruppen der Hemicellulosen abgespalten. Die Freisetzung der Säuren katalysiert wiederum die Spaltung von Polysacchariden des Holzes, dies kann zu einer Verminderung des Polymerisationsgrades der Komponenten sowie zur Bildung von Formaldehyd führen (Tjeerdsma et al. 1998).

Verfärbung des Holzes

Eine Verfärbung setzt bei Nadelholz ab Temperaturen um 60°C und bei Laubhölzern ab 90°C ein (Kollmann et al. 1951). Nach Untersuchungen der Autoren hat die Feuchte dabei einen deutlich größeren Einfluss als die Temperatur. Der Verfärbung liegen chemische Veränderungen der Holzkomponenten zugrunde. Hemicellulosen werden aufgrund der Temperaturbedingungen hydrolytisch abgebaut und die Spaltprodukte gehen dann Reaktionen mit Stickstoffverbindungen ein, die letztendlich zu Farbveränderungen im Holz führen (Kollmann et al. 1951, Wegener und Fengel 1988). Während der technischen Holz Trocknung verfärben sich Laubhölzer stärker als Nadelhölzer, da die Laubhölzer einen höheren Anteil an Hemicellulosen aufweisen (Koch et al. 2000). Bei Laubhölzern kann auch eine Oxidation bestimmter Komponenten, v.a. der phenolischen Holzinhaltstoffe, zu Verfärbungen führen (Kollmann et al. 1951).

Nach Roux und Gilles (1971) trägt die Hydrolyse des Holzes zur Verschlechterung von Platteneigenschaften in hohem Feuchtebereich insbesondere für besonders säurehaltigen Holzarten bei. Die Verfärbung von Platten, die sich während einer Lagerung im Stapel einstellen kann, wird von Roux und Gilles (1971) auf eine Hydrolyse der Cellulose zurückgeführt. Diese Verfärbungen treten bei längerer Lagerung unter erhöhter Temperatur auf. Ginzel (1973) legt 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 würden primär akzessorische Bestandteile des Holzes verfärbt.

2.1.4 Elastomechanische Eigenschaften

2.1.4.1 Änderung der Eigenschaften von Platten bei freier Luftumspülung

Die Festigkeiten der Holzwerkstoffplatten sind nach dem Verlassen der Heißpresse noch nicht vollständig ausgeprägt. Shukow und Michailow (1970) sowie Kiosseff (1971) berichten über eine Zunahme der Biegefestigkeit um 30% innerhalb von 48 Stunden. Während dieser Zeit nimmt der

Biege-E-Modul degressiv zu (vgl. 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.

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 Produktionsgeschwindigkeit limitierende Größe. In älteren Untersuchungen wurde für harnstoffharzverleimte Spanplatten keine oder nur eine sehr geringe Zunahme der Querkzugfestigkeit nach dem Heißpressen beobachtet (Plath 1963, Stegmann und v.Bismarck 1967, Kiosseff 1971).

Ohlmeyer (1997) hat die Eigenschaftsentwicklung von frei auskühlenden Laborspanplatten unmittelbar nach dem Heißpressen untersucht. Es wurden die Biegeeigenschaften, Scherfestigkeit sowie die Schallgeschwindigkeit senkrecht zur Plattenebene betrachtet. Die Messungen ergaben, dass die Eigenschaften der Platten mit Dichten zwischen 500 und 800 kg/m³ unmittelbar nach dem Pressen lediglich zu 70% bis 80% ausgeprägt waren. Im Zuge der Abkühlung innerhalb von 2 Stunden kam es zu einer degressiven Zunahme der Eigenschaften.

2.1.4.2 Änderung der Eigenschaften stapelgelagerter Platten

2.1.4.2.1 Querkzugfestigkeit

Harnstoff-Formaldehyd-Harz

Unter Lagerbedingungen mit hoher Temperatur und Feuchte kommt es bei Harnstoff-Formaldehyd-Harz-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 Schwindspannungen des Spanverbundes bei Änderungen der Feuchte zurückgeführt.

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 Querkzugfestigkeit um etwa 40% innerhalb von vier Tagen Lagerzeit. In den Untersuchungen wurden aus 19 mm starken Spanplatten Stapel aus 13 bis 15 Platten gebildet. Der untersuchte Stapel ist somit kleiner als die in der Industrie heute üblichen Stapel. Die stärksten Verluste der Festigkeit sind an den Platten aus der Mitte des Stapels zu erkennen. Die Platten aus den äußeren Bereichen des Stapels zeigen eine geringere Abnahme der Querkzugfestigkeit.

Hohe Feuchtigkeit, hohe Temperaturen und ein saures Milieu wirken beschleunigend auf die Hydrolyse des Klebharzes. 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 Zugscherversuchen 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 Wärmeschrank auf 100°C erhitzt und dann abgekühlt wurden. Die Abkühlung wurde stufenweise in Anlehnung an eine in der Industrie in einem Spanplattenstapel gemessenen Abkühlungskurve nachvollzogen.

Tabelle 1: Bestimmung des unlöslichen Anteils von Harnstoffharz nach einer Wasserbehandlung bei 60°C in Holzspanplatten sowie Veränderung der Querkzugfestigkeit nach Wärmebehandlung (nach Ginzel 1973).

Plattenart	Feuchte	Unlösliche Harzanteile (%) nach 1 h in 60°C Wasser		Verlust an Querkzugfestigkeit
		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 ist auf eine hydrolytische Zersetzung des UF-Harzes zurückzuführen, die neben der Temperatur auch von der Ausgangsfeuchte der eingestapelten Platten abhängt (Ginzel 1973). Die Untersuchungen zeigen, dass bei den eingestapelten Platten die Querkzugfestigkeit abnimmt (Abbildung 5).

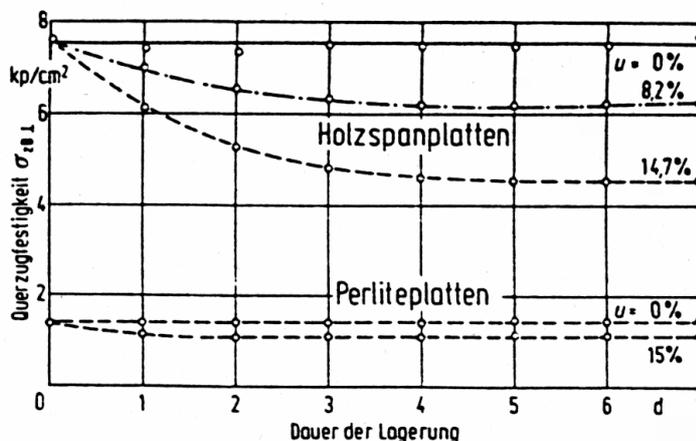


Abbildung 5: Entwicklung der Querkzugfestigkeit von harnstoffharzgebundenen Holzspanplatten und Perliteplatten bei unterschiedlichen Temperaturen und Feuchten (Ginzel 1973).

Den Rückgang der Querkzugfestigkeit führt Ginzel (1973) allerdings nicht ausschließlich auf die Hydrolyse zurück, sondern zu einem erheblichen Teil auch auf die Quell- und Schwindbewegungen innerhalb des Spanverbundes. Diesen Bewegungen kann das in auskondensiertem Zustand sehr spröde Harnstoffharz nicht folgen. Auf diesem Weg entstehen Brüche innerhalb des Span-Leim-Verbundes. Die daraus resultierende verschlechterte Verleimungsqualität wirkt sich ebenfalls negativ auf die Querkzugfestigkeit aus.

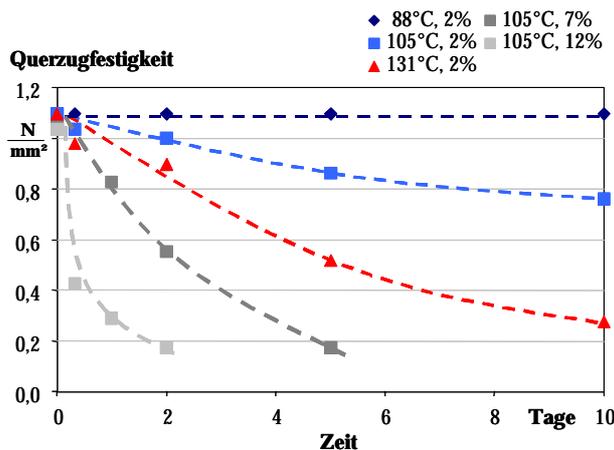


Abbildung 6: Abnahme der Querkzugfestigkeit während mehrtägiger Stapellagerung in Abhängigkeit von der Temperatur und der Feuchte (nach Robitschek und Christensen 1976).

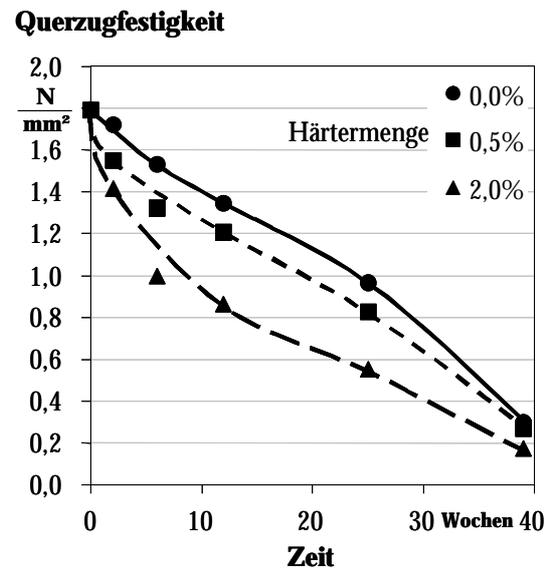


Abbildung 7: Abnahme der Querkzugfestigkeit während mehrwöchiger Stapellagerung in Abhängigkeit von der Härtermenge (nach Robitschek und Christensen 1976).

Untersuchungen von Robitschek und Christensen (1976) stellen den Zusammenhang zwischen Abnahme der Querkzugfestigkeit und den Lagerbedingungen dar. Bei Temperaturen oberhalb von 105°C nimmt die Verklebungsfestigkeit während einer mehrtägigen Stapellagerung merklich ab. Je höher die Temperatur und je höher die Feuchte desto rascher erfolgt die Abnahme der Querkzugfestigkeit (Abbildung 6). Es liegt auch ein Einfluss der Härtermenge vor, der sich allerdings in der Veränderung der Festigkeit bei gleicher Lagerdauer nicht so stark widerspiegelt wie die vorgenannten Faktoren. Je höher die Härtermenge, umso größer und umso schneller ist die Festigkeitsabnahme bei Lagerbedingungen von 65°C und 70 rel. Luftfeuchte. Der Zeitraum, bis die Querkzugfestigkeit der Platten von der Anfangsfestigkeit (ca. 1,7 N/mm²) auf etwa 0,2 N/mm² abgesunken ist, erstreckt sich über etwa 40 Wochen (Abbildung 7).

Melamin-Harnstoff-Formaldehyd-Harz

In orientierenden Untersuchungen haben Zhao und Pizzi (2000) gezeigt, dass die Querkzugfestigkeit für MUF-verleimte Platten durch eine Temperatur-Nachbehandlung in einem Ofen bei 90°C bzw. 100°C für 30 Minuten über 20% gesteigert werden kann. Mit Hilfe der Thermo-Mechanischen Analyse haben die Autoren optimale Nachhärtungsbedingungen

hinsichtlich der Temperatur und der Einwirkungsdauer erarbeitet. Allerdings waren die Aushärtungszeiten der Klebfugen mit 6 bis 10 Minuten sehr lang angesetzt. Zudem wurden die Proben zwischen der Aushärtung und der Nachtemperung auf Umgebungstemperatur abgekühlt. Dies entspricht nicht den Bedingungen, wie sie in Spanplatten während des Verpressens und der Lagerung realistisch sind.

Phenol-Formaldehyd-Harz

Nach May (1979) ist bei PF-Harz-verleimten Platten allein durch eine Lagerung bei mindestens 100°C Plattentemperatur eine Erhöhung der Querzugfestigkeit zu erreichen, da das PF-Harz oberhalb von 100°C weiter auskondensiert. Auch Lambert und Pungs (1978) ermittelten eine Zunahme der Querzugfestigkeit 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.

2.1.4.2.2 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.

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 den unterschiedlichsten 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.

2.1.4.2.3 Dickenquellung

Das Maß der Dickenquellung nach 2h erlaubt eine Beurteilung des kurzfristigen Feuchtigeschutzes durch das Hydrophobierungsmittel (Amthor 1972). Die Ermittlung der Quellung nach 24h dient der Beurteilung der Feuchtebeständigkeit von Spanplatten. Im Rahmen der Produktionsüberwachung werden in der Regel beide Werte ermittelt. Während der Prüfung wird durch den Quellungsdruck der Späne die Verbindung zwischen Spänen und Klebstoff einer Belastung ausgesetzt. Je höher die Qualität der Verklebung ist, umso geringer ist die Minderung der Klebfugenfestigkeit durch diese Belastung. Dies kann zu einer geringeren Dickenquellung der gesamten Holz-Klebstoff-Matrix führen.

Harnstoff-Formaldehyd-Harz

Im Schrifttum beschäftigen sich nur wenige Arbeiten mit dem direkten Zusammenhang zwischen den Quellwerten von Holzwerkstoffen und den Nachreifungsbedingungen. Nach Kehr und Grabitzki (1965) können Spannungen in den Platten durch die Temperatureinwirkung abgebaut werden. Spannungen, die durch das Verpressen des Spanmaterials aufgebaut werden, wirken sich senkrecht zur Plattenebene in Form einer höheren Dickenquellung nach Wasserlagerung aus. In der Plattenebene können 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 ist eine Abnahme der Wasserabsorption zu verzeichnen. Zur Verminderung der Dickenquellung ist nach Albrecht (1968) die warme Einstapelung von Spanplatten bedeutsamer als die 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 kommt zu dem Schluss, dass die Dickenquellung um so größer ist je mehr Spannungen in der Spanplatte durch das Verpressen eingeschlossen werden. Im Holz kommt es mit der Zeit in Abhängigkeit von der Temperatur und Feuchte zu einem Spannungsabbau (Becker und Reiter 1970). Dieser Spannungsabbau kann zu Abnahme der Dickenquellung führen (Neußer und Schall 1970).

Lu und Pizzi (1998) konnten durch eine kurzzeitige Temperatureinwirkung von 100°C nach dem Pressen eine Abnahme der Dickenquellung von 22,5% auf etwa 19,0% nachweisen.

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) berichten über eine Abnahme der Dickenquellung um 10 – 20% bei heißer Einstapelung von Spanplatten und anschließender Lagerdauer im Stapel von 6 Tagen.

Nach Roffael et al. (1973b) kann die Dickenquellung (nach 24-stündiger Wasserlagerung) bei einer Lagertemperatur von 150°C über eine Dauer von 2 Stunden bei Platten mit einer Dichte um 600 kg/m³ von 18% auf nahezu 10% reduziert werden. Bei PF-verleimten Platten mit einer Dichte von etwa 750 kg/m³ wurden die Quellwerte während einer dreistündigen Lagerung bei 150°C von 30% auf etwa 24% reduziert (Roffael et al. 1973a).

2.1.4.2.4 Biegeeigenschaften

Harnstoff-Formaldehyd-Harz

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

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

Untersuchungen von Lu und Pizzi (1998) zeigen, dass der Biegeelastizitätsmodul unabhängig von der Lagertemperatur (zwischen 60 und 100°C) innerhalb von 15 Minuten um 25% ansteigt. Änderungen der Biegefestigkeit sind bei höheren Temperaturen nicht signifikant. Bei einer Lagertemperatur von 60°C wird 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 führt zu einer deutlichen Erhöhung der Biegefestigkeit. Der Einfluss einer mehr oder weniger starken Abkühlung ist bei dem Biege-E-Modul uneinheitlich und von geringer Bedeutung.

2.1.4.3 Elastische Eigenschaften und Festigkeitseigenschaften des Holzes

Nach Schneider (1971) werden die Festigkeitseigenschaften durch thermische Behandlung erst ab Temperaturen um 150°C beeinflusst. Burmester (1973) wies nach, dass die Druckfestigkeit und

die Härte von Eiche, Buche und Kiefer nach Behandlungen ab 145°C ansteigt. Unter gleichen Bedingungen kann die Biegefestigkeit und insbesondere die Bruchschlagarbeit der untersuchten Hölzer deutlich abnehmen. Giebler (1986) geht von einer Abnahme der Festigkeitseigenschaften von 30 bis 50% bei thermisch behandeltem Holz aus. Die negative Beeinflussung der Holzfestigkeit ist in starkem Maße von der Art der Behandlung und von der Temperatur abhängig. Nach Untersuchungen von Ginzel (1973) ist unter den Bedingungen, denen das Holz während industriell üblicher Stapelbedingungen ausgesetzt ist, von keiner Verminderung der Festigkeitseigenschaften auszugehen.

Der E-Modul, die Druckfestigkeit und die Härte des Holzes können nach thermischer Behandlung selbst bei hohen Temperaturen weitgehend unverändert bleiben oder zum Teil sogar erhöht werden (Leithoff und Peek 1998, Syrjänen et al. 2000). Allerdings sind diese Eigenschaften deutlich von der Prozessführung der thermischen Behandlung abhängig.

Rheologie des Holzes

Die Rheologie beschreibt das Spannungs- und Verformungsverhalten von Stoffen in Abhängigkeit von der Belastungszeit. Es wird zwischen der Retardation und der Relaxation unterschieden. Unter Retardation (auch: Kriechen) wird Zunahme der Verformung bei gleich bleibender Belastung in Abhängigkeit von der Zeit verstanden. Unter Relaxation ist die zeitabhängige Abnahme von Spannungen bei konstanter Verformung zu verstehen. Die Ursachen und die Einflüsse von verschiedenen äußeren Einflüssen auf die Retardation und Relaxation sind weitgehend gleich.

Die rheologischen Eigenschaften des Holzes werden neben der Struktur des Werkstoffes im besonderen Maß durch die Temperatur- und Luftfeuchtebedingungen beeinflusst (Gressel 1971). So ist beispielsweise die Relaxation bei MDF größer als bei Spanplatten (Martensson und Thelandersson 1990). Je höher die Luftfeuchte, der ein Holzprodukt unter Belastung ausgesetzt ist, umso stärker ist die Spannungsrelaxation. Die Temperatur wirkt ab etwa 50°C in die gleiche Richtung. Dabei kann sich die Temperaturerhöhung bei verschiedenen Holzfeuchten stärker auswirken als die Feuchteerhöhung bei konstanter Temperatur (Gressel 1971).

Nach Untersuchungen von Kelley et al. (1987) beträgt die Glas-Übergangstemperatur von Lignin und Hemicellulosen im darrtrockenen Zustand etwa 200°C. Mit zunehmender Feuchte sinkt die Übergangstemperatur deutlich ab. Bei einer Feuchte von 6% beträgt die Glas-Übergangstemperatur von Lignin etwa 110°C und von Hemicellulosen rund 75°C sowie bei 12% 75°C (Lignin) bzw. 25°C (Hemicellulosen). Dies hat zur Folge, dass diese Komponenten des Holzes mit höherer Feuchte bei deutlich geringerer Temperatur plastifiziert werden können.

2.2 Zusammenfassende Bewertung der Literaturstudie

- ✓ Die Plattentemperatur im Stapel nimmt in Abhängigkeit von der Einstapeltemperatur und der Stapelgröße recht langsam ab. Hohe Temperaturen können auf diese Weise über einen Zeitraum von einer Woche und länger auf die Platten einwirken. Die Temperatur hat einen wichtigen Einfluss auf die Entwicklung der Platteneigenschaften.
- ✓ Während der Stapellagerung ändert sich die Gesamtfeuchte der Platte nicht nennenswert. Die Feuchte 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. Über die Geschwindigkeit des Feuchteausgleichs und die Einflussmöglichkeiten darauf werden im Schrifttum keine hinreichenden Angaben gemacht.
- ✓ Im allgemeinen ist anzunehmen, dass die Festigkeitseigenschaften der harnstoffharzverleimten Platten während einer Stapellagerung bei erhöhten Temperaturen vermindert werden. Dies ist im Wesentlichen auf hydrolytische Spaltung des Klebharzes zurückzuführen, die bei hohen Temperaturen einsetzt. Die Hydrolyse wird verstärkt durch hohe Feuchte, mit der Lagerdauer und stärkerer Acidität. Aus diesem Grund werden UF-verleimte Platten vor dem Einstapeln auf eine Temperatur von 60 bis 70°C abgekühlt. Untersuchungen an modernen "E1"-Harnstoffharzen deuten darauf hin, dass bei diesen Klebstoffen eine Verbesserung der Platteneigenschaften durch eine gezielte Stapellagerung erreicht werden kann: Es war Lu und Pizzi (1998) möglich, sowohl die Querkzugfestigkeit als auch die Dickenquellung von Spanplatten zu verbessern.
- ✓ Phenolharzverleimte Spanplatten werden mit hoher Temperatur eingestapelt, um eine weitere Vernetzung des Harzes nach dem Verpressen der Platte zu erreichen, um so die Festigkeitswerte ohne hohen wirtschaftlichen Aufwand zu erhöhen. Die Werte der Dickenquellung werden für PF-verleimte Platten durch eine Lagerung im Stapel deutlich vermindert. Es gibt keine hinreichenden Untersuchungen über das Verhalten von modifizierten PF-Harzen während der Stapellagerung.
- ✓ Die Produktionstechnologie hat sich in den letzten drei Jahrzehnten stark verändert. Als Beispiel sind die Entwicklung und der Einsatz von kontinuierlichen Pressensystemen zu nennen, mit deren Hilfe deutlich höhere Produktionsgeschwindigkeiten erreicht werden können.² Mit kürzeren Presszeiten ändert sich gleichzeitig der Zustand der Platte nach dem Verpressen, somit ist auch ein verändertes Nachreifungsverhalten während der Stapellagerung zu erwarten.

² In den frühen Tagen der Spanplattenproduktion wurden UF-Platten mit einem Presszeitfaktor von etwa 24 s/mm mit einer Pressplattentemperatur von 140 bis 160°C in Ein- oder Mehretagenpressen verpresst (Allan und Polovseff 1961a). In modernen kontinuierlichen Heißpressen werden UF-Platten mit etwa 4 s/mm bei 220°C hergestellt.

- ✓ In der heutigen Zeit werden Leimsysteme mit einer anderen Zusammensetzung eingesetzt. Das Molverhältnis der Harnstoff-Formaldehydharze ist deutlich vermindert worden³; es werden strengere Anforderungen an die Formaldehydemissionen gestellt. Für spezielle Plattentypen werden Melamin-Anteile den Harnstoffharzen zugegeben und auch die Phenol-Formaldehydharze wurden weiterentwickelt, um eine schnellere Aushärtung in der Presse zu erreichen.
- ✓ Hinsichtlich des Verhaltens nach dem Pressvorgang liegen derzeit über MUF-verleimte Platten nur begrenzt und über MUPF-Harze keine wissenschaftliche Untersuchungen vor.
- ✓ Es gibt nur wenige Erkenntnisse darüber, welchen Einfluss verschiedene Prozessparameter (z.B. Mattenfeuchte, Härtermenge, Presszeit) auf die Entwicklung der Platteneigenschaften während der Stapellagerung haben.

2.3 Zielsetzungen

Problem- und Fragestellungen

Es ist bekannt, dass sich die Platteneigenschaften während der Abkühlung nach dem Verpressen ändern. Vor der Prüfung zur Qualitätsüberwachung werden Holzwerkstoff-Platten in der industriellen Produktion für etwa 2 Stunden abgekühlt, um vertrauenswürdige Prüfwerte zu erhalten. Um die Eigenschaftswerte zeitnah zum Produktionszeitpunkt zu erhalten, ist es vorteilhaft diese Zeit verkürzen. Zu diesem Zweck müssen die folgenden Fragestellungen beantwortet werden:

- ✓ In welcher Größenordnung nehmen die mechanischen Eigenschaften industriell gefertigter Span- und Faserplatten (Leimsysteme: UF, MUF und PF) unmittelbar nach dem Verlassen der Heißpresse bei sofortiger Abkühlung auf die Umgebungstemperatur zu?
- ✓ Kann die Eigenschaftsveränderung von industriell gefertigten Platten mit Hilfe der Temperatur bzw. der Abkühlgeschwindigkeit mathematisch-statistisch beschrieben werden?

Zur Untersuchung der Eigenschaftsentwicklung von Holzwerkstoffplatten während der Stapellagerung sollen folgende Problemstellungen bearbeitet werden:

- ✓ Ermittlung der aktuellen Randbedingungen der industriellen Stapellagerung und Erarbeitung einer Möglichkeit zur Simulation der Stapelbedingungen im Labor.
- ✓ Welche Rolle spielt die Komponente Holz bei der Entwicklung der Eigenschaften der Platten während der Lagerung im Plattenstapel?

³ Das Molverhältnis von Formaldehyd zu Harnstoff betrug 1,35 bis 1,60 für die Harze, mit denen die frühen Spanplatten verpresst wurden ("E3-Leim"). Bei heutigen UF-Leimsystem beträgt dieses Verhältnis etwa 1,10 und sogar darunter (Dunky 1999). Die Formaldehydemission aus Holzwerkstoffen wurde im Sinne des Verbraucherschutzes gesetzlich limitiert. Die Reduzierung des Molverhältnisses F:U der Harze ist eine der wesentlichen Maßnahmen, um die Formaldehydemission im Gebrauch der Platten einzudämmen.

- ✓ Zu diesem Zweck werden chemische Veränderungen von Holzarten analysiert, die üblicherweise zur Produktion von Holzwerkstoffplatten eingesetzt werden. Zu diesen Untersuchungen zählen vor allem die Sorptionseigenschaften, der pH-Wert, die Pufferkapazität und die Formaldehydemission.
- ✓ Die Untersuchungen sollen unter den Bedingungen durchgeführt werden, denen das Holz in der Holzwerkstoffplatte während des Verpressens und der Stapellagerung ausgesetzt ist.
- ✓ Welche Rolle spielt die Komponente Klebstoff bei der Entwicklung der Eigenschaften der Platten während der Lagerung im Plattenstapel?
- ✓ Es soll die grundsätzliche Entwicklung der Festigkeiten von Aminoplast-Harzen unter Lagerbedingungen analysiert werden. Dazu sind folgende Spanplatten-Harze einzusetzen: ein aktuelles UF-Standardprodukt, je ein Melamin-Harnstoff-Formaldehydharz mit geringem und hohem Melaminanteil.
- ✓ Der Einfluss wichtiger Prozessparameter auf die Entwicklung der Klebstofffestigkeit während der Lagerung soll bestimmt werden. Folgende Parameter sind zu diesem Zweck zu betrachten: Presszeit, Presstemperatur, Härtermenge, Lagertemperatur und Feuchte des Holzes während der Lagerung.

Aus den Untersuchungen am Holz und Leim unter den Lagerbedingungen werden weiterführende Fragestellungen mit dem Ziel abgeleitet, die Stapellagerung gezielt zur Verbesserung der Platteneigenschaften zu nutzen:

- ✓ Welchen Einfluss haben verschiedene Herstellparameter (Presszeitfaktor, Feuchte, Härtermenge und Stapeltemperatur) auf die Entwicklung der Platteneigenschaften im Stapel?
- ✓ Auf welchem Niveau liegt die kritische Temperatur für Aminoplast-Harze?
- ✓ Es soll erarbeitet werden, wie die Temperatur bzw. die Temperaturentwicklung im Stapel beeinflusst werden kann, um die Stapeltemperatur über einen definierten Zeitraum gezielt einstellen zu können.
- ✓ Auf welche Weise kann die Feuchteverteilung während der Stapellagerung beeinflusst werden, damit Spannungen v.a. zwischen Deck- und Mittelschicht möglichst schnell abgebaut werden?
- ✓ Neben konventionellen aktuellen Leimsystemen der Spanplattenherstellung soll auch ein Harnstoffharz berücksichtigt werden, das ein Molverhältnis von F:U < 1 aufweist. Zudem sollen ein modifiziertes mit einem unmodifizierten PF-Harz hinsichtlich der Eigenschaftsentwicklung während der Stapellagerung verglichen werden.

Ziele der Arbeit

Aus der Problemstellung, den Erkenntnissen aus der Literatur und den möglichen Untersuchungsansätzen lassen sich folgende Ziele für die Arbeit ableiten:

1. Analyse der Temperaturentwicklung an der Oberfläche und in der Mittelschicht der Platten nach dem Heißpressen bis zur vollständigen Abkühlung und während der Stapellagerung.
2. Beschreibung der Eigenschaftsänderung an frei auskühlenden Span- und Faserplatten unmittelbar nach dem Heißpressen an industriell hergestellten Platten mit verschiedenen Klebstofftypen.
3. Analyse ausgewählter Holzeigenschaften unter den Bedingungen der Stapellagerung mit verschiedenen Parametern, zum Beispiel: Holzart, Lagertemperatur, -Feuchte, Presstemperatur und deren Einfluss auf die Eigenschaftsentwicklung.
4. Untersuchung über die Veränderung der Eigenschaft des Klebstoffs unter den Bedingungen der Stapellagerung mit verschiedenen Parametern (Presszeit, Temperatur, Härtermenge, Lagertemperatur, -feuchte).
5. Aus den Erkenntnissen zu 1. bis 4. sind relevante Parameter zu identifizieren sowie ihre Größenordnung für Untersuchungen an Spanplatten abzuleiten, so dass die Eigenschaftsentwicklung während der Stapellagerung gezielt beeinflusst werden kann.
6. Überprüfung und Übertragung der Erkenntnisse auf die industrielle Produktion im Hinblick auf eine gezielte Nutzung der Stapellagerung zur Verbesserung der Platteneigenschaften.

3 Eigenschaftsänderung an frei auskühlenden MDF und Spanplatten

3.1 Zielsetzung und Fragestellungen

1. Wie ändern sich die physikalisch-technologischen Eigenschaften industriell gefertigter Span- und Faserplatten unmittelbar nach dem Verlassen der Heißpresse bei sofortiger Abkühlung auf die Umgebungstemperatur?
2. Die Fragestellung gilt für die Leimsysteme: UF, MUF und PF.
3. Kann die Eigenschaftsveränderung von industriell gefertigten Platten mit Hilfe der Temperatur bzw. der Abkühlgeschwindigkeit mathematisch-statistisch beschrieben werden?

3.2 Material

3.2.1 Spanplatten

In einer Spanplattenanlage wurden aus der laufenden Produktion unmittelbar nach dem Heißpressen insgesamt 33 Probestreifen (Breite: 2.050 bis 2.600 mm, Länge: 600 mm) entnommen. Es handelte sich um harnstoffharz-, melamin-harnstoffharz- und phenolharzverleimte Platten. Die UF-verleimten Platten hatten eine Dicke von 12, 16, 22, 28, 35 und 38 mm, die der PF-verleimten Platten 19 und 22 mm und die der MUF-verleimten Platten 38 mm. Die Dichte der Platten variierte je nach Plattendicke und Plattentyp (Tabelle 2).

Tabelle 2: Untersuchte Spanplatten.

UF		
Nenndicke	12, 16, 22, 28, 35, 38	mm
Dichte	600 ... 700	kg/m ³
MUF		
Nenndicke	38	mm
Dichte	650	kg/m ³
PF		
Nenndicke	19, 22	mm
Dichte	650 ... 740	kg/m ³

Probenentnahme und Probenabmessungen

In modernen Spanplattenlinien werden die Platten direkt nach Verlassen der kontinuierlichen Heißpresse durch Doppeldiagonaltrennsägen auf die gewünschte Länge getrennt. An dieser Stelle können für die interne Qualitätskontrolle Probestreifen (auch: Laborstreifen oder Laborschnitte) entnommen werden. Auf diese Weise wurden für die vorliegende Untersuchung insgesamt 33 Platten über die volle Produktionsbreite (zwischen 2.050 bis 2.650 mm) mit einer Länge von etwa 600 mm entnommen. Je zwei Platten des gleichen Typs wurden unmittelbar hintereinander

entnommen und der zerstörenden bzw. der zerstörungsfreien Prüfung zugeführt: 17 Platten wurden zerstörungsfrei, 16 Platten⁴ zerstörend geprüft.

Die Zeitspanne zwischen Entnahme der Platte und dem Beginn der Prüfungen betrug für die UF- und MUF-verleimten Platten maximal drei und für die PF-verleimten Platten etwa fünf Minuten. Bei den Untersuchungen an UF- und MUF-verleimten Platten schwankte die Lufttemperatur zwischen 20 und 25°C, die relative Luftfeuchte betrug 30 bis 60%. Das Umgebungsklima der PF-verleimten Platten war wie folgt gekennzeichnet: Temperatur zwischen 20 und 25°C und relative Luftfeuchte zwischen 50 bis 70%.

Zerstörungsfreie Prüfungen

Für die zerstörungsfreie Prüfung wurden die Laborstreifen durch einen Sägeschnitt halbiert (etwa 1.300 mm). Die Platten wurden der Messeinrichtung zugeführt, so dass der mittlere Bereich geprüft wurde.

Zerstörende Prüfungen

Für die zerstörenden Prüfungen wurde der gesamte Laborstreifen quer zur Produktionsrichtung halbiert. Zu den jeweiligen Messzeitpunkten wurde ein 50 mm breiter Streifen abgetrennt (Abbildung 9). Die beiden verbliebenen Teile des Laborstreifens wurden bis zur nächsten Entnahme wieder zusammengesetzt. Aus dem Probestreifen wurden die Prüfkörper ausgeformt, und bis zur Prüfung innerhalb von 10 Minuten wärmeisoliert gelagert. Bei der Gestaltung des Probenschnittplans wurden die Schwankungen der Platteneigenschaften quer zur Produktionsrichtung durch eine entsprechende Verteilung der Proben berücksichtigt (Abbildung 8, Abbildung 9, Tabelle 3).

⁴ Die Platte PF 22 mm konnte nur zerstörungsfrei gemessen werden.

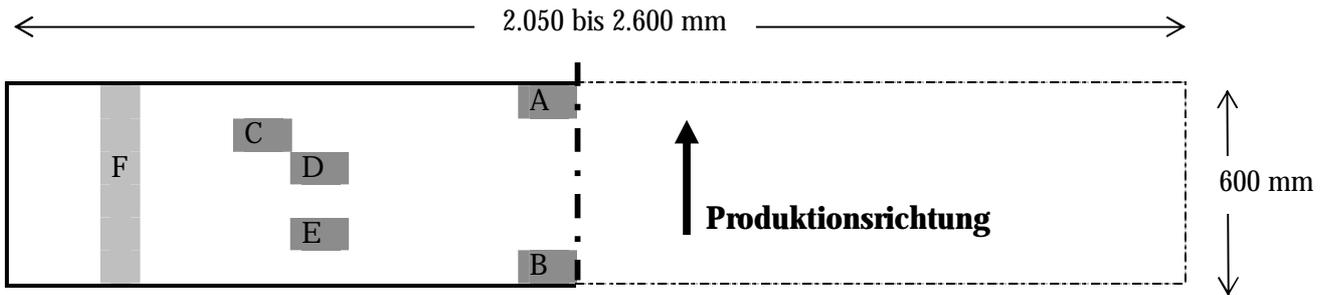


Abbildung 8: Messpunkte der zerstörungsfreien Prüfungen.

- A: Induzierung der Eigenschwingung
- B: Erfassung der Eigenschwingung
- C: Dicke
- D: Schallgeschwindigkeit – berührungslos
- E: Schallgeschwindigkeit – berührend
- F: eingespannte Fläche

Nr.	Mess- Zeitpunkt Klimatisierung bei 20°C, 65% rel. LF	QZ1	S1	u1	B1	QZ2	S2	u2	B2	QZ3	S3	u3	B3
10	180		S1	u1	B1		S2	u2	B2		S3	u3	B3
8	90		S1	u1	B1		S2	u2	B2		S3	u3	B3
6	45		S1	u1	B1		S2	u2	B2		S3	u3	B3
4	20		S1	u1	B1		S2	u2	B2		S3	u3	B3
2	10		S1	u1	B1		S2	u2	B2		S3	u3	B3
1	10		S1	u1	B1		S2	u2	B2		S3	u3	B3
3	30		S1	u1	B1		S2	u2	B2		S3	u3	B3
5	60		S1	u1	B1		S2	u2	B2		S3	u3	B3
7	120		S1	u1	B1		S2	u2	B2		S3	u3	B3
9	24h		S1	u1	B1		S2	u2	B2		S3	u3	B3

Abbildung 9: Schnittplan der zerstörenden Prüfung (hier am Beispiel einer 19 mm Platte).

wobei

- QZ: Querzugfestigkeit
- S: Druckscherfestigkeit
- B: Biegefestigkeit und Biege-Elastizitätsmodul
- u: Feuchte

Tabelle 3: Plattenbreite nach Zuschnitt.

Nennstärke	Länge der Biegeprobe	Anzahl der Proben				Gesamte Plattenbreite
		B	QZ	u	S	
38	810	2	3	3	3	2.114
35	750	2	3	3	3	1.994
28	610	3	3	3	3	2.328
22	490	3	3	3	3	1.968
19	430	3	3	3	3	1.788
16	370	3	3	3	3	1.608
12	290	4	4	4	4	1.824

3.2.2 Faserplatten (MDF und HDF)

In einer Anlage wurden aus der laufenden Produktion unmittelbar nach dem Heißpressen insgesamt 11 Probestreifen (ca. 2.500 x 600 mm²) entnommen. Bei den Untersuchungen wurden harnstoffharzverleimte Faserplatten (HDF und MDF) betrachtet. Die Platten hatten eine Nenndicke von 5, 7, 12, 16 und 22 mm. Die Dichte der Platten variierte je nach Plattendicke (Tabelle 4). Das Probematerial wurde unter den gleichen Bedingungen den Prüfungen zugeführt, wie dies in Abschnitt 3.2.1 beschrieben ist.

Tabelle 4: Stufen des Versuchsplans für die Faserplatten.

<i>Einheit</i>		<i>Stufen</i>				
Typ		HDF		MDF		
Nenndicke	mm	5,9	7,4	12	16	22
Dichte	kg/m ³	870 .. 880		715 .. 730		

3.3 Methodik

3.3.1 Zerstörungsfreie Prüfungen

Für die zerstörungsfreie Prüfung wurde im jeweiligen Industriebetrieb ein Messplatz (Abbildung 10) aufgebaut, mit dem die verschiedenen Messungen gleichzeitig bzw. direkt hintereinander durchgeführt wurden. Die heißen Platten wurden in einen Pressrahmen einseitig eingespannt. Die Prüfungen wurden an identischen Messpunkten durchgeführt.

Die Ergebnisse der Temperatur- und Dickenmessung wurden mit einem Datenlogger aufgezeichnet. Für die Erfassung der Eigenschwingungsanalyse (Schulte 1997) und der berührungslosen Schallmessung (Kruse 1997) standen Programme der Hersteller zur Verfügung.

3.3.1.1 Temperatur

Mit der Temperatureaufzeichnung wurde nach Entnahme des Laborschnitts aus dem Prozess begonnen. Zur Erfassung der Mittelschichttemperatur wurden die Platten jeweils auf der Höhe der Mittelschicht ca. 12 cm tief horizontal angebohrt und mit einem Einstechthermoelement versehen. Die Oberflächentemperatur wurde auf der Plattenober- und Unterseite mit Hilfe von zwei Infrarot-Sensoren aufgenommen. Die Temperaturerfassung wurde über einen Zeitraum von 120 bis 180 Minuten nach dem Pressen durchgeführt.

3.3.1.2 Dicke

Da ein berührendes Dickenmessverfahren zu ungenau und zu kritisch hinsichtlich der Plattentemperatur ist, wurde ein optisches Weg-Messsystem verwendet (Abbildung 10). Zu diesem Zweck wurden zwei LED-Messsensoren mit Messfleckdurchmessern von 0,8 bzw. 3 mm eingesetzt. Der Gesamtfehler für dieses System betrug $\pm 30,15 \mu\text{m}$.

3.3.1.3 Eigenschwingungsanalyse

Aus der Analyse der Eigenschwingung von Holzwerkstoffplatten können Aussagen über ihre elastomechanische Eigenschaften getroffen werden (Kollmann und Krech 1960, Hearmon 1966, Schulte 1997). Die Korrelationen zwischen den dynamisch und statisch ermittelten Eigenschaften erwiesen sich in den bisherigen Untersuchungen als hoch bzw. sehr hoch. So ermittelte Schulte (1997) eine sehr gute Korrelation zwischen dem dynamischen und statisch bestimmten Biege-E-Modul nach EN 310. Der Zusammenhang zwischen dem dynamisch und statisch bestimmten Schubmodul bei Möbelspanplatten war ebenfalls sehr gut.

Bei dem hier verwendeten Verfahren werden Holzwerkstoffplatten einseitig in einen Rahmen eingespannt und durch einen einmaligen Schlagimpuls in Schwingungen versetzt. Diese Schwingungen werden durch Laser-Messköpfe berührungslos erfasst. Die Resonanzschwingungen werden mit Hilfe einer Frequenzanalyse ermittelt. Durch ein computergestütztes Auswertungsprogramm können diesen Resonanzschwingungen Schwingungsmoden zugewiesen werden. Je nachdem welche Schwingungen erfasst werden, kann bereits aus der Frequenz $f(01)$ der E-Modul in Richtung des Kragarmes (E_x) nach Schulte (1997) berechnet werden:

$$E_x = \frac{1}{K_1} \frac{4 \rho^2 f(01)^2 12 (1 - \nu_{12} \nu_{21}) a^3 m_0}{b d^3} \frac{1}{1000} \quad (4)$$

wobei:

E_x	dynamischer Biege-Elastizitätsmodul in Richtung des Kragarmes	N/mm ²
a	Kragarmlänge	mm
b	Plattenbreite	mm
d	Plattendicke	mm
m_0	Masse des auskragenden Plattenteils	kg
ν_{12}, ν_{21}	= 0,2 (Poisson'sche Konstanten)	
K_1	= 12,36 (Konstante)	

Je kürzer der Kragarm ist, um so weniger Schwingungsmoden werden über die Kragarmlänge detektiert. Bei Längen um 600 mm kann der Schwingungsmodus erster Ordnung noch

problemlos aufgenommen werden. Für die Versuche wurden die Platten horizontal in einen Pressrahmen eingespannt.

In einem Vorversuch wurde das Verhalten einer im Labor hergestellten Spanplatte (Dichte 650 kg/m³) gegenüber Querdruck überprüft. Die Prüfung erfolgte in Anlehnung an DIN 52 192 für Vollholz. Die Ergebnisse dieser Prüfung sind in Tabelle 5 dargestellt. Danach liegt die Proportionalitätsgrenze für den Querdruck im Mittel bei 4,02 N/mm². Dieser Wert liegt weit oberhalb des im Bereich der Einspannung des Schwingungsrahmen auftretenden Spannung von ungefähr 0,32 N/mm² (vgl. Schulte 1997). Die im Pressrahmen auftretende Druckspannung liegt also deutlich innerhalb des elastischen Bereiches. Somit kann davon ausgegangen werden, dass die Einspannung die Messung nicht wesentlich beeinflusst.

Die Messung des dynamischen Biege-E-Moduls wurde zu den Zeitpunkten ab 5 bis 120 bzw. 180 Minuten sowie 24 Stunden nach dem Heißpressen der Platte durchgeführt.

Tabelle 5: Spannung bei Stauchung der Probe um 1% im Querdruckversuch.

Proben- Nummer	d N/mm²
1	3,85
2	3,92
3	3,79
4	4,31
6	4,10
9	4,01
11	4,20
12	3,65
13	4,29
14	4,04
Mittelwert	4,02
Standardabweichung	0,22
Var.koeff.	5,4%

3.3.1.4 Berührende Bestimmung der Ultraschallgeschwindigkeit

Zwischen der Schallgeschwindigkeit senkrecht zur Plattenebene und der Querkzugfestigkeit von Holzwerkstoffplatten bestehen befriedigende bis gute Zusammenhänge (Vogt 1986, Greubel 1989, Kruse 1997). Die Laufzeitmessung des Schalls senkrecht zur Plattenoberfläche wurde mit dem Ultraschallmessgerät BP 5 der Firma Steinkamp durchgeführt. Dieses Messgerät arbeitet nach dem piezoelektrischen Prinzip. Die Schallgeschwindigkeit wurde aus der Plattendicke und der Laufzeit nach Gleichung (5) berechnet:

$$c = \frac{d}{t} \tag{5}$$

wobei

<i>c</i>	Schallgeschwindigkeit	m/s
<i>d</i>	Plattendicke	m
<i>t</i>	Laufzeit des Schalls	s

Auf der Ober- und Unterseite der Platte wurden Exponentialprüfköpfe (Sendefrequenz 45 kHz) appliziert. Die Ultraschallmessköpfe wurden so in den Messplatz integriert, dass ab 5 bis

180 Minuten sowie nach 24 Stunden jeweils an dem gleichen Messpunkt die Laufzeit gemessen werden konnte.

3.3.1.5 Berührungslose Bestimmung der Ultraschallgeschwindigkeit

Die berührungslose Bestimmung der Schallgeschwindigkeit senkrecht zur Plattenebene erfolgte in Anlehnung an Kruse (1997). Zu diesem Zweck wurden zwei elektrostatische Ultraschallwandler ober- und unterhalb der Platten angeordnet (Abbildung 10).

Bei Verwendung von Ultraschallwellen in einem weiten Frequenzspektrum kann die Schallgeschwindigkeit am Messpunkt durch Bestimmung der Frequenz der maximalen Schwingungsamplitude und der Plattendicke nach Kruse (1993) berechnet werden (Gleichung 6).

$$c = \sqrt{\frac{h - \sqrt{h^2 - \frac{16 \cdot h}{n^2} f_{\max}^2 \cdot d^2}}{2}} \quad (6)$$

wobei

c	Schallgeschwindigkeit der Probe	m/s
f_{\max}	Frequenz maximaler Signalamplitude	Hz
d	Dicke der Probe	mm
h	Konstante (abhängig vom Einschallwinkel)	
n	ganzzahliges Vielfaches der Frequenz f_{\max}	

Es wurde ein Frequenzspektrum von 20 bis 100 kHz eingesetzt. Das Empfangssignal wurde über eine A/D-Wandlerkarte in den PC eingelesen. Von einer Auswertungssoftware konnten die Messsignale graphisch dargestellt und ausgewertet werden. Die Messungen wurden zeitgleich mit der berührenden Ultraschallmessung durchgeführt.

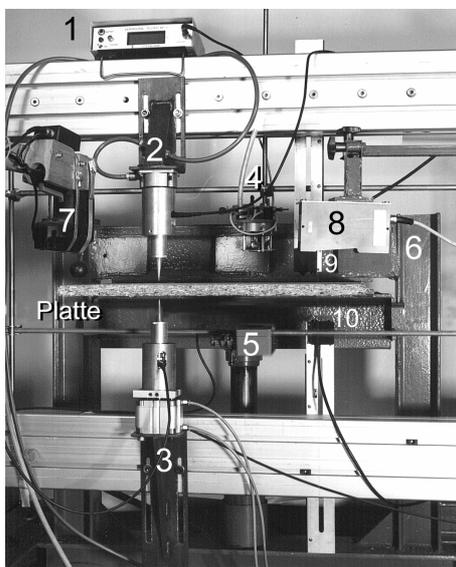


Abbildung 10: Messplatzeinrichtung für zerstörungsfreie Prüfungen (nach Kruse 1997).

- 1: Messwertanzeige für berührende Schallmessung
- 2, 3: Schallsensoren für berührende Schallmessung
- 4, 5: Schallsensoren für berührungslose Schallmessung
- 6: Pressrahmen
- 7: Schwingungsanregung
- 8: Laser-Sensor zur Erfassung der Eigenschwingung
- 9, 10: Dickenmessung

3.3.2 Zerstörende Prüfmethoden

3.3.2.1 Temperatur

Die Temperaturmessung für die zerstörende Prüfung wurde analog zur zerstörungsfreien Prüfung an den Laborstreifen durchgeführt.

3.3.2.2 Feuchte

Die Proben wurden mit einem Messer in zwei Außenschichten von ca. 3 mm Dicke und in eine Mittelschicht getrennt. Die Feuchte der Schichten wurden separat nach der Darmmethode ermittelt.

3.3.2.3 Scherfestigkeit

Die Zugfestigkeit senkrecht zur Plattenebene lässt unmittelbar Rückschlüsse auf die Verleimungsqualität zu, daher dient die Querkzugfestigkeit als Prüfgröße der Verleimungsqualität in der Qualitätskontrolle. Die Bestimmung der Querkzugfestigkeit nach EN 319 lässt eine sofortige Prüfung unmittelbar nach dem Einschnitt nicht zu, da die Proben zunächst geschliffen und mit Jochen verklebt werden müssen. Dadurch vergeht so viel Zeit, dass die Proben in der Regel vollständig auskühlen.

Noack und Schwab (1972) zeigten, dass auch die Druckscherfestigkeit parallel zur Mittelschicht einer Probe (50 x 50 mm²) als Maß für die Güte der Verleimung herangezogen werden kann. Dies gilt unter der Maßgabe, dass die schwächste Stelle der Verleimung in der Bruchlinie liegt. Zwischen der Scherfestigkeit parallel zur Plattenebene und der Querkzugfestigkeit besteht eine sehr gute Korrelation. Gressel (1975), Kufner (1975) und Meierhofer et al. (1977) konnten diese Ergebnisse für Spanplatten bestätigen. Die Druckscherfestigkeit wurde gemäß DIN 52 367 als Maß für die Klebfestigkeit der Spanplatten ermittelt.

3.3.2.4 Querkzugfestigkeit

Die Prüfung der Scherfestigkeit nach DIN 52 367 ist für Faserplatten nicht geeignet, da die geringste Festigkeit nicht in der Mitte der Probe parallel zur Oberfläche erwartet werden kann. Daher wurde anstelle dessen die Querkzugfestigkeit zu den gewählten Zeitpunkten in Anlehnung an EN 319 geprüft. Die Proben wurden mit Hilfe eines Cyanacrylat-Klebers mit Buchen-Vollholzjochen sofort nach Zuschnitt verklebt und konnten unmittelbar geprüft werden. Der ersten Prüfwerte lagen somit 10 Minuten nach dem Verlassen der Platten aus der Heißpresse vor. Weitere Prüfungen wurden in regelmäßigen Zeitabschnitten bis zu 180 Minuten sowie nach 24 Stunden durchgeführt.

3.4 Ergebnisse und Diskussion

3.4.1 Spanplatten

3.4.1.1 Temperaturänderung der frei auskühlenden Platten

In Abbildung 11 ist exemplarisch die Temperatur in der Mittelschicht sowie die der oberen und unteren Oberfläche einer 35 mm dicken Spanplatte (UF) über einen Zeitraum von zwei Stunden nach dem Heißpressen aufgetragen. Unmittelbar nach Verlassen der Presse weist die Mittelschicht eine Temperatur von etwa 110°C (extrapoliert) auf. Die Temperaturen der Oberflächen liegen zu diesem Zeitpunkt noch deutlich darüber, sinken aber sehr rasch ab und liegen bereits 5 Minuten nach dem Heißpressen unter 80°C. Die Temperaturen der Deck- und Mittelschicht nähern sich asymptotisch der Umgebungstemperatur, wobei die der Mittelschicht deutlich langsamer sinkt als die der Deckschichten. Nach etwa 80 Minuten erreichen Deck- und Mittelschicht ein gleiches Temperaturniveau von rund 40°C und haben nach 110 Minuten Raumtemperatur angenommen. Aufgrund der horizontalen Lagerung kühlt die Oberseite geringfügig schneller aus als die Unterseite.

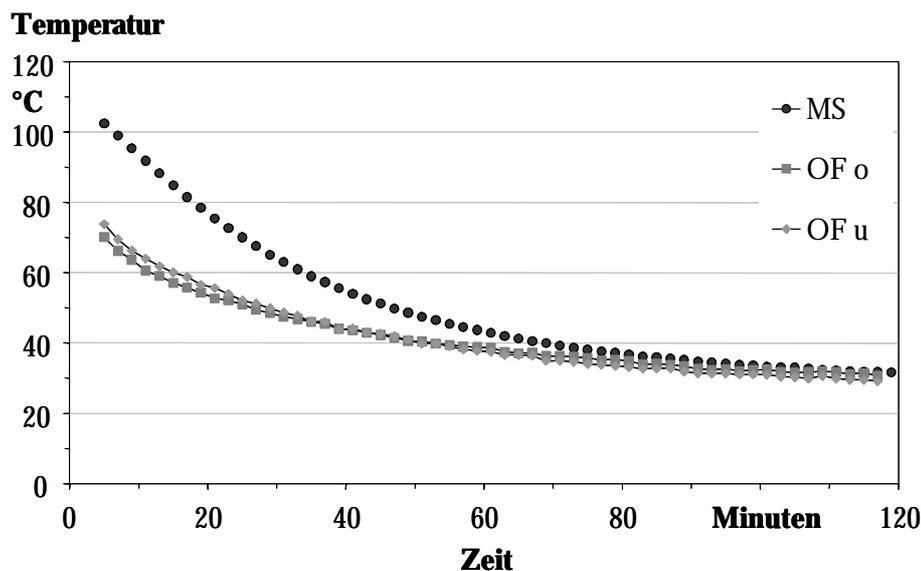


Abbildung 11: Änderung der Mittelschicht- und Oberflächtemperatur (oben und unten) einer 35 mm Spanplatte bei freier Ausföhlung; Umgebungstemperatur: ca. 28°C.

In Abbildung 12 ist die Abnahme der Mittelschichttemperatur von Spanplatten unterschiedlicher Dicke bei frei luftumspöelter Lagerung nach dem Heißpressen dargestellt. Es ist ersichtlich, dass die Abkühlungsgeschwindigkeit deutlich von der Plattendicke abhängig ist: Platten mit geringerer Dicke und geringerer Masse kühlen wesentlich schneller aus als Platten mit höherer Dicke bzw. Masse. Kruse (1997) hatte bereits aufgezeigt, dass ein enger Zusammenhang zwischen der Abkühlungsgeschwindigkeit und der Dichte besteht. Physikalisch ist die Abkühlung durch die Temperaturleitung zu beschreiben (vgl. Gleichung 2). Danach ist die Abkühlung von der

Wärmeleitfähigkeit, der Dichte und der Temperaturdifferenz abhängig. Die Bedeutung der Dichte für die Temperaturleitfähigkeit wird durch die direkte Berücksichtigung sowie durch deren zusätzliche, indirekte Berücksichtigung über die Wärmeleitfähigkeit (Gleichung 3 und 4) verdeutlicht.

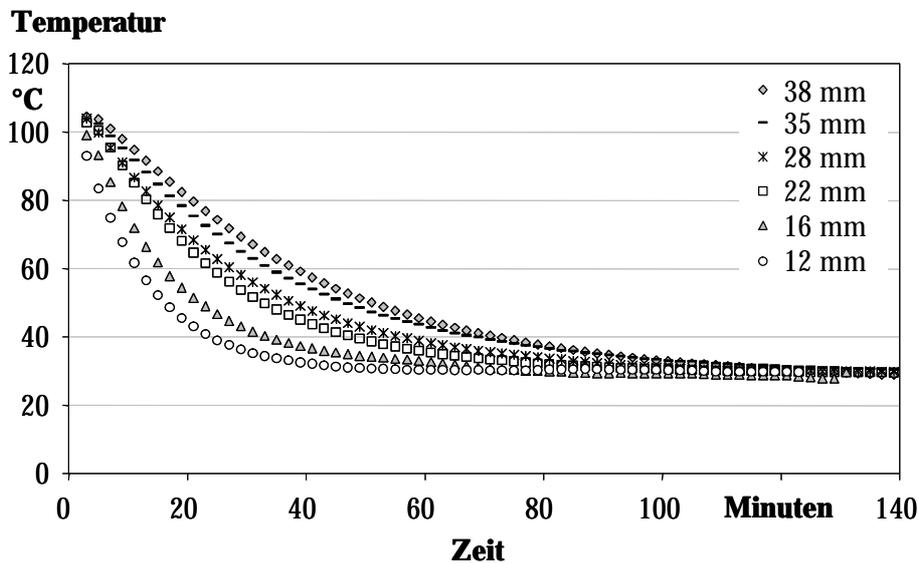


Abbildung 12: Änderung der Mittelschichttemperatur einzelner industriell gefertigter Spanplatten mit unterschiedlicher Nenndicke und Leimtyp; Lagerung horizontal.

Zur einfachen Abschätzung der Abkühlung kann das Flächengewicht herangezogen werden. Bei dem Flächengewicht gehen Dicke und Dichte der Platten gemeinsam ein. Das Flächengewicht beschreibt die Masse bezogen auf die Fläche der Platte. Wird das Flächengewicht gegen die Zeitdifferenz vom Moment des Verlassens der Presse bis zur Abkühlung auf Raumtemperatur aufgetragen, wird der Einfluss des Flächengewichtes auf die Abkühlung demonstriert (Abbildung 41).

3.4.1.2 Feuchte

Unmittelbar nach dem Pressvorgang weisen die Deckschichten aller Plattentypen eine deutlich niedrigere Feuchte auf als die Mittelschichten. Der Feuchtehaushalt der Platte zu diesem Zeitpunkt wird entscheidend durch die Mattenfeuchte vor dem Verpressen, die Permeabilität und durch die Presszeit beeinflusst. In der Regel werden dickere Platten mit einer höheren Feuchte, insbesondere in den Deckschichten, verpresst als dünnere Platten. Zudem werden die Platten je nach Dicke mit unterschiedlichen Presszeitfaktoren produziert. Die Bedeutung der Presszeit wird bei einem Vergleich von UF- und PF-verleimten Platten besonders deutlich. Die Presszeit PF-verleimter Platten ist etwa um den Faktor zwei größer als bei UF-verleimten Platten gleicher Dicke. Aus vorgenannten Aspekten lassen sich die unterschiedlichen Feuchten der untersuchten Platten kurz nach dem Heißpressen eindeutig ableiten (Abbildung 13 und Abbildung 14).

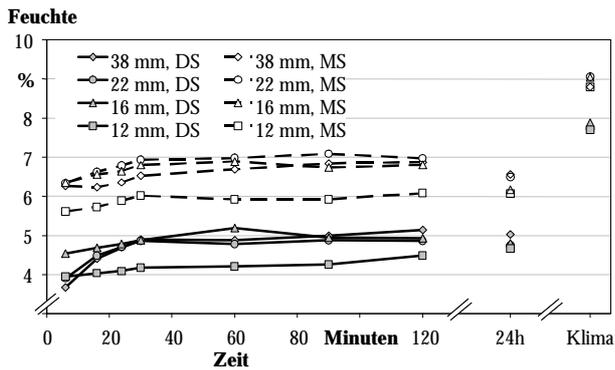


Abbildung 13: Änderung der Deck- und Mittelschichtfeuchte UF-verleimter Spanplatten.

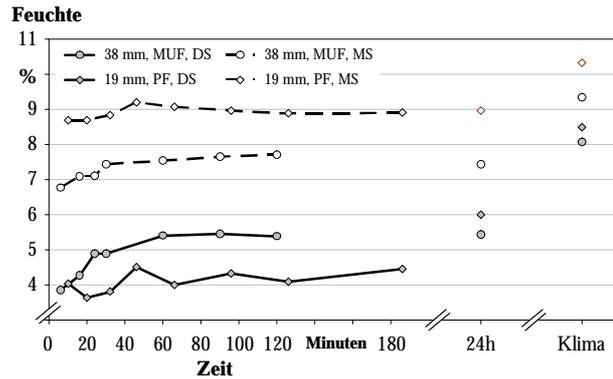


Abbildung 14: Änderung der Deck- und Mittelschichtfeuchte PF sowie MUF-verleimter Spanplatten.

Während der Abkühlung nach dem Heißpressen nimmt die Feuchte über einen Zeitraum von etwa zwei Stunden zwar erkennbar aber nur geringfügig zu. Die größte Änderung tritt bis etwa 30 Minuten nach dem Verpressen auf (Abbildung 13 und Abbildung 14). Die Mittelschichtfeuchte UF-verleimter Platten nimmt um etwa 0,5% zu, die der MUF-verleimten Platte um etwa 1% und die der PF-verleimten Platte um rund 0,2%. Die Deckschichtenfeuchten nehmen in Abhängigkeit von Anfangsfeuchte und Umgebungsklima deutlich stärker zu. Bei den UF- und MUF-verleimten Platten ist eine Zunahme von bis zu 1,5% zu verzeichnen, die Deckschichtfeuchte der PF-verleimten Platte nahm um 1% zu. Zeitgleich nimmt die Differenz zwischen Deck- und Mittelschichtfeuchte stetig ab (Abbildung 15).

Nach Verlassen der Presse streben die Platten einen Ausgleich der Feuchte an, die durch die relative Feuchte der Umgebungsluft bestimmt ist. Nach Roffael und Schneider (1978) beträgt diese Gleichgewichtsfeuchte (u_{gl}) bei den vorliegenden Umgebungsbedingungen für UF- bzw. MUF-verleimten Platten 7% und für die PF-verleimten Platten etwa 10%.

Es ist festzustellen, dass selbst nach Lagerung der Proben im Normklima kein vollständiger Ausgleich der Feuchte zwischen Deck- und Mittelschicht stattfindet. Seifert (1970) führt dies auf eine thermische Sorptionsvergütung zurück, die dem Deckschichtmaterial beim Heißpressen widerfährt. Dieser Effekt kann durch die höhere Feuchte der Matten-Deckschichten verstärkt werden. Auch der Leimtyp und -anteil haben einen Einfluss, wodurch die Sorptionsisothermen und damit die Gleichgewichtsfeuchten beeinflusst werden. Da die PF-verleimten Platten mit längeren Presszeiten und hohen Leimgehalten in der Deckschicht hergestellt wurden, ergibt sich auch nach Klimatisierung eine größere Feuchtedifferenz zwischen Deck- und Mittelschicht (Abbildung 15). Die Feuchtedifferenz nach Klimalagerung beträgt bei den PF-verleimten Platten ca. 1,8% gegenüber ca. 1,2% der UF-verleimten Platten.

Feuchtedifferenz zwischen DS und MS

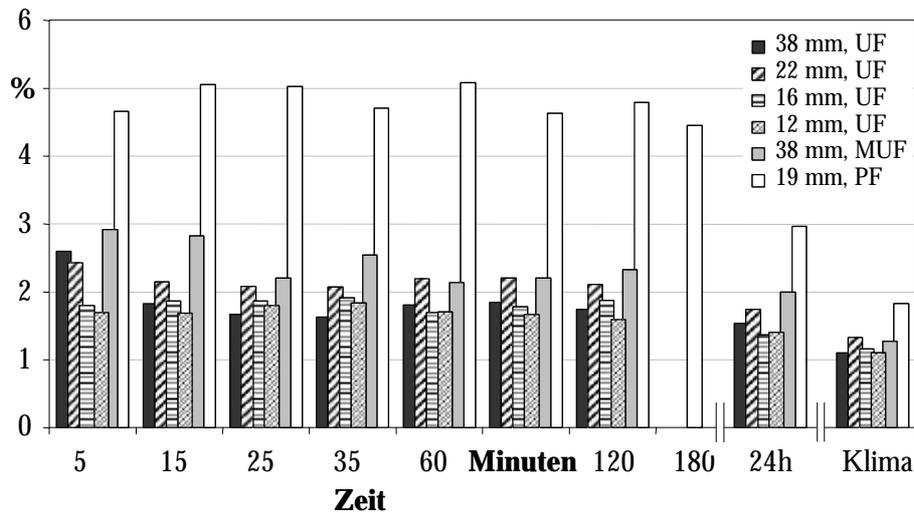


Abbildung 15: Feuchtedifferenz zwischen Deck- und Mittelschicht verschiedener Plattentypen zu unterschiedlichen Zeitpunkten nach dem Heißpressen.

3.4.1.3 Plattendicke

In der Zeitspanne zwischen etwa 3 und 120 Minuten nach dem Verlassen der Heißpresse tritt eine degressive Abnahme der Plattendicke auf. Für die UF- und PF-verleimten Platten mit einer Nenndicke von 22 mm sinkt die reale Dicke im Verlauf der Abkühlung um etwa 0,20 mm (Abbildung 16).

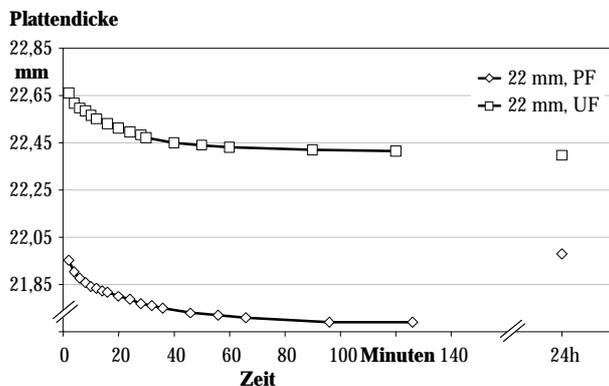


Abbildung 16: Änderung der Dicke nach dem Heißpressen – exemplarische Darstellung für UF und PF-verleimte Platten mit einer Nenndicke von 22 mm.

Die relative Abnahme der Plattendicke (Tabelle 6) in dem Zeitraum bis 120 Minuten nach dem Pressen zeigt, dass die Dicke sämtlicher Plattentypen um etwa 1% sinkt. Kruse (1997) stellte einen Ansatz vor, der dieses Phänomen beschreibt: Die Wärmekontraktion in dem untersuchten Temperaturbereich und der Abbau des Dampfdruckes in der Mitte der Platte nach Verlassen der Presse können die Abnahme der Dicke um etwa 0,10 mm einer 20 mm starken Spanplatten theoretisch erklären. Allerdings führt die geringe Feuchteaufnahme während der Abkühlung wiederum zu einer Dickenquellung in einer Größenordnung von etwa 0,07 mm. Somit bleibt ein großer Teil der Dickenabnahme nicht erklärbar.

Tabelle 6: Änderung der Plattendicke (absolut, relativ) nach dem Heißpressen; Spanplatten.

Plattenstärke Mm	Änderung absolut in mm			Änderung relativ in%		
	0-120	0-24h	120-24h	0-120	0-24h	120-24h
38 mm, UF	-0,35	-0,55	-0,20	-0,90	-1,43	-0,52
35 mm, UF	-0,33	-0,45	-0,12	-0,93	-1,26	-0,33
28 mm, UF	-0,25	-0,32	-0,07	-0,89	-1,14	-0,25
22 mm, UF	-0,25	-0,26	-0,02	-1,10	-1,18	-0,08
16 mm, UF	-0,14	-0,16	-0,02	-0,87	-0,98	-0,10
22 mm, PF	-0,27	0,03	0,30	-1,26	0,13	1,36
19 mm, PF	-0,22	-0,08	0,14	-1,17	-0,42	0,74

Eine Begründung dafür kann sein, dass die angewendeten Materialkenngrößen, die für den von Kruse (1997) beschriebenen Ansatz angewandt worden sind, die Wärmekontraktion nicht geeignet beschreiben. Die Einflüsse des Dampfdruckes, der während der Abkühlung ebenfalls abgebaut wird, spiegeln sich darin beispielsweise nicht wider. Ohnehin ist die Wärmedehnung in dem Temperaturbereich zwischen 20°C und 100°C methodisch nur aufwendig zu erfassen, da diese durch Feuchteänderungen bedingte Quell- und Schwindbewegung überlagert wird.

Festzuhalten ist, dass die Platten innerhalb der ersten 120 Minuten um ca. 1% dünner werden. Die Veränderung der Plattendicke nach der vollständigen Auskühlung ist uneinheitlich. Sie wird wesentlich von den Umgebungsbedingungen und damit einhergehend von der Feuchteaufnahme beeinflusst.

3.4.1.4 Schallgeschwindigkeit

Die Schallgeschwindigkeit senkrecht zur Plattenebene ändert sich während der Abkühlung nach dem Heißpressen. In Abbildung 17 ist die Änderung der berührungslos ermittelten Schallgeschwindigkeit während der Abkühlung UF-verleimter Spanplatten dargestellt. Die Änderung der relativen Schallgeschwindigkeit (Messwert nach 24 Stunden = 100%) ist für die unterschiedlichen Leimtypen in Abbildung 18 vergleichend aufgeführt. Es ist ersichtlich, dass Platten unterschiedlicher Dicke sowie vor allem bei den verschiedenen Leimtypen ein spezifisches Verhalten zeigen: Die Schallgeschwindigkeit in UF-verleimten Platten mit einer Dicke von 16, 22 und 38 mm beginnt nach dem Heißpressen nahezu mit dem gleichen Wert von etwa 420 m/s. Die 12 mm dicke Platte weist zu diesem Zeitpunkt bereits eine Schallgeschwindigkeit von 480 m/s auf. Die Zunahme der Schallgeschwindigkeit nimmt mit steigender Plattendicke ab. 38 mm dicke Platten benötigen ca. 120 Minuten bis der maximale Wert erreicht ist, 12 mm dicke Platten nur 30 Minuten. Hat die Schallgeschwindigkeit einmal innerhalb der ersten 120 Minuten ihren maximalen Wert erreicht, ändert sie sich nachfolgend auch über einen Zeitraum von 24 Stunden nicht mehr.

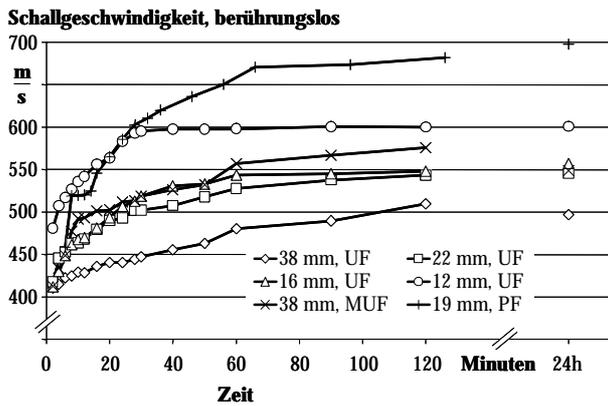


Abbildung 17: Schallgeschwindigkeit (berührungslos, absolut) von Spanplatten während der Abkühlung.

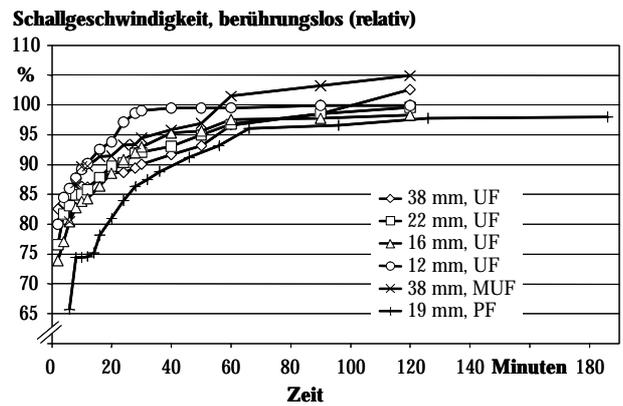


Abbildung 18: Schallgeschwindigkeit (berührungslos, relativ) von Spanplatten während der Abkühlung.

Die Darstellung der relativen Schallgeschwindigkeit (Abbildung 18) verdeutlicht das unterschiedliche Verhalten der verschiedenen Leimtypen und Plattenstärken. Etwa 3 Minuten nach der Heißpresse liegt die Schallgeschwindigkeit der 22 mm dicken **UF**-verleimten Platte bei rund 77% des Wertes nach 24 Stunden. 6 Minuten nach dem Heißpressen weist die **PF**-verleimte 19 mm dicke Platte erst ca. 66% des Wertes nach 24 Stunden auf.

Zusammenhang zwischen der Schallgeschwindigkeit und der Temperatur

Die höchste Schallgeschwindigkeit ist annähernd zu dem Zeitpunkt erreicht, an dem sich Platten- und Umgebungstemperatur weitgehend angeglichen haben. In Abbildung 19 ist die Schallgeschwindigkeit (relativ) gegen die Temperatur der Plattenmittelschicht aufgetragen. Die Änderung der Schallgeschwindigkeit kann sehr gut mit für jeden Leimtyp spezifischen, linearen Regressionen beschrieben werden.

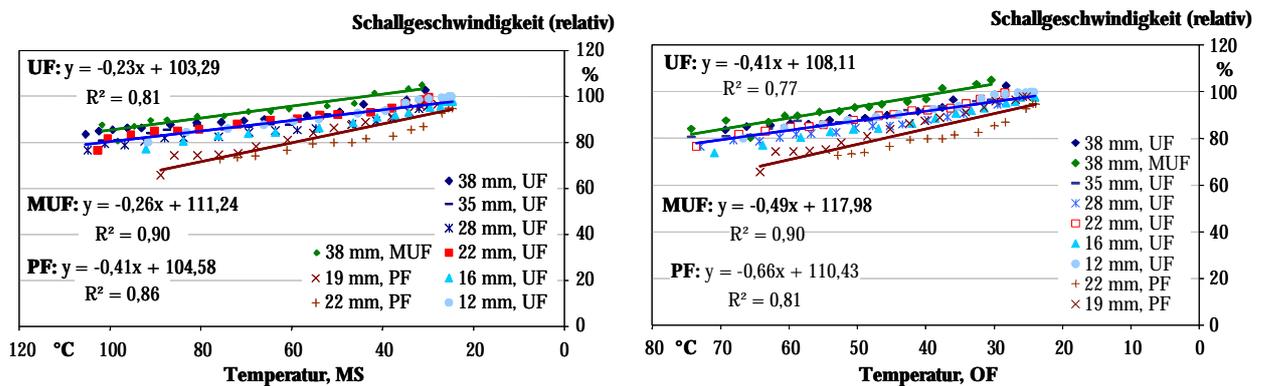


Abbildung 19: Zusammenhang zwischen Temperatur und Schallgeschwindigkeit (berührungslos, relativ) abkühlender Spanplatten mit unterschiedlichem Leimtyp.
links: Mittelschicht
rechts: Oberfläche

Sinkt die Temperatur der Mittelschicht um 1°C steigt die Schallgeschwindigkeit (berührungslos) bei UF-verleimten Platten um 0,23%, bei MUF-verleimten Platten um 0,26% und bei PF-verleimten Platten um 0,41%. Die Bestimmtheitsmaße (R^2) der Zusammenhänge liegen zwischen 0,81 und 0,90. Die Ausgleichsgeraden der zwei eingesetzten Verfahren zur Messung der Schallgeschwindigkeit liegen in der gleichen Größenordnung. Die Güte der Regression ist bei Verwendung der Mittelschichttemperatur geringfügig höher als bei Verwendung Oberflächentemperatur (vgl. Gleichungen 7 bis 18). Allerdings ist hier anzumerken, dass insbesondere in der industriellen Praxis die Messung der Oberflächentemperatur mittels eines berührungslos arbeitenden Infrarot-Messsystems mit deutlich geringerem Aufwand verbunden ist. Unterschiede individueller Regressionen für einzelne Plattenstärken UF-verleimter Platten sind nicht signifikant.

Da die Steigungskoeffizienten der Regressionen deutlich variieren, lässt sich ableiten, dass sich die verschiedenen Leimsysteme während der Abkühlung grundlegend unterschiedlich verhalten. Die Schallgeschwindigkeit wird in starkem Maße von den elastischen Eigenschaften der Plattenmittelschicht bestimmt wird (Kruse 1997). Da die Einflüsse der Dichte, Feuchte und des Festharzgehalts nicht signifikant waren, kann gefolgert werden, dass sich die Eigenschaften der Klebstoffkomponente der MUF- und besonders die der PF-verleimten Platten während der Abkühlung deutlich ändern.

Im folgenden sind die Ausgleichsgeraden zwischen der Schallgeschwindigkeit und der Temperatur auf der Oberfläche und in der Mittelschicht aufgeführt:

berührungslos:

$$\text{UF: } c_{Modu} = -0,2294 \cdot J_{MS} + 103,29 \quad R^2 = 0,81 \quad n = 78 \quad (7)$$

$$\text{MUF: } c_{Modu} = -0,2602 \cdot J_{MS} + 111,24 \quad R^2 = 0,90 \quad n = 16 \quad (8)$$

$$\text{PF: } c_{Modu} = -0,4115 \cdot J_{MS} + 104,58 \quad R^2 = 0,86 \quad n = 32 \quad (9)$$

$$\text{UF: } c_{Modu} = -0,4097 \cdot J_{OF} + 108,11 \quad R^2 = 0,77 \quad n = 78 \quad (10)$$

$$\text{MUF: } c_{Modu} = -0,4867 \cdot J_{OF} + 117,98 \quad R^2 = 0,90 \quad n = 16 \quad (11)$$

$$\text{PF: } c_{Modu} = -0,6579 \cdot J_{OF} + 110,43 \quad R^2 = 0,81 \quad n = 32 \quad (12)$$

berührend:

$$\text{UF: } c_{BPV} = -0,2245 \cdot J_{MS} + 104,25 \quad R^2 = 0,92 \quad n = 78 \quad (13)$$

$$\text{MUF: } c_{BPV} = -0,2373 \cdot J_{MS} + 104,13 \quad R^2 = 0,96 \quad n = 16 \quad (14)$$

$$\text{PF: } c_{BPV} = -0,3640 \cdot J_{MS} + 103,19 \quad R^2 = 0,91 \quad n = 32 \quad (15)$$

$$\text{UF: } c_{BPV} = -0,3886 \cdot J_{OF} + 108,42 \quad R^2 = 0,82 \quad n = 78 \quad (16)$$

$$\text{MUF: } c_{BPV} = -0,4448 \cdot J_{OF} + 110,32 \quad R^2 = 0,98 \quad n = 16 \quad (17)$$

$$\text{PF: } c_{BPV} = -0,5853 \cdot J_{OF} + 108,50 \quad R^2 = 0,87 \quad n = 32 \quad (18)$$

wobei

c_{Modu} Schallgeschwindigkeit – berührungslos, relativ%

c_{BPV} Schallgeschwindigkeit – berührend, relativ %

J_{MS} Temperatur – Mittelschicht °C

J_{OF} Temperatur – Oberfläche °C

3.4.1.5 Scherfestigkeit

Die Änderung der Scherfestigkeit während der Abkühlung nach dem Verlassen der Heißpresse ist in Abbildung 20 dargestellt. Das Niveau der absoluten Festigkeitswerte der einzelnen Plattentypen ist deutlich unterschiedlich und kann nach der mittleren Dichte der Plattenmittelschicht und dem Leimtyp differenziert werden. Auch hier ist ein Anstieg der Eigenschaft über einen Zeitraum von zwei Stunden ersichtlich. Im Anschluss ändern sich die Werte gegenüber denen nach 24 Stunden und nach Klimatisierung nicht mehr entscheidend. Bei der Darstellung der relativen Messergebnisse wird deutlich, dass – vergleichbar mit den Ergebnissen der Schallgeschwindigkeit – dickere Platten einen relativ geringeren Ausgangswert

aufweisen als dünnere Platten. So liegt die Festigkeit wenige Minuten nach Verlassen der Presse 38 mm UF-verleimter Platten bei unter 80%, der Wert für 12 mm Platten bei etwa 85%. Die Zunahme der Scherfestigkeit ist dabei von dem Umfang der Kondensation zum Zeitpunkt des Verlassens der Presse (wofür unter anderem der Pressfaktor und chemische Eigenschaften bedeutend sind) und von dem Fortschritt der Kondensation nach dem Heißpressen (wofür vor allem die Temperatur von Bedeutung ist) abhängig. Die Zunahme der Scherfestigkeit ist dabei typisch für die verschiedenen Leimsysteme. Sechs Minuten nach dem Heißpressen haben UF-verleimte Platten eine Scherfestigkeit von ca. 82%, MUF-verleimte Platten von etwa 67% und PF-verleimte Platten von ca. 63%.

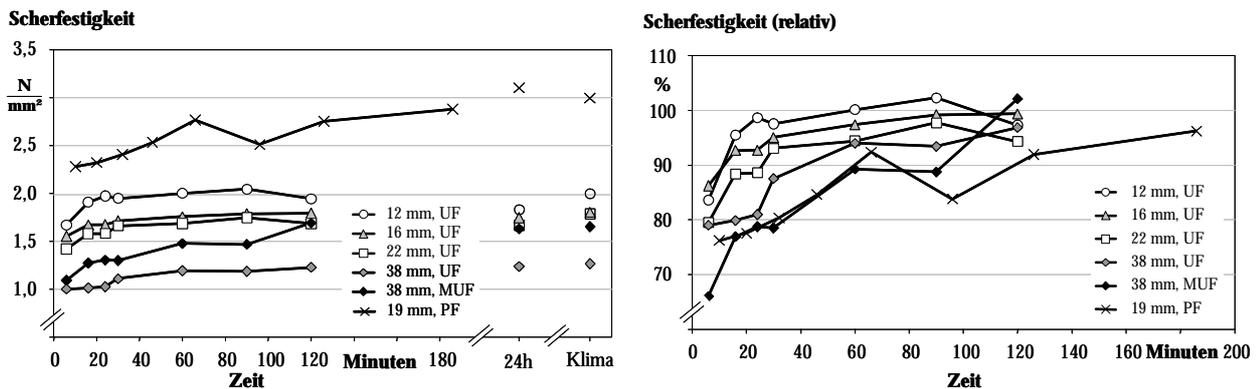


Abbildung 20: Änderung der Scherfestigkeit während der Abkühlung nach dem Verlassen der Heißpresse.
links: absolut
rechts: relativ
(Messwert nach Klimatisierung = 100%)

Zusammenhang zwischen Scherfestigkeit und Temperatur

In Abbildung 21 ist der Zusammenhang zwischen den relativen Werten der Scherfestigkeit und der Plattentemperatur der Oberfläche sowie die der Mittelschicht aufgetragen. Eine Differenzierung nach der Plattendicke scheint hier – im Gegensatz zu den Ergebnissen der Schallgeschwindigkeit senkrecht zur Plattenebene, nicht sinnvoll, da sich die Zusammenhänge nicht signifikant unterscheiden. Es kann davon ausgegangen werden, dass vorhandene Unterschiede bei der Scherfestigkeitsprüfung von der großen Streuung der Einzelwerte überlagert werden und die Prüfung der Scherfestigkeit eine geringere Sensitivität im Hinblick auf die Eigenschaftsveränderung während der Abkühlung aufweist. Dennoch besteht eine gute Korrelation zwischen der relativen Scherfestigkeit und der Temperatur der Platten (Abbildung 21). Für eine präzise Betrachtungsweise ist dieser Zusammenhang für die verschiedenen Leimsysteme individuell beschrieben. Mit Abnahme der Plattentemperatur um 1°C steigt die Scherfestigkeit UF-verleimter Platten um 0,27% an, bei PF-verleimten Platten um 0,31%. Hierdurch wird das ausgeprägtere Verhalten von PF-verleimten während der Abkühlung verdeutlicht.

Mit guter Näherung kann aber auch unabhängig vom Leimtyp eine einzelne Gleichung verwendet werden (Gleichungen 19 und 20).

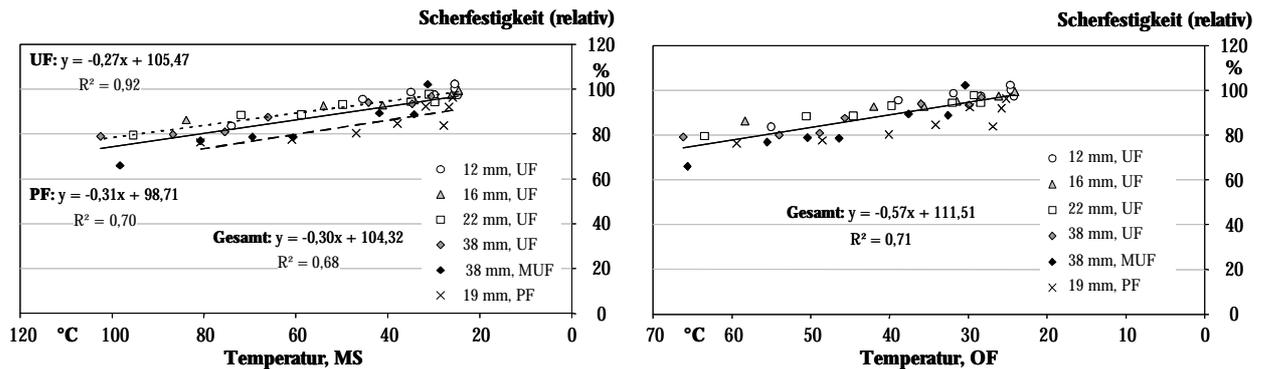


Abbildung 21: Zusammenhang zwischen Scherfestigkeit (relativ) und Temperatur.
links: Mittelschicht rechts: Oberfläche

$$t = -0,301 \cdot J_{MS} + 104,32 \quad R^2 = 0,68 \quad n = 45 \quad (19)$$

$$t = -0,565 \cdot J_{OF} + 111,51 \quad R^2 = 0,71 \quad n = 45 \quad (20)$$

wobei

t	Scherfestigkeit, rel.	%
J_{OF}	Temperatur der Plattenoberfläche	°C
J_{MS}	Temperatur der Plattenmittelschicht	°C

Zusammenhang zwischen Scher- und Querzugfestigkeit

Der im Schrifttum beschriebene Zusammenhang zwischen der Scher- und der Querzugfestigkeit (Noack und Schwab 1972, Gressel 1975, Meierhofer 1977) bestätigt sich prinzipiell an den untersuchten Platten (Abbildung 22). In Tabelle 7 sind die Ansätze verschiedener Autoren zur Berechnung der Querzugfestigkeit aus den Werten der Scherfestigkeit aufgeführt. Die eigenen Ansätze (Gleichungen 30, 31 und 32) wurden an klimatisierten Proben ermittelt. Es bleibt festzuhalten, dass die hier ermittelten Gleichungen zum Teil beträchtlich von den Ergebnissen früherer Arbeiten abweichen. Allerdings beruhen die eigenen Ansätze auf wesentlich geringeren Probenumfängen. Dennoch scheinen die etwa 25 Jahre alten Zusammenhänge nicht vorbehaltlos auf heutige Verhältnisse übertragen werden zu können. Vorrangige Ursachen sind hierfür sicherlich die Weiterentwicklungen in der Anlagentechnik und der Leimsysteme. Vor allem in der Streu- und Presstechnik sowie bei der Rezeptur der Leimharze wurden in den letzten 20 Jahren gravierende Änderungen realisiert. Des weiteren haben sich u.a. auch die Eigenschaften der Harze, die Spandimensionen und die Leimverteilung verändert, so dass auch das Verhalten gegenüber Querzug- und Scherfestigkeit anderen Zusammenhängen genügt. In diesem Zusammenhang ist vor Allem aber die Pressentechnologie zu nennen: Die Rohdichteprofile der Platten, die in kontinuierlichen Heißpressen produziert werden, unterscheiden sich deutlich von denen, die in Etagenpressen hergestellt wurden. Aus diesen Gründen brechen die Proben bei der Querzug- und Scherprüfung heutzutage zum Teil in Zonen auch außerhalb der Plattensymmetrielinie.

Wenn die Scherfestigkeit zur Qualitätsüberwachung genutzt werden soll, ist es notwendig, die Zusammenhänge zwischen Scher- und Querzugfestigkeit an größeren Probenumfängen zu aktualisieren.

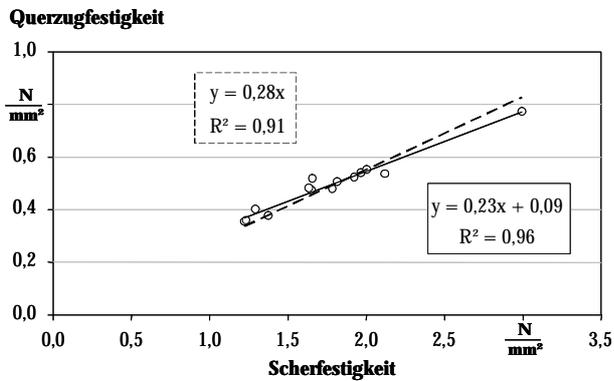


Abbildung 22: Zusammenhang zwischen der Scher- und der Querzugfestigkeit nach Klimatisierung.

Tabelle 7: Berechnung der Querzugfestigkeit aus den Werten der Scherfestigkeitsprüfung.

$$\text{Form: } \sigma_{zu} = \tau \cdot a + b$$

Plattentyp	Dickenbereich	a	b	nach	Nr.
UF und PF	alle (13-25 mm)	0,442	-0,235	Meierhofer et al. (1977)	(21)
V20	< 13 mm	0,461	-0,310	Gressel (1975)	(22)
V20	13-20 mm	0,385	-0,163	Gressel (1975)	(23)
V20	20-25 mm	0,360	-0,125	Gressel (1975)	(24)
V20	25-32 mm	0,281	-0,036	Gressel (1975)	(25)
V20	32-40 mm	0,313	-0,068	Gressel (1975)	(26)
V100	13-20 mm	0,386	-0,135	Gressel (1975)	(27)
UF und PF	alle (13-40 mm)	0,376	-0,151	Gressel (1975)	(28)
UF und PF	alle (10-39 mm)	0,405	-0,174	Noack, Schwab (1972)	(29)
UF	28-38 mm	0,208	+0,108	eigener Ansatz	(30)
UF	12-22 mm	0,151	+0,235	eigener Ansatz	(31)
UF und PF	alle (12-39 mm)	0,226	+0,094	eigener Ansatz	(32)

3.4.1.6 Biegeeigenschaften

In Abbildung 23 ist die Änderung der statisch ermittelten Biegeeigenschaften für einige ausgewählte industriell hergestellte Platten während der Abkühlung nach dem Heißpressen dargestellt. Für alle Plattentypen ist ein degressiver Anstieg der Biegefestigkeit (MOR) und des Biege-Elastizitätsmoduls (MOE) erkennbar. Auch hier ist die Geschwindigkeit der Veränderung im Zusammenhang mit der unterschiedlichen Auskühlungsgeschwindigkeit der Platten zu sehen.

Das Niveau der Eigenschaft ist sowohl für den Biege-Elastizitätsmodul als auch für die Biegefestigkeit primär durch die Dicke der Platte festgelegt. Zwar spielt auch die Dichte der Platte eine Rolle, hat hier aber nur einen untergeordneten Einfluss, da die Dichte der Deck- bzw. Mittelschicht der unterschiedlichen Platten nur wenig variiert. Eine Ausnahme stellen die Werte der 19 mm PF-verleimten Platte dar. Diese Platte besaß eine etwa 15% höhere mittlere Dichte. Daher liegen deren absolute Werte auf einem höheren Niveau als UF-verleimte Platten vergleichbarer Dicke.

Mit zunehmender Dicke sinkt sowohl die Biegefestigkeit als auch der Biege-Elastizitätsmodul, weil das Beplankungsverhältnis λ mit Zunahme der Plattendicke geringer ist (Keylwerth 1958). So beträgt λ für 38 mm Platten etwa 0,25, für 22 mm Platten 0,30 und für 12 mm Platten rund 0,40 (Gleichung 33).

$$I = \frac{2 \cdot s}{d} \quad (33)$$

wobei

I	Beplankungsverhältnis	-
s	Dicke der Deckschicht	mm
d	Gesamtdicke der Platte	mm

In dem Zeitraum zwei bzw. drei Stunden bis 24 Stunden nach dem Verpressen ist nur noch eine geringfügige Änderung des Biege-Elastizitätsmoduls zu verzeichnen (Abbildung 23 und Abbildung 24). Die Messwerte nach 24 Stunden entsprechen etwa denen nach Klimatisierung.

In Abbildung 25 ist die Änderung des dynamisch ermittelten Biege-Elastizitätsmodul während der Abkühlung dargestellt. Diese Eigenschaft verhält sich während der Abkühlung analog zum oben beschriebenen statisch geprüften Biege-Elastizitätsmodul. Zwischen beiden Messwerten ist ein enger Zusammenhang festzustellen (Gleichungen 34 und 36).

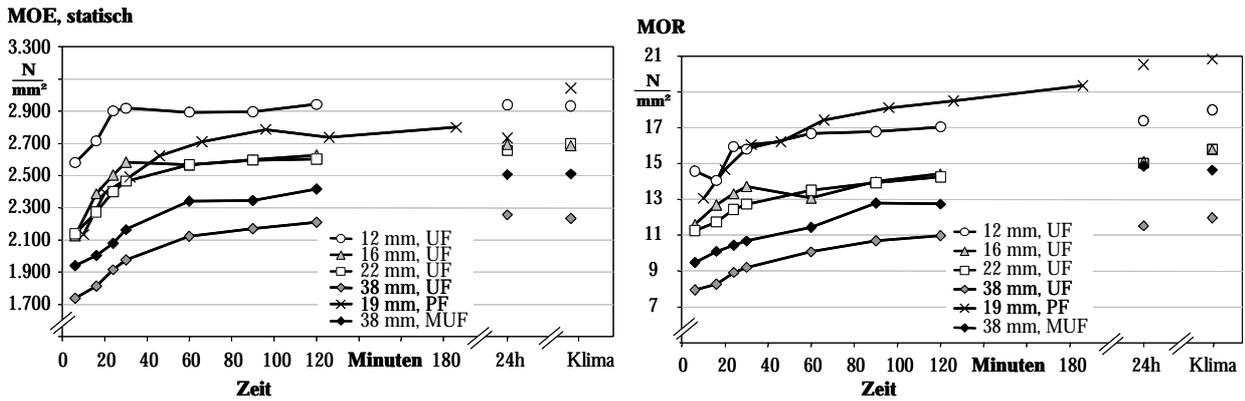


Abbildung 23: Änderung des statisch ermittelten Biege-Elastizitätsmoduls (links) und der Biegefestigkeit (rechts) ausgewählter Spanplatten während der Abkühlung nach dem Heißpressen. (absolute Werte).

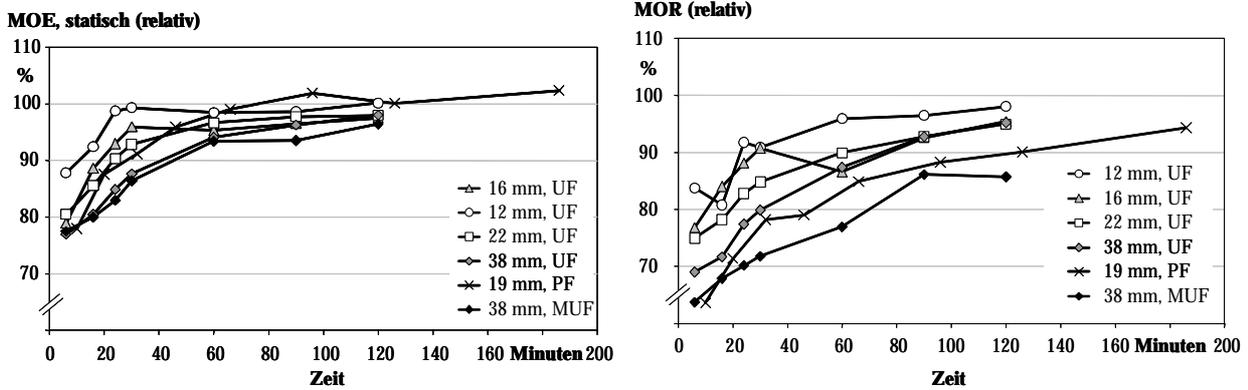


Abbildung 24: Änderung des statisch ermittelten Biege-Elastizitätsmoduls (links) und der Biegefestigkeit (rechts) ausgewählter Spanplatten während der Abkühlung nach dem Heißpressen. (relative Werte).

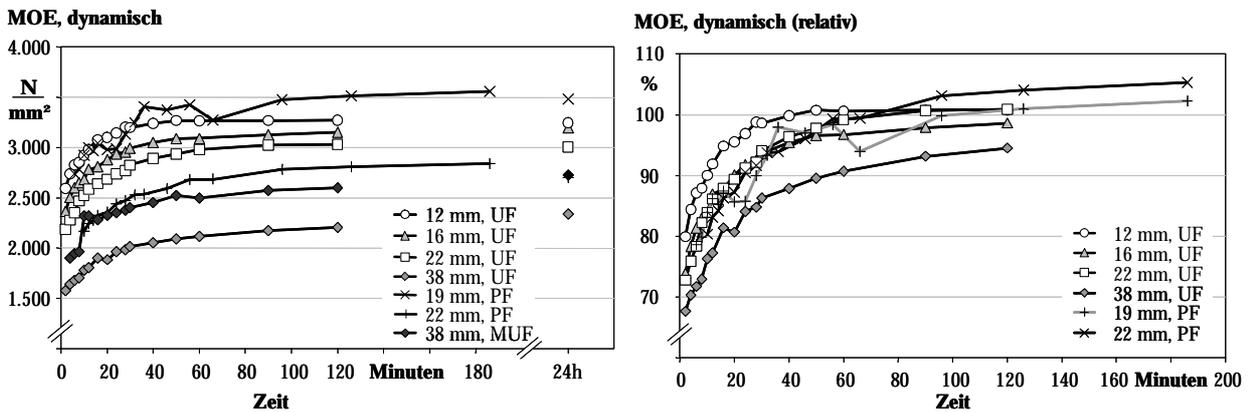


Abbildung 25: Änderung des dynamisch ermittelten Biege-Elastizitätsmoduls (links: absolut, rechts: relativ) ausgewählter Spanplatten während der Abkühlung nach dem Heißpressen.

Die Darstellung der relativen Werte des Biege-Elastizitätsmoduls (Abbildung 24 und Abbildung 25) zeigt, dass sich die Biege-Elastizitätsmoduln der Platten während der Abkühlung nahezu identisch verhalten. Geringfügige Unterschiede der jeweiligen Plattentypen sind nicht signifikant. Demgegenüber ist die Änderung der Biegefestigkeit deutlich nach Plattentyp und Plattenstärke zu differenzieren.

Während die Werte der Biege-Elastizitätsmoduln sämtlicher Platten unmittelbar nachdem Verpressen bei etwa 75% liegen, ist die Biegefestigkeit für dünnere Platten nach dem Verlassen der Presse bereits deutlich stärker ausgeprägt als die Festigkeit dickerer Platten. Im Vergleich zu UF-verleimten ist die Biegefestigkeit PF-verleimter Platten zu Beginn der Abkühlung wesentlich schwächer ausgeprägt.

$$\text{UF/MUF: } MOE, stat. = 0,7906 \cdot MOE, dyn. + 356 \quad R^2 = 0,94 \quad n = 109 \quad (34)$$

$$\text{UF/MUF: } MOR, stat. = 0,0061 \cdot MOE, dyn. - 2,9828 \quad R^2 = 0,89 \quad n = 109 \quad (35)$$

$$\text{PF: } MOE, stat. = 0,8968 \cdot MOE, dyn. - 371,80 \quad R^2 = 0,87 \quad n = 9 \quad (36)$$

$$\text{PF: } MOR, stat. = 0,0093 \cdot MOE, dyn. - 13,585 \quad R^2 = 0,83 \quad n = 9 \quad (37)$$

Zusammenhang zwischen den Biegeeigenschaften und der Temperatur

Der Biege-Elastizitätsmodul (dyn.) steigt um 0,34% je 1°C Temperaturabnahme (Mittelschicht) (Gleichung 38). Bei Untersuchungen von Kollmann (1951) wurde an Kiefernholz ein Anstieg in ähnlicher Größenordnung festgestellt (0,38% je 1°C Temperaturabnahme). Da der Biege-Elastizitätsmodul im Wesentlichen durch die Deckschichten bestimmt wird, ist der Einfluss der Oberflächentemperatur weitaus bedeutender als der der Mittelschicht. Dort macht sich eine Temperaturabnahme dann auch in einem Anstieg von 0,61% bzw. 0,57% bemerkbar. Mit diesen Gleichungen kann der Zusammenhang zwischen Temperatur und Biege-Elastizitätsmodul für alle untersuchten Platten beschrieben werden.

$$MOE, dyn. = -0,335 \cdot J_{MS} + 108,03 \quad R^2 = 0,86 \quad n = 141 \quad (38)$$

$$MOE, dyn. = -0,609 \cdot J_{OF} + 115,54 \quad R^2 = 0,88 \quad n = 141 \quad (39)$$

$$MOE, stat. = -0,568 \cdot J_{OF} + 113,82 \quad R^2 = 0,95 \quad n = 73 \quad (40)$$

wobei

$MOE, dyn.$ dynamisch ermittelter Biege-Elastizitätsmodul, rel. %

$MOE, stat.$ statisch ermittelter Biege-Elastizitätsmodul, rel. %

J_{OF} Temperatur der Plattenoberfläche °C

J_{MS} Temperatur der Plattenmittelschicht °C

Während des Heißpressens steigt die Temperatur in den Deckschichten auf annähernd Pressplattentemperatur an. Temperaturen von weit über 100°C liegen in der Regel für mehr als 60 Sekunden an. Daher kann davon ausgegangen werden, dass das Harz in Deckschichten nach dem Verlassen der Heißpresse nahezu vollständig ausgehärtet ist. Von Duroplasten ist ein elastisches Verhalten nur oberhalb einer Temperatur von 50°C bekannt (Römpf 1995). Da die Temperaturen der Deckschichten nach dem Heißpressen innerhalb von 10 bis 15 Minuten auf

50°C abfallen, wird hier angenommen, dass der Duroplast nur einen untergeordneten Einfluss auf die Temperaturabhängigkeit des Biege-Elastizitätsmoduls hat.

Die Biegefestigkeit zeigt ein anderes Verhalten während der Abkühlung. Hier sind die Zusammenhänge zur Temperatur individuell für die verschiedenen Leimtypen zu beschreiben (Gleichungen 41 bis 43). Demnach nimmt die Biegefestigkeit bei MUF und insbesondere bei PF-verleimten Platten wesentlich stärker zu als bei UF-verleimten Platten. Ursächlich hierfür ist sicherlich die Bedeutung der Mittelschicht für die Biegefestigkeit. Bei der Biegeprüfung hat das Versagen der Mittelschicht durch Schubspannungen einen wesentlichen Anteil an der maximalen Kraft. Die Schubspannungen wiederum werden in starkem Maße von der Qualität der Verklebung bestimmt. Von dieser ist bekannt, dass sie mit fortschreitender Abkühlung ansteigt (siehe Scherfestigkeit, Abschnitt 3.4.1.5).

$$\text{UF: } MOR = -0,597 \cdot J_{OF} + 110,02 \quad R^2 = 0,74 \quad n = 54 \quad (41)$$

$$\text{MUF: } MOR = -0,653 \cdot J_{OF} + 104,34 \quad R^2 = 0,98 \quad n = 9 \quad (42)$$

$$\text{PF: } MOR = -0,808 \cdot J_{OF} + 110,53 \quad R^2 = 0,95 \quad n = 10 \quad (43)$$

wobei

MOR Biegefestigkeit, relativ %

J_{OF} Temperatur der Plattenoberfläche °C

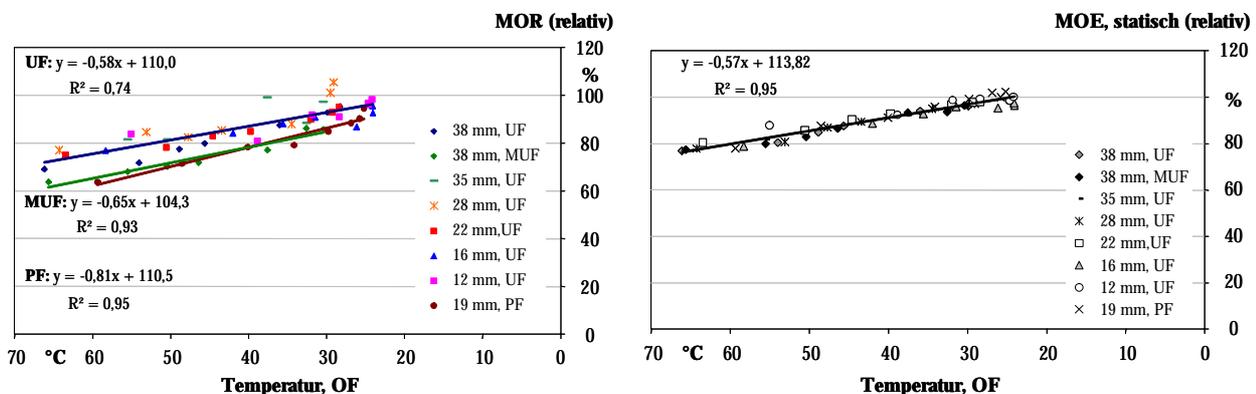


Abbildung 26: Zusammenhang zwischen Temperatur und Biegeeigenschaft (relativ) abkühlender Spanplatten.
links: Biegefestigkeit (statisch) rechts: Biege-Elastizitätsmodul (statisch)

3.4.2 Faserplatten

3.4.2.1 Temperaturänderung der frei auskühlenden Platten

Nach dem Verlassen der Heißpresse nehmen die Temperaturen der Mittelschicht ab. In Abbildung 27 ist die Änderung der Temperatur in der Mitte von Faserplatten mit verschiedenen Dicken bei frei luftumspülter Lagerung nach dem Heißpressen dargestellt. Wie bereits in Kapitel 3.4.1.1 beschrieben, ist Geschwindigkeit der Abkühlung abhängig von der Dicke der Platten. Es ist festzustellen, dass die Platten mit einer Dicke von 5 mm bereits etwa 30 Minuten nach Verlassen der Heißpresse die Umgebungstemperatur angenommen haben. Platten mit einer Dicke von 7 mm erreichen in der Mittelschicht nach etwa 40 Minuten, 12 mm Platten nach 55 Minuten, 16 mm Platten nach 75 Minuten und 22 mm Platten nach rund 90 Minuten Raumtemperatur.

Temperatur

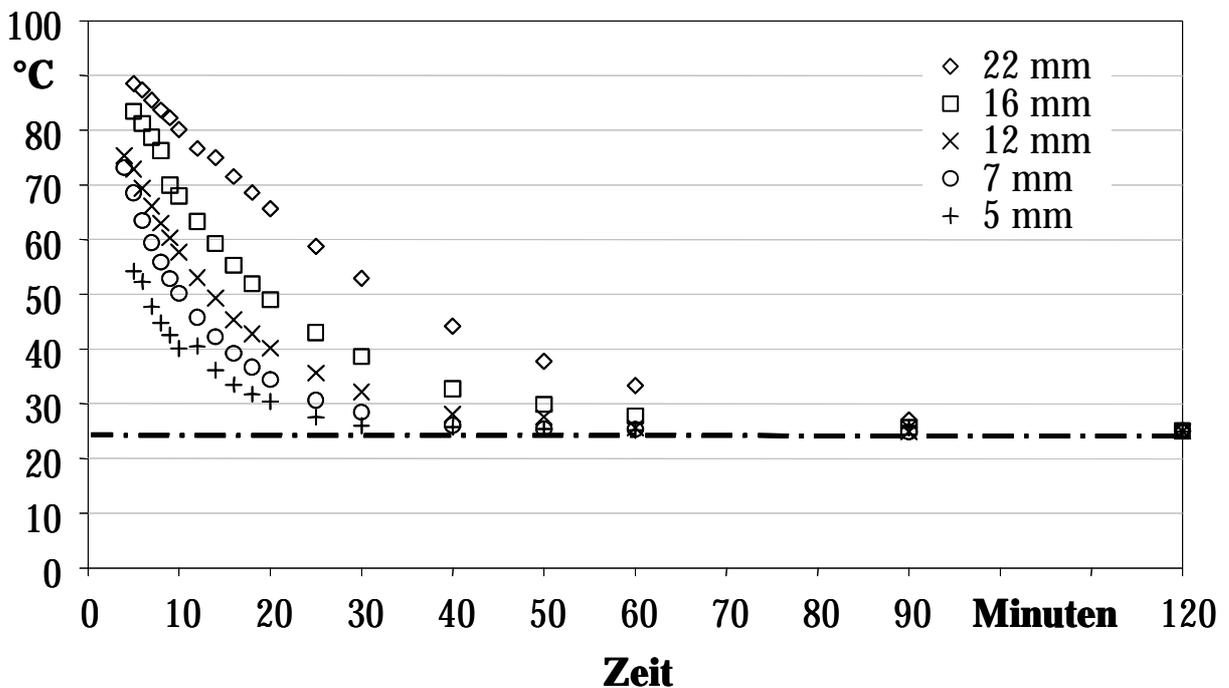


Abbildung 27: Änderung der Mittelschichttemperatur industriell hergestellter Faserplatten mit unterschiedlicher Dicke.

Entsprechend den Ausführungen über das Abkühlverhalten von frei luftumspülten Spanplatten (Abschnitt 3.3.1.1) gilt auch der Faserplatten der physikalischer Zusammenhang zwischen der Abkühlgeschwindigkeit und der Dichte sowie der Dicke der Platten.

3.4.2.2 Feuchte

In Abbildung 28 ist die Feuchte der verschiedenen Faserplatten während der Abkühlung über einen Zeitraum von 120 Minuten sowie der Messwert nach 24 Stunden dargestellt. Es wird ersichtlich, dass dünnere Platten die Presse mit einer deutlich geringeren Feuchte verlassen als dickere Platten. Die Gesamtfeuchte der Platten mit einer Dicke von 5,9 bzw. 7,4 mm liegen bei 3,3% und 4,2%. Die Feuchte der 12 mm und 22 mm Platten beträgt unmittelbar nach dem Verpressen zwischen 5,1% und 5,4%. Dieser Umstand ist darauf zurückzuführen, dass die Platten ab 12 mm zusätzlich vor dem Verpressen mit Dampf beaufschlagt wurden – hierzu kam das so genannte "Dampfschwert" zum Einsatz. Bereits im Zuge der Abkühlung innerhalb von 120 Minuten nimmt die Feuchte der Faserplatten merklich zu. Die Gleichgewichtsfeuchte nach Klimatisierung bei 20°C und 65% relativer Luftfeucht beträgt zwischen 6,9% und 7,8%.

Feuchte

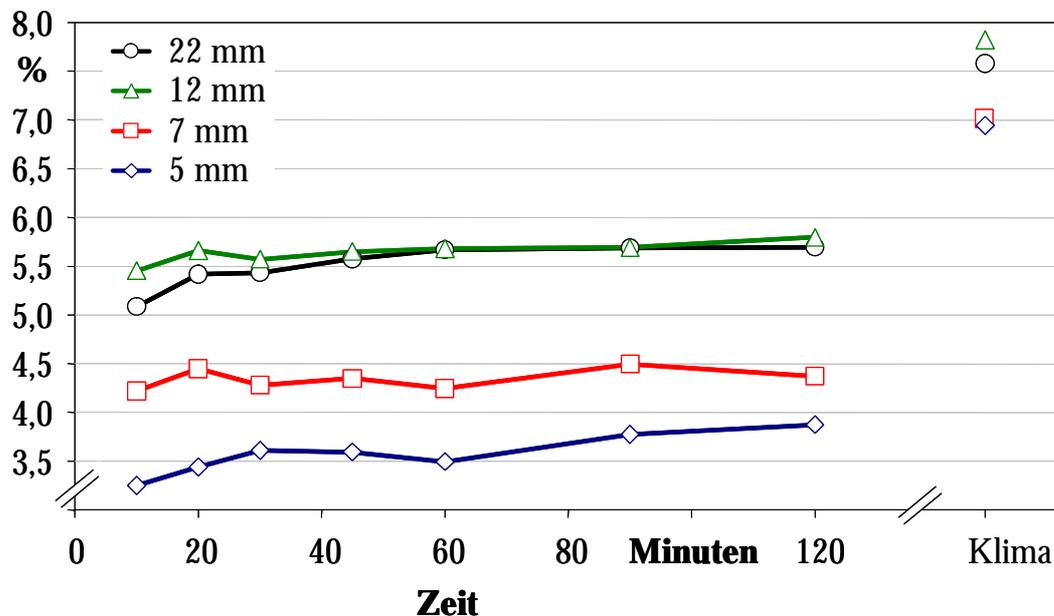


Abbildung 28: Änderung der Gesamtfeuchte von MDF.

Das Umgebungsklima ist wie folgt charakterisiert: Die Temperatur betrug zwischen 25°C und 30°C, die relative Luftfeuchte zwischen 40% und 50%. Daraus ergibt sich eine Gleichgewichtsfeuchte für Faserplatten von 7,5% bis 9,0%.

3.4.2.3 Plattendicke

In Abbildung 29 ist die Änderung der Dicke einer MDF mit einer Nenndicke von 12 mm während der Abkühlung nach der Heißpresse über einen Zeitraum von 120 Minuten dargestellt. Es ist erkennbar, dass die Dicke unmittelbar nach dem Pressen etwa 12,99 mm beträgt und im Zuge der Abkühlung auf 12,86 mm verringert wird. Etwa 40 Minuten nach dem Heißpressen ist dieser Wert erreicht. In diesem Zeitraum hat die Temperatur der gesamten Platte Umgebungstemperatur erreicht.

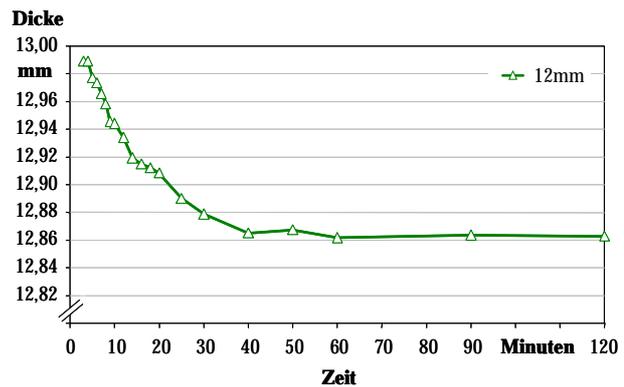


Abbildung 29: Änderung der Dicke nach dem Heißpressen – exemplarische Darstellung für eine MDF mit einer Nenndicke von 12 mm.

Die Dicke von Faserplatten wird mit einer Dicke zwischen 12 mm und 22 mm (MDF) während der Abkühlung nach Heißpresse um 1,0% bzw. 1,5% reduziert. Bei dünnen HDF ist eine geringere relative Änderung der Dicke während der Abkühlung von 0,5% zu verzeichnen (Tabelle 8).

Tabelle 8: Änderung der Plattendicke von MDF (absolut, relativ) nach dem Heißpressen.

Plattenstärke mm	Änderung absolut in mm nach 120 Minuten Abkühlung	Änderung relativ in % nach 120 Minuten Abkühlung
22 mm, MDF	-0,33	-1,5%
16 mm, MDF	-0,24	-1,4%
12 mm, MDF	-0,13	-1,0%
7,4 mm, HDF	-0,04	-0,5%
5,9 mm, HDF	-0,04	-0,5%

3.4.2.4 Schallgeschwindigkeit

Während der Abkühlung nach dem Heißpressen nimmt die Schallgeschwindigkeit senkrecht zur Plattenebene degressiv zu. In Abbildung 30 ist die Zunahme der berührend ermittelten Schallgeschwindigkeit der Faserplatten dargestellt. Es werden die unterschiedlichen Niveaus der Schallgeschwindigkeit für die variierende Dicke deutlich. Die Werte für dünne Platten sind deutlich höher als die der dicken Platten. Es wird auch ersichtlich, dass die Schallgeschwindigkeit senkrecht zur Plattenebene während der Abkühlung deutlich zunimmt. Die relative Darstellung der berührend ermittelten Schallgeschwindigkeit in Abbildung 31 verdeutlicht die unterschiedliche Zunahme.

Schallgeschwindigkeit, berührend

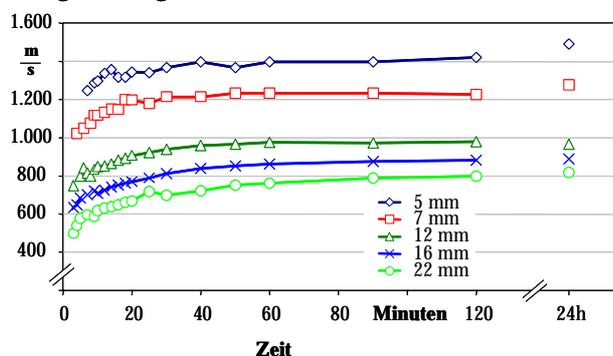


Abbildung 30: Schallgeschwindigkeit (berührend, absolut) von Faserplatten während der Abkühlung.

Schallgeschwindigkeit, berührend (relativ)

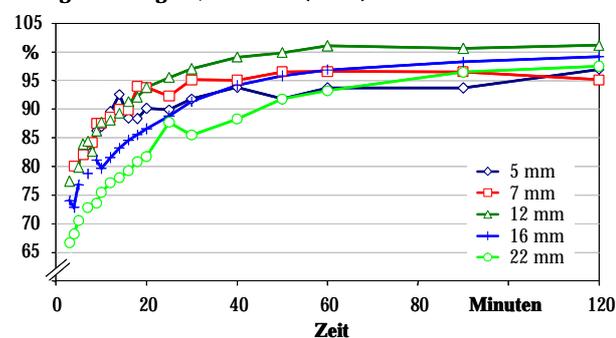


Abbildung 31: Schallgeschwindigkeit (berührend, relativ) von Faserplatten während der Abkühlung.

Unmittelbar nach dem Verpressen der 22 mm MDF ist die Schallgeschwindigkeit erst zu 65% ausgeprägt (Messwert nach 24 Stunden = 100%) und bei der 5 mm HDF zu 84%.

Zusammenhang zwischen der Schallgeschwindigkeit und der Temperatur

Die höchste Schallgeschwindigkeit ist annähernd zu dem Zeitpunkt erreicht, an dem sich Platten- und Umgebungstemperatur weitgehend angeglichen haben. In Abbildung 32 und Abbildung 33 ist die Schallgeschwindigkeit (relativ berührend und berührungslos ermittelt) gegen die Temperatur der Plattenmittelschicht aufgetragen. Die Änderung der Schallgeschwindigkeit kann sehr gut mit einer linearen Regressionen beschrieben werden. Mit 1°C Temperaturabnahme steigt die Schallgeschwindigkeit um 0,41% (berührend) oder um 0,56% (berührungslos).

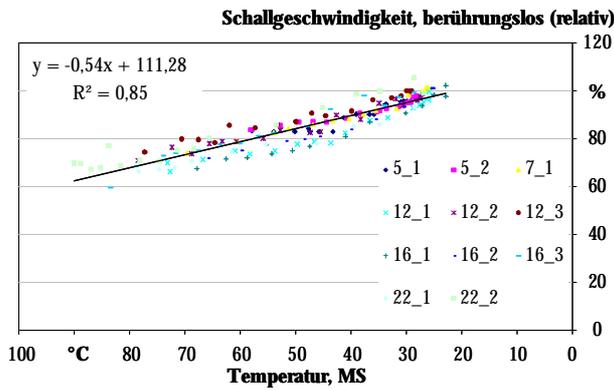


Abbildung 32: Zusammenhang zwischen Temperatur und Schallgeschwindigkeit (berührungslos, relativ) abkühlender Faserplatten unterschiedlicher Dicke.

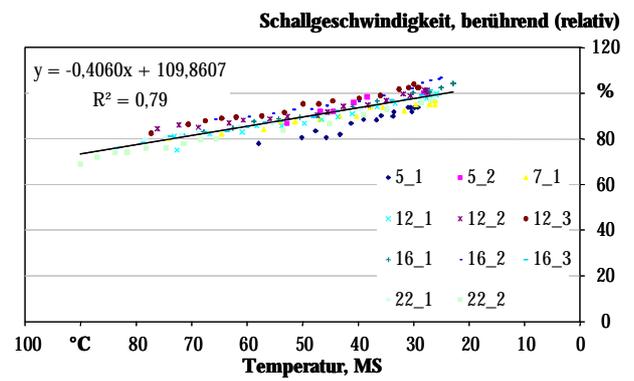


Abbildung 33: Zusammenhang zwischen Temperatur und Schallgeschwindigkeit (berührend, relativ) abkühlender Faserplatten unterschiedlicher Dicke.

Im folgenden sind die Ausgleichsgeraden zwischen den Messwerten der Schallgeschwindigkeit und der Temperatur (Oberfläche und Mittelschicht) aufgeführt:

Berührungslos

$$c_{Modu} = -0,5434 \cdot J_{MS} + 111,28 \quad R^2 = 0,85 \quad n = 173 \quad (44)$$

$$c_{Modu} = -0,9832 \cdot J_{OF} + 125,30 \quad R^2 = 0,85 \quad n = 173 \quad (45)$$

Berührend

$$c_{BPV} = -0,4060 \cdot J_{MS} + 109,86 \quad R^2 = 0,79 \quad n = 156 \quad (46)$$

$$c_{BPV} = -0,6956 \cdot J_{OF} + 118,83 \quad R^2 = 0,79 \quad n = 156 \quad (47)$$

wobei

c_{Modu} Schallgeschwindigkeit – berührungslos, relativ %

c_{BPV} Schallgeschwindigkeit – berührend, relativ %

J_{MS} Temperatur – Mittelschicht °C

J_{OF} Temperatur – Oberfläche °C

3.4.2.5 Biegeeigenschaften

Auch die Biegeeigenschaften der Faserplatten nehmen nach dem Verlassen der Heißpresse während der Abkühlung zu. In Abbildung 34 ist die Änderung des dynamisch ermittelten Biege-Elastizitätsmoduls dargestellt. Es zeigt sich, dass die Werte für dünne HDF (5,9 mm und 7,4 mm) auf einem grundsätzlich höherem Niveau liegen, als die der MDF mit einer Dicke von 12 mm, 16 mm und 22 mm. Dies bestätigt sich auch an den statisch ermittelten Werten des Biege-E-Moduls (Abbildung 36) und der Biegefestigkeit (Abbildung 37).

In der relativen Darstellung der Ergebnisse des Biege-Elastizitätsmoduls (Abbildung 35) ist die unterschiedliche Entwicklung der verschiedenen Dicken ersichtlich. Unmittelbar nach dem Verpressen beträgt der relative Wert der 22 mm MDF etwa 65% und der Wert der 5 mm HDF 85% des Messwertes nach vollständiger Abkühlung.

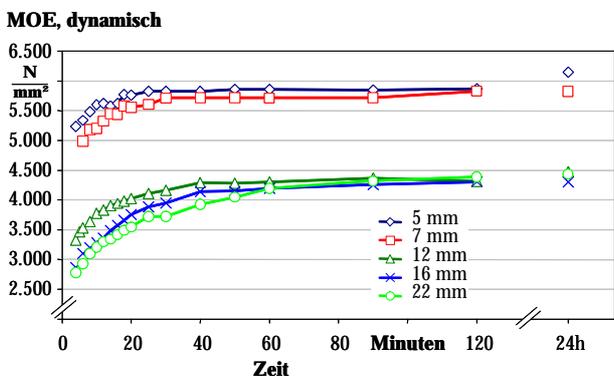


Abbildung 34: Änderung des dynamisch ermittelten Biege-Elastizitätsmoduls von Faserplatten während der Abkühlung nach dem Heißpressen.

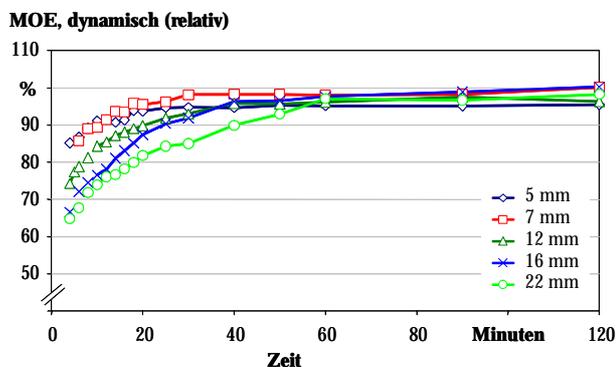


Abbildung 35: Änderung des dynamisch ermittelten Biege-Elastizitätsmoduls (relativ) von Faserplatten während der Abkühlung nach dem Heißpressen.

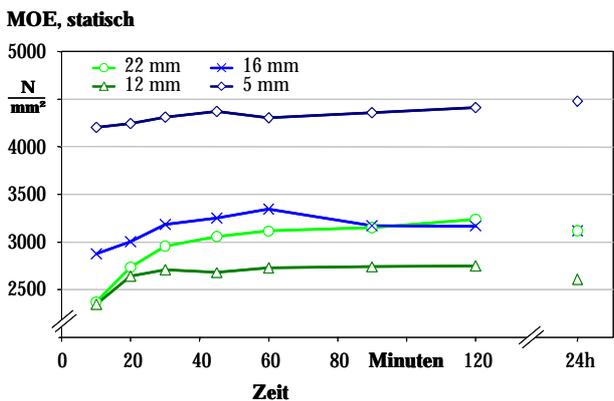


Abbildung 36: Änderung des statisch ermittelten Biege-Elastizitätsmoduls von Faserplatten während der Abkühlung nach dem Heißpressen.

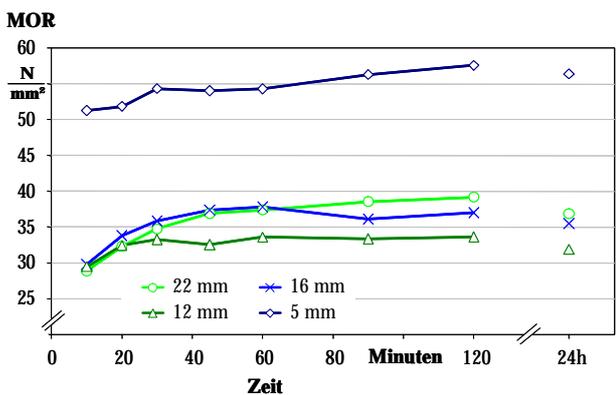


Abbildung 37: Änderung der Biegefestigkeit von Faserplatten während der Abkühlung nach dem Heißpressen.

Zusammenhang zwischen den Biegeeigenschaften und der Temperatur

Bei den Faserplatten ist die Änderung der Biegeeigenschaften nach dem Heißpressen ist ebenso von der Temperatur abhängig wie dies für Spanplatten aufgezeigt wurde (siehe Abschnitt 3.4.1.5). Der Zusammenhang dieser Eigenschaften mit der Temperatur, lässt sich durch eine lineare Regression sehr gut beschreiben (Abbildung 38).

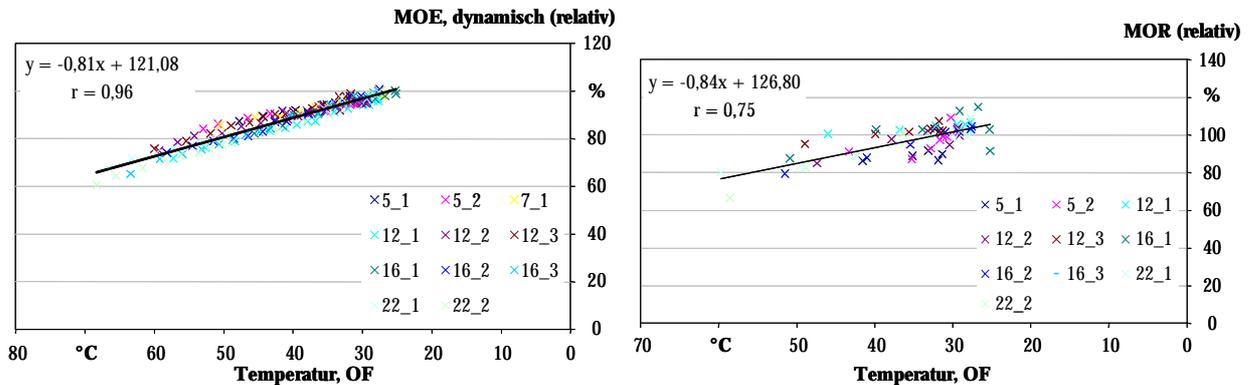


Abbildung 38: Zusammenhang zwischen Oberflächentemperatur und Biegeeigenschaft (relativ) abkühlender Faserplatten.

links: Biege-Elastizitätsmodul (dynamisch)

rechts: Biegefestigkeit (statisch)

Im folgenden sind die Ausgleichsgeraden zwischen den Biegeeigenschaften und der Temperatur auf der Oberfläche und in der Mittelschicht aufgeführt:

$$MOE, dyn. = -0,4499 \cdot J_{MS} + 109,76 \quad R^2 = 0,93 \quad n = 157 \quad (48)$$

$$MOE, dyn. = -0,8067 \cdot J_{OF} + 121,08 \quad R^2 = 0,93 \quad n = 157 \quad (49)$$

$$MOE, stat. = -0,3337 \cdot J_{MS} + 111,76 \quad R^2 = 0,29 \quad n = 62 \quad (50)$$

$$MOE, stat. = -0,6518 \cdot J_{OF} + 122,04 \quad R^2 = 0,37 \quad n = 62 \quad (51)$$

$$MOR = -0,4585 \cdot J_{MS} + 114,65 \quad R^2 = 0,51 \quad n = 62 \quad (52)$$

$$MOR = -0,8360 \cdot J_{OF} + 126,80 \quad R^2 = 0,57 \quad n = 62 \quad (53)$$

wobei

$MOE, dyn.$ dynamisch ermittelter Biege-Elastizitätsmodul, rel. %

$MOE, stat.$ statisch ermittelter Biege-Elastizitätsmodul, rel. %

MOR statisch ermittelte Biegefestigkeit, rel. %

J_{OF} Temperatur der Plattenoberfläche °C

J_{MS} Temperatur der Plattenmittelschicht °C

3.4.2.6 Querzugfestigkeit

In Abbildung 39 ist die Änderung der Querzugfestigkeit der Faserplatten während der Abkühlung nach dem Heißpressen dargestellt. Wie bei den anderen Eigenschaften ist auch hier eine deutliche Zunahme über den betrachteten Zeitraum zu verzeichnen. Die Genauigkeit der Aussage über das Verhalten der Faserplatten hinsichtlich der Querzugfestigkeit wird allerdings durch erhöhte Streuung der Mittelwerte überlagert. Jeder einzelne Punkt im Graphen stellt den Mittelwert aus bis zu neun Einzelwerten.

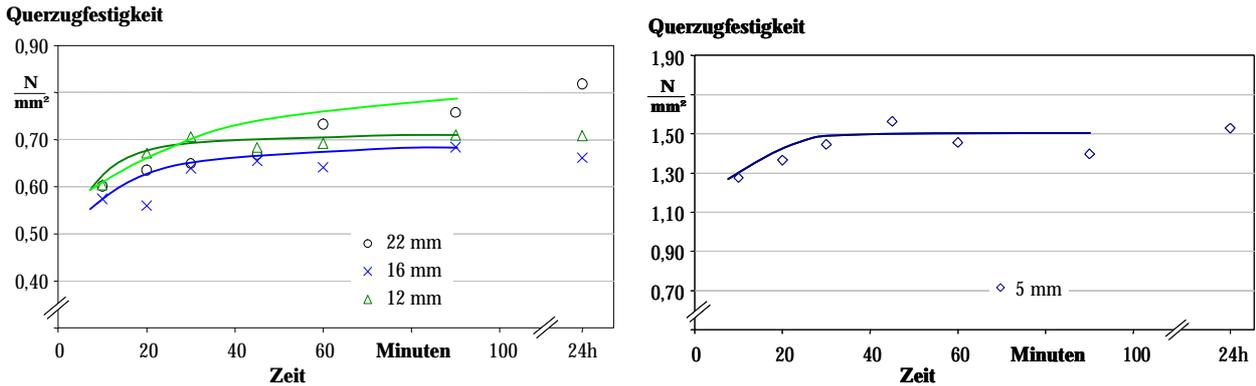


Abbildung 39: Änderung der Querzugfestigkeit nach dem Verlassen der Heißpresse.
links: MDF, Dicke: 12 mm bis 22 mm rechts: HDF, Dicke: 5 mm

Zusammenhang zwischen Querzugfestigkeit und Temperatur

In Abbildung 40 ist der prinzipielle Zusammenhang zwischen der Querzugfestigkeit (relativ) und der Temperatur erkennbar. Die Güte der Korrelation ist allerdings nicht ausreichend, um die Regressionen für diesen Zusammenhang aufzustellen, zumal hier keine Normalverteilung der Messwerte vorliegt.

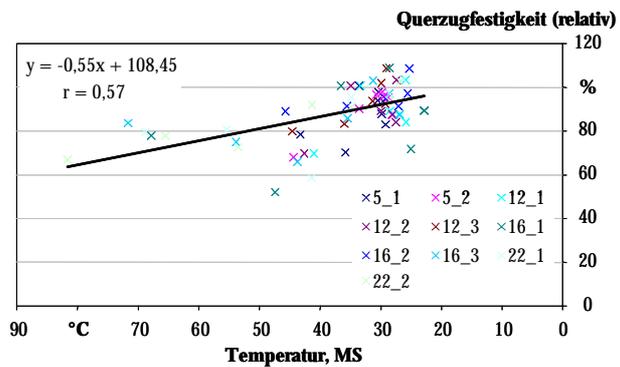


Abbildung 40: Zusammenhang zwischen Querzugfestigkeit (rel.) und Mittelschichttemperatur.

3.5 Vergleich von Span- und Faserplatten

Temperatur und Feuchte

Sowohl für Span- aus auch für Faserplatten gilt der physikalischer Zusammenhang zwischen der Abkühlgeschwindigkeit und der Dichte sowie der Dicke der Platten. Zur Vereinfachung kann auch hier das Flächengewicht herangezogen werden, um die Abkühlzeit abzuschätzen (Abbildung 41). Beide Größen stehen bei annähernd gleichen Umgebungsbedingungen in einem engen logarithmischen Zusammenhang. Dass der Zusammenhang nicht linear ist, lässt sich wie folgt begründen: Die Platten mit einem höheren Flächengewicht hatten produktionsbedingt eine höhere Feuchte (Abbildung 13 und Abbildung 28). Mit steigender Feuchte nimmt die Temperaturleitfähigkeit zu (Schmid 1976), somit kühlen Platten mit einer höheren Feuchte verhältnismäßig schneller aus. Daher wird die Steigung der Kurve mit zunehmendem Flächengewicht (und gleichzeitig zunehmender Feuchte) kleiner.

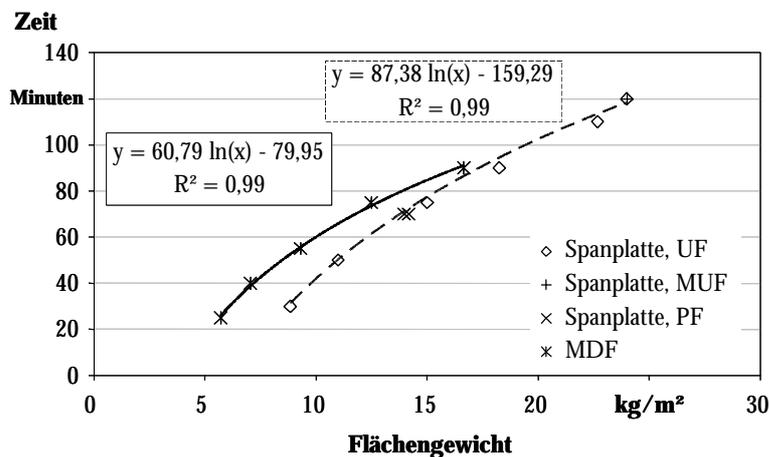


Abbildung 41: Zusammenhang zwischen dem Flächengewicht und der Dauer bis zur vollständigen Auskühlung.

Auf die Abkühlung haben darüber hinaus unter anderem noch die Strömungsgeschwindigkeit der Luft und deren Wärmekapazität sowie die Temperaturdifferenz und die Plattenfeuchte einen Einfluss, die aber selbst bei den sehr unterschiedlichen Bedingungen der Industrieuntersuchungen⁵ vernachlässigt werden konnten, so dass dieser Zusammenhang übergreifend gilt. Es wird dabei ein deutlicher Unterschied zwischen den Span- und Faserplatten ersichtlich. Unterhalb eines Flächengewichtes von etwa 20 kg/m² ist die Abkühlung auf Umgebungstemperatur der Faserplatten bei gleichem Gewicht immer deutlich langsamer als bei den Spanplatten. Die Ursache dafür ist in erster Linie darin zu sehen, dass die thermischen Eigenschaften (v.a. die Wärmeleitfähigkeit) von Span- und Faserplatten deutliche Unterschiede aufweisen (vgl. Kollmann und Malmquist 1956). Zudem sind die funktionellen Zusammenhänge

⁵ Messungen	Temperatur	relative Luftfeuchte
Spanplatte (UF und MUF)	20 .. 30°C	40 .. 65%
Spanplatte (PF)	20 .. 25°C	50 .. 70%
Faserplatte	25 .. 30°C	40 .. 50%

zwischen der Wärmeleitfähigkeit und der Temperatur, Feuchte sowie Dichte für Faserplatten und Spanplatten unterschiedlich (v.Haas 1998).

Plattendicke

Die Plattendicke, sowohl der Spanplatten als auch der Faserplatten, nimmt während der Abkühlung nach dem Heißpressen erkennbar ab. Die Dicke von Spanplatten wird innerhalb der ersten zwei Stunden nach dem Heißpressen um etwa 1%, unabhängig von der Nenndicke, reduziert. Bei den Faserplatten hingegen wird die Dickenabnahme von der Nenndicke und der Dichte beeinflusst. Während die Dicke der 22 mm MDF um 1,5% vermindert wird, sinkt der Wert einer HDF um lediglich 0,5%. Es erscheint, als würde sich Faserplatten von der Spanplatte auch hinsichtlich der Dickenkontraktion durch die Abkühlung unterscheiden. Wie oben bereits erwähnt, ist eine sinnvolle rechnerische Abschätzung nicht möglich, da exakte Materialkenngrößen nicht vorliegen. Das Verhalten der Platten kann aber wie folgt erklärt werden:

Beim Verlassen der Presse wird der äußere Druck auf die Platte durch die Pressstempel oder – Bänder sehr schnell abgebaut. Durch Rückstellkräfte der Holzpartikel federt die Platte zurück ("Spring-Back"). Es ist vorstellbar, dass bedingt durch den zu diesem Zeitpunkt vorhandenen Dampfdruck im Inneren der Platte die Rückfederung stärker ausfällt und die Platte in ihrer Dicke überdehnt wird. Dies kann dadurch begünstigt werden, dass zu diesem Zeitpunkt die Temperatur der Platte sehr hoch und somit auch die Flexibilität des Materials erhöht ist. Dadurch entstehen in der Platte Querspannungen. Aufgrund des elastischen Verhaltens des Holzes bewirken diese Zugspannungen wiederum eine Kontraktion der Platte. Nach dem eigentlichen "Spring-Back" wird auf diese Weise die Dicke der Platte um durchschnittlich 1% reduziert. Bei dünnen Faserplatten mit einer hohen Dichte (HDF) ist eine deutlich geringere Dickenabnahme während der Abkühlung erkennbar als bei den MDF. Dies ist vermutlich darauf zurückzuführen, dass die Steifigkeit des Materials aufgrund der höheren Dichte größer ist. Zudem sinkt die Temperatur dieser dünnen Platten deutlich schneller; auch dadurch wird die Steifigkeit des Materials erhöht. Daher fällt der "Spring-Back" und auch die Kontraktion der HDF vergleichsweise geringer aus. Wenn also der "Spring-Back" geringer ist, schrumpft die Platte während der Abkühlung um einen geringeren Betrag. Diese Aussage wird durch Untersuchungen von Roll et al. (2001) unterstützt. Die Autoren wiesen nach, dass durch eine Kühlzone am Ende der Presse einer Temperatur von 85°C der Gasdruck in der Platte nahezu halbiert wird. Gleichzeitig wurde eine deutliche Verminderung der Dickenabnahme während der Abkühlung nachgewiesen.

Schallgeschwindigkeit

Für Span- und für Faserplatten nimmt die Schallgeschwindigkeit während der Abkühlung nach dem Heißpressen zu. Bis zur vollständigen Auskühlung der Platten ist eine degressive Zunahme der Schallgeschwindigkeit senkrecht zur Plattenebene feststellbar. Es besteht ein guter linearer Zusammenhang zwischen der Eigenschaft und der Plattentemperatur. Die relativen Werte unmittelbar nach dem Pressen, bezogen auf den Wert nach 24 Stunden, der Faserplatten ist

deutlich geringer als die der Spanplatten. Die Schallgeschwindigkeit der Spanplatten mit einer Dicke von 22 mm beträgt im heißen Zustand etwa 83% und der 22 mm Faserplatten lediglich 55% des Wertes nach Abkühlung. Gleichzeitig sind die Steigungsfaktoren der Regression zwischen der Schallgeschwindigkeit und der Plattentemperatur für Faserplatten deutlich höher. Während die berührungslos ermittelte Schallgeschwindigkeit der UF-verleimten Spanplatten bei einer Temperaturminderung von 1°C in der Mittelschicht um etwa 0,23% steigt, nimmt die Schallgeschwindigkeit der Faserplatten um rund 0,54% zu.

Als Ursache für die stärkere Schallgeschwindigkeitszunahme der Faserplatten kann die geringere Auskühlgeschwindigkeit angeführt werden. Es wurde bereits festgestellt, dass nicht nur die Temperatur die Eigenschaftsänderung beeinflusst, sondern auch die Dauer der Temperatureinwirkung. Dies kann folgendermaßen erklärt werden:

Es wurde erkannt, dass Platten mit größerer Dicke langsamer abkühlen als Platten mit geringerer Dicke. Gleichzeitig nehmen die jeweiligen Festigkeitseigenschaften, relativ bezogen auf den Wert nach vollständiger Abkühlung, bei den Platten mit höherer Dicke stärker zu. Dies führt zu dem Schluss, dass die Eigenschaften der Platten mit geringerer Abkühlgeschwindigkeit stärker zunehmen. Wie oben dargestellt, ist dies auch im Vergleich zwischen Span- und Faserplatten zu beobachten. Es muss angemerkt werden, dass Faserplatten mit einem Klebsystem hergestellt werden, das andere Eigenschaften als ein UF-Harz für die Verwendung in Spanplatten aufweist.

Querzugfestigkeit

Analog zur Schallgeschwindigkeit ist auch für die Prüfwerte der zerstörend ermittelten Scher- und Querzugfestigkeit zu erkennen, dass diese Eigenschaften für die Faserplatten während der Auskühlung nach dem Heißpresse stärker ansteigt. Wenngleich die Streuung der Messergebnisse verhältnismäßig groß ist und unterschiedliche Prüfmethode zur Ermittlung der Festigkeit in der Mittelschicht der Platte angewandt wurden, so ist dennoch feststellbar, dass unmittelbar nach dem Verpressen der 12 mm bis 22 mm dicken Spanplatten die Klebfestigkeit zu 85% bis 91% und bei den Faserplatten mit gleicher Dicke lediglich zu 75% bis 85% ausgeprägt ist.

Biegeeigenschaften

Für den dynamischen Biege-Elastizitätsmodul ist ebenfalls ersichtlich, dass diese Eigenschaft während der Abkühlung bei den Faserplatten stärker zunimmt, als bei Spanplatten mit entsprechender Dicke. Hinsichtlich der statisch ermittelten Biegeeigenschaften ist dieser Effekt nicht erkennbar.

3.6 Zusammenfassung

- ✓ Die Eigenschaften von Span- und Faserplatten nach dem Verlassen der Heißpresse verändern sich im Laufe der Abkühlung deutlich. In den folgenden Tabellen sind die Eigenschaften der industriell gefertigten Spanplatten (Tabelle 9) und MDF-Platten (Tabelle 10) direkt nach dem Verlassen der Heißpresse im Verhältnis zu den Eigenschaften nach 24 Stunden im Überblick dargestellt.

Tabelle 9: Verhältnis der Eigenschaften von Spanplatten direkt nach dem Pressen und nach 24 Stunden.

Platten Typ	Flächen- gewicht kg/m²	t	C_{ber.los}	C_{ber.}	MOE_{stat}	MOE_{dyn.}	MOR_{stat.}
38 UF	24,0	0,81	0,83	0,81	0,69	0,68	0,77
28 UF	18,2	0,90	0,77	0,80	0,77	0,72	0,78
22 UF	15,0	0,85	0,77	0,80	0,75	0,73	0,80
16 UF	11,0	0,89	0,74	0,80	0,77	0,74	0,79
12 UF	8,8	0,91	0,80	0,87	0,84	0,80	0,88
38 MUF	24,0	0,67	0,84	0,79	0,64	0,68	0,77
19 PF	14,2	0,63	0,66	0,73	0,59	0,79	0,77

Tabelle 10: Verhältnis der Eigenschaften von MDF direkt nach dem Pressen und nach 24 Stunden.

Platten Typ	Flächen- gewicht kg/m²	QZ	C_{ber.los}	C_{ber.}	MOE_{stat}	MOE_{dyn.}	MOR_{stat.}
22 MDF	15,7	0,75	0,55	0,67	0,76	0,65	0,78
16 MDF	11,7	0,83	0,58	0,74	0,90	0,67	0,84
12 MDF	8,6	0,85	0,68	0,77	0,92	0,74	0,90
7,4 HDF	6,4	n.g.	0,74	0,80	n.g.	0,86	n.g.
5,9 HDF	5,2	0,87	0,77	0,84	0,94	0,85	0,92

n.g.: nicht geprüft

- ✓ Die Temperaturen in den Deckschichten sinken zunächst rapide. Die Temperaturen von Deck- und Mittelschichten gleichen sich immer stärker an und erreichen nach 30 bis 120 Minuten Raumtemperatur. Die Abkühlung kann anhand des Flächengewichts der Platten abgeschätzt werden. Faserplatten kühlen unter annähernd gleichen Bedingungen langsamer ab als Spanplatten.
- ✓ Nach dem Pressen ist die Feuchte der Deckschichten wesentlich geringer als die der Mittelschicht. Die Feuchte der Deckschichten steigt während der Abkühlung deutlich an, die der Mittelschicht nimmt nur marginal zu. Die Änderungen der Feuchte werden in starkem Maße von der Differenz zwischen Momentan- und Gleichgewichtsfeuchte bestimmt. Nach Klimatisierung bleibt eine Feuchtedifferenz zwischen Deck- und Mittelschicht von ca. 1% bestehen.

- ✓ Die Schallgeschwindigkeit von Spanplatten steigt während der Abkühlung degressiv an. Direkt nach dem Verlassen der Heißpresse liegt ihr Wert zwischen 55% und 87% des Wertes nach 24 Stunden. Zwischen den Temperaturen der Platte und der Schallgeschwindigkeit bestehen stramme lineare Zusammenhänge. Das eingesetzte Leimsystem hat einen entscheidenden Einfluss auf die Ausprägung der Schallgeschwindigkeit. PF-verleimte Spanplatten zeigen eine besonders starke Zunahme der Schallgeschwindigkeit während der Abkühlung. Die Eigenschaftszunahme ist bei Faserplatten größer als bei Spanplatten (beide UF-verleimt).
- ✓ Die Scherfestigkeit der Spanplatten beträgt unmittelbar nach dem Heißpressen zwischen 63% und 90% des Wertes nach 24 Stunden. Im Laufe der Abkühlung steigt die Scherfestigkeit degressiv an. Zwischen der Temperatur der Platte und der Scherfestigkeit besteht ein guter Zusammenhang. Der Einfluss des verwendeten Leimtyps ist deutlich. Das PF-Harz hrtert während der Abkühlung wesentlich stärker nach.
- ✓ Die Querkzugfestigkeit der Faserplatten zeigt direkt nach Verlassen der Heißpresse zwischen 75% und 87% der Endfestigkeit. Die Querkzugfestigkeit der Faserplatten steigt während der Abkühlung stärker an als bei vergleichbaren Spanplatten.
- ✓ Der Biege-Elastizitätsmodul steigt im Zuge der Abkühlung degressiv an. Direkt nach dem Pressen weisen die Moduln 64% bis 84% des Wertes nach 24 Stunden auf. Zwischen der Temperatur der Platten und den Modulen besteht für alle Platten ein strenger linearer Zusammenhang.
- ✓ Die Biegefestigkeit steigt während der Abkühlung degressiv an. Der Anstieg ist bei PF- und MUF-verleimten Platten größer als bei UF-verleimten Platten. Die individuellen Zusammenhänge zwischen Temperatur und Biegefestigkeit sind signifikant.
- ✓ Anhand der Temperatur können die Änderungen der Platteneigenschaften nach dem Verlassen der Heißpresse nachvollzogen werden. In den meisten Fällen können die Regressionen zwischen der Oberflächen- und Mittelschichttemperatur sowie den jeweiligen Eigenschaften während der Abkühlung ermittelt werden. Mit Hilfe dieser Regressionen ist es möglich, die Eigenschaftsentwicklung im Zuge der Abkühlung zu errechnen.
- ✓ In Kombination mit der Temperatur spielt auch die Zeit eine wichtige Rolle für die Ausprägung der Eigenschaften. Es hat sich gezeigt, dass die Eigenschaften der Platten mit einer geringeren Abkühlgeschwindigkeit nach dem Heißpressen vergleichsweise stärker zunehmen als der Platten mit höherer Abkühlgeschwindigkeit. So nimmt die Zeitspanne bis zur vollständigen Abkühlung bei Platten mit höherer Dicke zu, und gleichzeitig ist die Zunahme der jeweiligen Eigenschaft der dickeren Platten während der Abkühlung relativ größer.

Bedeutung für die industrielle Praxis

1. Der Laborschnitt kann unter immer gleichen Bedingungen bis zur vollständigen Auskühlung vor der Prüfung gelagert werden, um zuverlässige und vergleichbare Ergebnisse für die Qualitätskontrolle zu erzielen.
2. Unter Berücksichtigung der Probentemperatur kann die Prüfung auch bereits wesentlich schneller durchgeführt werden. Die aufgezeigten Korrelationen zwischen der Eigenschaftsentwicklung und der Oberflächen- oder Mittelschichttemperatur der Platten sind unter gleichen Bedingungen als Korrekturfunktionen geeignet.
3. Unter industriellen Bedingungen können zerstörungsfreie Prüfmethode zur Optimierung der Prozesskontrolle unmittelbar hinter der Presse implementiert werden. Die Messergebnisse dieser Prüfmethode können mit Hilfe der ermittelten Temperatur- und Eigenschaftskorrelationen auf den zu erwartenden Messwert nach der vollständigen Abkühlung abgeschätzt werden.

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 aufgespalten. An den einzelnen Schichten wurde die Feuchte mittels Darmmethode (EN 322) ermittelt.

Parallel wurde die Temperatur innerhalb der Stapel an mehreren Stellen aufgezeichnet. Dazu wurden Thermoelemente in verschiedenen Positionen des Stapels jeweils zwischen zwei Platten eingebracht.

4.2.3 Temperatur im Plattenstapel

In Abbildung 43 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 (zwischen 2. und 3. Platte von oben) unterscheiden sich die Temperaturverläufe nur geringfügig.

Die Kurven (Abbildung 43) 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 schneller als die Mittelschicht ab, nachdem die Platten die Heißpresse verlassen haben (vgl. Abschnitt 3.4.1.1). 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 und somit der Ausgleich der Temperaturen innerhalb des Stapels erfasst. Es ist daraus abzuleiten, dass die Homogenisierung der Temperatur im Stapel einen Zeitraum von etwa 12 Stunden in Anspruch nimmt.

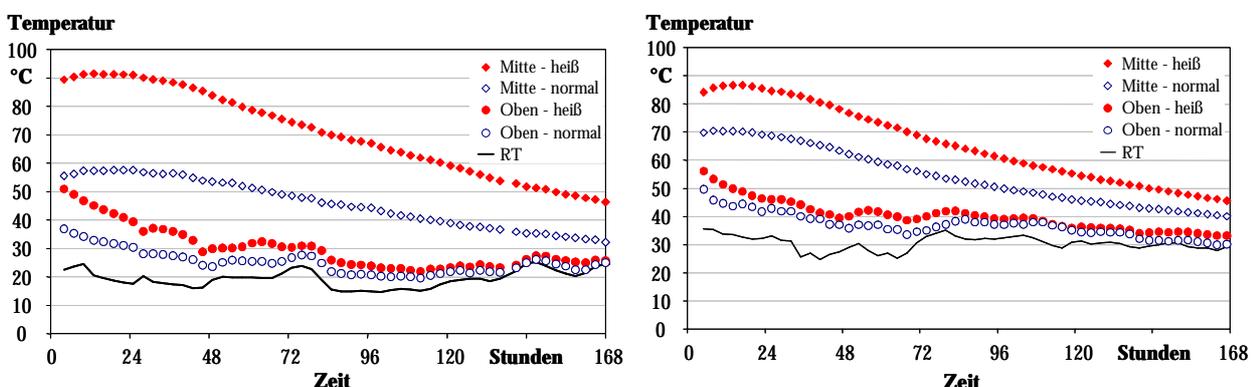


Abbildung 43: Temperaturänderung während der Stapellagerung der UF-Platten bei normaler und hoher Einstapeltemperatur.

links: 22 mm

rechts: 38 mm

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 bekanntermaßen hohen Eigenschaftsschwankungen von Spanplatten quer zur Produktionsrichtung eliminiert werden. Zu diesem Zweck wurden 500 x 500 mm² große Probeplatten in Längsrichtung der Produktion entnommen. Es ist bekannt, dass die Eigenschaftsschwankungen längs kleiner sind als quer zur Produktionsrichtung. Die Probeplatten wurden 500 mm vom Produktionsrand aus drei direkt aufeinander folgenden Platten (Größe der Platten: 5.200 x 2.070 mm²) 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 realen 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 nach 24 Stunden Wasserlagerung, die Querzugfestigkeit und die Feuchte ermittelt wurden.

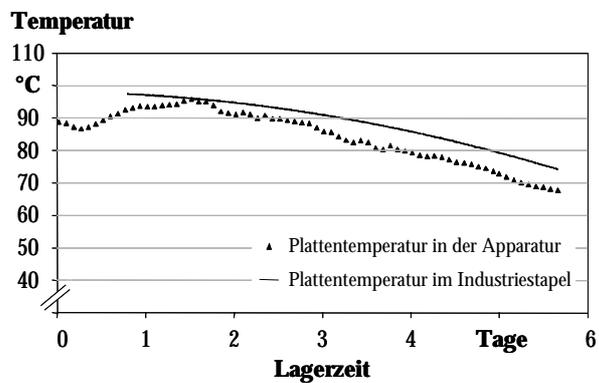


Abbildung 45: Änderung der Plattentemperatur im Industriestapel und im simulierten Stapel.

Zeitgleich zu dem untersuchten Industriestapel wurden die in der Apparatur eingelagerten Platten geprüft. Es wurde versucht, die Temperatur des Industriestapels in der Apparatur nachzustellen. In Abbildung 45 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 nach 24 Stunden Wasserlagerung, die Querzugfestigkeit und die Feuchte ermittelt wurde.

Die Ergebnisse zeigen, dass Platten, die in der Apparatur gelagert wurden, ähnliche Eigenschaftsänderungen aufweisen, wie die Platte aus dem Industriestapel (Abbildung 46). Insbesondere ist bei der Querzugfestigkeit 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

Abbildung 47 dargestellt. Die deutliche Abnahme der Querzugfestigkeit mit der Zeit ist ein eindeutiges Indiz dafür, dass die Leimverbindungen in der Platte, vergleichbar mit industriellen Bedingungen, degradiert wurden (vergleiche Kiosseff 1971 und Ginzel 1973).

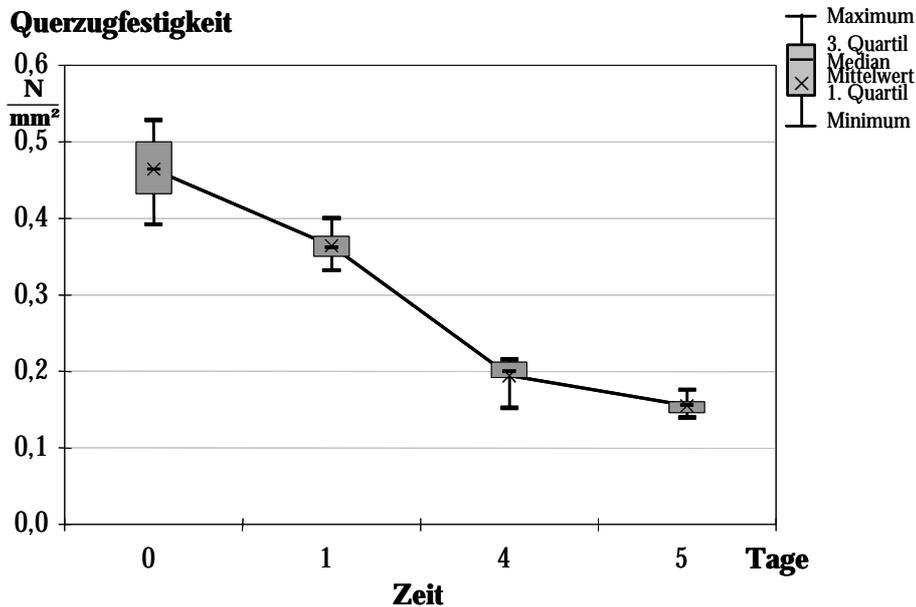


Abbildung 47: Abnahme der Querzugfestigkeit bei einer Lagertemperatur von 90°C.

4.4 Zusammenfassung

- ✓ Die prinzipielle Veränderung der Temperatur bei den gegebenen Umgebungsbedingungen ist aufgezeigt.
- ✓ Die Gesamtfeuchte von Spanplatten ändert sich nur unwesentlich während der Stapellagerung. Ein Ausgleich zwischen der Deck- und Mittelschichtfeuchte erfolgt innerhalb der ersten 12 Stunden.
- ✓ Aufgrund der Ergebnisse der Vorversuche und der Tatsache, dass es möglich war die Platten in dem simulierten Stapel Bedingungen auszusetzen, die zu einer Hydrolyse des Leimes führten, wird geschlossen, dass in der Apparatur und in einem Industriestapel vergleichbare Zustände herrschen. Somit können Holzwerkstoffplatten im Labor einer industrienahen Stapellagerung ausgesetzt werden.

5 Eigenschaftsänderung von Holz unter Stapelbedingungen

5.1 Zielsetzung und Fragestellung

1. Analyse der chemischen Veränderung von Holzarten, die in Europa üblicherweise zur Produktion von Holzwerkstoffplatten eingesetzt werden. Zu diesen Untersuchungen zählen vor allem die Sorptionseigenschaften, der pH-Wert, die Pufferkapazität und die Formaldehydemission.
2. Die Untersuchungen sollen unter den Bedingungen durchgeführt werden, denen das Holz in der Holzwerkstoffplatte während des Verpressens und der Stapellagerung ausgesetzt ist.

5.2 Material

Es kam Kieferschäl furnier zum Einsatz, das aus der laufenden Produktion nach der Trocknung und Qualitätskontrolle eines finnischen Sperrholzherstellers entnommen wurde. Im Prozess wurde das Kiefernholz vor dem Schälvorgang für 24 Stunden bei 38°C gedämpft. Etwa zwei Tage nach dem Schälen wurden die Furniere für 5 Minuten bei 190°C getrocknet. Diese Trocknungsbedingungen sind mit den Bedingungen vergleichbar, den die Späne für Spanplatten während der Trocknung ausgesetzt sein können. Das Furnier-Material eignet sich daher gut dafür, das Verhalten des Holzes während des Pressvorgangs und der Lagerung zu betrachten, da es einer ähnlichen Vorbehandlung unterzogen wurde.

Zusätzlich wurde Fichtenfurnier eingesetzt, das unter ähnlichen Bedingungen wie das oben beschriebene Kiefern furnier hergestellt wurde. Des weiteren wurde auch Buchenfurnier verwendet. Das Furnier wurde in 200 x 20 mm² große Streifen aufgetrennt. Diese Furnierstreifen wurden für die Untersuchung des Verhaltens des Holzes unter definierten Stapelbedingungen genutzt.

5.3 Methodik

5.3.1 Versuchsablauf

Die Furnierstreifen wurden mit einer Ausgangsfeuchte von 6% bei Temperaturen zwischen 110°C und 200°C und einem spezifischen Pressdruck von rund 10 N/mm² für 100 Sekunden gepresst. Anschließend wurden die Proben unmittelbar bei Temperaturen zwischen 60°C und 100°C sowie einer Feuchte von 6% und 12% gelagert. Die untersuchten Parameterkombinationen sind Tabelle 12 zu entnehmen.

Tabelle 12: Variable Bedingungen der Holzanalyse.

Varierte Parameter	Stufen
Pressplattentemperatur	110°C, 160°C, 200°C
Lagertemperatur	60°C, 100°C
Holzfeuchte während der Lagerung	6%, 12%

5.3.2 Einstellung der Lagerbedingungen

Um die gewünschten Lagerbedingungen bei Temperaturen zwischen 60°C und 100°C sowie einer Holzfeuchte zwischen 6% und 12% einzustellen, wurden Glasflaschen⁶ mit einem Twist-Off-Deckel und 1 Liter Fassungsvermögen verwendet. Mit Hilfe dieser dampfdichten Flaschen war es möglich auch bei erhöhter Temperatur relative Luftfeuchten einzustellen, aus denen die verlangten Holzfeuchten resultierten. In jeweils eine Flasche wurden die Proben, die zum gleichen Zeitpunkt zu entnehmen waren, und eine definierte Wassermenge gegeben. Die Flasche wurde verschlossen und in einem Wärmeschrank mit der vorgewählten Temperatur gelagert. Es war nach v.Haas und Frühwald (1999) zu erwarten, dass sich die Gleichgewichtsfeuchte im Holz innerhalb weniger Minuten einstellt.

Die zugebende Wassermenge ermittelt sich aus der Differenz zwischen der vorhandenen Wassermenge im Probenmaterial und im Gasvolumen des Probenbehälters sowie der theoretisch benötigten Wassermenge bei den entsprechenden Bedingungen:

$$Dm_w = (Soll\ m_w^L + Soll\ m_w^H) - (Ist\ m_w^L + Ist\ m_w^H) \quad (54)$$

wobei:

Δm_w :	Ausgleichswassermenge	g
$Soll\ m_w^L$:	Soll- Masse des Wassers in der Luft	g
$Soll\ m_w^H$:	Soll- Masse des Wassers im Holz	g
$Ist\ m_w^L$:	Ist- Masse des Wassers in der Luft	g
$Ist\ m_w^H$:	Ist- Masse des Wassers im Holz	g

Im ersten Schritt wird hergeleitet, wie die vorhandene Wassermenge im Holz und in der Raumluft (Ist-Zustand) ermittelt wurde:

Aus der Berechnung der Holzfeuchte lässt sich die Gleichung zur Errechnung der Wassermenge im Holz ableiten:

⁶ Getränkemehrwegflasche – Marke: Punika

$$m_w^H = \frac{u \cdot m_0}{100} \quad (55)$$

wobei:

m_w^H	Masse des Wassers im Holz	g
m_0	Masse des darrtrockenen Holzes	g
u	Holzfeuchte	%

Unter der vereinfachten Annahme, dass sich Wasserdampf wie ein ideales Gas verhält, kann zur Berechnung der absoluten Wassermasse in der Luft die allgemeine Zustandsgleichung idealer Gase herangezogen werden (Gleichung 56). Die Masse von einem Mol Wasser beträgt 18 g.

$$P \cdot V = n \cdot R \cdot T \quad (56)$$

wobei:

P	Druck des Gases	Pa
V	Volumen des Gases	m ³
n	Stoffmenge	mol
T	absolute Temperatur	K
R	universelle Gaskonstante	8,314 J/(mol K)

Die relative Luftfeuchte beschreibt das Verhältnis des Wasserdampfteildrucks zum Sättigungsdampfdruck von Wasser in der Luft (Gleichung 57).

$$j = \frac{P_D}{P_S} \cdot 100 \quad (57)$$

wobei:

j	relative Luftfeuchte	-
P_D	Wasserdampfteildruck	Pa
P_S	Sättigungsdampfdruck	Pa

Nach Vermaas (1978) berechnet sich der Sättigungsdruck für Wasserdampf in der Luft in Abhängigkeit von der Temperatur näherungsweise gemäß Gleichung (58).

$$P_S = 6,1078 \cdot e^{\left(\frac{17,08085 \cdot J}{234,175 + J}\right)} \quad (58)$$

wobei:

J	Temperatur	°C
P_S	Sättigungsdampfdruck	mbar

Die Temperatur der Raumluft betrug 20°C und die relative Luftfeuchte 65%. Aus diesen Vorgaben lässt sich die absolute Masse des Wassers in 1 dm³ Luft berechnen:

$$\text{Ist } m_w^L = 18 \cdot \frac{0,001 \cdot 65 \cdot 6,1078 \cdot e^{\left(\frac{17,08085 \cdot 20}{234,175 + 20}\right)}}{8,314 \cdot (273,15 + 20)} = \underline{\underline{0,01125 \text{ g}}}$$

Bei einer Eingangsfeuchte von beispielsweise 4% und einer Gesamtmasse des eingelagerten Holzes im Darrzustand von durchschnittlich 60 g errechnet sich die Masse des Wassers im Holz folgendermaßen:

$$\text{Ist } m_w^H = \frac{4 \cdot 60}{100} = \underline{\underline{2,4 \text{ g}}}$$

Im zweiten Schritt wird hergeleitet, wie die theoretisch benötigte Wassermenge (Soll-Zustand) ermittelt wurde:

Die Zielfeuchte sollte während der Lagerung 6% oder 12% bei einer Lufttemperatur von 60°C, 80°C oder 100°C betragen. Aus dem Diagramm nach Keylwerth und Noack (1964) können die entsprechenden Gleichgewichtsfeuchten des Holzes bei einer definierten Temperatur und relativer Luftfeuchtigkeit abgelesen werden. Hieraus lässt sich mit Hilfe der oben genannten Formeln die benötigte Wassermenge *Soll* m_w^L und *Soll* m_w^H berechnen, um die angestrebte relative Luftfeuchte einzustellen. Diese Form der Berechnung hat sich angeboten, da auf die Variationen der Eingangsfeuchte und Masse des Probenmaterials spontan reagiert werden konnte. Zu diesem Zweck wurde die Berechnung in einem Excel-Datenblatt hinterlegt, um mit dessen Hilfe aus den variablen Eingangsparametern die benötigte Wassermenge zu errechnen.

5.3.3 Sorptionseigenschaften

Um den Einfluss der Lagerung auf die Sorptionseigenschaften des Holzes zu ermitteln, wurden die Streifen der Proben verwendet, die zur Prüfung der Zugscherfestigkeit genutzt wurden (Kapitel 6.3.2). Nach der Behandlung der Proben unter den oben beschriebenen Bedingungen standen nach der Prüfung der Festigkeit je Prüfzeitpunkt 20 Furnierstreifen zur Verfügung. Davon wurden 16 Furnierstreifen auf eine Größe von 120 x 20 mm² zugeschnitten. Dabei wurde der Rest der Klebefuge abgetrennt. An den übrigen vier Furnieren erfolgte die Feuchtebestimmung gravimetrisch nach der Darmmethode zum Zeitpunkt der Prüfung. An den Proben für die Untersuchung der Sorptionseigenschaften erfolgte die Bestimmung der Gleichgewichtsfeuchte bei Normklima. Dazu wurden die Proben zunächst bei

Umgebungsbedingungen von 20°C und 35% relativer Luftfeuchte bis zur Gewichtskonstanz und erst danach bei 20°C und 65% rel. LF klimatisiert.

5.3.4 pH-Wert und Pufferkapazität

Um den pH-Wert und die Pufferkapazität zu bestimmen wurden je Parameter und Entnahmezeitpunkt zehn Furnierstreifen für 100 Sekunden verpresst und nach der Lagerung für 24, 72, 186 Stunden unter den folgenden Bedingungen entnommen:

Tabelle 13: Bedingungen für die Bestimmung des pH-Wertes und der Pufferkapazität.

<i>Parameter</i>	<i>Stufen</i>
Pressplattentemperatur	110°C .. 200°C
Lagertemperatur	60°C .. 100°C
Holzarten	Kiefer, Fichte, Buche

Zusätzlich wurde ein Probensatz unmittelbar nach dem Pressvorgang zur Prüfung genommen. Für jede Holzart wurde die Prüfung einer Nullprobe, ohne Behandlung, durchgeführt.

Für jede Einzelprüfung wurden die Furniere in einer Schwingmühle⁷ für 30 Sekunden gemahlen. Es wurden 5 g Holzmehl in einen 300 ml Erlenmeyerkolben mit 150 ml destilliertem und entgastem Wasser versetzt. Luftdicht verschlossen wurde das Holz für 24 Stunden auf einem Rütteltisch extrahiert. Die Lösung wurde anschließend abfiltriert und 20 ml davon in ein Becherglas pipettiert. Der pH-Wert dieser Lösung wurde mit einer pH-Elektrode gemessen. Der Ablesezeitpunkt wurde mit zwei Minuten nach Eintauchen der Elektrode in die Lösung festgesetzt. Anschließend wurde mit Hilfe eines Titrierprozessors die Pufferkapazität bestimmt. Hierzu wurde die Lösung gegen 0,01 mol/l NaOH (Titrisol) bis pH 7 titriert. Es wurde jeweils eine Doppelbestimmung durchgeführt.

5.3.5 Formaldehydemission

Die Prüfung der Formaldehydemission wurde in Anlehnung an EN 717-3 durchgeführt. Hier wurde ausschließlich Kiefernholz geprüft. Das Holz wurde mit einem Gummiband umwickelt in die PE-Weithalsflaschen eingehängt. Um der geringen Probengröße des Untersuchungsmaterials gerecht zu werden, wurden folgende Anpassungen vorgenommen: a) Die Einwaage des Probenmaterials betrug etwa 1,5 g. b) Eine Probe wurde für 24h bei 40°C in der PE-Flasche zur Extraktion gelagert. Abschließend wurde die Extinktion der Extraktlösung in einen Spektrophotometer ermittelt. Es wurde jeweils eine Doppelbestimmung durchgeführt.

⁷ Fabrikat: HERZOG

5.4 Ergebnisse und Diskussion

5.4.1 Sorption

Die Presstemperatur sowie die Temperatur und Feuchte während der Lagerung haben einen merklichen Einfluss auf die Abnahme der Ausgleichfeuchte. In Abbildung 48 sind die Ausgleichfeuchten bei 20°C und 65% relativer Luftfeuchte für das Kiefern-Splintholz unter verschiedenen Press- und Lagerbedingungen dargestellt. Die Ausgleichfeuchte des unbehandelten Holzes beträgt 12,3%, sie liegt damit in der Größenordnung, die auch von Kollmann und Schneider (1963) festgestellt wurde. Es ist erkennbar, dass die Sorptionsfähigkeit des Holzes während der Lagerung und bereits auch durch die Pressbedingungen deutlich vermindert wird. Die Ausgangsfeuchte des Holzes vor dem Verpressen betrug in allen Fällen um 6%. Nach einer Presszeit von 100 Sekunden und einer Presstemperatur von 110°C wird die Ausgleichfeuchte auf etwa 11,5% und bei 200°C auf 10,7% abgesenkt. Während der Lagerung für 72 Stunden wird die Gleichgewichtsfeuchte weiter vermindert. Je höher die Lagertemperatur und je höher die Feuchte während der Lagerung, umso geringer ist die Gleichgewichtsfeuchte.

Abbildung 49 zeigt die Entwicklung der Gleichgewichtsfeuchte bei 20°C und 65% rel. LF nach einer Lagerung bei 80°C und 100°C. Es ist feststellbar, dass bei einer Lagertemperatur von 100°C die Gleichgewichtsfeuchte über den gesamten Zeitraum von 72 Stunden abnimmt. Die Abnahme ist allerdings im Anfangsbereich größer. Bei einer Lagertemperatur von 80°C wird deutlich, dass die Gleichgewichtsfeuchte nur innerhalb der ersten 6 Stunden beeinflusst wird.

Erkenntnisse

Es ist eine deutliche Beeinflussung der Gleichgewichtsfeuchte durch die Presstemperatur, Lagertemperatur und -feuchte erkennbar. Die Ausgleichfeuchte des Holzes (gemessen bei 20°C und 65% rel. LF) kann unter den Bedingungen, wie sie in den Deckschichten einer Spanplatte

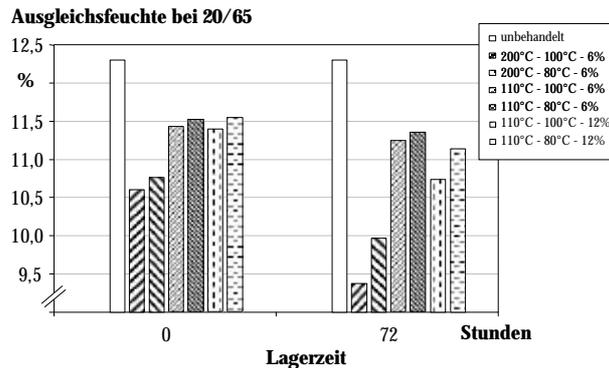


Abbildung 48: Gleichgewichtsfeuchte von Kiefern-Splintholz bei 20°C und 65% relativer Luftfeuchte nach Exposition von Feuchte und Temperatur über 72 Stunden.

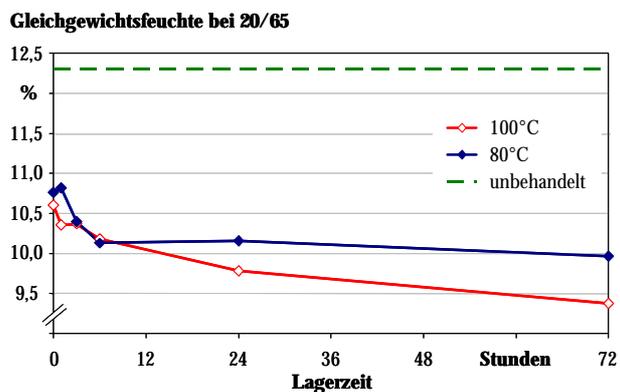


Abbildung 49: Änderung der Gleichgewichtsfeuchte bei 20°C und 65% relative Luftfeuchte während der Lagerung.

vorkommen, um bis zu 2,5% vermindert werden. Bereits Kollmann und Schneider (1963) wiesen eine Minderung der Sorptionsisothermen ab Temperaturen über 70°C nach.

5.4.2 pH-Werte und Pufferkapazität

Abbildung 50 zeigt die Entwicklung der pH-Werte und der Pufferkapazität während der Lagerung über 168 Stunden für die Holzarten Kiefer, Fichte und Buche. Vor der Behandlung liegen die pH-Werte in einem für diese Holzarten üblichen Bereich (vgl. Sandermann und Rothkamm 1959). Es ist erkennbar, dass es bedingt durch den Pressvorgang (Nullprobe vs. 0 Stunden) zu keiner nennenswerten Veränderung des pH-Wertes und der Pufferkapazität kommt. Während der Lagerung nimmt der pH-Wert für die untersuchten Holzarten deutlich ab und die Pufferkapazität drastisch zu.

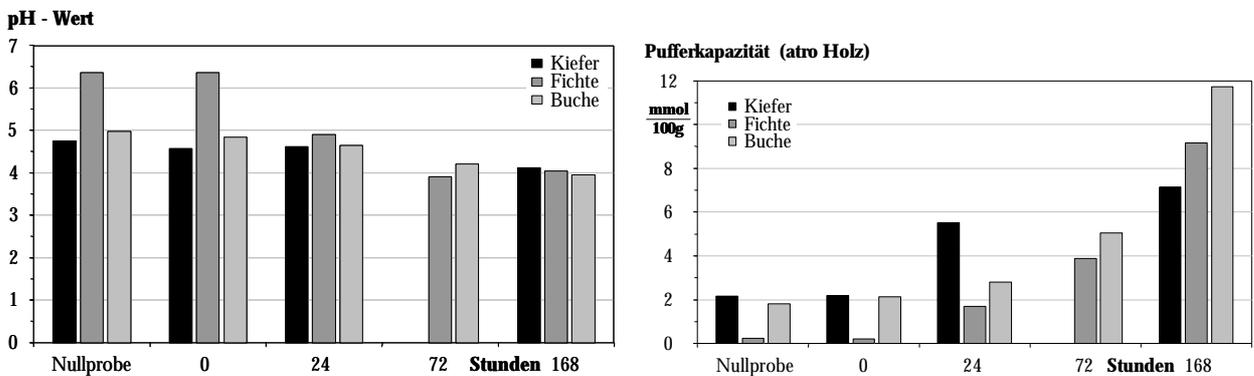


Abbildung 50: Änderung des pH-Wertes (links) und der Pufferkapazität (rechts) für verschiedene Holzarten während der Lagerung über 168 Stunden, Mittelwerte aus allen Messreihen.

In Abbildung 51 ist die Entwicklung des pH-Wertes und der Pufferkapazität für Kiefer unter verschiedenen Bedingungen dargestellt. Die Press- und Lagertemperatur sind variiert. Während einer Lagerung bei 60°C wird der pH-Wert ausgehend von einem Wert vor der Behandlung um 4,8 nicht nennenswert beeinflusst. Die Pufferkapazität wird unter diesen Bedingungen geringfügig von 2,2 mmol/100g atro Holz auf bis zu 3,8 mmol/100g erhöht.

Bei einer Lagertemperatur von 100°C nimmt der pH-Wert der Kiefer innerhalb von 168 Stunden auf 4,1 ab und die Pufferkapazität steigt auf 7,2 mmol/100g.

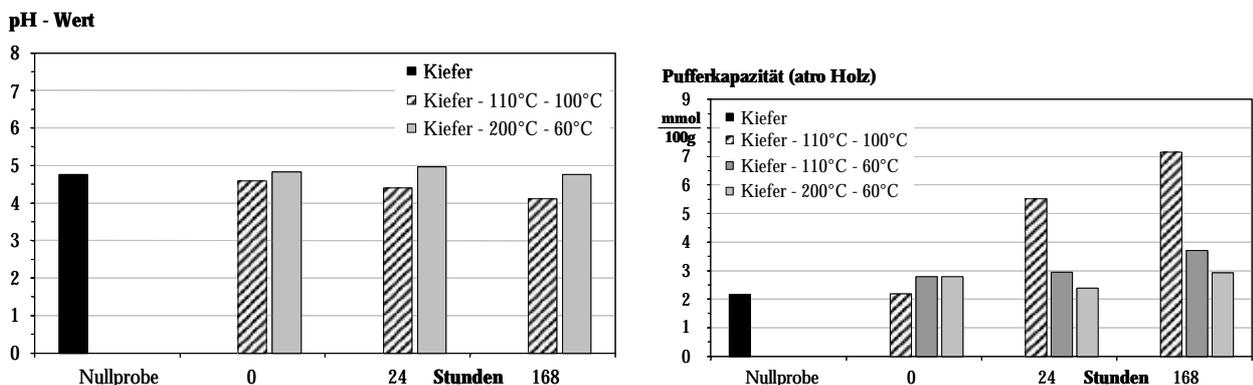


Abbildung 51: Änderung des pH-Wertes (links) und der Pufferkapazität (rechts) für Kiefer unter verschiedenen Temperaturbedingungen während der Lagerung über 168 Stunden.

Abbildung 52 zeigt die Entwicklung des pH-Wertes und der Pufferkapazität für Buche in Abhängigkeit von der Press- und Lagertemperatur während 168 Stunden. Auch hier ist erkennbar, dass weder der pH-Wert noch die Pufferkapazität bei einer Lagertemperatur von 60°C beeinflusst werden. Bei 100°C sinkt der pH-Wert jedoch von 5,0 auf 4,0 innerhalb von 168 Stunden, gleichzeitig steigt die Pufferkapazität von 1,9 mmol/100g auf etwa 12,0 mmol/100g an.

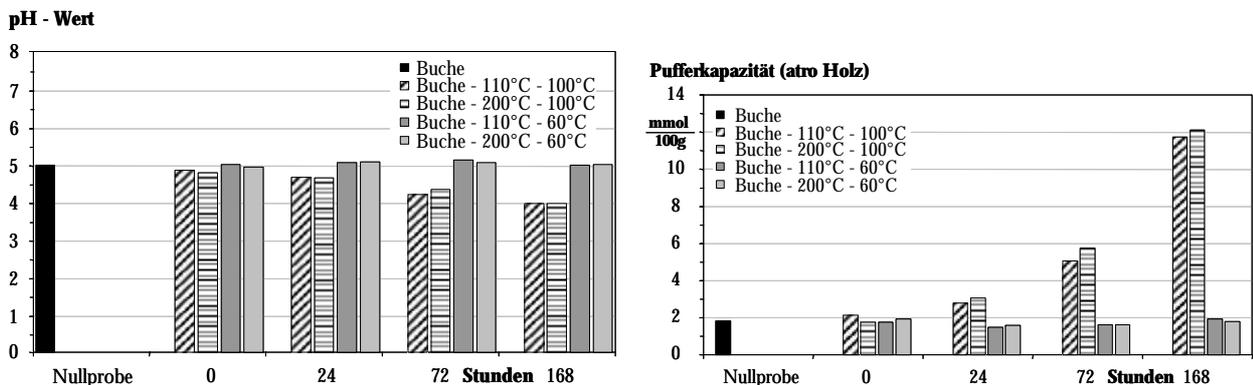


Abbildung 52: Änderung des pH-Wertes (links) und der Pufferkapazität (rechts) für Buche unter verschiedenen Temperaturbedingungen während der Lagerung über 168 Stunden.

Abbildung 53 zeigt die Änderung des pH-Wertes und der Pufferkapazität für Fichte unter verschiedener Press- und Lagerbedingungen über 168 Stunden. Der pH-Wert der unbehandelten Proben beträgt 6,3 und wird bei einer Lagertemperatur von 60°C auf etwa 5,0 und bei 100°C auf 4,0 innerhalb des betrachteten Zeitraum vermindert. Parallel dazu steigt die Pufferkapazität von 0,2 mmol/100g auf etwa 0,5 mmol/100g bei 60°C und 9,5 mmol/100g bei einer Lagertemperatur von 100°C an.

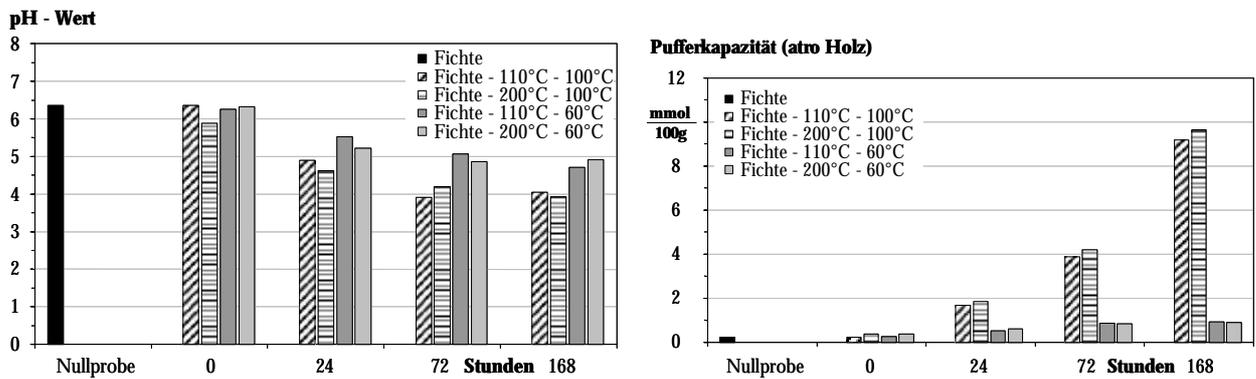


Abbildung 53: Änderung des pH-Wertes (links) und der Pufferkapazität (rechts) für Kiefer unter verschiedenen Temperaturbedingungen während der Lagerung über 168 Stunden.

Erkenntnisse

Der Pressvorgang (100 s) beeinflusst den pH-Wert und die Pufferkapazität des Holzes nicht entscheidend. Auch wirkt sich die Presstemperatur nur unwesentlich aus. Eine Lagertemperatur von 60°C bewirkt keine merkliche Veränderung des pH-Wertes und der Pufferkapazität. Mit höherer Temperatur von etwa 100°C sinkt der pH-Wert der untersuchten Holzarten mit zunehmender Lagerzeit. Ausgehend von unterschiedlichen pH-Werten vor der Lagerung sinken die Werte auf etwa pH 4,0. Die Pufferkapazität steigt über den betrachteten Lagerzeitraum von 168 Stunden linear an.

Organische Säuren können aus einer Oxidation von Aldehyden entstehen. Im Holz entsteht Ameisensäure unter Wärmeeinwirkung als Spaltprodukt des Furfurals, das wiederum ein Spaltprodukt des Pentosan, also der Hemicellulosen, ist (Runkel 1951).

Dieser Effekt hat zur Folge, dass es bei einer Lagerung von Holzwerkstoffplatten über einen längeren Zeitraum zu einer deutlichen Erhöhung der Säurebestandteile in der Platte kommen kann. Aufgrund dessen ist bei hohen Temperaturen nach mehrtägiger Lagerung für Harnstoffharze mit verstärktem Auftreten der Hydrolyse zu rechnen.

5.4.3 Formaldehydemission

In Abbildung 54 ist die Entwicklung der Formaldehydemission von Kiefer während einer Lagerung bei 80°C und 100°C sowie einer Feuchte von 6% über 72 Stunden aufgetragen. Unmittelbar nach dem Verpressen bei 110°C für 80 Sekunden beträgt die Formaldehydemission etwa 33 mg/kg. Während der Lagerung bei 80°C steigt die Formaldehydemission des reinen Holzes auf 36 mg/kg und bei 100°C auf etwa 46 mg/kg nach 72 Stunden an.

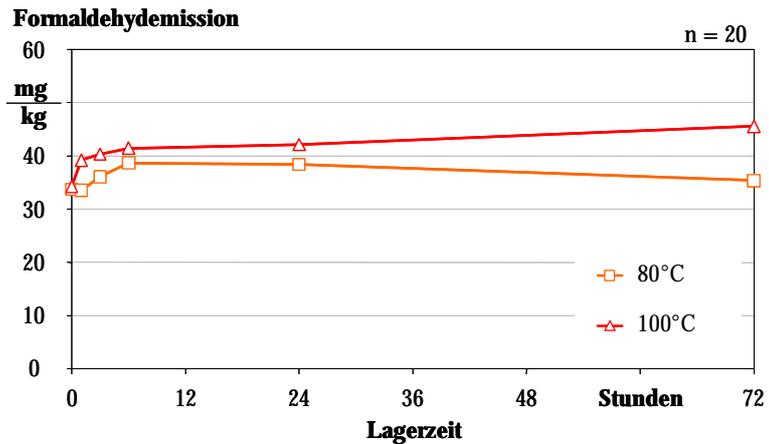


Abbildung 54: Änderung der Formaldehydemission (Flaschenmethode) des reinen Holzes während der Lagerung bei 80°C und 100°C bis 72 Stunden (Holzart: Kiefer).

Das Emissionsniveau für Formaldehyd, das aus dem Holz hervorgeht, macht lediglich einen Bruchteil dessen aus, was unmittelbar nach dem Verpressen der Leimfuge ermittelt werden kann. Allerdings erklärt dies recht deutlich den Grundbetrag der Formaldehydemission, der auch nach längerer Lagerung an der Klebfuge festgestellt wird (vgl. Abschnitte 6.4.1.2, 6.4.2.2 und 6.4.3.2).

Es ist deutlich erkennbar, dass auch das Holz der Holzwerkstoffplatte zu einem bestimmten Anteil an den Formaldehydemissionen beiträgt.

Dies deckt sich mit früheren Untersuchungen (vgl. Boehme 2000). Månsson und Roffael (1999) bestimmten die Formaldehydemissionen aus Holz unter Trocknungsbedingungen. Nach ihren Erkenntnissen erhöht sich die Formaldehydabgabe aus Kiefern- und Fichtenholz ab 40°C und einer Einwirkungsdauer von 24 Stunden. Mit zunehmender Temperatur und Einwirkungsdauer erhöht sich die Formaldehydabgabe. Die Größenordnungen der Ergebnisse von Månsson und Roffael (1999) sind mit den vorliegenden Untersuchungen v.a. im Hinblick auf Temperatur und Zeit nur bedingt vergleichbar, da hier Späne getestet wurden.

Der Formaldehyd kann im wesentlichen aus den Kohlenhydraten und dem Lignin entstehen (Marutzky und Roffael 1977). Nach Untersuchungen von Schäfer und Roffael (2000) scheint Lignin das höchste Formaldehydabgabepotenzial der Holzkomponenten zu haben, zudem tragen nach Angabe der Autoren auch bestimmte Holzextraktstoffe zur Formaldehydemission des Holzes bei.

5.5 Zusammenfassung

Sorption

- ✓ Das Sorptionsvermögen des Holzes wird sowohl durch den Pressvorgang als auch während der Stapellagerung vermindert.. Die Gleichgewichtsfeuchte wird dabei durch Presstemperatur, Lagertemperatur und –Feuchte deutlich beeinflusst. Je höher die Temperatur und die Feuchte während der Lagerung, umso stärker wird die Gleichgewichtsfeuchte vermindert.
- ✓ Die größten Veränderungen finden innerhalb der ersten Stunden der Lagerung statt.

Acidität

- ✓ Der Pressvorgang beeinflusst den pH-Wert und die Pufferkapazität des Holz nicht entscheidend. Auch wirkt sich die Presstemperatur nicht auf die Messwerte selber und auch nicht auf die Entwicklung der Werte während der Lagerung aus.
- ✓ Einer Lagertemperatur von 60°C bewirkt keine merkliche Veränderung des pH-Wertes und der Pufferkapazität.
- ✓ Bei einer Lagertemperatur von 100°C wird der pH-Wert von Fichte, Buche und Kiefer auf zum Teil unter 4 abgesenkt. Die Pufferkapazität steigt innerhalb von 168 Stunden drastisch an.
- ✓ Bei Temperaturen von 100°C ist nach dreitägiger Lagerung mit einer Verschärfung der Bedingungen für Harnstoffharze zu rechnen. Die Gefahr der Hydrolyse ist nach dieser Zeit bei hohen Temperaturen aufgrund des vermehrten Säureanteils erhöht.

Formaldehydemission

- ✓ Auch das Holz trägt zu einem bestimmten (wenn auch geringem) Anteil der Formaldehydemissionen der Holzwerkstoffplatten bei.
- ✓ Unter den betrachteten Lagerbedingungen nimmt die Formaldehydemission aus dem Kiefernholz zu, wobei eine höhere Temperatur zu einer größeren Emission führt.

6 Eigenschaftsänderung von Klebstoffen unter Stapelbedingungen

6.1 Zielsetzung und Fragestellung

1. Es soll die grundsätzliche Entwicklung der Festigkeiten von Aminoplast-Harzen unter den Lagerbedingungen analysiert werden.
2. Der Einfluss wichtiger Prozessparameter auf die Entwicklung der Klebstofffestigkeit während der Lagerung soll bestimmt werden. Folgende Parameter werden zu diesem Zweck betrachtet: Presszeit, Presstemperatur, Härtermenge, Lagertemperatur und Feuchte des Holzes während der Lagerung.
3. Zur Untersuchung der reinen Klebfestigkeit wird die trockene Zugscherfestigkeit und als Maß für die Feuchtebeständigkeit der Harze wird die Zugscherfestigkeit nach einer zweistündigen Wasserlagerung geprüft.

6.2 Material

6.2.1 Holz

Es kam das gleiche Kiefernurnier zum Einsatz, wie in Abschnitt 5.2 beschrieben. Das Furnier mit einer Nenndicke von 1,5 mm wurde in 120 x 20 mm² Streifen aufgetrennt. Diese Furnierstreifen wurden für die Untersuchung des Verhaltens verschiedener Leimharze unter Stapelbedingungen genutzt. Vor ihrem Einsatz wurden die Furniere auf eine Feuchte von etwa 6% klimatisiert.

6.2.2 Klebstoffe

Zur Untersuchung unter Stapelbedingungen wurden drei verschiedene Spanplatten-Harze eingesetzt, die auch in der industriellen Produktion verwendet werden: ein konventionelles UF-Harz, ein MUF-Harz mit geringem

Tabelle 14: Analytische Kenndaten des UFM-Harzes.

pH-Wert	9,0
Dichte	1,3 g/cm ³
Viskosität bei 20°C	500 .. 650 mPa s
Feststoffgehalt	65%

Melaminanteil (UFm) sowie ein MUF-Harz mit hohem Melaminanteil. Die analytischen Kenndaten des UFM-Harzes sind in Tabelle 14 dargestellt und die UF- und MUF-Harze werden näher in Kapitel 7.2.2 beschrieben.

Die Furniere wurden mit den oben genannten Harzen in einer Heißpresse verklebt und unterschiedlichen Lagerbedingungen ausgesetzt. Anschließend wurde die Leimfuge auf ihre Zugscherfestigkeit (trocken und nass) geprüft. Die Herstell- und Lagerparameter sind in Tabelle 15 und Tabelle 16 dargestellt.

Tabelle 15: Konstante Bedingungen der Leimuntersuchung.

Konstante Parameter	Einstellung
Leimauftragsmenge	100 g/m ²
Trockengehalt der Leimflotten	40%
Härterlösung	Ammoniumnitrat

Tabelle 16: Variable Bedingungen der Leimuntersuchung.

Varierte Parameter	Stufen
Härtermenge in der Leimflotte	1%, 3%, 5%
Presszeit	60 s, 100 s
Pressplattentemperatur	110°C, 200°C
Lagertemperatur	60°C, 80°C, 100°C
Holzfeuchte während der Lagerung	6%, 12%

6.3 Methodik

6.3.1 Versuchsablauf

Es wurden jeweils 20 Furniere nebeneinander aufgereiht und die zu beileimende Fläche des Holzes (10 x 20 mm²) mit einem Klebestreifen eingegrenzt. Die Leimflotte wurde mit Hilfe einer Farbspritzpistole⁸ aufgesprüht, indem diese über die Furnierstreifen geführt wurde. Die Farbspritzpistole funktionierte nach dem Prinzip einer Zweistoffdüse, bei der der Sprühwinkel, der Luftdruck und die Durchflussmenge reguliert werden konnte. Um die Leimauftragsmenge konstant zu halten, wurde die Farbspritzpistole mit einer gleich bleibenden Vorschubgeschwindigkeit bewegt. Die Spritzpistole wurde auf dem Schlitten einer Konstruktion mit Schrittmotor fixiert (Abbildung 55).

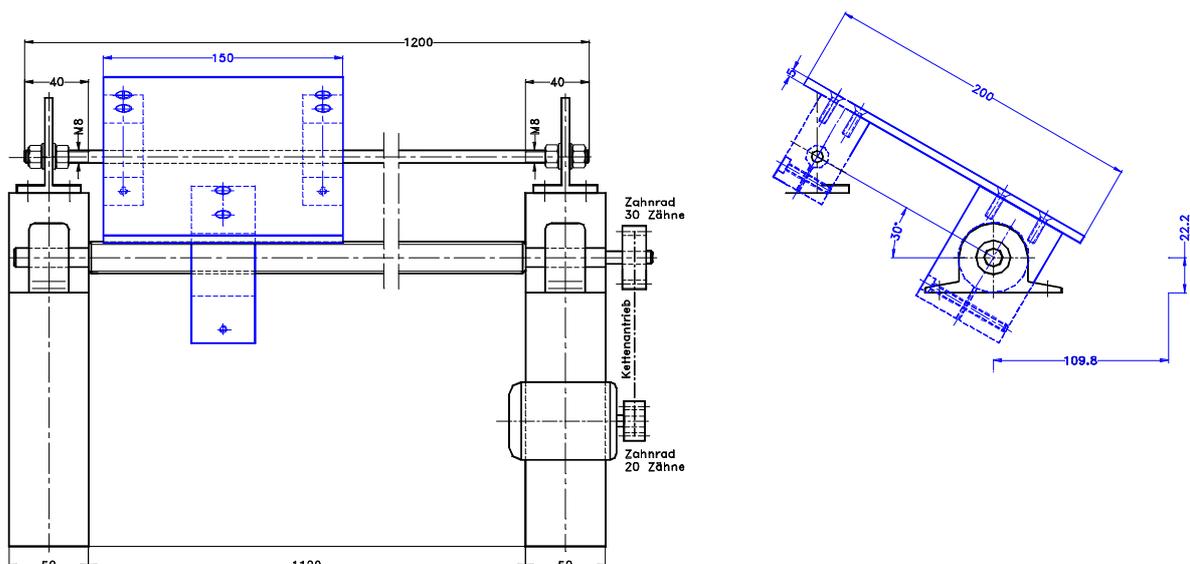


Abbildung 55: Einrichtung zum Leimauftrag.

⁸ Produkt: Schneider Optimal 2000

Die aufgesprühte Leimmenge wurde für jede einzelne Messreihe an insgesamt 18 Proben gravimetrisch erfasst und bei der Auswertung berücksichtigt.

Die beleimten Furniere wurden auf einem Pressblech gleichmäßig angeordnet und mit einem zweiten Furnierstreifen, wie in Abbildung 56 dargestellt, zusammengelegt. Für jede Messreihe wurden die Furnierstreifenpaare in je zwei Chargen für eine Dauer zwischen 60 und 100 Sekunden bei Temperaturen von 110°C bis 200°C verpresst. Der spezifische Pressdruck betrug etwa 10 N/mm².

Nach Ablauf der Presszeit wurden die Furnierstreifen aus der Presse entnommen, in vorgeheizte, luftdicht verschließbare Flaschen überführt und bei Temperaturen zwischen 60°C und 100°C im Trockenschrank gelagert. Es wurde eine Holzfeuchte während dieser Lagerung zwischen 6% und 12% eingestellt.

Die verleimten und verpressten Furnierstreifenpaare wurden zu definierten Zeitpunkten den Lagerbedingungen entnommen, anschließend auf Raumtemperatur abgekühlt und nach 15 bis 30 Minuten der entsprechenden Prüfung zugeführt. Es wurde je ein Probensatz unmittelbar nach dem Verpressen (0h) zur Prüfung entnommen. Weitere Probensätze wurden jeweils nach einer Stunde sowie nach 3, 6, 72 und gegebenenfalls nach 168 Stunden entnommen und geprüft. Ein Probensatz setzt sich wie folgt zusammen: An 10 Proben wurden eine Zugscherprüfung und an weiteren fünf Proben wurden eine Zugscherprüfung nach Wasserlagerung durchgeführt. 10 Proben dienen der Ermittlung der Formaldehydemission.

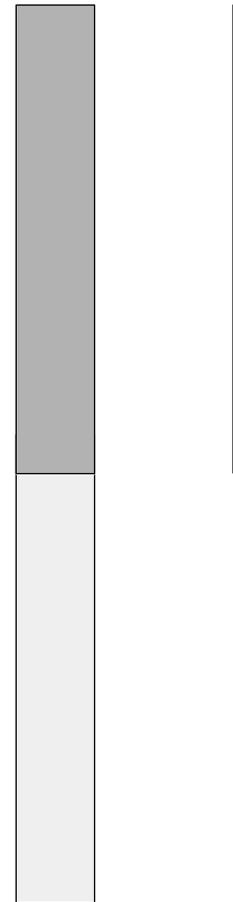


Abbildung 56: Verklebte Furnierstreifen.
links: Draufsicht
rechts: Seitenansicht

6.3.2 Zugscherfestigkeit

Nach Entnahme der Proben wurden diese bei 20°C und 65% rel. LF für etwa 30 Minuten vor der Prüfung der Eigenschaften abgekühlt. Die Leimfestigkeit wurde in Anlehnung an DIN 53 254 durch die Zugscherfestigkeit ermittelt.

6.3.3 Zugscherfestigkeit nach Wasserlagerung

Die Leimfestigkeit nach Wasserlagerung wurde in Anlehnung an DIN 53 254 durch die Zugscherfestigkeit ermittelt, wobei die Proben vor der Prüfung für zwei Stunden in 20°C

temperiertem Wasser gelagert wurden. Die Proben lagen horizontal 25 mm unter der Wasseroberfläche.

6.3.4 Formaldehydmission

Die Prüfung der Formaldehydmission wurde in Anlehnung an EN 717-3 durchgeführt. Hierzu wurde lediglich der verklebte Bereich des Furniers genutzt. Der übrige Teil der Furniere wurden mit einem Spaltmesser abgetrennt. Die Fläche der einzelnen Leimfuge betrug demnach etwa $10 \times 20 \text{ mm}^2$. Die Proben wurde mit einem Gummiband umwickelt in die PE-Weithalsflaschen eingehängt. Um der geringen Probengröße des Untersuchungsmaterials gerecht zu werden, wurden folgende Anpassungen vorgenommen: a) Es wurden fünf Einzelproben für eine Messung der Formaldehydmission zu einer Messung zusammengefasst. Die Einwaage des Probenmaterials betrug etwa 1,5 g. b) Eine Probe wurde für 24h bei 40°C in einer PE-Flasche zur Extraktion gelagert. Abschließend wurde die Extinktion an einen Spektrophotometer ermittelt. Es wurde jeweils eine Doppelbestimmung durchgeführt.

6.3.5 Statistische Auswertung

Mittelung der Einzelwerte

Zur Auswertung und Darstellung der Eigenschaftsentwicklung in Abhängigkeit von der Lagerzeit wurden die Einzelwerte mit gleichen Parametersätzen im Hinblick auf den zu betrachtenden Parametern gruppiert und gemittelt. Anschließend wurde ein Ausreißertest durchgeführt. Einzelwerte, die nicht innerhalb folgender Grenzen lagen wurden ausgeschlossen:

$$x < \bar{x} - 4 \cdot s \quad \text{oder} \quad x > \bar{x} + 4 \cdot s \quad (59)$$

wobei:

x zu prüfender Einzelwert

\bar{x} Mittelwert der Stichprobe

s Standardabweichung der Stichprobe

Die Anzahl der berücksichtigten Einzelwerte der jeweiligen Prüfzeitpunkte werden in den Graphen angegeben.

6.4 Ergebnisse und Diskussion

6.4.1 UF-Harz

6.4.1.1 Zugscherfestigkeit

Abbildung 57 ist die Entwicklung der Scherfestigkeit von UF-verklebten Furnierstreifen während einer Lagerung von 72 Stunden bei Temperaturen zwischen 60°C und 100°C zu entnehmen. Es ist feststellbar, dass die Werte für alle Lagertemperaturen ausgehend von etwa 2,6 N/mm² innerhalb der ersten drei Stunden auf rund 3,0 N/mm² ansteigen. Im weiteren Verlauf ändert sich die Scherfestigkeit bei einer Temperatur von 60°C nicht wesentlich, bei 80°C nimmt der Wert innerhalb des betrachteten Zeitraumes auf den Ausgangswert wieder ab und bei 100°C wird die Scherfestigkeit deutlich auf unter 2,0 N/mm² gemindert.

Die Scherfestigkeit nach 2-stündiger Wasserlagerung zeigt prinzipiell den gleichen Zusammenhang auf (Abbildung 58). Der Temperatureinfluss auf die Entwicklung der Klebfestigkeit wird hier noch deutlicher. Bei einer Lagerung von 60°C wird die Festigkeit innerhalb der ersten drei Stunden um etwa 7% erhöht und ändert sich darüber hinaus nicht mehr. Höhere Temperaturen wirken sich dagegen merklich negativ auf die Scherfestigkeit aus: Bei der Lagerung mit 100°C wird der Wert nach 72 Stunden Lagerung bezogen auf den Ausgangswert halbiert.

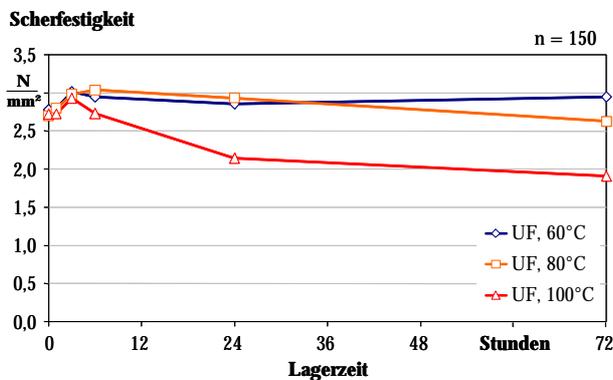


Abbildung 57: Änderung der Scherfestigkeit von UF-verklebten Furnierstreifen während der Lagerung bei verschiedenen Temperaturen.

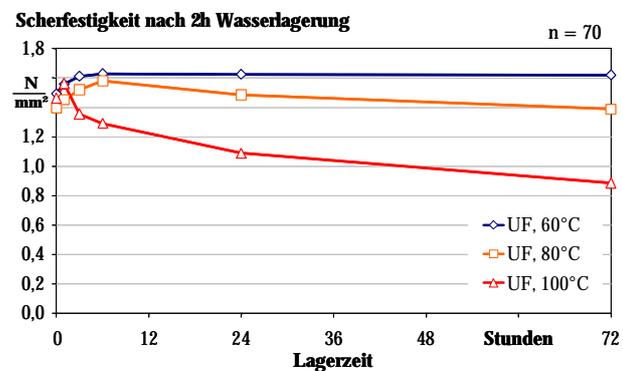


Abbildung 58: Änderung der Scherfestigkeit nach 2-stündiger Wasserlagerung von UF-verklebten Furnierstreifen während der Lagerung bei verschiedenen Temperaturen.

Abbildung 59 zeigt die Entwicklung der Scherfestigkeit während einer Lagerzeit von 72 Stunden in Abhängigkeit von der Lagertemperatur und der Presszeit. Es wird ersichtlich, dass das Festigkeitsniveau mit der längeren Presszeit deutlich zunimmt. Der Anfangswert nach 60 Sekunden Presszeit beträgt etwa 2,4 N/mm² und nach 100 Sekunden um 3,3 N/mm². Während der Lagerung stellt sich die Veränderung der Scherfestigkeit nach einer Presszeit von 60 Sekunden so dar, wie es im vorherigen Abschnitt bereits beschrieben wurde. Nach einer Presszeit von 100 Sekunden ist keine Zunahme der Scherfestigkeit innerhalb der ersten Stunden

der Lagerung mehr erkennbar. Bei einer Lagertemperatur von 60°C ist auch hier keine Änderung der Klebfestigkeit feststellbar, die Werte nehmen auch bei höheren Temperaturen wieder ab, allerdings ist die Abnahme sowohl absolut, als auch relativ betrachtet, deutlich geringer, als bei den Proben, die mit einer kürzeren Presszeit hergestellt wurden.

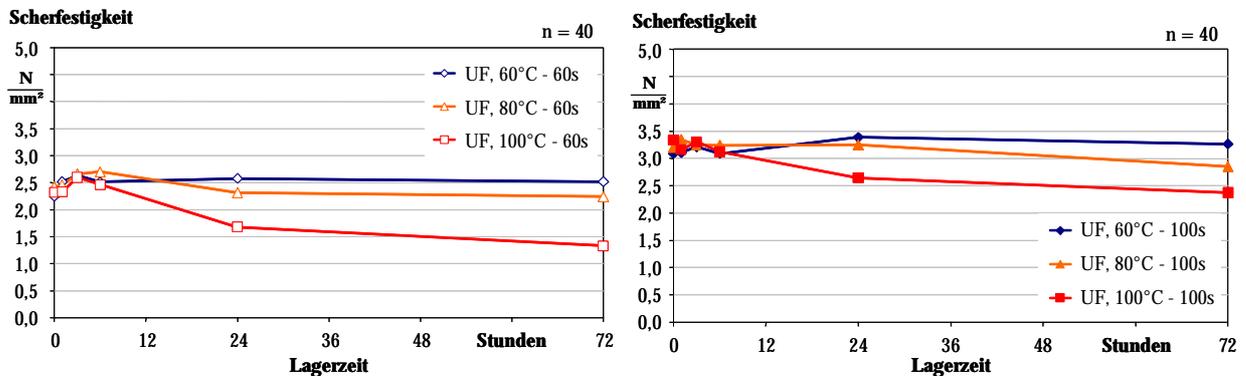


Abbildung 59: Änderung der Scherfestigkeit von UF-verklebten Furnierstreifen während der Lagerung bei verschiedenen Temperaturen und Presszeiten.
links: Presszeit 60 Sekunden rechts: Presszeit 100 Sekunden

Abbildung 60 stellt die Entwicklung der Scherfestigkeit bei verschiedenen Temperaturen und Feuchten während der Lagerung dar. Es ist feststellbar, dass die trockene Scherfestigkeit ausgehend von einem Anfangswert um 3,0 N/mm² durch eine Lagertemperatur von 60°C und einer eingestellten Feuchte von 6% wenig beeinflusst wird. Bei einer Feuchte von 12% ist eine geringfügige Abnahme der Klebfestigkeit erkennbar. Bei einer Lagertemperatur von 100°C nimmt die Scherfestigkeit deutlich ab, dabei wirkt sich die höhere Feuchte von 12% wesentlich stärker auf die Abnahme aus; nach 72 Stunden ist der Wert auf etwa ein Drittel des Anfangswertes abgesunken. Wenngleich auf einem anderen Niveau, so stellt sich die Entwicklung der Scherfestigkeit nach 2-stündiger Wasserlagerung ähnlich dar. Auch hierbei ist die Abstufung des Temperatur- und Feuchteinflusses auf die Entwicklung der Festigkeit deutlich erkennbar.

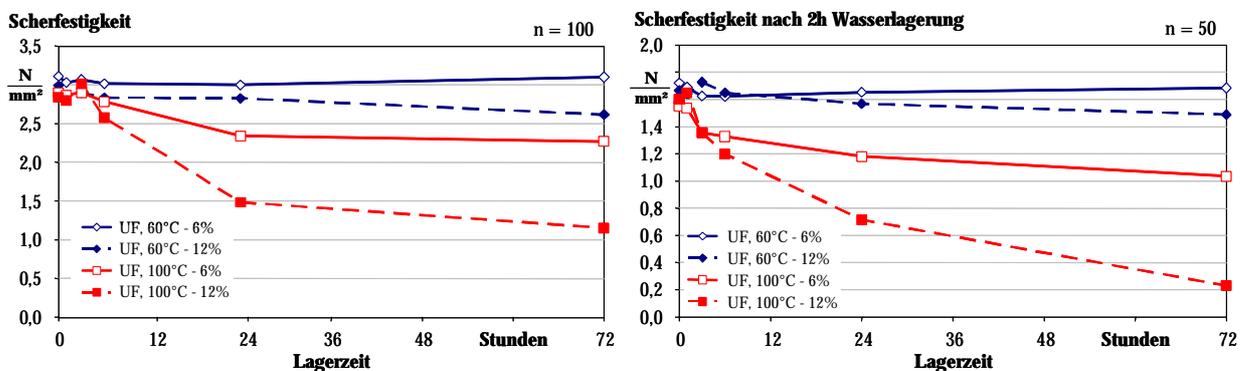


Abbildung 60: Änderung der Scherfestigkeit von UF-verklebten Furnierstreifen bei verschiedenen Temperaturen und Feuchten während der Lagerung.
links: trockene Prüfung rechts: Prüfung nach 2-stündiger Wasserlagerung

In Abbildung 61 ist die Entwicklung der Scherfestigkeit für UF-verklebte Furnierstreifen mit verschiedenen Härtereinsatzmengen während der Lagerung bei 60°C und 100°C zu dargestellt. Eine höhere Härterdosierung von 5% hat, selbst bei Lagertemperaturen von 100°C bzw. 60°C, eine deutlichen Abnahme der Klebfestigkeit über den betrachteten Zeitraum zur Folge. Bei einer geringen Härtereinsatzmenge von 1% und einer Lagertemperatur von 60°C ändert sich die Scherfestigkeit nur unwesentlich. Die unterschiedliche Härterdosierung wirkt sich hier nicht merklich auf das Festigkeitsniveau unmittelbar nach dem Verpressen aus.

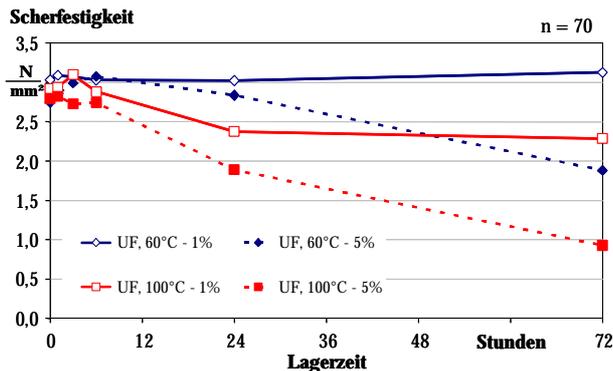


Abbildung 61: Änderung der Scherfestigkeit von UF-verklebten Furnierstreifen während der Lagerung bei verschiedenen Temperaturen und Härtereinsatzmengen.

In Abbildung 62 ist die Entwicklung der Scherfestigkeit für verschiedene Press- und Lagertemperaturen dargestellt. Das Niveau der Scherfestigkeit unmittelbar nach dem Verpressen ist bei einer Presstemperatur von 200°C deutlich höher als bei 110°C. Während einer Lagerung der mit 200°C verpressten Proben ist über den gesamten Zeitraum von 72 Stunden eine Abnahme der Klebfestigkeit erkennbar, dabei wirkt sich eine höhere Temperatur stärker auf den Abfall der Festigkeit aus. Bei einer Presstemperatur von 110°C ist wiederum ein Anstieg der Scherfestigkeit in den ersten 6 Stunden der Lagerung zu verzeichnen. Darüber hinaus ändert sich die Klebfestigkeit bei 60°C nicht und bei 80°C sowie 100°C mit einer zum Teil deutlich negativen Tendenz.

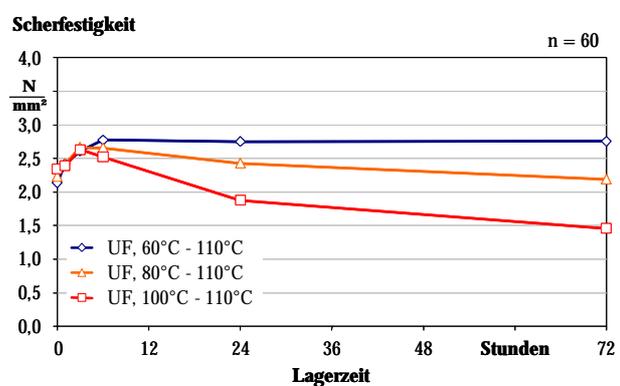
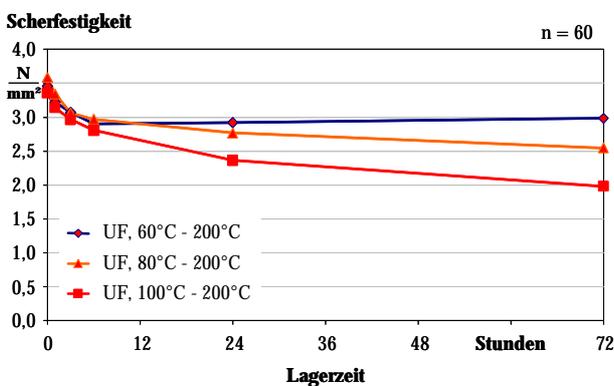


Abbildung 62: Änderung der Scherfestigkeit von UF-verklebten Furnierstreifen während der Lagerung bei verschiedenen Press- und Lagertemperaturen.

links: 200°C Presstemperatur

rechts: 100°C Presstemperatur

Erkenntnisse

Unter den ausgewählten Lagerbedingungen kann die Klebfestigkeit von UF-Harzen gesteigert werden. Bei Lagertemperaturen unterhalb von 80°C ist eine merkliche Zunahme der Scherfestigkeit zu verzeichnen; bei Temperaturen über 80°C sind nach 72-stündiger Lagerzeit deutliche Einbußen hinsichtlich der Klebfestigkeiten feststellbar. Unter günstigen Bedingungen wird das Optimum der Klebfestigkeit in einem Zeitraum von etwa 6 Stunden erreicht. Kommt es aufgrund hoher Temperaturen darüber hinaus zu einer Abnahme der Festigkeit, so erfolgt die Abnahme deutlich langsamer. Neben der trockenen Prüfung der Scherfestigkeit kann durch geeignete Lagerungsbedingungen auch die Festigkeit nach Feuchtebelastung verbessert werden.

Es gibt eine Reihe von theoretischen Überlegungen, mit deren Hilfe die vorliegenden Effekte beschrieben werden können:

- a) Eine weitere Kondensation der Harze nach dem Verlassen der Presse kann zu einer stärkeren Ausprägung der Kohäsionskräfte innerhalb des Leimes führen. In der Konsequenz kann daraus eine deutliche Zunahme der Scherfestigkeit resultieren. Dies ist für Harnstoffharze nicht belegt, sondern konnte bisher nur für PF-Harze dokumentiert werden (Roffael et al. 1973b). Nach Stegmann und v.Bismarck (1967) ist es nicht möglich, eine einmal unterbrochene Kondensation eines Harnstoffharzes weiterzuführen. Allerdings muss unterschieden werden, ob nach dem Verpressen abgekühlt wird und zur Prüfung der Hydrolyseeffekte wiederum aufgeheizt wird oder ob die Proben auf eine Temperatur abgekühlt werden, um dieser dann über einen längeren Zeitraum ausgesetzt zu bleiben. Damit würde die Kondensation, die in der Presse begonnen wurde, nicht vollständig unterbrochen, sondern kann bei einer niedrigeren Temperatur weitergeführt werden.
- b) Lu und Pizzi (1998) vermuten, dass es zu einer Reorganisation von Dimethylenetherbrücken-Bindungen zu Methylenbrücken-Bindungen in dem kondensierten Harz kommen kann, wodurch ein festeres Netzwerk entstehen kann und auf diese Art eine Verbesserung der Verleimungsgüte erreicht wird. Methylenbrücken weisen zudem eine höhere Hydrolysebeständigkeit auf (Dunky 1999a). Ein Nachweis für diese Reorganisation wurde bisher nicht erbracht.
- c) Die Rheologie von Klebstoffen wurde von Keylwerth und Höfer (1962) untersucht. Die Autoren stellen fest, dass grundsätzliche Unterschiede zwischen dem rheologischen Verhalten des Leims selber und dem der Leimfuge bestehen. Es wurden Untersuchungen an Thermoplasten (PVAc⁹-Leim) und Duroplasten (P-R¹⁰-Leim) bei Querkzugbelastung durchgeführt. Es wurde festgestellt, dass das Kriechverhalten von Thermoplasten deutlich stärker ausgeprägt ist als von Duroplasten; aber auch bei Duroplasten ist ein Kriechverhalten nachweisbar. Es ist vorstellbar, dass dieser Effekt dazu führt, die mechanische Verankerung zu verstärken, da durch Fließen des Klebstoffes auch noch nach

⁹ Poly-Vinyl-Acetat

¹⁰ Resorzin-Phenol-Formaldehyd-Harz

dem Verpressen vermehrt Kontakt zwischen Holz und Klebstoff aufgebaut wird und Spannungen im Material insgesamt abgebaut werden.

- d) Ob es zwischen den Komponenten des Klebharzes und dem Holz zur Ausbildung von kovalenten Bindungen kommen kann, ist im Schrifttum bisher nicht zweifelsfrei belegt (Dunky 1999a). Es wird angenommen, dass der Klebstoff über Wasserstoffbrücken-Bindungen Kontakt zur Holzoberfläche findet (Pizzi 1983).
- e) Unter Hydrolyse wird der Abbau der Leimes in seine Grundbausteine Harnstoff und Formaldehyd unter Einlagerung von Wasser verstanden; dieser Effekt tritt vermehrt mit höherer Temperatur und niedrigerem pH-Wert auf (Dunky 1999a). Nach Untersuchungen von Neußer und Schall (1970) tritt der hydrolytische Abbau von Harnstoffharzen ab einer Temperatur von etwa 75°C auf.
- f) Eine mechanische Zerstörung der Leimverbindung kann durch Quell- und Schwindbewegungen hervorgerufen werden (Ginzel 1973), da ein ausgehärtetes UF-Harz spröde ist und den feuchtebedingten Dimensionsänderungen des Holzes nicht folgen kann.

Bei der Lagerung der verklebten Furnierstreifen ist dem Grunde nach bei Temperaturen von 60°C bis 100°C innerhalb der ersten drei Stunden eine Zunahme der Scherfestigkeit feststellbar (Abbildung 57). Dafür kann prinzipiell zunächst eine weitere Kondensation des Harzes, eine Reorganisation der Leimbrücken als auch ein möglicher Spannungsabbau innerhalb der Leimfuge verantwortlich gemacht werden. Allerdings muss die Möglichkeit einer weitergeführten Kondensation des Harzes eingeschränkt werden, da bei keiner Lagertemperatur die maximal mögliche Scherfestigkeit von 3,5 N/mm² (vgl. Abbildung 59 und Abbildung 62) erreicht wird.

Nach Robitschek und Christensen (1976) kann in der Presse sowohl die Kondensation des UF-Harzes aber auch gleichzeitig eine hydrolytische Spaltung der bereits vernetzten Bereiche stattfinden. Es lässt sich ableiten, dass auch unter den Lagerbedingungen die Hydrolyse parallel zu den positiven Effekten auf die Klebfestigkeit wirkt. Während bei einer Lagertemperatur von 60°C keine Einbußen der Klebfestigkeit festzustellen sind, überwiegt insbesondere bei einer Temperatur von 100°C nach der anfänglichen Festigkeitszunahme die hydrolytische Spaltung des Harzes. Eine mechanische Belastung der Leimfuge kann im Hinblick auf den zeitlichen Verlauf der Lagerung an den hier untersuchten verklebten Furnierstreifen ausgeschlossen werden, da die Proben gleichen Feuchtebedingungen ausgesetzt waren und somit Quell- und Schwindbewegungen des Holzes vermieden wurden. Die Feuchtebeständigkeit des UF-Harzes (Abbildung 58) verhält sich in diesem Zusammenhang analog. Die Annahme, dass eine Verbindung des UF-Harzes zum Holz lediglich durch Wasserstoffbrücken-Bindungen besteht, erscheint im Hinblick auf die Entwicklung der Feuchtebeständigkeit des UF-Harzes während der Lagerung wenig plausibel. Entweder wird die Zugänglichkeit des Wassers vermindert oder aber es werden kovalente Bindungen zwischen Harz und Holz während der Lagerung ausgebildet, die die Beständigkeit gegenüber Wassereinwirkung erhöhen.

Aus dem Vergleich der Presszeiten (Abbildung 59) lässt sich ableiten, dass während des Pressvorgangs die Kondensation nach einer längeren Presszeit weiter fortgeschritten ist und mehr Methylenbrücken ausgebildet sind. Da dieser Bindungstyp stärker hydrolysebeständig ist, folgt die geringere Abnahme der Klebfestigkeit bei höherer Lagertemperatur.

Der Vergleich der beiden Feuchtebereiche während der Lagerung (Abbildung 60) verdeutlicht den Einfluss der Feuchte auf die Hydrolyseempfindlichkeit des UF-Harzes. Bereits bei einer relativ geringen Lagertemperatur von 60°C kommt es zu einer merklichen Festigkeitsabnahme. Die Befeuchtung der Proben auf 12% erfolgt unter den vorliegenden Bedingungen innerhalb weniger Minuten zu Beginn der Lagerung. Damit finden in dem Zeitraum auch die daraus resultierenden Dimensionänderungen des Holzes (vgl. v.Hass und Frühwald 1999) statt. Es hätte erwartet werden können, dass dadurch die Prüfwerte nach einstündiger Lagerung der stärker befeuchteten Proben beeinflusst werden. Dieser Effekt ist allerdings nicht erkennbar. Hier kann ein Einfluss der Quell- und Schwindbewegungen des Holzes auf die Klebfestigkeit nicht nachgewiesen werden. Möglicherweise ist die Elastizität des Harzes zu diesem Zeitpunkt noch so groß, dass es diesen Dimensionsänderungen folgen kann.

Aus der Betrachtung der geringen und hohen Härterdosierung (Abbildung 61) erschließt sich der gravierende Einfluss der Härtermenge und des daraus resultierenden pH-Wertes auf die Hydrolysebeständigkeit des UF-Harzes (vgl. Robitschek und Christensen 1976). Bei einer Härterdosierung von 5% wird die Klebfestigkeit bei einer geringen Lagertemperatur von 60°C innerhalb von 72 Stunden nahezu halbiert.

6.4.1.2 Formaldehydemission

In Abbildung 63 ist die Entwicklung der Formaldehydemission der Leimfuge von UF-verleimten Furnierstreifen während der Lagerung über 72 Stunden in Abhängigkeit von den Lagertemperaturen aufgetragen. Ausgehend von einem Anfangswert zwischen 160 und 180 mg/kg an Probenmaterial nimmt die Formaldehydemission (Messung nach der Flaschenmethode) bei allen Temperaturen rasch auf 8 bis 120 mg/kg ab. Über diesen Zeitpunkt hinaus ändern sich die Werte bei 60°C und 80°C nur noch unwesentlich, bei 100°C wird er Wert nach 72-stündiger Lagerung noch weiter auf etwa 50 mg/kg gesenkt. Es wird ein deutlicher Einfluss der Temperatur auf die Abnahme der Emissionswerte herausgestellt: Je höher die Lagertemperatur, umso geringer ist die Formaldehydemission der Leimfuge.

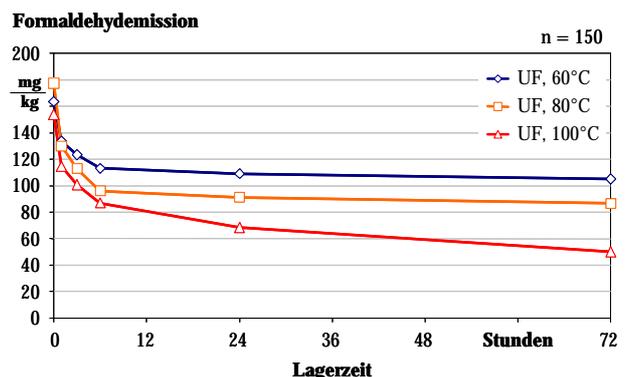


Abbildung 63: Änderung der Formaldehydemission (Flaschenmethode) von UF-verklebten Furnierstreifen während der Lagerung über 72 Stunden; Mittelwerte aus allen Messreihen.

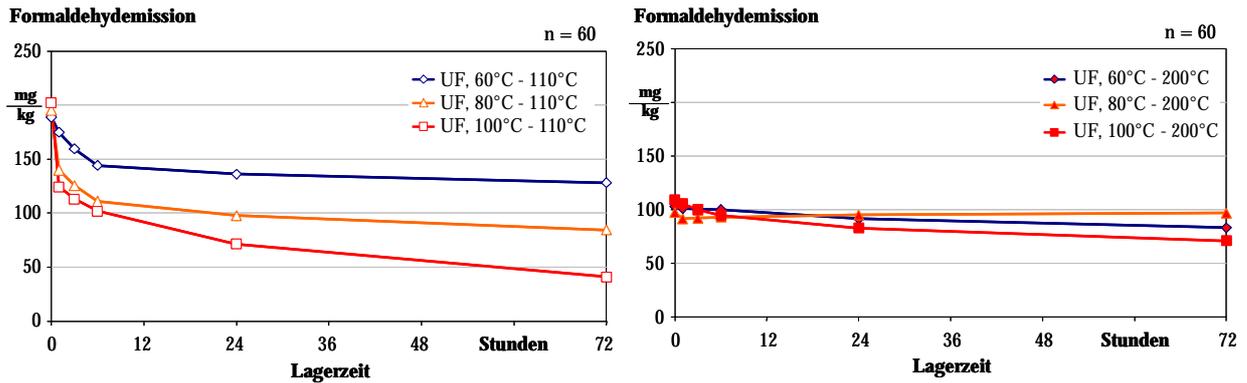


Abbildung 65: Änderung der Formaldehydemission von UF-verklebten Furnierstreifen während der Lagerung über 72 Stunden bei verschiedenen Lager- und Presstemperaturen.
links: 100°C Presstemperatur rechts: 200°C Presstemperatur

In Abbildung 66 ist die Änderung der Formaldehydemission der Klebfuge bei verschiedenen Lagertemperaturen und -feuchten aufgezeigt. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Werte bei einer Lagerung mit höherer Temperatur stärker abnehmen. Der Einfluss der Probenfeuchte stellt sich uneinheitlich dar: Während bei 60°C die Formaldehydemission der Proben mit einer Feuchte von 6% innerhalb von 72 Stunden stärker abnimmt als bei Proben mit einer Feuchte von 12%, verhält sich dies bei einer Lagertemperatur von 100°C umgekehrt: Mit einer Probenfeuchte von 12% wird am Ende der Lagerung der geringste Emissionswert gemessen.

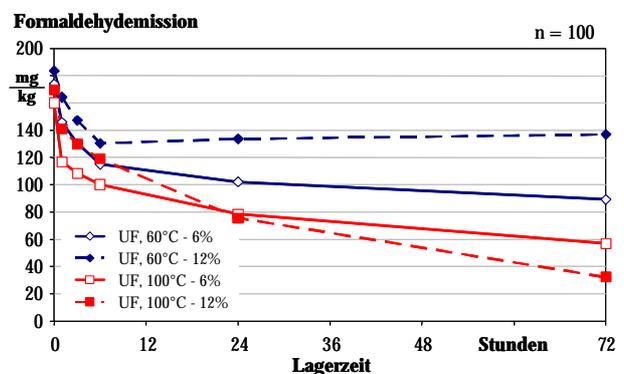


Abbildung 66: Änderung der Formaldehydemission von UF-verklebten Furnierstreifen während der Lagerung über 72 Stunden bei verschiedenen Lagertemperaturen und -Feuchten.

Erkenntnisse

Im folgenden sind die möglichen Ursachen für die Entwicklung der Formaldehydemission aus der Leimfuge während der Lagerung aufgezählt:

- Es besteht die Möglichkeit, dass Formaldehyd während der Lagerung aus der Leimfuge ausdampft und somit während der Prüfung nicht mehr als Emission erfasst werden kann. Dieser Effekt wurde von Roffael et al. (1980) für die Reduktion der Formaldehydemission an Laborspanplatten verantwortlich gemacht.
- Während der Aushärtung des Leims kondensiert freier Formaldehyd mit Harnstoff. Durch eine weitere Kondensation des Leims nach dem Verpressen würde ebenso freier Formaldehyd eingebunden und somit reduziert werden.

- c) Durch das Holz kann Formaldehyd gebunden werden (Roffael 1973). Somit kann das Holz dazu beitragen, dass die Formaldehydemission reduziert wird.
- d) Bei der Hydrolyse von UF-Harz wird Formaldehyd freigesetzt (Dunky 1999a). Dies führt zu einer Erhöhung der Formaldehydemission.

Die Ergebnisse legen den Schluss nahe, dass der freie Formaldehyd aus der Leimfuge in die Umgebungsluft freigesetzt wird. Der Formaldehyd dampft aus der Leimfuge aus. Je höher die Lagertemperatur, umso schneller sinkt die Formaldehydemission der Leimfuge. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Diffusionsgeschwindigkeit mit zunehmender Temperatur ansteigt.

Je höher die Lagertemperatur, umso geringer ist die Formaldehydemission der Leimfuge. Allerdings sinkt die Formaldehydemission in keinem Fall unter einen Wert von 40 mg/kg. Die Formaldehydemission des Kiefernholzes (vgl. Abschnitt 5.4.3) beträgt zwischen 35 mg/kg und 45 mg/kg. Ein gewisser Grundbetrag an Formaldehyd wird also vom Holz emittiert.

6.4.2 UFM-Harz

6.4.2.1 Scherfestigkeit

In Abbildung 67 ist die Entwicklung der Scherfestigkeit von UFM-verleimten Furnierstreifen während der Lagerung bei verschiedenen Temperaturen dargestellt. Der Anfangswert beträgt für alle Proben unmittelbar nach dem Verpressen zwischen 2,7 N/mm² und 3,0 N/mm². Während einer Lagerung der Proben bei 60°C ist ein allmählicher Anstieg der Scherfestigkeit auf etwa 3,6 N/mm² feststellbar. Die größte Zunahme erfolgt innerhalb der ersten 6 Stunden. Bei einer Temperatur von 80°C nimmt die Scherfestigkeit in den ersten 6 Stunden der Lagerung auf fast 4 N/mm² zu und ändert sich im weiteren Verlauf nicht mehr wesentlich. Ausgehend vom gleichen Anfangswert steigt die Klebfestigkeit bei einer Temperatur von 100°C auf über 4 N/mm² innerhalb der ersten Stunde und sinkt dann im weiteren Verlauf der Lagerung wiederum auf die Hälfte dieses Wertes ab.

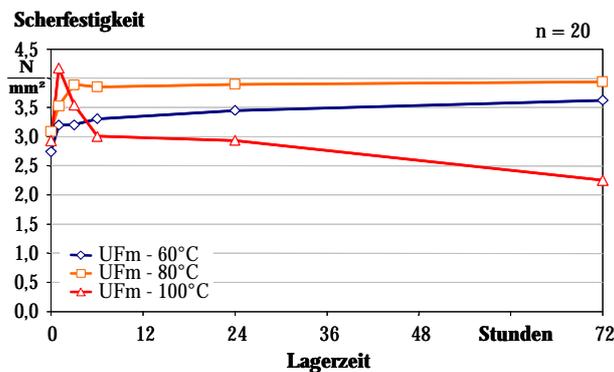


Abbildung 67: Änderung der Scherfestigkeit von UFM verklebten Furnierstreifen während der Lagerung bei verschiedenen Temperaturen.¹¹

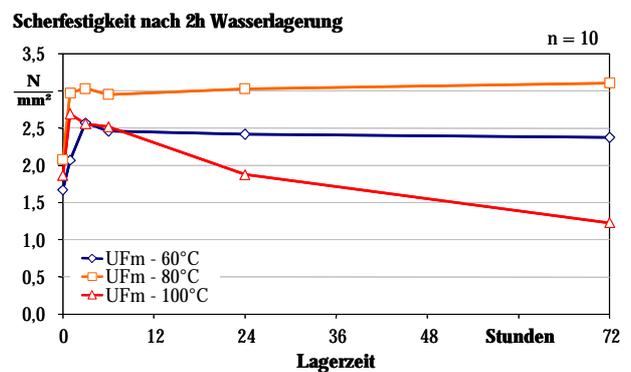


Abbildung 68: Änderung der Scherfestigkeit nach 2-stündiger von UFM verklebten Furnierstreifen während der Lagerung bei verschiedenen Temperaturen.

Wenngleich auf einem anderen Niveau, so stellt die Scherfestigkeit nach 2-stündiger Wasserlagerung prinzipiell den gleichen Zusammenhang zwischen der Klebfestigkeit und der Temperatur dar während der Lagerung über 72 Stunden dar (Abbildung 68).

Erkenntnisse

Die Scherfestigkeit (trocken und nach Wasserlagerung) des Harzstoff-Formaldehydharzes mit einem geringen Melaminanteil weist unmittelbar nach dem Verpressen unter gleichen Pressbedingungen etwa den gleichen Betrag auf, wie der eines reinen UF-Harzes. Während der Lagerung nimmt die Klebfestigkeit in Abhängigkeit von der Lagertemperatur beträchtlich zu.

¹¹ Anmerkung: Für die Auswertung des UFM-Harzes standen für die Lagertemperatur von 100°C lediglich eine Probenreihe zur Verfügung, die auf eine Feuchte von 12% klimatisiert waren. Im Vergleich zu einem reinen UF-Harz mit gleichen Lagerbedingungen (vgl. Abbildung 60) ist erkennbar, dass die Hydrolysebeständigkeit des UFM-Harzes deutlich größer ist, da die absolute und relative Abnahme der Scherfestigkeit wesentlich geringer ausfällt.

Die "Grenztemperatur" für Lagerbedingungen scheint hier höher zu liegen, als bei dem reinen UF-Harz. Bei 80°C wird noch eine deutliche Erhöhung der Klebfestigkeit erreicht und auch im weiteren Verlauf der Lagerung nicht wieder abgebaut. Eine Temperatur von 60°C ist zu gering, um die Klebfestigkeit entscheidend zu erhöhen und eine Lagertemperatur von 100°C kann zwar einen sprunghaften Anstieg der Festigkeit bewirken, aber über einen längeren Zeitraum wird bei dieser Temperatur die Klebfestigkeit merklich vermindert.

Die Unterschiede und Gemeinsamkeiten zwischen reinen UF- und melaminhaltigen UF-Harzen können wie folgt charakterisiert werden:

- a) Melaminhaltige UF-Harze¹² weisen eine höhere Festigkeit als reine UF-Harze auf. Dies ist zum einen auf die Ringstruktur des Melamins zurückzuführen. Weiterhin ist die Methylolgruppe durch die konjugierten Doppelbindungen des Melamins stabilisiert. Daher ist die C-N-Bindung zwischen dem Formaldehyd und dem Melamin stabiler (Dunky 1999a).
- b) Dadurch hat ein UF-Harz mit steigendem Melaminanteil auch eine höhere Beständigkeit gegenüber der Hydrolyse. Die Hydrolysebeständigkeit wird zudem durch die Pufferwirkung des Melamins gegenüber Säure erhöht (Dunky 1999a).
- c) Die Pufferwirkung des Melamins bewirkt einen langsameren Abfall des pH-Wertes in der Leimfuge. Dies hat allerdings auch zur Folge, dass die Reaktionsgeschwindigkeit bei zunehmendem Melaminanteil im UF-Harz abnimmt (Troughton und Chow 1975).
- d) Kovalente Bindungen zwischen Harnstoff und Melamin sind über Methylen- und Methylenetherbrücken bei der Cokondensation möglich (Nusselder et al. 1998).
- e) Die Reaktionsmechanismen der Methylolierung und Kondensation von UF- und melaminhaltigen UF- bzw. MUF-Harzen verlaufen nach den gleichen Prinzipien.

Die verminderte Reaktionsgeschwindigkeit des melaminhaltigen Harzes gegenüber einem reinen UF-Harz ist anhand der Gelierzeiten (Abbildung 165) deutlich zu erkennen. Allerdings spiegelt sich dies nicht in einer verminderten Anfangsfestigkeit der Klebfuge bei gleichen Pressbedingungen im Vergleich zu dem reinen UF-Harz wider. Das bedeutet, dass mit diesem Harz eine ausreichende Klebfestigkeit trotz geringem Aushärtungsgrad erzielt werden kann.

Innerhalb der ersten Stunden der Lagerung kommt es zu einer deutlichen Zunahme der Scherfestigkeit, dabei nimmt die Klebfestigkeit um bis zu 35% zu. Die maximal mögliche Scherfestigkeit unter den vorliegenden Bedingungen liegt um 4,0 N/mm² für die trockene Prüfung und um 3,0 N/mm² für die Prüfung nach 2-stündiger Wasserlagerung. Dies legt den Schluss nahe, dass als Ursache für den starken Festigkeitsanstieg eine weitere Kondensation des Harzes eine wesentliche Rolle spielen kann. Eine Lagertemperatur von 60°C bewirkt, dass sich die Klebfestigkeit nur sehr langsam dem Maximalwert nähert.

¹² Reine Melamin-Formaldehyd-Harze werden bei der Herstellung von Holzwerkstoffen aus wirtschaftlichen Gründen nicht eingesetzt.

Gleichzeitig zeigt sich die erhöhte Hydrolysebeständigkeit des melaminhaltigen Harzes gegenüber einem reinen UF-Harz dadurch, dass bei einer Temperatur von 80°C die Festigkeit der Leimfuge nicht vermindert wird. Eine Temperatur von 100°C ist auch hier deutlich zu hoch, allerdings ist der Wert nach 72-stündiger Lagerung höher als der des reinen UF-Harzes.

Es ist festzuhalten, dass die Festigkeit des UFm-Harzes durch die Lagerung um über 30% erhöht werden kann. Eine Lagertemperatur um 80°C erscheint hierbei als optimal. Die Eigenschaftsänderung ist dann nach 3 Stunden abgeschlossen.

6.4.2.2 Formaldehydemission

Abbildung 69 zeigt die Änderung der Formaldehydemission der Leimfuge von UFm-verleimten Furnierstreifen während der Lagerung für 72 Stunden. Der Anfangswert unmittelbar nach dem Verpressen beträgt zwischen 250 mg/kg und 290 mg/kg. Während der Lagerung nimmt die Formaldehydemission in Abhängigkeit von der Temperatur stark ab. Nach 72 Stunden beträgt der Wert bei einer Lagertemperatur von 60°C etwa 120 mg/kg, bei 80°C 70 mg/kg und bei 100°C 40 mg/kg.

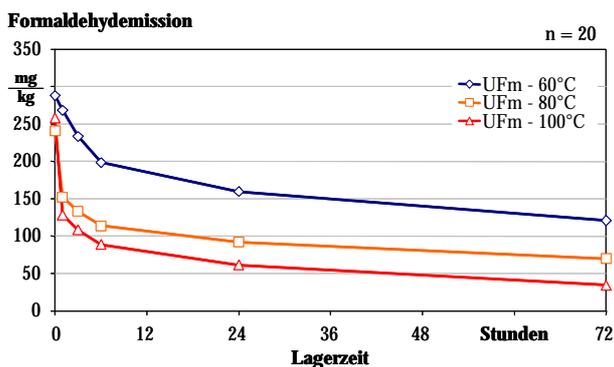


Abbildung 69: Änderung der Formaldehydemission von UFm-verklebten Furnierstreifen während der Lagerung bei verschiedenen Temperaturen.

Erkenntnisse

Der Anfangswert der Formaldehydemission des melaminhaltigen Harzes liegt vor der Lagerung um etwa 30% über dem des reinen UF-Harzes. Dies stützt die Annahme, dass das Klebharz unmittelbar nach den Heißpressen nicht vollständig kondensiert ist, da zu diesem Zeitpunkt deutlich mehr freies Formaldehyd in der Leimfuge vorliegt.

Die Abnahme der Formaldehydemission ist wiederum in starkem Maße von der Temperatur während der Lagerung beeinflusst (vgl Abschnitt 6.4.1.2).

6.4.3 MUF-Harz

6.4.3.1 Scherfestigkeit

In Abbildung 70 ist die Entwicklung der Scherfestigkeit der MUF-verleimten Furnierstreifen während der Lagerung bei verschiedenen Temperaturen dargestellt. Der Ausgangswert vor der Lagerung beträgt $3,5 \text{ N/mm}^2$. Bei beiden Temperaturen ist ein deutlicher Anstieg der Scherfestigkeit auf etwa 4 N/mm^2 innerhalb der ersten 3 Stunden der Lagerung festzustellen. Bei 80°C ist über den weiteren Verlauf der Lagerung keine nennenswerte Änderung der Klebfestigkeit zu erkennen. Bei 100°C dagegen nimmt die Scherfestigkeit bis zum Ende des betrachteten Zeitraums auf etwa 3 N/mm^2 ab.

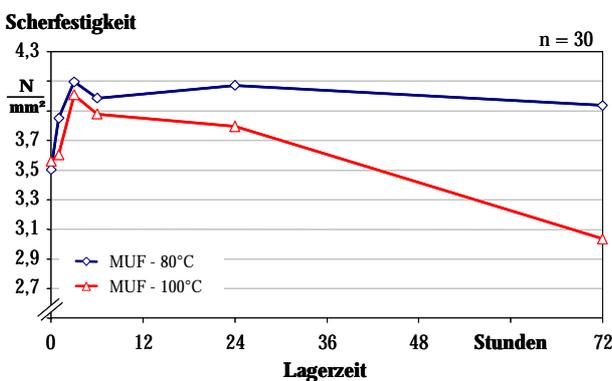


Abbildung 70: Änderung der Scherfestigkeit von MUF-verklebten Furnierstreifen während der Lagerung bei verschiedenen Temperaturen.

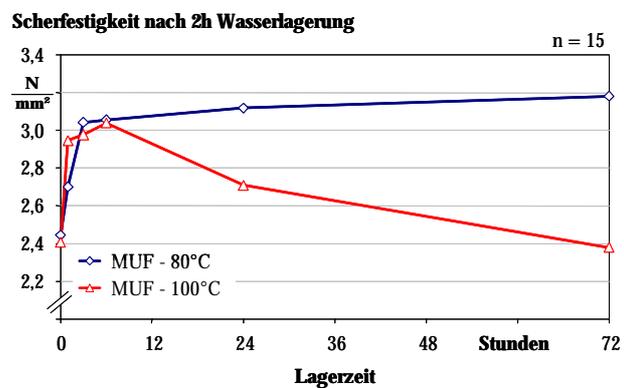


Abbildung 71: Änderung der Scherfestigkeit nach 2-stündiger Wasserlagerung von MUF-verklebten Furnierstreifen.

Abbildung 71 zeigt die Entwicklung der Scherfestigkeit nach 2-stündiger Wasserlagerung der MUF-verleimten Furnierstreifen. Ausgehend von einem Wert um $2,4 \text{ N/mm}^2$ ist auch hier zunächst ein Anstieg der Festigkeit innerhalb der ersten 6 Stunden auf rund 3 N/mm^2 wahrzunehmen. Bei 80°C sinkt der Wert über den Lagerzeitraum nicht ab, bei 100°C aber wird die Festigkeit deutlich reduziert.

Abbildung 72 stellt die Änderung der Scherfestigkeit von MUF-verleimten Furnierstreifen bei verschiedenen Lagertemperaturen und Presszeiten dar. Das Festigkeitsniveau vor der Lagerung liegt nach einer Presszeit 60 Sekunden um 3 N/mm^2 und nach 100 Sekunden um 4 N/mm^2 . Es ist feststellbar, dass die Proben nach 60 Sekunden Presszeit bei einer

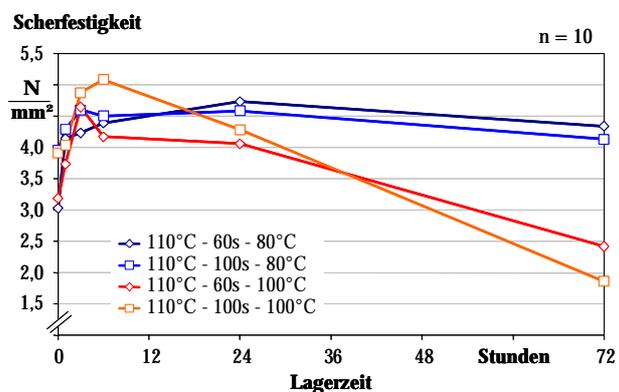


Abbildung 72: Änderung der Scherfestigkeit von MUF-verklebten Furnierstreifen bei verschiedenen Lagertemperaturen und Presszeiten.

Lagertemperatur von 100°C innerhalb der ersten drei Stunden der Lagerung den gleichen Wert erreichen, wie die Proben, die 60 Sekunden verpresst werden und mit 80°C gelagert werden. Proben mit einer Presszeit von 100 Sekunden und einer Lagertemperatur von 100°C erreichen innerhalb von 6 Stunden sogar einen Maximalwert von 5 N/mm². Danach ist bei einer Temperatur von 100°C ein drastischer Abfall der Scherfestigkeit zu beobachten.

Erkenntnisse

Das MUF-Harz liefert bereits nach dem Verpressen im Vergleich zum UFM- und zum reinen UF-Harz die höchsten Festigkeitswerte. Die Scherfestigkeit wird bei 80°C und 100°C zunächst um etwa 20% erhöht. Auch die Feuchtebeständigkeit des Harzes nimmt während der Lagerung um etwa 30% zu. Allerdings ist auch für das Harz mit hohem Melaminanteil eine Lagertemperatur von 100°C zu hoch.

Die Proben erreichen nach 60 Sekunden Presszeit bei einer Lagertemperatur von 100°C innerhalb der ersten drei Stunden der Lagerung den gleichen Wert, wie die Proben mit einer Presszeit von 60 Sekunden und 80°C Lagertemperatur.

6.4.3.2 Formaldehydemission

Abbildung 73 zeigt die Entwicklung der Formaldehydemission von MUF-verleimten Furnierstreifen während der Lagerung. Der Anfangswert unmittelbar nach dem Verpressen beträgt etwa 200 bis 230 mg/kg atro Holz. Während der Lagerung wird dieser Wert auf etwa 50 mg/kg gesenkt, wobei die stärksten Veränderungen während der ersten 6 Stunden der Lagerung stattfinden und die Werte bei einer Lagerung mit der höheren Temperatur von 100°C geringer sind.

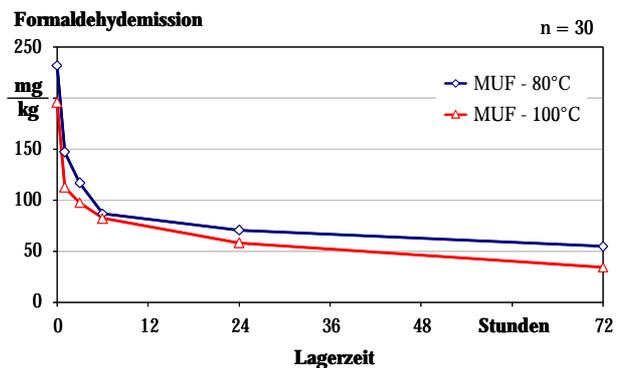


Abbildung 73: Änderung der Formaldehydemission von MUF-verklebten Furnierstreifen.

6.5 Zusammenfassung

- ✓ Während der Lagerung der verklebten Furnierstreifen unter den Bedingungen, wie sie im Plattenstapel realistisch sind, kommt es bei Aminoplast-Harzen unter geeigneten Bedingungen zu einer deutlichen Erhöhung der Klebfestigkeit.
- ✓ Die Formaldehydemission nimmt in nahezu allen Fällen mit der Lagerdauer ab.
- ✓ Die Klebfestigkeiten haben bereits während der ersten 6 Stunden der Lagerung ihr Maximum erreicht. Aufgrund von zu hohen Lagertemperaturen kommt es zu einer langsamen Abnahme der Klebfestigkeit.
- ✓ Bei sehr hohen Lagertemperaturen (100°C) kommt es zunächst zu einer Verbesserung der Scherfestigkeit. Diese nimmt bis zum Ende des betrachteten Lagerzeitraumes zum Teil wieder beträchtlich ab. Häufig wird nach 72 Stunden das Anfangsniveau deutlich unterschritten.

UF-Harze

- ✓ Die "Grenztemperatur" für das untersuchte UF-Harz scheint bei den gegebenen Bedingungen bei höchstens 80°C zu liegen, da es bei dieser Temperatur im längeren Verlauf der Lagerung zu einer Abnahme der Scherfestigkeiten kommen kann.
- ✓ Nach langer Presszeit gibt es keine Verbesserung der Festigkeitswerte, das deutet darauf hin, dass die maximalen Festigkeitswerte in der Presse bereits erreicht sind und die Aushärtung nahezu abgeschlossen ist.
- ✓ Nach einer kürzeren Presszeit kann die Klebfestigkeit angehoben werden, allerdings wirkt sich eine Lagerung bei Temperaturen über 80°C nach etwa einer Lagerzeit von 6 Stunden negativ aus.
- ✓ Die Feuchte hat keinen positiven Einfluss auf die Entwicklung der Klebfestigkeit von UF-Harzen. Je höher die Feuchte und je höher die Lagertemperatur umso stärker nimmt die Klebfestigkeit ab.
- ✓ Bei einer zu hohen Härtereinsatzmenge kommt es selbst bei niedrigen Lagertemperaturen zu einer deutlichen Abnahme der Klebfestigkeit.
- ✓ Die Presstemperatur hat einen merklichen Einfluss auf die Entwicklung der Klebfestigkeit. Während es nach einem Verpressen mit 200°C selbst bei moderaten Temperaturen zu einer Abnahme der Scherfestigkeit kommt, kann bei einer Presstemperatur von 110°C die Festigkeit zunehmen. Dies hat zur Folge, dass das Verhalten der Deck- und Mittelschichten der Holzwerkstoffplatten gesondert betrachtet werden muss.
- ✓ Je höher die Lagertemperatur, umso geringer ist die Formaldehydemission der Leimfuge.

UFm-Harz

- ✓ Die "Grenztemperatur" für Lagerbedingungen liegt hier höher, als bei dem reinen UF-Harz. Bei 80°C wird noch eine deutliche Erhöhung der Klebfestigkeit erreicht und auch im weiteren Verlauf der Lagerung nicht wieder abgebaut.
- ✓ Eine Temperatur von 60°C ist zu gering, um die Klebfestigkeit entscheidend zu erhöhen. Eine Lagertemperatur von 100°C kann zwar einen sprunghaften Anstieg der Festigkeit bewirken, aber über einen längeren Zeitraum wird die Klebfestigkeit bei dieser Temperatur merklich vermindert.
- ✓ Die Abnahme der Formaldehydemission ist in starkem Maße von der Temperatur während der Lagerung abhängig. Der Anfangswert liegt unmittelbar nach dem Verpressen oberhalb der UF-verleimten Proben.

MUF-Harz

- ✓ Das MUF-Harz liefert die höchsten Festigkeitswerte. Die Klebfestigkeit kann während der Lagerung deutlich erhöht werden.
- ✓ Auch hier wirkt sich eine Lagertemperatur von 80°C positiv aus; eine Temperatur von 100°C ist aber auch für das MUF-Harz zu hoch.
- ✓ Es ist feststellbar, dass die Proben nach 60 Sekunden Presszeit bei einer Lagertemperatur von 100°C innerhalb der ersten drei Stunden der Lagerung den gleichen Wert erreichen, wie die Proben, die 100 Sekunden verpresst werden und mit 80°C gelagert werden.
- ✓ Die Abnahme der Formaldehydemission ist von der Temperatur während der Lagerung abhängig.

7 Eigenschaftsänderung von stapelgelagerten Spanplatten im Labor

7.1 Zielsetzung und Fragestellung

Aus den Untersuchungen am Holz und Klebstoff unter den Lagerbedingungen lassen sich folgende Fragestellungen bzw. Zielsetzungen ableiten:

1. Wirken sich die festgestellten Zusammenhänge der Klebfestigkeit (Scherfestigkeit) der untersuchten Klebharze auch auf die Querkzugfestigkeit der Spanplatten unter geeigneten Lagerbedingungen positiv aus?
2. Kann mit Hilfe der Stapellagerung die Gleichgewichtsfeuchte insbesondere für PF-verleimte Platten reduziert werden?
3. Es soll erarbeitet werden, welchen Einfluss verschiedene Herstellparameter (Presszeitfaktor, Feuchte, Härtereinsatzmenge und Stapeltemperatur) auf die Entwicklung der Platteneigenschaften im Stapel haben.
4. Als Stapeltemperaturen für die reinen UF-Harze sollen 60°C und 75°C gewählt werden, da bei höheren Temperaturen nicht mit einer positiven Entwicklung der Platteneigenschaften gerechnet werden kann. Bei melaminhaltigen Harzen werden Stapeltemperaturen von 75°C und 100°C verwendet, obwohl es bei der hohen Temperatur zu einem Festigkeitsabfall der Klebfuge kommt. Es soll überprüft werden, wie sich beim MUF-Harz die Verminderung der Klebfestigkeit in Verbindung mit dem möglichen Spannungsabbau im Holz auf die Entwicklung der Eigenschaften auswirkt.
5. Neben konventionellen, aktuellen Leimsystemen der Spanplattenherstellung soll auch ein Harnstoffharz berücksichtigt werden, das ein Molverhältnis von F:U < 1 aufweist. Zudem sollen ein modifiziertes PF-Harz mit einem unmodifizierten hinsichtlich der Eigenschaftsentwicklung während der Stapellagerung verglichen werden.

7.2 Material

Im Rahmen der Laborversuche wurden dreischichtige Spanplatten in vier Versuchsreihen hergestellt. In der ersten und zweiten Versuchsreihe wurden Spanplatten mit verschiedenen UF-Harzen analysiert.¹³ Die dritte Versuchsreihe bestand aus jeweils einem Sortiment an MUF- und MUPF-Leimen. In der vierten Versuchsreihe fanden zwei PF-Harzkombinationen Verwendung.

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 Formaldehyd und Harnstoff unter 1,0 aufwies. Die übrigen Kenndaten des Harzes sind vergleichbar mit denen des Standardharzes. Im Labor

¹³ Die experimentellen Untersuchungen dieser Versuchsreihe wurden von Eikmeyer (1999) im Rahmen einer Diplomarbeit im Fachbereich Biologie der Universität Hamburg durchgeführt.

wurden insgesamt 60 UF-verklebte Spanplatten angefertigt und anschließend einer Stapellagerung unterzogen.

Eine weitere Versuchsreihe wurde mit konventionellen MUF- und MUPF-Harzen durchgeführt. Zudem werden zwei PF-Harzkombinationen verwendet. Es wurden insgesamt 8 MUF, 8 MUPF und 12 PF-verklebte Spanplatten angefertigt und anschließend einer Stapellagerung unterzogen.

7.2.1 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 und Sichtung, jedoch vor der Beleimung, entnommen.

Die Feuchte der Deckschichtspäne betrug vor der Beleimung im Mittel 3%, die der Mittelschichtspäne 2%. Aus den beiden Spansortimenten wurden dreischichtige Platten (Solldichte: 650 kg/m³) hergestellt.

7.2.2 Klebharze

7.2.2.1 UF-Harze

In der ersten Versuchsreihe wurde ein industriell etabliertes "E1"-Standardharz eingesetzt. Die Kenndaten der verwendeten Charge sind Tabelle 17 zu entnehmen.

Tabelle 17: Analytische Kenndaten des Standardharzes.

Molverhältnis	F:U > 1
Dichte	1,3 g/cm ³
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 18 sind die Kenndaten dieses Produkts aufgeführt.

Tabelle 18: Analytische Kenndaten des Versuchsharzes.

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

Bei der Beleimung der Deckschicht wurden dem Leim 0,5% Ammoniumnitrat als Härter zugegeben. Die Härtermenge der Mittelschicht wurde zwischen 0,5% und 3% variiert. Der Deckschicht und der Mittelschicht wurden jeweils 0,5% Paraffinemulsion (Mobilcer 730) als Hydrophobierungsmittel zugegeben (Tabelle 19).

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 20).

Tabelle 19: Konstante Herstellparameter der UF-Platten.

Konstante Parameter	Einstellung
Mittelschichtfeuchte	8%
Festharzgehalt DS	10%
Festharzgehalt MS	8%
Härter in der DS	0,5%
Presstemperatur	220°C
Nennichte	650 kg/m ³
Paraffinzugabe DS und MS	0,5%

Tabelle 20: Variierte Herstellparameter der UF-Platten.

Varierte Parameter	Stufen
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

7.2.2.2 MUF- und MUPF-Harze

Für diese Versuchsreihe wurde ein MUF- sowie ein MUPF-Harz verwendet. Die analytischen Kenndaten der verwendeten Chargen sind in Tabelle 21 dargestellt. Bei beiden Harzen handelt es sich um in der Industrie etablierte Produkte.

Tabelle 21: Analytische Kenndaten des MUF- und MUPF-Harzes.

Dichte	1,3 g/cm ³
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 der 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 und 100°C festgelegt (Tabelle 22 und Tabelle 23).

Tabelle 22: Konstante Herstellparameter der MUF- und MUPF-Platten.

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

Tabelle 23: Variierte Herstellparameter der MUF- und MUPF-Platten.

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

7.2.2.3 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 Spanplattenindustrie. Die Analysenwerte der verwendeten Chargen sind Tabelle 24, Tabelle 25 und Tabelle 26 zu entnehmen.

Die Modifikation des PF-Harzes besteht darin, dass die Viskosität mit Harnstoff auf einen Wert herabgesetzt wird, bei dem eine problemlose 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 genannten Gründen eine schnellere Produktion möglich ist, als mit dem unmodifizierten Harz.

Tabelle 24: Analytische Kenndaten des PF-Deckschichtharzes.

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

Tabelle 25: Analytische Kenndaten des unmodifizierten PF-Mittelschichtharzes.

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

Tabelle 26: Analytische Kenndaten des modifizierten PF-Mittelschichtharzes.

Alkaligehalt	5,2%
Dichte	1,3 g/cm ³
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 27).

Variiert wurden der Presszeitfaktor zwischen 9 und 12 Sekunden je Millimeter Plattenstärke sowie die Einstapeltemperatur mit 80°C, 95°C und 110°C. Alle übrigen Parameter blieben konstant (Tabelle 28).

Tabelle 27: Konstante Herstellparameter der PF-Platten.

Konstante Parameter	Einstellung
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
Neendichte	650 kg/m ³
Paraffinzugabe DS und MS	1%

Tabelle 28: Variierte Herstellparameter der PF-Platten.

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

7.3 Methodik

7.3.1 Herstellung der Spanplatten

Um eine gute und gleichmäßige Durchwärmung auch des Randbereichs der Spanplatten zu erreichen, wurde mit einem überstreuten Rand gearbeitet: Um den Spankuchen herum wurde ein 2 cm breiter Rand aus beleimten Deckschichtspänen gestreut. Durch die 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, in der Abmessung 700 x 550 mm² hergestellt. Diese Platten wurden unmittelbar nach der 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 74).

Um sicherzustellen, dass die sechs Teilplatten tatsächlich untereinander vergleichbar sind, wurden in Vorversuchen eine Platte hergestellt, deren sechs Teilplatten vollständig in 50 x 50 mm² 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 mit

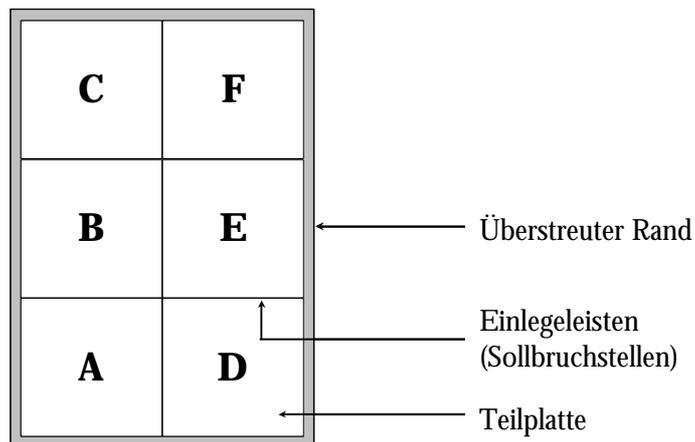


Abbildung 74: Aufteilung der Platten mit überstreutem Rand.

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

7.3.2 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 75 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.

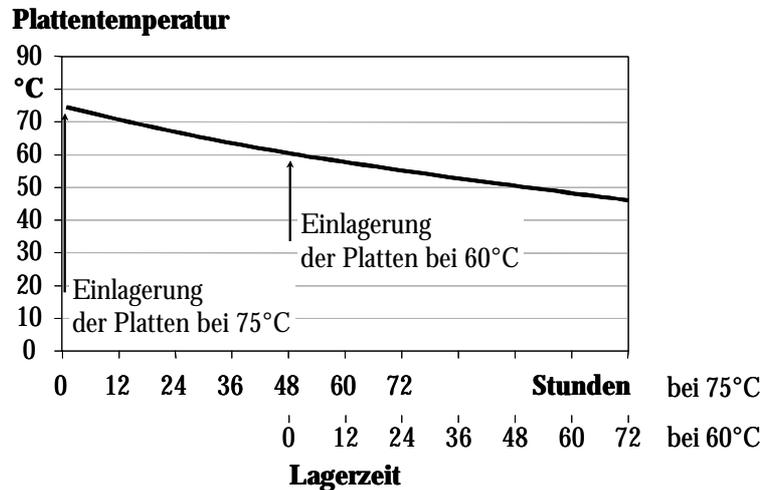


Abbildung 75: Temperaturkurve der simulierten Stapellagerung.

Für die jeweiligen Entnahmezeitpunkte ergaben sich folgende Temperaturen:

Tabelle 29: Plattentemperaturen bei Entnahme aus dem simulierten Stapel.

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

7.3.3 Probennahme

Die Teilplatte A wurde unmittelbar nach dem Pressen bei freier Luftumspülung innerhalb von 60 Minuten auf Raumtemperatur abgekühlt, die Proben gemäß Schnittplan ausgeformt (Abbildung 76) und dann geprüft. Es besteht während der Abkühlung nach den Verpressen ein enger Zusammenhang zwischen der Plattentemperatur und den Platteneigenschaften (Ohlmeyer 1997). 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 im Normklima gelagert. Die übrigen Platten wurden nach dem in Tabelle 30 gezeigten Schema aus dem Stapel entnommen.

Tabelle 30: Entnahmezeitpunkte der UF-Platten

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

Nach der Entnahme wurden die Platten im Normklima bis zur Gewichtskonstanz klimatisiert und dann gemäß Schnittplan zu Proben ausgeformt und geprüft (Abbildung 76).

7.3.4 Prüfmethoden

Die Querkzugfestigkeit 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.

Ab 1	QZ 1	u 1	QZ 2
u 2	Ab 2	QZ 3	FA Q1
FA Q2	FA	FA Q3	FA
QZ 4	Ab 3	u 3	QZ 5

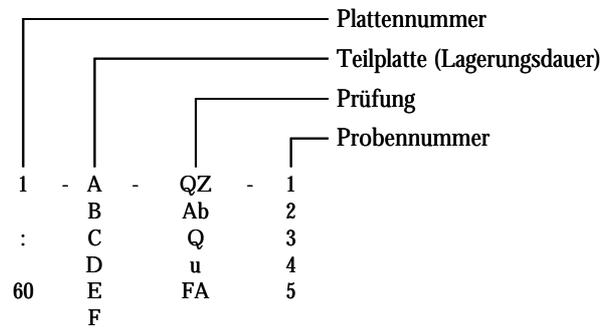


Abbildung 76: Schnittplan (links) und Probenbezeichnung (rechts) für UF-Platten.

wobei:

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

7.3.5 Anpassungen für MUF-, MUPF- und PF-Platten

7.3.5.1 Herstellung der Spanplatten

Die Platten wurden mit einer Dicke von 19 mm nach dem gleichen Prinzip hergestellt, wie es in Kapitel 7.3.1 beschrieben wurde. Lediglich das Plattenmaß (750 x 550 mm²) und die Abmessung der Teilplatten (250 x 275 mm²) wurden vergrößert. Der Schnittplan wurde entsprechend angepasst (Abbildung 77).

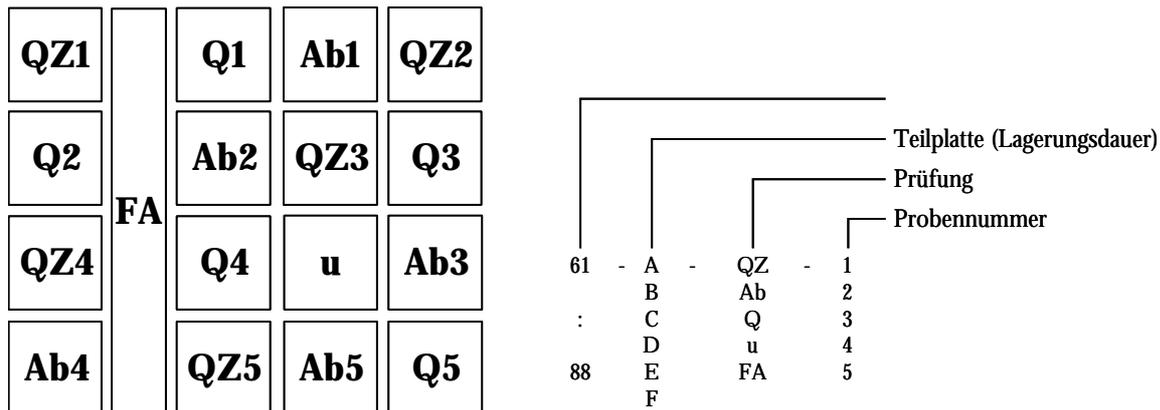


Abbildung 77: Schnittplan (links) und Probenbezeichnung (rechts) für MUF-, MUPF und PF-Platten.
wobei:

- Ab: Abhebefestigkeit
- QZ: Querkzugfestigkeit
- u: Feuchte
- Q: Dickenquellung
- FA: Formaldehydprüfung

7.3.5.2 Lagerung

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

7.3.5.3 Probennahme

Die Teilplatten wurden nach 3, 6, 24, 72 und 168 Stunden der Lagerung entnommen (Tabelle 31). 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 77). Im Normklima wurden die Proben anschließend bis zur Gewichtskonstanz klimatisiert.

Tabelle 31: Entnahmezeitpunkte der MUF,- MUPF- und PF-Platten.

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

7.3.5.4 Prüfmethoden

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 CO₂-freiem Wasser für 24 Stunden extrahiert.

7.3.6 Statistische Auswertung

Mittelung der Einzelwerte

Zur Auswertung und Darstellung der Eigenschaftsentwicklung in Abhängigkeit von der Lagerzeit wurden die Einzelwerte ermittelt, wie in Abschnitt 6.3.5 beschrieben. Ein Ausreißertest wurde ebenso durchgeführt. Die Anzahl der berücksichtigten Einzelwerte der jeweiligen Prüfzeitpunkte werden in den Graphen angegeben.

Ermittlung des Signifikanzniveaus

Es wurde ein t-Test zwischen den Werten der jeweiligen Prüfzeitpunkte durchgeführt, um das Signifikanzniveau der Eigenschaftsveränderung zu ermitteln.

7.4 Ergebnisse und Diskussion

7.4.1 Temperatur und Feuchte

Temperatur

In Abbildung 78 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 4.2.3 ausführlich erläutert.

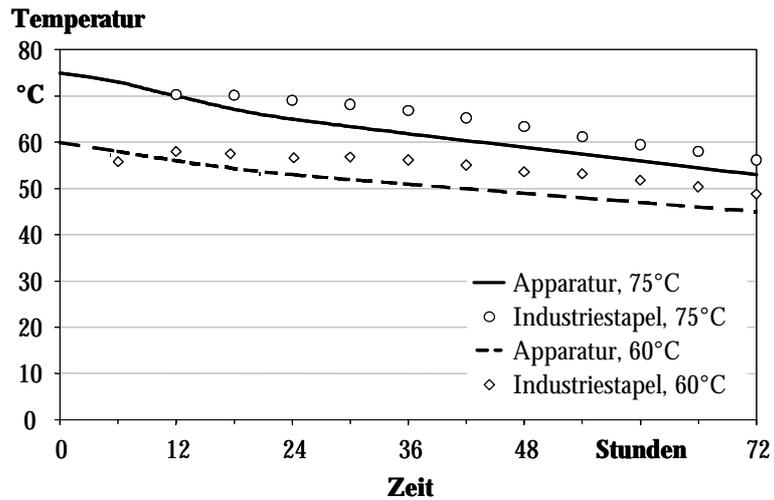


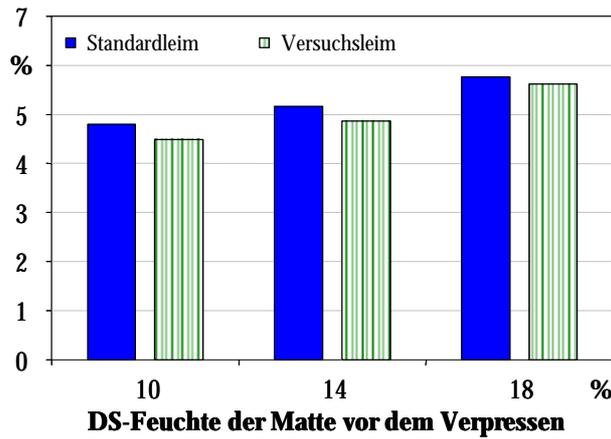
Abbildung 78: Vergleich der Temperaturen von Labor- und Industriestapeln (Einstapeltemperaturen 60°C und 75°C).

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%, bei 75°C höchstens 7%. Die absoluten Temperaturunterschiede betragen maximal 5°C.

Feuchte

Der Abbildung 79 ist zu entnehmen, dass die Feuchte der Platten nach dem Verpressen in Abhängigkeit von den Herstellparametern variiert. Durch die Produktionsparameter wird 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. Dementsprechend 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.

Feuchte nach dem Verpressen



Feuchte nach dem Verpressen

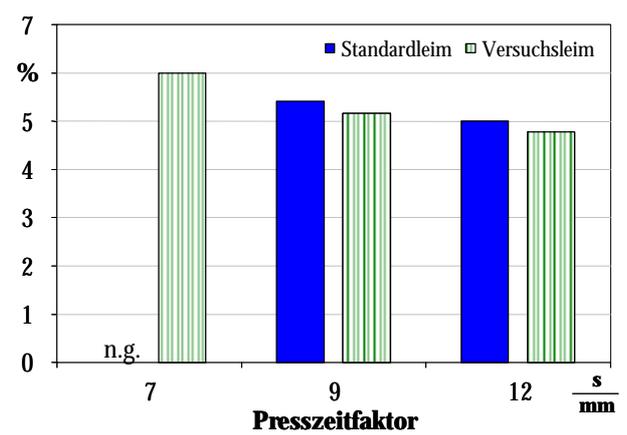
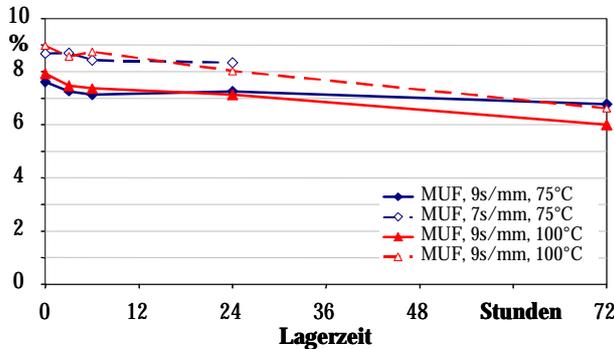


Abbildung 79: Feuchte der UF-Platten in Abhängigkeit von Mattenfeuchte und Presszeitfaktor.

Feuchte



Feuchte

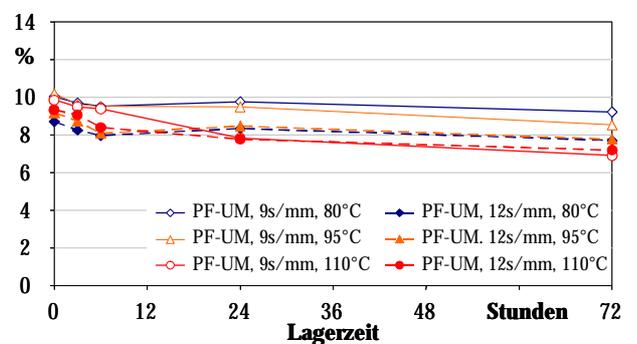


Abbildung 80: Änderung der Feuchte von MUF-Platten (links) und PF-Platten (rechts) während der Lagerung in Abhängigkeit von Presszeitfaktor und Lagertemperatur.

Die Änderung der Feuchte von MUF- und PF-Platten während der Lagerung ist in Abbildung 80 dargestellt. Durch die angewandte Methodik (siehe Kapitel 4.3) ist gewährleistet, dass die Platten während der Lagerung, entsprechend der realen Bedingungen im Plattenstapel, auch bei hohen Temperaturen nicht austrocknen.

7.4.2 UF-Platten

7.4.2.1 Querzugfestigkeit

In Abbildung 81 ist die Entwicklung der Querzugfestigkeit während der Stapellagerung bei 60°C 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/mm² und das der Versuchs-UF-Platten bei 0,27 N/mm².

In dieser Darstellung ist keine nennenswerte Veränderung 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 Temperatur von 75°C eine positive Tendenz erkennbar.

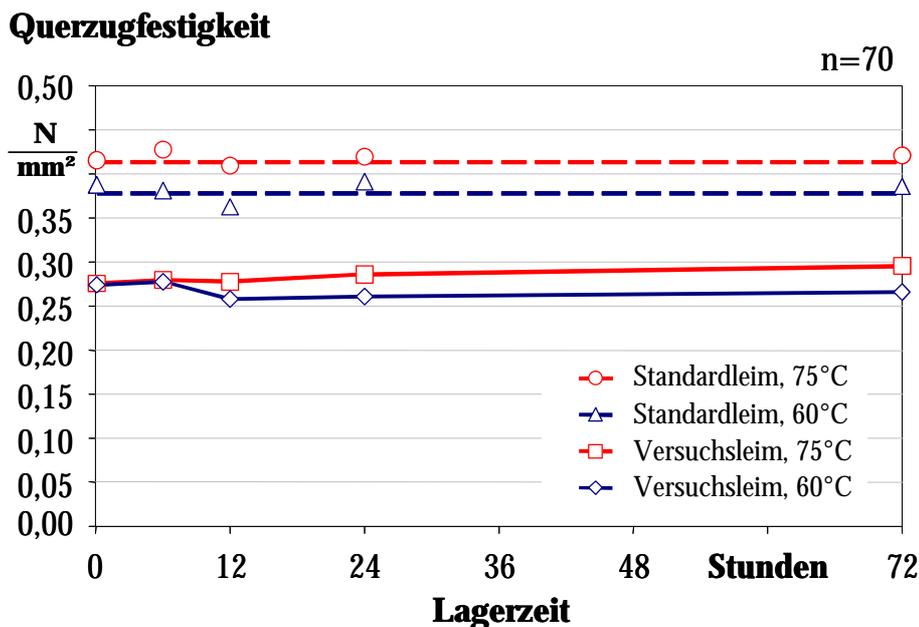


Abbildung 81: Entwicklung der Querzugfestigkeit für UF-Platten bei 60°C und 75°C Stapellagerung.

Abbildung 82 und Abbildung 83 zeigen die Differenzierung der Ergebnisse bezüglich der verwendeten Presszeitfaktoren. Es ist zu erkennen, 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/mm² für 12 s/mm und 0,35 N/mm² für 9 s/mm). Die Querzugfestigkeit der Platten, die mit dem Versuchsharz verpresst wurden, betragen bei einem Presszeitfaktor von 9 s/mm ca. 0,25 N/mm² und bei einem Presszeitfaktor von 12 s/mm ca. 0,30 N/mm².

An den Platten, die mit dem Standardharz verklebt 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 82).

Bei dem Versuchsharz ist mit einer Stapeltemperatur von 60°C unabhängig vom Presszeitfaktor keine Änderung der Querkzugfestigkeit zu verzeichnen. 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, wie Platten mit hohem Presszeitfaktor. Die Verbesserung der Querkzugfestigkeit ist innerhalb der ersten 6 bis 12 Stunden der Lagerung abgeschlossen (Abbildung 83).

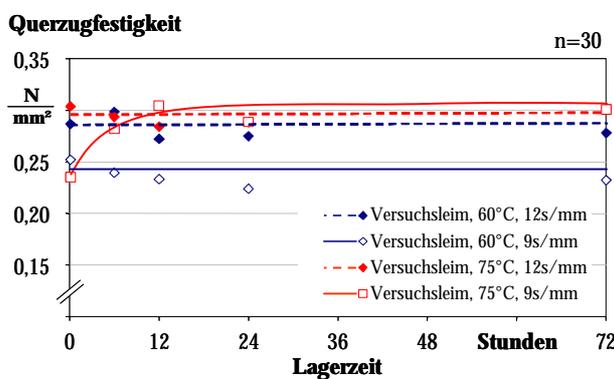


Abbildung 82: Entwicklung der Querkzugfestigkeit während der Stapellagerung bei 60°C und 75°C für UF-Platten (Versuchsharz) hergestellt mit unterschiedlichen Presszeitfaktoren.

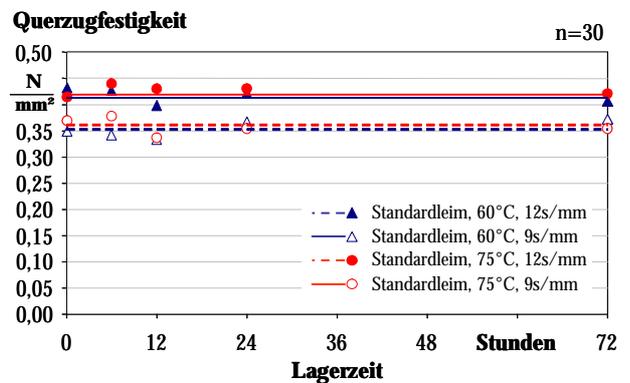


Abbildung 83: Entwicklung der Querkzugfestigkeit während der Stapellagerung bei 60°C und 75°C für UF-Platten (Standardharz) hergestellt mit unterschiedlichen Presszeitfaktoren.

In Tabelle 32 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 Parametern 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 zeigt.

Tabelle 32: Prozentuale Veränderung der Querzugfestigkeit zwischen 0 und 72 Stunden Lagerzeit mit Angabe des Signifikanzniveaus¹⁴.

Querzugfestigkeit		<i>Versuchsleim</i>		<i>Standardleim</i>	
		60°C	75°C	60°C	75°C
alle		-3%	+7%	±0%	+2%
DS-Feuchte	10%	-3%	+2%	-5%	-3%
	14%	-1%	+4%	-8%	+2%
	18%	-3%	+16% ++	+14% ++	+6% +
MS-Härter	0,5%	-5%	-12%	-1%	-1%
	1,5%	+3%	+28% +++	±0%	-1%
	3,0%	-8%	-1%	-	+9%
Presszeit	7 s/mm	-5%	+22% ++	-	-
	9 s/mm	-8%	+28% ++	-7%	-3%
	12 s/mm	-3%	±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 Querzugfestigkeit. Die Entwicklung der Querzugfestigkeit dieser Parameterkombination ist in Abbildung 84 dargestellt. Unter diesen Bedingungen tritt eine Verbesserung der Querzugfestigkeit um mehr als 100% auf. Somit können diese für eine Nachreifung im Stapel als optimal bezeichnet werden. Es ist festzuhalten, dass die wesentliche Änderung der Querzugfestigkeit bereits nach den ersten 12 Stunden abgeschlossen ist.

¹⁴ Angabe des Signifikanzniveaus in der folgenden Form:

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

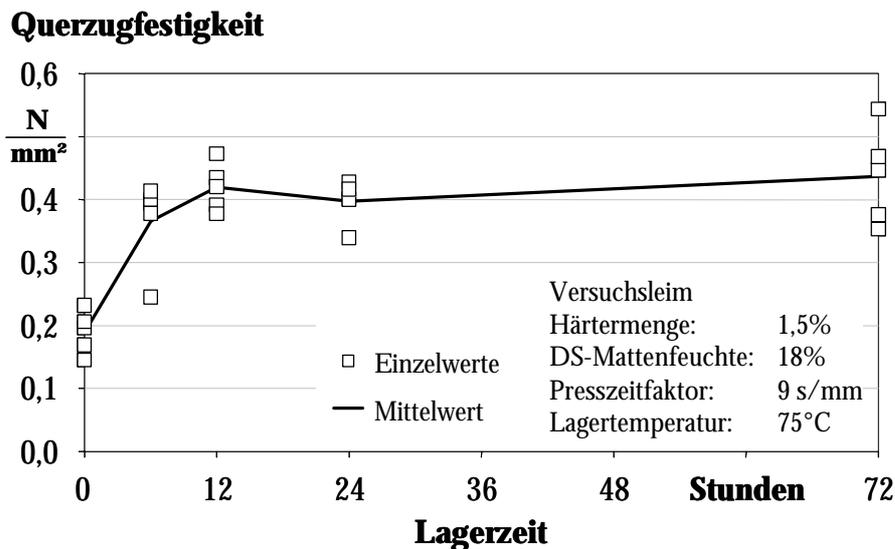


Abbildung 84: Entwicklung der Querzugfestigkeit unter optimalen Bedingungen für das Versuchsharz.

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 (formaldehydarm) 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 (vgl. Abschnitt 6.4.1.1):

- a) Fortgeführte Kondensation: Es findet eine Fortsetzung der Kondensation des Harzes während der Stapellagerung statt. Dies ist für Harnstoffharze nicht belegt, sondern konnte bisher nur für PF-Harze dokumentiert werden (Roffael et al. 1973b). Nach Stegmann und v.Bismarck (1967) sei es nicht möglich, eine einmal unterbrochene Kondensation eines Harnstoffharzes weiterzuführen. Wie bereits in Abschnitt 6.4.1.1 erläutert wurde, ist aber davon auszugehen, dass bei einer Stapellagerung unmittelbar nach dem Verpressen die Kondensation nicht unterbrochen, sondern bei einer geringeren Temperatur weitergeführt wird.
- b) Reorganisation: Nach Lu und Pizzi (1998) soll es zu einer Reorganisation von Dimethylenetherbrücken-Bindungen zu Methylenbrücken-Bindungen in dem kondensier-

ten Harz kommen, wodurch ein festeres Netzwerk entsteht und auf diese Art eine Verbesserung der Verleimungsgüte erreicht wird.

- c) Rheologisches Verhalten: 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 höheren Querkzugfestigkeit ausgegangen werden. Der Abbau von Spannungen (Relaxation) des Holzes steht in engem Zusammenhang mit der Feuchte und der Temperatur der Platten. Mit steigender Temperatur und Feuchte werden Spannungen stärker abgebaut (Becker und Reiter 1970).
- d) 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 seinerzeit allerdings ein beträchtlich höheres Molverhältnis F:U als die Harze, die in der vorliegenden Untersuchung eingesetzt wurden.

Die Festigkeitszunahme des Versuchsharzes mit einem Molverhältnis F:U < 1 ist in den meisten Fällen so groß, dass sie auf eine fortgesetzte Kondensation zurückgeführt werden kann. Dies erscheint plausibel, da die Reaktionsgeschwindigkeit des Harzes so gering ist, dass in der Presse die Aushärtung nicht vollständig abgeschlossen ist. 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 diese Leimsystem als optimal.

Bei dem eingesetzten Standardharz kam es unter keinen Bedingungen zu einer Verschlechterung der Querkzugfestigkeit. Dagegen besteht 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. 1989b, Jahic und Thole 1996), ist in diesem Fall davon auszugehen, dass die Festigkeitszunahme auf diesen Spannungsabbau zurückzuführen ist.

7.4.2.2 Abhebefestigkeit

Bei der Abhebefestigkeit ist keine eindeutige Tendenz während der Stapellagerung erkennbar. 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.

In Tabelle 33 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 7 s/mm zu verzeichnen. Für beide Stapeltemperaturen wird eine Verbesserung der Abhebefestigkeit von ca. 20 bzw. 13% erzielt. Auch hier kommt es wie bei der Querkzugfestigkeit (Abschnitt 7.4.2.1) in keinem Fall zu einer nennenswerten Verschlechterung der Festigkeitswerte.

Tabelle 33: Prozentuale Veränderung der Abhebefestigkeit zwischen 0 und 72 Stunden Lagerzeit mit Angabe des Signifikanzniveaus.

Abhebefestigkeit		<i>Versuchsleim</i>		<i>Standardleim</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%

Aufgrund der höheren Temperatur und der längeren Einwirkungsdauer während des Pressvorgangs ist davon auszugehen, dass die Kondensation (auch für das Versuchsharz) weitestgehend abgeschlossen ist. Im Gegensatz zur Querkzugfestigkeit tritt daher lediglich bei einem relativ kurzen Presszeitfaktor eine erkennbare Zunahme der Abhebefestigkeit auf.

7.4.2.3 Formaldehydgehalt

In Abbildung 85 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 ist erkennbar, dass der Formaldehydgehalt des Versuchsharzes deutlich unter dem des Standardharzes liegt. Vor der Stapellagerung weist der Versuchslime einen Anfangswert um 4,4 mg/100g und der Standardlime einen Wert von 6,2 mg/100g auf. Einzelne Werte des Standardharzes überschreiten zunächst die Anforderung gemäß EN 312-1.

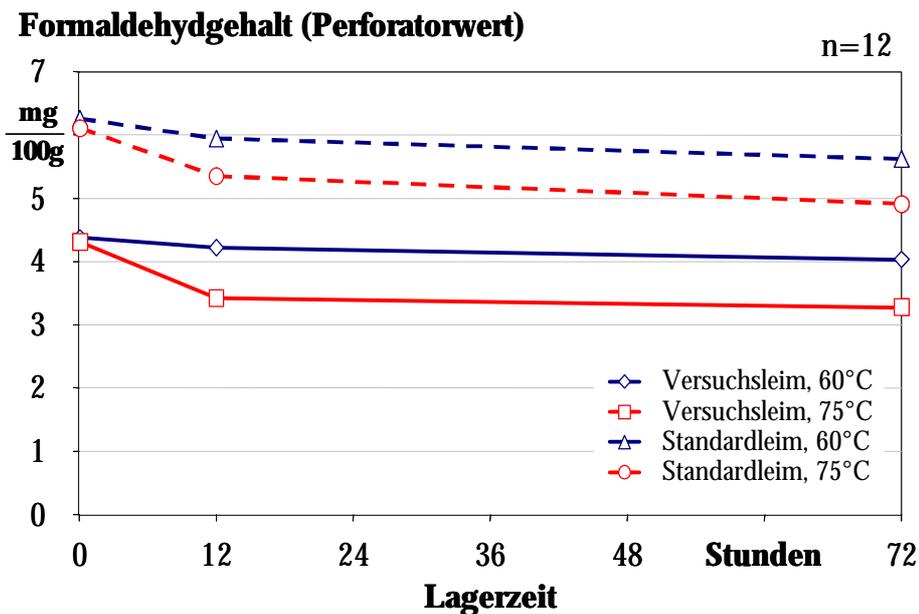


Abbildung 85: Entwicklung des Formaldehydgehalts für UF-Platten bei 60°C und 75°C Stapellagerung.

Während der Lagerung werden die Perforatorwerte für beide verwendeten Leime wesentlich reduziert. Dadurch wird die Anforderung gemäß Norm auch für den Standardlime 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 Formaldehydgehalt dann nur noch unwesentlich.

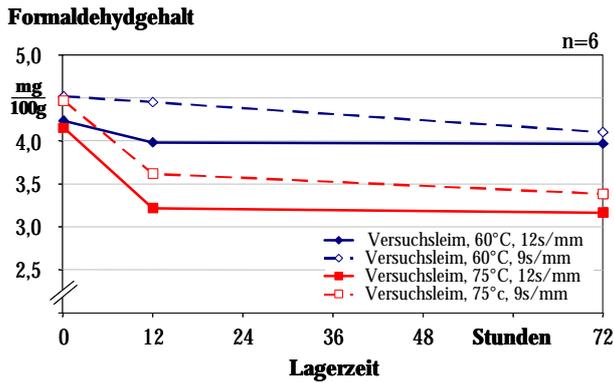


Abbildung 86: Entwicklung des Formaldehydgehalts für das Versuchsharz während der Stapellagerung bei 60°C und 75°C für verschiedene Presszeitfaktoren.

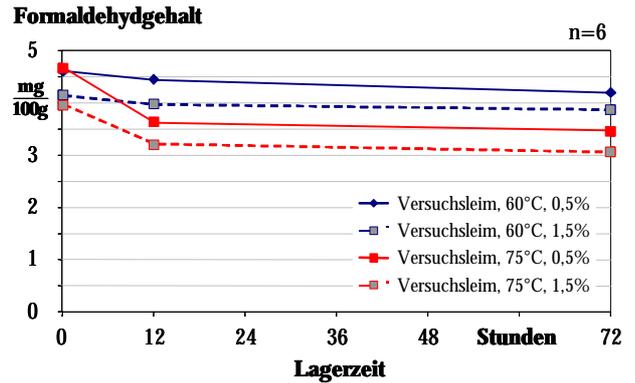


Abbildung 87: Entwicklung des Formaldehydgehalts für das Versuchsharz während der Stapellagerung bei 60°C und 75°C für verschiedene Härtermengen.

In Abbildung 86 ist die Änderung des Formaldehydgehaltes 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 Formaldehydgehaltes hinsichtlich des Presszeitfaktors ist hingegen nicht erkennbar. Auch bezüglich der eingesetzten Härtermenge ist kein Unterschied bei der Entwicklung des Formaldehydgehaltes zu erkennen (Abbildung 87).

In Tabelle 34 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. Bei dem Versuchsharz ist bei einer Stapeltemperatur von 75°C erkennbar, dass mit zunehmender DS-Feuchte (10 auf 18%) vor dem Verpressen der Platte

Tabelle 34: Prozentuale Veränderung des Formaldehydgehalts zwischen 0 und 72 Stunden Lagerzeit mit Angabe des Signifikanzniveaus.

Formaldehydgehalt		<i>Versuchsleim</i>		<i>Standardleim</i>	
		60°C	75°C	60°C	75°C
alle		-8%	-24%	-10%	-20%
DS-Feuchte	10%	-4%	-21% +	-10%	-20% ++
	14%	-9% +	-24% +	-9%	-18%
	18%	-7%	-30% +++	-13%	-16% +
MS-Härter	0,5%	-9% +	-26% +++	-9%	-20%
	1,5%	-7% +	-23% +++	-10%	-19%
	3,0%	-	-	-	-
Presszeit	9 s/mm	-10%	-24% +++	-13%	-20%
	12 s/mm	-6% +	-24% ++	-6%	-28% ++

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 einer 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 erklärt die in Abbildung 86 und Abbildung 87 dargestellten Zusammenhänge.

Dass die Formaldehydemission im Zuge der Lagerung vermindert werden kann, wurde auch von Deppe und Ernst (1965) sowie von Roffael (1978) dem Grunde nach aufgeführt. Als mögliche Ursachen für eine Veränderung des Gehalts an freiem Formaldehyd der Platten während der Lagerung können folgende Ursachen genannt werden (vgl. Abschnitt 6.4.1.2):

- a) Fortgeführte Kondensation: Die Kondensation des Harzes schreitet während der Lagerung bei erhöhter Temperatur weiter fort.
- b) Ausdampfen: Formaldehyd kann aus den Schmalflächen der Platten während der Lagerung ausdampfen (Roffael 1980).
- c) Bindung an Holz: Es besteht die Möglichkeit, dass Formaldehyd von Holz aufgenommen und gebunden wird (Ginzel 1973). Roffael (1973) führt dies auf Reaktionen zwischen dem Formaldehyd und bestimmten Strukturen des Lignins zurück. Zudem können auch Extraktstoffe (v.a. die der Kiefer) mit Formaldehyd reagieren und somit dazu beitragen, dass die Formaldehydemission reduziert wird (Roffael et al. 1994).

Da der Formaldehydgehalt des Versuchsharzes unter gleichen Bedingungen um einen größeren Betrag abnimmt als 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 Querzugfestigkeit 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 ein geringe Fläche wodurch der Schmalflächenanteil recht groß ist. Hierdurch wird das Ausdampfen stark begünstigt. Es muss

daher an Platten mit industriellen Abmaßen überprüft werden, ob diese Größenordnungen der Formaldehydabgabe bestätigt werden kann.

7.4.2.4 Gleichgewichtsfeuchte

Im Zuge der Stapellagerung der Platten im Stapel wird die Gleichgewichtsfeuchte bei 20°C und 65% rel. LF reduziert. In Abbildung 88 ist die absolute Änderung der Gleichgewichtsfeuchte 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 ausgeprägt ist. Innerhalb der ersten 24 Stunden der Lagerung wird die Gleichgewichtsfeuchte um bis zu 0,5% auf 10,2% reduziert.

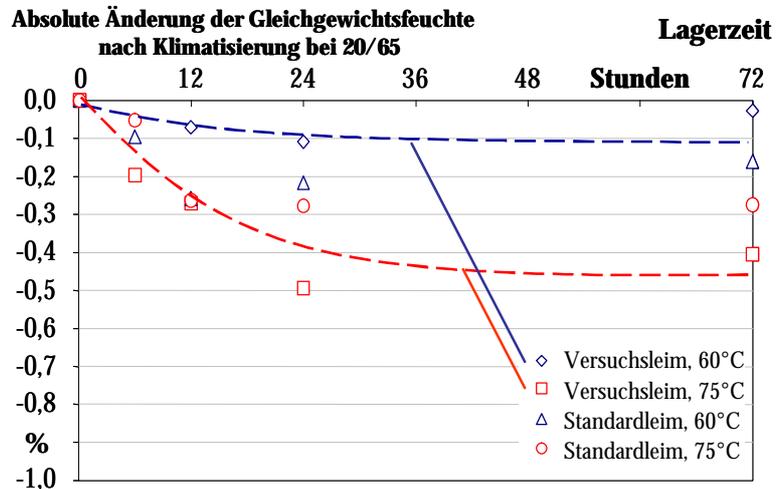


Abbildung 88: Abnahme der Gleichgewichtsfeuchte bei 20°C und 65% relativer Luftfeuchte für UF-Platten während der Stapellagerung bei 60°C und 75°C.

Erkenntnisse

Die Verminderung der Gleichgewichtsfeuchte während der Stapellagerung bei den angegebenen Temperaturen kann ausschließlich auf eine thermische Modifizierung des Holzes zurückgeführt werden. Eine erkennbare Verminderung der Gleichgewichtsfeuchten wurde von Kollmann und Schneider (1963) an Vollholz ab 100°C beobachtet. Da bereits die Gleichgewichtsfeuchte der Platten auf Grund des Temperatureinflusses während des Heißpressvorgangs reduziert wird, wird dieser Vorgang bei höheren Stapeltemperaturen fortgeführt. Die Feuchtebedingungen, die während der Lagerung konstant um Feuchten von etwa 5% bis 6% liegen, wirken sich verstärkend auf die Verminderung der Sorptionseigenschaften des Holzes aus (vgl. Abschnitt 5.4.1).

7.4.2.5 Dickenquellung

Abbildung 89 zeigt die Änderung der Dickenquellung nach 24 Stunden Wasserlagerung während der Lagerung über einen Zeitraum bis zu 72 Stunden für das Standard- und das 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.

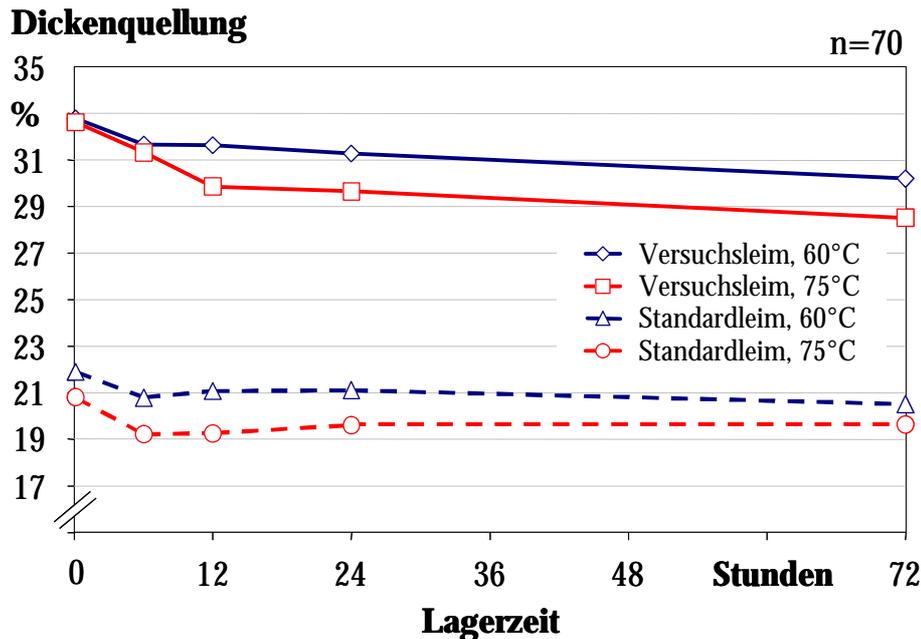


Abbildung 89: Entwicklung der Dickenquellung für UF-Platten bei einer Lagertemperatur von 60°C und 75°C.

In Abbildung 90 ist die Änderung der Dickenquellung für das Versuchsharz während der Stapellagerung bei den Temperaturen von 60°C 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 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, 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 91). Die Verbesserung der Dickenquellung während der Lagerung ist allerdings nur geringfügig stärker bei Platten mit einer höheren Feuchte.

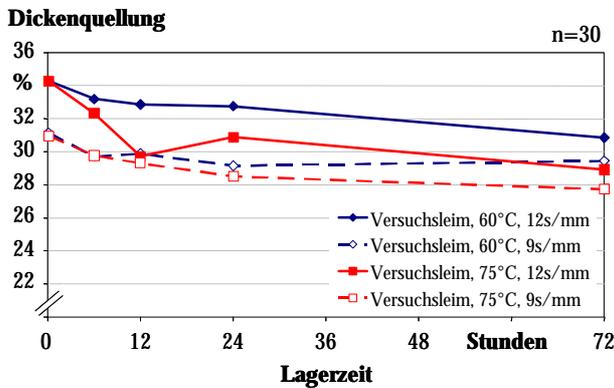


Abbildung 90: Entwicklung der Dickenquellung für UF-Platten (Versuchsharz) während der Stapellagerung bei 60°C und 75°C für verschiedene Presszeitfaktoren.

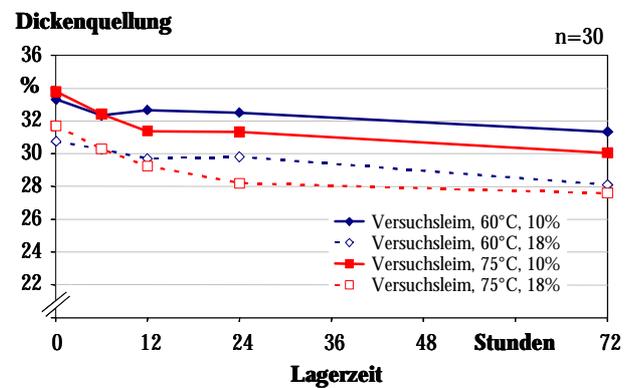


Abbildung 91: Entwicklung der Dickenquellung für UF-Platten (Versuchsharz) während der Stapellagerung bei 60°C und 75°C für verschiedene DS-Feuchten vor dem Verpressen.

In Tabelle 35 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 höherer Stapeltemperatur stärker.

Tabelle 35: Prozentuale Veränderung 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% ++	-2%
	14%	-10% +++	-13% +++	-6%	-10% +++
	18%	-9% ++	-13% +++++	-6%	-1%
MS-Härter	0,5%	-9% +++	-12% +++++	-8% ++	-4%
	1,5%	-7%	-14% +++++	-3%	-3%
	3,0%	-7%	-12% ++	-	-2%
Presszeit	7 s/mm	-4%	-9% +-	-	-
	9 s/mm	-6% +	-10% +++	-3%	-8% +++
	12 s/mm	-10% +++++	-16% +++++	-11% ++	-2%

Erkenntnisse

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

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

- a) 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 wird die Quellung vermindert.
- b) 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.
- c) Spannungsabbau: Während des Verpressens werden infolge des Verdichtungs Vorgangs und der Leimaushärtung Druckspannungen im Holz eingeschlossen. Nach dem Verlassen der Presse werden diese Spannungen nicht vollständig abgebaut. Bei erhöhter Temperatur und Feuchte werden Spannungen mit zunehmender Zeit im Holz reduziert. Dies haben Becker und Reiter (1970) durch Versuche über die Relaxation der Biegespannungen in Buchenholz nachgewiesen. Adcock (1998) hat den Zusammenhang zwischen der Relaxation von Druckspannungen und Temperatur sowie Feuchte an gepressten Spänen nachgewiesen. Spannungen innerhalb der Holzwerkstoffplatte wirken sich negativ auf die Dickenquellung der Platten aus (Bolton et al. 1989b). Durch einen Spannungsabbau während der Lagerung der Platten bei erhöhter Temperatur und Feuchte nimmt die Dickenquellung ab.
- d) 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 zwangsläufig zu einer Erhöhung der Dickenquellung 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 Quellung 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 der Dickenquellung 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.

7.4.3 MUF- und MUPF-Harze

7.4.3.1 Querzugfestigkeit

In Abbildung 92 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/mm², bei der Lagerung mit 75°C innerhalb von 24 Stunden auf 0,69 N/mm² ansteigt. Bei einer Stapeltemperatur von 100°C hingegen fällt die Querzugfestigkeit nach einem geringen Anstieg innerhalb von 3 Stunden im weiteren Verlauf deutlich ab. Nach 168 Stunden wurde nur noch eine Festigkeit von 0,56 N/mm² gemessen.

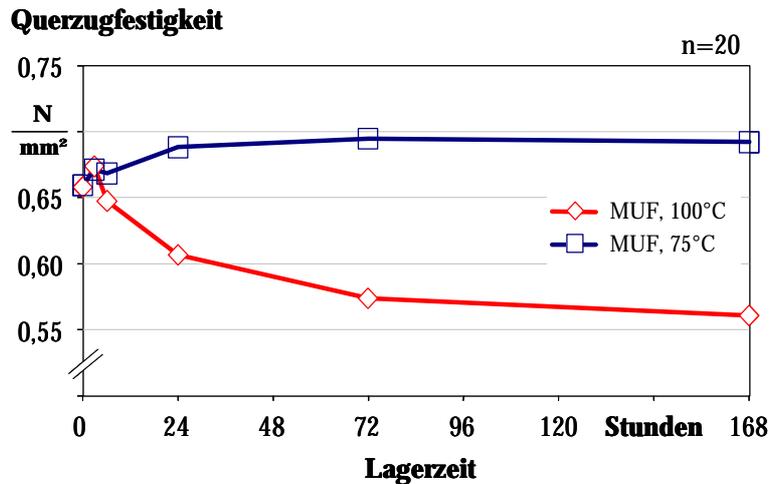


Abbildung 92: Entwicklung der Querzugfestigkeit für MUF-Platten während der Stapellagerung bei 75°C und 100°C.

Das Anfangsniveau der Querzugfestigkeit der MUPF-Platten liegt bei sonst gleichen Herstellparametern mit etwa 0,70 N/mm² höher als das der MUF-Platten (Abbildung 93). Bei einer Stapeltemperatur von 75°C ist ein Anstieg der Querzugfestigkeit innerhalb der ersten 3 Stunden der Lagerung auf etwa 0,75 N/mm² zu verzeichnen. Im weiteren Verlauf der Lagerung kann bei dieser Temperatur keine weitere nennenswerte Veränderung festgestellt werden. Auch bei einer Stapeltemperatur von 100°C kommt es innerhalb der ersten Stunden zu einer Zunahme der Festigkeit, allerdings fällt die Querzugfestigkeit darauf bis 168 Stunden auf etwa 0,65 N/mm² ab.

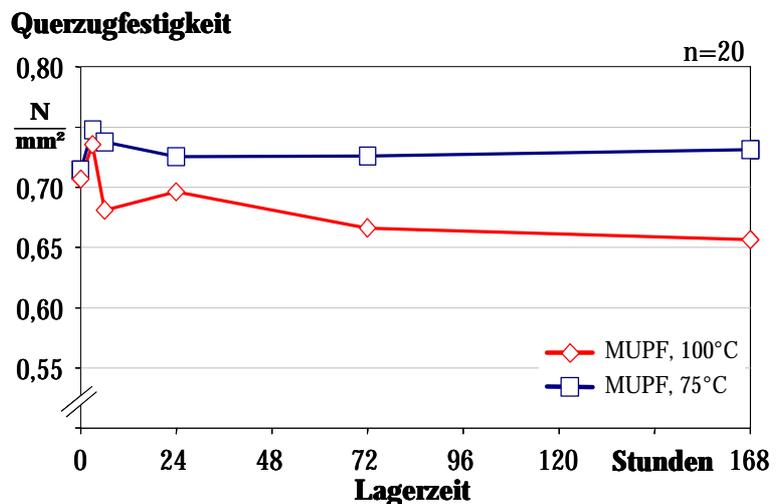


Abbildung 93: Entwicklung der Querzugfestigkeit für MUPF-Platten während der Stapellagerung bei 75°C und 100°C.

Es kann festgehalten werden, dass für beide Harztypen hinsichtlich der Querzugfestigkeit 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 Feuchteinfluss ist bei melaminhaltigen Harzen höher als bei reinen UF-Harzen. Dies liegt in der chemischen Struktur des Melamins begründet (Dunky 1999a). 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 auf einen hydrolytischen Abbau des Harzes zurückgeführt werden.

Da der Phenolanteil im MUPF-Harz sehr gering (etwa 1%) ist, scheint sich diese Komponente auf die Änderung während der Lagerung nicht gravierend auszuwirken. Es wird lediglich ein höheres Festigkeitsniveau erreicht.

7.4.3.2 Dickenquellung

In Abbildung 94 und Abbildung 95 ist die Änderung der Dickenquellung nach 24 Stunden Wasserlagerung 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 verschlechtert sich die Dickenquellung wiederum auf nahezu den Ausgangswert.

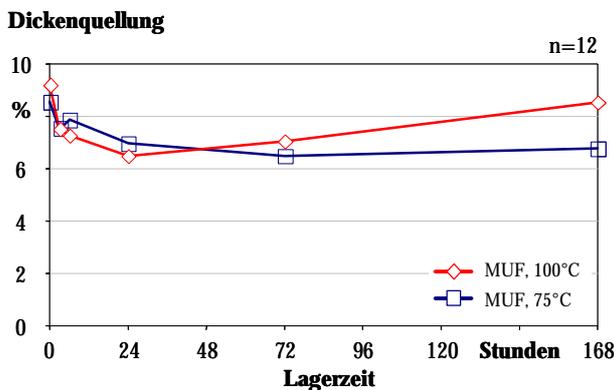


Abbildung 94: Entwicklung der Dickenquellung für MUF-Platten während der Stapellagerung bei 75°C und 100°C.

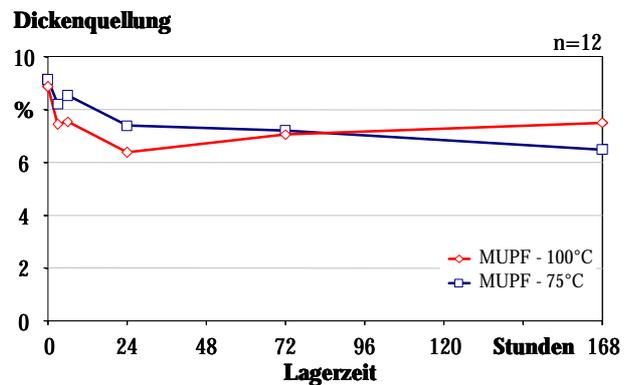


Abbildung 95: Entwicklung der Dickenquellung für MUPF-Platten während der Stapellagerung bei 75°C und 100°C.

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 (vgl. Abschnitt 6.4.2) 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 die Abnahme der Dickenquellung neben dem Spannungsabbau im Holz auf Veränderungen des Harzes zurückzuführen ist. Nach einer Lagerzeit von 24 Stunden zeigt sich bei einer Temperatur von 100°C eine Zunahme der Quellwerte, die zeitlich versetzt zu der Abnahme der Querzugfestigkeit einsetzt. Dies ist darauf zurückzuführen, dass aufgrund der Hydrolyse die Klebfestigkeit vermindert wird. Wegen der geringen Klebfestigkeit wird die Dickenquellung erhöht.

7.4.3.3 Abhebefestigkeit

In Abbildung 96 ist die Entwicklung der Abhebefestigkeit für MUF-Platten während der Stapellagerung bei 75°C und 100°C dargestellt. Ausgehend von 1,80 N/mm² unmittelbar nach dem Verpressen treten bei einer Stapeltemperatur von 75°C nur unwesentliche Veränderungen auf. Bei 100°C wird die Abhebefestigkeit innerhalb von 168 Stunden signifikant auf 1,53 N/mm² vermindert.

Bei den MUPF-Platten wird bei einer Temperatur von 75°C die Abhebefestigkeit von 1,52 N/mm² auf 1,65 N/mm² erhöht. Bei 100°C hingegen vermindert sich der Wert von 1,72 N/mm² auf 1,50 N/mm².

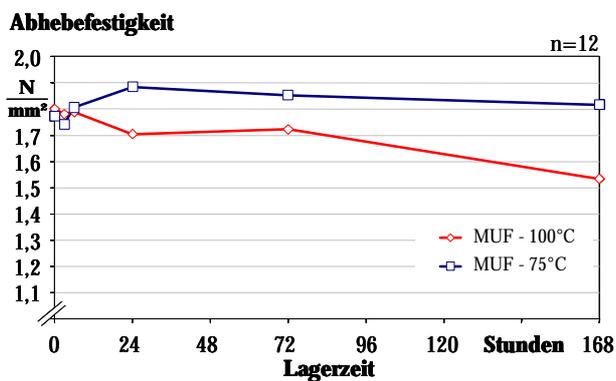


Abbildung 96: Entwicklung der Abhebefestigkeit für MUF-Platten während der Stapellagerung bei 75°C und 100°C.

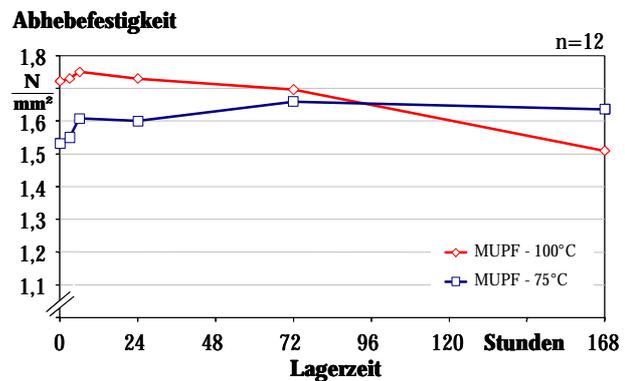


Abbildung 97: Entwicklung der Abhebefestigkeit für MUPF-Platten während der Stapellagerung bei 75°C und 100°C.

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 in den Ergebnissen der MUPF-Platten wider: Die Werte der Platten, die bei 75°C und 100°C gelagert wurden, liegen auf einem unterschiedlichen Niveau.

Dennoch ist der Einfluss der Stapeltemperatur auf die Abhebefestigkeit deutlich 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 geringern Spangröße in der Deckschicht als nachrangig eingestuft werden. Damit kann nur doch eine Veränderung der Leimkomponente auf die Zunahme der Abhebefestigkeit ursächlich sein. Die Abnahme der Festigkeit ist analog zur Verschlechterung der Querzugfestigkeit und der Dickenquellung auf eine hydrolytische Degradierung des Harzes zurückzuführen.

7.4.3.4 Formaldehydmission

Während der Stapellagerung wird die Formaldehydmission (Flaschenmethode) der MUF- (Abbildung 98) und MUPF-Platten (Abbildung 99) sowohl bei 75°C als auch bei 100°C deutlich vermindert. Unmittelbar nach dem Verpressen weist die Formaldehydmission (nach der Flaschenmethode) der MUF-Platten etwa 1,0 mg/kg auf, dies entspricht etwa einer Größenordnung von 5 mg/100g nach der Perforatormethode. Im Verlauf der Stapellagerung wird die Formaldehydmission 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.

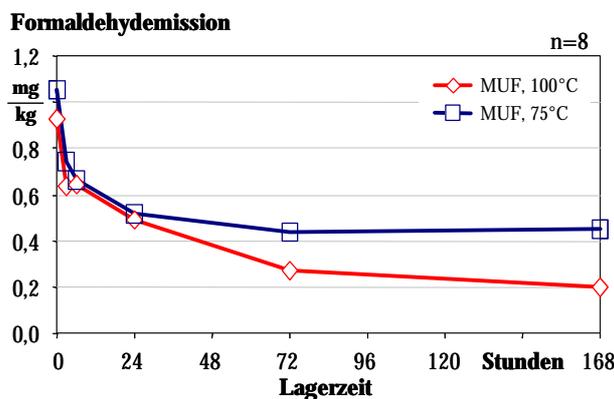


Abbildung 98: Entwicklung der Formaldehydmission für MUF-Platten bei 75°C und 100°C.

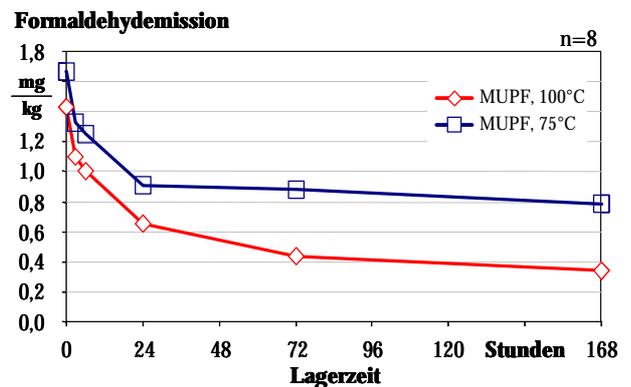


Abbildung 99: Entwicklung der Formaldehydmission für MUPF-Platten bei 75°C und 100°C.

Bei den MUPF-Platten wird die Formaldehydmission 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 Formaldehydmission kann sowohl auf eine weitere Aushärtung des Harzes aber auch auf das Ausdampfen des freien Formaldehyds aus den kleinformatischen Laborplatten zurückgeführt werden (vgl. Abschnitt 7.4.2.3). Daher müssen Untersuchungen an Platten mit industriellen Abmessungen durchgeführt werden, um eine genauere Aussage über das Verhalten der Formaldehydmission während der Lagerung zu treffen.

7.4.3.5 Gleichgewichtsfeuchte

Die Gleichgewichtsfeuchte bei 20°C und 65% relativer Luftfeuchte wird unter allen Bedingungen sowohl für MUF- (Abbildung 100) als auch für MUPF-Platten (Abbildung 101) vermindert. Ausgehend von einem Anfangswert um 11% nimmt die Gleichgewichtsfeuchte 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 Veränderungen finden für alle Parameter indes innerhalb der ersten 24 Stunden statt. Darüber hinaus werden die Änderungen deutlich geringer.

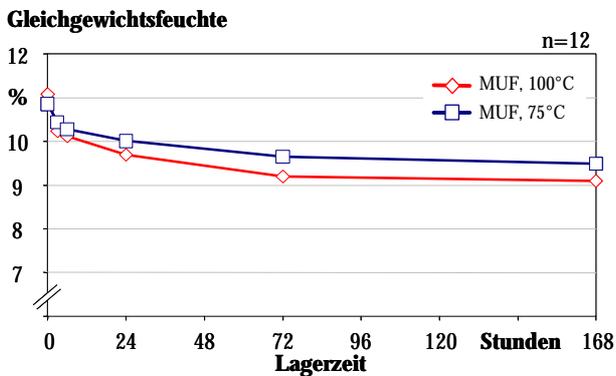


Abbildung 100: Entwicklung der Gleichgewichtsfeuchte bei 20°C und 65% rel.LF für MUF-Platten während der Stapellagerung bei 75°C und 100°C.

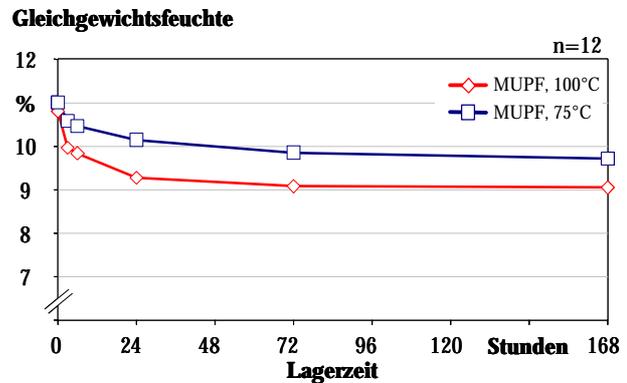


Abbildung 101: Entwicklung der Gleichgewichtsfeuchte bei 20°C und 65% rel.LF für MUPF-Platten während der Stapellagerung bei 75°C und 100°C.

Erkenntnisse

Die Abnahme der Gleichgewichtsfeuchte in einer thermische Vergütung des Holzes begründet. Mit zunehmender Temperatur über 70°C wird die Sorptionsfähigkeit des Holzes vermindert (Kollmann und Schneider 1963) (vgl. Abschnitt 5.4.1).

7.4.4 PF-Harze

7.4.4.1 Querzugfestigkeit

In Abbildung 102 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 N/mm² und 0,44 N/mm². 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 103 ist die Zunahme der Querzugfestigkeit für Platten mit modifiziertem PF-Harz während der Stapellagerung bei 80°C, 95°C und 110°C aufgetragen. Die Anfangsfestigkeit vor der Lagerung liegt für dieses Harz mit 0,54 N/mm² bis 0,59 N/mm² 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/mm² bereits nach etwa 3 Stunden erreicht. Die relative Zunahme beträgt etwa 25%, eine Differenzierung hinsichtlich der Stapeltemperatur ist nicht erkennbar. Der Temperatureinfluss hinsichtlich der Festigkeitszunahme erscheint für das modifizierte PF-Harz von untergeordneter Bedeutung zu sein.

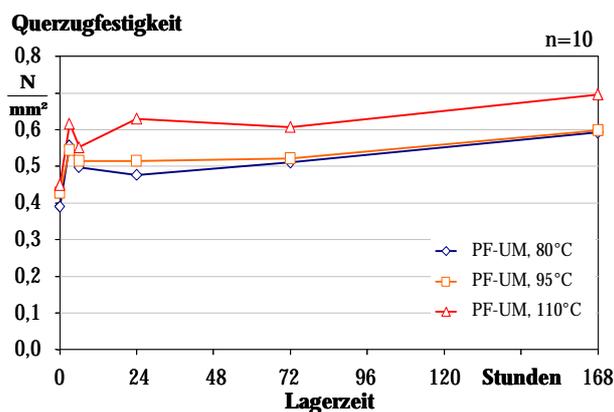


Abbildung 102: Entwicklung der Querzugfestigkeit für PF-Platten (unmodifiziert) während der Stapellagerung bei 80°C, 95°C und 110°C.

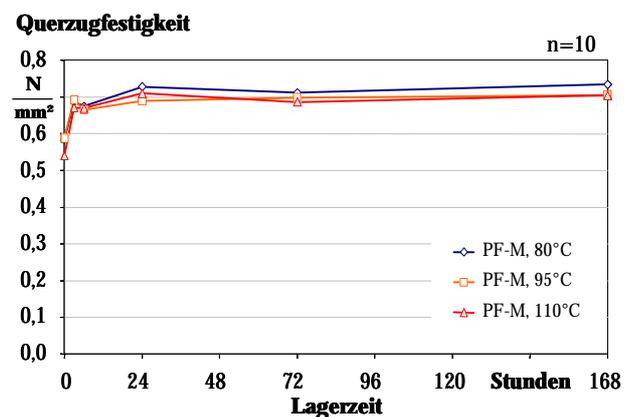


Abbildung 103: Entwicklung der Querzugfestigkeit für PF-Platten (modifiziert) während der Stapellagerung bei 80°C, 95°C und 110°C.

Abbildung 104 und Abbildung 105 zeigen den Einfluss des Presszeitfaktors bezüglich der Eigenschaftsentwicklung der verwendeten Harze. Für beide Harze ist erkennbar, dass mit geringerem 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/mm² und bei 12 s/mm über 0,50 N/mm². Das

modifizierte PF-Harz weist Anfangswerte um $0,50 \text{ N/mm}^2$ bei einem Presszeitfaktor von 9 s/mm und in der Höhe von $0,60 \text{ N/mm}^2$ 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.

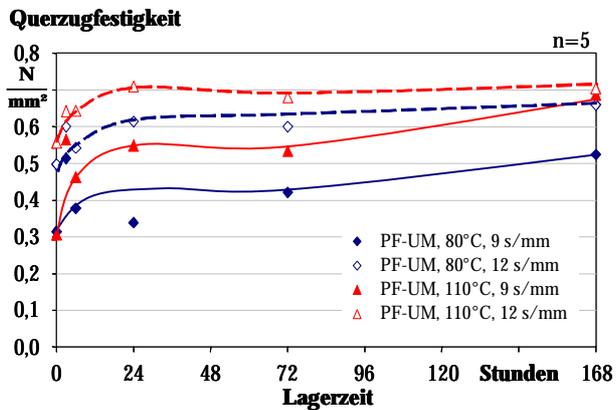


Abbildung 104: Entwicklung der Querkzugfestigkeit für PF-Platten (unmodifiziert) während der Stapellagerung bei 80°C und 110°C bei unterschiedlichen Presszeitfaktoren.

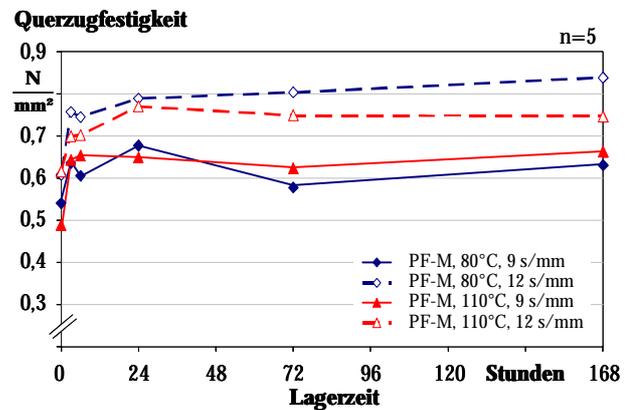


Abbildung 105: Entwicklung der Querkzugfestigkeit für PF-Platten (modifiziert) während der Stapellagerung bei 80°C und 110°C bei unterschiedlichen Presszeitfaktoren.

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.

Erkenntnisse

Es ist bekannt, dass Phenolharze bei erhöhter Stapeltemperatur nach der Presse weiter aushärten. Im Zuge dieser Aushärtung werden die physikalisch-technologischen Eigenschaften verbessert (Deppe und Ernst 1965, Roffael et al. 1973b). Hier konnte die strenge Temperaturabhängigkeit für das Nachreifverhalten während der Lagerung des unmodifizierten PF-Harzes dargelegt werden. Für das modifizierte Harz ist die Temperaturabhängigkeit nicht deutlich. Dies lässt sich darauf zurückführen, dass die Differenz zwischen dem Kondensationsgrad unmittelbar nach dem Verpressen und dem maximal möglichen Kondensationsgrad das Harz deutlich geringer ist. Das Harz ist in der Presse schon weiter ausgehärtet, dies spiegelt sich im Festigkeitsniveau wider.

Die Prüfung der Querkzugfestigkeit nach Kochprüfung konnte aufgrund mangelnder Probenanzahl nicht durchgeführt werden. Daher wird in Untersuchungen an industriell gefertigten PF-Spanplatten gezeigt werden, welchen Einfluss die Stapeltemperatur während der Lagerung auf die Querkzugfestigkeit nach Kochprüfung hat (siehe Kapitel 8.4.4.3).

7.4.4.2 Abhebefestigkeit

Die Entwicklung der Abhebefestigkeit während der Stapellagerung bei 80°C, 95°C und 110°C ist in Abbildung 106 dargestellt. Ausgehend von einem Anfangswert nach dem Verpressen über 1,6 N/mm² kann ein Anstieg der Abhebefestigkeit auf etwa 1,9 N/mm² 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.

Der Wert nach 24-stündiger Lagerung bei 80°C kann als Ausreißer aus dieser Reihe betrachtet werden.

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.

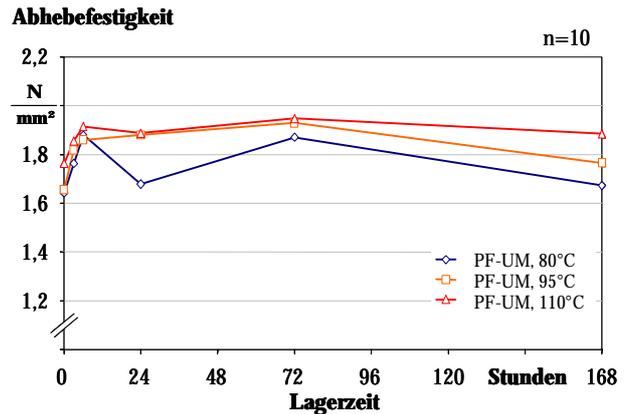


Abbildung 106: Entwicklung der Abhebefestigkeit für PF-Platten während der Stapellagerung bei 80°C, 95°C und 110°C.

7.4.4.3 Dickenquellung

Die Entwicklung der Dickenquellung nach 24 Stunden Wasserlagerung während der Stapellagerung bei 80°C, 95°C und 110°C ist für Platten mit unmodifiziertem PF-Harz in Abbildung 107 und mit dem modifiziertem PF-Harz in Abbildung 108 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 Veränderungen finden innerhalb der ersten 72 Stunden der Lagerung statt, darüber hinaus ergibt sich keine nennenswerte Veränderung mehr (Abbildung 107).

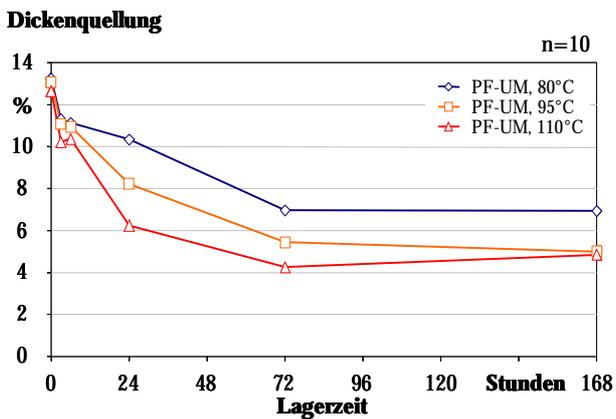


Abbildung 107: Entwicklung der Dickenquellung für PF-Platten (unmodifiziert) während der Stapellagerung bei 80°C, 95°C und 110°C.

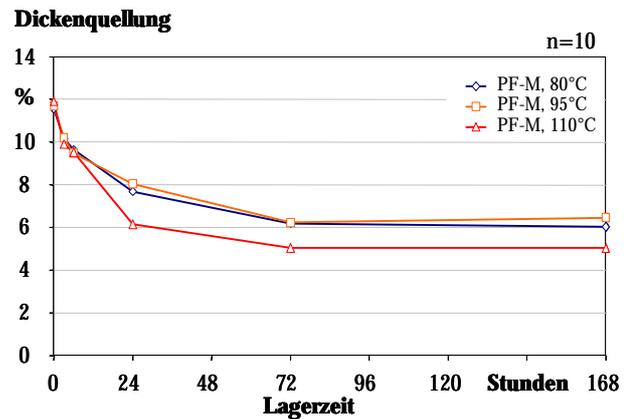


Abbildung 108: Entwicklung der Dickenquellung für PF-Platten (modifiziert) während der Stapellagerung bei 80°C, 95°C und 110°C.

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 und 95°C erkennbar, nach 72 Stunden wird hierbei ein Wert von 6% erreicht. Lediglich bei der extrem hohen Lagertemperatur von 110°C kann dieser Wert noch unterschritten werden. Auch hier findet über 72 Stunden hinaus keine Änderung der Dickenquellung mehr statt (Abbildung 108).

Erkenntnisse

Das Zusammenspiel einer fortgesetzten Aushärtung der PF-Harze und des Spannungsabbaus innerhalb des Spangefüges während der Lagerung bei hohen Temperaturen führt dazu, dass die Dickenquellung mehr als halbiert wird. Auch hier ist festzustellen, dass der Temperatureinfluss auf das modifizierte PF-Harz geringer ist. Dennoch ist erkennbar, dass mit höherer Temperatur die Verbesserung dieser Eigenschaft größer ist. Wie bei der Querkzugfestigkeit bereits gezeigt wurde, ist der Einfluss der Temperatur auf die weitere Aushärtung des Harzes geringer. Der Temperatureinfluss auf die Änderung der Holzeigenschaften wird dadurch aber deutlich erkennbar, denn der Spannungsabbau im Holz ist bei höheren Temperaturen größer.

7.4.4.4 pH-Wert

In Abbildung 109 und Abbildung 110 ist die Änderung der pH-Werte der Deck- und Mittelschichten für die untersuchten PF-Platten während der Stapellagerung über 168 Stunden bei 80 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 ist aufgrund des deutlich niedrigerem Alkaligehaltes des Deckschichtharzes zurückzuführen. 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 110). 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.

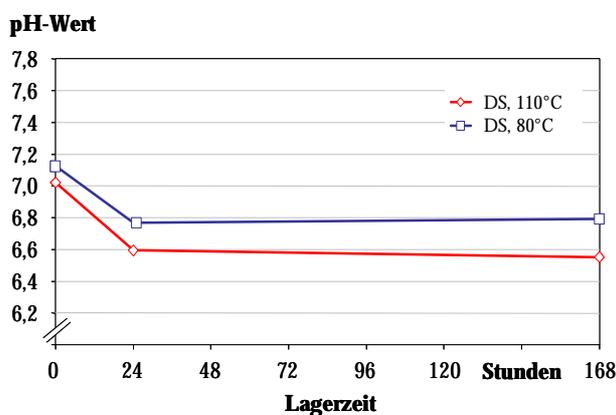


Abbildung 109: Entwicklung des pH-Wertes für PF-Platten in den Deckschichten während der Stapellagerung bei 80°C und 110°C.

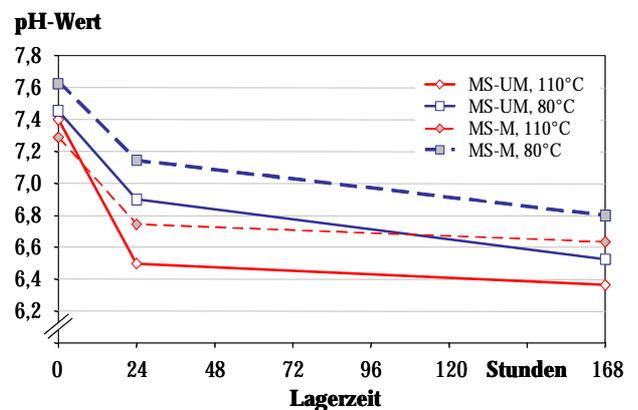


Abbildung 110: Entwicklung des pH-Wertes für PF-Platten (modifiziert und unmodifiziert) in der Mittelschicht während der Stapellagerung bei 80°C und 110°C.

Der pH-Wert der Deckschichten ist geringer als die der jeweiligen Mittelschichten, da der Alkaligehalt des Deckschichtharzes mit 2,8% gegenüber 5,2 und 8,3% der Mittelschichtharze deutlich geringer 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, Essigsäure u.a.) aus dem Holz abgespalten. Die Säureabspaltung ist größer mit höherer Temperatur und höherer Feuchte des Holzes (vgl. Abschnitt 5.4.2). Dies führt dazu, dass der pH-Wert der phenolharzgebundenen Spanplatten während der Lagerung merklich absinkt.

7.4.4.5 Gleichgewichtsfeuchte

Die Gleichgewichtsfeuchte bei 20°C und 65% relativer Luftfeuchte wird unter allen Bedingungen für beide PF-Harze (unmodifiziert Abbildung 111 und modifiziert Abbildung 112) vermindert. Ausgehend von einem Anfangswert um 13% nimmt die Gleichgewichtsfeuchte 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 Veränderungen finden für alle Parameter innerhalb der ersten 24 Stunden statt. Darüber hinaus werden die Änderungen deutlich geringer.

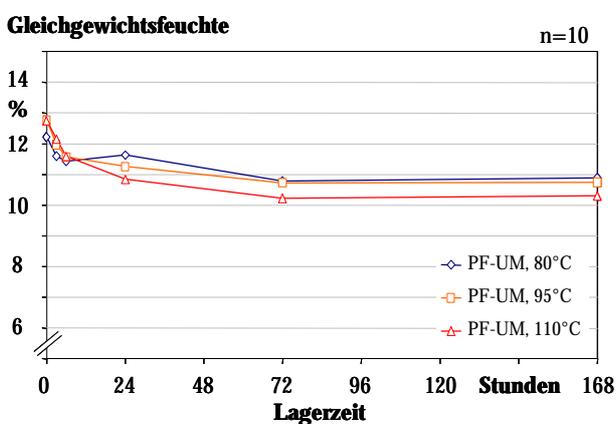


Abbildung 111: Entwicklung der Gleichgewichtsfeuchte bei 20°C und 65% rel.LF für PF-Platten (unmodifiziert) während der Stapellagerung bei 80°C, 95°C und 110°C.

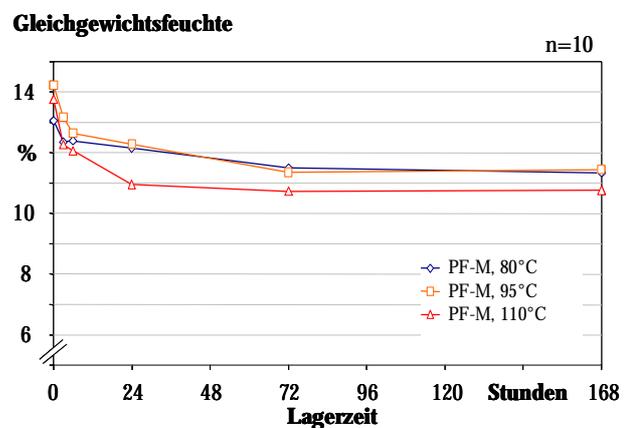


Abbildung 112: Entwicklung der Gleichgewichtsfeuchte bei 20°C und 65% rel.LF für PF-Platten (modifiziert) während der Stapellagerung bei 80°C, 95°C und 110°C.

Die Änderung der Gleichgewichtsfeuchte ist durch die Veränderung der Holzeigenschaften hervorgerufen (vgl. Abschnitt 5.4.1). Dadurch wird die thermische Veränderung des Holzes während der Lagerung deutlich. Es ist erkennbar, dass diese Veränderung mit höherer Temperatur ansteigt, wie dies oben bereits beschrieben wurde.

7.5 Zusammenfassung der Laboruntersuchungen

- ✓ Im Vorfeld der Untersuchungen wurden die grundsätzlichen Bedingungen hinsichtlich Temperatur und Feuchte im Plattenstapel ermittelt (vgl. Abschnitt 4).
- ✓ Es ist prinzipiell möglich, die industriellen Stapelbedingungen nachzustellen. Dabei können folgende Parameter kontrolliert werden: Stapeltemperatur, Plattenfeuchte und Stapelhöhe.
- ✓ Erst dadurch wurde es möglich, eine große Zahl verschiedener Produktionsparameter bezüglich ihres Einflusses auf die Eigenschaftsentwicklung während der Stapellagerung im Labor zu untersuchen.

UF-Harze

- ✓ Die Querkzugfestigkeit bleibt beim Standardharz (mit einem Molverhältnis $F : U > 1$) während der hier untersuchten Stapelbedingungen unverändert. Es kommt weder zu einer nennenswerten Zunahme noch wird die Querkzugfestigkeit vermindert.
- ✓ Die Querkzugfestigkeit kann beim Versuchsharz ($F : U < 1$) unter bestimmten Bedingungen gravierend verbessert werden. Eine hohe Mattenfeuchte, mittlere Härterdosierung sowie ein Presszeitfaktor von 9 s/mm sind im vorliegenden Fall optimal. Für die Zunahme der Querkzugfestigkeit kann dem Versuchsharz eine Nachhärtung des Klebers als Ursache zugeschrieben werden.
- ✓ Die Dickenquellung wird während der Lagerung prinzipiell vermindert. Der Effekt ist bei höherer Temperatur und höherer Plattenfeuchte, bedingt durch eine höhere Mattenfeuchte, für das Versuchsharz merklich größer.
- ✓ Der Formaldehydgehalt sowie die Gleichgewichtsfeuchte (bei 20°C/65% rel. LF) werden vermindert. Bei höherer Temperatur wird auch dieser Effekt größer.
- ✓ Die Abnahme der Dickenquellung und der Gleichgewichtsfeuchte ist wesentlich in der Veränderung des Holzes (thermische Vergütung bzw. Spannungsabbau) begründet.

MUF- und MUPF-Harze

- ✓ Eine Lagertemperatur von 100°C ist für MUF- und MUPF-Harze eindeutig zu hoch. Bei einer Temperaturen von 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 liegt bei einer Stapeltemperatur von 75°C bei nahezu 10%. Bei 100°C Lagertemperatur wird die Festigkeit nach einem Anstieg zu Beginn der Lagerung 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 größer, aber im weiteren Verlauf verschlechtern sich die Werte wieder. Hier wirkt sich die verminderte Querkzugfestigkeit merklich auf die Dickenquellung aus.
- ✓ Die Formaldehydemission sowie die Gleichgewichtsfeuchte werden vermindert. Die Stapeltemperatur hat auf diese Eigenschaften einen entscheidenden Einfluss: Je höher die Temperatur umso stärker werden die Formaldehydemission und die Gleichgewichtsfeuchte vermindert. Die Reduzierung der Formaldehydemission ist unter realen Stapelbedingungen zu überprüfen, ob dieser Effekt ausschließlich auf ein Ausdampfen aus den Platten zurückzuführen ist.

PF-Harze

- ✓ Das modifizierte PF-Harz ist gegenüber dem unmodifizierten Harz unter gleichen Bedingungen am Ende des Pressvorgangs weiter auskondensiert. Daraus resultierten merklich höhere Festigkeits- und geringere Quellwerte.
- ✓ Die Eigenschaften der PF-Platten werden während der Stapellagerung deutlich verbessert. Für das konventionelle 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 modifiziertem PF-Harz liegt die absolute maximale Festigkeit auf gleichem Niveau. Während der Lagerung ist das Potenzial für eine Nachreifung 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 für Platten mit längerer Presszeit.
- ✓ 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 13% auf bis zu 4% gesenkt. Hier spielt neben der fortgesetzten Kondensation des Harzes der Spannungsabbau im Holz eine entscheidende Rolle.
- ✓ Die thermische Modifikation des Holzes spiegelt sich in der Entwicklung des pH-Wertes und der Gleichgewichtsfeuchte wider. Diese Eigenschaften werden insbesondere in Abhängigkeit von der Stapeltemperatur merklich vermindert.

8 Eigenschaftsänderung von stapelgelagerten Span- und Faserplatten in der industriellen Produktion

8.1 Zielsetzungen und Fragestellungen

für Untersuchungen an UF-Spanplatten

1. Können mit Hilfe der Stapellagerung bei erhöhter Temperatur die Platteneigenschaften in der industriellen Produktion 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 verkürzten Presszeit erreicht werden wie nach längerer 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 Eigenschaftsverbesserungen (v.a. Dickenquellung und Querkzugfestigkeit) sind unter industriellen Bedingungen erreichbar?
3. Welche Lagerbedingungen sind im konventionellen Produktionsprozess realisierbar? Wie ist die Temperatur der Platten beeinflussbar?
4. Welchen Einfluss hat Stapellagerung insbesondere auf die Feuchtebeständigkeit der Platten (v.a. Dickenquellung und Querkzug 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 Eigenschaft aus?
3. Es soll ermittelt werden, in welcher Zeit der Feuchteausgleich zwischen Deck- und Mittelschicht abläuft. Auf welche Weise kann der Feuchteausgleich beeinflusst werden?
4. Welche Möglichkeiten zur Manipulation der Temperatur im Plattenstapel bestehen im industriellen Produktionsprozess?

für Untersuchungen an PMDI-Spanplatten

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

für Untersuchungen an Faserplatten

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

8.2 Material

8.2.1 UF-Spanplatten

In einer industriellen Spanplattenanlage wurden insgesamt vier Stapel UF-verleimter Platten untersucht, die unter verschiedenen Produktionsbedingungen hergestellt wurden. Die Abmaße der Platten betragen $4.120 \times 2.650 \text{ mm}^2$. Die Platten hatten eine Rohdicke von 18,5 mm sowie eine Nettodicke von 17,9 mm nach dem Schleifen, die Zieldichte betrug 645 kg/m^3 .

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 zwischen 4,1 s/mm und 4,7 s/mm

Tabelle 36: Variable Produktionsparameter der UF-Platten.

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

eingestellt. Nach dem Verpressen wurden die Platten auf unterschiedliche Temperaturen gekühlt, indem diese 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 36 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 Probestreifen zur Prüfung entnommen werden konnte.

8.2.2 MUF-Spanplatten

In einer Produktionsanlage wurden insgesamt drei Stapel aus MUF-verleimten Platten untersucht, die unter verschiedenen Produktionsbedingungen hergestellt wurden. Die Abmaße der Platten betragen $5.350 \times 2.650 \text{ mm}^2$. Die Platten hatten eine Rohdicke von 18,5 mm; die Zieldichte war 700 kg/m^3 .

Tabelle 37: Variable Produktionsparameter der MUF-Platten.

Stapel Nr.	Harz Typ	Wender Anzahl	Lagerung in Stunden
1	MUF	4	2
2	MUF	2	2
3	MUF	2	6

Die Deckschicht wurde mit 14% (Festharz auf atro Spanmaterial) eines konventionellem Melamin-Harnstoffharzes und die Mittelschicht mit 9,5% des selben Harzes beleimt und in einer kontinuierlichen Presse mit einem Presszeitfaktor von 6,4 s/mm 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 36 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.

8.2.3 MUPF-Spanplatten

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

8.2.4 PF-Spanplatten

In der industriellen Produktion eines Spanplattenproduzenten 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 betrug $5.650 \times 2.070 \times 19 \text{ mm}^3$. Die mittlere Dichte betrug 740 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

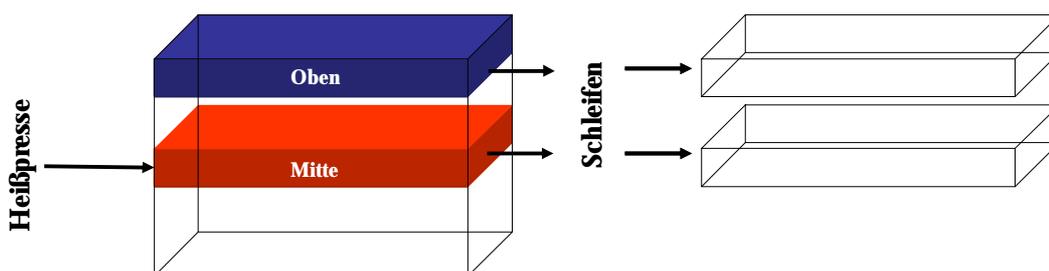


Abbildung 113: Ablaufschema für die Errichtung der Stapel aus PF-Platten in der Produktion.

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 113). 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.

8.2.5 PMDI-Spanplatten

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

8.2.6 Faserplatten

In einer weiteren industriellen Faserplattenanlage wurden die Änderung von HDF-Platten im Plattenstapel untersucht.¹⁵ Dabei handelte es sich um ein typisches Fußbodenplattensortiment, die Rohdicke betrug 8,1 mm und die Dichte 870 kg/m^3 . Die Abmessungen der Platten betragen $2.800 \times 2.040 \text{ mm}^2$, sie wurden mit einem UF-Harz in einer kontinuierlichen Presse hergestellt und nach dem Pressvorgang in Sternwendern vor der Lagerung im Stapel abgekühlt. Es wurden zwei Stapel mit je 120 Platten (Höhe: 972 mm) gebildet: der erste aus Platten, die zwei Sternwender durchliefen (resultierende Abkühlzeit: etwa 10 Minuten), und der zweite aus Platten, die drei Sternwender in 15 Minuten durchliefen.

¹⁵ Die experimentellen Untersuchungen dieser Versuchsreihe wurden von Rochet (2000) im Rahmen einer Diplomarbeit an der ENSTIB, Université Henri Poincaré Nancy, Frankreich durchgeführt.

8.3 Methodik

8.3.1 Probennahme

8.3.1.1 UF-Platten

Es wurde jeweils eine Nullprobe bezogen auf Probenpaare 1 und 2, 3 und 4 sowie 5 und 6 (vgl. Tabelle 36) vor der Stapellagerung genommen. 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.

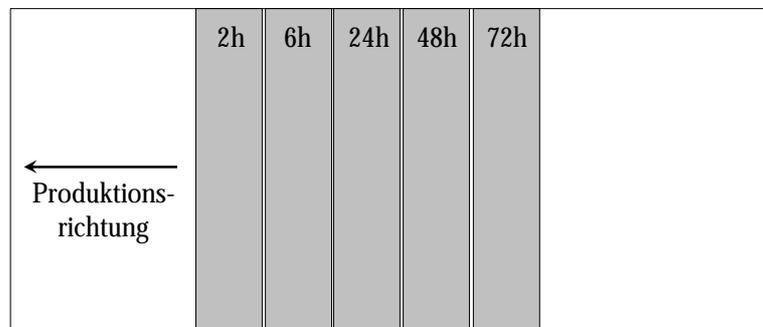


Abbildung 114: Einschnittplan für die Probennahme aus den Stapeln.

Die obere Hälfte des Stapels wurde mit Hilfe eines Gabelstaplers angehoben und

so der zentrale Bereich der mittleren Platte des Stapels mit einer Handkreissäge in 40 cm breite Streifen geschnitten (Abbildung 114). Um eine weitere Auskühlung dieser Platte zu vermeiden, wurde der Arbeitsschritt so organisiert, dass der Stapel in möglichst kurzer Zeit wieder zusammengeführt werden konnte. Zu 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 etwas angehoben. 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. Auf diese Weise wurde es möglich, Proben zu unterschiedlichen Zeiten 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 Abschnitt 8.3.2).

8.3.1.2 MUF-Platten

Es wurde eine Nullprobe vor der Stapellagerung aus der "Laborschnitt"-Vorrichtung der Diagonaltrennsgen unmittelbar nach der Heißpresse aus dem Prozess entnommen. Damit die Vergleichbarkeit dieser Probe mit den später geschliffenen Platten gewährleistet ist, wurde auch hier 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, so manipuliert, dass unmittelbar nach dem Schleifen sowie nach 6, 24, 48 und 72 Stunden Lagerzeit ein Probestreifen zur Prüfung entnommen werden konnte.

8.3.1.3 MUPF-Platten

Es wurde eine Nullprobe vor der Stapellagerung unmittelbar nach der Heißpresse aus dem Prozess entnommen. Die Platte nach 24-stündiger Stapellagerung wurde 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 oben genannten Zeitpunkten zurück in den Prozess eingeschleust und nach wiederum 24-stündiger Lagerzeit entnommen und geprüft.

8.3.1.4 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. Für die verschiedenen Lagerzeiten der Großstapel wurden die Kleinstapel nach dem Schleifen so gebildet, dass aus den Platten des oberen und mittleren Grostapelbereichs je ein Kleinstapel entstand (Abbildung 115). Die Stapel aus den geschliffenen Platten wurden vergleichbar mit der Beschreibung in Kapitel 8.3.1.1 so 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 Temperaturen ausgesetzt waren.

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

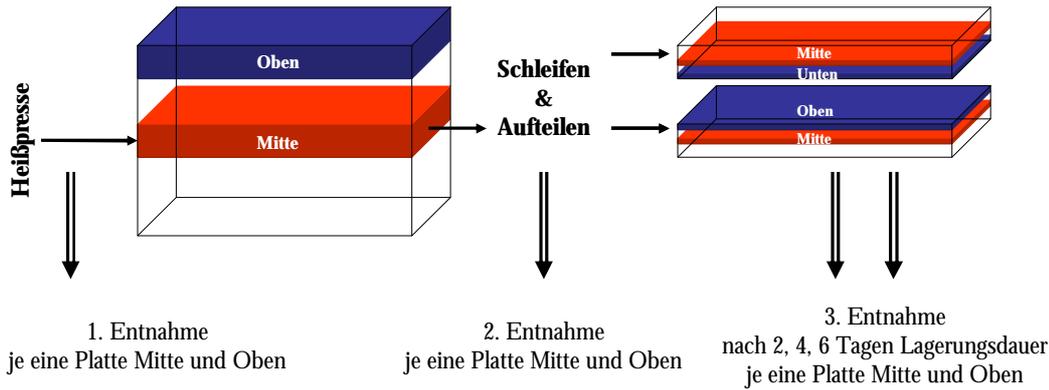


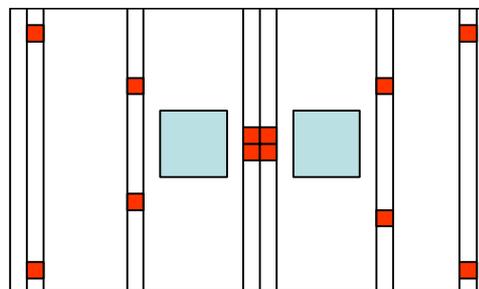
Abbildung 115: Entnahmeschema für die PF-Platten aus der industriellen Produktion.

8.3.1.5 PMDI-Platten

Entsprechend der Beschreibung in Kapitel 8.3.1.1 wurden auch 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.

8.3.1.6 MDF-Platten

Nach 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 116 dargestellten Schema ausgeformt und der Prüfung zugeführt.



■ Dickenquellung, Querkzugfestigkeit,
Feuchte, Rohdichte, Dicke

■ Formaldehydgehalt

Abbildung 116: Probennahme für die MDF-Platten.

8.3.2 Prüfmethoden

Die Querzugfestigkeit wurde in Anlehnung an EN 319 und die Querzugfestigkeit nach Kochprüfung wurde an den PF- und PMDI-Platten gemäß EN 1087-1 bestimmt. Die Abhebefestigkeit wurde in Anlehnung an EN 311 ermittelt. Die Dickenquellung wurde sowohl nach 2 und 24 Stunden Wasserlagerung 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 bzw. die Formaldehydmission wurde sowohl in Anlehnung an EN 120 nach der Perforatormethode als auch nach der Flaschenmethode gemäß EN 717-3 ermittelt. Die Proben zur Bestimmung des Formaldehyd wurden aus dem zentralen Bereich der Platten entnommen.

Für die Ermittlung der Deck- und Mittelschichtfeuchte wurde je Entnahmezeitpunkt Proben 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 Gleichgewichtsfeuchte wurde nach Klimatisierung der Proben bei 20°C und 65% relativer Luftfeuchte bestimmt.

8.3.3 Temperaturmessung

Unmittelbar nach dem Pressvorgang wurden ausgewählte UF-Platten in der Mittelschicht mit Einstech-Thermoelementen versehen. Mittels einer Bohrung wurde jeweils ein Thermoelement in der Mitte bezüglich der Plattenbreite und ein Element etwa 250 mm ausgehend vom Rand platziert. Die Einstech-

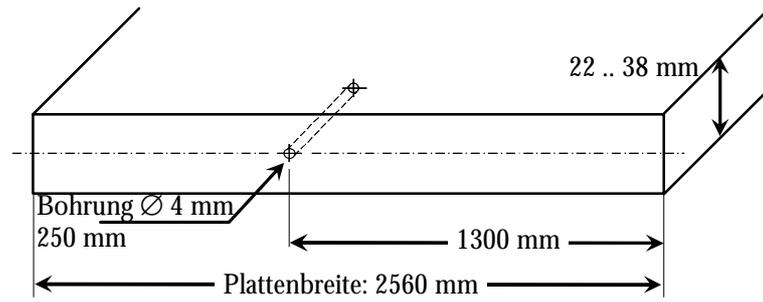


Abbildung 117: Messtellen für die Temperatur der Platten im Sternwender.

Tiefe betrug etwa 250 mm (vgl. Abbildung 117). Auf diese Weise wurde die Temperatur der Platten während der Abkühlung in den Sternwendern erfasst.

Die Stapel wurden nach dem in Abbildung 118 dargestellten Schema mit Thermoelementen bestückt. Die Thermoelemente wurden jeweils zwischen zwei Platten im Stapel eingebracht. Die Aufzeichnung der Daten erfolgte mit einem Mehrkanal-Datenlogger.

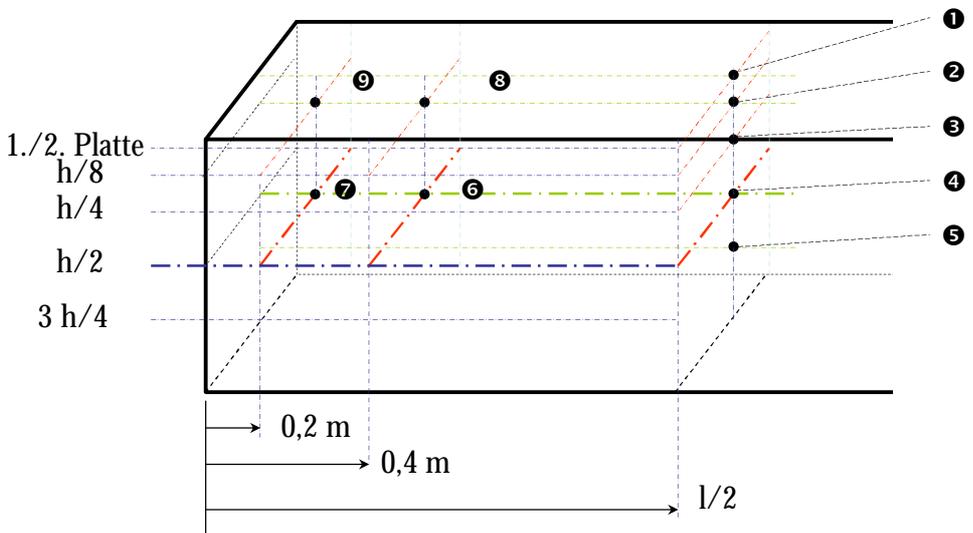


Abbildung 118: Temperaturmessstellen für die Stapel in der industriellen Produktion.

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

8.4 Ergebnisse und Diskussion

8.4.1 UF-Spanplatten

8.4.1.1 Temperatur und Feuchte

Plattentemperatur im Sternwender

Im Produktionsprozess folgt üblicherweise nach dem Verpressen der Platten die Kühlung in Sternwendern. Die Abnahme der Temperatur für drei Plattendicken (22, 32 und 38 mm) ist in Abbildung 119 dargestellt. Alle Platten durchliefen 4 Sternwender; der Wechsel vom ersten zum zweiten, vom zweiten zum dritten und vom vierten in den Stapel ist durch Unterbrechungen der Graphen erkennbar. Es wird deutlich, dass die Temperatur in der Mittelschicht der Platten ausgehend von einem Wert um 110°C vergleichbar mit der freien Auskühlung (vgl. Abschnitt 3.4.1.1) abnimmt.

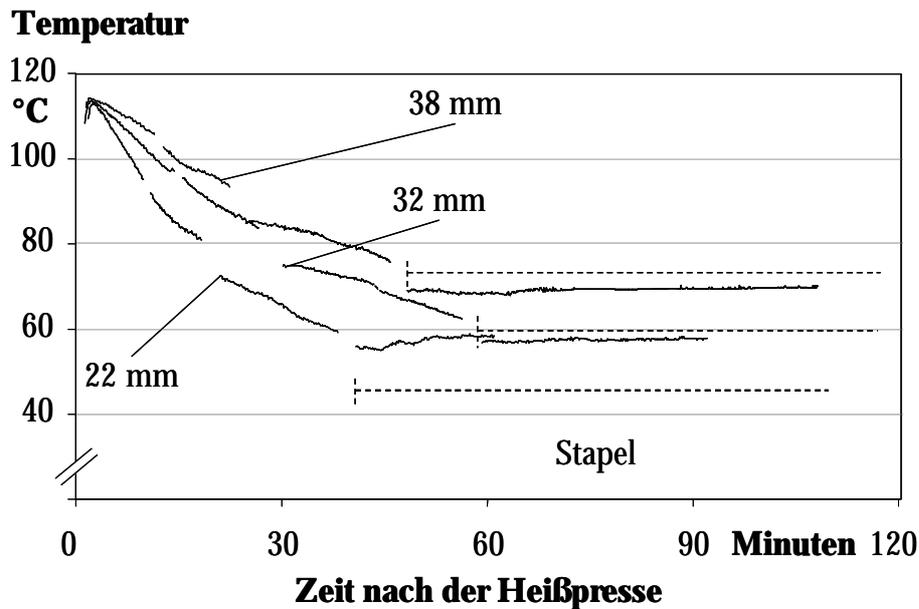


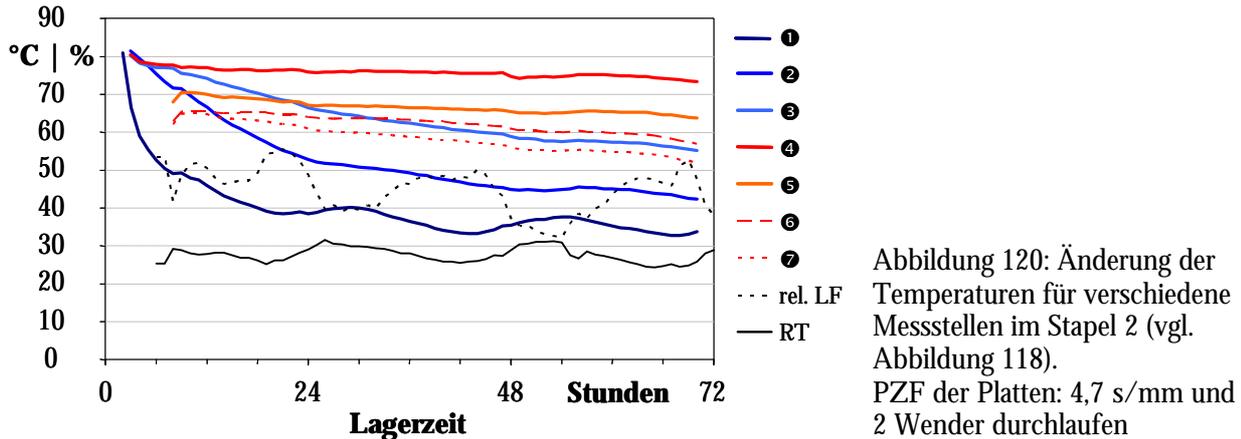
Abbildung 119: Änderung der Plattentemperatur (Mittelschicht) im Sternwender.

Die Entwicklung der Mittelschichttemperatur, wie auch die Stapeltemperatur, wird wesentlich durch die Dicke der Platten beeinflusst. Die mittlere Einstapeltemperatur für die 38 mm-Platten beträgt etwa 70°C, während sowohl die 22 mm als auch die 32 mm Platten mit einer Temperatur um 60°C eingestapelt werden. Dies lässt sich aus der unterschiedlichen Verweildauer im Sternwender erklären, denn die Platten mit einer Dicke von 32 mm verbleiben rund 60 Minuten im Wender, und die 22 mm-Platten werden bereits nach 40 Minuten abgestapelt. Dies wiederum resultiert aus variierenden Taktraten, die sich vornehmlich aus der Presszeit und der Plattenlänge ergeben können.

Plattentemperatur im Stapel

Die Temperaturen in den Stapeln sind in Abbildung 120 und Abbildung 121 dargestellt. Es sind zudem die Temperatur und die relative Luftfeuchte der Umgebungsluft aufgezeigt. Die Umgebungstemperatur schwankt zwischen 25 und 30°C. Die relative Luftfeuchte variiert zwischen 35 und 55%. Diese Variationen resultieren aus den Schwankungen des Tageszeitenklimas in Verbindung mit der Wärmeabstrahlung der Stapel.¹⁶

Temperatur & rel. LF



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 verminderte 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 geringere Presszeit in einer höheren Taktrate der Wender 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 (ca. 15%) kürzer.

¹⁶ Die Umgebungsbedingungen wurden in einem Abstand von 1 m zu den Stapeln auf einer Höhe von 1 m ausgehend vom Boden gemessen.

Temperatur & rel. LF

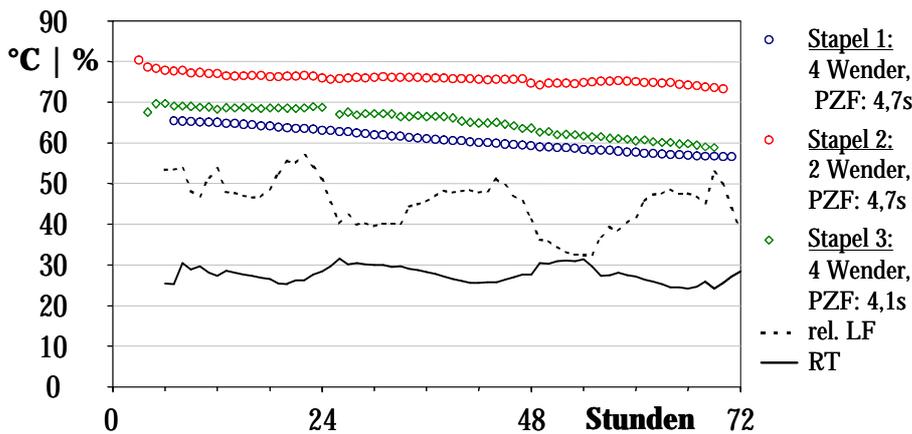


Abbildung 121:
Entwicklung der
Temperaturen in der
Mitte der Stapel 1, 2 & 3.

In der Mitte des Stapels nimmt die Temperatur um 8 bis 10°C während einer Lagerung innerhalb von drei Tagen ab. In den Randbereichen wird die Temperatur wesentlich stärker reduziert. In der Mitte des Stapels unterhalb 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 120). 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 der 72 Stunden Lagerzeit auf 57°C ab; die Temperatur wird im gleichen Zeitraum bei einem Randabstand 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 Lagerung. Die Gesamtfeuchte verändert sich über den untersuchten Zeitraum von 72 Stunden nicht nennenswert.

Gleichgewichtsfeuchte

In Abbildung 122 ist die Änderung der Gleichgewichtsfeuchte der UF-Platten (mit PZF = 4,1) nach Klimatisierung bei 20°C und 65% relativer Luftfeuchte dargestellt. Ausgehend von 10,5% vor der Lagerung nimmt die Gleichgewichtsfeuchte auf 10,0% bei höherer bzw. auf 9,7% bei geringerer Anzahl der durchlaufenen Sternwender ab. Die Gleichgewichtsfeuchte der Platten, die mit einem Presszeitfaktor von 4,7 s/mm hergestellt wurden, beträgt unmittelbar nach

Gleichgewichtsfeuchte

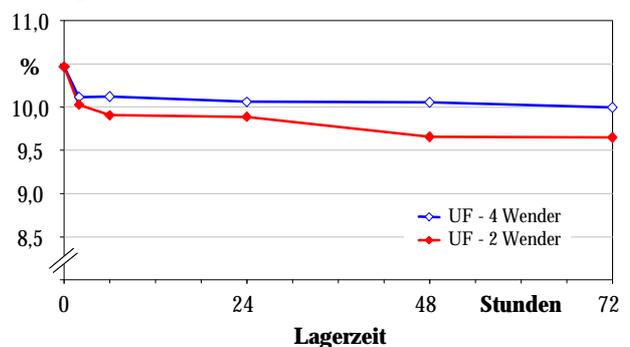


Abbildung 122: Änderung der Gleichgewichtsfeuchte der UF-Platten (PZF = 4,1 s/mm) während einer Stapellagerung über 72 Stunden.

dem Verpressen 10,3%. Die Abnahme während der Stapellagerung über 72 Stunden liegt in der gleichen Größenordnung, wie bei den Platten mit einem Presszeitfaktor von 4,1 s/mm.

8.4.1.2 Querzugfestigkeit

Die Entwicklung der Querzugfestigkeit von UF-Platten mit verschiedenen Herstellparametern während der Stapellagerung über 72 Stunden ist in Abbildung 123 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 Querzugfestigkeit beider Plattentypen zu, wenn die Platten nach zwei Sternwendern und somit bei erhöhter Temperatur eingestapelt werden. Die Querzugfestigkeit 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 124).

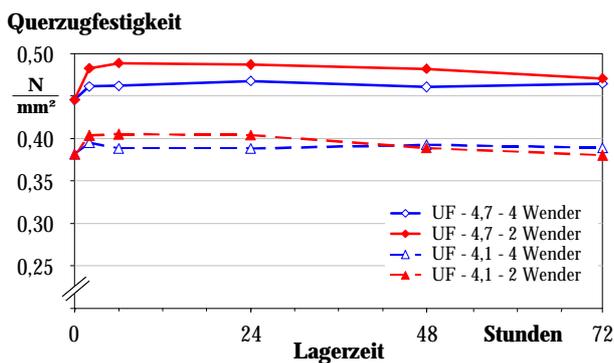


Abbildung 123: Entwicklung der Querzugfestigkeit von UF-Platten während der Stapellagerung über 72 Stunden.

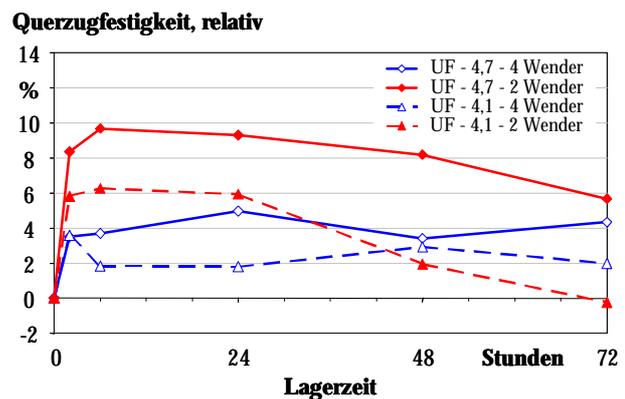


Abbildung 124: Entwicklung der Querzugfestigkeit von UF-Platten während der Stapellagerung über 72 Stunden, Darstellung der Festigkeiten relativ zu den Ausgangswerten.

Allerdings ist zu erkennen, dass bei höherer Stapeltemperatur die Festigkeit bei den Platten nach einer Stapeldauer von 24 Stunden abnimmt. Bei längerer Stapelung kann die Querzugfestigkeit nicht auf dem erhöhten Niveau gehalten werden; nach 72 Stunden ist die Querzugfestigkeit der Platten mit der kürzeren Presszeit wieder auf den Ausgangswert abgesunken.

Erkenntnisse

Es ist festzustellen, dass hier die Mechanismen greifen, die bereits weiter oben diskutiert wurden (Kapitel 7.4.2.1). Zunächst kommt es bei den UF-Platten zu einer Zunahme der Querzugfestigkeit – insbesondere bei einer Lagerung mit hoher Temperatur (hier: $\sim 80^\circ\text{C}$). Eine weitere Kondensation des Harzes ist als Ursache aber auszuschließen, da es ansonsten nahe liegen würde, dass die Festigkeit der Platten mit einem Presszeitfaktor von 4,1 s/mm annähernd auf das Niveau steigen müsste wie die Platten mit 4,7 s/mm. Die Platten mit der längeren

Presszeit haben sogar eine größere relative Zunahme als die Platten mit geringerem Presszeitfaktor. Die Zunahme der Querkzugfestigkeit kann wie folgt erläutert werden:

Das Harz der Platten mit dem geringeren Presszeitfaktor von 4,1 s/mm ist am Ende des Pressvorgangs weniger ausgehärtet als das Harz der Platten mit 4,7 s/mm. Gleichzeitig sind Spannungen im Spangefüge der Platten mit 4,1 s/mm aufgrund der kürzeren Temperatureinwirkung weniger stark abgebaut. Dies resultiert in einen größeren "Spring-Back" am Ende beim Verlassen der Pressen, dabei werden Spannungen zu einem größeren Anteil reduziert. Somit werden bei diesen Platten während der Lagerung die eingeschlossenen Spannungen im Spangefüge zu einem geringeren Anteil vermindert als bei den Platten, die mit einem Presszeitfaktor von 4,7 s/mm hergestellt wurden. Dadurch nimmt die Querkzugfestigkeit um einen geringeren Wert zu.

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 wurde.

8.4.1.3 Dickenquellung

Während der Stapellagerung nimmt die Dickenquellung nach 24-stündiger Wasserlagerung bei allen untersuchten Parametern ab (Abbildung 125). 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 126 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 ersichtlich, 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.

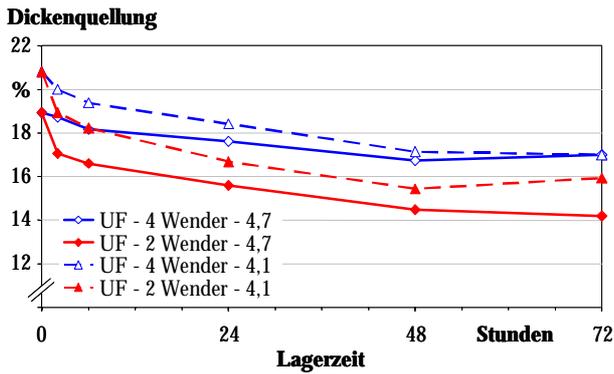


Abbildung 125: Entwicklung der Dickenquellung nach 24 Stunden Wasserlagerung von UF-Platten während der Stappellagerung.

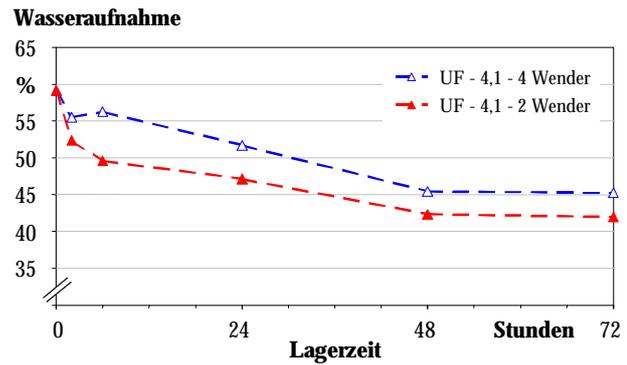


Abbildung 126: Entwicklung der Wasseraufnahme nach 24 Stunden Wasserlagerung von UF-Platten während der Stapellagerung.

Erkenntnisse

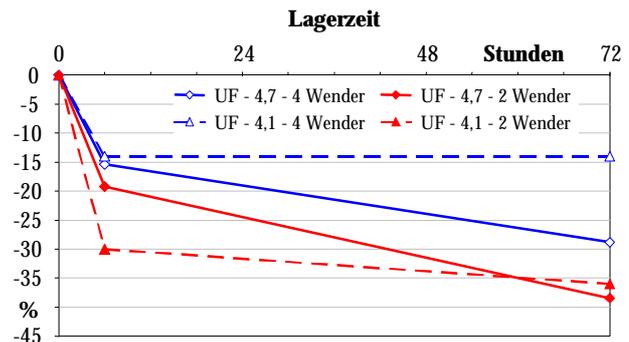
Die Dickenquellung der UF-verleimten Platten nimmt während der Lagerung, insbesondere bei höheren Temperaturen, deutlich ab. Gleichzeitig wird auch die Wasseraufnahme der Quellungsproben im Zuge der Lagerung vermindert. Die Dickenquellung korreliert¹⁷ gut mit der Wasseraufnahme der Quellungsproben. Während der Lagerung dieser Proben wird die Klebfestigkeit erhöht (vgl. Abschnitt 8.4.1.2). Gleichzeitig werden die Spannungen im Holz abgebaut; dieser Effekt ist mit größerer Temperatur stärker. Diese beiden Effekte führen dazu, dass die Quellwerte der Spanplatten verringert werden.

Wenn eine Spanplattenprobe quillt, wird an 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.

¹⁷ Der Korrelationskoeffizient zwischen der Dickenquellung und der Wasseraufnahme bei 24-stündiger Wasserlagerung beträgt bei den vorliegenden Daten $r = 0,81$.

8.4.1.4 Formaldehydgehalt

Die Entwicklung des Gehaltes an freiem Formaldehyd der Platten (ermittelt mit der Perforatormethode) während der Lagerung im Stapel über einen Zeitraum von 72 Stunden ist in Abbildung 128 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 Formaldehydgehaltes 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% reduziert. Die Platten, die durch lediglich zwei Wender gekühlt wurden, haben nach 72 Stunden nur noch einen Perforatorwert von 3,2 mg/100g. Die entspricht einer relativen Abnahme bezogen auf den Anfangswert von nahezu 40% (Abbildung 127).



Formaldehydgehalt

Abbildung 127: Abnahme des Formaldehydgehaltes von UF-Platten während der Stapellagerung über 72 Stunden – relative Darstellung.

Formaldehydgehalt

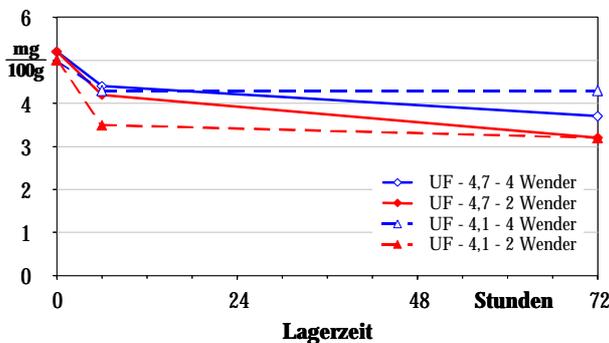


Abbildung 128: Abnahme des Formaldehydgehaltes (Perforatormethode) von UF-Platten während der Stapellagerung über 72 Stunden.

Formaldehydemission

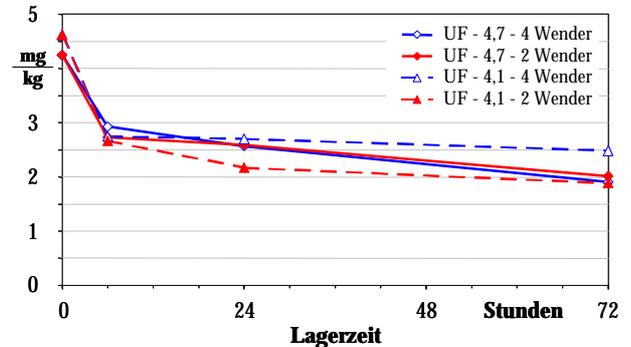


Abbildung 129: Abnahme der Formaldehydemission (Flaschenmethode) von UF-Platten während der Stapellagerung über 72 Stunden.

Das Verhalten dieser Platteneigenschaft wird auch durch die Messung der Formaldehydemission nach der Flaschenmethode prinzipiell bestätigt (Abbildung 129). Allerdings ist der Unterschied bei den Platten mit dem Presszeitfaktor von 4,7 s/mm hinsichtlich der Stapelbedingungen nicht so stark ausgeprägt.

Erkenntnisse

Die Abnahme des Formaldehydgehaltes übertrifft unter annähernd gleichen Temperaturbedingungen im Stapel deutlich die Größenordnung 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 kleinformatischen 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 15mal größer als das der Industriespanplatten. Auch aufgrund der Tatsache, dass die Proben jeweils aus dem zentralen Bereich der Platte (des Stapels) entnommen worden sind, ist das Ausdampfen als alleinige Ursache für die Minderung des Formaldehydgehaltes auszuschließen. Dennoch ist die absolute Formaldehydabnahme der Industrieplatten größer.

Es kann angenommen werden, dass hierbei der Einfluss der Harnstoffzugabe als Formaldehydfänger dazu führt, dass der Formaldehyd während der Lagerung gravierend vermindert wird. Eine Zugabe von Harnstoff erfolgte im Labor nicht.

8.4.1.5 Biegeeigenschaften

Unter den gegebenen Bedingungen ist an den UF-verleimten Platten keine nennenswerte Änderung des Biege-Elastizitätsmoduls und der Biegefestigkeit während der Stapellagerung feststellbar.

8.4.2 MUF-Spanplatten

8.4.2.1 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

Tabelle 38: Stapeltemperaturen den 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

die Temperatur in der Mitte des Stapels 50°C nach dem Schleifen. 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 38).

Feuchte

Die mittlere 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.

Gleichgewichtsfeuchte

Die Abnahme der Gleichgewichtsfeuchte (20°C und 65% relativer Luftfeuchte) während der 72-stündigen Lagerung von MUF-Platten unter den verschiedenen Stapelbedingungen ist in Abbildung 130 dargestellt. In Abhängigkeit von der Stapeltemperatur nimmt die Ausgleichfeuchte 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.

Gleichgewichtsfeuchte

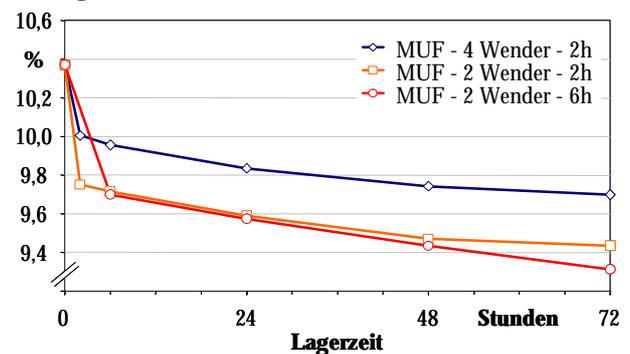


Abbildung 130: Abnahme der Gleichgewichtsfeuchte der MUF-Platten während der Lagerung über 72 Stunden.

8.4.2.2 Querkzugfestigkeit

In Abbildung 131 ist die Entwicklung der Querkzugfestigkeit der MUF-Platten während der Stapelung über 72 Stunden unter verschiedenen Stapelbedingungen dargestellt. Es ist erkennbar, dass in Abhängigkeit von den Lagerbedingungen die Querkzugfestigkeit beginnend mit einem Wert nach dem Verpressen von $0,95 \text{ N/mm}^2$ auf $1,01 \text{ N/mm}^2$ zunehmen kann. Diese Verbesserung tritt bei der höchsten Lagertemperatur auf und ist signifikant auf dem 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 dagegen keine Veränderung der Querkzugfestigkeit.

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.

8.4.2.3 Dickenquellung

Die Änderung der Dickenquellung von MUF-Platten während der Stapellagerung über einen Zeitraum von 72 Stunden ist in Abbildung 132 und Abbildung 133 dargestellt. Die Dickenquellung vor einer Stapellagerung beträgt für 2 Stunden Wasserlagerung 1,6% und für 24 Stunden Wasserlagerung 7,2%. Beide Eigenschaftswerte werden im betrachteten Zeitraum unter allen Lagerbedingungen verbessert bzw. vermindert.

Nach 72-stündiger Lagerung beträgt die Dickenquellung nach 2 Stunden Wasserlagerung bei einer Einstapeltemperatur von 50°C etwa 1,4%, bei einer Temperatur von 70°C 1,1% und bei 75°C 1,0%. Am Ende der Lagerung werden entsprechende Werte für die 24 Stunden-Quellung von 6,7%, 6,3% und bei höchster Temperatur 5,8% erreicht (Abbildung 133).

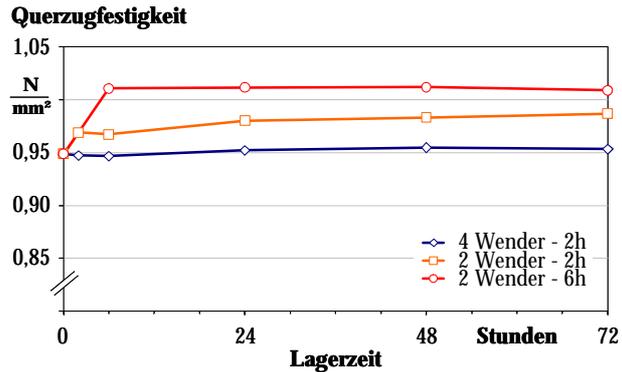


Abbildung 131: Entwicklung der Querkzugfestigkeit der MUF-Platten während der Lagerung über 72 Stunden.

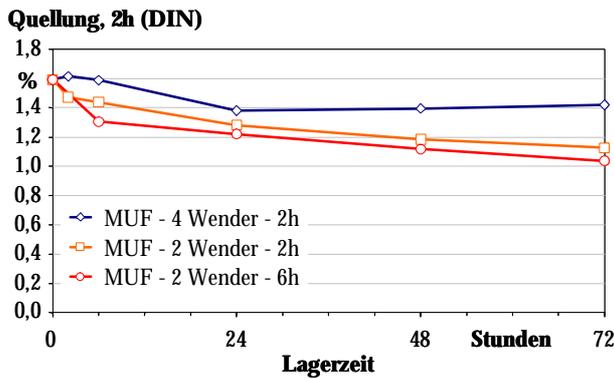


Abbildung 132: Entwicklung der Dickenquellung nach 2 Stunden Wasserlagerung (nach DIN).

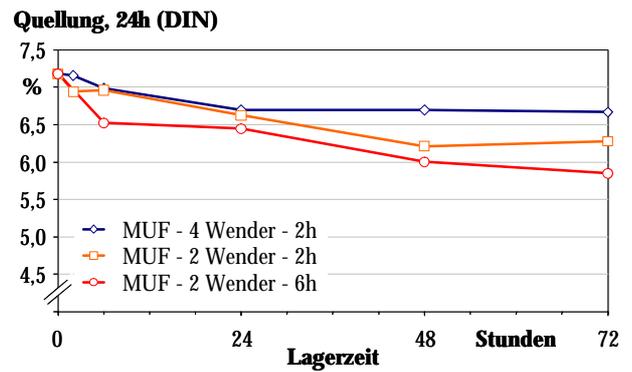


Abbildung 133: Entwicklung der Dickenquellung nach 24 Stunden Wasserlagerung (nach DIN).

Erkenntnisse

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

8.4.2.4 Formaldehydgehalt

In Abbildung 134 ist die Änderung des Formaldehydgehalts (Perforatormethode) und in Abbildung 135 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.

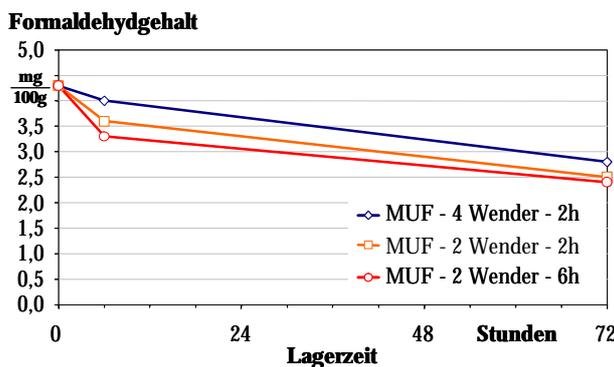


Abbildung 134: Entwicklung des Gehalts an freiem Formaldehyd von MUF-Platten während der Stapellagerung.

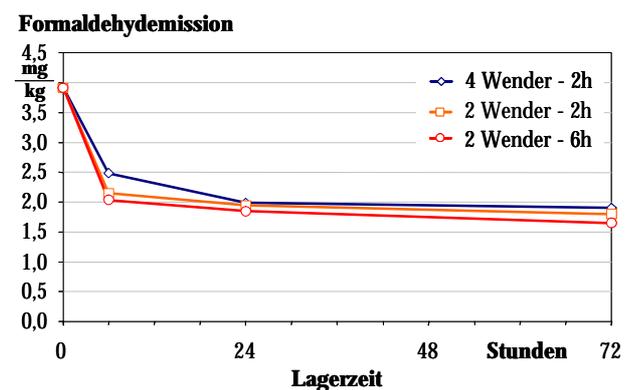


Abbildung 135: Entwicklung der Formaldehydemission von MUF-Platten während der Stapellagerung.

Erkenntnisse

Grundsätzlich wird der Formaldehydgehalt während der Lagerung beträchtlich vermindert. Der Temperatureinfluss ist hier zwar erkennbar, aber nicht sonderlich stark ausgeprägt.

8.4.2.5 Biegeeigenschaften

Hier wird einmal exemplarisch dargestellt, in welchem (geringem) Umfang die Biegeeigenschaften für Aminoplast-Harze durch die Lagerung im Plattenstapel beeinflusst werden. Sowohl der Biege-Elastizitätsmodul (Abbildung 136) als auch die Biegefestigkeit (Abbildung 137) erfährt bei keiner der untersuchten Bedingungen eine signifikante Veränderung. Der geringe Anstieg des Biege-Elastizitätsmoduls (Abbildung 136) ist auf unterschiedliche Bedingungen zurückzuführen, 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 dem Stapel quer zur Schleifrichtung entnommen und der Laborschnitt musste senkrecht zur eigentlichen Produktionsrichtung geschliffen werden. Dadurch können sich die geringen Abweichungen (Größenordnung: 5%) in den Biegeeigenschaften ergeben.

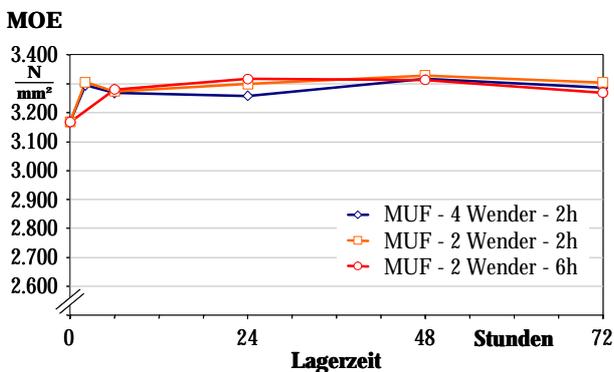


Abbildung 136: Entwicklung des Biege-Elastizitätsmoduls der MUF-Platten während der 72-stündigen Stapellagerung.

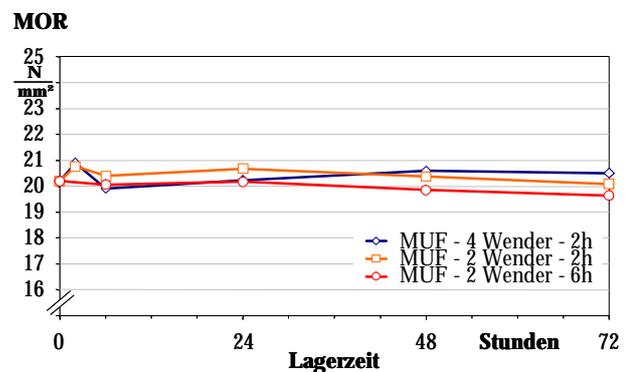


Abbildung 137: Entwicklung der Biegefestigkeit der MUF-Platten während der 72-stündigen Stapellagerung.

8.4.3 MUPF-Spanplatten

8.4.3.1 Temperatur und Feuchte

Die MUPF-Platten mit einer Dicke von 17,5 mm wurden nach dem Verpressen in Sternwendern gekühlt. Die Einstapeltemperatur dieser Platten beträgt etwa 70°C. Die Platten haben eine durchschnittliche Feuchte von 8,2%.

Die Platten mit einer Dicke von 20,5 mm wurden unmittelbar nach dem Verpressen bei etwa 95°C eingelagert. Nach 1, 2 und 3 Stunden wurden diese Platten dann im Sternwender auf 70°C gekühlt und wiederum eingestapelt. Die Plattenfeuchte beträgt dabei 8,3%.

8.4.3.2 Querzugfestigkeit und Kochquerzugfestigkeit

In Abbildung 138 ist die Veränderung der Querzugfestigkeiten der 17,5 mm MUPF-Platten vor und nach 24-stündiger Stapellagerung dargestellt. Es ist erkennbar, dass sowohl die Querzugfestigkeit trocken (EN 319) als auch die Querzugfestigkeit nach Kochprüfung während der Lagerung im Stapel deutlich ansteigt. Die Querzugfestigkeit nimmt um 13% auf 1,83 N/mm² und die Kochquerzugfestigkeit um 11% auf 0,44 N/mm² nach der Stapellagerung zu.

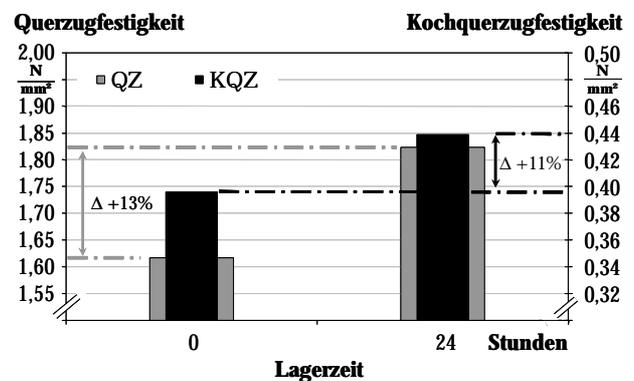


Abbildung 138: Entwicklung der Querzugfestigkeiten während einer 24-stündigen Lagerung der 17,5 mm Platten.

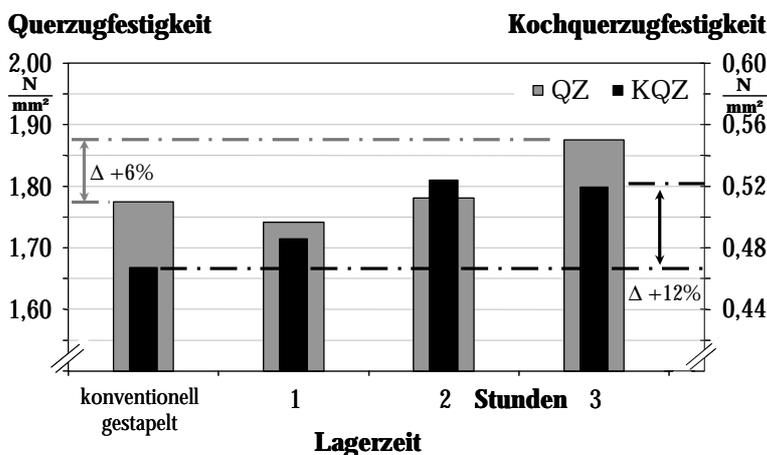


Abbildung 139: Entwicklung der Querzugfestigkeit und der Kochquerzugfestigkeit nach Kochprüfung während der Lagerung unmittelbar nach dem Verpressen der 20,5 mm Platten.

In Abbildung 139 ist die Entwicklung der Querzugfestigkeit der 20,5 mm MUPF-Platten gezeigt, die unmittelbar nach dem Verpressen für 1, 2 und 3 Stunden eingestapelt wurden. Es ist erkennbar, dass die Querzugfestigkeit innerhalb dieser Zeit um 6% gegenüber den Platten ansteigt, die den Prozess konventionell durchlaufen haben. Auch die Querzugfestigkeit nach Kochprüfung nimmt unter diesen Stapelbedingungen um 12% gegenüber der konventio-

nellen 24-stündigen Lagerung zu. Das Maximum liegt bei $0,52 \text{ N/mm}^2$ 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 noch zu übertreffen, die erreicht werden, wenn die Platten nach dem Pressen sofort im Sternwender gekühlt werden. Der kurzzeitige hohe Temperatureinfluss (95°C für 3 Stunden) wirkt sich positiv auf die Querkzugfestigkeit und noch deutlicher auf die Querkzugfestigkeit nach Kochprüfung aus.

8.4.3.3 Dickenquellung

Abbildung 140 zeigt die Änderung der Dickenquellung nach 24 Stunden Wasserlagerung 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 141 ist die Entwicklung der Dickenquellung der 20,5 mm Platten aufgezeigt. Im Stapel unmittelbar nach dem Verpressen wird innerhalb von 3 Stunden der Quellwert auf 3,4% vermindert. Dies entspricht einer relativen Verbesserung dieser Eigenschaft um 7% im Bezug auf den Quellwert bei einer Stapellagerung mit 70°C . Auf die Dickenquellung wirkt sich der Temperatureinfluss positiv aus. Mit höherer Temperatur und zunehmender Lagerdauer nimmt die Dickenquellung ab.

Dickenquellung

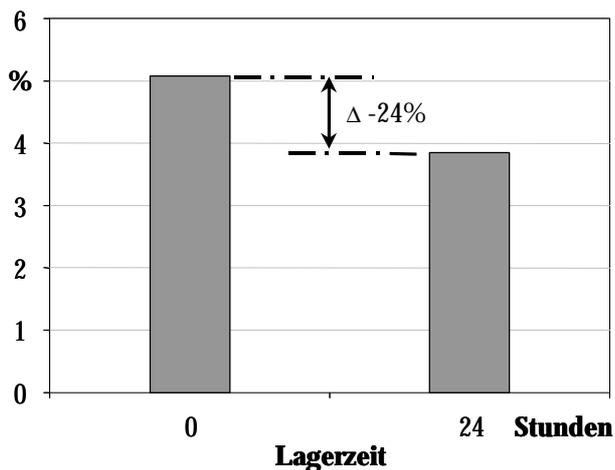


Abbildung 140: Entwicklung der Dickenquellung während einer 24-stündigen Lagerung der 17,5 mm Platten.

Dickenquellung

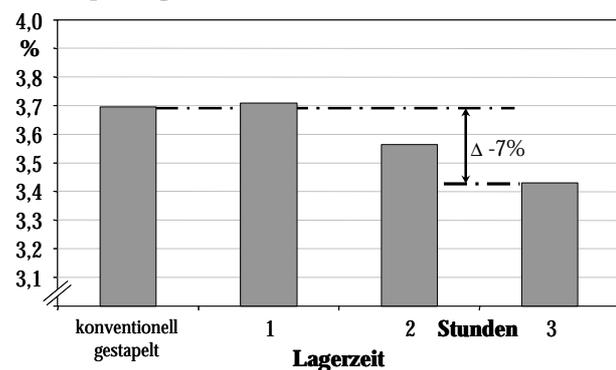


Abbildung 141: Entwicklung der Dickenquellung während der Lagerung unmittelbar nach dem Verpressen der 20,5 mm Platten.

8.4.3.4 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 in Abbildung 142 erkennbar, allerdings liegt die Abnahme lediglich bei 4,0% für die Biegefestigkeit und bei 5,5% für den Biege-Elastizitätsmodul.

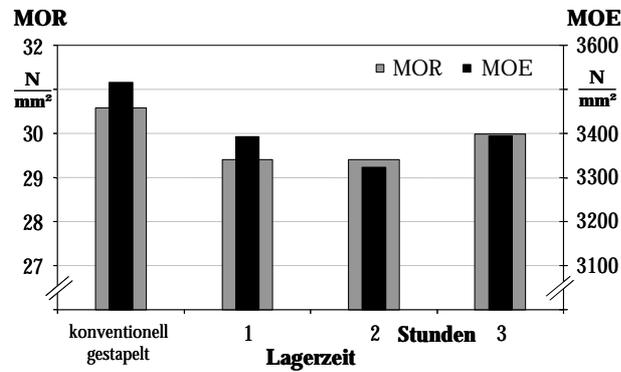


Abbildung 142: Entwicklung der Biegefestigkeit (MOR) und des Biege-Elastizitätsmoduls (MOE) während der Lagerung unmittelbar nach dem Verpressen der 20,5 mm Platten.

8.4.4 PF-Spanplatten

8.4.4.1 Temperatur und Feuchte

Temperatur

In Abbildung 143 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 gekennzeichnet. Die Anfangstemperatur liegt bei etwa 100°C. Es ist ein geringfügiger Anstieg der Temperatur zu erkennen, der darauf zurückzuführen ist, dass die Thermoelemente, an den Oberflächen zwischen den Platten, platziert wurden. Zum Zeitpunkt der Einstapelung sind die Deckschichten bereits um einige Grad abgekühlt. Während der Lagerung werden die Deckschichten von den noch wärmeren Mittelschichten wieder erwärmt. Die aufgezeichnete Erwärmung um etwa 3°C zeigt die stattfindende Vergleichmäßigung der Temperaturverteilung im Plattenstapel. Nach dem Schleifen erfolgt eine stetige Abnahme der Temperatur in der Mitte der Stapel. Es ist ersichtlich, dass Stapel, die 2 Stunden nach der Produktion geschliffen wurden, deutlich schneller abkühlten, als die Stapel, die später geschliffen wurden. Nach zwei Stunden geschliffene Stapel erreichen nach 6 Tagen (144 Stunden) 60°C. Bei Stapeln, die nach 48 Stunden geschliffen wurden, dauert es mehr als 24 Stunden länger, bis dieses Temperaturniveau erreicht ist. Der Zeitpunkt des Schleifens der Platten nach dem Verpressen hat somit bei sonst gleichen Umgebungsbedingungen einen entscheidenden Einfluss auf die Abkühlungsgeschwindigkeit der Stapel.

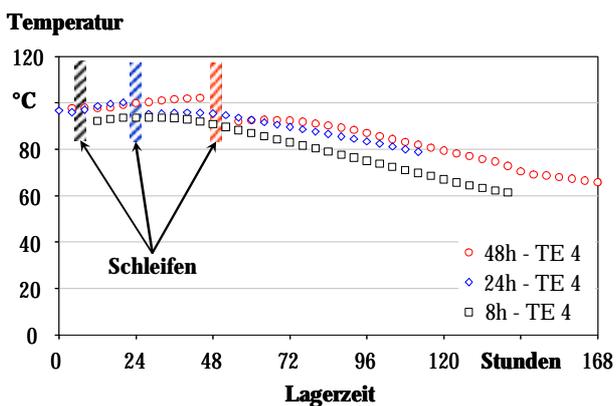


Abbildung 143: Änderung der Temperaturen in Stapeln aus PF-Platten in Abhängigkeit vom Zeitpunkt des Schleifens.

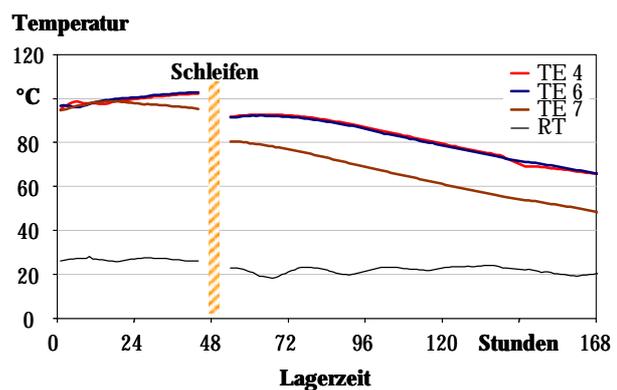


Abbildung 144: Änderung der Temperaturen in Stapeln aus PF-Platten an verschiedenen Messstellen.

Abbildung 144 stellt die Temperaturverteilung 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 festzustellen, 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 145).

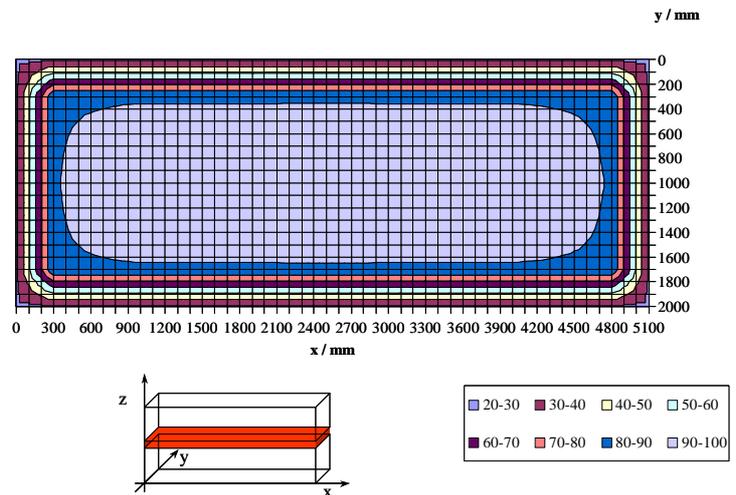


Abbildung 145: Temperaturverteilung nach 24-stündiger Stapellagerung einer PF-Platte bei einer Ausgangstemperatur der Mittelschicht von etwa 105°C.

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 39 ist eine Momentaufnahme der Stapeltemperaturen jeweils drei Tage nach dem Verpressen dargestellt, um die Temperaturniveaus der Stapel mit verschiedenen Herstellungsbedingungen 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 umgesetzt wurden. Das höchste Temperaturniveau wird in der Mitte des Stapel erreicht, der aus der Mitte des "48-Stunden-Großstapel" entstammt. 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

Tabelle 39: 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	
großer Stapel nach Presse	2h	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

Bereichen des "2-Stunden-Großstapels" entnommen wurde (vgl. Abbildung 115). Es ist auffallend, dass die Temperaturunterschiede zwischen dem Mittenbereich und den äußeren Bereichen des Stapels mit etwa 30°C bis 40°C sehr groß sind.

Feuchte

In Abbildung 146 ist die Entwicklung der Gesamtheuchte und die Feuchteverteilung zwischen Deck- und Mittelschicht in der Mitte der Stapel und in Abbildung 147 ist die Änderung der Feuchtebedingungen in den Außenbereichen der Stapel dargestellt. Der Schleifvorgang im Prozess wird in dieser Darstellung auf der Abszissenachse in den Zeitpunkt Null gelegt. Die Lagerzeit im Großstapel ist somit negativ.

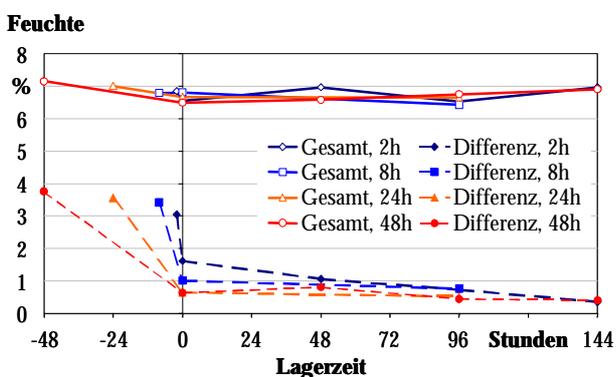


Abbildung 146: Entwicklung der Feuchteverteilung zwischen Deck- und Mittelschicht in der Mitte der Stapel (Zeit 0 = Zeitpunkt des Schleifens).

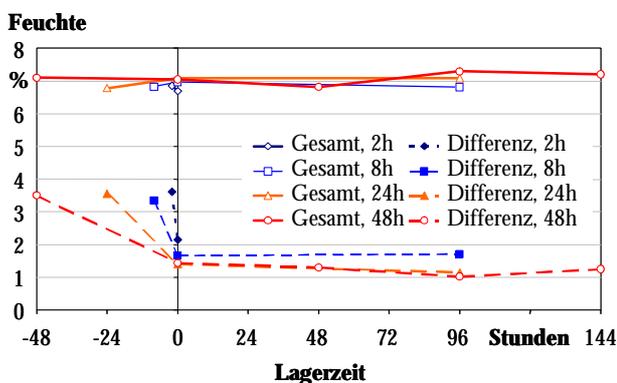


Abbildung 147: Entwicklung der Feuchteverteilung zwischen Deck- und Mittelschicht in den Randbereichen der Stapel.

Die Gesamtheuchte 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 146 und Abbildung 147). Bis zum Zeitpunkt des Schleifens wird die Differenz merklich vermindert. Je länger die Platten vor dem Schleifen gelagert wurden, umso geringer ist die Differenz. Nach einer Lagerzeit von 2 Stunden in der Mitte des Großstapels liegt die Feuchtedifferenz zwischen Deck- und Mittelschicht bei 1,5% und nach einer Lagerzeit von 48 Stunden im Großstapel ist der Wert auf 0,7% abgesenkt (Abbildung 146). Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Platten (v.a. die Deckschichten) bei einer längeren Lagerung vor dem Schleifen einer höheren Temperatur ausgesetzt werden (vgl. Abbildung 143 und Tabelle 39). Mit höherer Temperatur ist auch die Diffusionsgeschwindigkeit höher, somit gleichen sich die Feuchten zwischen Deck- und Mittelschicht schneller an.

Auch im weiteren Verlauf der Lagerung nach dem Schleifen wird dieser Wert noch weiter vermindert, allerdings kommt es nicht zu einem vollständigem Feuchteausgleich zwischen Deck- und Mittelschicht. Der minimale Wert nach der Lagerung von 144 Stunden im Stapel nach dem Schleifvorgang beträgt 0,4%.

Zu einem gänzlichem Ausgleich des Feuchteprofils in einer Holzwerkstoffplatte kommt es auch nach längerer Klimatisierung nicht (Kehr und Grabitzki 1965), da die Deckschichten mit einem höheren Beileimungsgrad beaufschlagt sind als die Mittelschicht. Gleichzeitig werden die Deckschichten in der Heißpresse einer höheren Temperatur (ca. 200°C)¹⁸ 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. Dadurch kommt es in den Deckschichten zu einer stärkeren thermischen Vergütung des Holzes als in der Mittelschicht und damit zur Verminderung der Sorptionsfähigkeit. Dies führt dazu, dass die Feuchten der Deckschichten einer Spanplatte geringer sind als die der Mittelschicht.

¹⁸ Die Temperatur der verschiedenen Heizkreise in der Presse betrug bis 240°C.

8.4.4.2 Querzugfestigkeit

In Abbildung 148 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 -") und dem oberen ("Oben -") Bereich des Großstapels sowie nach dem Schleifvorgang aus der Mitte und dem Randbereich ("- Oben" bzw. "- Unten") des Stapels entnommen wurden.

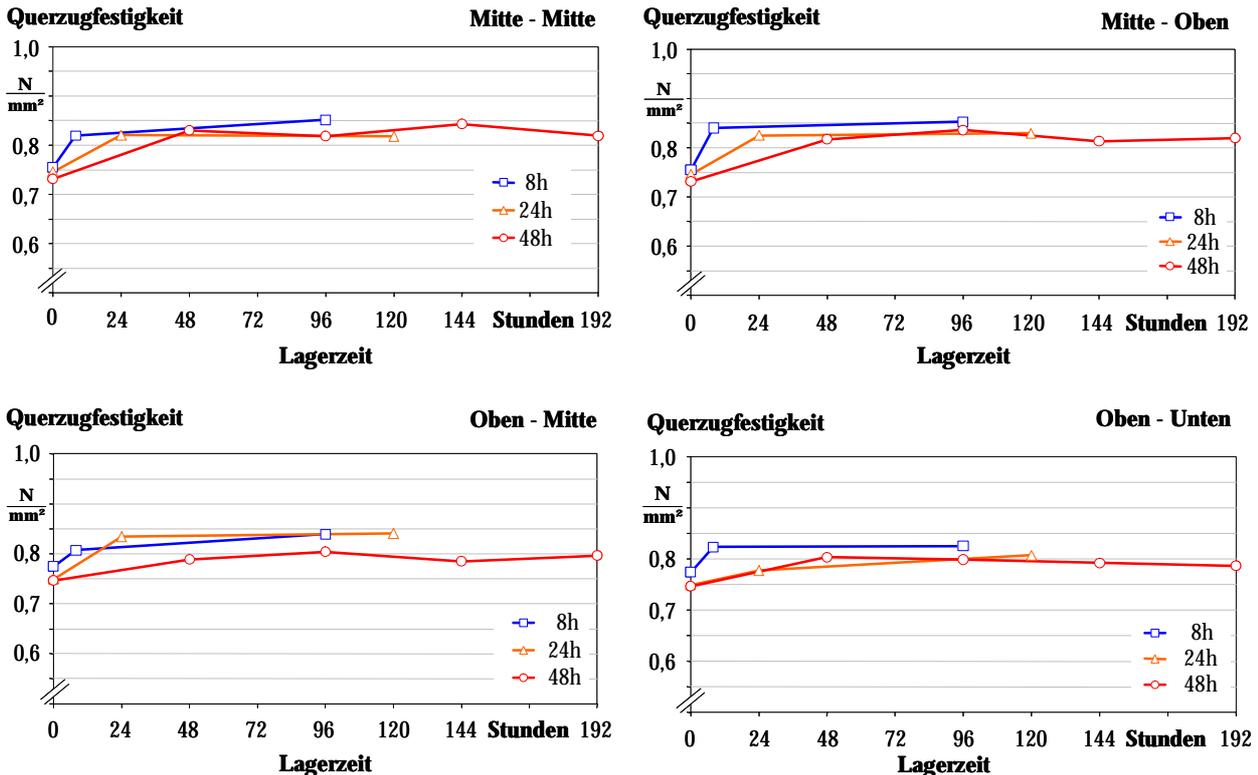


Abbildung 148: Entwicklung der Querzugfestigkeit über eine Lagerdauer im Stapel bis zu 192 Stunden.

- 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/mm². In allen Fällen ist eine Zunahme zu verzeichnen. Die maximale erreichte Festigkeit liegt bei 0,85 N/mm². Zu den größten Veränderungen kommt es im Großstapel, drüber hinaus wird die Eigenschaft im kleineren Stapel nach dem Schleifen nur noch marginal verändert.

Die relative Darstellung in Abbildung 149 verdeutlicht den Temperatureinfluss, der durch die unterschiedlichen Stapelbedingungen bedingt ist, auf die Entwicklung der Eigenschaft. Hier werden die Bedingungen gegenübergestellt, aus der die höchsten und die geringsten Plattentemperaturen im Stapel resultierten. 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 39). Es ist erkennbar, dass mit höherer Temperatur 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 149 - links). In den Randbereichen des Stapels (jeweils zweite Platte von oben bzw. unten), in denen die gemessene Temperatur am geringsten ist, wird eine Eigenschaftszunahme von 7% nicht überschritten (Abbildung 149 - rechts).

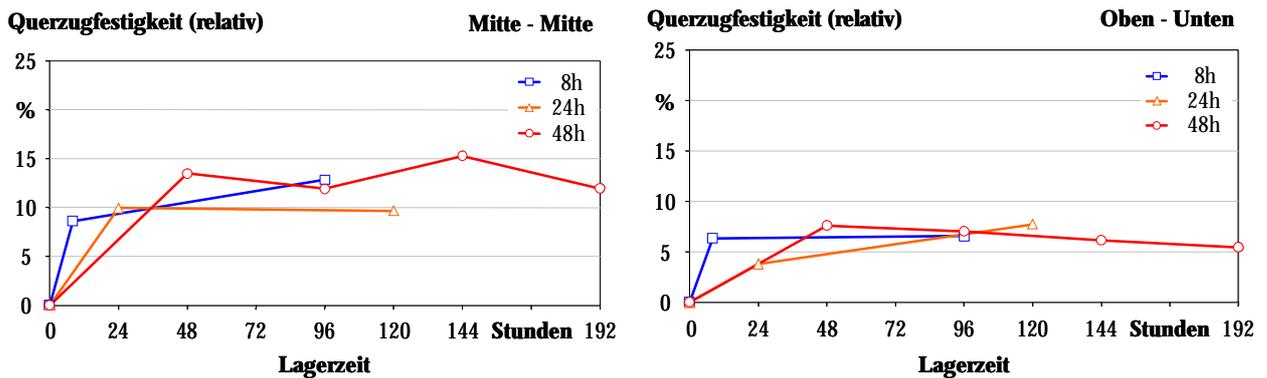


Abbildung 149: Entwicklung der Querkzugfestigkeit über eine Lagerdauer im Stapel bis zu 192 Stunden, relative Darstellung.
links: In der Mitte des Großstapels & in der Mitte des Stapels nach dem Schleifen
rechts: Im oberen Bereich des Großstapels & im unteren Bereich des Stapels nach dem Schleifen

Auch hinsichtlich der horizontalen Position der Platten im Stapel wird der Temperatureinfluss auf die Querkzugfestigkeit erkennbar. In Abbildung 150 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. Je höher die Stapeltemperatur umso größer ist die Eigenschaftszunahme.

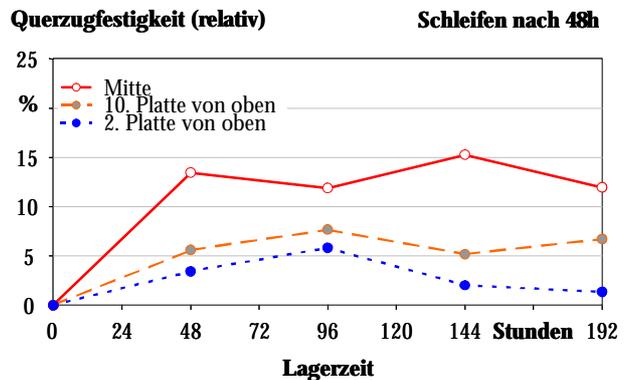


Abbildung 150: Entwicklung der Querkzugfestigkeit des Stapels (nach 48 Stunden geschliffen) in verschiedenen Positionen im Stapel, relative Darstellung.

Erkenntnisse

Durch diese Untersuchung konnten die Laborergebnisse bestätigt werden. Auch bei industriell gefertigten Platten ist ein deutlicher positiver Temperatureinfluss auf Platten mit einem modifizierten PF-Harz erkennbar. Allerdings ist an 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 einstellten, wesentlich größer waren als die gewählten Temperaturen im Laborstapel. Der Temperaturbereich für die Stapelbedingungen betrug im Labor zwischen 80°C und 110°C; demgegenüber ist die Temperaturspanne, die sich in den Industriestapeln ergab, mit 40°C bis 95°C deutlich in den unteren Bereich erweitert.

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. Um die Platteneigenschaften entscheidend zu verändern, muss die Stapeltemperatur mindestens 80°C betragen. Je höher die Temperatur, umso größer ist die Querkzugfestigkeit.

8.4.4.3 Querzugfestigkeit nach Kochprüfung

Die Entwicklung der Querzugfestigkeit nach Kochprüfung der PF-Platten während der Stapellagerung ist in Abbildung 151 zusammengestellt. Unmittelbar nach dem Pressen und vor einer Lagerung im Stapel beträgt die Querzugfestigkeit nach Kochprüfung $0,21 \text{ N/mm}^2$. Die Anforderung gemäß EN 312-5 ($0,14 \text{ N/mm}^2$) ist somit bereits erfüllt. Die Werte liegen allerdings noch unter der Anforderung der EN 312-7 ($0,23 \text{ N/mm}^2$). 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 $0,30 \text{ N/mm}^2$ 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.

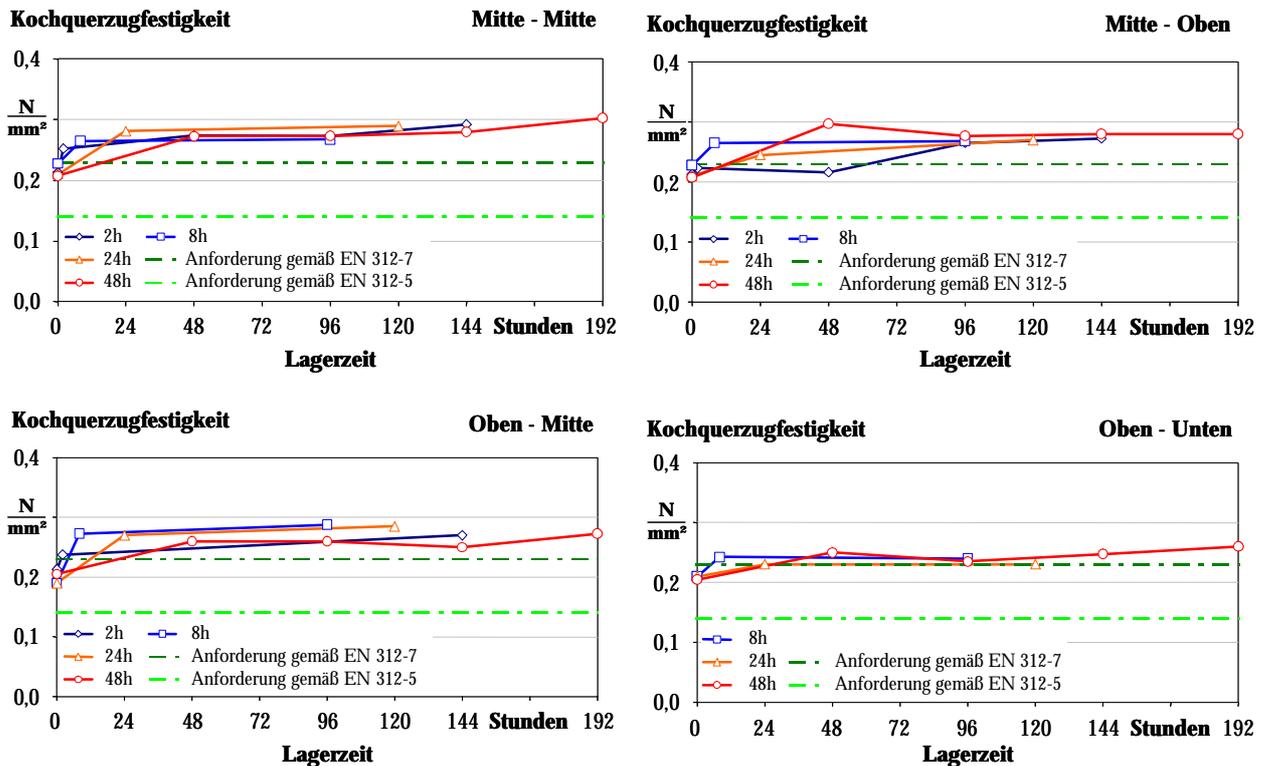


Abbildung 151: Entwicklung der Querzugfestigkeit nach Kochprüfung über eine Lagerdauer im Stapel bis zu 192 Stunden.

- 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 152 eine relative Darstellung der Ergebnisse bezogen auf den Ausgangswert vor der Lagerung gewählt. Bei dem höchsten Temperatureinfluss der Platten, welches sich in der Mitte des Stapels einstellt, die für 48 Stunden vor dem Schleifen gelagert

wurden, nimmt die Querkzugfestigkeit 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 Verbesserung um 15% nicht überschritten.

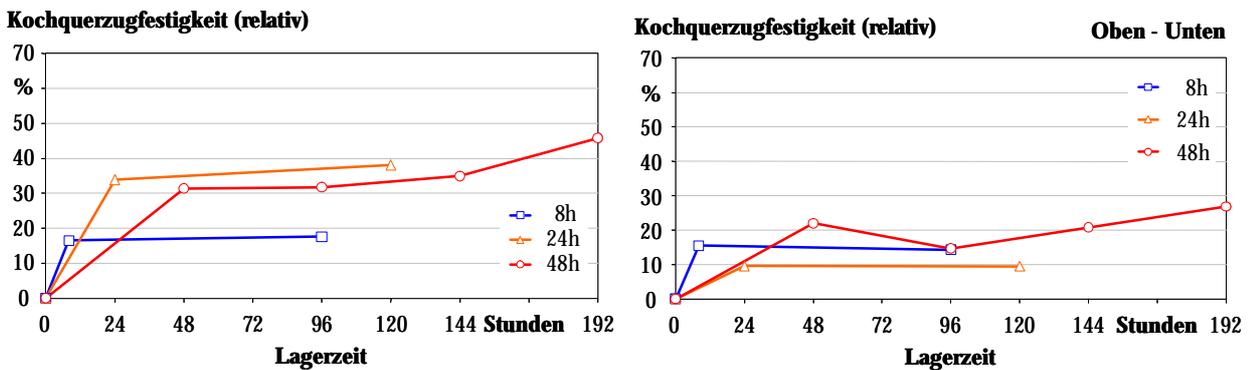


Abbildung 152: Entwicklung der Querkzugfestigkeit nach Kochprüfung über eine Lagerdauer im Stapel bis zu 192 Stunden, relative Darstellung.

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 Querkzugfestigkeit nach Kochprüfung wird während der Lagerung merklich erhöht. Ebenso ist die Abhängigkeit von der Stapeltemperatur klar erkennbar. Im Vergleich zur Querkzugfestigkeit (trocken) ist die relative Zunahme der Querkzugfestigkeit nach Kochprüfung mit bis zu 45% deutlich höher – die absolute Zunahme ist mit etwa 0,1 N/mm² nahezu identisch. Die Zunahme der Querkzugfestigkeit nach Kochprüfung ist darauf zurückzuführen, dass die Verklebungsfestigkeit während der Stapellagerung bei hohen Temperaturen für PF-Platten erhöht wird und damit einhergehend auch die Feuchtebeständigkeit des Leimes erhöht wird.

8.4.4.4 Dickenquellung

Abbildung 153 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 154 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 Schleifenvorgang 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%. In der Mitte des Stapel wird die Dickenquellung noch weiter reduziert. Nach 96-stündiger Lagerung haben alle Platten die Anforderung gemäß EN 312-7 (8%) erfüllt (Abbildung 153). Bei der höchsten Stapeltemperatur wird eine Dickenquellung von nur 5,5% erreicht.

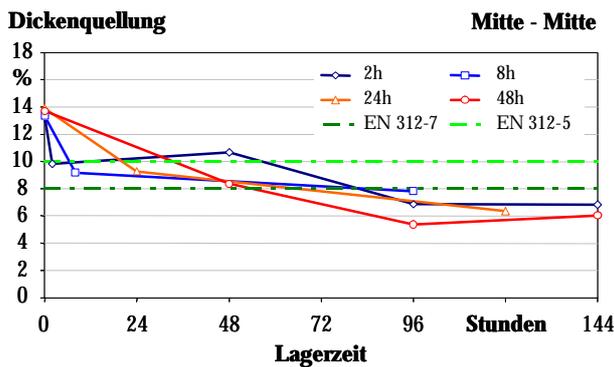


Abbildung 153: Entwicklung der Dickenquellung in der Mitte der Stapel in Abhängigkeit vom Zeitpunkt des Scheifens.

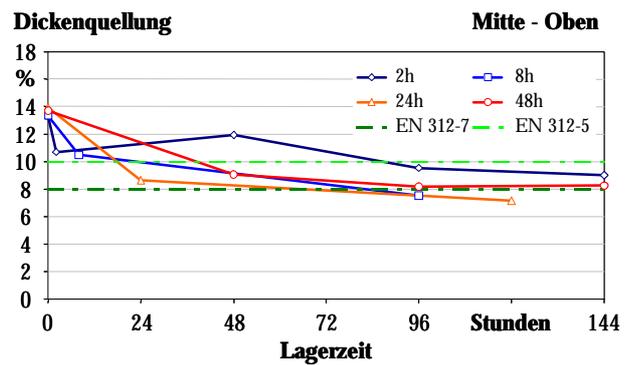


Abbildung 154: Entwicklung der Dickenquellung in der Mitte des Großstapels und nach dem Schleifen aus dem oberen Bereich der Stapel.

Die Proben, die nach dem Schleifen aus dem oberen Randbereich des Stapels entnommen wurden, wo die Plattentemperatur um etwa 30°C geringer als in der Mitte ist, zeigt sich nur eine geringe Verbesserung, so dass die Werte nach Abschluss der Lagerung zwischen 7% und 9% betragen (Abbildung 154).

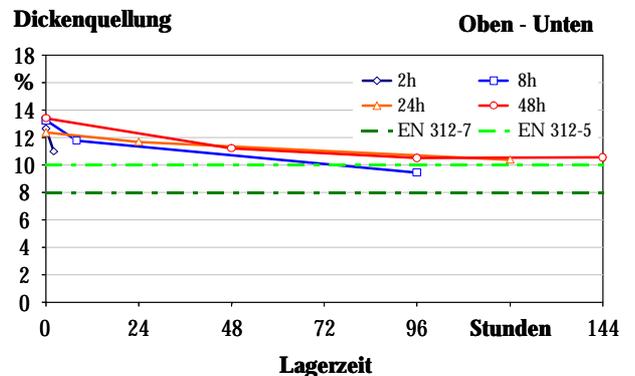


Abbildung 155: Entwicklung der Dickenquellung in den Außenbereichen der Stapel in Abhängigkeit vom Zeitpunkt des Scheifens.

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 155).

Erkenntnisse

An dieser Untersuchungsreihe bestätigt sich der Einfluss der Stapellagerung auf die Dickenquellung von mit einem modifizierten PF-Harz verleimten Platten. Analog zur Quersugfestigkeit (Kapitel 8.4.4.2) ist der Temperatureinfluss noch stärker erkennbar als bei den Laborplatten (Kapitel 7.4.4.3), da sich die Temperaturspanne in den industriellen Stapeln über einen größeren Bereich erstreckt (40°C bis 95°C).

Es konnte bereits gezeigt werden, dass die Quersugfestigkeit der PF-Platten während der Stapellagerung deutlich in Abhängigkeit von der Temperatur erhöht werden kann (vgl. Abschnitt 8.4.2.2). Die Zunahme der Quersugfestigkeit ist wesentlich durch eine stärkere Vernetzung des Harzes bedingt, damit verringert sich auch die Dickenquellung. Gleichzeitig werden Spannungen im Holz während der Lagerung reduziert. Mit geringeren Spannungen in der Holz-Leim-Matrix wird auch die Dickenquellung vermindert. Sowohl die Veränderungen der Klebstoffkomponente als auch die Veränderungen, die im Holz unter den Lagerbedingungen bei den vorliegenden Temperaturen vorliegen, führen dazu, dass die Dickenquellung abnimmt.

8.4.4.5 Biegeeigenschaften

Während der Lagerung bei hohen Temperaturen wird der Biege-Elastizitätsmodul und die Biegefestigkeit von PF-verleimten Platten erhöht. In Abbildung 156 ist die Entwicklung des Biege-Elastizitätsmoduls während der Lagerung in der Mitte der der Stapel in Abhängigkeit vom Schleifzeitpunkt dargestellt. Es ist erkennbar, dass der E-Modul bei den Platten, die für 48 Stunden vor dem Schleifen gelagert waren und damit dem höchsten Temperaturniveau ausgesetzt waren von etwa 2.900 N/mm² um etwa 10% zunimmt. Bei geringeren Lagertemperaturen wird der E-Modul nicht nennenswert verändert.

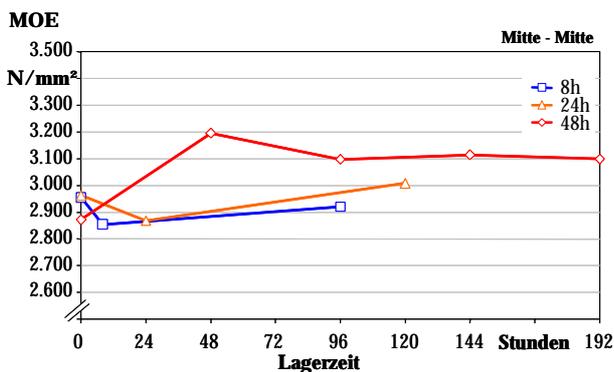


Abbildung 156: Entwicklung des Biege-Elastizitätsmoduls in der Mitte der Stapel in Abhängigkeit vom Zeitpunkt des Scheifens.

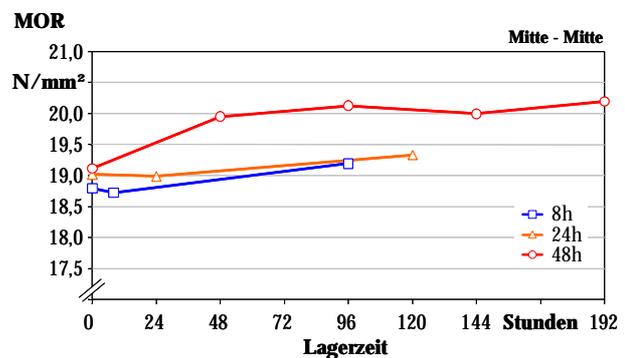


Abbildung 157: Entwicklung der Biegefestigkeit in der Mitte der Stapel in Abhängigkeit vom Zeitpunkt des Scheifens.

Abbildung 157 zeigt die Entwicklung der Biegefestigkeit während der Lagerung in der Mitte der Stapel in Abhängigkeit vom Schleifzeitpunkt. Es wird erkennbar, dass auch die Biegefestigkeit

während der Lagerung bei der höchsten Temperatur zunimmt, wobei die Zunahme ausgehend von $19,0 \text{ N/mm}^2$ lediglich 5% beträgt. Bei einer niedrigeren Temperatur ist auch bei der Biegefestigkeit keine nennenswerte Änderung zu verzeichnen.

Erkenntnisse

Die Biegung stellt eine zusammengesetzte Beanspruchung dar, bei der die einzelnen Schichten der Platte auf verschiedene Weise belastet werden. Keylwerth (1958) hat an dreischichtigen Spanplatten gezeigt, dass etwa $1/3$ des Biegemomentes von der Mittelschicht und $2/3$ von den Deckschichten aufgenommen wird. Die Plattenoberseite wird auf Druck- und die Unterseite auf Zug beansprucht; entstehende Schubspannungen werden von der Mittelschicht aufgenommen.

An den Laboruntersuchungen der PF-verleimten Platten konnte gezeigt werden, dass die Abhebefestigkeit der Deckschicht während der Lagerung bei Temperaturen über 80°C um etwa 15% erhöht wird. Auch die Querkzugfestigkeit, die als Maß für die Verklebungsfestigkeit in der Mittelschicht dient, wird während der Lagerung bei hohen Temperaturen erhöht. Die Zunahme von beiden Festigkeitswerten kann auf eine weitere Aushärtung des Klebstoffes zurückgeführt werden. Mit der weiteren Aushärtung des Klebstoffes geht auch eine Verfestigung des Gefüges innerhalb der Platte einher, wodurch sowohl die Biegefestigkeit als auch der Biege-Elastizitätsmodul gesteigert werden.

8.4.5 PMDI-Spanplatten

8.4.5.1 Temperatur und Feuchte

Temperatur

In Abbildung 158 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 in der Mitte lediglich eine Temperatur 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 48 Stunden.

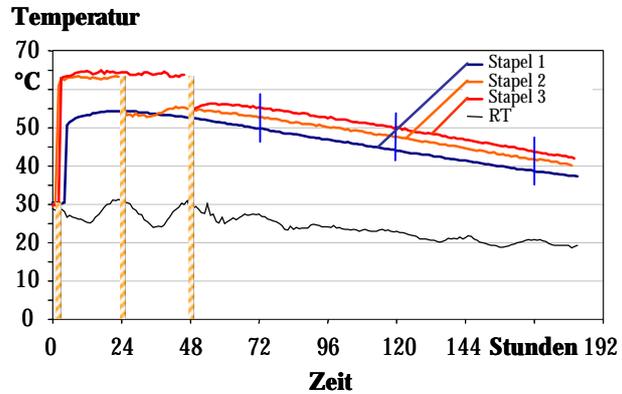


Abbildung 158: Entwicklung der Temperatur in der Mitte der Stapel.

Feuchte

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

Gleichgewichtsfeuchte

Die Gleichgewichtsfeuchte bei Normklima (20°C und 65% rel. LF) sinkt unter diesen Temperaturbedingungen über den Lagerzeitraum von 168 Stunden von 10,3% auf 9,9% ab.

8.4.5.2 Querkzugfestigkeit

Die Querkzugfestigkeit der PMDI-Platten unmittelbar nach dem Verpressen beträgt 0,96 N/mm². Während der Lagerung über einen Lagerzeitraum von 7 Tagen ist keine signifikante Änderung der Querkzugfestigkeit feststellbar.

8.4.5.3 Querkzugfestigkeit nach Kochprüfung

Die Querkzugfestigkeit nach Kochprüfung beträgt ca. 0,23 N/mm². Eine Veränderung während der Lagerung im Stapel ist nicht feststellbar.

8.4.5.4 Dickenquellung

In der Abbildung 159 und Abbildung 160 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 für Proben aus der Mitte des Stapels reduziert. Der minimale Wert wird erreicht (ca. 1,8%), wenn die Platten nach 24 Stunden geschliffen wurden. 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 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.

Dickenquellung, 2h (DIN)

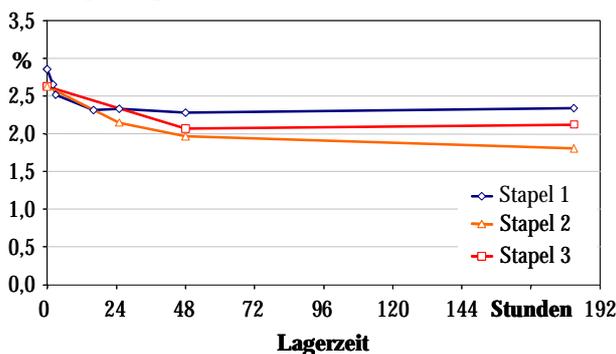


Abbildung 159: Entwicklung der Dickenquellung nach 2 Stunden (DIN) der PMDI-Platten während der Stapellagerung.

Dickenquellung, 24h (DIN)

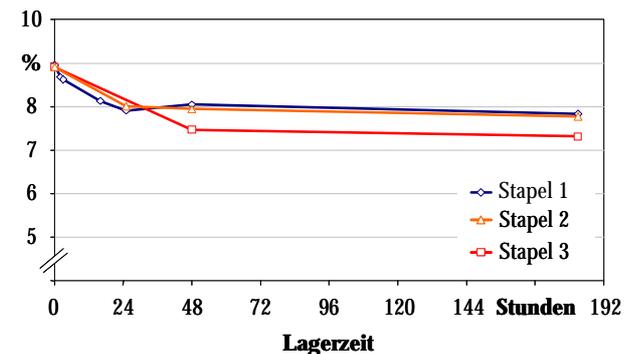


Abbildung 160: Entwicklung der Dickenquellung nach 24 Stunden (DIN) der PMDI-Platten während der Stapellagerung.

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 Temperatureniveau von unter 60°C zurückzuführen.

8.4.6 Faserplatten

8.4.6.1 Temperatur und Feuchte

Temperatur

In Abbildung 161 und Abbildung 162 sind die Temperaturänderungen der untersuchten Stapel dargestellt. Es ist erkennbar, dass die Einstapeltemperatur für die UF-verleimten Faserplatten, die durch zwei Wender gekühlt wurden, etwa 60°C beträgt. Die Temperatur in der Mitte des Stapel sank 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.

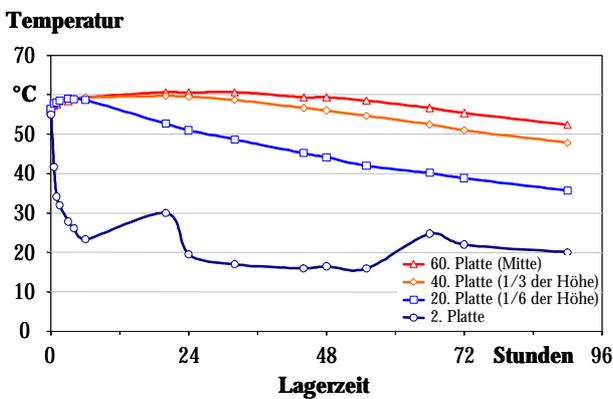


Abbildung 161: Änderung der Temperatur der HDF (nach zwei Wendern eingestapelt) während der Stapellagerung.

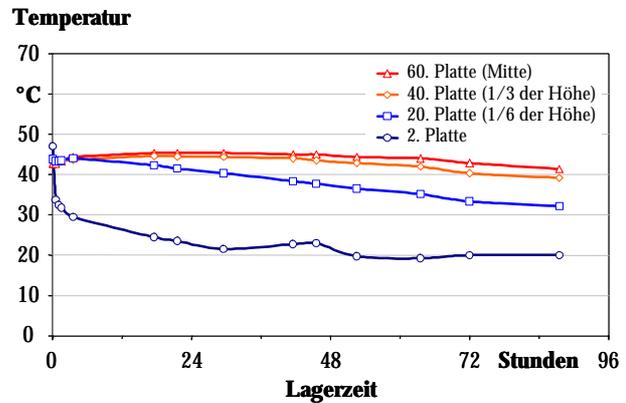


Abbildung 162: Änderung der Temperatur der HDF (nach drei Wendern eingestapelt) während der Stapellagerung.

Feuchte

Unmittelbar nach dem Verpressen haben die Platten eine Feuchte von etwa 4,0%. In Abbildung 163 ist die Verteilung der Feuchte von der Mitte bis zum Rand in den verschiedenen Schichten des

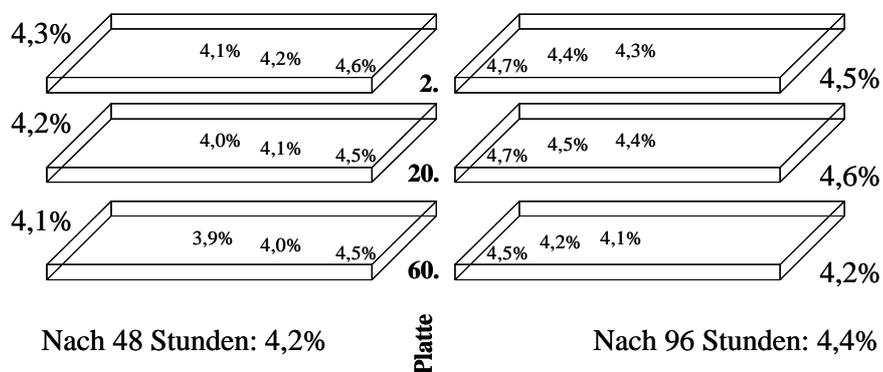


Abbildung 163: Entwicklung der Feuchte der HDF während der Stapellagerung.

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 Stapel auch nach 96 Stunden noch eine Feuchte von 4,1% vorliegt, so ist die Feuchte an der äußersten Ecke bereits Stapels 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 Gleichgewichtsfeuchte (etwa 8% bei dem Umgebungsklima 25°C und 45% relativer Luftfeuchte) relativ groß ist. Der Ausgleich der Feuchte erfolgt von außen nach innen im Stapel, wie es in Abbildung 163 erkennbar ist.

8.4.6.2 Querkzugfestigkeit

Ein gravierender Einfluss der Stapelbedingungen auf die Entwicklung der Querkzugfestigkeit ist nicht ermittelt worden. Über den betrachteten Zeitraum schwankt die Festigkeit nicht signifikant zwischen 1,8 N/mm² und 1,9 N/mm².

8.4.6.3 Dickenquellung

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

8.4.6.4 Formaldehydgehalt

Nach 72 Stunden Lagerzeit im Stapel nimmt der Perforatorwert der Platten aus der Mitte der Stapel ab. Der Wert für 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. Hinsichtlich des Formaldehydgehalts wird der Einfluss der Temperatur im Stapel erkennbar.

8.5 Zusammenfassung der Industrieuntersuchungen

- ✓ Die Eigenschaften der untersuchten Holzwerkstoffplatten ändern sich während der Lagerung im Stapel zum Teil deutlich.
- ✓ Der Großteil der Eigenschaftsveränderung findet bereits innerhalb der ersten Stunden der Lagerung statt.

UF-Spanplatten

- ✓ Die Stapeltemperatur wird neben der Abkühlung der Platten im Sternwender auch durch die Herstellbedingungen der Platten beeinflusst. Bei Veränderung 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 beeinflussen 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 durch Hydrolyse 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 Formaldehydgehaltes ist bei höherer Temperatur geringfügig besser (Abnahme von 5 auf fast 3 mg/100g).
- ✓ Die Gleichgewichtsfeuchte nimmt im günstigsten Fall während einer dreitägigen Lagerung von 10,5% auf unter 9,7% ab.

MUF-Spanplatten

- ✓ Die Beeinflussung der Stapeltemperatur durch die 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 Veränderung erkennbar ist.
- ✓ Die Lagerung der Platten im Stapel bewirkt eine Abnahme der Gleichgewichtsfeuchte 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 50°C Stapeltemperatur ist keine Änderung feststellbar.

- ✓ Die Abnahme der Dickenquellung beträgt in Abhängigkeit von der Stapeltemperatur von 1,6 auf bis zu 1,0% (nach 2 Stunden Wasserlagerung) und von 7,2 auf bis zu 5,8% (nach 24 Stunden Wasserlagerung).
- ✓ Hinsichtlich der Biegeeigenschaften sind keine signifikanten Veränderungen 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 bestimmten Zeitraum (hier: 3 Stunden) 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 Veränderungen feststellbar; diese folgen allerdings einem negativen Trend.

PF-Spanplatten

- ✓ Die Stapeltemperatur wird durch die Lagerdauer vor dem Schleifen und die damit einhergehende Vereinzelung der Platten deutlich beeinflusst. Je eher die Platten in einem kleineren Stapel gelagert werden umso schneller kühlen diese 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. Eine 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 (> 80°C) und die Einwirkungsdauer der Temperatur (> 24 Stunden) umso stärker wird die Querzugfestigkeit verbessert.
- ✓ Auch für die Querzugfestigkeit nach Kochprüfung wird der deutliche Temperatureinfluss ersichtlich.
- ✓ Dieser Zusammenhang ist auch hinsichtlich der Dickenquellung deutlich. Je höher die Temperatur während der Lagerung desto stärker wird die Quellung reduziert.
- ✓ Die Biegeeigenschaften, sowohl MOE als auch MOR, der PF-verleimten Platten werden durch die Stapellagerung ebenfalls mit Zunahme der Lagertemperatur beeinflusst.

PMDI-Spanplatten

- ✓ Die Stapeltemperatur kann durch die Art der Stapelbildung (v.a. durch die Wahl des Schleifzeitpunkts) beeinflusst werden. Durch das Schleifen zu unterschiedlichen Zeitpunkten können unterschiedliche Temperaturniveaus eingestellt werden.
- ✓ Die Feuchte (ca. 6,5%) ändert sich im Stapel nicht.
- ✓ Die Gleichgewichtsfeuchte wird geringfügig von 10,3 auf 9,9% vermindert.
- ✓ Es findet unter diesen Stapelbedingungen keine nennenswerte Veränderung der Querzugfestigkeit statt.
- ✓ Die Dickenquellung nach 24-stündiger Wasserlagerung wird 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.

Faserplatten

- ✓ Die Temperatur bei der Einstapelung der UF-verleimten HDF-Platten beträgt in den vorliegenden Untersuchungen in Abhängigkeit von der Anzahl der durchlaufenen Sternwender 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 eine Feuchtedifferenz von 0,5%.

- ✓ Bei dem vorliegenden Temperaturniveau tritt keine Veränderung 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.

9 Kostenabschätzung für die gezielte Nutzung der Stapellagerung

Um die wirtschaftlichen Aspekte der Stapellagerung abzuschätzen, werden nachfolgend die Kosten für die Lagerung den möglichen Einsparpotenzialen gegenübergestellt. Die Grundlage der Berechnung basiert auf folgenden Annahmen:

Ausgangssituation

Es wird von einer Spanplattenproduktion mit einer durchschnittlichen Kapazität von 2.000 m³ pro Tag ausgegangen. Die Platten haben eine Dichte von 650 kg/m³ und einen mittleren Klebstoffgehalt von 9% (Festharz auf atro Spanmaterial) mit 2,5% Härter (Feststoff auf Festharz). Die Paraffinmenge beträgt 0,5% (Feststoff auf atro Spanmaterial). Die Kosten für die Rohstoffe sind Tabelle 40 zu entnehmen (Janßen 2001). Es wird an 330 Tagen im Jahr produziert. Der Verkaufspreis für eine 22 mm Möbelspanplatte beträgt 100 €/m³.

Tabelle 40: Materialkosten für Rohstoffe von Spanplatten (nach Janssen 2001).

Material	Kosten bezogen auf Feststoff
Paraffin	1,53 €/kg
UF-Harz	0,47 €/kg
MUPF-Harz	0,64 €/kg
Härter	1,02 €/kg

Kosten der Lagerung

- a) erweiterte Grundstücks- und Gebäudekosten für zusätzliche Lagerkapazitäten

Die folgende Überlegung basiert darauf, dass bei einer Neukonzeption einer Produktionsanlage zusätzliche Lagerkapazität zur gezielten Nutzung der Stapellagerung eingeplant werden soll. Bei einer Stapelhöhe von 5 m wird für die Lagerung einer Zweitagesproduktion eine zusätzliche Netto-Lagerfläche von 800 m² benötigt. Die reinen Grundstückskosten werden mit 75 €/m² und die Gebäudekosten mit 200 €/m² angenommen. Die Gesamtaufwendungen werden über 5 Jahre abgeschrieben. Daraus ergeben sich anzusetzende Kosten in Höhe von 133,30 € für jeden Tag. Es wurden keine zusätzlichen Kosten für das Plattenhandling einbezogen, da existierende Systeme lediglich angepasst werden müssen.

- b) gebundenes Kapital während der Lagerung

Die angenommene Tagesproduktion hat einen Wert von 200.000 €. Bei einer Verzinsung von 10% ergibt sich das gebundene Kapital für zwei Tagesproduktionen während der Lagerung in Höhe von 114,30 € je Tag.

Einsparpotenziale

Mittels der Stapellagerung ist es prinzipiell möglich, die Querkzugfestigkeit um bis zu 10% und die Dickenquellung um etwa 20% bei Aminoplast-Harzen zu verbessern. Daher ist es möglich Anteile an Paraffin oder die Leimzugabemenge zu vermindern, um letztendlich die gleichen Eigenschaften zu erreichen. Die tatsächliche Menge, um die die Zugabe an Paraffin oder Klebstoff reduziert werden kann, ist nur grob abzuschätzen, da die Platteneigenschaften durch eine Vielzahl von Faktoren beeinflusst werden (vgl. Maloney 1993). Daher unterscheiden sich die Angaben, die der Literatur zu entnehmen sind zum Teil sehr deutlich. Zudem sind die funktionellen Zusammenhänge zwischen den Eigenschaftswerten und der Leim- bzw. Paraffinmenge der nachfolgend genannten Untersuchungen meist nicht linear. Sie sind daher auch davon abhängig auf welchem Niveau die Eigenschaften betrachtet werden. Nach Albrecht (1968) wird die Dickenquellung (24h) um 20% verringert mit einer Erhöhung der Paraffinzugabe um etwa 12%. Untersuchungen von Niemz (1982) ist zu entnehmen, dass die Menge an Paraffin um etwa 40% reduziert werden muss, um eine 20% höhere Dickenquellung (2h) zu erreichen. Um die Querkzugfestigkeit um 10% zu erhöhen, muss die Leimmenge nach Niemz (1982) etwa 30% und nach Maloney (1993) etwa 12% erhöht werden. Für die nachfolgende Berechnung werden Werte angenommen, die deutlich unter den Literaturangaben liegen.

a) Verminderung der Paraffinzugabe

Es wird davon ausgegangen, dass durch eine gezielte Stapellagerung die absolute Menge an Paraffin, das der Hydrophobierung des Holzes und somit der Verminderung der Dickenquellung dient, um 7% reduziert werden kann.

b) Verminderung der Leimeinsatzmenge

In einem zweiten Ansatz wird eine Verminderung der absoluten Leimmenge um 3% in Betracht bezogen. Dadurch wird auch die Härtermenge um den gleichen Anteil vermindert.

Vergleichsrechnung

Aus Tabelle 41 ist abzulesen, dass durch die Verminderung des zugegebenen Paraffinanteils um 7%, ein Einsparpotenzial von etwa 130.000 € pro Jahr besteht.

Tabelle 41: Kosten-Nutzen-Rechnung bei geringerem Paraffineinsatz.

Rohstoffe	ohne Lagerung	mit Lagerung	Kosten der Lagerung	Einsparpotenzial
Materialeinsatz				
Paraffin	0,5%	0,424%		
Absolut	2,96 kg/m ³	2,75 kg/m ³		
Kosten				
Paraffin	9.064 €/Tag	8.429 €/Tag	248 €/Tag	127.654 €/Jahr

Die Daten in Tabelle 42 zeigen auf, dass mit einer Reduzierung der Leimeinsatzmenge von 3% für eine Produktion mit UF-Harzen ein Einsparpotenzial von rund 440.000 € je Jahr und für den Einsatz von MUPF-Harzen ein Einsparpotenzial von etwa 620.000 € pro Jahr bei der gezielten Nutzung der Stapellagerung existiert.

Tabelle 42: Kosten-Nutzen-Rechnung bei geringerem Leimeinsatz.

Rohstoffe	ohne Lagerung	mit Lagerung	Kosten der Lagerung	Einsparpotenzial
Materialeinsatz				
Leim absolut	9% FH atro Span 53,3 kg/m ³	7,96% FH atro Span 51,7 kg/m ³		
Härter absolut	2,5% 1,33 kg/m ³	2,5% 1,29 kg/m ³		
Kosten				
Härter	2.716 €/Tag	2.637 €/Tag		
UF-Harz	50.116 €/Tag	48.613 €/Tag	248 €/Tag	441.355 €/Jahr
Härter	2.719 €/Tag	2.637 €/Tag		
MUPF-Harz	68.243 €/Tag	66.429 €/Tag	248 €/Tag	620.814 €/Jahr

10 Diskussion der Ergebnisse und Bewertung

10.1 Temperatur

Während der Lagerung im Stapel kühlen die Platten ausgehend von einer bestimmten Einstapeltemperatur langsam ab. Die Einstapeltemperatur ist wesentlich durch die Verweildauer der Platten im Sternwender bestimmt. Im Zuge der Abkühlung bei freier Luftumspülung (im Sternwender) sinkt die Plattentemperatur der Deckschichten innerhalb weniger Minuten unter die der Mittelschicht. Im Stapel findet ein Ausgleich der Temperatur zwischen der kühleren Deckschicht und der wärmeren Mittelschicht innerhalb von etwa 12 bis 24 Stunden statt. Nach dieser Zeit kommt es zu einer Homogenisierung der Temperatur innerhalb des Stapels, wobei die Temperatur über einen etwa 20 cm breiten Bereich zum Rand sowie zur Unter- und Oberseite abfällt.

Die Einstapeltemperatur, und damit das Temperaturniveau des Stapels, kann durch eine Variation der Verweildauer der Platten im Sternwender beeinflusst werden. Die Verweildauer der Platten im Sternwender ist durch die Anzahl der Sternwender und Anzahl der genutzten Positionen im Wender bestimmt. Ebenso wird die Kühlzeit der einzelnen Platte durch die Taktrate (Anzahl der produzierten Platten je Zeiteinheit) beeinflusst. Die Taktrate wiederum ergibt sich aus der Plattenlänge und der Presszeit der Platten. Zusätzlich ist die Abkühlgeschwindigkeit abhängig von der Dicke und der Dichte der Platten.

Die Untersuchungen an UF-verleimten Platten haben gezeigt, dass unter Verwendung von 2 Sternwendern, gegenüber 4 Wendern, eine um etwa 15°C höhere Stapeltemperatur erzielt werden kann. Es ist denkbar, die mögliche Anzahl der Plätze in einem Sternwender unterschiedlich zu belegen: Hat ein Sternwender 40 Plätze und werden alle belegt, so beträgt die Verweilzeit einer Platte in diesem Sternwender beispielsweise 12 Minuten; wird hingegen bei gleicher Taktrate nur jeder zweite Platz belegt, dann ist auch die Abkühlzeit auf 6 Minuten reduziert und damit ist die Plattentemperatur höher. Aus einer Kombination der beiden vorgenannten Optionen ist es möglich, für jeden Plattentyp und bei jeder Taktrate die angestrebte Stapeltemperatur einzustellen. Allerdings sind derzeit industrielle Produktionsanlagen darauf ausgelegt, die produzierten Platten unmittelbar nach dem Verpressen auf eine Temperatur unter 70°C zu kühlen. In den wenigsten Fällen besteht die Möglichkeit die Anzahl der zu durchlaufenden Sternwender und die Belegung der Plätze im Wender zu variieren.

Die Abkühlgeschwindigkeit des Stapels kann auch durch die Wahl des Zeitpunktes des Schleifens beeinflusst werden. Es wurde an PF-verleimten Platten nachgewiesen, dass das Temperaturniveau im Stapel nach dem Schleifen um etwa 7°C höher ist, wenn die Platten erst 48 Stunden nach dem Verpressen geschliffen (damit vereinzelt) wurden im Gegensatz zu Platten mit einem Schleifzeitpunkt nach 2 Stunden. Auch an MUF-Platten wurde ein 5°C höheres Temperaturniveau in dem Fall festgestellt, wenn die Platten nach 6 anstatt nach 2 Stunden geschliffen wurden.

Es konnte aufgezeigt werden, dass es eine Reihe von Möglichkeiten gibt, die Temperaturbedingungen des Stapels prinzipiell auch unter aktuellen Produktionsbedingungen zu beeinflussen.

10.2 Feuchte

Die mittlere Feuchte nach dem Verpressen beträgt für die hier untersuchten industriell gefertigten Spanplatten durchschnittlich 5% für die UF-verleimten, 6,5% für die MUF-verleimten, 7% für PF-verleimten Spanplatten und für HDF etwa 4%. Die Gesamtfeuchte der Spanplatten ändert sich während der Lagerung im Stapel nicht nennenswert. Bei den HDF ist zu beobachten, dass die Feuchte der Platten (im Stapel) von außen nach innen allmählich ansteigt, da die Feuchte dieser Platten deutlich unter der Gleichgewichtsfeuchte der Umgebungsbedingungen liegt.

Unmittelbar nach dem Verpressen der Spanplatten besteht ein deutlicher Unterschied zwischen der Deck- und der Mittelschichtfeuchte. Während der Lagerung wird diese Feuchtedifferenz unterschiedlich schnell in Abhängigkeit von der Temperatur abgebaut. Je höher die Stapeltemperatur, umso schneller gleicht sich die Feuchtedifferenz zwischen Deck- und Mittelschichtfeuchte aus. Dies ist auf eine erhöhte Diffusionsgeschwindigkeit bei höherer Temperatur zurückzuführen.

Die Feuchte der Deckschicht von Spanplatten ist auch nach vollständiger Klimatisierung um 0,5 bis 1% geringer als die der Mittelschicht (vgl. auch Kehr und Grabitzki 1965), da die Deckschicht mit einem höheren Leimgehalt versehen ist und dadurch die Sorption des Materials vermindert ist. Gleichzeitig ist die Temperatur, der die Deckschicht während des Pressvorgangs ausgesetzt ist, höher als in der Mittelschicht. Hinzu kommt, dass die Temperatur noch länger auf die Deckschicht einwirkt. Somit wird die Sorptionsfähigkeit des Holzes in der Deckschicht stärker vermindert als in der Mittelschicht.

Die Gleichgewichtsfeuchte (20°C, 65% rel. LF) beträgt unmittelbar nach dem Verpressen 10,5% für die UF-verleimten, 10,4% für die MUF-verleimten industriell gefertigten Spanplatten und etwa 13 % für PF-verleimten Laborspanplatten. Aufgrund einer thermischen Veränderung des Holzes nimmt auch die Gleichgewichtsfeuchte der Platten sowohl bereits während des Pressvorgangs als auch im Zuge der Stapellagerung merklich ab. Bereits ab einer Lagertemperatur von über 50°C konnte eine Abnahme der Gleichgewichtsfeuchte um 0,5% innerhalb von 3 Tagen Lagerzeit an den MUF-Platten beobachtet werden. Nach Kollmann und Schneider (1963) ist eine Minderung der Sorption für Kiefer, Eiche und Buche (im darrtrockenen Zustand) erst bei Temperaturen über 70°C zu erwarten. Vermutlich ist die erhöhte Feuchte während der Stapellagerung zwischen 5% und 7% dafür verantwortlich, dass auch schon bei niedrigerer Temperatur die Gleichgewichtsfeuchte in geringem Maß vermindert wird. Nach Burmester (1970) ist eine weitere Ursache zur Verminderung der Gleichgewichtsfeuchte denkbar: Formaldehyd reagiert mit den Hydroxylgruppen der Cellulose. Dies führt einerseits zu einer

Quellungsvergütung, weil chemische Brücken zwischen den Fibrillen durch Formaldehyd Bewegungen behindern (Burmester 1970), und andererseits zu einer Sorptionsvergütung, da die entstandenen Halbacetale eine geringere Polarität als die Hydroxylgruppen der Cellulose aufweisen. Damit sind die Hydroxylgruppen gegenüber einer Bindung von Wassermolekülen blockiert.

Bei PF-verleimten Platten wirkt die Verminderung des pH-Wertes und Erhöhung der Pufferkapazität gegenüber Alkali während der Lagerung in die gleiche Richtung. Aufgrund des erhöhten Alkaligehaltes der PF-Platten ist die Hygroskopizität prinzipiell gegenüber UF-verleimten Platten größer (Roffael und Schneider 1980). Es wurde gezeigt, dass während der Stapellagerung die Acidität des Holzes und damit auch der gesamten Platte bei Temperaturen um 100°C deutlich ansteigt. Die Pufferkapazität gegenüber Alkali steigt an und somit sinkt auch die Hygroskopizität bzw. das Sorptionsvermögen der Platten. Dies hat zur Folge, dass die Gleichgewichtsfeuchte der PF-Platten, von etwa 14% auf 11% deutlich stärker reduziert wird, als die der MUF- oder UF-Platten, die bei vergleichbaren Temperaturen gelagert werden.

10.3 Querzugfestigkeit

Harnstoff-Formaldehyd-Harze

Hinsichtlich der Querzugfestigkeit von UF-verleimten Platten hat sich gezeigt, dass bei einer Stapeltemperatur von 60°C grundsätzlich keine Veränderung zu verzeichnen sind. Dies zeigte sich auch für die untersuchten HDF. Eine Temperatur von 60°C ist zu gering, um Änderungen der Querzugfestigkeit von UF-verleimten Platten zu bewirken.

Bei der Untersuchung der Klebfestigkeit an Zugscherproben wurde festgestellt, dass die Festigkeit der Klebfuge auch bei einer Lagerung von 60°C geringfügig zunimmt. Es wurde in diesem Zusammenhang diskutiert, dass eine weitere Kondensation des Harzes unwahrscheinlich ist (vgl. Abschnitt 6.4.1.1). Ursächlich für die Festigkeitszunahme sind hier möglicherweise Umlagerungen von Ether- zu Methylenbrücken-Bindungen, wie es von Lu und Pizzi (1998) beschrieben wurde, sowie das rheologische Verhalten des Harzes und der damit einhergehende Spannungsabbau innerhalb der Leimfuge.

Die Querzugfestigkeit des Standard-UF-Harzes wird bei einer Lagertemperatur von 75°C auch nicht verändert. Die Ausbildung der Klebfestigkeit ist in der Presse vollständig abgeschlossen. Allerdings waren Veränderungen der Festigkeit des selben Klebstoffs an Zugscherproben bereits ab 60°C feststellbar. Bei dem Verpressen der Laborspanplatten ist in der Mittelschicht nach etwa 60 Sekunden eine Temperatur von 100°C erreicht (vgl. Abbildung 169). Bei einem Presszeitfaktor von 9 s/mm und mehr beträgt somit die Zeit, der die Mittelschicht einer Temperatur von 100°C ausgesetzt ist, deutlich über 100 Sekunden. Bei einer Presszeit von 100 Sekunden ist auch an den Zugscherproben keine weitere Festigkeitszunahme während der Lagerung mehr erkennbar.

Eine deutliche Zunahme der Querkzugfestigkeit des formaldehydarmen UF-Harzes ist bei Lagertemperaturen von 75°C feststellbar. Dieses Harz hat gegenüber dem Standardharz eine verminderte Reaktionsgeschwindigkeit aufgrund des geringeren Molverhältnis F:U (Dunky 1985). Dadurch hat ein UF-Harz mit einem geringen Formaldehydgehalt ein stärkeres Potenzial für eine Nachreifung im Stapel.

Melamin-Harnstoff-Formaldehyd-Harze

Die Querkzugfestigkeit der sowohl im Labor als auch in der Industrie hergestellten Platten wird bei einer Lagertemperatur von über 70°C erhöht. Bei einer Lagertemperatur von 80°C wurde die Klebfugenfestigkeit für das UFM- und das MUF-Harz erhöht. Die Untersuchungen der Klebfugenfestigkeit an einem UFM-Harz (geringer Melaminanteil) haben gezeigt, dass eine Lagertemperatur von 60°C nur zu einer geringeren Festigkeitszunahme führt. Diese Temperatur ist zu niedrig, um die Festigkeit der Klebfuge entscheidend zu erhöhen. Eine Temperatur von 100°C ist unter allen Bedingungen für die Klebfuge zu hoch. Sowohl an den verklebten Furnierstreifen als auch an den Laborspanplatten wurde eine deutlicher Abfall der Zugscher- bzw. Querkzugfestigkeit verzeichnet.

Diese Zusammenhänge lassen sich wie folgt erklären: Gegenüber einem reinen UF-Harz ist die Reaktionsgeschwindigkeit des melaminhaltigen Harzes geringer (Troughton und Chow 1975). Unter gleichen Pressbedingungen ist ein melaminhaltiges Harz somit vergleichsweise weniger ausgehärtet.

Nach Robitschek und Christensen (1976) können Kondensation und Hydrolyse während des Pressvorgangs von UF-verleimten Platten parallel ablaufen. Dieser Zusammenhang kann auch auf melaminhaltige Harze übertragen werden, da die Reaktionsmechanismen der beiden Aminoplasten nach den gleichen Prinzipien verlaufen. Es ist vorstellbar, dass eine weitere Kondensation des Harzes bzw. eine Hydrolyse auch während der Stapellagerung bei Temperaturen über 70°C stattfinden kann, da das Harz unter den oben beschriebenen Bedingungen nicht vollständig ausgehärtet ist. Eine mögliche Reorganisation der Ether- zu Methylenbrücken-Bindungen während einer temperierten Lagerung nach dem Verpressen wirkt sich auch bei melaminhaltigen Harzen positiv auf die Festigkeit der Klebfuge aus (Zhao und Pizzi 2000). Eine Temperatur von 60°C ist zu niedrig, um die beschriebenen Reaktionen schnell einzuleiten. Bei einer Temperatur von 70°C bis 80°C wird die Zugscherfestigkeit der Klebfuge und auch die Querkzugfestigkeit der Spanplatten nachhaltig erhöht. Bei einer Temperatur von 100°C wird die Klebfestigkeit zwar zunächst innerhalb der ersten Stunden der Lagerung auch erst erhöht, sie fällt jedoch danach ab. In diesem Fall überwiegt die Hydrolyse des Harzes gegenüber einer weiteren Kondensation. Die Temperatur, denen die MUF-Platten während der Lagerung ausgesetzt werden können, ist höher als bei reinen UF-Harzen, da die Hydrolysebeständigkeit der melaminhaltigen Harze gegenüber reinen UF-Harzen erhöht ist (Dunky 1999a).

Der Phenol-Anteil der MUPF-Harze spielt hinsichtlich der prinzipiellen Entwicklung während der Stapellagerung nur eine untergeordnete Rolle, jedoch ist unter gleichen Produktionsbedingungen das Festigkeitsniveau gegenüber einem MUF-Harz höher.

Phenol-Formaldehyd-Harze

Die Querkzugfestigkeit der PF-verleimten Platten wurde in allen Fällen erhöht. Eine Verminderung der Querkzugfestigkeit findet, im Gegensatz zu den Aminoplast-Harzen nicht statt. Dies deckt sich mit früheren Untersuchungen von Roffael (1973a und 1973b). Für das unmodifizierte Harz ist eine Temperaturabhängigkeit für die Zunahme der Querkzugfestigkeit erkennbar: Je höher die Temperatur, umso stärker und schneller nimmt die Querkzugfestigkeit zu. Bei den Laborergebnissen mit dem modifizierten PF-Harz ist die Temperaturabhängigkeit in einem Temperaturfenster von 85°C bis 110°C nicht erkennbar, da das Harz unter den gleichen Pressbedingungen bereits weiter ausgehärtet ist, als das unmodifizierte Harz. Die beruht auf dem höheren Grad der Vorkondensation.

An den industriellen Ergebnissen zeigte sich an einem modifizierten PF-Harz, dass ein Temperaturniveau um 60°C auch für PF-Harze zu gering ist, um eine Steigerung der Querkzugfestigkeit innerhalb des betrachteten Zeitraumes zu erzielen. Optimal entwickelt sich die Querkzugfestigkeit bei Temperaturen über 90°C. Hinsichtlich der Querkzugfestigkeit kann die Temperatur nicht zu hoch gewählt werden. Eine weitere Kondensation und die Hydrolysebeständigkeit für PF-Harze ist nachgewiesen (Deppe und Ernst 1965, Roffael et al. 1973). Der Harnstoff, der zur Modifikation dem Phenol-Harz zugesetzt wird, trägt nicht zur Querkzugfestigkeit bei und wird auch nicht in die Klebfuge einkondensiert (Oldörp und Marutzky 1998).

10.4 Dickenquellung

Die Dickenquellung von Holzwerkstoffplatten ist von einer ganzen Reihe von Faktoren abhängig. So beeinflussen unter anderem die Quellung des Holzes, der Spannungszustand des Holzes, die Festigkeit der Klebverbindung, die Feuchtebeständigkeit des Klebstoffes und die Einsatzmenge von Hydrophobierungsmitteln die Dickenquellung der Platten.

In den meisten Fällen wird die Dickenquellung während der Stapellagerung vermindert. Dabei gilt für alle Klebstoffsysteme: Je höher die Temperatur, umso geringer die Dickenquellung der Platten. Dies ist selbst dann der Fall, wenn die Querkzugfestigkeit, und damit die Festigkeit der Klebfugen, nicht verändert oder sogar zu einem geringen Maße vermindert wird. Dies konnte an den UF-Platten und auch an den PMDI-verklebten Platten gezeigt werden. Die reduzierte Quellung ist bereits bei geringen Temperaturen ab 60°C erkennbar.

Da die Verminderung der Dickenquellung auch ohne eine Veränderung der Querkzugfestigkeit, und somit ohne Veränderung des Klebstoffes, nachweisbar ist, kann geschlossen werden, dass

die Verringerung der Dickenquellung während der Lagerung im Wesentlichen durch die Veränderungen des Holzes beeinflusst wird. Während des Verpressens werden infolge des Verdichtungsvorgangs und der Aushärtung des Klebstoffes Druckspannungen im Holz eingeschlossen. Nach dem Verlassen der Presse werden diese Spannungen nicht vollständig abgebaut. Bei erhöhter Temperatur und Feuchte werden Spannungen mit zunehmender Zeit im Holz reduziert. Dies haben Becker und Reiter (1970) durch Versuche über die Relaxation der Biegespannungen in Buchenholz nachgewiesen. Adcock (1998) hat den Zusammenhang zwischen der Relaxation von Druckspannungen und Temperatur sowie Feuchte an senkrecht zur Faser gepressten Spänen für eine Zeitraum von 4 Minuten nach dem Pressen nachgewiesen. Er konnte zeigen, dass bei einer Temperatur von 100°C und einer Feuchte von 11,3% die Spannungen nach dem gleichen Zeitraum um 63% geringer waren als bei einer Temperatur von 20°C und einer Probenfeuchte von 0%. Es wird aber ersichtlich, dass auch bei hoher Temperatur und Feuchte die Spannungen im Holz 4 Minuten nach dem Verdichten nicht vollständig abgebaut sind. Die Spannungen innerhalb der Holzwerkstoffplatte wirken sich negativ auf die Dickenquellung der Platten aus (Bolton et al. 1989b). Durch den Spannungsabbau während der Lagerung der Platten nimmt die Dickenquellung ab.

Ist dabei die Temperatur allerdings so hoch, dass es zu einer gravierenden Verschlechterung der Querkzugfestigkeit kommt, wie dies beim MUF- und MUPF-Harz bei einer Lagertemperatur von 100°C im Labor der Fall war, nimmt auch die Dickenquellung wiederum zu.

Es ist festzuhalten, dass die Dickenquellung mit dem Abbau der Spannungen im Holz vermindert werden kann. Je höher die Temperatur und je höher die Feuchte dabei ist, umso stärker bzw. schneller werden die Spannungen im Holz vermindert. Das bedeutet, dass eine möglichst hohe Temperatur und Feuchte erstrebenswert ist, um die Dickenquellung während der Lagerung nach dem Verpressen entscheidend zu vermindern. Allerdings muss dann die Dauer der Lagerung für Aminoplast-Harze begrenzt werden, um eine Verminderung der Klebfestigkeit zu verhindern. So konnte beispielsweise die Dickenquellung der MUPF-verleimten Platten unter industriellen Bedingungen bei einer Lagerung von 95°C für einen Zeitraum von 3 Stunden gegenüber dem konventionellem Produktionsablauf um 7% (relativ) reduziert werden (vgl. Abschnitt 8.4.3.3).

10.5 Querkzugfestigkeit nach Kochprüfung

Die Querkzugfestigkeit nach dem Kochen gilt als Maß für die Feuchtebeständigkeit des eingesetzten Klebstoffes.

Es wurde festgestellt, dass die Querkzugfestigkeit nach Kochprüfung der industriellen MUPF- und PF-verleimten Platten während der Lagerung in Abhängigkeit von der Lagertemperatur deutlich erhöht wird. Die Zunahme korrespondiert mit der trockenen Prüfung der Querkzugfestigkeit, allerdings wird der Wert nach Kochprüfung im Vergleich zur trockenen Prüfung während der Lagerung, relativ betrachtet, deutlich stärker erhöht. Sowohl die Querkzugfestigkeit nach

Kochprüfung als auch die Querzugfestigkeit (trocken) der untersuchten PMDI-Platten ändert sich während der Lagerung bei Temperaturen unterhalb von 60°C nicht.

Daraus kann abgeleitet werden, dass die Änderung der Querzugfestigkeit nach Kochprüfung somit im Wesentlichen der Klebfestigkeitszunahme zugeschrieben werden kann. Es lässt sich vermuten, dass aber auch die Veränderung der Holzeigenschaften während der Lagerung zu einer Zunahme der Querzugfestigkeit nach Kochprüfung beitragen kann. Der Einfluss der Holzeigenschaften ist hinsichtlich seiner Auswirkung auf den Eigenschaftswert anhand der vorliegenden Ergebnisse nicht zweifelsfrei von der Auswirkung der Klebfestigkeitszunahme während der Lagerung im Plattenstapel bei erhöhten Temperaturen zu trennen.

10.6 Formaldehydemission

Es wurde gezeigt, dass der Formaldehydgehalt der UF-verleimten Laborspanplatten und die Formaldehydemission der Furnierstreifen deutlich reduziert werden. Innerhalb von 72 Stunden wird die Formaldehydemission der Klebfuge bei einer Lagertemperatur von 100°C auf den Grundbetrag abgesenkt, der auf die Formaldehydemission des Kiefernholzes zurückzuführen ist.

Aufgrund des relativ großen Verhältnisses zwischen der Schmalfläche zum Volumen der Laborplatte ist als Hauptursache für die Verminderung der Formaldehydemission und des Formaldehydgehaltes die Abgabe des Formaldehyds an die Umgebungsluft anzusehen (vgl. Roffael et al. 1980).

Prinzipiell ist davon auszugehen, dass bei der Hydrolyse der Aminoplast-Harze Formaldehyd freigesetzt wird (Dunky 1999a). Während die Zugscherfestigkeit der Klebfuge der verleimten Furnierstreifen während einer Lagertemperatur von 100°C merklich absinkt, ist gleichzeitig keine Erhöhung der Formaldehydemission zu erkennen. Der freiwerdende Formaldehyd wird durch die Messung nicht erfasst, da er bereits während der Lagerung wiederum aus der Klebfuge an die Umgebungsluft abgegeben wird.

Allerdings wurde auch an Platten mit industriell üblichen Dimensionen und damit mit einem deutlich geringerem Verhältnis zwischen Schmalfläche zu Volumen eine Verminderung des Formaldehydgehaltes und der Formaldehydemission nach der Flaschenmethode ermittelt. Erstaunlicherweise war die Verminderung der absoluten Menge an Formaldehyd an den industriellen Platten größer als an den Laborplatten. Es ist zu vermuten, dass während der Lagerung der eingesetzte Harnstoff als Formaldehydfänger Wirkung zeigt und somit die Menge an freiem durch die Plattenformate nicht emittierendem Formaldehyd durch U-F-Bindungen reduziert wird. Zudem wird Formaldehyd auch durch das Holz gebunden (Burmester 1970, Ginzel 1973). Damit wirkt auch das Holz (wenn auch in geringerem Maße als zusätzlicher Harnstoff) selbst als Formaldehydfänger.

10.7 Konsequenzen für die industrielle Praxis

Harnstoff-Formaldehyd-Harze

Durch die Stapellagerung bei Temperaturen zwischen 60°C und 75°C können die Eigenschaften von UF-verklebten Platten verbessert werden. Eine Verbesserung ist für alle UF-Harze hinsichtlich der Dickenquellung, des Formaldehydgehalts und der Gleichgewichtsfeuchte zu erzielen. Bei einem UF-Harz mit einem Molverhältnis von F:U < 1 wird zudem auch die Querzugfestigkeit 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 über einen längeren Zeitraum zu vermeiden, da unterhalb dieser die UF-Harze nicht nennenswert hydrolysieren. 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.

Eine kurzzeitige Temperatureinwirkung von über 75°C erscheint v.a. im Hinblick auf eine Verminderung der Quellwerte aber auch für UF-Harze sinnvoll und möglich. Die chemischen Reaktionen des Klebstoffes und im Holz, die zu einer Verbesserung der Platteneigenschaften führen, sind am Ende des Pressvorgangs nicht vollständig abgeschlossen. Je höher die Temperatur, umso schneller laufen diese Reaktionen ab. Damit können Umlagerungsreaktionen im Klebstoff, der Spannungsabbau und die Sorptionsverminderung des Holzes schneller ablaufen. Die Lagerzeit bei einer Temperatur über 75°C darf dann aber nicht länger als etwa 6 Stunden auf die Platten einwirken. Somit kommt es zu einer Verminderung der Plattenqualität, die wesentlich in der Hydrolyse des Harzes und in Verfärbungen begründet liegt.

Melamin- Harnstoff-Formaldehyd-Harze

Auch für MUF- und MUPF-Harzen ist von einer Verbesserung der Querzugfestigkeit während der Stapellagerung auszugehen. Wie 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 der Platten im Stapel von 24 Stunden deutlich vermindert. Auch die Formaldehydemission und die Gleichgewichtsfeuchte 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. So können die Platteneigenschaften im Stapel beeinflusst werden, wie es in der Presse nicht möglich und nur

durch Zugabe von kostenintensiven Zuschlagstoffen erreicht werden kann. Als Beispiel sei hier die Formaldehydemission oder die Gleichgewichtsfeuchte genannt, diese Eigenschaften können während der Lagerung deutlich reduziert werden, unter ungünstigen Bedingungen zum Teil allerdings auf Kosten der Querkzugfestigkeit.

Phenol-Formaldehyd-Harze

Für PF-Harze gilt, je länger die Platten nach dem Verpressen einer möglichst hohen Temperatur ausgesetzt sind umso besser sind die physikalisch-technologischen und chemischen Eigenschaften. Die Exposition der Platten einer möglichst hohen Temperatur wirkt sich durchweg positiv auf die Eigenschaften aus. Allerdings muss auch hier die Farbveränderung berücksichtigt werden. Diese wirkt sich gerade bei den extrem hohen Temperaturen um 100°C gravierend auf die natürliche Farbe aus. Mit höherer Temperatur und länger anhaltenden Lagerung wird die Färbung der Platten zunehmend dunkler. Im Hinblick auf 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.

Verfahrenstechnische Maßnahmen

- ✓ Die Untersuchungen haben gezeigt, dass die Temperatur während der Stapellagerung die größte Bedeutung bei der Eigenschaftsentwicklung für alle eingesetzten Klebstoffsysteme hat. Um das Potenzial der Stapellagerung hinsichtlich der Verbesserung der Platteneigenschaften auszuschöpfen, muss die Möglichkeit bestehen, die Stapeltemperatur exakt einzustellen. Zu diesem Zweck ist eine höhere Flexibilität im Bereich des Plattenhandlings nach dem Verpressen bzw. bei der Kühlung und Abstapelung erforderlich.
- ✓ Um die Planung dieses Verfahrensschrittes zu unterstützen, ist eine genaue Kenntnis der Temperaturentwicklung der Platten in Abhängigkeit der Umgebungsbedingungen und des Plattentyps erforderlich. Zu diesem Zweck wäre ein Modell, das die beschriebenen Bedingungen erfasst, für die exakte Simulation der Temperatur hilfreich.
- ✓ An den untersuchten industriellen MUPF-Platten wurde bei einer sofortigen Einstapelung für einen Zeitraum bis zu 3 Stunden und anschließender Kühlung eine Erhöhung der physikalisch-technologischen Eigenschaften gegenüber der konventionellen Prozessführung erreicht. Es wurde ferner beobachtet, dass eine Zunahme der Festigkeitseigenschaften auch für andere Klebstoffsysteme in relativ kurzer Zeit (bis maximal 12 Stunden) stattfindet. Nach diesen Ergebnissen erscheint es sinnvoll, die Platten unmittelbar nach dem Heißpressen für eine kurze Zeit zu stapeln und erst dann im

Sternwender zu kühlen. Idealerweise könnte an die Kühlung dann direkt der Schleifvorgang anschließen.

- ✓ 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 ein Rand von etwa 20 cm (vgl. Abschnitt 4.2.3) nicht hinreichend temperiert. 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 den gewünschten Temperaturen ausgesetzt sind. Soll der Temperatureffekt genutzt werden, müssen Maßnahmen getroffen werden, um die Temperatur und auch die Feuchte gleichmäßig im Stapel zu verteilen. Möglichkeiten zur Vergleichmäßigung der Temperaturen sind wie folgt vorstellbar: Die Plattenstapel müssen mit einem geeigneten Material gegen eine ungleichmäßige Auskühlung isoliert werden. Denkbar wäre auch eine Klimatisierung der Lagerräume, allerdings ist eine Realisierung dieser Möglichkeit mit erheblichen Kosten verbunden.
- ✓ Nach Dunky (1999b) ließe sich die Produktivität einer Plattenproduktion steigern, wenn die Stapellagerung für die vollständige Aushärtung des Klebstoffes genutzt würde:

"When the press opens, a certain mechanical hardening and with this a certain bonding strength is necessary. The full curing however can be completed outside of the press during hot stacking."

Dieses erfordert allerdings, dass die Klebstoffsysteme angepasst werden. Die vorgestellten Untersuchungen unterstreichen diese Forderung.

11 Zusammenfassung

Unmittelbar nach dem Verlassen der Heißpresse sind die Eigenschaften von Holzwerkstoffplatten noch nicht vollständig ausgeprägt. Sie ändern sich sowohl während der freiluftumspülten Auskühlung als auch während der Lagerung im Stapel zum Teil beträchtlich. In der industriellen Produktion werden die Platten vor der Qualitätsprüfung in der Regel vollständig ausgekühlt. Dadurch vergehen zwischen der Herstellung und dem Zeitpunkt bis die Eigenschaftswerte vorliegen, meist mehr als zwei Stunden. Wünschenswert wäre, durch eine Verringerung dieser Zeitspanne direkter auf Eigenschaftsschwankungen reagieren zu können. Voraussetzung dafür ist, dass durch frühzeitige Eigenschaftsprüfung Aussagen über die zu erwartenden Werte getroffen werden können. Ein Ziel der Arbeit war daher, die Änderung der physikalisch-technologischen Eigenschaften von industriell gefertigten Span- und Faserplatten während der Abkühlung zu ermitteln.

Es ist sowohl aus der Literatur als auch aus der industriellen Praxis bekannt, dass, in Abhängigkeit von den Klebstofftypen, Lagerbedingungen und weiteren Faktoren, die Platteneigenschaften nach Verlassen der Presse unterschiedlich beeinflusst werden. Dies kann bedeuten, dass in der Presse die Platten nicht "fertig gepresst" werden müssen, um nach entsprechender Behandlung nach dem Pressen erhöhte Eigenschaftswerte zu erreichen. Diese Zusammenhänge sind bisher in ihrer Komplexität nicht soweit bekannt, dass klare Strategien für die Plattenherstellung ableitbar sind. Hauptaugenmerk der Arbeit ist daher die Erarbeitung allgemeiner Zusammenhänge der Eigenschaftsentwicklung von Spanplatten während der Stapellagerung nach dem Pressen. Daraus werden Konzepte abgeleitet, um die Stapellagerung gezielt zur Verbesserung der Eigenschaften von aminoplast- und phenoplastharz-verleimten Platten zu nutzen.

Die Änderung physikalisch-technologischer Eigenschaften während der freien Auskühlung wurde an mit Harnstoff- (UF), Melamin-Harnstoff- (MUF) und Phenol-Formaldehydharz (PF) verklebten Spanplatten sowie an UF-verklebten Faserplatten untersucht. Ermittelt wurden die Druckscherfestigkeit parallel zur Plattenebene, die Querkzugfestigkeit, die Biegefestigkeit sowie der Biege-Elastizitätsmodul über einen Zeitraum von 24 Stunden. Ferner wurde die Entwicklung von Plattendicke, Temperatur und Feuchte in der Deck- und Mittelschicht gemessen. Neben den zerstörenden Prüfmethöden wurden zerstörungsfreie Verfahren zur Bestimmung des dynamischen Biege-Elastizitätsmoduls und der berührenden sowie berührungslosen Bestimmung der Schallgeschwindigkeit senkrecht zur Plattenebene angewandt.

Die elastomechanischen Eigenschaften haben unmittelbar nach dem Verpressen etwa 60% bis 90% ihres Endwertes erreicht. Dabei besteht ein enger Zusammenhang zwischen der Plattentemperatur und den Eigenschaften. Die Eigenschaften der MUF- und PF-verleimten Platten nehmen je 1°C Temperaturänderung stärker zu als die der UF-verleimten Platten. Dicke Platten kühlen langsamer ab als dünne und weisen daher eine stärkere relative Eigenschaftszunahme auf. Auch die Dauer der Temperatureinwirkung während der Abkühlung wirkt sich also auf die Entwicklung der Platteneigenschaften aus.

Die vorliegende Untersuchung ergab für jeden Plattentyp und für definierte Abkühlbedingungen einen statistisch gesicherten Zusammenhang zwischen dem Temperaturverlauf und der Eigenschaftsentwicklung. Daher besteht die Möglichkeit unter Berücksichtigung der Temperatur die Eigenschaftsmessung zeitnah zum Verpressen durchzuführen, um dann mit Hilfe der Regression zwischen der Temperatur und der Eigenschaft den Wert nach vollständiger Auskühlung abzuleiten.

Um die Veränderungen der Klebstoffe und des Holzes während der Stapellagerung charakterisieren zu können, wurden zunächst in der industriellen Produktion die Temperatur- und Feuchtebedingungen ermittelt, denen die Platten während der Abkühlung und Lagerung nach dem Verpressen ausgesetzt sind.

Furnierstreifen verschiedener Holzarten (Kiefer, Fichte und Buche) wurden gepresst und anschließend einer Lagerung unterzogen. Dabei wurden Temperatur- und Feuchtebedingungen eingestellt, denen die Platte während des Verpressens und der Stapellagerung ausgesetzt ist. Während der Lagerung betrug die Temperatur zwischen 60°C und 100°C und die Feuchte zwischen 6% und 12%. Ziel dieser Untersuchung war es die Änderung der Gleichgewichtsfeuchte, des pH-Wertes und der Pufferkapazität sowie der Formaldehydemission zu ermitteln. Es wurde festgestellt, dass die Sorptionsfähigkeit des Holzes sowohl durch den Pressvorgang als auch durch die Lagerbedingungen beeinflusst wird: Je höher die Feuchte und die Temperatur, umso geringer ist die Gleichgewichtsfeuchte. Die pH-Werte und Pufferkapazitäten ändern sich beim Pressen nicht. Während einer längeren Lagerung bei 100°C werden diese Eigenschaften deutlich beeinflusst. Der pH-Wert sinkt für die untersuchten Holzarten innerhalb von 7 Tagen auf etwa 4,0 ab und die Pufferkapazität steigt über diesen Zeitraum linear an. Die Formaldehydemission des Holzes, bestimmt nach der Flaschenmethode, nimmt während der Lagerung in Abhängigkeit von der Temperatur geringfügig zu.

An Furnierstreifen, die mit Aminoplast-Harzen verklebt wurden, wurde die Entwicklung der Zugscherfestigkeit während der Lagerung unter verschiedenen Temperatur- und Feuchtebedingungen untersucht. Es kamen konventionelle Spanplatten-Klebstoffe zum Einsatz: ein reines UF-Harz und je ein melaminhaltiges UF-Harz mit geringem (UFm) und hohem (MUF) Melaminanteil. Die Bedingungen beim Verkleben der Furnierstreifen wurden mit Presszeiten von 60 bis 100 Sekunden und mit Presstemperaturen von 110°C und 200°C den Gegebenheiten der Deck- bzw. Mittelschichten einer Spanplatte simuliert. Die Proben wurden ebenfalls bei Temperaturen zwischen 60°C und 100°C bei einer Feuchte von 6% und 12% für mehrere Tage gelagert. Für das reine UF-Harz zeigte sich, dass sich die Scherfestigkeit der Klebfuge nach einer kurzen Presszeit innerhalb der ersten 6 Stunden der Lagerung erhöht. Nach einer Lagerzeit von 6 Stunden erhöht sich die Zugscherfestigkeit bei einer Temperatur von 60°C nicht weiter, bei fortgesetzter Lagerung ist bei einer Temperatur von 80°C und insbesondere 100°C ein deutlicher Abfall der Klebfugenfestigkeit infolge von Hydrolyse erkennbar. Diese Zusammenhänge werden auch für die Feuchtebeständigkeit der Klebfuge, die mit Hilfe der Scherfestigkeit nach zweistündiger Wasserlagerung ermittelt wurden, gefunden.

Bei Erhöhung des Melamingehaltes der Harze liegt das Temperaturniveau, bei dem sich die Klebfugenfestigkeit optimal entwickelt, höher. Beim UFm-Harz wurde die maximale Festigkeit innerhalb von 6 Stunden bei 80°C ermittelt, bei 100°C ist nach einem starken Anstieg der Festigkeit innerhalb von 3 Stunden nach dem Verpressen eine deutliche Abnahme feststellbar. Bei MUF ist auch nach einem Anstieg der Scherfestigkeit innerhalb vom 6 Stunden bei 100°C ein Einsetzen der Hydrolyse erkennbar, allerdings wird die Klebfugenfestigkeit erst nach 24 Stunden deutlich reduziert.

Im nächsten Schritt wurden Laborspanplatten hergestellt und bei erhöhter Temperatur für mehrere Stunden gelagert. Zu diesem Zweck wurde ein Klimatisierungsgert so angepasst, dass die Stapelbedingungen für kleinformartige Platten im Labor nachgestellt werden konnten. Die Tauglichkeit dieser Apparatur wurde an Vergleichsmessungen mit industriell produzierten und gestapelten Platten nachgewiesen. Als Klebstoffe wurden UF-Harze (je mit einem Molverhältnis F:U > 1 und F:U < 1), ein MUF und ein MUPF sowie zwei PF-Harze (unmodifiziert und modifiziert) eingesetzt. Des weiteren wurden die Herstellparameter (Presszeit, Härtermenge und Mattenfeuchte) und die Einstapeltemperaturen variiert.

Die Querkzugfestigkeit der Platten mit dem UF-Harz mit einem Molverhältnis F:U < 1 wurde während einer Stapellagerung bei 75°C nach kurzer Presszeit innerhalb von etwa 6 Stunden auf das gleiche Niveau angehoben wie die Platten mit längerer Presszeit. Dickenquellung und Formaldehydgehalt werden während der Stapellagerung mit zunehmender Stapeltemperatur grundsätzlich vermindert.

Die Querkzugfestigkeit der MUF- und MUPF-verleimten Platten nimmt bei Erhöhung der Stapeltemperatur auf 75°C zu. Bei weiterer Erhöhung der Temperatur auf 100°C nimmt die Festigkeit aber wieder deutlich ab. Die Dickenquellung dieser Platten wird bei beiden Temperaturen innerhalb von 24 Stunden deutlich reduziert, bei einer Lagertemperatur von 100°C nehmen die Werte darüber hinaus aufgrund des Rückgangs der Querkzugfestigkeit wieder zu.

Bei Platten mit einem unmodifizierten PF-Harz steigt die Querkzugfestigkeit in Abhängigkeit von der Lagertemperatur um bis zu 25% an. Für das modifizierte PF-Harz ist der Temperatureinfluss bei der Festigkeitszunahme nicht erkennbar, weil das Harz bereits während des Pressvorgangs vollständiger aushärtet. Für beide Harze wird die Dickenquellung in Abhängigkeit von der Stapeltemperatur mehr als halbiert, woraus geschlossen werden kann, dass die Dickenquellung auch durch Veränderungen im Holz während der Lagerung bei erhöhter Temperatur beeinflusst wird. Es wurde festgestellt, dass durch die Stapellagerung der pH-Wert aufgrund der Säureabspaltung des Holzes unter den gewählten Bedingungen deutlich vermindert werden kann. Bei allen untersuchten Platten wird die Gleichgewichtsfeuchte mit Zunahme der Stapeltemperatur vermindert.

Anhand der Untersuchungen in der industriellen Produktion konnten unter den gegebenen Bedingungen verschiedene Möglichkeiten aufgezeigt werden, wie die Einstapeltemperatur und auch die Abkühlungsgeschwindigkeit der Platten während der Lagerung im Stapel beeinflusst werden können. In diesem Zusammenhang ist eine hohe Flexibilität beim Plattenhandling im Bereich der Sternwender und bei der Wahl des Schleifzeitpunktes sinnvoll.

An den industriell produzierten und gestapelten UF-verleimten Platten bestätigte sich die prinzipielle Möglichkeit, die Querkzugfestigkeit bei einer Stapeltemperatur von etwa 80°C innerhalb von 24 Stunden zu steigern. Allerdings ist bei noch längerer Lagerung eine Abnahme der Querkzugfestigkeit festzustellen. Die Dickenquellung, die Formaldehydemission und die Gleichgewichtsfeuchte wurden bei Stapeltemperaturen bis 80°C (Einstapeltemperatur) vermindert.

Bei den MUF-verleimten Platten nimmt die Querkzugfestigkeit mit höherer Stapeltemperatur (bis 75°C) innerhalb der ersten 6 Stunden der Lagerung zu. Ebenso werden die Dickenquellung, die Gleichgewichtsfeuchte und die Formaldehydemission mit zunehmender Lagertemperatur reduziert.

Alle physikalisch-technologischen Eigenschaften der PF-verleimten Platten werden bei hohen Stapeltemperaturen verbessert. Je höher die Temperatur (mindestens 80°C) und je länger diese auf die Platten einwirkt (mindestens 24 Stunden), umso höher ist die Qualität der Platten.

An den PMDI-Spanplatten und Faserplatten, bei denen unter industriellen Bedingungen Stapeltemperaturen lediglich zwischen 50°C und 60°C eingestellt werden kann, ändern sich die Platteneigenschaften nicht wesentlich.

Es wurde an MUPF-verleimten Spanplatten nachgewiesen, dass sich eine veränderte Strategie für die Kühlung und Stapelung der Platten nach dem Verpressen positiv auf die Platteneigenschaften auswirken kann: Die Platten wurden unmittelbar nach dem Verpressen eingestapelt und bei entsprechend hohen Temperaturen von etwa 95°C für bis zu drei Stunden gelagert. Danach wurden die Platten wiederum in den Prozess eingeführt und in Sternwendern gekühlt. Hierbei ergab sich eine Verminderung der Dickenquellung um 7%, eine Erhöhung der Querkzugfestigkeit um 6% und eine Erhöhung der Querkzugfestigkeit nach Kochprüfung um 12% gegenüber Platten, die konventionell direkt nach dem Pressen in Sternwendern gekühlt und eingestapelt wurden.

Ein gezieltes Einstellen des Verfahrensablaufs nach dem Pressen unter Berücksichtigung der komplexen Zusammenhänge ermöglicht eine deutliche Verbesserung der Eigenschaften von amino- und phenoplast-gebundenen Holzwerkstoffen.

12 Literatur

- Adcock, T.W. 1998: The rheological behaviour of isolated wood particles pressed perpendicular to the grain. Ph.D. Thesis Forest Products Research Centre, Buckinghamshire Chilterns University College, Brunel University, 189 Seiten
- 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
- Amthor, J. 1972: Paraffindispersion zur Hydrophobierung von Spanplatten. Holz als Roh- und Werkstoff 30: 422-429
- Becker, H.; Reiter, L. 1970: Über den Einfluss von Temperatur und Holzfeuchtigkeit auf die Relaxation der Biegespannungen in Rotbuchenholz. Holz als Roh- und Werkstoff 28: 264-270
- Blomquist, R.E; Olson, W.Z. 1957: Durability of urea-resin glues at elevated temperatures. Forest Products Journal: 226-272
- Boehme, Ch. 2000:Über die Formaldehydabgabe von Holz und ihre Veränderung während technischer Prozesse der Holzwerkstoffherstellung. Dissertation Universität Göttingen, 141 Seiten
- 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
- Burmester, A, 1970: Formbeständigkeit von Holz gegenüber Feuchtigkeit – Grundlagen und Vergütungsverfahren. BAM-Bericht Nr. 4, 180 Seiten

- Burmester, A. 1973: Einfluss der Wärme-Druck-Behandlung halbtrockenen Holzes auf seine Formstabilität. Holz als Roh- und Werkstoff 31: 237-243
- Burmester, A. 1974: Erfolgreiche Quellungsvergütung mit einfachen Mitteln, Teil1 und 2. Holz- und Kunststoffverarbeitung 9: 534-538 und 610-613
- Buro, A. 1955: Untersuchungen über die Veränderungen der Pilzresistenz von Hölzern durch Hitzebehandlung in Metallschmelzen. Holzforschung 9: 177-181
- Cherubim, M. 1976: Zur Hydrolyse und Formaldehydabspaltung aus Holzspanplatten. Holz als Roh- und Werkstoff 34: 449-452
- Choon; K.K.; Roffael, E. 1990: The acidity of five hardwood species. Holzforschung 44 (1): 53- 58
- Christensen, R.L. 1972: Test for measuring formaldehyde emission from formaldehyde resin bonded particleboards and plywood. Forest Products Journal 22 (4): 17-20
- Denisov, O.B.; Juškov, V.V. 1974: Die Berechnung der Presszeit bei der Herstellung von Spanplatten aus Holz. Holztechnologie 15 (3): 168-172
- 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 52 192 (1979): Prüfen von Holz, Druckversuch quer zur Faserrichtung.
- DIN 52 364 (1965): Prüfung von Holzspanplatten, Bestimmung der Dickenquellung.
- DIN 52 367 (1980): Prüfung von Spanplatten, Bestimmung der Scherfestigkeit parallel zur Plattenebene.
- DIN 53 254 (1980): Prüfen von Holzklebstoffen, Bestimmung der Klebfestigkeit von Längsklebung im Scherversuch.
- 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
- Dunky, M. 1999a: Leime und Holzwerkstoffe.
Habilitationsschrift, Universität für Bodenkultur, Wien, 479 Seiten
- Dunky, M. 1999b: Adhesives for new types and applications of wood-based panels. *Proceedings 2nd European Wood-Based Panel Symposium*, 8.-10. September 1999, Hannover
- Eikmeyer, T 1999: Einfluss der Stapellagerung auf die Eigenschaften von Spanplatten.
Diplomarbeit, Universität Hamburg (unveröffentlicht), 88 Seiten
- EPF 2001: Annual Report 2000-2001, European Panel Federation, 227 Seiten
- Fengel, D. (1966): Über die Veränderung des Holzes und seiner Komponenten im Temperaturbereich bis 200°C – Erste Mitteilung: Heiß- und Kaltwasserextrakte von thermisch behandeltem Fichtenholz. *Holz als Roh- und Werkstoff* 24 (1): 9-14
- Fengel, D. (1966): Über die Veränderung des Holzes und seiner Komponenten im Temperaturbereich bis 200°C – Zweite Mitteilung: Die Hemicellulosen in unbehandeltem und thermisch behandeltem Fichtenholz.
Holz als Roh- und Werkstoff 24 (3): 98-109

- Fengel, D. (1966): Über die Veränderung des Holzes und seiner Komponenten im Temperaturbereich bis 200°C – Dritte Mitteilung: Thermisch und mechanisch bedingte Strukturänderungen bei Fichtenholz. Holz als Roh- und Werkstoff 24 (11): 529-536
- 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
- Greubel, D.; Wissing, S. 1995: Zerstörungsfreie Messung des Biege-E-Moduls und Schubmoduls von Spanplatten durch Biegeschwingungen. Holz als Roh- und Werkstoff 53: 29-37
- Gressel, P. 1971: Untersuchung über das Zeitstandbiegeverhalten von Holzwerkstoffen in Abhängigkeit von Klima und Belastung. Dissertation Universität Hamburg, 218 Seiten
- Gressel, P. 1975: Eignung der Blockscher-Prüfmethode zur Beurteilung der Verleimungsqualität von Spanplatten. Holz als Roh- und Werkstoff 33: 393-398
- 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
- Haas, G.v.; Frühwald, A. 1999: Einfluss der Temperatur auf die Geschwindigkeit der sorptiven Wasseraufnahme von Furnieren. Holz als Roh- und Werkstoff 57 (1): 77-78
- Hearmon, R.F.S. 1966: Vibration testing of wood. Forest Products Journal 8: 29-40
- 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
- Jahic, J.; Thole, V. 1996: Spannungsrelaxation und Querkzugfestigkeit bei Spanplatten. WKI-Kurzbericht Nr. 26/1996
- Jämsä, S.; Viitaniemi, P. 2000: Heat treatment of wood – better durability without chemicals. Nordic Wood Seminar om varmebehandlet tre, Lorenskog, 22.11.2000, 59-63
- Janßen, A. 2001: Wirtschaftlich-technologische Analyse der MDF-Produktion und Ausblick auf andere Holzwerkstoffe. Dissertation Universität Hamburg, 294 Seiten

- Kehr, E.; Grabitzki, K.-H. 1965: Untersuchungen zur Konditionierung von Spanplatten.
Holztechnologie 6 (2): 81-87
- Kelly, M.W.; Rials, T.G.; Glasser, W.G. 1987: Relaxation behavior of the amorphous components
of wood. Journal of Material Science 22 (6): 617-624
- Keylwerth, R.; Noack, D. 1964: Die Kammertrocknung von Schnittholz – Betriebsblatt 1
Holz als Roh- und Werkstoff 22: 29-36
- Keylwerth, R. 1958: Zur Mechanik der mehrschichtigen Spanplatte.
Holz als Roh- und Werkstoff 16: 419-430
- Keylwerth, R.; Höfer, W. 1962: Rheologische Untersuchungen an Leimfugen bei
Querzugbelastung. Holz als Roh- und Werkstoff 20 (3): 91-105
- Kiosseff, H. 1971: Einfluss der Konditionierungsdauer auf die Festigkeit der Spanplatten und
deren Abkühlungsgeschwindigkeit nach dem Pressvorgang.
Holzindustrie (11): 341-342
- Kiosseff, H. 1973: Bestimmung der wärmephysikalischen Eigenschaften von Spanplatten.
Holzindustrie (6): 183-184
- Kiosseff, H. 1974: Technische Neuerungen - Konditionierungskammern für Spanplatten.
Holzindustrie (5): 144
- Kiosseff, H. 1975: Über die optimalen Konditionierungsbedingungen von Spanplatten.
Holztechnologie (10): 315-316
- Koch, G.; Bauch, J.; Puls, J.; Schwab, E.; Welling, J. 2000: Vorbeugung gegen Verfärbung von
Rotbuche. Holz-Zentralblatt 6: 74-75
- Kollmann, F. 1982: Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe.
Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag, 1048 Seiten
- Kollmann, F.; Keylwerth, R.; Kübler, H. 1951: Verfärbungen des Vollholzes und der Furniere bei
der künstlichen Holz Trocknung. Holz als Roh- und Werkstoff 9 (10): 382-391
- Kollmann, F.; Krech, H. 1960: Dynamische Messung der elastischen Holzeigenschaften und der
Dämpfung, ein Beitrag zur zerstörungsfreien Werkstoffprüfung.
Holz als Roh- und Werkstoff 18 (2): 41-54
- Kollmann, F.; Malmquist, L. 1956: Über die Wärmeleitfähigkeit von Holz und Holzwerkstoffen.
Holz als Roh- und Werkstoff 14 (6): 17, 202-204

- Kollmann, F.; Schneider, A. 1963: Über das Sorptionsverhalten wärmebehandelter Hölzer.
Holz als Roh- und Werkstoff 21: 77-85
- Kruse, K. 1993: Untersuchungen verschiedener Einflussgrößen auf die zerstörungsfreie
Werkstoffprüfung von Holzwerkstoffen mittels Ultraschall.
Diplomarbeit Universität Hamburg (unveröffentlicht)
- 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
- Kühlmann, G. 1960: Untersuchungen der thermischen Eigenschaften von Hölzern und
Spanplatten in Abhängigkeit von Feuchtigkeit und Temperatur im hygroskopischen
Bereich. Dissertation Universität München, 193 Seiten
- Kürschner, K.; Melcerová, A. 1965: Über die chemische Veränderung des Buchenholzes bei
thermischer Behandlung Teil 1: Chemische Veränderung von Sägespänen bei
1-28 tägiger Erhitzung auf 80-160°C. Holzforschung 19: 161-171
- Kufner, M. 1975: Die Prüfung der Bindefestigkeit von Spanplatten.
Holz Roh- Werkstoff 33: 265-270
- Lambert, K.; Pungs, L. 1978: Modelluntersuchungen über die Nachhärtung
phenolharzgebundener Holzspanplatten in Hochfrequenzfeld.
Holz als Roh- und Werkstoff 36: 299-304
- Leithoff, H; Peek, R.-D. 1998: Hitzebehandlung – eine Alternative zum chemischen Holzschutz?
21. Holzschutztagung, 13 Seiten
- 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
- MacLean, J.D. 1941: Thermal conductivity of wood. Heating, Piping and Air Conditioning – The
Magazine of Mechanical System Engine 13: 380-391
- Maloney, T.M. 1993: Modern Particleboard & Dry-Process Fibreboard Manufacturing.
Miller Freeman Inc., San Francisco, 672 Seiten
- Månsson, B.; Roffael, E. 1999: Formaldehydfrei wie gewachsenes Holz: Was bedeutet das?
Holz-Zentralblatt (7): 98-102

- Mantanis, G.I.; Young, R.A.; Rowell, R.M. 1994: Swelling of Wood - Part 2.
Holzforschung 48: 480-490
- Mantanis, G.I.; Young, R.A.; Rowell, R.M. 1995: Swelling of Wood - Part 3.
Holzforschung 49: 239-248
- Martensson, A.; Thelandersson, S. 1990: Effect of moisture and mechanical loading on wooden materials. Wood Science and Technology 24: 247-261
- Marutzky, R.; Roffael, E. 1977: Über die Abspaltung von Formaldehyd bei der thermischen Behandlung von Holzspänen. Holzforschung 31 (1): 8-12
- 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
- Meierhofer, U.A.; Sell, J.; Sommerer, S. 1977: Blockscherprüfung von Holzspanplatten zur Ermittlung der Güte des Spanverbundes. Holzforschung und -verwendung 29: 6-8
- Netz, H. 1991: Handbuch Wärme. Gräfeling: Resch Verlag KG
- Neußer, H.; Schall, W. 1970: Versuche zur Erfassung von Hydrolyseerscheinungen in Spanplatten. Holzforschung und Holzverwertung 22 (6): 116-120
- Niemz, P. 1982: Untersuchung zum Einfluss der Struktur auf die Eigenschaften von Spanplatten, Teil 1: Einfluss von Partikelformat, Rohdichte, Festharzanteil und Festparaffinanteil. Holztechnologie 23: 206-213
- Noack, D.; Schwab, E. 1972: Die Scherfestigkeit von Holzspanplatten als Kriterium des Spanverbundes. Holz als Roh- und Werkstoff 30: 440-444
- Nusselder, J.J.H.; Aarts, V.M.L.J.; Brandts, P.M.; Mattheij, J. 1998: Cocondensation of melamine, urea and formaldehyde: Fact of fantasy?. Proceedings of the second Panel Products Symposium, Llandudno, Wales, UK: 224-232
- Ohlmeyer, M. 1997: Änderung physikalisch-technologischer Eigenschaften abkühlender Holzwerkstoffplatten. Diplomarbeit Universität Hamburg (unveröffentlicht), 105 Seiten

- Oldörp, K.; Marutzky, R. 1998: Untersuchungen an Spanplatten mit harnstoffmodifizierten PF-Harzen. Holz als Roh- und Werkstoff 56: 75-77
- 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. 1967: Versuche über die Formaldehyd-Abspaltung aus Spanplatten, 2. Mitteilung: Einfluss von Presszeit und Presstemperatur auf die Formaldehyd-Abspaltung. Holz als Roh- und Werkstoff 25 (2): 63-68
- Plath, L. 1967: Versuche über die Formaldehyd-Abspaltung aus Spanplatten, 3. Mitteilung: Einfluss der Härter-Zusammensetzung auf die Formaldehyd-Abspaltung. Holz als Roh- und Werkstoff 25 (5): 169-173
- Plath, L. 1967: Versuche über die Formaldehyd-Abspaltung aus Spanplatten, 4. Mitteilung: Einfluss der Feuchtigkeit im Spanvlies auf die Formaldehyd-Abspaltung. Holz als Roh- und Werkstoff 25 (6): 231-238
- Plath, L. 1968: Versuche über die Formaldehyd-Abspaltung aus Spanplatten, 5. Mitteilung: Einfluss der Härtungsbeschleunigung 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
- Rochet, B. 2000: Influence de la qualité des panneaux de MDF lors de la mise en pile. Diplomarbeit an der ENSTIB, Université Henri Poincaré Nancy (unveröffentlicht)
- Römpf 1995: Chemie-Lexikon auf CD-ROM. Stuttgart, New York: Thieme
- Roffael, E. 1973: Zur Verminderung der Formaldehydabgabe von Spanplatten. Holz-Zentralblatt 99: 845
- Roffael, E.; Rauch, W. 1973: Einfluss von Temperatur und thermischer Nachbehandlung auf einige physikalische Eigenschaften von diisocyanatgebundenen Spanplatten. Holz als Roh- und Werkstoff 31 (10): 402-405

- Roffael, E.; Rauch, W. and Schaller, K. 1973a: Zur Fertigung von Phenolharz-Spanplatten – Teil 2: Über Ablauf und Wirkung der thermischen Nachbehandlung bei Platte mit hoher Dichte. Holz-Zentralblatt 93 (73): 1429-1431
- Roffael, E.; Rauch, W. and Schaller, K. 1973b: Zur Fertigung von Phenolharz-Spanplatten – Teil 3: Über Ablauf und Wirkung der thermischen Nachbehandlung bei Platte mit mittleren und niedrigeren Rohdichten. Holz-Zentralblatt 99 (73): 1500-1501
- Roffael, E. 1978: Einfluss der Lagerung von harnstoff-formaldehydharzgebundenen Spanplatten auf ihre Formaldehydabgabe. Adhäsion: 180-182
- Roffael, E.; Schneider, A. 1980: Zum Sorptionsverhalten von Holzspanplatten, Teil 3: Untersuchungen an mit Phenolformaldehydharzen gebundenen Spanplatten. Holz als Roh- und Werkstoff 38: 151-155
- 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. 1989: Abgabe von flüchtigen organischen Säuren aus Holzspänen und Holzspanplatten. Holz als Roh- und Werkstoff 47: 447- 452
- 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
- Roffael E.; Lelis, R. und Dix B. 1994: Wechselwirkungen zwischen den Inhaltsstoffen des Holzes und dem Formaldehyd bei der Herstellung von Holzwerkstoffen. Holz-Zentralblatt 120 (108): 1705-1706
- Roll, H.; Barbu, M.; Beck, P.; Hoepner, D.; Kaiser, U.; Lerach, K. 2001: Continuous hot press with cooling section for MDF. Proceedings of the fifth Panel Products Symposium, Llandudno, Wales, UK: 61-72
- Roux, J.L.; Gilles, F. 1971: Hydrolyse in Spanplatten. FESYP-Bericht: 105-114
- Runkel, R.O.H. 1951: Zur Kenntnis des thermoplastischen Verhaltens von Holz. 1. Mitteilung. Holz als Roh- und Werkstoff 9 (2): 41-53
- Runkel, R.O.H. und Wilke, K.-D. 1951: Zur Kenntnis des thermoplastischen Verhaltens von Holz. 2. Mitteilung. Holz als Roh- und Werkstoff 9 (7): 260-270

- Runkel, R.O.H.; Lüthgens, M. 1956: Studien über die Sorption der Holzfasern – Zweite Mitteilung: Untersuchungen über die Heterogenität der Wassersorption der chemischen und morphologischen Komponenten verholzter Zellwände.
Holz als Roh- und Werkstoff 14: 424-441
- Sandermann, W.; Rothkamm, M. 1959: Bestimmung der pH-Werte von Handelshölzern.
Holz als Roh- und Werkstoff 17 (11): 433-440
- Schäfer, M. 1996: Einfluss der Lagerbedingungen von Fichten- und Kiefern-Industrierestholz aus der Profilerspannung auf die Eigenschaften von Spanplatten und mitteldichte Faserplatten (MDF). Dissertation Universität Göttingen, 273 Seiten
- Schäfer, M; Roffael, E. 2000: On the formaldehyde release of wood.
Holz als Roh- und Werkstoff 58: 259-264
- Schmid, E.W. 1976: Temperatenausgleich in feuchten porösen Stoffen, insbesondere in Holz.
Holzforschung 30 (3): 86-90
- Schneider, A. 1971: Untersuchungen über den Einfluss von Wärmebehandlung im Temperaturbereich von 100 bis 200°C auf Elastizitätsmodul, Druckfestigkeit und Bruchschlagarbeit von Kiefern-Splint- und Buchenholz.
Holz als Roh- und Werkstoff 29 (11): 431-440
- Schulte, M. 1997: Zerstörungsfreie Prüfung elastomechanischer Eigenschaften von Holzwerkstoffplatten durch Auswertung des Eigenschwingverhaltens und Vergleich mit zerstörenden, statischen Prüfmethode. Dissertation, Universität Hamburg; 265 Seiten
- 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 Beileimungsfaktoren der Deckschicht.
Diplomarbeit Berufsakademie Mosbach
- Shukow, W. P.; Michailow, N. A. 1971: Die Abkühlung der Spanplatten nach dem Pressvorgang [russ. Original]. Derevoobr. Prom. 6: 3-4
- 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
- Skaar, C. 1988: Wood-Water Relations. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York, 283 Seiten
- 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
- Tjeerdsma, B.F.; Boonstra, M.; Pizzi, A.; Tekely, P.; Militz, H. 1998: Characterisation of thermally modified wood: molecular reasons for wood performance improvement. Holz als Roh- und Werkstoff 56: 149-153
- Troughton, G.E; Chow, S. 1975: . Effect of fortifier addition on the curing reactions of urea-formaldehyde adhesives. Holzforschung 29: 214-247
- Vermaas, H.F. 1978: Humidity – a review of the fundamental concepts pertinent of the drying of timber. Wood South Africa: 11-16
- Syrjänen, T.; Jämsä, S.; Viitaniemi, P. 2000: Heat treatment of wood in Finland – State of the art report. Nordic Wood Seminar om varmbehandlet tre, 22.11.2000 in Lørenskog: 51-63
- Vogt, J. J. 1986: Longitudinal stress waves as predictors of internal bond strength. Proceedings, 20th International Particleboard Symposium: 385-402
- Wegner, G.; Fengel, D. (1988): Zum Stand der chemischen und mikroskopischen Untersuchung an trocknungsverfärbtem Eichenschnittholz. Holz-Zentralblatt 114: 2238-2241
- Wissing, S. 1993: Software zur Ausgabe von Rohdichteprofilen. Universität Hamburg (unveröffentlicht)
- Wittmann, O. 1962: Die nachträgliche Formaldehydabspaltung bei Spanplatten. Holz als Roh- und Werkstoff 20 (6): 221-224
- Zhao, C.; Pizzi, A. 2000: Hot postcuring improvement of MUF-bonded particleboards and its temperature forecasting model. Holz als Roh- und Werkstoff 58: 307-308
- Zmijewski, K. 1964: Einfluss der Temperatur auf die mechanischen Eigenschaften von Spanplatten [polnisches Original]. Przemysl Drzewny 15 (7): 16-17

13 Anhang

13.1 Verteilung des Pressdruckes in Spanplatten

Um den Pressdruck in der Leimfuge innerhalb der Spanstruktur während des Verpressens in einer Spanplatte überschlägig abschätzen zu können, wurde der Anteil an Fehlstellen in der Mittelschicht ermittelt. Dazu wurden Spanplattenproben mit einer mittleren Dichte von etwa 650 kg/m^3 parallel zur Plattenebene in der Mittelschicht mit Hilfe eines Mikrotommessers aufgetrennt. Diese Fläche wurde mit einem Oberflächenrauheitsmessgerät analysiert. Es wurde dabei der Traganteil bestimmt. Der Traganteil einer Oberfläche bezeichnet den prozentualen Anteil einer rauen Oberfläche, der bei einem Schnitt des 3D-Profiles in der Höhe z unterhalb dieser Höhe liegt.

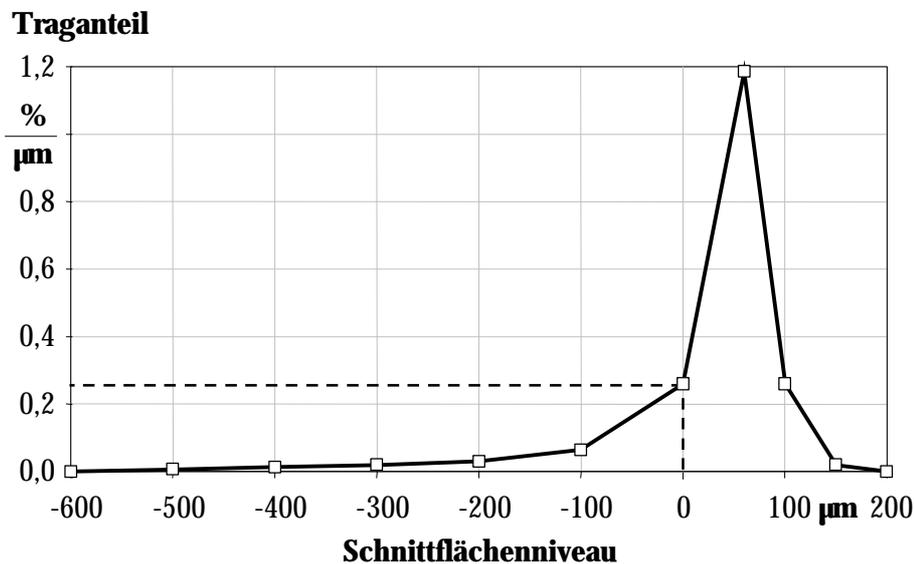


Abbildung 164: Exemplarische Darstellung der Traganteile des Schnittflächenniveaus in der Mitte einer Spanplatte.

In Abbildung 164 sind exemplarisch die Traganteile des Schnittflächenniveaus einer Spanplattenmittelschicht aufgetragen. Es wird ersichtlich, dass der Traganteil bei etwa 25% liegt. Es lässt sich ableiten, dass parallel zur Oberfläche die Mittelschicht einer Möbelspanplatte mit einer mittleren Dichte von 650 kg/m^3 zu etwa 25% aus Fehlstellen bzw. Hohlräumen besteht.

Der Pressdruck in der Leimfuge beträgt also $4/3$ des äußeren Druckes, der auf die Platte aufgebracht wird. Das bedeutet, dass aus einem maximalen spezifischen Pressdruck von 4 N/mm^2 , der üblicherweise äußerlich während des Verpressens auf die Matte aufgebracht wird, ein Pressdruck von $5,3 \text{ N/mm}^2$ in der Leimfuge resultiert.

13.2 Daten

13.2.1 Gelierzeiten

Methodik: Der entsprechende Leim wurde mit dem Härter versetzt. Die Leimflotte wurde durch Zugabe von Wasser für alle Ansätze auf einen Trockengehalt von 60% eingestellt. Die Geltzeit wurde an einer Menge der Leimflotte von 5g in einem dünnwandigem Reagenzglas, das in ein auf 60°C, 80°C oder 100°C temperiertem Wasserbad getaucht wurde, manuell ermittelt.

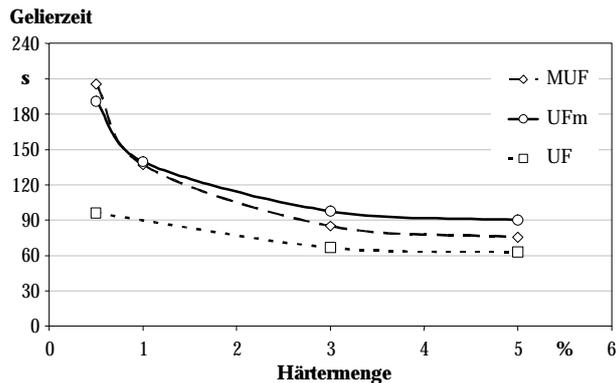


Abbildung 165: Gelierzeiten für verschiedene Aminoplast-Harze in Abhängigkeit von der Härteremenge (Ammoniumnitrat).

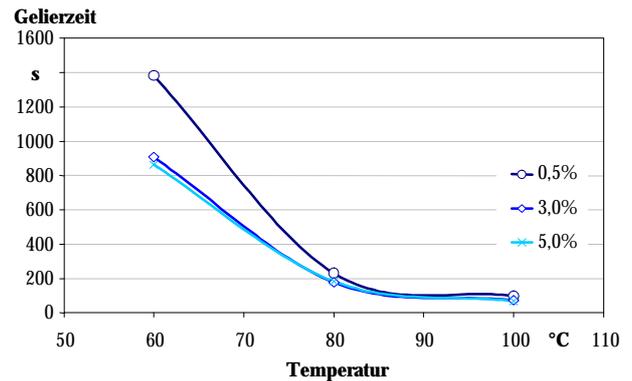


Abbildung 166: Gelierzeiten eines reinen UF-Harzes mit verschiedenen Härtermengen in Abhängigkeit von der Temperatur.

13.2.2 Wasserlöslichkeit von Aminoplast-Harzen

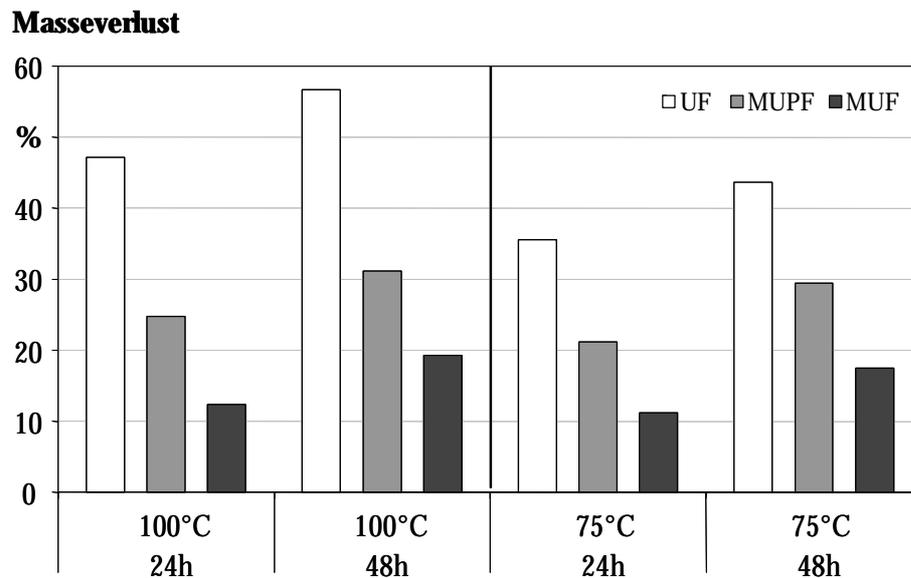


Abbildung 167: Masseabnahme nach Wasserlagerung für verschieden ausgehärtete Aminoplast-Harze in Abhängigkeit von der Dauer und der Temperatur.

13.2.3 Nachreifung

Tabelle 43: Eigenschaften der untersuchten Span- und Faserplatten 24 Stunden nach dem Verpressen bzw. nach Klimatisierung.

Platte	Typ	Dichte	Feuchte		Scherf.	QZ	MOR	MOE	MOE _{dyn.}	Schall _{be.los}	Schall _{berühr.}
		20/65	20/65		24 Std	20/65	20/65	20/65	24 Std	24 Std	24 Std
		kg/m ³	DS	MS	N/mm ²	m/s	m/s				
38/1	UF	617	7,5	9,0	1,22	0,36	11,5	2209	2377	492	523
38/2	UF	607	7,4	9,0	1,37	0,38	12,3	2303	2386	544	546
38/3	UF	609	7,4	8,9	1,23	0,36	12,2	2190	2248	502	528
35/1	UF	629	7,8	9,3	1,78	0,48	13,6	3097	2756	564	n.g.
28/1	UF	638	7,4	9,0	1,29	0,40	13,7	2549	2856	513	530
22/1	UF	657	7,7	8,9	1,79	0,50	15,4	2642	3048	533	549
22/2	UF	671	7,8	9,3	1,92	0,52	16,1	2757	3331	566	569
22/3	UF	658	n.g.	n.g.	1,65	0,48	16,0	2677	3012	537	571
16/1	UF	649	7,9	9,1	1,81	0,51	16,9	2786	3002	571	665
16/2	UF	672	8,0	9,2	1,96	0,54	15,8	2605	3308	528	570
16/3	UF	668	7,8	8,9	1,63	0,48	14,7	2668	3281	573	624
12/1	UF	722	7,7	8,8	2,00	0,55	19,0	2925	3220	588	621
12/2	UF	711	7,7	8,8	2,12	0,54	19,7	3173	3272	614	600
38/4	MUF	612	8,1	9,3	1,66	0,52	14,6	2510	2623	549	620
22/4	PF	640	n.g.	n.g.	n.g.	n.g.	n.g.	n.g.	2701	624	693
19/1	PF	750	8,5	10,3	2,99	0,77	20,9	3045	3482	698	744
24 Std											
5/1	HDF	893	6,8	7,0	n.g.	1,28	54,6	4398	6069	1561	1491
5/2	HDF	906	6,1	7,5	n.g.	1,66	58,3	4560	6231	1378	1491
7/1	HDF	878	n.g.	n.g.	n.g.	1,48	61,8	5234	5821	1425	1278
12/1	MDF	710	6,9	7,7	n.g.	0,74	31,3	2615	4595	906	1016
12/2	MDF	741	6,9	7,9	n.g.	0,70	32,1	2537	4406	824	977
12/3	MDF	738	6,9	7,9	n.g.	0,70	32,2	2631	4430	850	908
16/1	MDF	736	6,9	8,4	n.g.	0,70	36,5	3148	4380	898	840
16/2	MDF	726	6,9	8,1	n.g.	0,71	34,5	3091	4132	862	824
16/3	MDF	752	6,9	7,8	n.g.	0,68	n.g.	n.g.	4385	871	880
22/1	MDF	743	6,9	7,6	n.g.	0,81	36,9	3107	4415	794	840
22/2	MDF	742	6,9	7,7	n.g.	0,79	36,8	3130	4456	792	796

13.2.4 Stapellagerung

13.2.4.1 Siebfractionen des eingesetzten Spanmaterials

Zur Charakterisierung der Späne zur Herstellung der Laborspanplatten wurde eine Siebfractionierung für das Deck- und Mittelschichtmaterial durchgeführt. Die dargestellten Ergebnisse sind Mittelwerte aus drei Messungen. Dabei wurde eine charakteristische Häufigkeitsverteilung festgestellt (Abbildung 168).

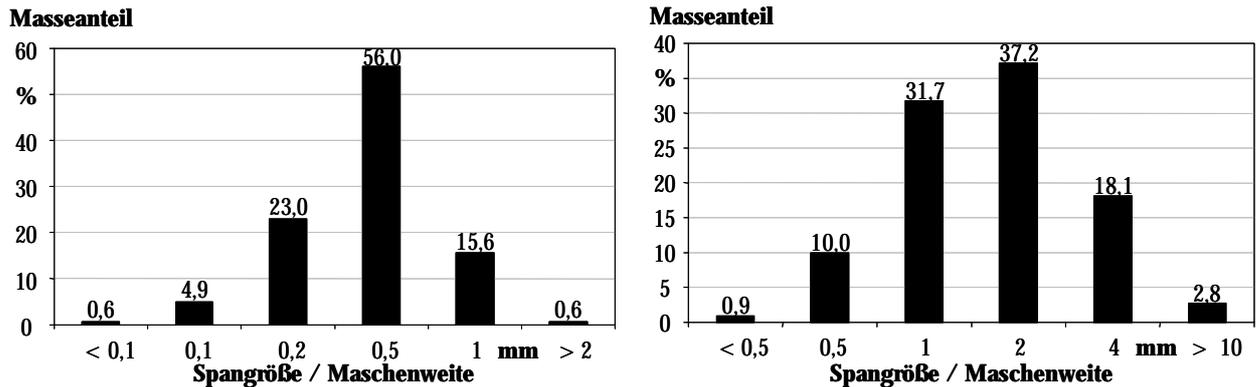


Abbildung 168: Siebfractionen des verwendeten Spanmaterials.
links: Deckschichtspäne rechts: Mittelschichtspäne

13.2.4.2 Pressdiagramm

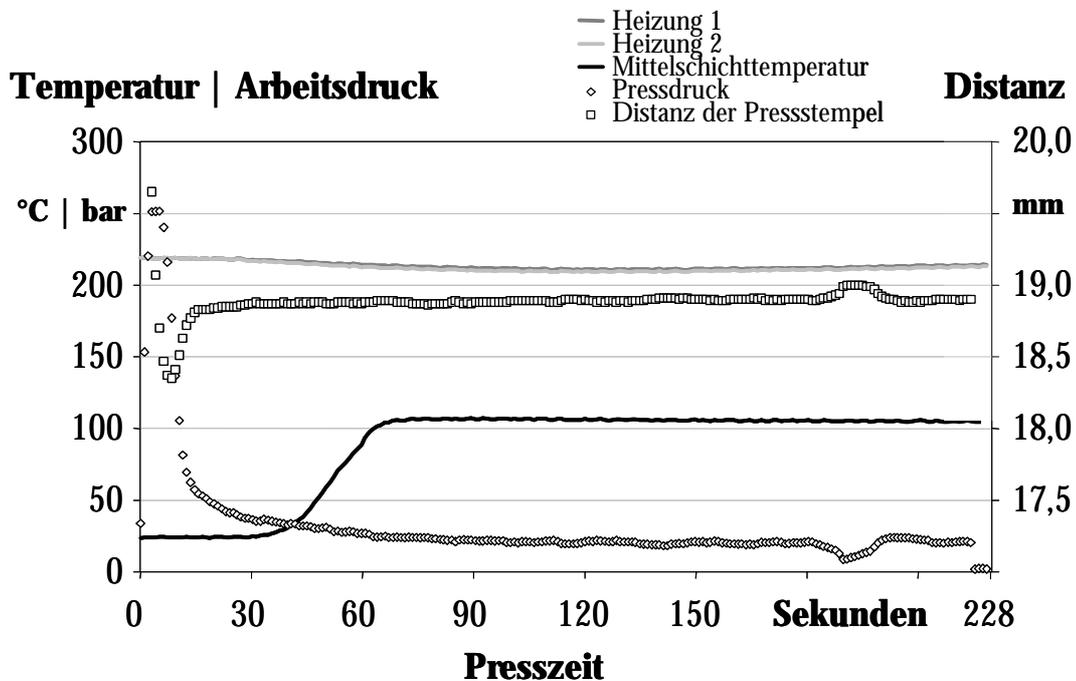


Abbildung 169: Pressdiagramm einer UF-verleimten Laborspanplatte.
Plattendicke: 19 mm; DS-Feuchte: 14%; Presszeitfaktor: 12 s/mm

13.2.4.3 Ergebnisse

Tabelle 44: Eigenschaftswerte der Laborspanplatten vor der Stapellagerung; Mittelwerte der Platten mit gleichen Parametern.

Leim- typ	Härter- menge %	DS- Feuchte %	Press- zeit s/mm	QZ	Dichte	Q	Ab	FA
				N/mm ² n=10	kg/m ³ n=10	% n=6	% n=6	mg/100g n=4
Standard	0,5	10	9	0,44	669	23,4	1,06	5,2
Standard	0,5	10	12	0,40	663	23,0	1,16	7,1
Standard	0,5	14	9	0,29	639	20,3	1,02	7,1
Standard	0,5	14	12	0,36	644	21,5	0,97	7,3
Standard	0,5	18	9	0,21	620	19,3	0,90	8,0
Standard	0,5	18	12	0,39	658	20,4	1,05	4,7
Standard	1,5	10	9	0,46	670	21,7	1,12	4,4
Standard	1,5	10	12	0,57	688	21,4	1,15	4,9
Standard	1,5	14	9	0,40	663	21,8	1,07	4,7
Standard	1,5	14	12	0,38	645	20,5	0,92	7,4
Standard	1,5	18	9	0,39	661	19,3	1,03	7,2
Standard	1,5	18	12	0,50	673	18,5	1,17	6,8
Standard	3	10	9	0,47	660	24,0	1,26	
Standard	3	10	12	0,50	671	22,8	1,14	
Standard	3	18	9	0,39	665	18,9	1,04	
Standard	3	18	12	0,52	654	22,2	1,07	
Versuch	0,5	10	9	0,10	620	32,6	0,73	4,5
Versuch	0,5	10	12	0,30	669	35,0	0,82	4,5
Versuch	0,5	14	9	0,13	639	31,5	0,76	5,1
Versuch	0,5	14	12	0,17	642	34,3	0,77	4,7
Versuch	0,5	18	9	0,18	661	29,9	0,87	4,7
Versuch	0,5	18	12	0,22	672	33,2	0,86	4,5
Versuch	1,5	10	9	0,25	662	32,3	0,89	4,0
Versuch	1,5	10	12	0,30	658	33,6	0,82	3,7
Versuch	1,5	14	9	0,24	642	31,7	0,82	4,2
Versuch	1,5	14	12	0,30	682	34,7	0,87	3,9
Versuch	1,5	18	9	0,17	659	28,2	0,81	4,6
Versuch	1,5	18	12	0,30	656	31,3	0,74	4,0
Versuch	3	10	7	0,18	637	31,7	0,75	
Versuch	3	10	12	0,33	665	37,5	0,77	
Versuch	3	18	7	0,22	658	31,5	0,79	
Versuch	3	18	12	0,26	663	35,7	0,75	

14 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Produktion von Holzwerkstoffplatten in Europa (nach EPF 2001).	1
Abbildung 2: Änderung der Temperatur der Mittelschicht nach dem Heißpressen von Spanplatten unterschiedlicher Dichte (Kruse 1997).....	7
Abbildung 3: Variation der beobachteten Feuchte einer 20 mm dicken Laborplatte (650 kg/m ³).	9
Abbildung 4: Berechneter Verlauf der Materialfeuchte nach dem Pressen während der Abkühlung (Greubel 1989).....	10
Abbildung 5: Entwicklung der Querkzugfestigkeit von harnstoffharzgebundenen Holzspanplatten und Perliteplatten bei unterschiedlichen Temperaturen und Feuchten (Ginzel 1973).....	16
Abbildung 6: Abnahme der Querkzugfestigkeit während mehrtägiger Stapellagerung in Abhängigkeit von der Temperatur und der Feuchte (nach Robitschek und Christensen 1976).	17
Abbildung 7: Abnahme der Querkzugfestigkeit während mehrwöchiger Stapellagerung in Abhängigkeit von der Härtermenge (nach Robitschek und Christensen 1976).....	17
Abbildung 8: Messpunkte der zerstörungsfreien Prüfungen.....	28
Abbildung 9: Schnittplan der zerstörenden Prüfung (hier am Beispiel einer 19 mm Platte).	28
Abbildung 10: Messplatzeinrichtung für zerstörungsfreie Prüfungen (nach Kruse 1997).	32
Abbildung 11: Änderung der Mittelschicht- und Oberflächtemperatur (oben und unten) einer 35 mm Spanplatte bei freier Ausföhlung; Umgebungstemperatur: ca. 28°C.....	34
Abbildung 12: Änderung der Mittelschichttemperatur einzelner industriell gefertigter Spanplatten mit unterschiedlicher Nenndicke und Leimtyp; Lagerung horizontal.....	35
Abbildung 13: Änderung der Deck- und Mittelschichtfeuchte UF-verleimter Spanplatten.	36
Abbildung 14: Änderung der Deck- und Mittelschichtfeuchte PF sowie MUF-verleimter Spanplatten.	36
Abbildung 15: Feuchtedifferenz zwischen Deck- und Mittelschicht verschiedener Plattentypen zu unterschiedlichen Zeitpunkten nach dem Heißpressen.....	37
Abbildung 16: Änderung der Dicke nach dem Heißpressen – exemplarische Darstellung für UF und PF-verleimte Platten mit einer Nenndicke von 22 mm.	37
Abbildung 17: Schallgeschwindigkeit (berührungslos, absolut) von Spanplatten während der Abkühlung.	39
Abbildung 18: Schallgeschwindigkeit (berührungslos, relativ) von Spanplatten latten während der Abkühlung.....	39
Abbildung 19: Zusammenhang zwischen Temperatur und Schallgeschwindigkeit (berührungslos, relativ) abkühlender Spanplatten mit unterschiedlichem Leimtyp.....	39
Abbildung 20: Änderung der Scherfestigkeit während der Abkühlung nach dem Verlassen der Heißpresse.	42
Abbildung 21: Zusammenhang zwischen Scherfestigkeit (relativ) und Temperatur.....	43
Abbildung 22: Zusammenhang zwischen der Scher- und der Querkzugfestigkeit nach Klimatisierung.	44
Abbildung 23: Änderung des statisch ermittelten Biege-Elastizitätsmoduls (links) und der Biegefestigkeit (rechts) ausgewählter Spanplatten während der Abkühlung nach dem Heißpressen. (absolute Werte).	46
Abbildung 24: Änderung des statisch ermittelten Biege-Elastizitätsmoduls (links) und der Biegefestigkeit (rechts) ausgewählter Spanplatten während der Abkühlung nach dem Heißpressen. (relative Werte).....	46
Abbildung 25: Änderung des dynamisch ermittelten Biege-Elastizitätsmoduls (links: absolut, rechts: relativ) ausgewählter Spanplatten während der Abkühlung nach dem Heißpressen.	46
Abbildung 26: Zusammenhang zwischen Temperatur und Biegeeigenschaft (relativ) abkühlender Spanplatten.....	48

Abbildung 27: Änderung der Mittelschichttemperatur industriell hergestellter Faserplatten mit unterschiedlicher Dicke.	49
Abbildung 28: Änderung der Gesamtfeuchte von MDF.....	50
Abbildung 29: Änderung der Dicke nach dem Heißpressen – exemplarische Darstellung für eine MDF mit einer Nenndicke von 12 mm.	51
Abbildung 30: Schallgeschwindigkeit (berührend, absolut) von Faserplatten während der Abkühlung.....	52
Abbildung 31: Schallgeschwindigkeit (berührend, relativ) von Faserplatten während der Abkühlung.....	52
Abbildung 32: Zusammenhang zwischen Temperatur und Schallgeschwindigkeit (berührungslos, relativ) abkühlender Faserplatten unterschiedlicher Dicke.	53
Abbildung 33: Zusammenhang zwischen Temperatur und Schallgeschwindigkeit (berührend, relativ) abkühlender Faserplatten unterschiedlicher Dicke.	53
Abbildung 34: Änderung des dynamisch ermittelten Biege-Elastizitätsmoduls von Faserplatten während der Abkühlung nach dem Heißpressen.	54
Abbildung 35: Änderung des dynamisch ermittelten Biege-Elastizitätsmoduls (relativ) von Faserplatten während der Abkühlung nach dem Heißpressen.	54
Abbildung 36: Änderung des statisch ermittelten Biege-Elastizitätsmoduls von Faserplatten während der Abkühlung nach dem Heißpressen.	54
Abbildung 37: Änderung der Biegefestigkeit von Faserplatten während der Abkühlung nach dem Heißpressen.	54
Abbildung 38: Zusammenhang zwischen Oberflächentemperatur und Biegeeigenschaft (relativ) abkühlender Faserplatten.	55
Abbildung 39: Änderung der Querkzugfestigkeit nach dem Verlassen der Heißpresse.....	56
Abbildung 40: Zusammenhang zwischen Querkzugfestigkeit (rel.) und Mittelschichttemperatur.....	56
Abbildung 41: Zusammenhang zwischen dem Flächengewicht und der Dauer bis zur vollständigen Auskühlung.....	57
Abbildung 42: Abmessung und Aufbau der Plattenstapel.....	63
Abbildung 43: Temperaturänderung während der Stapellagerung der UF-Platten bei normaler und hoher Einstapeltemperatur.....	64
Abbildung 44: Änderung der Feuchte von UF-Platten während der Lagerung.....	65
Abbildung 45: Änderung der Plattentemperatur im Industriestapel und im simulierten Stapel.	66
Abbildung 46: Entwicklung der Platteneigenschaften im Industriestapel und in der Apparatur.....	67
Abbildung 47: Abnahme der Querkzugfestigkeit bei einer Lagertemperatur von 90°C.....	68
Abbildung 48: Gleichgewichtsfeuchte von Kiefern-Splintholz bei 20°C und 65% relativer Luftfeuchte nach Exposition von Feuchte und Temperatur über 72 Stunden.	74
Abbildung 49: Änderung der Gleichgewichtsfeuchte bei 20°C und 65% relative Luftfeuchte während der Lagerung.	74
Abbildung 50: Änderung des pH-Wertes (links) und der Pufferkapazität (rechts) für verschiedene Holzarten während der Lagerung über 168 Stunden, Mittelwerte aus allen Messreihen.....	75
Abbildung 51: Änderung des pH-Wertes (links) und der Pufferkapazität (rechts) für Kiefer unter verschiedenen Temperaturbedingungen während der Lagerung über 168 Stunden.	76
Abbildung 52: Änderung des pH-Wertes (links) und der Pufferkapazität (rechts) für Buche unter verschiedenen Temperaturbedingungen während der Lagerung über 168 Stunden.	76
Abbildung 53: Änderung des pH-Wertes (links) und der Pufferkapazität (rechts) für Kiefer unter verschiedenen Temperaturbedingungen während der Lagerung über 168 Stunden.	77
Abbildung 54: Änderung der Formaldehydemission (Flaschenmethode) des reinen Holzes während der Lagerung bei 80°C und 100°C bis 72 Stunden (Holzart: Kiefer).	78

Abbildung 55: Einrichtung zum Leimauftrag.....	81
Abbildung 56: Verklebte Furnierstreifen.....	82
Abbildung 57: Änderung der Scherfestigkeit von UF-verklebten Furnierstreifen während der Lagerung bei verschiedenen Temperaturen.....	84
Abbildung 58: Änderung der Scherfestigkeit nach 2-stündiger Wasserlagerung von UF-verklebten Furnierstreifen während der Lagerung bei verschiedenen Temperaturen.....	84
Abbildung 59: Änderung der Scherfestigkeit von UF-verklebten Furnierstreifen während der Lagerung bei verschiedenen Temperaturen und Presszeiten.....	85
Abbildung 60: Änderung der Scherfestigkeit von UF-verklebten Furnierstreifen bei verschiedenen Temperaturen und Feuchten während der Lagerung.....	85
Abbildung 61: Änderung der Scherfestigkeit von UF-verklebten Furnierstreifen während der Lagerung bei verschiedenen Temperaturen und Härtereinsatzmengen.....	86
Abbildung 62: Änderung der Scherfestigkeit von UF-verklebten Furnierstreifen während der Lagerung bei verschiedenen Press- und Lagertemperaturen.....	86
Abbildung 63: Änderung der Formaldehydemission (Flaschenmethode) von UF-verklebten Furnierstreifen während der Lagerung über 72 Stunden; Mittelwerte aus allen Messreihen.....	89
Abbildung 64: Änderung der Formaldehydemission von UF-verklebten Furnierstreifen während der Lagerung über 72 Stunden bei verschiedenen Lagertemperaturen und Presszeiten.....	90
Abbildung 65: Änderung der Formaldehydemission von UF-verklebten Furnierstreifen während der Lagerung über 72 Stunden bei verschiedenen Lager- und Presstemperaturen.....	91
Abbildung 66: Änderung der Formaldehydemission von UF-verklebten Furnierstreifen während der Lagerung über 72 Stunden bei verschiedenen Lagertemperaturen und -Feuchten.....	91
Abbildung 67: Änderung der Scherfestigkeit von UFM verklebten Furnierstreifen während der Lagerung bei verschiedenen Temperaturen.....	93
Abbildung 68: Änderung der Scherfestigkeit nach 2-stündiger von UFM verklebten Furnierstreifen während der Lagerung bei verschiedenen Temperaturen.....	93
Abbildung 69: Änderung der Formaldehydemission von UFM-verklebten Furnierstreifen während der Lagerung bei verschiedenen Temperaturen.....	95
Abbildung 70: Änderung der Scherfestigkeit von MUF-verklebten Furnierstreifen während der Lagerung bei verschiedenen Temperaturen.....	96
Abbildung 71: Änderung der Scherfestigkeit nach 2-stündiger Wasserlagerung von MUF-verklebten Furnierstreifen.....	96
Abbildung 72: Änderung der Scherfestigkeit von MUF-verklebten Furnierstreifen bei verschiedenen Lagertemperaturen und Presszeiten.....	96
Abbildung 73: Änderung der Formaldehydemission von MUF-verklebten Furnierstreifen.....	97
Abbildung 74: Aufteilung der Platten mit überstretimem Rand.....	106
Abbildung 75: Temperaturkurve der simulierten Stapellagerung.....	107
Abbildung 76: Schnittplan (links) und Probenbezeichnung (rechts) für UF-Platten.....	109
Abbildung 77: Schnittplan (links) und Probenbezeichnung (rechts) für MUF-, MUPF und PF-Platten.....	110
Abbildung 78: Vergleich der Temperaturen von Labor- und Industriestapeln (Einstapeltemperaturen 60°C und 75°C).....	112
Abbildung 79: Feuchte der UF-Platten in Abhängigkeit von Mattenfeuchte und Presszeitfaktor.....	113
Abbildung 80: Änderung der Feuchte von MUF-Platten (links) und PF-Platten (rechts) während der Lagerung in Abhängigkeit von Presszeitfaktor und Lagertemperatur.....	113
Abbildung 81: Entwicklung der Querkzugfestigkeit für UF-Platten bei 60°C und 75°C Stapellagerung....	114

Abbildung 82: Entwicklung der Querkzugfestigkeit während der Stapellagerung bei 60°C und 75°C für UF-Platten (Versuchsharz) hergestellt mit unterschiedlichen Presszeitfaktoren.	115
Abbildung 83: Entwicklung der Querkzugfestigkeit während der Stapellagerung bei 60°C und 75°C für UF-Platten (Standardharz) hergestellt mit unterschiedlichen Presszeitfaktoren.	115
Abbildung 84: Entwicklung der Querkzugfestigkeit unter optimalen Bedingungen für das Versuchsharz.	117
Abbildung 85: Entwicklung des Formaldehydgehalts für UF-Platten bei 60°C und 75°C Stapellagerung.	120
Abbildung 86: Entwicklung des Formaldehydgehalts für das Versuchsharz während der Stapellagerung bei 60°C und 75°C für verschiedene Presszeitfaktoren.	121
Abbildung 87: Entwicklung des Formaldehydgehalts für das Versuchsharz während der Stapellagerung bei 60°C und 75°C für verschiedene Härtermengen.	121
Abbildung 88: Abnahme der Gleichgewichtsfeuchte bei 20°C und 65% relativer Luftfeuchte für UF-Platten während der Stapellagerung bei 60°C und 75°C.	123
Abbildung 89: Entwicklung der Dickenquellung für UF-Platten bei einer Lagertemperatur von 60°C und 75°C.	124
Abbildung 90: Entwicklung der Dickenquellung für UF-Platten (Versuchsharz) während der Stapellagerung bei 60°C und 75°C für verschiedene Presszeitfaktoren.	125
Abbildung 91: Entwicklung der Dickenquellung für UF-Platten (Versuchsharz) während der Stapellagerung bei 60°C und 75°C für verschiedene DS-Feuchten vor dem Verpressen.	125
Abbildung 92: Entwicklung der Querkzugfestigkeit für MUF-Platten während der Stapellagerung bei 75°C und 100°C.	127
Abbildung 93: Entwicklung der Querkzugfestigkeit für MUPF-Platten während der Stapellagerung bei 75°C und 100°C.	127
Abbildung 94: Entwicklung der Dickenquellung für MUF-Platten während der Stapellagerung bei 75°C und 100°C.	129
Abbildung 95: Entwicklung der Dickenquellung für MUPF-Platten während der Stapellagerung bei 75°C und 100°C.	129
Abbildung 96: Entwicklung der Abhebefestigkeit für MUF-Platten während der Stapellagerung bei 75°C und 100°C.	130
Abbildung 97: Entwicklung der Abhebefestigkeit für MUPF-Platten während der Stapellagerung bei 75°C und 100°C.	130
Abbildung 98: Entwicklung der Formaldehydemission für MUF-Platten bei 75°C und 100°C.	131
Abbildung 99: Entwicklung der Formaldehydemission für MUPF-Platten bei 75°C und 100°C.	131
Abbildung 100: Entwicklung der Gleichgewichtsfeuchte bei 20°C und 65% rel.LF für MUF-Platten während der Stapellagerung bei 75°C und 100°C.	132
Abbildung 101: Entwicklung der Gleichgewichtsfeuchte bei 20°C und 65% rel.LF für MUPF-Platten während der Stapellagerung bei 75°C und 100°C.	132
Abbildung 102: Entwicklung der Querkzugfestigkeit für PF-Platten (unmodifiziert) während der Stapellagerung bei 80°C, 95°C und 110°C.	133
Abbildung 103: Entwicklung der Querkzugfestigkeit für PF-Platten (modifiziert) während der Stapellagerung bei 80°C, 95°C und 110°C.	133
Abbildung 104: Entwicklung der Querkzugfestigkeit für PF-Platten (unmodifiziert) während der Stapellagerung bei 80°C und 110°C bei unterschiedlichen Presszeitfaktoren.	134
Abbildung 105: Entwicklung der Querkzugfestigkeit für PF-Platten (modifiziert) während der Stapellagerung bei 80°C und 110°C bei unterschiedlichen Presszeitfaktoren.	134
Abbildung 106: Entwicklung der Abhebefestigkeit für PF-Platten während der Stapellagerung bei 80°C, 95°C und 110°C.	135

Abbildung 107: Entwicklung der Dickenquellung für PF-Platten (unmodifiziert) während der Stapellagerung bei 80°C, 95°C und 110°C.....	136
Abbildung 108: Entwicklung der Dickenquellung für PF-Platten (modifiziert) während der Stapellagerung bei 80°C, 95°C und 110°C.....	136
Abbildung 109: Entwicklung des pH-Wertes für PF-Platten in den Deckschichten während der Stapellagerung bei 80°C und 110°C.....	137
Abbildung 110: Entwicklung des pH-Wertes für PF-Platten (modifiziert und unmodifiziert) in der Mittelschicht während der Stapellagerung bei 80°C und 110°C.....	137
Abbildung 111: Entwicklung der Gleichgewichtsfeuchte bei 20°C und 65% rel.LF für PF-Platten (unmodifiziert) während der Stapellagerung bei 80°C, 95°C und 110°C.....	138
Abbildung 112: Entwicklung der Gleichgewichtsfeuchte bei 20°C und 65% rel.LF für PF-Platten (modifiziert) während der Stapellagerung bei 80°C, 95°C und 110°C.....	138
Abbildung 113: Ablaufschema für die Errichtung der Stapel aus PF-Platten in der Produktion.....	144
Abbildung 114: Einschnittplan für die Probennahme aus den Stapeln.....	146
Abbildung 115: Entnahmeschema für die PF-Platten aus der industriellen Produktion.....	148
Abbildung 116: Probennahme für die MDF-Platten.....	148
Abbildung 117: Messstellen für die Temperatur der Platten im Sternwender.....	150
Abbildung 118: Temperaturmessstellen für die Stapel in der industriellen Produktion.....	150
Abbildung 119: Änderung der Plattentemperatur (Mittelschicht) im Sternwender.....	151
Abbildung 120: Änderung der Temperaturen für verschiedene Messstellen im Stapel 2 (vgl. Abbildung 118).....	152
Abbildung 121: Entwicklung der Temperaturen in der Mitte der Stapel 1, 2 & 3.....	153
Abbildung 122: Änderung der Gleichgewichtsfeuchte der UF-Platten (PZF = 4,1 s/mm) während einer Stapellagerung über 72 Stunden.....	153
Abbildung 123: Entwicklung der Querkzugfestigkeit von UF-Platten während der Stapellagerung über 72 Stunden.....	154
Abbildung 124: Entwicklung der Querkzugfestigkeit von UF-Platten während der Stapellagerung über 72 Stunden, Darstellung der Festigkeiten relativ zu den Ausgangswerten.....	154
Abbildung 125: Entwicklung der Dickenquellung nach 24 Stunden Wasserlagerung von UF-Platten während der Stapellagerung.....	156
Abbildung 126: Entwicklung der Wasseraufnahme nach 24 Stunden Wasserlagerung von UF-Platten während der Stapellagerung.....	156
Abbildung 127: Abnahme des Formaldehydgehalts von UF-Platten während der Stapellagerung über 72 Stunden – relative Darstellung.....	157
Abbildung 128: Abnahme des Formaldehydgehalts (Perforatormethode) von UF-Platten während der Stapellagerung über 72 Stunden.....	157
Abbildung 129: Abnahme der Formaldehydemission (Flaschenmethode) von UF-Platten während der Stapellagerung über 72 Stunden.....	157
Abbildung 130: Abnahme der Gleichgewichtsfeuchte der MUF-Platten während der Lagerung über 72 Stunden.....	159
Abbildung 131: Entwicklung der Querkzugfestigkeit der MUF-Platten während der Lagerung über 72 Stunden.....	160
Abbildung 132: Entwicklung der Dickenquellung nach 2 Stunden Wasserlagerung (nach DIN).....	161
Abbildung 133: Entwicklung der Dickenquellung nach 24 Stunden Wasserlagerung (nach DIN).....	161

Abbildung 134: Entwicklung des Gehalts an freiem Formaldehyd von MUF-Platten während der Stapellagerung.....	161
Abbildung 135: Entwicklung der Formaldehydemission von MUF-Platten während der Stapellagerung.	161
Abbildung 136: Entwicklung des Biege-Elastizitätsmoduls der MUF-Platten während der 72-stündigen Stapellagerung	162
Abbildung 137: Entwicklung der Biegefestigkeit der MUF-Platten während der 72-stündigen Stapellagerung.....	162
Abbildung 138: Entwicklung der Querkzugfestigkeiten während einer 24-stündigen Lagerung der 17,5 mm Platten.	163
Abbildung 139: Entwicklung der Querkzugfestigkeit und der Querkzugfestigkeit nach Kochprüfung während der Lagerung unmittelbar nach dem Verpressen der 20,5 mm Platten.....	163
Abbildung 140: Entwicklung der Dickenquellung während einer 24-stündigen Lagerung der 17,5 mm Platten.	164
Abbildung 141: Entwicklung der Dickenquellung während der Lagerung unmittelbar nach dem Verpressen der 20,5 mm Platten.	164
Abbildung 142: Entwicklung der Biegefestigkeit (MOR) und des Biege-Elastizitätsmoduls (MOE) während der Lagerung unmittelbar nach dem Verpressen der 20,5 mm Platten.....	165
Abbildung 143: Änderung der Temperaturen in Stapeln aus PF-Platten in Abhängigkeit vom Zeitpunkt des Schleifens.	166
Abbildung 144: Änderung der Temperaturen in Stapeln aus PF-Platten an verschiedenen Messstellen. ..	166
Abbildung 145: Temperaturverteilung nach 24-stündiger Stapellagerung einer PF-Platte bei einer Ausgangstemperatur der Mittelschicht von etwa 105°C.....	167
Abbildung 146: Entwicklung der Feuchteverteilung zwischen Deck- und Mittelschicht in der Mitte der Stapel (Zeit 0 = Zeitpunkt des Schleifens).....	168
Abbildung 147: Entwicklung der Feuchteverteilung zwischen Deck- und Mittelschicht in den Randbereichen der Stapel.....	168
Abbildung 148: Entwicklung der Querkzugfestigkeit über eine Lagerdauer im Stapel bis zu 192 Stunden.	170
Abbildung 149: Entwicklung der Querkzugfestigkeit über eine Lagerdauer im Stapel bis zu 192 Stunden, relative Darstellung	171
Abbildung 150: Entwicklung der Querkzugfestigkeit des Stapels (nach 48 Stunden geschliffen) in verschiedenen Positionen im Stapel, relative Darstellung.....	171
Abbildung 151: Entwicklung der Querkzugfestigkeit nach Kochprüfung über eine Lagerdauer im Stapel bis zu 192 Stunden.....	173
Abbildung 152: Entwicklung der Querkzugfestigkeit nach Kochprüfung über eine Lagerdauer im Stapel bis zu 192 Stunden, relative Darstellung.	174
Abbildung 153: Entwicklung der Dickenquellung in der Mitte der Stapel in Abhängigkeit vom Zeitpunkt des Scheifens.	175
Abbildung 154: Entwicklung der Dickenquellung in der Mitte des Großstapels und nach dem Schleifen aus dem oberen Bereich der Stapel.....	175
Abbildung 155: Entwicklung der Dickenquellung in den Außenbereichen der Stapel in Abhängigkeit vom Zeitpunkt des Scheifens.....	175
Abbildung 156: Entwicklung des Biege-Elastizitätsmoduls in der Mitte der Stapel in Abhängigkeit vom Zeitpunkt des Scheifens.....	176
Abbildung 157: Entwicklung der Biegefestigkeit in der Mitte der Stapel in Abhängigkeit vom Zeitpunkt des Scheifens.	176
Abbildung 158: Entwicklung der Temperatur in der Mitte der Stapel.....	178

Abbildung 159: Entwicklung der Dickenquellung nach 2 Stunden (DIN) der PMDI-Platten während der Stapellagerung.	179
Abbildung 160: Entwicklung der Dickenquellung nach 24 Stunden (DIN) der PMDI-Platten während der Stapellagerung.	179
Abbildung 161: Änderung der Temperatur der HDF (nach zwei Wendern eingestapelt) während der Stapellagerung.....	180
Abbildung 162: Änderung der Temperatur der HDF (nach drei Wendern eingestapelt) während der Stapellagerung.....	180
Abbildung 163: Entwicklung der Feuchte der HDF während der Stapellagerung.....	180
Abbildung 164: Exemplarische Darstellung der Traganteile des Schnittflächenniveaus in der Mitte einer Spanplatte.	214
Abbildung 165: Gelierzeiten für verschiedene Aminoplast-Harze in Abhängigkeit von der Härtereinsatzmenge (Ammoniumnitrat).....	215
Abbildung 166: Gelierzeiten eines reinen UF-Harzes mit verschiedenen Härtermengen in Abhängigkeit von der Temperatur.	215
Abbildung 167: Masseabnahme nach Wasserlagerung für verschieden ausgehärtete Aminoplast-Harze in Abhängigkeit von der Dauer und der Temperatur.	215
Abbildung 168: Siebfractionen des verwendeten Spanmaterials.	217
Abbildung 169: Pressdiagramm einer UF-verleimten Laborspanplatte.....	217

15 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Bestimmung des unlöslichen Anteils von Harnstoffharz nach einer Wasserbehandlung bei 60°C in Holzspanplatten sowie Veränderung der Querkzugfestigkeit nach Wärmebehandlung (nach Ginzler 1973).....	16
Tabelle 2: Untersuchte Spanplatten.....	26
Tabelle 3: Plattenbreite nach Zuschnitt.....	28
Tabelle 4: Stufen des Versuchsplans für die Faserplatten.....	29
Tabelle 5: Spannung bei Stauchung der Probe um 1% im Querdruckversuch.....	31
Tabelle 6: Änderung der Plattendicke (absolut, relativ) nach dem Heißpressen; Spanplatten.....	38
Tabelle 7: Berechnung der Querkzugfestigkeit aus den Werten der Scherfestigkeitsprüfung.....	44
Tabelle 8: Änderung der Plattendicke von MDF (absolut, relativ) nach dem Heißpressen.....	51
Tabelle 9: Verhältnis der Eigenschaften von Spanplatten direkt nach dem Pressen und nach 24 Stunden.....	60
Tabelle 10: Verhältnis der Eigenschaften von MDF direkt nach dem Pressen und nach 24 Stunden.....	60
Tabelle 11: Parameter einer UF-Platte zwecks Hydrolyse.....	67
Tabelle 12: Variable Bedingungen der Holzanalyse.....	70
Tabelle 13: Bedingungen für die Bestimmung des pH-Wertes und der Pufferkapazität.....	73
Tabelle 14: Analytische Kenndaten des UFm-Harzes.....	80
Tabelle 15: Konstante Bedingungen der Leimuntersuchung.....	81
Tabelle 16: Variable Bedingungen der Leimuntersuchung.....	81
Tabelle 17: Analytische Kenndaten des Standardharzes.....	101
Tabelle 18: Analytische Kenndaten des Versuchsharzes.....	101
Tabelle 19: Konstante Herstellparameter der UF-Platten.....	102
Tabelle 20: Variierte Herstellparameter der UF-Platten.....	102
Tabelle 21: Analytische Kenndaten des MUF- und MUPF-Harzes.....	102
Tabelle 22: Konstante Herstellparameter der MUF- und MUPF-Platten.....	103
Tabelle 23: Variierte Herstellparameter der MUF- und MUPF-Platten.....	103
Tabelle 24: Analytische Kenndaten des PF-Deckschichtharzes.....	104
Tabelle 25: Analytische Kenndaten des unmodifizierten PF-Mittelschichtharzes.....	104
Tabelle 26: Analytische Kenndaten des modifizierten PF-Mittelschichtharzes.....	104
Tabelle 27: Konstante Herstellparameter der PF-Platten.....	105
Tabelle 28: Variierte Herstellparameter der PF-Platten.....	105
Tabelle 29: Plattentemperaturen bei Entnahme aus dem simulierten Stapel.....	107
Tabelle 30: Entnahmezeitpunkte der UF-Platten.....	108
Tabelle 31: Entnahmezeitpunkte der MUF-, MUPF- und PF-Platten.....	111
Tabelle 32: Prozentuale Veränderung der Querkzugfestigkeit zwischen 0 und 72 Stunden Lagerzeit mit Angabe des Signifikanzniveaus.....	116
Tabelle 33: Prozentuale Veränderung der Abhebefestigkeit zwischen 0 und 72 Stunden Lagerzeit mit Angabe des Signifikanzniveaus.....	119
Tabelle 34: Prozentuale Veränderung des Formaldehydgehalts zwischen 0 und 72 Stunden Lagerzeit mit Angabe des Signifikanzniveaus.....	121
Tabelle 35: Prozentuale Veränderung der Dickenquellung zwischen 0 und 72 Stunden Lagerzeit mit Angabe des Signifikanzniveaus.....	125

Tabelle 36: Variable Produktionsparameter der UF-Platten.	143
Tabelle 37: Variable Produktionsparameter der MUF-Platten.....	143
Tabelle 38: Stapeltemperaturen den MUF-Stapel.....	159
Tabelle 39: Momentaufnahme der Temperaturen bei verschiedenen Herstellungsbedingungen und an verschiedenen Positionen der Stapel jeweils 3 Tage nach dem Verpressen.	167
Tabelle 40: Materialkosten für Rohstoffe von Spanplatten (nach Janssen 2001).....	186
Tabelle 41: Kosten-Nutzen-Rechnung bei geringerem Paraffineinsatz.....	187
Tabelle 42: Kosten-Nutzen-Rechnung bei geringerem Leimeinsatz.....	188
Tabelle 43: Eigenschaften der untersuchten Span- und Faserplatten 24 Stunden nach dem Verpressen bzw. nach Klimatisierung.	216
Tabelle 44: Eigenschaftswerte der Laborspanplatten vor der Stapellagerung; Mittelwerte der Platten mit gleichen Parametern.	218

16 Abkürzungsverzeichnis

\bar{U}	Wärmeleitfähigkeit	W / (mEK)
\bar{U}	Bepankungsverhältnis	-
\hat{e}	Temperatur	°C
\acute{a}	Dichte	kg / m ³
φ	relative Luftfeuchte	-
τ	Scherfestigkeit	N/mm ²
f_{max}	Resonanzfrequenz	Hz
a	Temperaturleitfähigkeit	m ² / h
c	spezifische Wärmekapazität	kJ / (kgEK)
c	Schallgeschwindigkeit	m/s
d	Plattendicke	mm
s	Dicke der Deckschichten	mm
t	Zeit	s
E	Elastizitätsmodul	N/mm ²
F	Kraft	N
u	Feuchte	%
P	Gasdruck	Pa
P _D	Wasserdampfteildruck	Pa
P _S	Sättigungsdampfdruck	Pa
R	universelle Gaskonstante	8,314 J/(mol K)
V	Gasvolumen	m ³
n	Stoffmenge	mol
T	absolute Temperatur	K
MOE	Biege-Elastizitätsmodul	N/mm ²
MOR	Biegefestigkeit	N/mm ²
Ab	Abhebefestigkeit	N/mm ²
QZ	Querzugfestigkeit	N/mm ²
Q	Dickenquellung	%

Lebenslauf

Name Martin Ohlmeyer

Geboren 27. November 1970 in Unna

Familienstand ledig

Grundschule 1977-81 Ludgeri-Grundschule in Hamm (Westf.)

Gymnasium 1981-90 Galilei-Gymnasium in Hamm (Westf.)
Abschluss Abitur

Zivildienst 1990-91 Alten- und Pflegeheim in Wentorf bei Hamburg

Hochschule 1991-97 Studium der Holzwirtschaft an der Universität Hamburg
Abschluss Diplom-Holzwirt

1997-99 Wissenschaftlicher Angestellter am Ordinariat für Holztechnologie der Universität Hamburg.

Seit 12/99 Wissenschaftlicher Angestellter am Institut für Holzphysik und mechanische Technologie des Holzes der Bundesforschungsanstalt für Forst- und Holzwirtschaft.