

**„Entwicklung eines naturnahen Bindemittels aus  
nachwachsenden Rohstoffen auf Proteinbasis zur Herstellung von  
Mitteldichten Faserplatten“**

**Dissertation**

zur Erlangung des Doktorgrades  
der Fakultät für Forstwissenschaften und Waldökologie  
der Georg-August-Universität Göttingen

vorgelegt von

CHRISTIAN SCHÖPPER

geboren in Coesfeld / Nordrhein-Westfalen

Themenbearbeitung am Lehrstuhl für Forstbotanik  
Abteilung Molekulare Holzbiotechnologie und Technische Mykologie  
der Georg-August-Universität Göttingen

**D 7**

1. Berichterstatter: Prof. Dr. A. KHARAZIPOUR

2. Berichterstatter: Prof. Dr. E. ROFFAEL

Tag der mündlichen Prüfung: 15.03.2006

## **Danksagung**

Die vorliegende Arbeit wurde am Forstbotanischen Institut der GEORG-AUGUST-Universität Göttingen in Zusammenarbeit mit der Fa. PFLEIDERER Holzwerkstoffe GmbH & Co. KG, Neumarkt und der Fa. CERESTAR Deutschland, Krefeld unter Leitung von Herrn Prof. Dr. A. Kharazipour angefertigt. Gefördert wurde diese Arbeit durch das BUNDESMINISTERIUM FÜR VERBRAUCHERSCHUTZ, ERNÄHRUNG UND LANDWIRTSCHAFT (BMVEL) über die FACHAGENTUR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE (FNR) in Gülzow.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr. A. Kharazipour für die Vergabe dieses Dissertationsthemas und die sehr qualifizierte Betreuung, die in Form von zahlreichen anregenden Fachgesprächen und vielen motivierenden Worten die Anfertigung dieser Arbeit wesentlich unterstützt hat.

Für die tatkräftige Hilfe und die fachliche Unterstützung möchte ich mich bei allen Mitarbeitern der Arbeitsgruppe Kharazipour recht herzlich bedanken. Insbesondere gilt mein Dank Michael Reichel, Georg Geigl und Christian Bohn.

Für die zahlreichen Anregungen und fachlichen Ratschläge zur Durchführung der radiometrischen Untersuchungen möchte ich mich beim gesamten Team des LARI recht herzlich bedanken. Besonders seien hier Prof. Dr. J. Trojanowski und Marina Horstmann genannt, durch die diese Versuche erst realisierbar wurden.

Für das sehr freundliche Arbeitsklima, die gute Zusammenarbeit und die Unterstützung bei den analytischen Arbeiten möchte ich mich bei allen Kollegen des Instituts für Forstbotanik bedanken. Besonders erwähnen möchte ich hier Karin Lange, Theres Riemekasten, Martin Rühl, Burkhard Rüther und Carsten Boritzki.

Ich möchte mich ebenfalls bei Herrn Prof. Dr. E. Roffael dafür bedanken, dass er sich bereit erklärt hat diese Arbeit als Zweitgutachter zu beurteilen.

Schließlich möchte ich mich noch besonders bei meiner Familie für die langjährige Unterstützung bedanken, die es mir ermöglichten diesen Weg einzuschlagen. Bei meiner Frau Cora möchte ich mich besonders dafür bedanken, dass sie mir in allen Belangen eine sehr große Hilfe war und mir ihre Unterstützung stets gewiss war.



# I. Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>EINLEITUNG .....</b>	<b>1</b>
1.1	ENTWICKLUNG DER FASERPLATTEN .....	3
1.2	ZIELSETZUNGEN DER ARBEIT .....	7
<b>2</b>	<b>THEORETISCHE GRUNDLAGEN.....</b>	<b>9</b>
2.1	HOLZ .....	9
2.1.1	<i>Anatomischer Aufbau des Holzes</i> .....	9
2.1.2	<i>Chemische Holzzusammensetzung</i> .....	10
2.1.3	<i>Aufbau der verholzten Zellwand</i> .....	12
2.1.3.1	Lignin .....	14
2.1.3.2	Cellulose.....	15
2.1.3.3	Holzpolyosen.....	16
2.1.4	<i>Nebenbestandteile des Holzes</i> .....	17
2.2	CHEMISCHE GRUNDSTOFFE IN DER HOLZWERKSTOFFINDUSTRIE.....	19
2.2.1	<i>Bindemittel</i> .....	19
2.2.2	<i>Bindemittelarten</i> .....	22
2.2.2.1	Konventionelle Bindemittel.....	22
2.2.2.1.1	Harnstoff-Formaldehyd-Harze .....	22
2.2.2.1.2	Phenol-Formaldehyd-Harze .....	24
2.2.2.1.3	Melamin-Formaldehyd-Harze .....	25
2.2.2.1.4	Klebstoffe auf der Basis polymerer Diisocyanate .....	26
2.2.2.2	Naturnahe Bindemittel.....	27
2.2.2.2.1	Tannine .....	27
2.2.2.2.2	Enzyme .....	28
2.2.2.2.3	Aktivierung der holzeigenen Bindestoffe.....	29
2.2.2.2.4	Stärke .....	30
2.2.2.2.5	Proteine .....	31
2.2.3	<i>Zugabestoffe</i> .....	37
2.2.3.1	Hydrophobierungsmittel.....	37
2.2.3.2	Härter und Beschleuniger .....	38
2.2.3.3	Formaldehyd-Fängersubstanzen.....	38
2.2.3.4	Fungizide.....	38
2.3	AUFSCHLUSSVERFAHREN VON HOLZ ZUR HERSTELLUNG VON FASERPLATTEN.....	39
2.3.1	<i>Masonite- oder Dampfexplosions-Verfahren</i> .....	39
2.3.2	<i>ASPLUND- oder Defibrator-Verfahren</i> .....	40
2.4	HAUPTARBEITSSTUFEN BEI DER HERSTELLUNG VON MITTELDICHTEN FASERPLATTEN.....	40
2.4.1	<i>Verfahrensvarianten bei der Herstellung von Mitteldichten Faserplatten</i> .....	41
2.4.1.1	Nassverfahren.....	41
2.4.1.2	Halbtrockenverfahren .....	42
2.4.1.3	Trockenverfahren .....	42
2.5	DIN- UND EN- VORSCHRIFTEN FÜR HOLZFASERPLATTEN.....	42
2.6	HOLZABBAU DURCH WEIß-, BRAUN- UND MODERFÄULEERREGER.....	44
2.6.1	<i>Weißfäule</i> .....	45
2.6.1.1	Selektive Delignifizierung.....	46
2.6.1.2	Simultane Fäule.....	47
2.6.2	<i>Braunfäule</i> .....	49
2.6.3	<i>Moderfäule</i> .....	50
<b>3</b>	<b>MATERIAL UND METHODEN .....</b>	<b>53</b>
3.1	ANALYTISCHE UNTERSUCHUNGEN .....	53
3.1.1	<i>Analytische Untersuchungen des Faserstoffes</i> .....	53
3.1.1.1	Siebkenlinien nach WIHS 74 .....	54
3.1.1.2	RAPID-KÖTHEN-Blattbildner (DIN 54358).....	55
3.1.1.3	Bestimmung des Hemicellulosegehaltes im Industriefaserstoff .....	56
3.1.1.4	Bestimmung des Ligningehaltes im STEICO Fasermaterial .....	57
3.1.2	<i>Morphologische Untersuchungen des Faserstoffes</i> .....	59
3.1.2.1	Rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen von Faserstoff.....	59
3.1.3	<i>Analytische Untersuchungen der Bindemittel</i> .....	60
3.1.3.1	Charakterisierung des Weizenprotein-Bindemittels der Fa. CERESTAR .....	60

3.1.3.2	Viskositätsmessungen .....	61
3.1.3.2.1	Viskositäten des Harnstoff-Formaldehyd-Harz Bindemittels.....	62
3.1.3.2.2	Viskositäten des Phenol-Formaldehyd-Harz Bindemittels.....	63
3.1.3.2.3	Viskositäten der UF-Harz/Weizenprotein Bindemittel.....	63
3.1.3.2.4	Viskositäten der PF-Harz/Weizenprotein Bindemittel.....	64
3.1.3.2.5	Viskositäten des Weizenprotein Bindemittels.....	64
3.1.3.3	Ermittlung der Stickstoffgehalte.....	65
3.1.3.3.1	KJELDAHL-Methode (DIN EN 25663).....	65
3.2	HERSTELLUNG VON MITTELDICHTEN FASERPLATTEN IM PILOTMAßSTAB .....	68
3.2.1	<b>Anlagenteile der Pilot-MDF-Anlage .....</b>	<b>68</b>
3.2.1.1	Beleimung .....	69
3.2.1.1.1	Transportband / Muldengurttörderer.....	69
3.2.1.1.2	Beleimungsmischer.....	70
3.2.1.1.3	Leimpumpe.....	71
3.2.1.2	Trocknung .....	72
3.2.1.2.1	Trocknereinheit.....	72
3.2.1.2.2	Speicher- und Zuführband.....	74
3.2.1.3	Vliesbildung .....	74
3.2.1.3.1	Faserbunker.....	74
3.2.1.3.2	Faserstreukopf.....	75
3.2.1.3.3	Formband.....	76
3.2.1.4	Verpressen/Konditionieren.....	76
3.2.1.4.1	Heißpresse.....	76
3.2.1.4.2	Tischformatkreissäge und Langbandschleifmaschine .....	78
3.2.2	<b>Herstellung von UF-Harz gebundenen Mitteldichten Faserplatten.....</b>	<b>79</b>
3.2.3	<b>Herstellung von PF-Harz gebundenen Mitteldichten Faserplatten.....</b>	<b>85</b>
3.2.4	<b>Herstellung von UF-Harz/Weizenprotein gebundenen Mitteldichten Faserplatten.....</b>	<b>87</b>
3.2.5	<b>Herstellung von PF-Harz/Weizenprotein gebundenen Mitteldichten Faserplatten.....</b>	<b>90</b>
3.2.6	<b>Herstellung von Weizenprotein gebundenen Mitteldichten Faserplatten.....</b>	<b>92</b>
3.3	ERMITTLUNG DER MECHANISCH-TECHNOLOGISCHEN EIGENSCHAFTEN .....	98
3.3.1	<b>Universal-Prüfmaschine .....</b>	<b>98</b>
3.3.2	<b>DIN-/EN-Vorgaben für die Prüfung von Mitteldichten Faserplatten.....</b>	<b>100</b>
3.3.2.1	DIN EN 317 Bestimmung der Dickenquellung nach Wasserlagerung .....	100
3.3.2.2	DIN EN 319 Bestimmung der Zugfestigkeit senkrecht zur Plattenebene.....	101
3.3.2.3	DIN EN 323 Bestimmung der Rohdichte .....	102
3.3.2.4	DIN EN 326-1 Probenahme, Zuschnitt und Überwachung.....	103
3.3.2.5	DIN EN 622-5 Anforderungen an Platten nach dem Trockenverfahren (MDF).....	104
3.3.3	<b>Ermittlung der Formaldehydabgabe aus Mitteldichten Faserplatten .....</b>	<b>105</b>
3.3.3.1	Perforator-Methode (DIN EN 120) .....	105
3.4	MYKOLOGISCHE UNTERSUCHUNGEN AN MITTELDICHTEN FASERPLATTEN .....	107
3.4.1	<b>Holzabbauversuch Mitteldichten Faserplatten .....</b>	<b>108</b>
3.4.2	<b>Holzabbau an radioaktiv markierten Mitteldichten Faserplatten (<sup>14</sup>C).....</b>	<b>110</b>
3.4.3	<b>Kompostierungsversuch an <sup>14</sup>C markierten Mitteldichten Faserplatten .....</b>	<b>118</b>
<b>4</b>	<b>ERGEBNISSE UND DISKUSSION .....</b>	<b>120</b>
4.1	ANALYTISCHE UNTERSUCHUNGEN .....	120
4.1.1	<b>Ergebnisse der analytischen Untersuchungen des Faserstoffes.....</b>	<b>120</b>
4.1.1.1	Siebkenlinien nach WIHS 74 .....	120
4.1.1.2	RAPID-KÖTHEN-Blattbildner .....	122
4.1.1.3	Hemicellulosegehalt.....	123
4.1.1.4	Ligningehalt .....	125
4.1.2	<b>Ergebnisse der morphologischen Untersuchungen des Faserstoffes.....</b>	<b>126</b>
4.1.3	<b>Ergebnisse der analytischen Untersuchungen der Bindemittel.....</b>	<b>129</b>
4.1.3.1	Charakterisierung des Weizenproteins der Fa. CERESTAR .....	129
4.1.3.1.1	Ermittlung der Inhaltstoffe im Weizenprotein.....	130
4.1.3.1.2	Viskositäten des Weizenproteins aus der laufenden Produktion .....	133
4.1.3.2	Viskositäten der untersuchten Bindemittel und Leimflotten.....	135
4.1.3.2.1	Viskositäten des Harnstoff-Formaldehyd-Harz-Leims Kauritec 407 <sup>®</sup> flüssig der Fa. BASF .....	135
4.1.3.2.2	Viskositäten des Phenol-Formaldehyd-Harz Bindemittels 1808 HW der Fa. BAKELITE.....	136
4.1.3.2.3	Viskositäten der UF-Harz/Weizenprotein Bindemittel.....	138
4.1.3.2.4	Viskositäten der PF-Harz/Weizenprotein Bindemittel .....	141
4.1.3.2.5	Viskosität der Weizenprotein-Suspension.....	144
4.1.3.3	Stickstoffgehalte der untersuchten Bindemittel.....	146
4.1.3.3.1	Stickstoffgehalte des Harnstoff-Formaldehyd-Harzes Kauritec 407 <sup>®</sup> flüssig der Fa. BASF .....	146
4.1.3.3.2	Stickstoff- und Proteingehalte der Weizenprotein-Suspension .....	147
4.2	HERSTELLUNG VON MITTELDICHTEN FASERPLATTEN IM PILOTMAßSTAB .....	149

4.2.1	<i>Ergebnisse der Harnstoff-Formaldehyd-Harz gebundenen MDF-Referenzplatten</i>	149
4.2.2	<i>Ergebnisse der Phenol-Formaldehyd-Harz gebundenen MDF-Referenzplatten</i>	154
4.2.3	<i>Ergebnisse der UF-Harz/Weizenprotein gebundenen Mitteldichten Faserplatten</i>	159
4.2.4	<i>Ergebnisse der PF-Harz/Weizenprotein gebundenen Mitteldichten Faserplatten</i>	173
4.2.5	<i>Ergebnisse der mit Weizenprotein hergestellten Mitteldichten Faserplatten</i>	184
4.2.5.1	Fazit der mechanisch-technologischen Eigenschaften Weizenprotein gebundener MDF-Platten unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten	199
4.3	MYKOLOGISCHE UNTERSUCHUNGEN AN MITTELDICHTEN FASERPLATTEN	200
4.3.1	<i>Holzabbauversuch an Mitteldichten Faserplatten</i>	200
4.3.2	<i>Holzabbau an <sup>14</sup>C markierten Mitteldichten Faserplatten</i>	206
4.3.3	<i>Kompostierung von <sup>14</sup>C-U markierten Mitteldichten Faserplatten</i>	231
<b>5</b>	<b>ZUSAMMENFASSUNG</b>	<b>235</b>
<b>6</b>	<b>AUSBLICK</b>	<b>239</b>
<b>7</b>	<b>LITERATURVERZEICHNIS</b>	<b>240</b>
<b>8</b>	<b>ANHANG</b>	<b>252</b>
8.1	BERECHNUNGEN ANALYTIK	252
8.1.1	<i>Pentosanbestimmung</i>	252
8.1.1.1	Probeneinwaage	252
8.1.1.2	Pentosangehalt	252
8.1.2	<i>Ligninbestimmung</i>	253
8.1.2.1	Probeneinwaage	253
8.1.2.2	Ligningehalt	253
8.1.3	<i>Ermittlung rheologischer Eigenschaften</i>	253
8.1.3.1	Dynamische Viskosität	253
8.1.4	<i>Bestimmung des Stickstoffgehaltes</i>	254
8.1.4.1	Berechnung nach KJELDAHL	254
8.2	BERECHNUNGEN ZUR HERSTELLUNG VON MITTELDICHTEN FASERPLATTEN	255
8.2.1	<i>Volumen und Rohdichte der herzustellenden Mitteldichten Faserplatten</i>	255
8.2.2	<i>Unbeleimte Faserfeuchte</i>	255
8.2.3	<i>Fasermenge lutro / atro</i>	255
8.2.4	<i>Leimmenge lutro / atro</i>	256
8.2.5	<i>Beleimungszeit / Pumpgeschwindigkeit</i>	256
8.2.6	<i>Theoretische Feuchte</i>	257
8.2.7	<i>Fasereinwaage / Ausgleichsfeuchte</i>	257
8.3	BERECHNUNGEN ZUR ERMITTLUNG DER MECHANISCH-TECHNOLOGISCHEN EIGENSCHAFTEN VON MITTELDICHTEN FASERPLATTEN	258
8.3.1	<i>Berechnung der Dickenquellung nach Wasserlagerung (DIN EN 317)</i>	258
8.3.2	<i>Berechnung der Zugfestigkeit senkrecht zur Plattenebene (DIN EN 319)</i>	258
8.3.3	<i>Berechnung der Rohdichte (DIN EN 323)</i>	259
8.3.4	<i>Berechnung der Formaldehydabgabe von Holzwerkstoffen (DIN EN 120)</i>	259
8.4	BERECHNUNGEN MYKOLOGIE	260
8.4.1	<i>Zusammensetzung von Nährmedien</i>	260
8.4.1.1	BSM-Nährmedium	260
8.4.1.2	Raulin-Nährmedium	260
8.4.1.3	MYA-Nährmedium	261
8.4.1.4	MPA-Nährmedium	261

## II. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1: MDF-Produktion von 1986 bis 2004 (EUROPEAN PANELBOARD FEDERATION, 2004) .....	6
Abbildung 1-2: Verwendungszwecke für MDF-Platten (EUROPEAN PANELBOARD FEDERATION, 2004) .....	7
Abbildung 2-1: Übersicht über die chemischen Holzbestandteile (LOHMANN, 1998) .....	11
Abbildung 2-2: Strukturmodell von Fichtenlignin (ADLER, 1977) .....	14
Abbildung 2-3: Struktur der Cellulose (KHARAZIPOUR, 1996) .....	15
Abbildung 2-4: Struktur der Hemicellulose (KHARAZIPOUR, 1996) .....	16
Abbildung 2-5: Anteile der petrochemischen Bindemittel zur Herstellung von Mitteldichten Faserplatten (EUROPEAN PANELBOARD FEDERATION, 2004) .....	21
Abbildung 2-6: Reaktion von Harnstoff und Formaldehyd zu UF-Harz (DEPPE und ERNST, 1996) .....	23
Abbildung 2-7: Reaktion von Phenol und Formaldehyd (DEPPE und ERNST, 1996) .....	24
Abbildung 2-8: Reaktion von Melamin und Formaldehyd (ADAM, 1988) .....	25
Abbildung 2-9: Diphenylmethan-4,4'-Diisocyanat (DEPPE und ERNST, 1996) .....	27
Abbildung 2-10: Prozentuale Weizenbestandteile (CERESTAR, 2004) .....	36
Abbildung 2-11: Stadien der selektiven Delignifizierung (A-D) eines Weißfäuleerregers (SCHWARZE et al., 1999) .....	46
Abbildung 2-12: Stadien der simultanen Fäule (A-D) eines Weißfäuleerregers (SCHWARZE et al., 1999) .....	48
Abbildung 2-13: Entwicklungsstadien (A-D) einer Braunfäule (SCHWARZE et al., 1999) .....	50
Abbildung 2-14: Holzzersetzungsmuster von Moderfäule- erregern (SCHWARZE et al., 1999) .....	51
Abbildung 3-1: Natives Weizenprotein der Fa. CERESTAR .....	60
Abbildung 3-2: Rotor-Stator-Prinzip bei der Verdrängerpumpe (Fa. NETZSCH, 1998) .....	72
Abbildung 3-3: Prüfkörper für die Messung der Dickenquellung .....	100
Abbildung 3-4: Messstellen für die Ermittlung der Seitenlängen und der Dicke des Prüfkörpers .....	103
Abbildung 3-5: Schematischer Schnittplan für die Probennahme bei Holzwerkstoffen .....	103
Abbildung 4-1: Graphische Darstellung der Siebkennlinien des STEICO-Faserstoffes .....	122
Abbildung 4-2: RAPID-KÖTHEN-Blattbildner aus STEICO-Faserstoff, Nahaufnahme .....	123
Abbildung 4-3: Graphische Darstellung der Pentosangehalte im STEICO-Industriefaserstoff .....	124
Abbildung 4-4: Graphische Darstellung der ermittelten Ligningehalte im STEICO-Faserstoff .....	126
Abbildung 4-5: REM-Aufnahme des nativen Industriefaserstoffes der Fa. STEICO, 710-fache Vergrößerung ..	127
Abbildung 4-6: REM-Aufnahme von UF-Harz beleimtem und getrocknetem Fasermaterial, 1420-fache Vergrößerung .....	128
Abbildung 4-7: REM-Aufnahme von unverpresstem, mit Weizenprotein beleimten Faserstoff, 710-fache Vergrößerung .....	128
Abbildung 4-8: Entstehung des Weizenproteins bei der Gewinnung von Vitalgluten und Stärke aus <i>Triticum aestivum</i> (CERESTAR, 2004) .....	129
Abbildung 4-9: Veränderung des Feststoffgehaltes in der Weizenprotein-Suspension .....	130
Abbildung 4-10: Durchschnittliche prozentuale Zusammensetzung der Weizenprotein-Suspension bezogen auf Trockengewicht (CERESTAR, 2004) .....	133
Abbildung 4-11: Viskositäten des Weizenproteins aus der Produktion im CERESTAR Werk/Barby .....	134
Abbildung 4-12: Viskositäten der BASF Bindemittels Kauritec <sup>®</sup> 407 <sup>®</sup> flüssig ohne Zugabe von Paraffin und mit 1% HYDROWAX 138 bzw. 1 % HYDROWAX 730 der Fa. SASOL .....	135
Abbildung 4-13: Viskositäten des PF-Harzes 1808 HW der Fa. BAKELITE ohne Zugabestoffe und mit 1 % HYDROWAX 138 bzw. 1 % HYDROWAX 730 .....	137
Abbildung 4-14: Viskositäten der UF-Harz/WP Mischkondensate (75/25) mit HYDROWAX 138 und HYDROWAX 730 .....	139
Abbildung 4-15: Viskositäten der UF-Harz/WP Mischkondensate (50/50) mit HYDROWAX 138 und HYDROWAX 730 .....	140
Abbildung 4-16: Viskositäten der UF-Harz/Weizenprotein Mischkondensate (25/75) mit HYDROWAX 138 und HYDROWAX 730 .....	141
Abbildung 4-17: Viskositäten der PF-Harz/Weizenprotein Mischkondensate (50/50) mit HYDROWAX 138 und HYDROWAX 730 .....	142
Abbildung 4-18: Viskositäten der PF-Harz/Weizenprotein Mischkondensate (25/75) mit HYDROWAX 138 und HYDROWAX 730 .....	143
Abbildung 4-19: Viskositäten des Weizenproteins der Fa. CERESTAR ohne Paraffine und mit 1 % HYDROWAX 138 bzw. 1 % HYDROWAX 730 .....	145
Abbildung 4-20: Graphische Darstellung der Gesamtstickstoffgehalte im UF-Harz Kauritec <sup>®</sup> 407 flüssig der Fa. BASF .....	147
Abbildung 4-21: Graphische Darstellung der Stickstoff- und Gesamtproteingehalte im Weizenprotein .....	149



Abbildung 4-22: Mechanisch-technologische Eigenschaften der 4 mm bis 18 mm starken UF-Harz gebundenen Mitteldichten Faserplatten ohne Hydrophobierungsmittel .....	151
Abbildung 4-23: Mechanisch-technologische Eigenschaften der 4 mm bis 18 mm starken UF-Harz gebundenen Mitteldichten Faserplatten mit HYDROWAX 138.....	152
Abbildung 4-24: Mechanisch-technologische Eigenschaften der 4 mm bis 18 mm starken UF-Harz gebundenen Mitteldichten Faserplatten mit HYDROWAX 730.....	152
Abbildung 4-25: Formaldehydemissionen aus 10 mm starken mit Kauritec 407 <sup>®</sup> flüssig gebundenen MDF-Platten nach der Perforator-Methode.....	153
Abbildung 4-26: Mechanisch-technologische Eigenschaften der PF-Harz gebundenen MDF-Platten ohne Zugabe von Hydrophobierungsmitteln .....	155
Abbildung 4-27: Mechanisch-technologische Eigenschaften der PF-Harz gebundenen MDF-Platten unter Verwendung von HYDROWAX 138 .....	156
Abbildung 4-28: Mechanisch-technologische Eigenschaften der PF-Harz gebundenen MDF-Platten unter Verwendung von HYDROWAX 730 .....	157
Abbildung 4-29: Formaldehydemissionen der 10 mm starken MDF-Platten gebundenen mit Phenol-Formaldehyd-Harz vom Typ 1808 HW der Fa. BAKELITE.....	158
Abbildung 4-30: Mechanisch-technologische Eigenschaften der UF/WP (75/25) gebundenen MDF-Platten ohne Hydrophobierungsmittel.....	160
Abbildung 4-31: Mechanisch-technologische Eigenschaften der UF/WP (75/25) gebundenen MDF-Platten mit 1 % HYDROWAX 138 .....	161
Abbildung 4-32: Mechanisch-technologische Eigenschaften der UF/WP (75/25) gebundenen MDF-Platten mit 1 % HYDROWAX 730 .....	162
Abbildung 4-33: Mechanisch-technologische Eigenschaften der UF/WP (50/50) gebundenen MDF-Platten ohne Hydrophobierungsmittel.....	164
Abbildung 4-34: Mechanisch-technologische Eigenschaften der UF/WP (50/50) gebundenen MDF-Platten mit 1 % HYDROWAX 138 .....	165
Abbildung 4-35: Mechanisch-technologische Eigenschaften der UF/WP (50/50) gebundenen MDF-Platten mit 1 % HYDROWAX 730 .....	166
Abbildung 4-36: Mechanisch-technologische Eigenschaften der UF/WP (25/75) gebundenen MDF-Platten ohne Hydrophobierungsmittel.....	168
Abbildung 4-37: Mechanisch-technologische Eigenschaften der UF/WP (25/75) gebundenen MDF-Platten mit 1 % HYDROWAX 138 .....	169
Abbildung 4-38: Mechanisch-technologische Eigenschaften der UF/WP (25/75) gebundenen MDF-Platten mit 1 % HYDROWAX 730 .....	170
Abbildung 4-39: Formaldehydemissionen aus den mit Mischkondensaten aus UF-Harz und WP hergestellten, 10 mm starken MDF-Platten nach der Perforator-Methode .....	171
Abbildung 4-40: Mechanisch-technologische Eigenschaften der PF/WP (75/25) gebundenen MDF-Platten ohne Hydrophobierungsmittel.....	174
Abbildung 4-41: Mechanisch-technologische Eigenschaften der PF/WP (75/25) gebundenen MDF-Platten mit 1 % HYDROWAX 138 .....	175
Abbildung 4-42: Mechanisch-technologische Eigenschaften der PF/WP (75/25) gebundenen MDF-Platten mit 1 % HYDROWAX 730 .....	176
Abbildung 4-43: Mechanisch-technologische Eigenschaften der PF/WP (50/50) gebundenen MDF-Platten ohne Hydrophobierungsmittel.....	177
Abbildung 4-44: Mechanisch-technologische Eigenschaften der PF/WP (50/50) gebundenen MDF-Platten mit 1 % HYDROWAX 138 .....	178
Abbildung 4-45: Mechanisch-technologische Eigenschaften der PF/WP (50/50) gebundenen MDF-Platten mit 1 % HYDROWAX 730 .....	179
Abbildung 4-46: Mechanisch-technologische Eigenschaften der PF/WP (25/75) gebundenen MDF-Platten ohne Hydrophobierungsmittel.....	180
Abbildung 4-47: Mechanisch-technologische Eigenschaften der PF/WP (25/75) gebundenen MDF-Platten mit 1 % HYDROWAX 138 .....	181
Abbildung 4-48: Mechanisch-technologische Eigenschaften der PF/WP (25/75) gebundenen MDF-Platten mit 1 % HYDROWAX 730 .....	182
Abbildung 4-49: Formaldehydemissionen aus den mit Mischkondensaten aus PF-Harz und WP hergestellten, 10 mm starken MDF-Platten nach der Perforator-Methode .....	183
Abbildung 4-50: Presszeitoptimierung bei 10 mm starken mit Weizenprotein gebundenen Mitteldichten Faserplatten im Pilotmaßstab (SCHÖPPER, 2003).....	184
Abbildung 4-51: Temperaturverlauf in der Plattenmitte einer 10 mm starken mit Weizenprotein gebundenen MDF-Platte während des Heißpressens in der Pilotpresse der Fa. SIEMPELKAMP (SCHÖPPER, 2003).....	186
Abbildung 4-52: Mechanisch-technologische Eigenschaften der 4 mm starken Weizenprotein gebundenen Mitteldichten Faserplatten .....	187

Abbildung 4-53: Mechanisch-technologische Eigenschaften der 6 mm starken Weizenprotein gebundenen Mitteldichten Faserplatten .....	189
Abbildung 4-54: Mechanisch-technologische Eigenschaften der 8 mm starken Weizenprotein gebundenen Mitteldichten Faserplatten .....	190
Abbildung 4-55: Mechanisch-technologische Eigenschaften der 10 mm starken Weizenprotein gebundenen Mitteldichten Faserplatten .....	192
Abbildung 4-56: Mechanisch-technologische Eigenschaften der 12 mm starken Weizenprotein gebundenen Mitteldichten Faserplatten .....	193
Abbildung 4-57: Mechanisch-technologische Eigenschaften der 14 mm starken Weizenprotein gebundenen Mitteldichten Faserplatten .....	195
Abbildung 4-58: Mechanisch-technologische Eigenschaften der 16 mm starken Weizenprotein gebundenen Mitteldichten Faserplatten .....	196
Abbildung 4-59: Mechanisch-technologische Eigenschaften der 18 mm starken Weizenprotein gebundenen Mitteldichten Faserplatten .....	198
Abbildung 4-60: Formaldehydemissionen aus den Weizenprotein gebundenen MDF-Platten nach der Perforator-Methode (DIN EN 120).....	198
Abbildung 4-61: Überwachungsgrade der Weizenprotein gebundenen MDF-Platten mit (PF 1-45) und ohne (P 1-45) Fungizid .....	201
Abbildung 4-62: Überwachungsgrade der UF-Harz gebundenen MDF-Platten mit (UFF 1-45) und ohne (UF 1-45) Fungizid .....	202
Abbildung 4-63: Durchschnittliche Holzerstörung der mit Weizenprotein gebundenen MDF-Platten mit (PF 1-45) und ohne (P 1-45) Fungizid .....	203
Abbildung 4-64: Durchschnittliche Holzerstörung der mit Harnstoff-Formaldehyd-Harz gebundenen MDF-Platten mit (UFF 1-45) und ohne (UF 1-45) Fungizid.....	204
Abbildung 4-65: Holzersetzung an den <sup>14</sup> C-U markierten UF-Harz gebundenen MDF durch <i>Trametes versicolor</i> .....	207
Abbildung 4-66: Holzersetzung an den <sup>14</sup> C-U markierten UF-Harz gebundenen MDF durch <i>Coniophora puteana</i> .....	208
Abbildung 4-67: Holzersetzung an den <sup>14</sup> C-U markierten UF-Harz gebundenen MDF durch <i>Trichoderma viridae</i> .....	209
Abbildung 4-68: Holzabbau durch <i>Trametes versicolor</i> an Protein gebundenen <sup>14</sup> C-U markierten MDF .....	210
Abbildung 4-69: Holzersetzung durch <i>Coniophora puteana</i> an Protein gebundenen <sup>14</sup> C-U markierten MDF-Proben.....	211
Abbildung 4-70: Holzerstörung durch <i>Trichoderma viridae</i> an Protein gebundenen <sup>14</sup> C-U markierten MDF-Platten.....	211
Abbildung 4-71: Holzabbau durch <i>Trametes villosa</i> an Protein gebundenen <sup>14</sup> C-U markierten MDF-Proben ..	212
Abbildung 4-72: Holzdegradation durch <i>Chaetomium globosum</i> an Protein gebundenen <sup>14</sup> C-U markierten Mitteldichten Faserplatten .....	213
Abbildung 4-73: Masseverluste und Ergebnisse der <sup>14</sup> C-Messung der Proben WP I bis X während der Degradation durch Holzerstörende Pilze .....	215
Abbildung 4-74: Abbau des <sup>14</sup> C-U-Cellulose markierten Materials in den MDF-Proben durch <i>Trametes versicolor</i> .....	216
Abbildung 4-75: Abbau des <sup>14</sup> C-U-Lignin markierten Materials in den MDF-Proben durch <i>Trametes versicolor</i> .....	217
Abbildung 4-76: Abbau des <sup>14</sup> C-Cellulose markierten Materials in den MDF-Proben durch <i>Coniophora puteana</i> .....	219
Abbildung 4-77: Abbau des <sup>14</sup> C-Lignin markierten Materials in den MDF-Proben durch <i>Coniophora puteana</i> .....	219
Abbildung 4-78: Abbau des <sup>14</sup> C-Cellulose markierten Materials in den MDF-Proben durch <i>Trichoderma viridae</i> .....	222
Abbildung 4-79: Abbau des <sup>14</sup> C-Lignin markierten Materials in den MDF-Proben durch <i>Trichoderma viridae</i> .....	222
Abbildung 4-80: Abbau des <sup>14</sup> C-Cellulose markierten Materials in den MDF-Proben durch <i>Trametes villosa</i> ..	224
Abbildung 4-81: Abbau des <sup>14</sup> C-Lignin markierten Materials in den MDF-Proben durch <i>Trametes villosa</i> .....	225
Abbildung 4-82: Abbau des <sup>14</sup> C-Cellulose markierten Materials in den MDF-Proben durch <i>Chaetomium globosum</i> .....	227
Abbildung 4-83: Abbau des <sup>14</sup> C-Lignin markierten Materials in den MDF-Proben durch <i>Chaetomium globosum</i> .....	228
Abbildung 4-84: Ergebnisse der Kompostierungsversuche mit Weizenprotein gebundenen MDF-Platten.....	231
Abbildung 4-85: Masseverluste der MDF-Platten während des Kompostierungsversuches.....	233

### III. Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1: Aufbau der verschiedenen Gewebearten bei Laub- und Nadelhölzern (LOHMANN, 1998).....	10
Tabelle 2-2: Elementarzusammensetzung des Holzes (LOHMANN, 1998) .....	11
Tabelle 2-3: Chemische Hauptbestandteile von Baumarten der gemäßigten Zone (LOHMANN, 1998).....	12
Tabelle 3-1: Vorschriften für die Trockene Siebfraktionierung nach WIHS 74 .....	55
Tabelle 3-2: Arbeitsschritte und chemische Reaktionen bei der KJELDAHL-Methode (www.kmf-laborchemie.de/pdf/Kjeldahl_de1.pdf, 14.12.2005) .....	66
Tabelle 3-3: Parameter zur Anfertigung der UF-Harz gebundenen Referenzplatten (Varianten I bis III).....	81
Tabelle 3-4: Herstellungsparameter für die UF-Harz gebundenen Referenzplatten (Varianten IV bis VI) .....	82
Tabelle 3-5: Parameter für die UF-Harz gebundenen Referenzplatten (Varianten VII und VIII).....	83
Tabelle 3-6: Maschineneinstellungen der Pilot-MDF-Anlage zur Herstellung von UF-Harz gebundenen MDF-Platten in den Stärken 4 bis 18 mm und einer Rohdichte von 800 kg/m <sup>3</sup> (SCHÖPPER, 2002).....	84
Tabelle 3-7: Herstellungsparameter der Referenz-Faserplatten gebundenen mit Phenol-Formaldehyd-Harz .....	86
Tabelle 3-8: Maschineneinstellungen der Pilot-MDF-Anlage für die Herstellung der 10 mm starken, PF-Harz gebundenen MDF-Platten mit einer Rohdichte von 800 kg/m <sup>3</sup> (SCHÖPPER, 2002) .....	87
Tabelle 3-9: Herstellungsparameter der mit Mischkondensaten aus Urease-Formaldehyd-Harz der Fa. BASF und Weizenprotein der Fa. CERESTAR gebundenen MDF-Platten.....	88
Tabelle 3-10: Maschineneinstellungen der Pilot-MDF-Anlage für die Herstellung von 10 mm starken MDF-Platten mit einer Zielrohddichte von 800 kg/m <sup>3</sup> (SCHÖPPER, 2002) .....	89
Tabelle 3-11: Herstellungsparameter der mit Mischkondensaten aus Phenol-Formaldehyd-Harz und Weizenprotein gebundenen Mitteldichten Faserplatten.....	91
Tabelle 3-12: Maschineneinstellungen der Pilot-MDF-Anlage für die Herstellung von 10 mm starken MDF-Platten mit einer Rohdichte von 800 kg/m <sup>3</sup> (SCHÖPPER, 2002) .....	92
Tabelle 3-13: Parameter zur Anfertigung der WP gebundenen MDF-Platten (Varianten I bis III) .....	94
Tabelle 3-14: Herstellungsparameter für die WP gebundenen MDF-Platten (Varianten IV bis VI) .....	95
Tabelle 3-15: Parameter für die WP gebundenen Faserplatten (Varianten VII und VIII).....	96
Tabelle 3-16: Maschineneinstellungen der Pilot-MDF-Anlage zur Herstellung von Weizenprotein gebundenen MDF-Platten in den Stärken 4 bis 18 mm und einer Rohdichte von 800 kg/m <sup>3</sup> .....	97
Tabelle 3-17: Mindestzahl m von kleinen Prüfkörpern, die aus jeder einzelnen Platte herzustellen sind.....	104
Tabelle 3-18: Anforderungen an MDF-Platten für allgemeine Zwecke zur Verwendung im Trockenbereich (DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG e. V., 1998).....	105
Tabelle 3-19: Angesetzte Nährmedien zur Anzucht der unterschiedlichen Holzabbauenden Pilze.....	109
Tabelle 3-20: Überwachungsgrad des Mycels modifiziert nach SHEKHOLESLAMI (1986).....	110
Tabelle 3-21: Nährmedien und Pilze für den Holzabbauversuch mit <sup>14</sup> C-U markierten MDF-Platten .....	111
Tabelle 3-22: Mit <sup>14</sup> C-U-markiertem Holz und UF-Harz hergestellte MDF-Proben .....	113
Tabelle 3-23: Versuchsaufbau für die mit <sup>14</sup> C-U-markiertem Holz und UF-Harz hergestellten MDF-Platten ...	113
Tabelle 3-24: Mit <sup>14</sup> C-U-markiertem Holz und Weizenprotein hergestellte MDF-Proben .....	114
Tabelle 3-25: Versuchsaufbau für die mit <sup>14</sup> C-U-markierten Buchenspänen und WP hergestellten MDF-Platten .....	114
Tabelle 3-26: Mit <sup>14</sup> C-U-Cellulose-markiertem Material und Weizenprotein hergestellte MDF-Proben .....	115
Tabelle 3-27: Mit <sup>14</sup> C-U-Cellulose markierte und mit WP hergestellte MDF-Platten .....	115
Tabelle 3-28: Mit <sup>14</sup> C-U-Lignin-markiertem Material und Weizenprotein hergestellte MDF-Proben .....	116
Tabelle 3-29: Mit <sup>14</sup> C-U-Lignin markiertem Material und WP hergestellte MDF-Platten .....	116
Tabelle 3-30: Für den Kompostierungsversuch hergestellte <sup>14</sup> C-U-markierte MDF-Platten .....	118
Tabelle 3-31: Versuchsaufbau des Kompostierungsversuches an <sup>14</sup> C-U-markierten MDF-Platten.....	119
Tabelle 4-1: Siebkennlinien des STEICO-Faserstoffes nach WIHS 74 .....	121
Tabelle 4-2: Ergebnisse der Pentosanbestimmung des STEICO-Faserstoffes .....	124
Tabelle 4-3: Ergebnisse der Ligninbestimmung des STEICO-Faserstoffes nach HALSE (1940) .....	125
Tabelle 4-4: Titrationsergebnisse der Stickstoffbestimmung des UF-Harzes Kauritec <sup>®</sup> 407 flüssig der Fa. BASF nach KJELDAHL.....	146
Tabelle 4-5: Titrationsergebnisse der Stickstoffbestimmung im Weizenproteins der Fa. CERESTAR nach KJELDAHL .....	148
Tabelle 4-6: Abbauverhältnisse zwischen <sup>14</sup> C-U markierter Cellulose und <sup>14</sup> C-U markiertem Lignin bei den verwendeten Weißfäule-, Braunfäule und Moderfäuleerregern.....	230
Tabelle 8-1: Zusammensetzung des BSM-Nährmediums .....	260
Tabelle 8-2: Zusammensetzung Raulin-Nährmedium.....	260
Tabelle 8-3: Zusammensetzung MYA-Nährmedium .....	261
Tabelle 8-4: Zusammensetzung MPA-Nährmedium.....	261

#### IV. Abkürzungsverzeichnis

%	Prozent
°C	Grad Celsius
µg	Mikrogramm
µl	Mikroliter
<sup>14</sup> C-U-Cellulose-markiert	Nur Cellulose im Material mit <sup>14</sup> C markiert
<sup>14</sup> C-U-Lignin-markiert	Nur Lignin im Material mit <sup>14</sup> C markiert
<sup>14</sup> C-U-markiert	Einheitlich mit <sup>14</sup> C markiertes Material
ABTS	2,2'-Azino-bis(3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic acid)
Atro	Absolut trocken
B	Breite
Bar	Maßangabe des Luftdrucks
Bq	Becquerel
ca.	Circa
cm	Zentimeter
cm <sup>2</sup>	Quadratzenimeter
cm <sup>3</sup>	Kubikzentimeter
dest.	Destilliert
DIN	Deutsches Institut für Normung e. V.
DMS	Dehnungsmessstreifen
dpm	Disintegration per minute
F****	F Four Star, Japanischer Standard der Formaldehydemission
g	Gramm
h	Stunde
ha	Hektar
Hz	Hertz, Maßeinheit der Frequenz (1 Hz 1 Schwingung / s)
kg	Kilogramm
kN	Kilonewton
L	Liter
l	Länge
LARI	Labor für Radioisotope
Lutro	Lufttrocken
M	Molarität
m	Meter
m / m	Prozent des Gewichts (Masse zu Masse)

m <sup>3</sup>	Kubikmeter
MDF	Medium Density Fibreboard (Mitteldichte Faserplatte)
mg	Milligramm
Min.	Minute
Mio.	Millionen
ml	Milliliter
mol	Mol
mPa·s	Millypascalsekunde
Mrd.	Milliarden
MUF-Harz	Melamin verstärkte Harnstoff-Formaldehyd-Harze
N	Normalität
N / mm	Newton pro Millimeter
N / mm <sup>2</sup>	Newton pro Quadratmillimeter
Nr.	Nummer
OSB	Oriented Strand Board
Pa·s	Pascalsekunde
PF-Harz	Phenol-Formaldehyd-Harze
pH	Negativ dekadischer Logarithmus der Protonenkonzentration
PMDI	Klebstoffe auf Basis von polymeren Diisocyanaten
Ppm	Parts per million
REM	Rasterelektronenmikroskop
Rpm	Rounds per minute
s	Sekunden
Sek.	Sekunde
t	Tonne
Tab.	Tabelle
TG	Trockengewicht
U / min	Umdrehungen pro Minute
UF-Harz	Urease-Formaldehyd-Harz ( Harnstoff-Formaldehyd-Harz)
V	Volt
WKI	Willhelm-Klauditz-Institut
WP	Weizenprotein-Suspension
z. T.	zum Teil



## 1 Einleitung

Nachhaltigkeit ist heute ein zentraler Punkt in der Forst- und Holzwirtschaft bei der Nutzung der bestehenden Holzvorkommen. Ein wichtiger Aspekt ist dabei, impliziert durch die Industrialisierung und die damit verbundene Verknappung der fossilen Rohstoffe und des Rohstoffes Holz, eine sinnvolle Nutzung bzw. Veredelung bestimmter Sortimente. Dazu gehören beispielsweise Schwachhölzer und Holzabfälle sowie auch Holz aus Jungwuchsdurchforstungen. Diese Sortimente, die bei der Waldbewirtschaftung und Holzverarbeitung anfallen, blieben anfänglich ungenutzt. Durch den Einsatz der oben genannten Sortimente konnte sich im Laufe der Zeit die Span- und Faserplattenindustrie entwickeln (VON TROTHA, 2005). Aufgrund der steigenden Nachfrage nach Holzwerkstoffen können durch den Einsatz dieser Sortimente Rohholzmengen substituiert und somit kostenintensive Importe aus Übersee reduziert werden.

Allein in der Bundesrepublik Deutschland werden durch die Spanplattenindustrie und Faserplattenindustrie mindestens 140 Mio. ha tropischer Regenwald pro Jahr verschont, der sonst zur Deckung des aus Mitteleuropa nicht zu beschaffenden Schnittholzes abgeholzt würde (HÜTTERMANN et al., 1990). Aus ökologischer Sicht nimmt neben der Nachhaltigkeit, begründet in der Verknappung der fossilen Rohstoffvorkommen und Energieressourcen, die Verwendung von nachwachsenden Rohstoffen bei der Produktion von Holzwerkstoffen eine immer wichtigere Position ein. Ziel der Forschungs- und Entwicklungsarbeiten auf dem Sektor der Holzwerkstoffindustrie ist die Entwicklung eines Werkstoffes, der vollständig aus nachwachsenden Rohstoffen hergestellt werden kann und dabei die gleichen bzw. bessere Eigenschaften aufweist, als die zur Zeit mit konventionellen Bindemitteln hergestellten Produkte dieser Industriezweige.

Als nachwachsende Rohstoffe werden organische Stoffe aus land- und forstwirtschaftlichen Nutzpflanzen bezeichnet, die unterschieden werden nach KRUSENBAUM (1991) in *Werk-, Faser- und Gerüststoffe, Chemieroh- und Chemiegrundstoffe* sowie *Heiz- und Kraftstoffe*.

Holz zählt zu den nachwachsenden Rohstoffen und findet in der Holzwerkstoffindustrie eine breite Verwendung. Holzwerkstoffe geraten jedoch trotz des Einsatzes von nachwachsenden Rohstoffen aus einer nachhaltigen Forstwirtschaft immer mehr in die Kritik. Die Gründe dafür liegen bei der Herstellung und der Art der verwendeten, konventionellen Bindemittel. Die am häufigsten zur Herstellung von Holzwerkstoffen verwendeten Bindemittel (siehe dazu auch Kapitel 2.2.2) sind Harnstoff-Formaldehyd-Harze, Klebstoffe auf Basis von polymeren

Diisocyanaten und Phenol-Formaldehyd-Harze. Diese Bindemittel werden überwiegend bzw. fast ausschließlich auf petrochemischer Basis hergestellt, wodurch der Verbrauch fossiler Rohstoffquellen vorangetrieben wird. Durch die ständig steigenden Rohölpreise, sowie die Abhängigkeit der Holzwerkstoffindustrie von diesen petrochemischen Bindemitteln, verteuerten sich die hergestellten Holzwerkstoffe in den letzten Jahren erheblich. Die Bindemittelkosten können bei der Herstellung von Holzwerkstoffen bis zu 20 %, je nach Art und Menge des verwendeten Bindemittels, der gesamten Herstellungskosten ausmachen (KHARAZIPOUR, 2004). Der Formaldehyd (HCHO) ist bei diesen konventionellen Bindemitteln ein wichtiger Bestandteil, da er für die meisten Klebstoffe als Reaktionspartner dient.

Ein weiterer Nachteil von Formaldehyd ist, dass neben dem natürlichen Vorkommen von Formaldehyd während der Trocknung von Holz, z.B. in Form von Spänen und Fasern, auch bei der Herstellung, Lagerung und Verwendung konventionell hergestellter Holzwerkstoffe, geringe Mengen an Formaldehyd freigesetzt werden (ROFFAEL, 1982; SUNDIN und ROFFAEL, 1989; ROFFAEL et al., 1993). In Verbindung mit Holzwerkstoffen ist Formaldehyd vor allem als Inhalationsstoff von Bedeutung. Aufgrund seiner Reaktivität wird er sehr schnell umgesetzt und kann bei entsprechender Konzentration zu Reizungen der Schleimhäute, der Augen und der Haut führen. Akute lebensgefährliche Konzentrationen sind im Zusammenhang mit Holzwerkstoffen nicht dokumentiert worden (WAGNER, 1997). Der menschliche Körper akkumuliert den Formaldehyd nicht, sondern spaltet ihn im Blut und in der Leber über entsprechende Enzyme. Formaldehyd wird zu Essig-, Propion- und Ameisensäure umgewandelt und kann entweder im Urin ausgeschieden oder zu Kohlenstoff und Wasser metabolisiert werden. Im Sommer 2004 jedoch wurde Formaldehyd aufgrund einiger durchgeführter Untersuchungen in den USA von der International Agency for Research on Cancer (IARC) als karzinogen eingestuft (IARC, 2004). Aufgrund dieser Ergebnisse wurde eine Reklassifizierung des Formaldehyds von „krebsverdächtig“ zu „krebserregend“ durch das IARC empfohlen (THOLE, 2006) Bei den durchgeführten Untersuchungen in amerikanischen Betrieben der Holzwerkstoffindustrie wurde eine selten auftretende Form von Nasenkrebs attestiert, die nach dem aktuellen Stand der Untersuchungen auf sehr hohe Formaldehydkonzentrationen in den Produktionsstätten zurückzuführen ist (MARUTZKY, 2005).

Für die Holz be- und verarbeitenden Betriebe, besonders die Holzwerkstoffindustrie, ist die Entwicklung von naturnahen Bindemitteln aus nachwachsenden Rohstoffen ein wichtiges



Kriterium, das unter anderem in den kommenden Jahren auch über die Wettbewerbsfähigkeit der einzelnen Unternehmen entscheiden wird. Allein für die Herstellung von Span- und Faserplatten werden in der Bundesrepublik Deutschland zur Zeit jährlich ca. 750.000 t Kunstharze verwendet (KHARAZIPOUR, 2004). Die Holzwerkstoffindustrie ist somit der größte und zugleich wichtigste Abnehmer von technischen Bindemitteln. Aufgrund dieser Tatsachen sind Bestrebungen seitens der Bindemittelhersteller zu erkennen, formaldehydarme bzw. formaldehydfreie Bindemittel für die Herstellung von Holzwerkstoffen zu entwickeln. Zurzeit wird bereits von einigen Herstellern technischer Bindemittel vorgeschlagen, den sehr geringen Japanischen Formaldehydstandard, den so genannte F\*\*\*\*, auch als Europäischen Standard für Span- und Faserplatten anzustreben (DUNKY, 2005).

Eine zukunftsorientierte Produktion unter Verwendung nachhaltiger Rohstoffe, welche die Holzwerkstoffindustrie bereits heute vorbildlich durch die Verwendung verschiedener Sortimente in Bezug auf den Rohstoff Holz realisiert hat, muss in Zukunft auch auf die zur Herstellung der Holzwerkstoffe notwendigen Bindemittel ausgedehnt werden. Bei der Entwicklung eines naturnahen Bindmittels aus nachwachsenden Rohstoffen sollen jedoch nicht nur unternehmenspolitische Aspekte sondern auch die Ansprüche der Verbraucher an innovative Holzwerkstoffe berücksichtigt werden.

Dabei werden durch den Einsatz von naturnahen Bindemitteln aus nachwachsenden Rohstoffen zur Herstellung von Holzwerkstoffen sowohl eine kostenoptimierte Produktion realisiert als auch die bestehende Wettbewerbsfähigkeit der Unternehmen gewährleistet, da durch die Verwendung dieser Bindemittel keine Abhängigkeit mehr vom Rohöl und den daraus hergestellten Produkten besteht. Des Weiteren bietet die Verwendung naturnaher Bindemittel aus nachwachsenden Rohstoffen den Holzwerkstoffunternehmen die Möglichkeit zu umweltpolitisch akzeptierten Produktionsverfahren sowie durch die Herstellung und den Verkauf gesundheitlich unbedenklicher, formaldehydfreier Produkte zu einer breiteren Akzeptanz in der Bevölkerung.

## **1.1 Entwicklung der Faserplatten**

Natürliches Holz weist in vielen Anwendungsbereichen deutliche Nachteile gegenüber Holzwerkstoffen auf. Ein bekanntes Beispiel ist die Anisotropie des Vollholzes, die sich in unterschiedlichen Anwendungsbereichen negativ auswirkt und somit eine Verwendung von

Vollholz für bestimmte Zwecke ausschließt. Ein weiteres Kriterium sind die Festigkeiten von gewachsenem Holz und Holzwerkstoffen. So beträgt die Festigkeit quer zur Faser nur ca. 1/20 bis 1/10 der Festigkeit längs zur Faser (NOWAK et al., 1949). Vollholz hat jedoch Vorteile bei einer Beanspruchung längs zur Faser, aber zum Einsatz als Flächenelement ist es nicht geeignet.

Ziel der Holztechnologie ist es daher, flächige und homogene Werkstoffe aus Holz zu entwickeln, die gute Eigenschaften zur Beanspruchung als Flächenelement aufweisen. Der Begriff Holzwerkstoffe umfasst unterschiedliche Produkte, die auf der Basis von mechanisch zerkleinertem bzw. aufgeschlossenem Holz (Furnieren, Spänen, Fasern) entstehen, das unter Verwendung von Bindemitteln, Druck und Hitze wieder zusammengefügt wird. Durch die Umwandlung des Holzes in Holzwerkstoffe wird die Anisotropie des Vollholzes, das Quellen und Schwinden unter Feuchtigkeits- und Temperatureinfluss, zum größten Teil aufgehoben (KIRCHNER und KHARAZIPOUR, 1999).

Die Gruppe der wichtigsten, weltweit produzierten Holzwerkstoffe bildet sich aus:

- Spanplatten und Spanformteilen
- Mitteldichten Faserplatten (MDF)
- Oriented Strand Boards (OSB)
- Sperrholz und Sperrformteilen
- Wood Plastic Composites (WPC)

Die Verfahren zur Papierherstellung waren der erste Ansatz zur Herstellung von Faserplatten. Im Jahre 1772 führte der Engländer CLAY erste Versuche zur Herstellung dickerer Papiersorten, dem so genannten papier maché, durch. Diese dickeren Papiersorten sollten als großflächiges, nicht flexibles, steifes Bauelement beim Bau von Häusern, Möbeln und Türen eingesetzt werden. Durch die von CLAY verwendeten Rohstoffe, Abfälle aus der Papier- und Celluloseproduktion, zur Herstellung von papier maché, wird ersichtlich, dass man schon damals bemüht war, Abfallstoffe durch Zerfaserung wirtschaftlich zu verwerten. Erst mit der Einführung des Holzschleifens und des damit verbundenen Anfalles an Schleifresten setzte man Holz als Rohstoff zur Herstellung des papier maché ein.

Die maschinellen Voraussetzungen zur Herstellung von Faserplatten wurden jedoch erst um 1799, durch die Erfindung der Langsiebmaschine von den Brüdern FOURDRINIER, geschaffen. Die industrielle Fertigung halbharter Faserplatten aber setzte sich erst ca. 100 Jahre später in England in Gang. In Amerika wurden um 1901 in Minnesota Isoliermatten für Bauzwecke

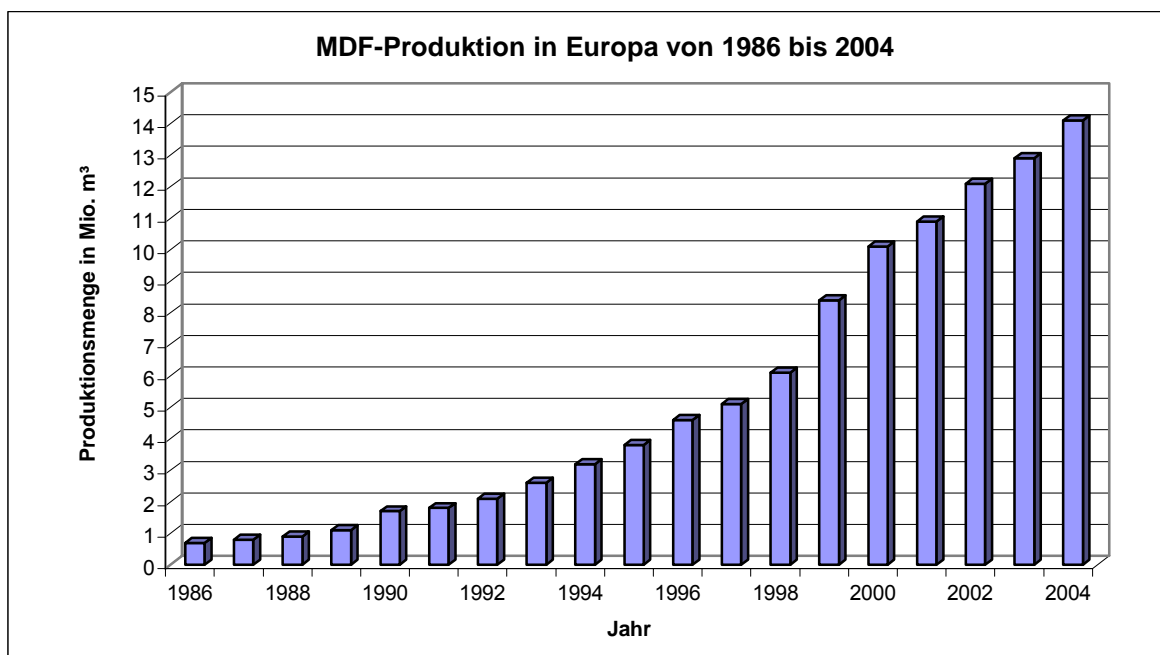
hergestellt. 1914 wurde mit Erfolg die erste Versuchsanlage zur Produktion poröser Faserplatten aus Holzabfällen gebaut (LAMPERT, 1966).

In Amerika bildete sich daraufhin eine Industrie, obwohl noch kein einwandfreies Verfahren zur Zerfaserung des Holzes vorlag. Zur Nutzung der riesigen Mengen an Abfallspänen in den Sägewerken der USA entwickelte MASON 1926 ein Dampfexplosionsverfahren, welches das plastische Verhalten des Holzes bei Temperaturen um die 220 °C nutzt (LAMPERT, 1966). In einer verschließbaren Röhre werden die feuchten Späne erhitzt, bis sich ein Dampfdruck von 20-30 bar aufbaut. Durch das anschließende Öffnen der Röhre entlädt sich das Gemisch explosionsartig. Das Ergebnis ist ein moosartiger Faserstoff, aus dem erstmalig auch harte Faserplatten produziert werden konnten (BERGMANN, 1998). Durch die hydrolytischen Vorgänge und die Plastifizierung des Lignins bei den hohen Dampfdrücken war es möglich, diese Platten ohne Bindemittel oder andere chemische Zusätze herzustellen (LAMPERT, 1966). Einige Zeit später entwickelte ASPLUND das Defibrator-Verfahren. Dieses Verfahren arbeitet mit geringeren Temperaturen und geringerem Druck als das von MASON entwickelte Dampfexplosionsverfahren. Dabei wird feuchtes Holz bei Temperaturen um die 160 °C - 180 °C erhitzt und bei einem Druck von 8 bar - 11 bar von gegenläufigen Mahlscheiben zerfasernd (BERGMANN, 1998). Das Dampfexplosions-Verfahren sowie das Defibrator-Verfahren werden heute zur Herstellung von Faserstoff angewendet, da mit beiden Verfahren qualitativ hochwertiger Faserstoff mit den von der Industrie geforderten technischen und physikalischen Eigenschaften produziert werden kann.

Die Mitteldichte Faserplatte ist ein Ergebnis technologischer Entwicklungen in den USA. Die erste Anlage entstand 1965 bei der Firma Allied Chemical in Deposit, New York (DEPPE und ERNST, 1996). Es waren hauptsächlich zwei Gründe ausschlaggebend, die eine Entwicklung von MDF-Platten forcierten. Zum einen waren dies die Nachteile der in den USA hergestellten Hartfaserplatten (Siebrückseite, fehlende Dimensionsstabilität, relativ niedrige Festigkeit, hohes Gewicht, geringe Plattendicken), die nur eine begrenzte Anwendbarkeit zuließen. Daher war das Substitutionspotential gegenüber dem in den USA dominierendem Sperrholz rasch erreicht. Ein anderer entscheidender Grund war, dass aufgrund von Rohstoffbasis und Verfahrenstechnologie schlechte Qualitätsniveau der in den USA produzierten Spanplatten. Durch diese Umstände war eine Marktlücke für einen flächigen und homogenen Werkstoff, der ohne größere Probleme im Möbel- und Innenraumbereich einsetzbar war, geschaffen (DEPPE und ERNST, 1996). Der Rohdichtebereich der hergestellten Mitteldichten Faserplatten lag zwischen 600 kg/m<sup>3</sup> und 900 kg/m<sup>3</sup>. Die Platten wurden in

einer Stärke von 3 mm bis 100 mm produziert. Nach einiger Zeit war es möglich, dünnere Platten auch im Kalander-, Texpan- oder Controll-Doppelband-Pressverfahren mit einer Rohdichte, die zwischen den minimal leichteren Spanplatten und den schwereren Hartfaserplatten lag, zu produzieren.

Dass eine Marktlücke für Mitteldichte Faserplatten bestand, zeichnete sich bereits früh in der Entwicklung des ungebrochenen Wachstums der Produktionskapazität ab. Obwohl die Mitteldichte Faserplatte zu Produktionsbeginn zum Teil deutlich teurer war als die dreischichtige Spanplatte, was auf die unterschiedlichen Material-, Energie- und Kapitalkosten der einzelnen Länder zurückzuführen war, gab es in allen MDF produzierenden Ländern ein kontinuierliches Produktionswachstum. Die Produktion von Mitteldichten Faserplatten lag laut der EUROPEAN PANELBOARD FEDERATION (2004) im Jahre 2003 europaweit bei 12,9 Mio. m<sup>3</sup> (vgl. dazu Abbildung 1-1), wovon ca. 2,5 Mio. m<sup>3</sup> in Deutschland hergestellt wurden. Für das Jahr 2004 wurde ein Produktionsvolumen von 14 Mio. m<sup>3</sup> prognostiziert (EUROPEAN PANELBOARD FEDERATION, 2004).



**Abbildung 1-1: MDF-Produktion von 1986 bis 2004 (EUROPEAN PANELBOARD FEDERATION, 2004)**

Vergleicht man dabei die Vorteile der Mitteldichten Faserplatten mit den Eigenschaften der dreischichtigen Standard-Spanplatten, so ist mit einer weiteren Produktionssteigerung in den kommenden Jahren zu rechnen. Die Vorteile der MDF-Platten, beispielsweise die Möglichkeit von direkten Oberflächen- und Kantenfräsarbeiten, der Direktlackierung oder des Direktbedruckens sowie das Entfallen von An- und Umleimern, verschafft ihnen einen

Vorsprung gegenüber dreischichtigen Spanplatten. Besonders deutlich kommt dies in den Bereichen der Möbelindustrie und des Baugewerbes zum Ausdruck, da diese die Hauptverwendungszwecke für Mitteldichte Faserplatten darstellen (vgl. Abbildung 1-2). Laut der EUROPEAN PANELBOARD FEDERATION (2004) werden 54 % aller produzierten MDF-Platten in der Möbelindustrie weiterverarbeitet, 29 % der Mitteldichten Faserplatten werden im Baugewerbe eingesetzt.

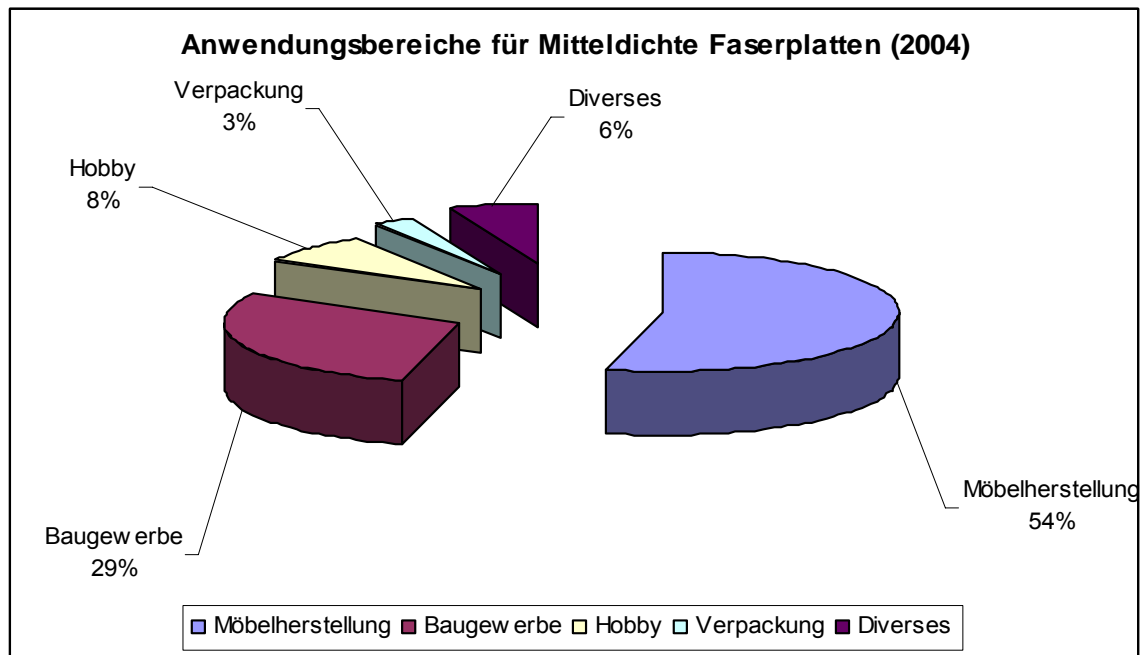


Abbildung 1-2: Verwendungszwecke für MDF-Platten (EUROPEAN PANELBOARD FEDERATION, 2004)

## 1.2 Zielsetzungen der Arbeit

Ziel dieser Dissertation ist es, in Zusammenarbeit mit der Firma CERESTAR Deutschland, Krefeld und der Firma PFLEIDERER Holzwerkstoffe GmbH & Co. KG, Neumarkt ein naturnahes Bindemittel aus nachwachsenden Rohstoffen auf Proteinbasis zur Herstellung von Mitteldichten Faserplatten, zunächst im Labor- und später auch im Pilotmaßstab, zu entwickeln. Durch den Einsatz von Weizenprotein, das ganzjährig als Nebenprodukt bei der Glucosesirupherstellung aus Weizen anfällt, soll ein neuer, attraktiverer Anwendungsbereich für dieses Nebenprodukt erschlossen werden. Zurzeit findet dieses Nebenprodukt nur eine unzureichende Anwendung als Zusatzstoff in der Futtermittelindustrie.

Die Versuche werden auf der Pilot-MDF-Anlage des Niedersächsischen Kompetenznetzwerkes zur Nachhaltigen Holznutzung (NHN) im Technikum in Göttingen

durchgeführt. Es werden zu Vergleichszwecken auf der Pilot-MDF-Anlage auch Harnstoff-Formaldehyd-Harz gebundene Mitteldichte Faserplatten produziert damit ein direkter Vergleich von UF-Harz und Protein gebundenen MDF-Platten möglich ist. Ziel dieses Dissertationsvorhabens ist es das Proteinbindemittel bzw. die Herstellungsparameter soweit zu optimieren, dass die mit Protein hergestellten Mitteldichten Faserplatten die gleichen bzw. bessere mechanisch-technologische Eigenschaften aufweisen, wie die mit Harnstoff-Formaldehyd-Harz gebundenen Vergleichsfaserplatten.

Ein weiteres Ziel dieser Arbeit ist es, den Einsatz des Weizenproteinleims als Formaldehyd-Fängersubstanz zu erforschen. Dazu werden Proteinleim und Harnstoff-Formaldehyd-Harz bzw. Proteinleim und Phenol-Formaldehyd-Harz in unterschiedlichen Mengenverhältnissen gemischt und als Leimflotte für die Herstellung von Mitteldichten Faserplatten verwendet. Durch die Variation der Mischungsverhältnisse soll einerseits ermittelt werden in welchem Umfang das naturnahe Bindemittel auf Weizenproteinbasis den nicht gebundenen Formaldehyd absorbieren kann und andererseits in welchem Grad konventionelle Bindemittel substituiert werden können ohne die mechanisch-technologischen Eigenschaften der Mitteldichten Faserplatten negativ zu beeinflussen.

Ein weiteres wichtiges Ziel bei der Herstellung der Protein gebundenen Mitteldichten Faserplatten ist es, die normale Anlagentechnik mit den üblichen im Refiner aufbereiteten Holzfasern beizubehalten, um komplizierte und kostenintensive Anlagenumbauten an bestehenden industriellen Großanlagen zu vermeiden. Die Pilot-MDF-Anlage des NHN ist die erste Anlage in Deutschland mit der die Möglichkeit der vollautomatischen Auflockerung, Trocknung und Beleimung des Fasermaterials sowie die anschließende Streuung des Faservlieses in Anlehnung an industrielle Fertigungsprozesse im Pilot-Maßstab realisiert werden kann. Aufgrund der Anlagenkonstruktion ist ein späterer Transfer vom Pilot- in den Industriemaßstab unter Beibehaltung der Produktionsparameter realisierbar.

Dieser Arbeit liegt der Gedanke zugrunde, die auf petrochemischer Basis produzierten konventionellen Kunstharze durch ein naturnahes Bindemittel aus nachwachsenden Rohstoffen auf Proteinbasis weitestgehend zu substituieren. Dabei liegt das Hauptaugenmerk auf den Harnstoff- und Phenol-Formaldehyd-Harzen, den zurzeit wichtigsten konventionellen Bindemitteln bei der industriellen Herstellung von Mitteldichten Faserplatten und anderen Holzwerkstoffen.

## 2 Theoretische Grundlagen

### 2.1 Holz

Holz ist ein natürlicher und nachwachsender Rohstoff der weltweit verfügbar ist. Es ist zum einen aufgrund seiner anatomischen Struktur und zum anderen wegen seiner chemischen Zusammensetzung ein stabiler Werkstoff, der in vielen Bereichen aufgrund seiner mechanisch-technologischen Eigenschaften Anwendung findet. Aus diesen Gründen nehmen die Wälder für die Industriezweige weltweit eine bedeutende Stellung als Rohstoffquelle ein. Holz ist laut DEPPE und ERNST (2000) bei der Produktion von Mitteldichten Faserplatten der zurzeit bedeutendste Rohstoff.

Für die Forstwirtschaft ist es daher eine zentrale Aufgabe Holz weltweit nachhaltig zu produzieren, um auch in Zukunft einen sicheren Holzvorrat und damit das Bestehen vieler Industriezweige zu gewährleisten (WEGENER, 2004). Neue Studien der Bundeswaldinventur<sup>2</sup>, erhoben über den Zeitraum von 1987 bis 2002, zeigen, dass Deutschland zu den walddreichsten Ländern in Europa zählt. Basierend auf diesen Erkenntnissen ist Deutschland mit einem Gesamtholzvorrat von 3,381 Mrd. m<sup>3</sup> führend innerhalb der Europäischen Union. Gefolgt wird Deutschland von Schweden mit einem Holzvorrat von 2,928 Mrd. m<sup>3</sup> und Finnland mit einem Vorrat von 2,892 Mrd. m<sup>3</sup>. In Deutschland sind 11,1 Mio. ha, dies entspricht in etwa einem Drittel der Gesamtfläche, bewaldet. Jährlich werden in Deutschland 9,0 m<sup>3</sup>/ha Holz eingeschlagen, 12,6 m<sup>3</sup> wachsen jährlich pro ha nach. Dadurch ergibt sich ein Zuwachs von 3,6 m<sup>3</sup>/a/ha. Der Holzzuwachs, bezogen auf die letzten 15 Jahre, liegt 39 % über dem Einschlag; dadurch stieg der gesamte Holzvorrat in Deutschland um durchschnittlich 17 % (BUNDESMINISTERIUM FÜR VERBRAUCHERSCHUTZ, ERNÄHRUNG UND LANDWIRTSCHAFT, 2005).

#### 2.1.1 Anatomischer Aufbau des Holzes

Laub- wie auch Nadelbäume sind aus vielen unterschiedlichen Zellen aufgebaut. Pflanzliche Zellen bestehen aus lebendem Zellplasma, einem Zellkern und Plastiden. Zu diesen Bestandteilen sind in den Zellen noch Vakuolen und leblose Einschlüsse, meist Fette und Harze, eingelagert (WAGENFÜHR, 1999). Jede Zelle wird von der Mittellamelle, einer aus Pektin und Lignin (vgl. Kapitel 2.1.3.1) gebildeten Schicht, umschlossen. Im Laufe des Zellwachstums lagern sich an die Mittellamelle beidseitig die Primärwände, die unter

anderem aus Cellulose (vgl. Kapitel 2.1.3.2) bestehen, an. Die Ausdifferenzierung der Zelle einschließlich der daran angelagerten Primärwand und Mittellamelle ist erst beendet, wenn die Zelle die ihrer Funktion entsprechende Größe und Form erreicht hat. Danach bilden sich in der Zelle die so genannten Sekundärwände, die hauptsächlich aus Lignin (vgl. Kapitel 2.1.3.1) und Hemicellulose (vgl. Kapitel 2.1.3.3) bestehen. Die Bildung von Sekundärwänden ist die Verholzung der Zellen. Sie trägt wesentlich zur Festigung bei und schließt das Wachstum ab (SCHÜTT et al., 1992). Die Entstehung und einzelnen Bestandteile der Mittellamelle sowie der Primär- und Sekundärwand werden noch in Zusammenhang mit den Hauptbestandteilen des Holzes im Kapitel 2.1.3 detailliert erläutert.

Zahlreiche Zellen mit gleicher Funktion und Morphologie werden im Holz zu Geweben zusammengefügt. Dabei werden die Gewebe hinsichtlich ihrer Hauptfunktion unterteilt. Es entstehen so drei zentrale Gewebe aus denen Holz gebildet wird. Dies sind das *Leit-*, das *Festigungs-* und das *Speichergewebe*. Die einzelnen Gewebearten, unterteilt nach ihrer Funktion, sind in Tabelle 2-1 aufgelistet.

**Tabelle 2-1: Aufbau der verschiedenen Gewebearten bei Laub- und Nadelhölzern (LOHMANN, 1998)**

<b>Funktion</b>	<b>Laubholz</b>	<b>Nadelholz</b>
Leiten	Tracheen	Tracheiden (Frühholz)
Stützen	Sklerenchym	Tracheiden (Spätholz)
Speichern	Parenchym	Parenchym

## 2.1.2 Chemische Holzzusammensetzung

Die chemische Zusammensetzung des Holzes kann generell hinsichtlich der *chemischen Elementarzusammensetzung* und der Zusammensetzung nach den *chemischen Holzhauptbestandteilen* (vgl. Kapitel 2.1.3.1 bis 2.1.3.3) unterteilt werden. Holz besteht bezogen auf seine chemischen Elemente hauptsächlich aus Kohlenstoff, Sauerstoff, Wasserstoff und Stickstoff (vgl. dazu auch Tabelle 2-2). Beim Vergleich unterschiedlicher Baum- bzw. Holzarten ist festzustellen, dass keine extremen Varianzen bei der Elementarzusammensetzung bestehen. Auch der Aufbau der einzelnen Baumteile, wie Wurzeln, Stämme und Äste, ist hinsichtlich seiner Elementarzusammensetzung sehr gleichmäßig (LOHMANN, 1998).

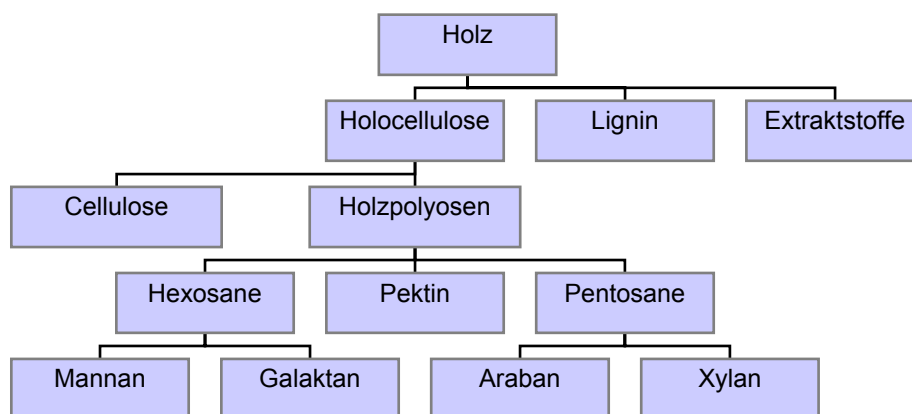


**Tabelle 2-2: Elementarzusammensetzung des Holzes (LOHMANN, 1998)**

Chemisches Element	Anteil an der Gesamtmasse atro (%)
<i>Kohlenstoff (C)</i>	50
<i>Sauerstoff (O)</i>	44
<i>Wasserstoff (H)</i>	6
<i>Stickstoff (N)</i>	0,05 - 0,25

Die Gruppe der chemischen Holzbestandteile (vgl. Abbildung 2-1) ist wesentlich umfangreicher als die chemische Elementarzusammensetzung. Zu ihr gehören im Wesentlichen die Komponenten Lignin, Cellulose, Holzpolyosen und Extraktstoffe, die in den Kapiteln 2.1.3.1 folgende und 2.1.4 näher beschrieben werden. Wie in Abbildung 2-1 ersichtlich, sind je nach Art der Zusammensetzung bei einzelnen Bestandteilen noch weitere Unterteilungen vorzunehmen. Dies ist beispielsweise bei der Betrachtung der Holzpolyosen von Nadel- und Laubhölzern von Bedeutung. AUGUSTIN und PULS (1982) berichten, dass die Entstehung von Holzpolyosen bei Nadelhölzern vorwiegend auf Mannanen, einer Vorstufe der Hexosane, basiert, die Hemicellulosen von Laubhölzern hingegen aus Xylanen, einer Vorstufe der Pentosane, gebildet werden.

Grundlegend unterscheidet sich die Zusammensetzung der Holzhauptbestandteile von der Elementarzusammensetzung des Holzes. Lignin ist beispielsweise mit einem Gehalt von 64 % Kohlenstoff wesentlich kohlenstoffreicher, dafür mit einem Sauerstoffgehalt von 30 % jedoch deutlich sauerstoffärmer als in der Elementarzusammensetzung (vgl. Tabelle 2-1) aufgeführt. Cellulosen und Hemicellulosen hingegen sind mit Kohlenstoffgehalten von 44 % - 45 % und Sauerstoffgehalten von 48 % - 49 % kohlenstoffärmer und sauerstoffreicher (ROFFAEL et al., 2004).

**Abbildung 2-1: Übersicht über die chemischen Holzbestandteile (LOHMANN, 1998)**

Bei Betrachtung der chemischen Hauptbestandteile des Holzes in Tabelle 2-3 fällt auf, dass diese Komponenten hinsichtlich ihres Anteils an der Gesamtmasse wesentlich höheren Schwankungen unterliegen als die einzelnen Elemente im Holz (vgl. Tabelle 2-2). Die Zusammensetzung der chemischen Holzbestandteile unterscheidet sich nach Holzart, Standort, Alter usw. signifikant (LOHMANN, 1998). Die Veränderung der chemischen Hauptbestandteile Lignin, Cellulose und Hemicellulose im Holz hat direkte Auswirkungen auf die physikalisch-chemischen sowie technologischen Eigenschaften des Holzes (ROFFAEL et al., 2002, ROFFAEL et al., 2004).

**Tabelle 2-3: Chemische Hauptbestandteile von Baumarten der gemäßigten Zone (LOHMANN, 1998)**

Chemischer Bestandteil	Anteil an der Gesamtmasse atro (%)
<i>Lignin</i>	18-30
<i>Cellulose</i>	42-51
<i>Hemicellulose</i>	24-40
<i>Extraktstoffe</i>	1-10
<i>Asche</i>	0,2-0,8

### 2.1.3 Aufbau der verholzten Zellwand

Die verholzte Zellwand ist eine Entwicklung der Pflanzen, die im Zuge der Landbesiedelung immer weiter optimiert wurde. Zum Schutz vor der an Land vorherrschenden permanenten Verdunstung und weiterer Störfaktoren hat sich die verholzte Zellwand der Pflanzen aus Zellwänden und Leitsystemen entwickelt, um ein Überleben an Land zu ermöglichen.

Bei der Betrachtung der Eigenschaften von pflanzlichen Zellwänden im Verbund ist festzustellen, dass diese Höhen-Durchmesser-Verhältnissen stand halten, die bisher noch mit keinem von Menschen konstruierten Werkstoff realisiert werden konnten (HÜTTERMANN und KHARAZIPOUR, 1993). Die optimale Stabilität im Zellwandverbund, beispielsweise bei einem Baum oder einem Getreidehalm, wird einerseits durch maximale Druck- und Zugfestigkeiten sowie andererseits durch eine maximale Elastizität erreicht. Verantwortlich für dieses optimale Verhältnis sind die chemischen Hauptbestandteile Lignin, Cellulose und Holzpolyosen, die bereits kurz in Kapitel 2.1.2 angesprochen wurden. Lignin ist im Aufbau von Pflanzen verantwortlich für die Druckfestigkeit, Cellulose für die Zugfestigkeit und die im Holz befindliche Hemicellulose sorgt durch die Verbindung von Lignin und Cellulose für eine ausreichende Elastizität.

Die Cellulose bildet zusammen mit einem Teil der Holzpolyosen das Gerüst des Holzgefüges. Dabei werden diese Bestandteile durch das Lignin zusammengehalten. Es fungiert als eine Art Kittsubstanz (LOHMANN, 1998). Wie bereits erwähnt basiert die Ausdifferenzierung der einzelnen Zellen immer auf der Ausbildung einer Mittellamelle, einer Primärwand und einer mehrschichtigen Sekundärwand. Diese drei chemischen Schichten der pflanzlichen Zellen sollen in den nächsten Absätzen näher erläutert werden. Danach werden dann in den folgenden Kapiteln 2.1.3.1 bis 2.1.3.3 die Hauptbestandteile des Holzes im Hinblick auf ihren chemischen Aufbau sowie ihre Wirkungsweise im pflanzlichen Zellverbund erklärt.

Die im Durchschnitt ca. 2  $\mu\text{m}$  dicke Mittellamelle besteht größtenteils aus Pektinen und Lignin und stellt eine feste Verbindung benachbarter Zellen im pflanzlichen Zellverbund dar (BERGMANN, 1998). Der Ligninanteil ist in der Mittellamelle, bezogen auf das Gesamtgewicht der Mittellamelle am pflanzlichen Zellverbund, prozentual am höchsten. Bis zu 70 % dieser Schicht bestehen aus Lignin (ROFFAEL et al., 2004). Die Lignifizierung, d.h. die Lignineinlagerung der verholzten Zellwand beginnt bei der Mittellamelle und greift anschließend auf die Primär- und Sekundärwände der angelagerten Zellen über (BERGMANN, 1998).

Bereits vor und während der Zellausdifferenzierung sind Primärwände an beiden Seiten der Mittellamelle angelagert. Primärwände bestehen hauptsächlich aus Cellulose. Des Weiteren werden Hemicellulosen und Glykoproteine, so genannte Makromoleküle bestehend aus Kohlenhydraten und Eiweiß, für den Aufbau der Primärwände verwendet. In den Primärwänden werden Pektine eingelagert, die für die Elastizität dieser Zellschicht verantwortlich sind. Die Menge an Pektin variiert jedoch und daher besitzen nicht alle Primärwände die gleiche Elastizität (WAGENFÜHR, 1999).

Die Lignifizierung, der mehrschichtigen Sekundärwände, bestehend aus Lignin, Hemicellulosen und Cellulose, geschieht erst nach der vollständigen Ausdifferenzierung der Zelle. Da der Celluloseanteil in den Sekundärwänden höher ist als in der Primärwand und keine Pektine oder Glykoproteine in diesen Zellschichten vorhanden sind, handelt es sich bei den Sekundärwänden um starre und nur schwer dehnbare Zellwände (BERGMANN, 1998). Die Sekundärwand ist durch die sperrholzartige Anordnung der Cellulosefibrillen in drei Schichten ( $S_1$ - $S_3$ ) zu unterteilen. Durch diese Anordnung erhält die Sekundärwand zusätzliche Stabilität. Die drei Schichten  $S_1$ - $S_3$  sind vor allem durch die unterschiedlich dicken und verschieden angeordneten Cellulosefibrillen zu unterscheiden (WAGENFÜHR, 1999).

### 2.1.3.1 Lignin

Lignin gehört zur Gruppe der Phenole, die bei allen Pflanzen anzutreffen und in sämtlichen Pflanzenteilen, d.h. in den Wurzeln, der Sprossachse, den Blättern, Blüten und Früchten, eingelagert sind. Der Begriff Phenole umfasst eine Reihe von Verbindungen, die alle eine Hydroxylgruppe (-OH) am aromatischen Ring tragen. Der aromatische Ring besteht aus sechs Kohlenstoffatomen, die über Doppelbindungen verknüpft sind. Das Makromolekül Lignin ist vorwiegend in den Mittellamellen und den S<sub>2</sub> Zellwänden lokalisiert. Aufgrund der diffizilen Molekülstruktur des Lignins kann in Laub- und Nadelholzlignin unterschieden werden, wobei Nadelholz grundsätzlich einen höheren Ligninanteil aufweist als Laubholz (FENGEL und WEGENER, 2003).

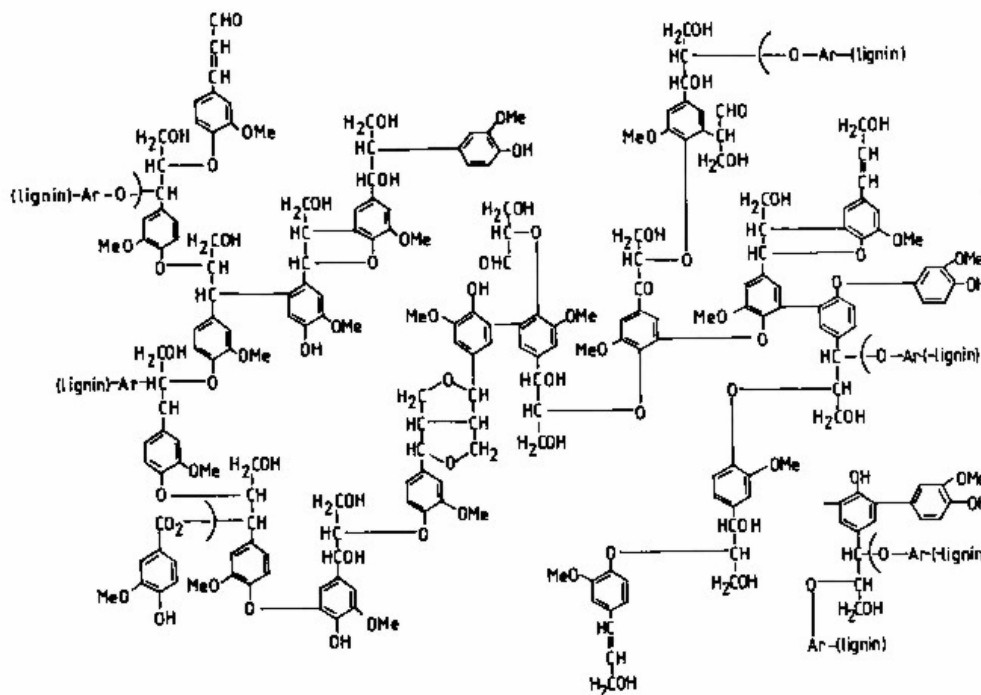


Abbildung 2-2: Strukturmodell von Fichtenlignin (ADLER, 1977)

Jährlich werden ca.  $2 \cdot 10^{10}$  t Lignin produziert; dies entspricht ungefähr 25 % der gesamten terrestrischen Biomasse. Damit ist Lignin hinsichtlich des Produktionsvolumens nach Cellulose ( $2 \cdot 10^{12}$  t pro Jahr) mengenmäßig die wichtigste organische Substanz. Die Bildung von Lignin erfolgt durch dehydrierte Polymerisation der drei Monomere Coniferylalkohol, Sinapylalkohol und p-Coumarylalkohol. Dabei sind nicht immer alle Alkohole mengenmäßig gleich vertreten. Je nach Pflanzenart sind die Anteile der drei oben genannten Alkohole im Lignin unterschiedlich. (SITTE et al., 1998). Auch Laub- und Nadelhölzer unterscheiden sich hinsichtlich des mengenmäßigen Vorkommens dieser sekundären Phenylpropane, welche die

Ligninvorstufen darstellen. Laubholzlignin weist einen hohen Sinapylalkoholanteil auf, während das Lignin der Nadelhölzer (vgl. dazu auch Abbildung 2-2) überwiegend aus der Vorstufe Coniferylalkohol synthetisiert wird. Gräser und Getreide, wie beispielsweise das Strohlignin, sind grundsätzlich durch einen hohen Anteil an Coumarylalkohol charakterisiert (MOHR und SCHOPFER, 1992).

Die hauptsächliche Bedeutung des Lignins liegt in der Druckfestigkeit und Steifheit, die es den Zellwänden verleiht. Dieses hydrophobe Makromolekül ist der Hauptbestandteil der Mittellamelle und dient als Kittsubstanz für das Cellulosegerüst in Pflanzen und Bäumen (RAVEN, et al., 2000). Der Ligningehalt von Bäumen, bezogen auf die gesamte Trockenmasse, variiert grundsätzlich nach Baumart, Standort, Alter, etc. Allgemein kann jedoch für Laubhölzer der gemäßigten Zonen ein Ligningehalt von 18 bis 22 % und für Nadelhölzer der gemäßigten Zonen ein Ligningehalt von 25 bis 30 % zu Grunde gelegt werden (ROFFAEL et al., 2002).

### 2.1.3.2 Cellulose

Cellulose (vgl. Abbildung 2-3) ist der Hauptbestandteil von Pflanzen und Bäumen, der maximal bis zur Hälfte der gesamten Trockenmasse ausmachen kann. Dies ist sowohl bei Laub- als auch bei Nadelhölzern der Fall, obwohl durchschnittlich im Laubholz ein leicht geringerer Cellulosegehalt vorherrscht. Das Polymer Cellulose besitzt ein sehr hohes Molekulgewicht und wird ausschließlich aus der  $\beta$ -D-Glucose gebildet. Aufgrund seiner chemischen und physikalischen Eigenschaften nimmt es im Aufbau der Zellwände von Pflanzen und Bäumen eine sehr wichtige Stellung ein (FENGEL und WEGENER, 2003).

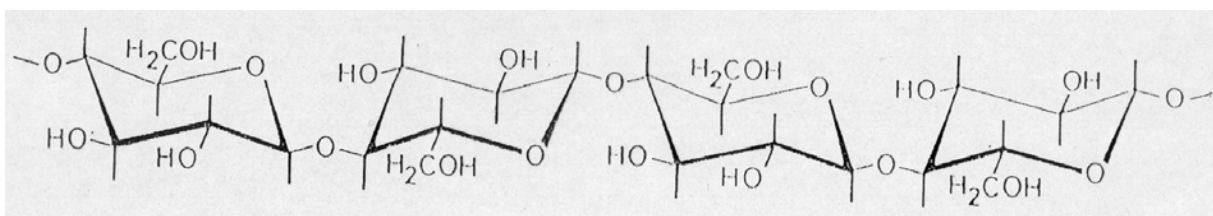


Abbildung 2-3: Struktur der Cellulose (KHARAZIPOUR, 1996)

Das Polysaccharid Cellulose ist mit einer jährlichen Produktion von  $2 \cdot 10^{12}$  t mengenmäßig die am stärksten vertretene organische Substanz auf Erden (MOHR und SCHOPFER, 1992). Durch das Aneinanderlagern von vielen linearen, unverzweigten Kettenmolekülen entstehen

Mikrofibrillen. Die Mikrofibrillen schlingen sich umeinander und bilden durch diese Konstruktion feine Kabel mit Durchmessern von ungefähr  $0,5 \mu\text{m}$  (RAVEN et al., 2000). Aufgrund ihrer Anordnung sind die Mikrofibrillen vor Angriffen durch chemische Stoffe und Wasser geschützt (MOHR und SCHOPFER, 1992). Bedingt in der Linearität und der mäßig kristallinen Molekülform der Cellulose ist dieser chemische Hauptbestandteil verantwortlich für die Zugfestigkeit von Pflanzen und Bäumen (OKAMURA, 1991).

### 2.1.3.3 Holzpolyosen

Die Holzpolyosen stehen in enger Verbindung mit der Cellulose in den Zellwänden von Pflanzen und Bäumen. Sie werden vorwiegend aus fünf neutralen Zuckern, den Hexosen Glucose, Mannose und Galactose sowie den Pentosen Xylose und Arabinose im pflanzlichen Stoffwechsel synthetisiert (vgl. auch Abbildung 2-1). Im Vergleich zu Cellulose sind die Molekülketten wesentlich kürzer; sie besitzen zudem Seitengruppen und sind unter Umständen verzweigt. Laubholz weist im Gegensatz zu Nadelholz durchschnittlich einen höheren Anteil an Holzpolyosen auf (FENGEL und WEGENER, 2003).

Die Holzpolyosen oder auch Hemicellulosen (vgl. Abbildung 2-4) genannt, treten in den zu erst gebildeten Wandschichten je nach Zelltyp und Pflanzengruppe in unterschiedlicher Form auf. Bei den Monokotylen, den einkeimblättrigen Blütenpflanzen, sind dies vorwiegend Xylane, bei den zweikeimblättrigen Blütenpflanzen, den so genannten Dikotylen, liegt die Hemicellulose hauptsächlich in Form von Xyloglucanen vor (RAVEN et al., 2000).

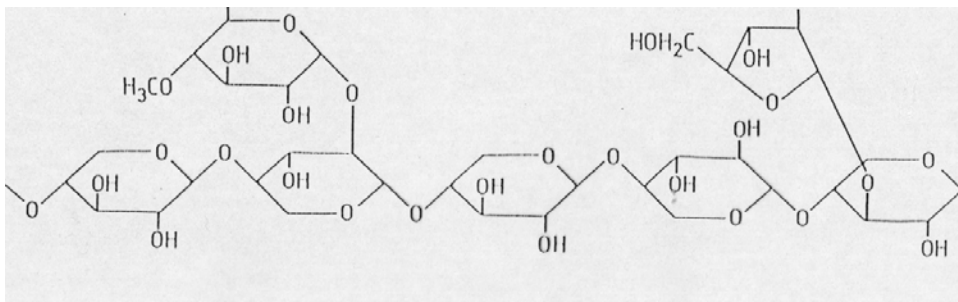


Abbildung 2-4: Struktur der Hemicellulose (KHARAZIPOUR, 1996)

Xyloglucane werden aus Ketten von vielen Glucoseeinheiten gebildet, an deren Seitenketten sich Xyloseeinheiten befinden. Diese Seitenketten werden bei den Xylanen hingegen durch Reste anderer Zucker, wie z.B. der Arabinose, ersetzt. Unabhängig von der Form der Holzpolyosen sind die Hemicellulosemoleküle grundsätzlich über Wasserstoffbrücken an

mehrere, umliegende Cellulosefibrillen gebunden (vgl. auch Kapitel 2.1.3.2). Sie vernetzen auf diese Weise die Fibrillen miteinander und begrenzen so die Ausdehnung der Zellwand. Hinsichtlich des Holzaufbaus sind die Holzpolyosen somit einerseits für die Stabilität der Cellulosefibrillen von zentraler Bedeutung und haben andererseits einen regulierenden Einfluss auf die Größenzunahme der Zellen (WAGENFÜHR, 1999).

#### **2.1.4 Nebenbestandteile des Holzes**

Holz enthält neben den in Kapitel 2.1.3.1 bis Kapitel 2.1.3.3 erläuterten Hauptbestandteilen weitere chemische Verbindungen. Bei diesen Verbindungen handelt es sich im Wesentlichen um Extraktstoffe, Inhaltsstoffe und akzessorische Bestandteile, die Auswirkungen auf das biologische, chemische und physikalische Verhalten des Holzes haben. Daneben haben sie auch auf die spätere Verwendung des Holzes einen bedeutenden Einfluss. Die Extraktstoffe werden in primäre und sekundäre Extraktstoffe unterteilt. Die primären Extraktstoffe kommen in jedem Baum vor, da sie zum pflanzlichen Stoffwechsel gehören; das Vorkommen von sekundären Extraktstoffen hinsichtlich ihrer Art und Zusammensetzung ist beschränkt auf einige bestimmte Holzarten (ROFFAEL und SCHÄFER, 2002).

Zu den primären Extraktstoffen, die hauptsächlich im Splintholz vorliegen, gehören beispielsweise Eiweiße, Fette und Kohlenhydrate. Auch der Reservestoff Stärke gehört zu den primären Extraktstoffen. Die primären Extraktstoffe sind in Mengen von 1 % bis 2 %, bezogen auf die gesamte, absolut trockene Holzmasse eines Baumes, im Holz vorhanden. Der Anteil dieser chemischen Verbindungen ist abhängig von der Jahreszeit und variiert daher im Jahresverlauf. GÄUMANN untersuchte den Zuckergehalt im Fichtenholz in Abhängigkeit der Jahreszeit. Dabei stellte sich heraus, dass der Zuckergehalt von April bis Juni relativ hoch ist und in den übrigen Monaten wieder abnimmt (GÄUMANN, 1928).

Sekundäre Extraktstoffe werden in den Strahlenparenchymzellen innerhalb der Splintholz-Kernholz-Umwandlungszone gebildet und anschließend in den umliegenden Tracheiden- und Gefäßzellwänden verteilt. Zu den sekundären Extraktstoffen gehören beispielsweise Harze, natürliche Polyphenole und Kautschuk. Sie sind in einheimischen Hölzern mengenmäßig zu ca. 2 % bis 5 %, bezogen auf trockenes Holz, vorhanden. Tropische und subtropische Hölzer hingegen können bis zu 40 % aus sekundären Extraktstoffen bestehen (ROFFAEL und SCHÄFER, 2002). NOACK (1963) stellte bei Untersuchungen an Eichen fest, dass die Bildung

von Kernholz stark mit einem Anstieg des Extraktstoffgehaltes korreliert ist. Dabei kann es durch die Einlagerungen der Extraktstoffe in diesen Zonen zu Rohdichteerhöhungen kommen (NOACK, 1963).

Der Zeitpunkt zu dem das Holz geschlagen wird - und der damit verbundene aktuell vorherrschende Gehalt an primären und sekundären Extraktstoffen - hat somit enorme Auswirkungen auf die physikalischen Eigenschaften des Holzes und der daraus hergestellten Produkte. Primäre und sekundäre Extraktstoffe wirken sich z.B. auf die natürliche Dauerhaftigkeit des Holzes aus und haben Einfluss auf die spätere Benetzbarkeit des Holzes mit Bindemitteln. Beispielhaft seien hier der positive Einfluss der primären Extraktstoffe auf die biologische Resistenz im Holz und die negativen Auswirkungen des zu hohen Zuckergehaltes im Holz auf die Festigkeiten der aus diesem Holz hergestellten zementgebundenen Spanplatten genannt. Des Weiteren beeinflussen die im Holz enthaltenen Extraktstoffe auch den mechanischen, halbmechanischen und chemischen Holzaufschluss, die Holztrocknung und die spätere Freisetzung umweltrelevanter Stoffe aus Holz und Holzprodukten (ROFFAEL und SCHÄFER, 2002).

Natürliche Polyphenole, so genannte Tannine, sind Extraktstoffe aus Hölzern, Rinden und Blättern unterschiedlicher Bäume, die in der Industrie unterschiedlich verwendet werden. Diese Tannine werden beispielsweise aus Kiefern-, Fichten-, Eichen-, Kastanien- und Quebrachoholz mit Hilfe unterschiedlicher Verfahren extrahiert. Bis zur Markteinführung synthetischer und mineralischer Gerbstoffe wurden die natürlichen Polyphenole aus der Eichen- und Fichtenrinde zum Gerben von Leder verwendet. Auch für Bindemittelformulierungen werden Tannine verwendet. Aus diesen natürlichen Polyphenolen kann in Kombination mit Formaldehyd ein Bindemittel hergestellt werden, das zur Produktion von Holzwerkstoffen genutzt werden kann. Tannine werden weiterhin in einigen Ländern aufgrund ihrer hohen Reaktivität gegenüber Formaldehyd als Härtungsbeschleuniger bei der Herstellung Phenol-Formaldehyd-Harz (vgl. Kapitel 2.2.2.1.2) gebundener Holzwerkstoffe eingesetzt (ROFFAEL und SCHÄFER, 2002).



## 2.2 Chemische Grundstoffe in der Holzwerkstoffindustrie

Die industrielle Herstellung von Mitteldichten Faserplatten basiert auf der Verwendung unterschiedlicher chemischer Grundstoffe. Diese chemischen Grundstoffe lassen sich in Bindemittel, Härter, Hydrophobierungsmittel und Hilfs- und Zuschlagstoffe differenzieren. Die Art und Zusammensetzung der unterschiedlichen chemischen Grundstoffe richtet sich nach den späteren Anwendungsbereichen und den daran gebundenen mechanisch-technologischen Anforderungen der hergestellten Mitteldichten Faserplatten. In den folgenden Kapiteln 2.2.1 bis 2.2.3 werden sowohl die Eigenschaften als auch die Zusammensetzungen der einzelnen chemischen Grundstoffe und ihre unterschiedlichen Wirkungsweisen erläutert.

### 2.2.1 Bindemittel

Der Begriff Bindemittel gehört wie viele andere Synonyme aus dem täglichen Sprachgebrauch zur Gruppe der Klebstoffe. Die unterschiedlichen Bezeichnungen haben ihren Ursprung häufig in alten Zunfttraditionen oder Anwendungsmöglichkeiten. In der Holzwerkstoffindustrie hat sich der Begriff Bindemittel etabliert und wird daher auch im Rahmen dieser Promotion synonym für den Begriff Klebstoff verwendet.

Nach DIN 16920 wird der Begriff Klebstoff als ein nichtmetallischer Stoff definiert, der Füge­teile durch Flächenhaftung und innere Festigkeit, d.h. durch Adhäsion und Kohäsion verbinden kann (DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG e.V., 1998 a).

Die vielen Bindemittelarten, die von der Industrie angeboten werden, lassen sich anhand ihrer unterschiedlichen, charakteristischen Merkmale nach differenzierten Ordnungsprinzipien systematisieren. Die beiden wichtigsten Ordnungsprinzipien sind dabei die chemische Basis und der Abbindemechanismus der Klebstoffe. Diese Ordnungsprinzipien sollen in den beiden folgenden Absätzen erläutert werden.

Bei der Einteilung der Klebstoffe hinsichtlich ihrer chemischen Basis lassen sich *organische* und *anorganische Verbindungen* unterscheiden. Die *organischen* Verbindungen sind aufgrund ihrer Elementarkomponenten in *natürliche Basis* (Eiweiße, Kohlenhydrate, Harze) und *künstliche Basis* (C-H-Verbindungen + Sauerstoff, Stickstoff, Chlor usw.) unterteilt. Die *anorganischen Verbindungen* umfassen keramische Bestandteile, Metalloxide, Silikate,

Phosphate und Borate. Eine Zwischenstellung nehmen in dieser Einteilung die *Silikone* ein. Sie stellen ihrer Art nach Verbindungen mit *organischen* und *anorganischen Merkmalen* dar.

Unterscheidungskriterien bei dieser Einteilung sind zum einen die unterschiedlichen Klebfestigkeiten innerhalb der organischen Verbindungen, die bei Klebstoffen auf künstlicher Basis wesentlich höhere Werte aufweisen und zum anderen die Verarbeitungs- und Anwendungstemperaturen. Klebstoffe auf organischer Basis besitzen eine geringere thermische Beständigkeit als Klebstoffe auf anorganischer Basis (HABENICHT, 1986).

Unterscheidet man Klebstoffe hinsichtlich ihres Abbindemechanismus, so ergeben sich zum einen die Gruppe der *chemisch reagierenden* und zum anderen die Gruppe der *physikalisch abbindenden Klebstoffe*. Zu den *chemisch reagierenden Klebstoffen* gehören die *Polymerisations-*, die *Polyadditions-* und die *Polykondensationsklebstoffe*. Diese Klebstoffe können sowohl kalt- als auch warmhärtend sein. Die *physikalisch abbindenden Klebstoffe* sind unterteilt in *Schmelz-* und *Lösungsmittelklebstoffe* und *Plastisole*.

Kriterien für eine Einteilung anhand des Abbindemechanismus sind der Molekülzustand des Bindemittels zu Beginn des Klebens und die Anzahl der an der Reaktion beteiligten Komponenten.

Bei den *chemisch reagierenden Klebstoffen* liegen Monomermoleküle in gleicher oder verschiedener Art vor, die zeit- und temperaturabhängig miteinander zu einer polymeren Klebeschicht reagieren. Bei den *physikalisch abbindenden Klebstoffen* liegen nur Polymerverbindungen vor, die mit Hilfe von hohen Temperaturen und/oder Lösungsmittelsystemen in einen benetzungsfähigen Zustand gebracht werden können. In der Klebefuge findet keine Reaktion mehr statt.

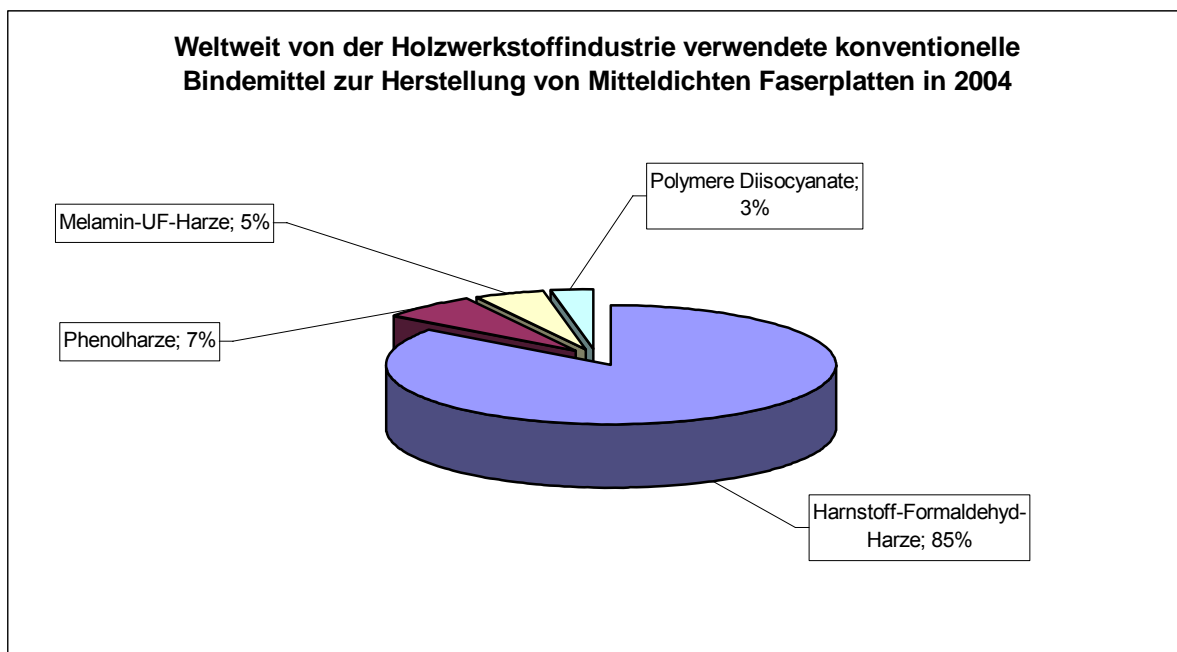
*Chemisch reagierende Klebstoffe* bestehen in der Regel aus zwei Reaktionspartnern. Gegebenenfalls kommen noch Beschleuniger oder Katalysatoren (vgl. Kapitel 2.2.3.1) hinzu. Da *physikalisch abbindende Klebstoffe* wie oben im Text erläutert nur aus einer Polymerverbindung bestehen, dient auch nur diese eine Komponente zum Verkleben. Sie heißen daher auch Einkomponentenklebstoffe (HABENICHT, 1986).

Bei der Herstellung von Mitteldichten Faserplatten werden von der Holzwerkstoffindustrie, je nach späterem Anwendungsbereich der Werkstoffe, unterschiedliche petrochemische Bindemittel eingesetzt. Aus der Abbildung 2-5 geht deutlich hervor, dass Harnstoff-Formaldehyd-Harze mit 85 % der Gesamtmenge den Großteil der in der Industrie

verwendeten konventionellen Bindemittel darstellen. Aufgrund des geringen Preises, des relativ breiten Anwendungsspektrums und der guten mechanisch-technologischen Eigenschaften der UF-Harz gebundenen Mitteldichten Faserplatten besitzen Harnstoff-Formaldehyd-Harze diese Vormachtstellung (EUROPEAN PANELBOARD FEDERATION, 2004).

Die Verwendung von Phenolharzen (7 %), Melamin verstärkten Harnstoff-Formaldehyd-Harzen (5 %) und polymeren Diisocyanaten (3 %) ist wesentlich seltener. Begründen lassen sich die Zahlen mit den folgenden Aspekten: Einerseits sind die Preise dieser Bindemittel im Vergleich zu Harnstoff-Formaldehyd-Harzen wesentlich höher – PF-Harze und MUF-Harze sind ca. doppelt so teuer wie UF-Harze, PMDI kostet das vierfache - und andererseits werden die mit den o. g. Bindemitteln hergestellten Faserplatten nur in geringen Mengen produziert, da es sich hierbei um so genannte Nischenprodukte handelt.

Die Herstellung dieser konventionellen Bindemittel, ihre Einteilung anhand der oben im Text erläuterten Ordnungsprinzipien und ihre Auswirkungen auf die mechanisch-technologischen Eigenschaften der hergestellten Mitteldichten Faserplatten sind in den Kapiteln 2.2.2.1.1 bis 2.2.2.2.5 beschrieben.



**Abbildung 2-5: Anteile der petrochemischen Bindemittel zur Herstellung von Mitteldichten Faserplatten (EUROPEAN PANELBOARD FEDERATION, 2004)**

## 2.2.2 Bindemittelarten

### 2.2.2.1 Konventionelle Bindemittel

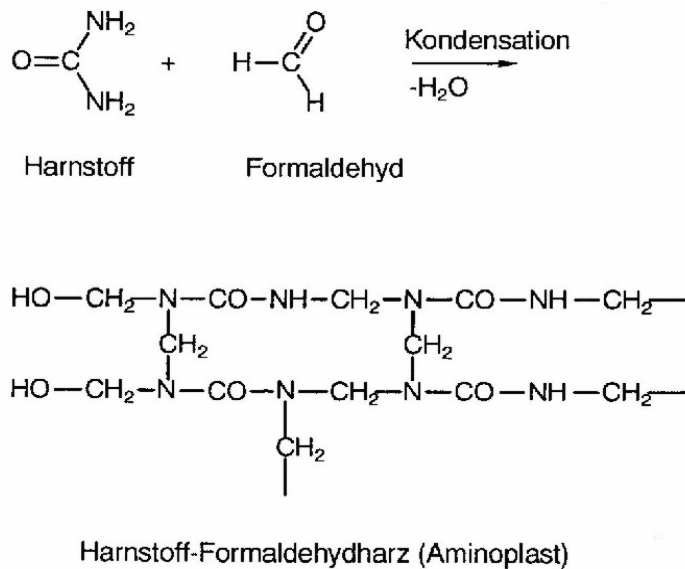
Die Harnstoff-, Melamin- und Phenol-Formaldehyd-Harze gehören zu den Polykondensationsklebstoffen, d.h. zu den chemisch reagierenden Klebstoffen (vgl. dazu auch Kapitel 2.2.1). Der grundlegende Unterschied der Polykondensationsklebstoffe im Vergleich zu den Polyadditions- und Polymerisationsklebstoffen, beispielsweise den polymeren Diisocyanaten, besteht darin, dass die Reaktion von zwei Monomermolekülen zu einem Polymermolekül unter Abspaltung eines einfachen Moleküls, z.B. Wasser oder Alkohol, erfolgt (HABENICHT, 1986).

#### 2.2.2.1.1 Harnstoff-Formaldehyd-Harze

Aufgrund ihrer Entstehungsreaktion und Polymerstruktur gehören die Harnstoff-Formaldehyd-Harze zu den Duromeren der Polykondensate (vgl. dazu auch Kapitel 2.2.1). Die Ausgangssubstanzen bei Polykondensaten sind Reaktionspartner gleichartiger oder unterschiedlicher Struktur. Eine Ausgangssubstanz verfügt grundsätzlich über eine reaktionsfähige Endgruppe (OH-Anordnung) oder eine reaktionsfähige Molekülgruppierung. Der Aufbau der Makromoleküle ist nicht ausschließlich auf Kohlenstoff-Kohlenstoff-Bindungen zurückzuführen, sondern auch auf Sauerstoff- und Stickstoffatome in der Hauptkette. Die UF-Harze reagieren wie alle Polykondensate nach dem Schema, dass die Reaktionspartner unter Abspaltung niedermolekularer Produkte verknüpft werden (HABENICHT, 1986).

Die erste Stufe bei der Herstellung von UF-Harz ist eine *Additionsreaktion* in einem wässrigen Medium, bei der sich der freie Formaldehyd (Methanal) an den Harnstoff bindet. Dies geschieht unter Bildung von Methylol- und Dimethylolharnstoff (DEPPE und ERNST, 1996).

Der zweite Schritt ist eine *Polykondensationsreaktion*, wobei das zuvor entstandene Gemisch unter Zugabe von Ammoniumchloridhärter oder Salzsäure angesäuert und erwärmt wird. Die Methylolharnstoffe kondensieren bei diesen Bedingungen, wie in Abbildung 2-6 dargestellt, unter der Ausbildung kettenförmiger und teilweise verzweigter höhermolekularer Kondensationsprodukte weiter (DEPPE und ERNST, 2000).



**Abbildung 2-6: Reaktion von Harnstoff und Formaldehyd zu UF-Harz (DEPPE und ERNST, 1996)**

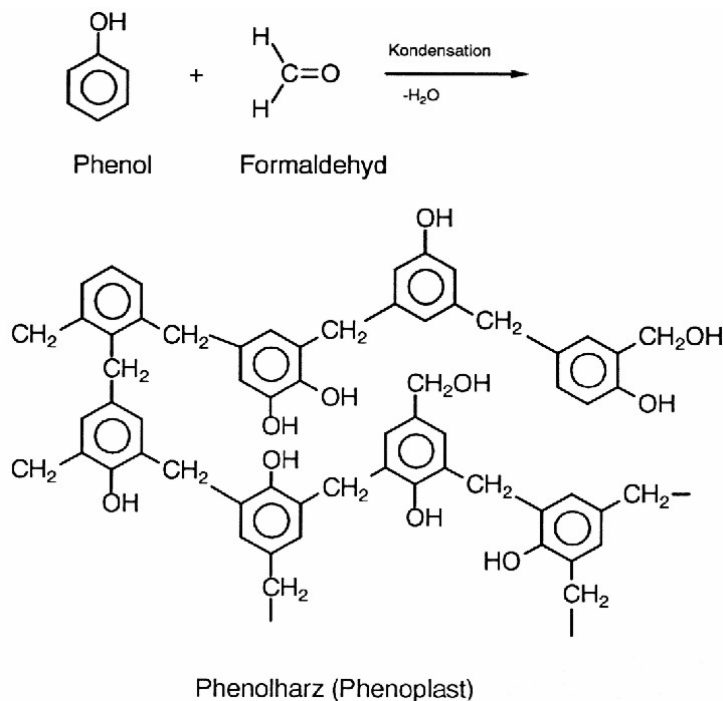
Durch die Neutralisierung des zugegebenen Ammoniumchloridhärters bzw. der Salzsäure wird die Polykondensation gestoppt. Der entstandene Rohleim wird abhängig von der späteren Verwendung entweder unter Vakuum konzentriert oder zu Pulverleim sprühgetrocknet (ZEPPENFELD, 1991). Bei der späteren Heißpressung der Mitteldichten Faserplatten läuft die zuvor abgebrochene Polykondensation des Harnstoff-Formaldehyd-Harzes extrem schnell ab und ein dreidimensionales Netzwerk von Polymeren entsteht.

Die Bindungskräfte der Harnstoff-Formaldehyd-Harze sind im Wesentlichen vom Molverhältnis Harnstoff zu Formaldehyd abhängig. Das Molverhältnis betrug bei den früher hergestellten UF-Harzen 1:1,4. Aufgrund des höheren Anteils an freiem Formaldehyd waren diese wesentlich reaktiver und länger lagerfähig im Vergleich zu den heute produzierten Harnstoff-Formaldehyd-Harzen. Durch die heute geltende Reglementierung bzgl. der Formaldehydemission aus Holzwerkstoffen war die Industrie jedoch gezwungen, das Molverhältnis auf 1:1,1 bis 1:1,2 zu senken (ZEPPENFELD, 1991). Holzwerkstoffe, die mit diesen Harnstoff-Formaldehydharzen hergestellt werden, zeichnen sich durch eine Formaldehydarmut aus, durch die der vorgegebene Grenzwert von 0,1 ml/m<sup>3</sup> (ppm) ohne eine Zugabe von Formaldehyd-Fängersubstanzen realisiert werden kann (BASF, 2000; BASF, 2002).

## 2.2.2.1.2 Phenol-Formaldehyd-Harze

Einerseits besitzen Phenol-Formaldehyd-Harze begründet in ihrer hohen Anpassungsfähigkeit an unterschiedliche Materialien das breiteste Anwendungsspektrum aller Kunstharze, andererseits finden sie hauptsächlich aufgrund ihres hohen Preises nur Anwendung bei der Herstellung von Nischenprodukten. Dies trifft auch bei der industriellen Herstellung von Mitteldichten Faserplatten zu, wobei die Phenol-Harze etwa 7 % der gesamten verwendeten petrochemisch hergestellten Bindemittel ausmachen (vgl. dazu auch Abbildung 2-5).

Die Phenol-Formaldehyd-Harze zählen, wie auch die UF-Harze, zu den Duromeren der Polykondensationsklebstoffe. Das diskontinuierliche Herstellungsverfahren von PF-Harzen beginnt mit einer *Additionsreaktion*, wobei Phenole mit Formaldehyd reagieren (vgl. Abbildung 2-7). Anschließend entstehen Phenol-Formaldehyd-Harze aus der Kondensationsreaktion zwischen Phenol und Formaldehyd (Wasserabspaltung) nach einem vergleichbaren Reaktionsschema wie die Harnstoff- und Melamin-Harze (vgl. Kapitel 2.2.2.1.1 und 2.2.2.1.3).



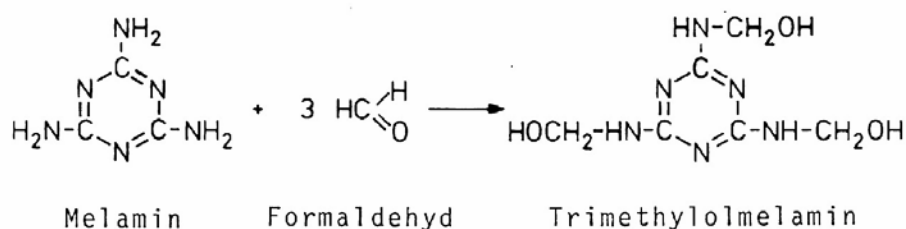
**Abbildung 2-7: Reaktion von Phenol und Formaldehyd**  
(DEPPE und ERNST, 1996)

Die Phenol-Harze weisen im Gegensatz zu den Harnstoff- und Melamin-Harzen nur sehr geringe Formaldehydemissionen auf, da sie den Formaldehyd während der Heißpressung in einer alkalischen Reaktion sehr fest einbinden. Die Feuchtebeständigkeit von PF-Harz

gebundenen Mitteldichten Faserplatten ist noch höher als die von Melamin-Harz gebundenen. Nachteilig wirken sich jedoch die langsamere Härtungsgeschwindigkeit und die daraus resultierenden längeren Presszeiten sowie die aufgrund der alkalischen Reaktion vorhandene, charakteristische dunkle Färbung aus, die zu Problemen bei einer späteren Lackierung führt. Aufgrund dieser Nachteile werden Phenol-Formaldehyd-Harze nur bei der Herstellung von Mitteldichten Faserplatten nach den Nassverfahren (vgl. Kapitel 2.4.1.1) eingesetzt, um spätere Lackierungsprobleme zu vermeiden (DEPPE und ERNST, 1996).

### 2.2.2.1.3 Melamin-Formaldehyd-Harze

Melamin-Formaldehyd-Harze entstehen, wie auch die Harnstoff-Formaldehyd-Harze, in einem kontinuierlichen Verfahren aus einer Polykondensationsreaktion (siehe Abbildung 2-8), was auch im chemischen Aufbau dieser Harze zu erkennen ist (vgl. Abbildung 2-6). Dabei reagiert das Melamin mit Formaldehyd unter Ausbildung von Methylolverbindungen. Theoretisch wäre dabei ein Molverhältnis von Melamin zu Formaldehyd von 1:6 möglich. Praktisch wird jedoch ein Verhältnis von 1:3 bevorzugt, um erhöhte Formaldehydemissionen bei der Verwendung Melamin-Formaldehyd-Harz gebundener Holzwerkstoffe zu vermeiden. Ein Unterschied bei der Herstellung von MF-Harzen verglichen mit UF-Harzen ist, dass die Kondensation in der Wärme ohne Säurehärter erfolgt (HABENICHT, 1986).



**Abbildung 2-8: Reaktion von Melamin und Formaldehyd (ADAM, 1988)**

Der wesentliche Vorteil der Melamin-Formaldehyd-Harze liegt in der besseren Feuchtebeständigkeit der hergestellten Holzwerkstoffe gegenüber Harnstoff-Formaldehyd-Harz gebundener Holzwerkstoffe (DEPPE und ERNST, 1996). Ein Nachteil der reinen MF-Harze ist ihre zeitlich sehr begrenzte Lagerfähigkeit von nur vier Tagen bei Raumtemperatur (ZEPPENFELD, 1991). Reine Melamin-Harze werden jedoch, unabhängig von der kurzen Lagerungsfähigkeit, allein aus Kostengründen industriell nicht eingesetzt. Mischkondensate, bestehend aus 45 % Melamin-Harz und 55 % Harnstoff-Harz, haben sich bei der industriellen

Herstellung von Mitteldichten Faserplatten etabliert (DEPPE und ERNST, 1996). Die mit Mischkondensaten produzierten Holzwerkstoffe weisen gegenüber allein mit Melamin-Harz gebundenen Holzwerkstoffen immer noch eine sehr gute Feuchtebeständigkeit auf und können aufgrund des geringeren Melamin-Anteils zu einem geringeren Preis angeboten werden.

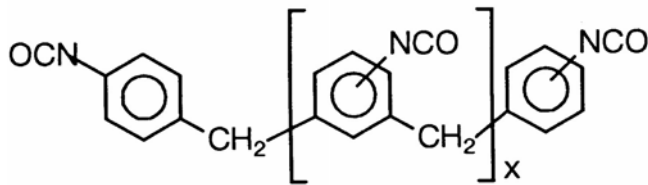
#### 2.2.2.1.4 Klebstoffe auf der Basis polymerer Diisocyanate

Hinsichtlich ihrer Entstehungsreaktion und Polymerstruktur gehören die organischen Isocyanate zu den Duromeren der Polyaddukte. Die Isocyanate besitzen, wie auch die Polykondensate, Reaktionspartner gleichartiger oder unterschiedlicher Struktur, die über reaktionsfähige Endgruppen oder Molekülgruppierungen verfügen. Der Aufbau der Makromoleküle in der Klebschicht erfolgt jedoch nicht nur über Kohlenstoff-Kohlenstoff-Bindungen, sondern auch über Sauerstoff- und Stickstoffatome in der Hauptkette. Hinsichtlich des Reaktionsmechanismus unterscheiden sich die organischen Isocyanate von den Duromeren der Polykondensate, da bei den Polyaddukten die Addition der Monomere unter Wanderung eines Wasserstoffatoms innerhalb der reagierenden Gruppen erfolgt. Dabei werden die Klebschichtbestimmenden Eigenschaften wie Festigkeit und Beständigkeit gegenüber chemischen Einflüssen, Elastizität und deformationsfähiges Verhalten durch gezielte Auswahl der Monomere bestimmt (HABENICHT, 1986).

Die zuvor beschriebenen Harnstoff-, Phenol- und Melamin-Formaldehyd-Harze erwirken einen Verklebungseffekt durch Adhäsion und mechanische Verzahnung der Holzpartikel mit dem Holz. Im Gegensatz dazu entstehen bei den organischen Isocyanaten zwischen dem Holz und dem Klebstoffstoff chemische Verbindungen, wobei die Reaktion dabei im Wesentlichen mit den freien OH-Gruppen des Holzes erfolgt. Durch dieses Reaktionsschema lassen sich sowohl die höheren Feuchtebeständigkeiten als auch die besseren mechanisch-technologischen Eigenschaften der PMDI-gebundenen Mitteldichten Faserplatten gegenüber den mit Kondensationsharzen hergestellten Faserplatten erklären. Ein weiterer Vorteil von organischen Isocyanaten ist, dass sie sowohl bei der Blowline- als auch bei der Mischerbeimung eingesetzt werden können. Nachteilig sind die deutlich höheren Herstellungskosten PMDI-gebundener Mitteldichter Faserplatten und der zwingende Einsatz eines Trennmittels, um ein Verkleben der Faserplatten mit den Pressblechen zu verhindern, da organische Isocyanate auch mit Metall Bindungen eingehen (DEPPE und ERNST, 1996).



Bei der industriellen Herstellung Isocyanat-gebundener Mitteldichter Faserplatten wird vornehmlich technisches MDI eingesetzt (vgl. hierzu auch Abbildung 2-9). Dieses besteht aus reinem Diphenylmethan-Diisocyanat und dessen Polymere (JOHNS et al., 1984, McLAUGHLIN et al. 1981).



**Abbildung 2-9: Diphenylmethan-4,4'-Diisocyanat**  
(DEPPE und ERNST, 1996)

### 2.2.2.2 Naturnahe Bindemittel

Da die fossilen Rohstoffe, insbesondere das Rohöl, immer knapper und teurer werden, ist die Holzwerkstoffindustrie sehr an der Entwicklung neuartiger, naturnaher Bindemittel aus nachwachsenden Rohstoffen interessiert. Durch die Entwicklung eines solchen Bindemittels würde die Holzwerkstoffindustrie wie auch weitere Industriezweige unabhängig von den konventionellen, auf Rohöl basierenden Bindemitteln, die auch in Zukunft immer weiter im Preis steigen werden. Die bei der Herstellung von Holzwerkstoffen verwendeten Bindemittel können bis zu 20 % der Gesamtkosten der Holzwerkstoffe ausmachen (KHARAZIPOUR, 2004) und stellen somit einen entscheidenden Kostenfaktor dar, der die Wettbewerbsfähigkeit der Unternehmen deutlich beeinflusst. Die Verwendung naturnaher Bindemittel aus nachwachsenden Rohstoffen würde sich jedoch nicht nur auf die Preispolitik der Holzwerkstoffhersteller vorteilhaft auswirken. Durch den Einsatz dieser Bindemittel würden sich die Hersteller eindeutig mit einer umwelt- und gesundheitsbewussten Holzwerkstoffproduktion identifizieren.

#### 2.2.2.2.1 Tannine

Tannine sind pflanzliche Extraktstoffe (vgl. dazu auch Kapitel 2.1.4) und gehören zu den Gerbstoffen, den pflanzlichen Polyhydroxyphenolen. Die Tannine sind sowohl in Wasser und verschiedenen Alkoholen als auch in Aceton löslich. Zur Verwendung von Extraktstoffen aus Mimosaceen (DALTON, 1953; PLOMLEY et al., 1976; PIZZI, 1982) und diversen Kiefernarten

(LIIRI et al., 1982; DIX und MARUTZKY, 1985) gibt es zahlreiche Forschungsarbeiten. Pflanzliche Phenole sind den synthetisch erzeugten Phenolen hinsichtlich ihrer Molekülstruktur sehr ähnlich. Aus diesem Grund können pflanzliche Phenole als Ausgangsmaterial für Holzleime verwendet werden (KHARAZIPOUR, 1996).

Das Rindenextrakt Tannin lässt sich in Verbindung mit Formaldehyd zu einem Harz umsetzen, dem Tanninharz. Diese Tanninharze sind in ihren Eigenschaften vergleichbar mit den Phenol-Harzen. Tannin-Formaldehyd-Harze werden seit 1982 zur Herstellung von Mitteldichten Faserplatten großtechnisch verwendet (MYERS, 1987). Ebenfalls wurde 1995 in Deutschland die industrielle Herstellung Tannin-Formaldehydharz gebundener Spanplatten aufgenommen. Die mit diesem Bindemittel hergestellten Werkstoffe zeichnen sich unter anderem durch geringe Formaldehydemissionen aus (ROFFAEL et al., 2001). Tanninharze stellen ein sehr kostengünstiges Bindemittel dar, mit dem kochfeste Vernetzungen realisiert werden können (JUNG und ROFFAEL, 1989; ROFFAEL und DIX, 1994).

#### 2.2.2.2.2 Enzyme

Enzyme sind substrat- und/oder wirkungsspezifische Katalysatoren biologischer Systeme. Durch eine Absenkung der für chemische Prozesse notwendigen Aktivierungsenergie beschleunigen Enzyme diese Reaktionen um viele Größenordnungen. Wirkungsspezifität bedeutet, dass ein Enzym durch eine Reaktion einen definierten Substratumsatz katalysiert. Katalysiert ein Enzym nur Reaktionen einer chemischen Verbindung oder einer Gruppe von annähernd gleichen chemischen Verbindungen, so handelt es sich um ein substratspezifisches Enzym (PRÄVE et al., 1994).

Wie schnell ein Enzym diese chemischen Reaktionen katalysiert, wird generell mit der Enzymaktivität eines Enzyms beschrieben. Die Arbeitsgeschwindigkeit von Enzymen ist im Allgemeinen sehr hoch. Ein Enzym kann unter optimalen Bedingungen pro Sekunde mehrere tausend Substratmoleküle verarbeiten. Die Geschwindigkeit ist jedoch im Wesentlichen von dem pH-Wert und der Temperatur abhängig. Der pH-Wert beeinflusst durch die Veränderung der Protonenkonzentration die Arbeitsgeschwindigkeit von Enzymen. Nach der RGT-Regel, der Korrelation von Reaktion, Geschwindigkeit und Temperatur, bewirkt eine Erhöhung der Temperatur um 10 °C eine Verdopplung der Reaktionsgeschwindigkeit. Eine Erhöhung der

Temperatur bewirkt jedoch auch die Auflösung der Disulfidbrücken des Enzyms, was ab einer gewissen Temperatur die Denaturierung des Enzyms zur Folge hat.

Die katalytische Aktivität der aus den Zellen ausgeschiedenen oder isolierten Enzyme bleibt unter optimalen Parametern erhalten. Auf diese Weise können Enzyme auch außerhalb des natürlichen Stoffwechselapparates genutzt werden, sofern die für die enzymatische Reaktion notwendigen Bedingungen vorhanden sind. Enzyme sind in der Regel zelleigene Proteine oder Proteide (PRÄVE et al., 1994).

Das Enzym Phenoloxidase, allgemein auch als Laccase bekannt, wurde 1883 durch YOSHIDA (1885) entdeckt. Die Bezeichnung Laccase geht auf das Vorhandensein der Phenoloxidasen im Lackbaum (*Rhus laquifera*) zurück. PEISACH et al. (1966) fanden heraus, dass die Phenoloxidasen sowohl aus Pflanzen und Pilzen als auch aus Bakterien isoliert werden können. Erstmals wurde die Laccase aus den Fruchtkörpern einiger Pilze isoliert (BETRAND, 1894). Darauf folgende Untersuchungen zeigten, dass die Weißfäulepilze (vgl. Kapitel 2.6.1), wie etwa die auf verrottendem Holz wachsenden Porlinge und Austernpilze, die besten Laccaseproduzenten sind. Mit Hilfe des Enzyms Laccase ist es diesen Pilzen möglich nahezu alle Holzbestandteile, auch das nur schwer zersetzbare Lignin, abzubauen. Dabei wird das Lignin durch relativ unspezifische radikalbildende Exoenzyme angegriffen und in Bruchstücke zerlegt. Der Abbau von Lignin verläuft zyklisch; dabei wechseln sich Depolymerisations- und Polymerisationsreaktionen ab (KHARAZIPOUR, 1996).

Aufgrund der Erkenntnis, dass die Laccase das im Holz vorhandene Lignin angreifen bzw. zersetzen kann, folgten zahlreiche Arbeiten zur Entwicklung eines naturnahen Bindemittels aus Laccase für die Herstellung von Holzwerkstoffen. Dabei gab es unterschiedliche Ansätze. Sowohl die Entwicklung eines naturnahen Bindemittels bestehend aus Laccase und Ligninsulfonat (HÜTTERMANN et al., 1977) als auch die direkte Aktivierung der holzeigenen Bindekräfte durch die Inkubation von Span- bzw. Fasermaterial mit Laccase wurden in diesen Forschungsansätzen untersucht (KHARAZIPOUR und HÜTTERMANN, 1993; KHARAZIPOUR, 1996; BERGMANN, 1998; KHARAZIPOUR und HAARS, 1998).

#### 2.2.2.2.3 Aktivierung der holzeigenen Bindestoffe

Angeregt durch die Diskussion über eventuell gesundheitsschädliche Auswirkungen von Formaldehydemissionen aus Holzwerkstoffen entwickelte sich bereits früh der Ansatz zur

Aktivierung der holzeigenen Bindestoffe. Ziel dieser Untersuchungen war es, konventionelle Bindemittel bei der Herstellung von Mitteldichten Faserplatten vollständig durch die Aktivierung der holzeigenen Bindestoffe zu ersetzen.

Bei diesem Verfahren werden durch eine abgestimmte Wärme- und Druckbehandlung das Lignin, die Cellulose und die Hemicellulosen im zuvor industriell gefertigten Faserstoff aktiviert. Aufgrund dieser thermischen Vorbehandlung lässt sich eine Bindung zwischen den Holzhauptbestandteilen im Fasermaterial realisieren, die den Einsatz weiterer konventioneller Bindemittel erübrigt. Die Versuche zeigten, dass die auf diese Weise hergestellten Holzwerkstoffe hinsichtlich der Quersugfestigkeiten durchaus mit Harnstoff-Formaldehyd-Harz gebundenen Werkstoffen vergleichbar waren. Es stellte sich jedoch heraus, dass bei diesem Verfahren im Vergleich zu UF-Harz gebundenen Mitteldichten Faserplatten höhere Presstemperaturen und Pressdrücke erforderlich waren (KHARAZIPOUR, 1983).

Die Möglichkeit die holzeigenen Bindestoffe für die Verklebung von Holzfasern zu aktivieren, kann aufgrund der damit verbundenen längeren Presszeiten und höheren Presstemperaturen im Vergleich zu Harnstoff-Formaldehyd-Harz gebundenen Mitteldichten Faserplatten im industriellen Maßstab nicht realisiert werden (DEPPE und ERNST, 1996).

#### 2.2.2.2.4 Stärke

Die Verwendung von Stärke als Bindemittelgrundstoff für die Verleimung von Holz wurde bereits in diversen Forschungsarbeiten untersucht. Ausgangsstoffe für die Stärkeleime sind vorzugsweise Produkte aus Kartoffeln, Getreide und Mais. Die Stärke ist bei all diesen Ausgangsmaterialien aus 1,4- $\alpha$ -D-glucosidisch gebundener Glucose aufgebaut und besteht einerseits aus dem hochmolekularen Amylopektin und andererseits aus der heißwasserlöslichen Amylose (MAYER, 1993).

Da die native Stärke aus Reis, Kartoffeln und Mais nicht kaltwasserlöslich ist, muss sie durch Alkalieinwirkung in eine lösliche Form überführt werden. Die Verkleisterung bei Stärke tritt erst ab einer Temperatur von ca. 65 °C ein. Durch unterschiedliche Molekülmodifikationen konnte das Einsatzgebiet der Stärke in den letzten Jahren erweitert werden. Anwendungsmöglichkeiten bei der Herstellung von Holzwerkstoffen sind beispielsweise Bindemittelformulierungen auf Basis von Stärkeleimen kombiniert mit Phenolharzen,

Melamin- oder Harnstoff-Formaldehydharzen, durch die bessere Bindefestigkeiten erzielt werden konnten (MÜLLER, 2005).

Bei den polymerisierenden Stärken wurden den Stärkemolekülen Acrylamidogruppen aufgepfropft, die über eine Strahlenhärtung zu einem Polymernetzwerk abbinden. Dadurch besitzen die polymerisierenden Stärken verbesserte Adhäsions- und Festigkeitseigenschaften sowie eine höhere Wasserstabilität verglichen mit den nativen Stärken (HINTERWALDNER, 1986).

Untersuchungen zur der Verwendung von Stärke haben ergeben, dass enzymatisch abgebaute und säurehydrolysierte Stärke in Kombination mit Tannin Leimharze ergeben, die als Bindemittel in der Holzwerkstoffindustrie verwendet werden können (DEPPE und ERNST, 2000). Die Verwendung von Kartoffelpülpe, d.h. der in der Pülpe vorhandenen Reststärke, als Bindemittel für die Herstellung von Mitteldichten Faserplatten stellt ebenfalls ein naturnahes Bindemittel aus nachwachsenden Rohstoffen dar. Dazu wird unter anderem die in der Pülpe enthaltene Stärke durch eine mechanisch-enzymatische Vorbehandlung freigelegt und ermöglicht auf diese Weise die Nutzbarmachung als Stärkeleim (MÜLLER, 2001; MÜLLER 2005).

#### 2.2.2.2.5 Proteine

Proteine sind Makromoleküle, die aus den 20 in der Natur vorkommenden Aminosäuren zusammengesetzt sind. Aminosäuren sind grundsätzlich aus einer Carboxylgruppe (-COOH), einer Aminogruppe (-NH<sub>2</sub>) und einem Rest aufgebaut. Der Rest ist bei jeder Aminosäure am mittleren C-Atom, welches die Carboxyl- und die Aminogruppe miteinander verbindet, lokalisiert. Dieser Rest entscheidet über die charakteristischen Merkmale einer Aminosäure. Ist beispielsweise eine zweite Carboxylgruppe am Rest angebunden, so handelt es sich um eine saure Aminosäure. Daneben gibt es noch basische und die am häufigsten vorkommenden, neutralen Aminosäuren (KINDL, 1991).

Die erste Stufe zum Bau eines Proteins stellen die Peptidbindungen dar. Über diese Bindungsform sind die Aminosäuren miteinander verknüpft. Die Peptidbindungen werden immer durch eine Kondensationsreaktion gebildet, d. h. unter Energieverbrauch werden kovalente Bindungen gebildet. Verbinden sich viele dieser Aminosäuren zu einem einzigen Molekül, so wird dieses als Polypeptid bezeichnet. Proteine sind große Polypeptid-

Makromoleküle, mit einem Molekulargewicht von  $10^4$  bis zu  $10^6$ . Die Proteine zeichnen sich, da sie aus mehreren tausend Aminosäuren aufgebaut sind, durch einen bestimmten strukturellen Aufbau aus. Die Primärstruktur ist in spiral- ( $\alpha$ -Helix) und zickzackförmige ( $\beta$ -Faltblatt) gewundene Bereiche aufgeteilt. Diese Bereiche sind wiederum untereinander gedreht und verwunden und bilden die Tertiärstruktur der Proteine. Erst diese Tertiärstruktur legt fest, ob es sich bei dem Protein um ein Strukturprotein oder ein Enzym bzw. ob es sich um ein globuläres oder um ein fadenförmiges Protein handelt (RAVEN et al., 2000).

Sowohl die physikalischen als auch die chemischen Eigenschaften der Proteine werden hauptsächlich durch ihre Aminosäuresequenzen und den darüber gelagerten Strukturen bestimmt. Zu den physikalischen Charakteristika der Proteine zählen neben den mechanischen Belastungen insbesondere die Kälte-, Wärme und Grenzflächenwirkungen, während zu den chemischen Einflüssen der pH-Wert, mehrwertige Metall-Ionen, organische Lösungsmittel und wässrige Lösungen von organischen Zusätzen wie Harnstoff, Tenside sowie Reduktions- und Oxidationsmittel gehören.

Da es sich bei allen in der Natur vorkommenden Aminosäuren um amphotere Verbindungen mit unterschiedlichen pH-Werten handelt, sind Proteine in der Lage, sowohl als Säuren als auch als Basen zu fungieren. Die amphoteren Verbindungen sind in der Tatsache begründet, dass die Aminosäuren, die Monomere der Proteine, stets über mindestens eine Carboxylgruppe (-COOH) und mindestens eine Aminogruppe (-NH<sub>2</sub>) verfügen. Die Seitenketten der Proteine entscheiden über das Löslichkeitsverhalten der Aminosäuren. Je nach Ausstattung der Seitenketten handelt es sich um hydrophobe, polare, zur Salzbildung oder zur Bildung von kovalenten Bindungen befähigte Gruppen.

Voraussetzung für die Verwendung von Proteinen als Bindemittel ist, dass es sich um natürlich lösliche Proteine handelt, die sich in eine unlösliche Form umwandeln lassen. Diese unlösliche Form kann entweder durch eine thermische Reaktion oder durch die Umsetzung mit einer reaktiven Komponente erzielt werden (KRUG, 2001a). Die durch chemische oder physikalische Einwirkung hervorgerufene Strukturveränderung wird auch als Denaturierung bezeichnet. Bei der Denaturierung entfalten sich die Polypeptidketten und die Tertiärstruktur des Proteins wird zerstört (ULRICH, 2002). Ein Beispiel dafür ist die Bindemittelformulierung von Sojaproteinen, die zunächst mit Natronlauge versetzt werden um eine Quellung zu bewirken. Nach dem Quellvorgang wird Kalziumhydroxid in gewissen Anteilen beigemischt, wodurch der Sojaproteinleim gelatiniert. Durch den Heißpressvorgang wird das Bindemittel dann in eine vollständig unlösliche Form gebracht (KRUG, 2001a). Dabei ist zu beachten, dass

die physikalische Denaturierung aufgrund von Hitzeeinwirkung durch Aggregation der denaturierten Proteinmoleküle irreversibel werden kann (NUHN, 1997).

Begründet in ihren vielfältigen charakteristischen Merkmalen werden seit geraumer Zeit Untersuchungen zur Verwendung von Proteinen als Bindemittel durchgeführt. Im Mittelpunkt der Untersuchungen standen und stehen dabei unterschiedliche Proteine, die entweder nach ihrer Rohstoffbasis oder nach ihrem Ursprung unterschieden werden. Dabei können die Proteine in vier Gruppen unterteilt werden:

- Albumine (Wasserlösliche Proteine, z.B. Blut- und Eiweißalbumin)
- Glutine (Tierisches Bindegewebe)
- Kaseine (Hauptbestandteil des Milcheiweißes)
- Pflanzliche Proteine (Mais-, Soja-, Weizenprotein)

Bei den verwendeten pflanzlichen Proteinen aus Mais, Soja oder Weizen handelt es sich in den meisten Fällen um reine Proteinmehle, die unter sehr hohem Arbeits- und Kostenaufwand hergestellt werden. Die Samen werden dazu geschält, getrocknet, gemahlen und anschließend mit Wasser versetzt. Durch eine Erhöhung des pH-Wertes auf 8-10 gehen diese Proteine dann in Lösung. Bedingt durch die anschließende Absenkung des pH-Wertes auf 4,5 fallen die Proteine aus und können von der Flüssigkeit getrennt werden. Durch die abschließende Neutralisierung des pH-Wertes können die Proteine dann zu Pulver sprüh- oder gefriergetrocknet werden (BIETZ und LOOKHART, 1996). Aufgrund des komplexen Herstellungsverfahrens sind diese Proteinpulver sehr teuer und daher für eine Verwendung als Bindemittel in der Holzwerkstoffindustrie aus Kostengründen nicht geeignet.

WEAKLEY et al. (1963) berichteten zu Anfang der 60er Jahre von einer Leimflotte, die sowohl aus pflanzlichen Proteinen als auch aus tierischen Albuminen bestand. Diese Leimmixtur aus Sojaproteinen und Blut wurde sehr erfolgreich und lange für das Heißverpressen von Pinienfurnieren in den USA eingesetzt.

Ein möglicher Einsatz von minderwertigen Getreidemehlen als Füllstoff und Streckmittel von Harnstoff-Formaldehyd-Harzen bei der Herstellung von Spanplatten wurde ebenfalls in Untersuchungen zu Beginn der 60er Jahre von DEPPE und ERNST (1964) sowie von ARNOLD (1964) erforscht. Zum Ende der 80er Jahre und zu Beginn der 90er Jahre wurden weitere Versuche von DIX und MARUTZKY (1988) als auch von ROFFAEL und DIX (1992)

durchgeführt, die den Einsatz von minderwertigen Getreidemehlen als Streckmittel für polymere Diisocyanate zum Ziel hatten.

In Untersuchungen zur Optimierung der Feuchtebeständigkeit von Harnstoff-Formaldehyd-Harzen mit tierischen Ei-Albuminen und Kollagen zur Verleimung von Sperrholz konnten WANG und PIZZI (1997) zeigen, das aufgrund einer Vernetzung der sekundären Aminogruppen aus der Proteinkette mit Formaldehyd und reaktiven Metholgruppen der Harnstoff-Formaldehyd-Harze ein Protein/UF-Gel entsteht, welches die Wasserresistenz der hergestellten Sperrhölzer wesentlich erhöht. Die verwendete Leimflotte bestand aus einem Ei-Albumin-Formaldehydleim, der zum zusätzlich verwendeten konventionellem Harnstoff-Formaldehyd-Harz beigemischt wurde.

SIRCH und KEHR (1997) führten Untersuchungen zur Eignung verschiedener pflanzlicher Proteine als Bindemittel zur Herstellung von einschichtigen Spanplatten und Mitteldichten Faserplatten durch. Dabei wurden vornehmlich Proteinisolate aus Soja, Mais und Weizen getestet. Die Ergebnisse der mechanisch-technologischen Eigenschaften der mit diesen unterschiedlichen, naturnahen Proteinleimen hergestellten Holzwerkstoffe ergaben, dass die mit Weizenproteinen gebundenen Spanplatten die besten Festigkeitseigenschaften aufwiesen. Die aus diesen Werkstoffen emittierten Mengen an Formaldehyd entsprachen der Formaldehydabgabe natürlich gewachsenen Holzes, da mit den naturnahen Proteinleimen kein zusätzlicher Formaldehyd zu den Werkstoffen hinzugegeben wurde.

Weiterführende Arbeiten von KRUG und SIRCH (1999) beschäftigten sich mit einer anteiligen Substitution von Phenol-Formaldehyd-Harz durch Weizenproteinisolate. Bei der Herstellung von 16 mm starken, einschichtigen Spanplatten führte eine 25 %ige Substitution von Phenol-Formaldehyd-Harz durch die eingesetzten Weizenproteine zu sehr guten Trocken- und Kochquerzugfestigkeiten. Weiterführende Forschungsarbeiten zur anteiligen Substitution von Phenol-Formaldehyd-Harzen durch Weizenproteine wurden später auch zur Herstellung von Mitteldichten Faserplatten durchgeführt (KRUG, 2003).

Bezüglich ihrer Dauerhaftigkeit sind die synthetischen Bindemittel den natürlichen Bindemitteln überlegen. Mit synthetischen und natürlichen Bindemitteln auf Sojaproteinbasis hergestellte Hochdichte und Mitteldichte Faserplatten, bestehend aus Holzfasern und Einjahrespflanzen, unterschieden sich hinsichtlich ihrer Dauerhaftigkeit erheblich. Die mit synthetischen Bindemitteln hergestellten Holzwerkstoffe zeigten eine deutlich höhere Widerstandsfähigkeit gegenüber natürlichen, äußeren Einflüssen (KUO et al., 1998).



KAMOUN et al. (1998) führten Untersuchungen durch, wobei sie Weizenmehle als Füllstoff in Phenol- und Harnstoff-Formaldehyd-Harz gebundenen Holzwerkstoffen einsetzten. Dabei stellte sich heraus, dass der Einsatz von Weizenmehl sowohl einen Einfluss auf die Harzaushärtung als auch auf die Festigkeiten der hergestellten Werkstoffe hatte. Aufgrund der Tatsache, dass durch die Stärkepolymere des Weizenmehls beim Verpressen ein verknüpftes Netzwerk entstand wurde das Weizenmehl auch als aktiver Füllstoff bezeichnet.

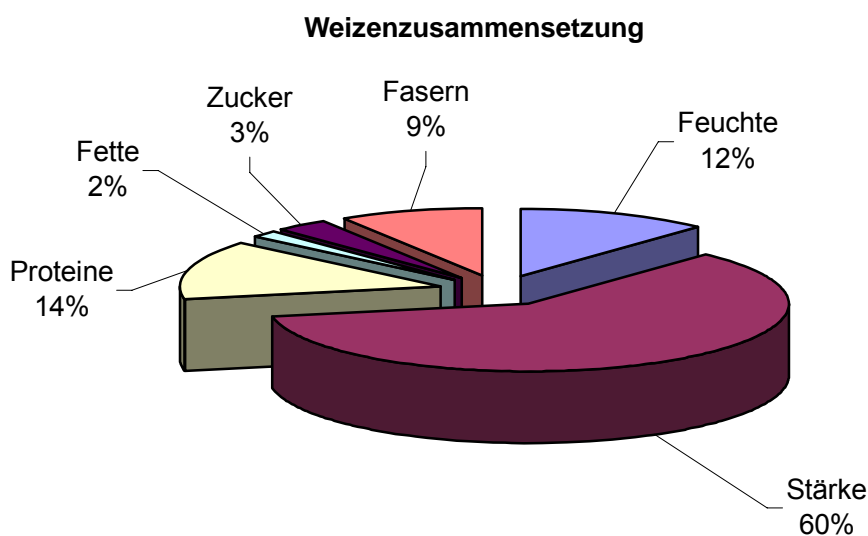
Neueste Untersuchungen beschäftigen sich beispielsweise mit dem Einsatz von Protein/Phenol-Harzen und Protein/Melamin-Harnstoff-Harzen im Holzbau (RÜHL, 2002) und der Verwendung von Proteinen als Bindemittel zur Herstellung von ein- oder mehrlagigen Massivholzplatten (KRUG u. WEBER, 2005).

Es ist festzustellen, dass sowohl tierische als auch pflanzliche Proteine als Grundstoff für die Entwicklung von natürlichen Bindemitteln und die Formulierung von Leimflotten geeignet sind. Vergleicht man den Einsatz von tierischen und pflanzlichen Proteinen jedoch unter rein ökologischen Gesichtspunkten, so erscheint die Verwendung von tierischen Proteinen als nicht sinnvoll. Alle tierischen Proteine sind genau genommen grundsätzlich pflanzlichen Ursprungs. Die Tiere können die über die Nahrung aufgenommenen pflanzlichen Proteine nach Abbau zu Aminosäuren zwar in ihren eigenen Proteinaufbau integrieren, der Wirkungsgrad liegt jedoch unter 5 % und ist daher energetisch nicht bedeutend (BORCHERDING und LUCK, 1995). Ein weiterer Grund, der die Verwendung pflanzlicher Proteine forciert, ist ihre ständige Verfügbarkeit. Bedingt durch die enormen Mengen an pflanzlichen Proteinen, die bei der ganzjährigen Stärkeherstellung anfallen, sind die pflanzlichen Proteine den tierischen Proteinen weit überlegen (KRUG et al., 2001 b).

Das in dieser Dissertation verwendete Weizenprotein der Fa. CERESTAR ist ein Produkt, das nur rein pflanzliche Weizenproteine als Rückstände enthält. Auch wenn es sich bei den Proteinen nur um Rückstände handelt, weist das Weizenprotein jedoch die oben im Text beschriebenen, charakteristischen Merkmale von Proteinen auf (CERESTAR, 2004). Da es sich um ein Nebenprodukt handelt, das bei der Glucosesirupherstellung anfällt, ist es ganzjährig verfügbar. Der Vorteil des Weizenproteins gegenüber den bereits beschriebenen Proteinbindemitteln ist, dass es sich hierbei bereits um eine Dispersion handelt, die ohne weitere kostenintensive und zeitaufwändige Modifizierungen als Bindemittel verwendet werden kann.

Laut aktueller (2004) Angaben der Stärkeindustrie fallen alleine in der Bundesrepublik Deutschland durchschnittlich 1,2 Mio. t Weizen (*Triticum aestivum*) pro Jahr an, die zur Herstellung von Stärke und Stärkederivaten genutzt werden (CERESTAR, 2004). Da der Einsatz von Stärke und modifizierten Stärkeprodukten in vielen Industriezweigen in den vergangenen Jahren enorm an Bedeutung gewonnen hat, ist in den kommenden Jahren auch mit einem steigenden Weizenanbau zu rechnen.

Weizensamen enthalten durchschnittlich 10 % - 14 % Proteine. Den Hauptbestandteil, mit einem Anteil von 60 % bis 65 %, bilden die Kohlenhydrate (FRANKE, 1997). Die Weizenproteine bestehen zu 44 % aus dem elastischen Glutein und zu 56 % aus dem viskosen Gliadin. Das Glutein ist dabei sowohl aus hoch- als auch aus niedermolekularen Anteilen aufgebaut, die wiederum über Disulfidbrücken und nicht kovalenten Bindungen zu Polymeren aggregiert sind. Die niedermolekularen Gliadine sind ausschließlich über nicht kovalente Bindungen miteinander verknüpft (BERGTHALLER, 1997).



**Abbildung 2-10: Prozentuale Weizenbestandteile (CERESTAR, 2004)**

Wie in Abbildung 2-10 dargestellt fallen bei der Stärkeverarbeitung bzw. Glucosesirupherstellung aus Weizenmaterial pro verarbeiteter Tonne durchschnittlich 14 % oder umgerechnet 140 kg Proteine in Form eines Nebenproduktes an, die zurzeit nahezu ungenutzt bleiben. Des Weiteren setzt sich dieses Nebenprodukt im Schnitt aus 9 % Fasern und 3 % Zucker zusammen. Die Fette sind bedingt durch die Herstellung der Stärke bzw. des Glucosesirups nicht im Nebenprodukt enthalten; der Feuchtegehalt von ursprünglich 12 % im Weizen erhöht sich auf bis zu 80 % im Nebenprodukt, da die Stärke aus dem

Ausgangsmaterial ausgewaschen wird und ein Großteil des dafür verwendeten Wassers im Nebenprodukt verbleibt.

Aufgrund unterschiedlicher Herstellungsverfahren und leichten Schwankungen in der Zusammensetzung des Ausgangsmaterials können die Werte bzgl. des Protein-, Zucker- und Fasergehaltes von den in Abbildung 2-10 dargestellten Angaben abweichen. Bedingt durch die enormen Mengen dieses Nebenproduktes, die während der Verarbeitung anfallen, ist die Stärkeindustrie zu erheblichen finanziellen Anstrengungen gezwungen, die sich von der Bereitstellung möglicher Lagerkapazitäten für dieses Material, über die Trocknung bis hin zu einem organisierten Verkauf des Nebenproduktes erstrecken.

## **2.2.3 Zugabestoffe**

### **2.2.3.1 Hydrophobierungsmittel**

Um ein Anquellen der Mitteldichten Faserplatten bei einer späteren Behandlung mit Wasserlacken oder wässrigen Leimen zu verhindern, werden Hydrophobierungsmittel bei der Herstellung der Faserplatten verwendet. Auch bei einer späteren Anwendung im Außen- oder Feuchtbereich ist die Verwendung von Hydrophobierungsmitteln unerlässlich.

Als Hydrophobierungsmittel wird dabei fast ausschließlich Paraffin eingesetzt, da sich der Einsatz anderer Wasserabweisender Stoffe, wie z.B. Metallseifen oder Silikone, als nicht erfolgreich herausstellte. Das Wachs wird dabei in Dosierungen von 0,3 % bis 1,0 %, bezogen auf absolut trockene Fasern, entweder als geschmolzenes Material direkt im Refiner oder als wässrige Dispersion bei der Blowline- bzw. der Mischerbeimung mit den Fasern vermischt (DEPPE und ERNST, 1996). Als Hydrophobierungsmittel werden in der vorliegenden Arbeit die beiden Paraffine HYDROWAX 138 und HYDROWAX 730 der Fa. SASOL, ehemals EXXON MOBIL, verwendet. Bei den beiden Paraffinen handelt es sich um Hydrophobierungsmittel, die in Form einer Dispersion vorliegen und direkt in die Leimflotten mit eingebracht werden können. Diese Paraffindispersionen werden in der Holzwerkstoffindustrie seit langer Zeit erfolgreich eingesetzt und unterscheiden sich nur geringfügig hinsichtlich ihres Feststoffgehaltes sowie ihrer Viskosität (SASOL WAX GmbH, 2003; SASOL WAX GmbH 2004a; SASOL WAX GmbH 2004b).

### **2.2.3.2 Härter und Beschleuniger**

Um ein vollständiges Aushärten der Harnstoff-Formaldehyd- und der Melamin verstärkten Harnstoff-Formaldehyd-Harze unter Temperatur- und Druckeinwirkung in der Heißpresse zu erzielen, werden von der Holzwerkstoffindustrie bei der Herstellung von Mitteldichten Faserplatten Härter verwendet. Da diese Aminoplastharze sauer katalysiert sind (siehe dazu auch Kapitel 2.2.2.1.1 und 2.2.2.1.3), muss es sich bei den benötigten Härtern um sauer reagierende Substanzen handeln (DEPPE und ERNST, 1996).

### **2.2.3.3 Formaldehyd-Fängersubstanzen**

Langfristige Formaldehydemissionen treten noch immer bei UF-, PF- und MUF-Harz gebundenen Holzwerkstoffen auf, obwohl das Molverhältnis in diesen Bindemitteln so weit wie technisch möglich von der Industrie reduziert wurde (vgl. dazu auch Kapitel 2.2.2.1.1 und 2.2.2.1.3). Da aufgrund verfahrenstechnischer Aspekte bei der Verklebung der Anteil des Formaldehyds immer noch gering höher sein muss als der des Harnstoffes wird nicht der gesamte Formaldehyd bei der Heißpressung gebunden.

Um Formaldehydausdampfungen zu vermeiden werden von der Holzwerkstoffindustrie bei der Herstellung von Mitteldichten Faserplatten Formaldehyd-Fängersubstanzen eingesetzt. Dazu wird in Dosierungen von 0,5 % bis maximal 5 % bezogen auf Flüssigharz Harnstoff in die Leimflotte beigemischt. Eine zu hohe Dosierung wirkt sich jedoch negativ auf das Quellverhalten unter Wassereinwirkung und die Festigkeiten der Holzwerkstoffe aus (DEPPE und ERNST, 1996).

### **2.2.3.4 Fungizide**

Sind Faserplatten langfristig einer feucht-warmen Umgebung ausgesetzt, so besteht die Gefahr einer Kontamination durch Pilzsporen. Um eine Besiedlung der Mitteldichten Faserplatten mit Pilzen zu vermeiden, ist der Einsatz eines Fungizids erforderlich. Dies ist vor allem bei MDF-Platten der Fall, die in Feucht- und Außenbereichen verwendet werden oder für spezielle Anwendungen unter extremer Feuchteeinwirkung vorgesehen sind.

Als Fungizide werden in der Holzwerkstoffindustrie Xyligen oder Kaliumhydrogenfluorid in unterschiedlichen Dosierungen, je nach späterem Anwendungszweck, eingesetzt (DEPPE und

ERNST, 1996). Fungizide liegen sowohl in Pulverform als auch in Form von Dispersionen vor und werden in den benötigten Mengen der Leimflotte bei der Herstellung der Werkstoffe beigemischt. Im Rahmen dieser Dissertation wird das Fungizidpulver MERGAL S 88 der FA. TROY zur Herstellung pilzgeschützter Faserplatten verwendet.

## **2.3 Aufschlussverfahren von Holz zur Herstellung von Faserplatten**

Der Begriff Faserstoff bezeichnet ein Material, das man erhält, wenn Holz oder andere lignocellulosehaltige Rohstoffe, zum Beispiel Ein- oder Mehrjahrespflanzen wie Hanf und Flachs, in die Grundelemente ihrer Zusammensetzung, d.h. sowohl in einzelne Fasern als auch in Faserbündel, aufgelöst werden.

Das in Kapitel 1.1 beschriebene Masonite- oder Dampfexplosions-Verfahren nach dem Amerikaner MASON und das nach dem Schweden ASPLUND benannte ASPLUND- oder Defibrator-Verfahren sind auch heute noch die grundlegenden Verfahren um qualitativ hochwertigen Faserstoff herzustellen.

### **2.3.1 Masonite- oder Dampfexplosions-Verfahren**

Die heute nach dem Masonite- oder Dampfexplosions-Verfahren arbeitenden Anlagen werden auch als Mason-Kanonen bezeichnet. Dabei werden die Hackschnitzel zuerst in Silos durch flächige Wasserbenetzung auf eine mittlere Feuchte von 50 % bis 60 % gebracht. Anschließend wird das befeuchtete Holzmaterial in die so genannten Mason-Kanonen transportiert. In den Mason-Kanonen wird nach dem Befüllen und dem luftdichten Verschluss ein Druck von ca. 70 bar und eine Temperatur von 300 °C aufgebaut. Durch das plötzliche Öffnen des Bodenventils wird der zuvor aufgebaute Druck schlagartig herabgesetzt. Aufgrund der explosionsartigen Entspannung und dem Aufschlag auf ein Auffangsieb lösen sich die Fasern und Faserbündel aus ihrem Verband. Das Ergebnis ist ein moosartiger und filziger Faserstoff. Bei diesem Verfahren ist, bedingt durch die plötzliche Druckentladung, eine Deformierung von Einzelfasern und Zellelementen charakteristisch. Die Ausbeute dieses Verfahrens liegt bei ca. 84 %. Die Verluste entstehen vor allem durch die hohen Aufschlusstemperaturen bei der Dampf-Druck-Behandlung der Holzsnitzel in Form von Ameisensäure, Essigsäure und Kohlendioxid.

### **2.3.2 ASPLUND- oder Defibrator-Verfahren**

Das Holz in Form von Hackschnitzeln wird in 160 °C bis 180 °C heißem Wasser bei einem Druck von 8 bar bis 12 bar aufgeschlossen. Nach der Plastifizierung gelangt das Material in einen Defibrator. Der Defibrator besteht aus zwei sich gegeneinander drehenden Mahlscheiben, zwischen denen das Material zerfasert wird. Dabei ist der Abstand zwischen den beiden Mahlscheiben entscheidend für die spätere Stärke und Länge des Fasermaterials. Bei der Zerfaserung herrscht im Defibrator ein konstanter Druck von 11 bar.

Gegenüber dem Masonite- oder Dampfexplosionsverfahren unterliegt das Holz bei den milderen Aufschlussbedingungen des ASPLUND- oder Defibrator-Verfahrens weniger chemischen Veränderungen. Die Vorteile des ASPLUND- oder Defibrator-Verfahrens sind ein hellerer Faserstoff, resultierend aus den geringeren Aufschlussstemperaturen, ein geringerer Verlust und damit eine höhere Ausbeute.

## **2.4 Hauptarbeitsstufen bei der Herstellung von Mitteldichten Faserplatten**

Als Rohstoff wird grundsätzlich Holz verwendet, aus dem nach Lagerung, Vorbehandlung und Zerkleinerung zu Hackschnitzeln, Faserstoff hergestellt wird (vgl. auch Kapitel 2.3.1 und Kapitel 2.3.2). Der Faserstoff wird anschließend mit einem Bindemittel (siehe Kapitel 2.2.2.1 und Kapitel 2.2.2.2) versetzt, dies geschieht entweder durch stationäre Mischerbeleimung oder durch das Blowline-Verfahren. Entscheidend bei beiden Beleimungsvarianten ist, dass der Sprühnebel des verwendeten Bindemittels bei der Beleimung eine Kegelform aufweist, um eine möglichst gleichmäßige Leimverteilung auf den Fasern zu gewährleisten. Verantwortlich für diese Kegelform ist zum einen die Viskosität der Bindemittel (vgl. dazu auch Kapitel 3.1.3.1) und zum anderen der Luftdruck mit dem die Leimflotten versprüht werden. Anschließend werden die beleimten Fasern auf die gewünschte Feuchte getrocknet und in einen Dosierbunker transportiert. Nach der Lagerung im Dosierbunker wird ein endloses Faservlies gestreut, das in einer Heißpresse (Mehretagenpresse, Conti-Pressanlage, etc.) bei definierten Pressparametern (Temperatur, Druck und Zeit) zu Faserplatten verpresst wird. Nach dem Pressvorgang werden die Mitteldichten Faserplatten thermisch nachbehandelt, klimatisiert, auf Format geschnitten und geschliffen. Anschließend werden sie sortiert und gelagert. Die Fasern bzw. Faserplatten werden während des Produktionsablaufes mit Hilfe von Luft, Transportschnecken und Transportbändern zu den einzelnen Produktionsstationen befördert.

### 2.4.1 Verfahrensvarianten bei der Herstellung von Mitteldichten Faserplatten

Die verschiedenartigen Fertigungstechnologien sowie die dazugehörigen Verfahrensabläufe zur Herstellung von Mitteldichten Faserplatten lassen sich grundsätzlich in drei Verfahrensvarianten unterteilen. Diese drei Verfahren sind:

- Nassverfahren
- Halbtrockenverfahren
- Trockenverfahren

Die Unterschiede zwischen den einzelnen oben genannten Verfahren liegen in der Endbehandlung, d.h. dem Pressen bzw. Trocknen des Faservlieses. Die Hauptarbeitsstufen, wie in Kapitel 2.4 beschrieben, sind bis zur Vliesbildung bei allen Verfahren analog. Erst nach der Vliesbildung muss eine spezielle, auf das Endprodukt ausgerichtete Behandlung durchgeführt werden. Ein wesentlicher, charakteristischer Unterschied zwischen den einzelnen Verfahren ist dabei der Feuchtigkeitsgehalt der Fasern vor und während der Vliesbildung. Aufgrund dieser unterschiedlichen Feuchtegehalte der Faservliese vor und während des Pressvorgangs in der Heißpresse hat jede Verfahrensvariante daher seine spezifischen Pressparameter.

#### 2.4.1.1 Nassverfahren

Das Faservlies beim Nassverfahren wird aus Nadelholzfaserstoff hergestellt. Der Feuchtegehalt des beleimten Vlieses beim Nassverfahren liegt zwischen 150 % und 300 % bezogen auf trockene Faser. Der Feuchtegehalt kommt daher zustande, da die Vliesbildung mit Hilfe von Wasser erfolgt (LAMPERT, 1966). Mit diesem Feuchtegehalt gelangt das gestreute Faservlies dann in die 180 °C bis 205 °C heiße Presse. Der Pressdruck liegt bei  $49 \times 10^5$  N/m<sup>2</sup>. Damit das Wasser, größtenteils in Form von Wasserdampf, beim Heißpressen besser entweichen kann, wird auf einer Seite der Faserplatte ein Sieb untergelegt. Faserplatten, hergestellt nach dem Nassverfahren, weisen daher immer eine charakteristische „Siebrückseite“ auf. Nachteile dieses Verfahrens sind der hohe Wasserverbrauch und die damit verbundenen hohen Abwasserreinigungskosten.

### 2.4.1.2 Halbtrockenverfahren

Das Halbtrockenverfahren ist eine Verbindung des Trocken- und Nassverfahrens. Dies zeigt sich darin, dass das Faservlies wie beim Trockenverfahren, über Luft oder andere mechanische Mittel gestreut wird, der Feuchtegehalt des Faservlieses mit 12 % bis 45 %, bezogen auf trockene Faser, jedoch höher ist als beim Trockenverfahren. Die Presstemperaturen und Pressdrücke liegen mit 180 °C bis 260 °C und  $6 \times 10^5 \text{ N/m}^2$  bis  $25 \times 10^5 \text{ N/m}^2$  im gleichen Bereich wie beim Trockenverfahren. Die nach dem Halbtrockenverfahren hergestellten Mitteldichten Faserplatten weisen ebenfalls eine „Siebrückseite“ wie die Faserplatten des Nassverfahrens auf, da ein Sieb zur besseren Wasserdampfabfuhr während des Pressvorgangs verwendet wird (LAMPERT, 1966).

### 2.4.1.3 Trockenverfahren

Das Streuen des Faservlieses beim Trockenverfahren erfolgt mittels Luft oder mechanischen Mitteln. Im Unterschied zum Nassverfahren wird hierbei auch Laubholzfaserstoff von Laubhölzern mit höherer Rohdichte eingesetzt. Grund dafür ist die kurze und schlanke Geometrie der Fasern gegenüber den längeren Nadelholzfäsern. Sie eignen sich besser für die pneumatische Förderung als Fasermaterial aus Nadelhölzern. Das Faservlies besitzt einen Feuchtegehalt von 5 % bis 10 % bezogen auf trockene Faser wenn es in die Heißpresse gelangt. Die Presstemperaturen liegen dabei zwischen 180 °C und 240 °C. Es wird mit einem Pressdruck gearbeitet, der zwischen  $6 \times 10^5 \text{ N/m}^2$  und  $25 \times 10^5 \text{ N/m}^2$  variieren kann (DEPPE und ERNST, 1996).

Auf Grund heutiger Bestimmungen, wie z.B. die karzinogene Einstufung von Eichen- und Buchenstaub, werden jedoch hauptsächlich Nadelholzfäsern eingesetzt. Ausnahmen stellen die regional geringen Beimischungen von Laubholzfaserstoffen der Baumarten *Fagus spec.*, *Quercus spec.* und *Betula spec.* dar.

## 2.5 DIN- und EN- Vorschriften für Holzfaserplatten

Holzwerkstoffe aus der laufenden Produktion werden konstant anhand definierter Prüfverfahren untersucht, damit eine spätere, reibungslose Verwendung in der Bau- und Möbelindustrie gewährleistet ist. Diese Prüfverfahren wurden vom Deutschen Institut für



Normung (DIN) entwickelt und sind in letzter Zeit, im Rahmen einer europäischen Marktwirtschaft in Zusammenarbeit mit dem europäischen Komitee für Normung, in Europäische Normen (EN) umgewandelt worden. Dabei sind für die einzelnen Holzwerkstoffarten sowie ihre unterschiedlichen Anwendungsmöglichkeiten genaue Vorgaben hinsichtlich ihrer mechanisch-technologischen Eigenschaften festgelegt worden um einen europäischen Standard für Holzwerkstoffe zu garantieren.

Der Bereich der Holzfaserplatten wird nach DIN EN 316 anhand verschiedener Kriterien klassifiziert. Dies geschieht hauptsächlich anhand des Herstellungsverfahrens (vgl. dazu auch Kapitel 2.4.1), der Dicke und Rohdichte sowie spezifischer Eigenschaften und späterer Verwendungszwecke. Hinsichtlich ihres Herstellungsverfahrens werden die Holzfaserplatten nach dem *Nassverfahren*, Faserfeuchte im Stadium der Plattenformung  $> 20\%$ , und dem *Trockenverfahren*, Faserfeuchte im Stadium der Plattenformung  $< 20\%$ , unterschieden (DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG e. V., 1998 b). Das Halbtrockenverfahren (siehe auch Kapitel 2.4.1.2) wird bei dieser Klassifizierung nicht berücksichtigt. Daher weichen die beleimten Faserfeuchten in den nachfolgenden Beschreibungen von den Angaben in Kapitel 2.4.1 ab.

Die Platten nach dem Nassverfahren lassen sich zunächst grob nach ihrer Fertigungsrohichte klassifizieren. Die Holzfaserplatten werden anhand dieser Klassifizierung in *Harte Platten* (Dichte  $\geq 900 \text{ kg/m}^3$ ), *Mittelharte Platten* (Dichte  $\geq 400 \text{ kg/m}^3$  bis  $< 900 \text{ kg/m}^3$ ) und *Poröse Platten* (Dichte  $\geq 230 \text{ kg/m}^3$  bis  $< 400 \text{ kg/m}^3$ ) unterteilt. Bei den *Mittelharten Platten* gibt es dann noch zwei weitere Unterkategorien; einerseits die *Mittelharten Platten geringer Dichte* ( $400 \text{ kg/m}^3$  bis  $< 560 \text{ kg/m}^3$ ) und andererseits die *Mittelharten Platten hoher Dichte* mit Rohdichten von  $560 \text{ kg/m}^3$  bis  $< 900 \text{ kg/m}^3$  (DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG e. V., 1998 b).

Die Holzfaserplatten nach dem Trockenverfahren haben eine beleimte Feuchte von weniger als  $20\%$  bei der Vliesbildung und eine Fertigungsrohichte von  $\geq 450 \text{ kg/m}^3$ . Die Mitteldichten Faserplatten (MDF) werden nach dem Trockenverfahren unter Zusatz eines synthetischen Bindemittels unter Druck und Hitze hergestellt. Dabei liegen die Endfertigungsrohichten von den in Europa hergestellten MDF  $\geq 600 \text{ kg/m}^3$ . Die Mitteldichten Faserplatten lassen sich anhand ihrer Fertigungsrohichte nicht weiter klassifizieren, da moderne Produktionstechnologien eine Variation der Rohdichte unabhängig von der Plattenstärke erlauben (DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG e. V., 1998 b).

Die Holzfaserplatten nach dem Nass- und Trockenverfahren lassen sich noch anhand zusätzlicher Eigenschaften und Anwendungen klassifizieren. Dabei wird hinsichtlich der späteren Anwendungsbedingungen in *Trocken-, Feucht- und Außenbereich* differenziert. Die Verwendungszwecke gliedern sich in *allgemeine* und *tragende Verwendung*. Bei einer *tragenden Verwendung* wird noch weiter unterschieden hinsichtlich der Lastwirkungsdauer (DEUTSCHEN INSTITUT FÜR NORMUNG e. V., 1998 b).

Bei den im Rahmen dieser Dissertation hergestellten Mitteldichten Faserplatten handelt es sich ausschließlich um Holzfaserplatten, die nach dem Trockenverfahren mit Endfertigungrohdichten im Bereich von  $\geq 650 \text{ kg/m}^3$  bis  $\leq 800 \text{ kg/m}^3$  hergestellt werden. Eine spezielle Differenzierung hinsichtlich einer späteren Anwendung im Trocken-, Feucht- oder Außenbereich ist nicht vorgesehen. Die spätere Verwendung beschränkt sich auf eine allgemeine Verwendung.

## 2.6 Holzabbau durch Weiß-, Braun- und Moderfäuleerreger

Es stehen für die Bewertung pilzlicher Holzabbauprozesse unterschiedliche Analysemethoden zur Verfügung, die alle auf chemischen bzw. strukturellen Veränderungen im Holz durch den Einfluss von Pilzen basieren. Dabei lassen sich die Holzzerstörenden Pilze in drei Gruppen einteilen. Dies sind die Weiß-, Braun- und Moderfäuleerreger. Für den Holzabbau bzw. die Holzersetzung in der Natur durch Weiß-, Braun- und Moderfäuleerreger sind vorwiegend der Holzaufbau der Bäume und die enzymatische Ausstattung der Pilze verantwortlich (SCHWARZE et al., 1999).

Da sich sowohl Laub- und Nadelbäume, als auch die einzelnen Baumarten selbst in diesen Kategorien, in der chemischen Zusammensetzung hinsichtlich ihrer Hauptbestandteile (vgl. Kapitel 2.1.2) unterscheiden, werden sie in unterschiedlicher Geschwindigkeit und in unterschiedlichem Umfang von Holzzerstörenden Pilzen abgebaut. Aufgrund der Tatsache, dass nicht alle Pilze die gleichen Enzyme zum Holzabbau besitzen, können sie unter Umständen nur bestimmte Teile des Holzes zersetzen.

Es sind daher die Fähigkeiten des Pilzes in welchem Umfang er ein Substrat erschließen und abbauen kann. Auch die Strategie, mit welcher der Pilz dabei vorgeht, hängt sowohl von seinen Möglichkeiten, welche Zelltypen und Zellwandbestandteile er zersetzen kann und seinem Anpassungsvermögen an die Bedingungen des Wirtes ab. Ein Indiz dafür sind die

zahlreichen Holzzersetzungsmuster, die bei den unterschiedlichen Pilzen zu beobachten sind (SCHWARZE et al., 1999).

In den folgenden Kapiteln 2.6.1 bis 2.6.3 werden die charakteristischen Eigenschaften der Weiß-, Braun- und Moderfäuleerreger erläutert. Die unterschiedlichen Strategien werden sowohl anhand von Veränderungen im Holzaufbau als auch an Veränderungen in der chemischen Zusammensetzung hinsichtlich der Hauptbestandteile des Holzes erklärt. Die Beschreibungen beziehen sich auf Bäume, bei denen unter natürlichen Gegebenheiten eine Infektion mit Weiß-, Braun- und Moderfäuleerreger stattfand.

Diese Erläuterungen können für die im Rahmen dieser Dissertation durchgeführten Holzabbauversuche (vgl. Kapitel 3.4.1 und 3.4.2) nur ansatzweise verwendet werden, da sich durch die Verarbeitung des nativen Kiefernholzes zu industriellem Kiefernfaserstoff bereits ohne den Einfluss von Pilzen anatomische und chemische Veränderungen im Holzaufbau und der Zusammensetzung ergeben. Dabei bleibt im Fasermaterial der Aufbau der verholzten Zellwand nur ansatzweise bestehen. Auch die Mengenanteile an Lignin, Cellulose und Hemicellulose ändern sich aufgrund der thermischen und mechanischen Aufschlussparameter bei der Herstellung von Faserstoff. Bei der abschließenden Beurteilung des Holzabbaus durch Weiß-, Braun- und Moderfäuleerreger (siehe Kapitel 4.3.1 und 4.3.2) sind daher sowohl die Ergebnisse der analytischen Untersuchungen des Faserstoffes (siehe Kapitel 3.1.1.3 und 3.1.1.4) als auch die morphologischen Untersuchungen des Faserstoffes (vgl. Kapitel 3.1.2) zu berücksichtigen.

### **2.6.1 Weißfäule**

Die Weißfäule wird vornehmlich durch Basidiomyceten und Ascomyceten an Laub- und Nadelbäumen hervorgerufen. Bei dieser Form der Holzzersetzung werden sowohl die Cellulosen und die Hemicellulose als auch das Lignin abgebaut und das Holz nimmt im Laufe der Zersetzung eine weißliche, gebleichte Farbe an. Die relativen Abbaugeschwindigkeiten der einzelnen Holzbestandteile und die Reihenfolge, in welcher die Cellulose, Hemicellulose und das Lignin zersetzt werden, hängen von den Bedingungen im Holz und der jeweiligen Pilzart ab (SCHWARZE et al., 1999). Dabei werden die zahlreichen Pilzarten der Weißfäule allgemein in zwei unterschiedliche Formen eingeteilt. Dabei handelt es sich zum einen um die *selektive Delignifizierung* und zum anderen um die *simultane Fäule* (ADASKAVEG &

GILBERTSON, 1986). Diese beiden Arten der Weißfäule und ihre charakteristischen Merkmale werden in den beiden folgenden Kapiteln erläutert.

### 2.6.1.1 Selektive Delignifizierung

Bei der selektiven Delignifizierung (vgl. Abbildung 2-11) wird durch den Pilz Lignin bereits im Frühstadium stärker abgebaut als Cellulose oder Hemicellulose. Der Ligninabbau erfolgt durch die von den Hyphen produzierten Phenoloxidasen wie Laccasen, Tyrosinasen und Peroxidasen. Aufgrund des bevorzugten Ligninabbaus bilden sich helle Flecken im Holz, bei denen es sich um die zunächst nicht zersetzte, reine Cellulose handelt. *Phellinus pini* ist für dieses Zersetzungsmuster ein typisches Beispiel (SCHWARZE, 1999).

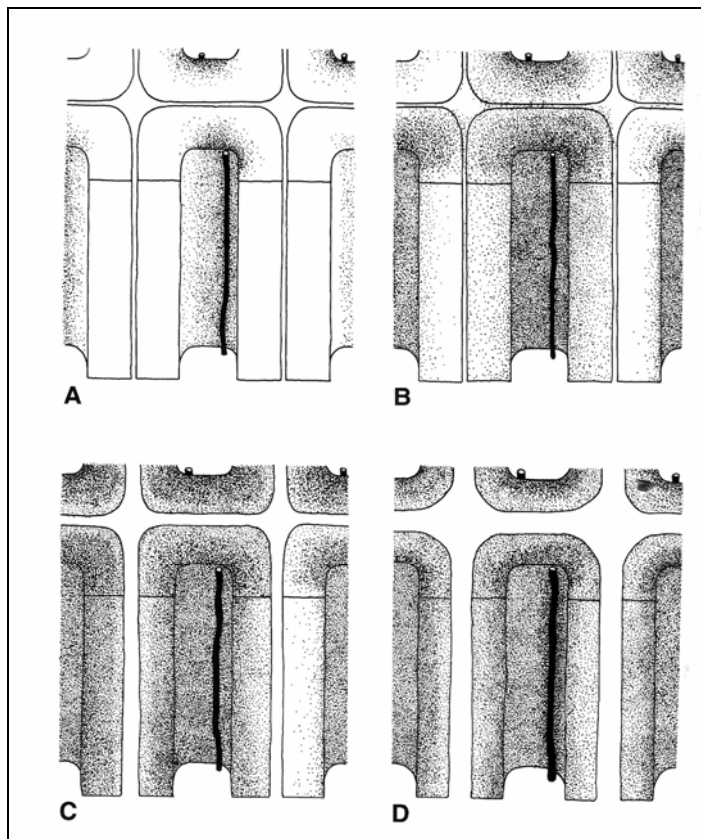


Abbildung 2-11: Stadien der selektiven Delignifizierung (A-D) eines Weißfäuleerregers (SCHWARZE et al., 1999)

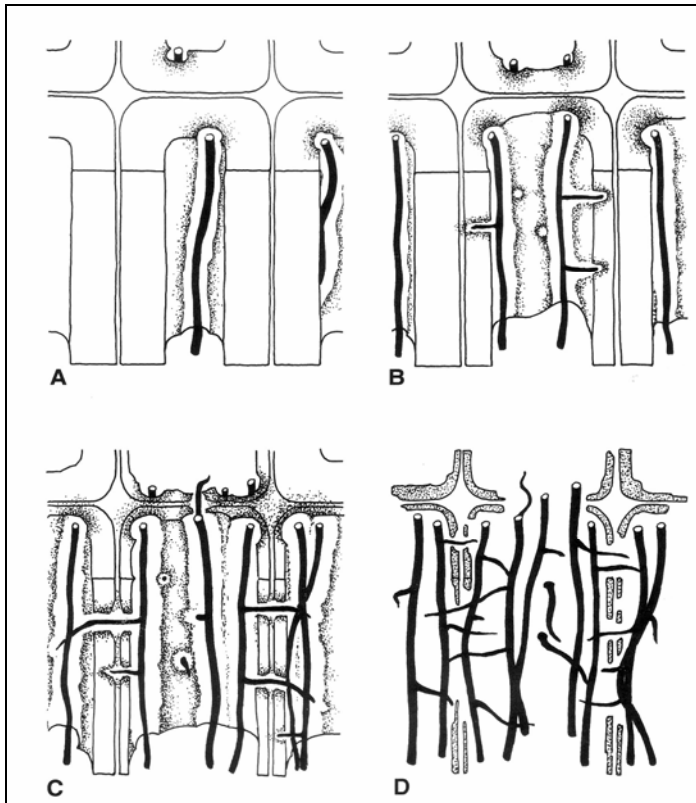
Die Mittellamellen, die wie in Kapitel 2.1.3 beschrieben, den höchsten Ligningehalt im pflanzlichen Zellaufbau aufweisen, werden bei der selektiven Delignifizierung vollständig abgebaut. Danach findet der Ligninabbau in der Sekundärwand der Zellen statt, wodurch sich

dann im Endstadium einzelne Zellen aus ihrem Verbund lösen (HARTIG, 1878, BLANCHETTE 1984). Besonders durch die Delignifizierung der S<sub>2</sub>-Schicht entstehen deutlich hervorgehobene, radiale Strukturen (SCHWARZE & ENGELS, 1998).

Eine Verringerung der Festigkeitseigenschaften des durch selektive Delignifizierung angegriffenen Holzes findet sehr langsam statt, da die Cellulose und Hemicellulose im Frühstadium der Infektion noch nicht zersetzt werden. Die radialen Strukturen, die sich wie oben beschrieben in der S<sub>2</sub>-Schicht bilden, tragen ebenfalls zur Aufrechterhaltung der Festigkeitseigenschaften bei (SCHWARZE & ENGELS, 1998). Aufgrund der Auflösung der ligninreichen Mittellamellen und der Trennung einzelner Zellen aus dem Verbund wird die Konsistenz des Holzes zunehmend faseriger und ein Verlust an Steifigkeit und Druckfestigkeit sind festzustellen (SCHWARZE, 1999). Nachdem das Lignin zu großen Anteilen in den Zellen abgebaut wurde beginnt der Cellulose- und Hemicelluloseabbau. Dies zeigt sich an den Festigkeitseigenschaften des Holzes deutlich, da der Abbau der restlichen Holzbestandteile extreme Verringerungen der Zugfestigkeit zur Folge hat (PRATT, 1995).

#### **2.6.1.2 Simultane Fäule**

Auch die simultane Fäule (vgl. dazu auch Abbildung 2-12) wird wie die selektive Delignifizierung durch Basidiomyceten und Ascomyceten hervorgerufen. Die simultane Fäule tritt überwiegend an Laubbäumen und eher selten an Nadelbäumen auf. Die Bezeichnung simultane Fäule beruht auf der Tatsache, dass alle Hauptbestandteile des Holzes zu gleichen Teilen abgebaut werden. Die Hyphen dieser Pilze wachsen im Lumen auf der S<sub>3</sub>-Schicht, dabei werden die Zellwände in der unmittelbaren Umgebung der Hyphen abgebaut und es entstehen Erosionsgräben (SCHWARZE, 1999). Somit ergibt sich ein wesentlicher Unterschied zum Holzersetzungsmuster der selektiven Delignifizierung (vgl. Abbildung 2-11). Der Holzabbau beginnt im Vergleich zu den Erregern der selektiven Delignifizierung nicht bei den Mittellamellen sondern auf der S<sub>3</sub>-Schicht.



**Abbildung 2-12: Stadien der simultanen Fäule (A-D) eines Weißfäuleerregers (SCHWARZE et al., 1999)**

Bei der simultanen Fäule werden im Gegensatz zur selektiven Delignifizierung Lignin, Cellulose und Hemicellulose zu fast gleichen Anteilen abgebaut. Charakteristisch für die Weißfäuleerreger, die eine simultane Fäule verursachen, ist die Tatsache, dass die von den Pilzhyphen ausgeschiedenen Enzyme alle Hauptbestandteile der Zellwände zersetzen können (RAYNER & BODDY, 1988, ERIKSON et al., 1990). Die Erosionsgräben, die sich im Laufe der Holzzersetzung bilden, fließen mit zunehmender Holzzerstörung immer weiter zusammen und daher nimmt die Zellwanddicke vom Lumen zur Mittellamelle langsam ab (LIESE, 1970).

Der schnelle Abbau der cellulosereichen Sekundärwand zeigt sich in einem spröden Brechen des infizierten Holzes. Da die ligninhaltigen Mittellamellen erst spät im Laufe der Infektion abgebaut werden, besitzt das Holz noch relativ lange eine hohe Steifigkeit. Von den Holzeigenschaften her ist das durch simultane Fäule zersetzte Holz absolut konträr zu dem durch selektive Delignifizierung zersetztem Holz. Somit ist eine Unterscheidung der beiden Weißfäulen bereits allein durch die Prüfung der vorhandenen Holzeigenschaften möglich.

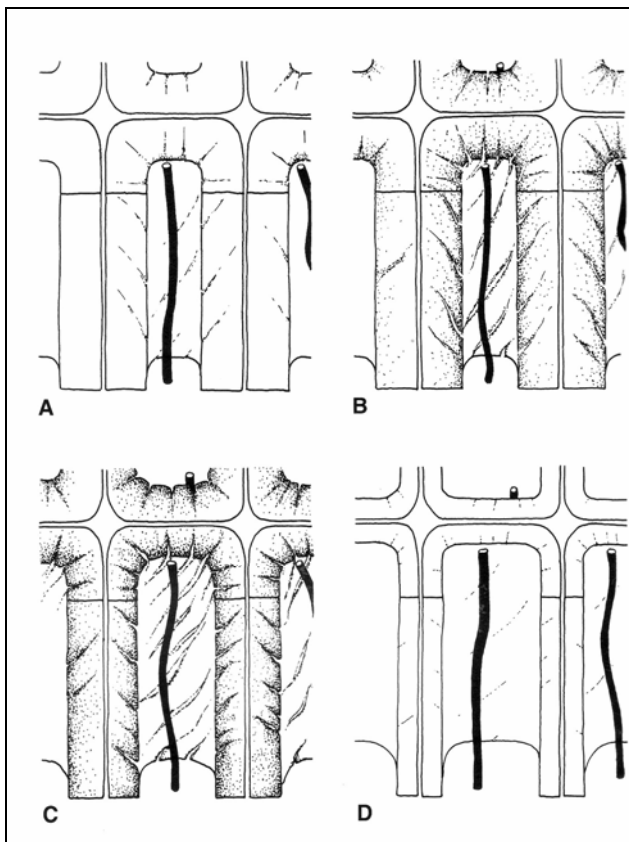
## 2.6.2 Braunfäule

Die Braunfäule wird ausschließlich durch Basidiomyceten verursacht und tritt hauptsächlich an Nadelbäumen auf. Bei dem Holzabbau durch Braunfäuleerreger werden die Zellulose und die Hemicellulose im Holz zerstört, das Lignin bleibt in leicht veränderter Form erhalten (RAYNER, BODDY, 1988; GREEN, HIGHLEY, 1997). Aufgrund ihrer Ontogenese und der sehr einfachen Holzzerlegung der Braunfäuleerreger können diese im Vergleich zu den Weißfäuleerregern als eher unflexibel bezeichnet werden. Das Holz erhält durch den bevorzugten Abbau von Kohlehydraten eine brüchige Konsistenz, es zerbricht würfelförmlich und zerfällt nach längerer Infektion pulvrig (SCHWARZE, 1999). Durch den relativ schnellen Celluloseabbau verliert das Holz schon frühzeitig nach dem Befall drastisch an Biegefestigkeit (WILCOX, 1978; SCHWARZE, 1995). Zerreibt man das Holz zwischen den Fingern so bleibt lediglich ein braunes Pulver übrig – das Lignin, das durch Braunfäuleerreger aufgrund der nicht vorhandenen Enzyme nicht abgebaut werden kann.

Der Abbau von Cellulosen und Hemicellulosen durch Basidiomyceten erfolgt in verschiedenen Schritten und es ergibt sich ein typisches Holzzerlegungsmuster für Braunfäuleerreger (vgl. dazu auch Abbildung 2-13). Die Celluloseabbauenden Enzyme sind relativ groß und können nicht ohne weiteres die kleinen Zellwandkapillaren überwinden (KOENIGS, 1974 a, b), daher wird angenommen, dass zunächst Wasserstoffperoxid, das leicht in die Zellwände eindringt, zusammen mit Eisenionen durch oxidative Depolymerisation die Lignocellulosematrix überwindet (KEILISCH, 1970). Die Hemicellulosen, welche die Cellulosen umhüllen, werden bei diesem Vorgang ebenfalls angegriffen und abgebaut. Somit können erst nach der Zersetzung der Hemicellulose, die Cellulose durch die Cellulasen abgebaut werden.

Im Holzaufbau zeigt sich, dass die radialen Strukturen zu Beginn der Holzzerlegung bevorzugt abgebaut werden. Dadurch entstehen feine Risse in den Sekundärwänden  $S_1 - S_3$ . Dies ist vermutlich auch die Erklärung für den bereits beschriebenen frühzeitigen Verlust an Biegefestigkeit beim Befall durch Braunfäuleerreger (SCHWARZE et al., 1999). Der Pilz kann jedoch die Zellwände der recht widerstandsfähigen  $S_3$ -Schicht nicht in der unmittelbaren Umgebung der Hyphen zersetzen. Daher diffundieren die Ektoenzyme der Braunfäuleerreger durch die  $S_3$ -Wand hindurch in die cellulosereiche  $S_2$ -Schicht und zersetzen diese (LIESE, 1963). Die Diffusion erfolgt dabei über die radialen Strukturen des Holzes und der Pilz hat auf diese Weise die Möglichkeit, Cellulose auch in weiter Entfernung von den Hyphen

abzubauen. Ein weiterer Vorteil dieser Strategie ist, dass der Pilz nicht viele Hyphen für den Celluloseabbau benötigt und somit das Holz sehr schnell zersetzen kann (MEIER, 1955).

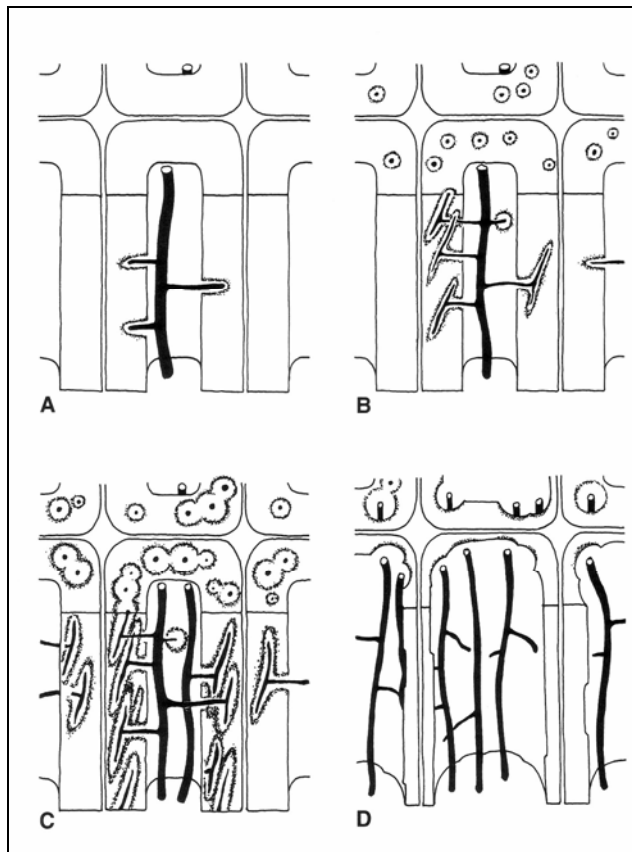


**Abbildung 2-13: Entwicklungsstadien (A-D) einer Braunfäule (SCHWARZE et al., 1999)**

### 2.6.3 Moderfäule

Moderfäuleerreger treten sowohl an Nadelbäumen als auch Laubbäumen auf und beschleunigen bei lebendigen Bäumen die natürliche Astreinigung (BUTIN, 1983). Eine weitere „Substratvariante“ stellen verbaute Hölzer, die der Witterung ausgesetzt sind, für diese Pilze dar. Das für Moderfäuleerreger typische Holzersetzungsmuster, graphisch dargestellt in Abbildung 2-14, wurde zum ersten Mal von SCHACHT im Jahre 1863 dokumentiert. Charakteristisch dafür ist das bevorzugte Wachstum der Hyphen innerhalb der Sekundärwand, das sich durch längs zur Zellachse ausgebildeter Kavernen darstellt.





**Abbildung 2-14: Holzzersetzungsmuster von Moderfäuleerregern (SCHWARZE et al., 1999)**

Das meistens mit Ascomyceten und Deuteromyceten infizierte Holz weist eine sehr weiche Konsistenz auf, woraus sich auch die englische Bezeichnung „soft rot“ abgeleitet hat. Da Moderfäuleerreger, wie auch die Braunfäuleerreger (vgl. Kapitel 2.6.2), hauptsächlich die Cellulose und die Hemicellulose im Holz abbauen, entsteht eine weiche Konsistenz. Das Holz besitzt einerseits eine hohe Steifigkeit, zerbricht jedoch andererseits spröde. Da Lignin nur in sehr geringen Mengen abgebaut wird, haben die Moderfäuleerreger biochemisch größere Ähnlichkeit mit den Braunfäuleerregern als mit den Weißfäuleerregern (LIESE, 1963). Im Gegensatz zur Braunfäule aber analog zur simultanen Fäule bei den Weißfäuleerregern (vgl. Kapitel 2.6.1) findet die Zersetzung der Cellulose und Hemicellulose in den Zellwänden immer in der direkten Umgebung der Hyphen statt (SCHWARZE et al., 1999).

Die Moderfäule erregenden Pilze werden aufgrund ihrer unterschiedlichen Holzabbaustrategien in *Typ 1* und *Typ 2* unterschieden (CORBETT, 1965), wobei einige Pilzarten nicht nur auf eine Abbauart spezialisiert sind, sondern auch beide Holzabbauarten gleichzeitig verursachen können (NIELSSON, 1973).

Der *Typ 1* zeigt eine deutliche Ausbildung hintereinander aufgereihter Kavernen, die innerhalb der S<sub>2</sub>-Schicht in Richtung der Mikrofibrillen orientiert sind (SAVORY, 1954). Die Entwicklung der Hyphenkanäle erfolgt in sich abwechselnden Wachstumsphasen. Erst nach Beendigung des Hyphenkanalwachstums folgt die Bildung einer Kaverne um die Hyphe herum. Dies ist begründet in der Tatsache, dass die Entwicklung eines Hyphenkanals eine Nährstoffversorgung durch die in der Kaverne befindliche Mutterhyphe voraussetzt. Bei einem Nährstoffmangel oder der Seneszenz der Mutterhyphe wird der Nährstofftransport unterbrochen und die Hyphe versorgt sich mit Nährstoffen aus den Holzzellwänden durch die Bildung von Kavernen (HALE & EATON, 1985 a, b).

Der *Typ 2* der Moderfäule erregenden Pilze ist hinsichtlich seines Holzzersetzungsmodells einer lokalisierten simultanen Fäule (vgl. Kapitel 2.6.1) sehr ähnlich und tritt vorwiegend an Laubbäumen auf. Die Holzzersetzung geht dabei vom Lumen nach außen hin vorstatten, wobei sich kleine Erosionsgräben in Form von v-förmigen Kerben bilden (CORBETT, 1965).

Aufgrund neuester Erkenntnisse sind nicht nur Pilzarten der bereits erwähnten Asco- und Deuteromyceten in der Lage eine Moderfäule hervorzurufen. Auch die Basidiomyceten können in lebenden Laubbäumen durch eine fakultative Moderfäule die weit reichende Zersetzung der in den Zellen enthaltenen Cellulose und Hemicellulose verursachen. Dabei zeigt sich das für Moderfäuleerreger typische Holzzersetzungsmodell (vgl. Abbildung 2-14), das typische Wuchsbild der Hyphen in den Zellwänden und die damit verbundenen Strukturveränderungen im Holz. Dieser Nachweis wurde erstmals von SCHWARZE et al. (1995) am Beispiel eines Weißfäuleerregers, dem Zottigen Schillerporling, erbracht und konnte später anhand des Riesenporlings (SCHWARZE & FINK, 1998) und des Tropfenden Schillerporlings (ENGELS, 1998) bestätigt werden. Diese Pilze wurden aufgrund früherer chemischer Holzanalysen als Weißfäuleerreger eingestuft, da sie auch beim Hervorrufen einer Moderfäule nicht nur Cellulose und Hemicellulose abbauen, sondern auch in stärkerem Ausmaß das in den Zellwänden vorhandene Lignin (SCHWARZE et al., 1999).

### **3 Material und Methoden**

#### **3.1 Analytische Untersuchungen**

In Kapitel 3.1.1 bis Kapitel 3.1.3 werden die im Rahmen dieser Dissertation durchgeführten analytischen Untersuchungen beschrieben. Dabei werden sowohl der Kiefernindustriefaserstoff der Fa. STEICO/Polen (Kapitel 3.1.1 ff. und 3.1.2 ff.) als auch die verwendeten Bindemittel (Kapitel 3.1.3 ff.) untersucht. Die eingesetzten Bindemittel unterteilen sich dabei in das UF-Harz Kauritec 407<sup>®</sup> flüssig der Fa. BASF, das PF-Harz 1808 HW der Fa. BAKELITE und die Weizenprotein-Suspension. Diese analytischen Untersuchungen sind wichtig für die spätere Beurteilung der mechanisch-technologischen Eigenschaften der aus diesen Materialien hergestellten Mitteldichten Faserplatten. Des Weiteren sind die Ergebnisse dieser analytischen Untersuchungen bei der Einschätzung eines möglichst realistischen Anwendungsspektrums der im Rahmen dieser Dissertation entwickelten Weizenprotein-Suspension als Bindemittel zur Herstellung von Mitteldichten Faserplatten von Bedeutung.

##### **3.1.1 Analytische Untersuchungen des Faserstoffes**

Zur Herstellung aller im Rahmen dieser Dissertation angefertigten Mitteldichten Faserplatten wird Industriefaserstoff der Fa. STEICO/Polen verwendet. Die analytischen Untersuchungen, die in den folgenden Kapiteln 3.1.1.1 bis 3.1.2.1 beschrieben sind beziehen sich daher ausschließlich auf den Industriefaserstoff der Fa. STEICO. Nach Herstellerangaben wird dieser Faserstoff ausschließlich aus Kiefernholz der Holzarten *Pinus sylvestris* und *Pinus radiata* in variierenden Mischungsverhältnissen nach dem Asplundverfahren (vgl. Kapitel 2.3.2) unter industrieeüblichen Produktionsparametern hergestellt. Der in dieser Arbeit verwendete Faserstoff stammt aus einer Produktionscharge mit einem konstanten Mischungsverhältnis der beiden Kiefernarten, so dass die Faserqualität als Kriterium für mögliche Schwankungen in den mechanisch-technologischen Eigenschaften der daraus hergestellten Faserplatten auszuschließen ist.

Bei den folgenden Versuchsbeschreibungen sowie der Beurteilung und Diskussion der Ergebnisse ist mit den Begriffen Fasermaterial bzw. Faserstoff ausschließlich der Industriekiefernfasernstoff der Fa. STEICO gemeint. Sofern ein anderer Faserstoff gemeint ist, wird dieser im jeweiligen Text namentlich genannt, um Verwechslungen auszuschließen.

### 3.1.1.1 Siebkennlinien nach WIHS 74

Dieser Standard gilt für die Charakterisierung von Faserstoff, der durch thermohydrolytischen Aufschluss im Defibrator hergestellt wird, durch trockenes Siebfractionieren auf Prüfmaschinen mit bewegten Siebböden. Folgende Prüfmittel werden dazu benötigt:

- Prüfsiebmaschine: Für die Fraktionierung ist eine Prüfsiebmaschine Typ NTS 1, Bauart VEB Labortechnik, Ilmenau, zu benutzen
- Prüfsiebe: Runde Prüfsiebe mit einem Durchmesser von 200 mm, es sind mindestens 6 und maximal 8 Siebe zu verwenden
- Siebhilfen: Hartgummikugeln, Durchmesser 20 mm, mit und ohne Metallstifte, Kugeln mit Metallstiften müssen sechs Stacheln besitzen, die durch drei Metallstifte 1,8 mm x 30 mm gebildet werden und die Kugel symmetrisch durchdringen
- Schnellwaage mit einer Wäggenauigkeit von  $\pm 0,05$  g
- Faserstoffproben: Aus unterschiedlichen Zonen der zu prüfenden Faserstoffmenge ist je eine repräsentative Faserstoffprobe zu entnehmen und durch Vierteln aufzubereiten

Jede zu fraktionierende Faserstoffprobe ist vor der Fraktionierung zu wägen und auf das obere Sieb des Siebsatzes aufzugeben. Die Verwendung von zwei Siebsätzen ist bei einem entsprechenden Arbeitsumfang empfehlenswert.

Die erste Fraktionierung ist nach den Angaben in Tabelle 3-1 für normal siebbaren Faserstoff durchzuführen. Danach ist der Rückstand der oberen Siebe visuell zu beurteilen. Beim Vorhandensein von Zusammenballungen von Fasern ist der Faserstoff als schwierig siebbar einzuordnen. Andernfalls handelt es sich um normal siebbaren Faserstoff.

Je nach Charakter des Faserstoffes sind entsprechend Tabelle 3-1 die Daten zur Fraktionierung einzuhalten. Die Verteilung der Siebhilfen nach Tabelle 3-1 erfolgt einerseits zur Auflockerung des Faserstoffes im Aufgabesieb, andererseits zur Erhöhung der Trennschärfe der Fraktionierung. Die für das Aufgabesieb bei schwierig siebbarem Faserstoff vorgesehenen Siebhilfen können auf die nachfolgenden Siebe mit verteilt werden, wenn es in diesen Sieben ebenfalls zu Zusammenballungen des Faserstoffes kommt.

Die Masse der Fraktionen des Rückstandes je Fraktionierung ist anschließend in das Fraktionierungsprotokoll einzutragen.

**Tabelle 3-1: Vorschriften für die Trockene Siebfractionierung nach WIHS 74**

Daten zur Fraktionierung		Siebbarkeit des Faserstoffes	
		normal	schwierig
Siebbeschleunigung (m/s <sup>2</sup> )		20	25
Siebzeit (min)		15 + / - 0,1	3 x 10 + / - 0,1
Einwaagemasse (g)		13 + / - 2,0	5 + / - 1,0
Anzahl der Siebhilfen			
Im Aufgabesieb	Ohne Metallstifte	2	2
	Mit Metallstiften	2	4
In jedem weiteren Sieb	ohne Metallstifte	1	1
Anzahl der Fraktionierungen		3	3 bis 6
Feuchtesatz des Faserstoffes (%)		5 bis 10	

### 3.1.1.2 RAPID-KÖTHEN-Blattbildner (DIN 54358)

In dieser Norm ist ein Verfahren festgelegt, nach dem aus Zellstoffen, Holzstoffen, Halbstoffgemischen oder Ganzstoffen unter Verwendung des RAPID-KÖTHEN-Gerätes als Blattbildungs- und Trocknungsanlage Laborblätter hergestellt werden. Diese Laborblätter sind mit Hilfe genormter oder üblicher Prüfverfahren zu prüfen, um so für die Papierherstellung wichtige Eigenschaften der zu untersuchenden Stoffe zu ermitteln.

Das gesäuberte Laborblattbildungssieb wird auf das Stützsieb gelegt. Die Füllkammer wird auf den Siebteil aufgesetzt und die Wasserabflussöffnung der Saugkammer geschlossen. Mit Hilfe der Verdünnungswasserpumpe wird eine definierte Menge an Wasser in die Füllkammer gedrückt. Anschließend wird die Suspensionsmenge mit etwa 2,4 g ofentrockener Substanz, die ein Laborblatt von 75 g/m<sup>2</sup> ( $\pm 2$  g/m<sup>2</sup>) bezogen auf ofentrockenen Zustand ergibt, von oben in die Füllkammer gegossen und die Füllkammer mit weiterem Verdünnungswasser aufgefüllt. Ohne Verzögerung wird dann fünf Sekunden lang mittels der Druckluftpumpe Luft in die Füllkammer gedrückt und so die Stoffsuspension durchwirbelt. Nach Abschalten der Druckluftzufuhr lässt man die Stoffsuspension fünf Sekunden lang ruhen und entlüften. Die Entwässerung wird dann durch die Vakuumpumpe, die mit der Saugkammer verbunden ist, eingeleitet. Hierbei ist darauf zu achten, dass der Druck in der Saugkammer 270 mbar nicht überschreitet.

Nach der Entwässerung wird der Trägerkarton mit der glatten Seite zentrisch auf das nasse Blatt gelegt. Die Gautschrolle lässt man ohne zusätzlichen Druck in zwei zueinander senkrechten Richtungen innerhalb von 2 Sekunden je einmal über das Blatt hin- und herrollen. Die Gautschrolle soll dabei auf dem Siebrand, nicht aber auf dem nassen Blatt,

aufgesetzt werden. Anschließend nimmt man das Laborblattbildungssieb mit dem nassen Laborblatt und dem Trägerkarton vom Stützsieb ab, dreht es um und schlägt es leicht geneigt mit dem Rand auf eine horizontale Unterlage, so dass das nasse Laborblatt mit dem Gautschkarton nach unten abfällt.

Spätestens eine Minute nach dem Abgautschen wird das nasse Laborblatt auf dem Trägerkarton ruhend auf das Stützsieb des geöffneten Trockners gelegt. Auf das nasse Laborblatt wird ein Deckblatt gelegt, der Trockner sofort geschlossen und mit Hilfe der Vakuumpumpe evakuiert. Nach einer Trocknungsdauer von fünf bis sieben Minuten wird die Vakuumpumpe abgeschaltet, der Trockner belüftet und das fertige Blatt mit Trägerkarton und Deckblatt entnommen. Anschließend werden das Deckblatt und der Trägerkarton vom fertigen Laborblatt abgezogen.

### **3.1.1.3 Bestimmung des Hemicellulosegehaltes im Industriefaserstoff**

Der Hemicellulosegehalt von Holz lässt sich mit Hilfe der Methode zur Bestimmung des Pentosangehaltes ermitteln. Da aus Pentosen (vgl. Kapitel 2.1.2) ca. 50 % der im Nadelholz enthaltenen Hemicellulosen gebildet werden, kann mit diesem Wert der ungefähre Gehalt an Hemicellulosen im Holz ermittelt werden. Die restlichen 50 % der Hemicellulose im Nadelholz entstehen aus der Vorstufe Hexosan.

Die Bestimmung des Pentosangehaltes erfolgt durch die Ermittlung der Menge an Furfurol, die beim Kochen von Pentosan mit Bromwasserstoffsäure entsteht. Im Rahmen dieser Dissertation wurde die Pentosanbestimmung mit der Apparatur nach JAYME und NEUHOF durchgeführt. Diese besteht aus einem 500 ml fassenden Rundkolben, welcher mit einer Pilzheizhaube erhitzt wird. Der Destillieraufsatz mit einem 100 ml fassenden Tropftrichter ist durch eine Brücke mit Kugelschliff fest mit dem Rundkolben und einem Kugelkühler verbunden. Das furfurolhaltige Destillat wird mit einem 250 ml fassenden Messzylinder aufgefangen.

Die einzelnen Arbeitsschritte sowie die Berechnung des Pentosangehaltes erfolgen nach einer von der ISO (Abk. für „International Standardisation Organisation“) vorgeschlagenen Standardmethode, welche überwiegend Untersuchungen von P. O. BETHGE (1958, 1964) und G. JAYME (1968) zugrunde liegen. Die Bestimmung des Pentosangehaltes gliedert sich in die folgenden drei Teile:

### ***Destillation***

2 g atro des STEICO-Industriefaserstoffes werden eingewogen und in die Destillationsanlage mit Pilzheizhaube gegeben. Anschließend gibt man 200 ml 3,2 N Bromwasserstoffsäure hinzu. Nachdem 90 ml der Flüssigkeit abdestilliert sind werden 90 ml bidestilliertes Wasser nachgefüllt. Wenn insgesamt 180 ml der Flüssigkeit abdestilliert sind werden 60 ml bidestilliertes Wasser hinzugegeben. Nachdem insgesamt 240 ml des Gemisches abdestilliert sind ist die Reaktion beendet und das aufgefangene Destillat wird auf 350 ml mit bidestilliertem Wasser aufgefüllt und gut durchmischt.

### ***Titration***

Dazu füllt man 50 ml des aufgefangenen Destillates in einen 250 ml Erlenmeyerkolben. Anschließend pipettiert man noch 30 ml Lösung, bestehend aus Salzsäure, Kochsalz und Kaliumbromid und 20 ml 0,025 N Kaliumbromatlösung in den Erlenmeyerkolben. Zwei Minuten nach der Zugabe der Kaliumbromatlösung werden 20 ml 1 M Kaliumjodidlösung und 10 ml 4 M Natriumacetatlösung in den Erlenmeyerkolben pipettiert. Anschließend titriert man das überschüssige Bromit und Bromat mit 0,025 N Natriumthiosulfatlösung zurück.

In gleicher Weise wird ein Blindversuch durchgeführt. Dabei werden jedoch nur 50 ml bidestilliertes Wasser anstelle des Destillates bei der Titration verwendet. Die vorhergehende Destillation ist nicht durchzuführen.

### ***Berechnung***

Der Anteil des Pentosans in den untersuchten Proben wird mit Hilfe der im Anhang unter Kapitel 8.1.1 angegebenen Formeln berechnet.

#### **3.1.1.4 Bestimmung des Ligningehaltes im STEICO Fasermaterial**

Die Ermittlung des Gesamtligningehaltes im Industriefaserstoff der Fa. STEICO erfolgt anhand der von HALSE (1926) entwickelten Methode. Zunächst wird Holzmehl aus den Faserstoffproben in der Ultrazentrifugenmühle hergestellt. Das Mehl wird dann anschließend zur Ligninbestimmung verwendet. Für die Ligninbestimmung müssen exakt 1 g atro jeder Probe eingewogen werden. Da das Holz nicht absolut trocken ist, wird zunächst der Feuchtegehalt der Proben mit einem Feuchtemessgerät ermittelt. Nachdem der Feuchtegehalt

der Proben bestimmt ist, lässt sich über einen Dreisatz die entsprechende Menge an Holzmehl lutro errechnen, die 1 g der Probe atro entspricht.

Die errechneten Mengen an Holzmehl werden jeweils in einen separaten Erlenmeyerkolben eingewogen und mit 50 ml 37%iger, rauchender Salzsäure übergossen. Die Erlenmeyerkolben werden anschließend mit einem Deckel verschlossen und 15 Minuten stehen gelassen. Nach Ablauf der 15 Minuten wird in die Erlenmeyerkolben noch 5 ml konzentrierte Schwefelsäure hinzu gegeben. Die Lösungen lässt man über Nacht ruhen.

Anschließend wird für den nächsten Tag noch ein Glasfiliertiegel (Duran G3/D2) gereinigt und bei 105 °C im Trockenschrank über Nacht gedarrt. Im Exsikkator werden die Glasfiliertiegel abgekühlt und auf drei Stellen hinter dem Komma genau gewogen. Dazu wiegt man die Glasfiliertiegel zweimal und berechnet den Mittelwert. Die Suspension wird in ein 1000 ml Becherglas gegeben und anschließend bis zur 500 ml Markierung mit destilliertem Wasser aufgefüllt. Dabei müssen mögliche Rückstände im Erlenmeyerkolben sehr gründlich nachgespült werden um Ligninverluste zu vermeiden. Der Inhalt des Becherglases wird dann 10 Minuten lang gekocht. Während dieser Zeit werden in einem weiteren Becherglas 400 – 500 ml destilliertes Wasser erhitzt. Hat die Suspension 10 Minuten lang gekocht wird sie anschließend durch den Filtriertiegel abgossen. Den dunklen Rückstand (Lignin/Asche) in dem Tiegel spült man so lange mit dem erhitzten Wasser nach, bis das Filtrat neutral (pH 7) ist. Der pH-Wert wird mit einem pH-Streifen ermittelt.

Der Glasfiliertiegel wird dann mit dem Überstand bei 105 °C für 24 Stunden im Trockenschrank gedarrt. Die Glasfiliertiegel werden nach 24 Stunden Aufbewahrung im Trockenschrank für ca. 30 Minuten im Exsikkator abgekühlt und anschließend auf drei Stellen hinter dem Komma genau gewogen. Die Differenz zum Vortag ist der Ligninanteil. Der prozentuale Ligninanteil im Holz lässt sich berechnen, indem man die Differenz prozentual zur eingewogenen Menge berechnet. Die verwendeten Formeln zur Berechnung der prozentualen Ligninmenge in den untersuchten Proben sind im Anhang unter Kapitel 8.1.2 aufgeführt.



### **3.1.2 Morphologische Untersuchungen des Faserstoffes**

#### **3.1.2.1 Rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen von Faserstoff**

Um die Qualität eines Faserstoffes festzustellen sind neben den analytische Untersuchungen, wie in Kapitel 3.1.1.1 bis 3.1.1.4 beschrieben, auch morphologische Untersuchungen des Fasermaterials notwendig. Die morphologischen Untersuchungen des Faserstoffes werden im Rahmen dieser Dissertation mit einem Rasterelektronenmikroskop, Typ EM 515, der Fa. PHILIPS durchgeführt. Wichtig bei der Vorbereitung der Proben ist, dass diese ein bestimmtes Format nicht überschreiten, da sie sonst nicht auf den Probenhalter aufgeklebt werden können bzw. zu dick sind. Sie sollten daher möglichst dünn, d.h.  $\leq 1 - 4$  mm stark, geschnitten werden.

Die Proben werden unter einer Lupe betrachtet und dabei so platziert, dass sie anschließend direkt aufgeklebt werden können. Der Klebstoff, das so genannte Leit-C, wird mit einem Spatel dünn auf den Probenhalter unter der Lupe aufgetragen. Dabei ist zu beachten, dass der Klebstoff möglichst dünn aufgetragen wird, damit später im Rasterelektronenmikroskop der Weg des Elektronenstrahls durch die Probe bis zum Probenhalter möglichst gering ist. Die bereitliegende Probe wird dann anschließend mit einer Pinzette unter leichtem Druck auf den Klebstoff gelegt. Der dabei verdrängte Klebstoff wird mit Hilfe einer Nadel am Probenrand aufgetragen. Der Klebstoff leitet den Elektronenstrahl, jedoch sind die Stellen an denen sich der Klebstoff befindet unter dem REM nicht zu betrachten. Die aufgeklebten Proben müssen je nach Klebstoffmenge ein bis zwei Stunden antrocknen. Der nächste Schritt ist dann das Bedampfen der Proben.

Das EMScope SC 500 ist das Hauptgerät für die Goldbedampfung. Zusätzlich gibt es noch ein Nebengerät, das EMScope SB 250 für Kohlebedampfung. Die Proben werden in die vorgesehenen Öffnungen eingesetzt und der Glasring wird kurz abgeputzt. Anschließend steckt man den Schlauch auf die Vorrichtung an der Argonflasche und öffnet zuerst das Hauptventil und danach das Druckventil der Flasche. Der Druck ist dabei unter 1 bar am Manometer. An der TORR-SKALA kann man beobachten wie sich ein Vakuum bildet. Benötigt wird ein Vakuum von 0,05 TORR oder höher. Ist der gewünschte Unterdruck erreicht, strömt Argon in das Gefäß und der Vakuumdruck geht zurück. Für ca. 1 ½ Minuten ist ein Plasmaring in dem Gefäß zu sehen und die Probe wird mit 40 bis 50 nm Gold beschichtet. Die Proben können anschließend unter dem Rasterelektronenmikroskop betrachtet werden.

### 3.1.3 Analytische Untersuchungen der Bindemittel

#### 3.1.3.1 Charakterisierung des Weizenprotein-Bindemittels der Fa. CERESTAR

Das in dieser Dissertation verwendete naturnahe Bindemittel aus nachwachsenden Rohstoffen auf Proteinbasis, das Weizenprotein (vgl. Abbildung 3-1), wird zur Qualitätsbeurteilung und zur Einschätzung der Klebeeigenschaften hinsichtlich seiner Hauptbestandteile analysiert. Diese Untersuchungen finden in der Analytikabteilung der Fa. CERESTAR in Krefeld statt und werden durch firmeneigenes Laborpersonal durchgeführt, da es sich bei der Analyse der Hauptbestandteile und spezielle Verfahren handelt, deren Durchführung einerseits eine besondere Laborausstattung und andererseits speziell für diese Untersuchungen ausgebildetes Personal voraussetzen. Von Seiten der Fa. CERESTAR war es aufgrund von Geheimhaltungsvereinbarungen leider nicht möglich, die zur Analyse angewandten Verfahren zu beschreiben. Aufgrund dieser Sachlage können hier zu diesem Zeitpunkt keine genauen Verfahren zur Ermittlung der Hauptbestandteile im Weizenprotein erläutert werden. Die Ergebnisse der Weizenproteinanalyse, die in Kapitel 4.1.3.1.1 aufgeführt sind, wurden von der Fa. CERESTAR im Rahmen einer gemeinsamen Besprechung im Jahr 2004 mitgeteilt.



**Abbildung 3-1: Natives Weizenprotein der Fa. CERESTAR**

Analog zur Charakterisierung der Hauptbestandteile des Weizenproteins werden im Labor des Kompetenznetzes zur Nachhaltigen Holznutzung der Georg-August-Universität Göttingen die Viskositäten dieses naturnahen Bindemittels aus der laufenden Produktion unter Berücksichtigung der Feststoffgehalte ermittelt. Die Bestimmung der Viskositäten erfolgt analog zu den Viskositätsmessungen der verwendeten konventionellen und naturnahen Bindemittel bzw. der Mischkondensate. Das Verfahren ist in Kapitel 3.1.3.1 ausführlich

beschrieben. Anhand der Veränderung der Viskositäten lassen sich Rückschlüsse auf Veränderungen in der Zusammensetzung des Ausgangsmaterials bzw. Veränderungen bei den Herstellungsparametern ziehen. Das Weizenprotein, das zur Herstellung der Mitteldichten Faserplatten im Rahmen dieser Arbeit verwendet wird, wie auch die Proben aus der laufenden Produktion zur Ermittlung der Viskositäten stammen beide aus dem CERESTAR Werk in Barby. Parallel zu den Feststoffgehalten des Weizenproteins werden auch bei jeder Neuanlieferung des Materials die pH-Werte dieses natürlichen Bindemittels im Labor des NHN überprüft.

### 3.1.3.2 Viskositätsmessungen

Die Viskosität eines Bindemittels ist ein entscheidender Faktor bei der Beleimung von Fasermaterialien. Mit steigender Viskosität wird eine gleichmäßige und flächige Beleimung immer unwahrscheinlicher, da sich das Bindemittel schlechter versprühen lässt und der erzeugte Sprühnebel im Mischer immer mehr von der gewünschten Kegelform (vgl. dazu auch Kapitel 2.4) abweicht. Dadurch wird das Bindemittel im schlimmsten Fall nur noch tropfenweise und nicht mehr flächig auf die Fasern aufgetragen, da eine gleichmäßige Beschickung der Beleimungsdüse mit einem hochviskosen Bindemittel nicht realisierbar ist. Begründen lässt sich die unregelmäßige Zuführung von hochviskosen Bindemitteln mit der Tatsache, dass es beim Anrühren dieser Bindemittel häufig zu Lufteinschlüssen im Leim kommt. Dies führt bei der späteren Verpressung der Fasern dann sowohl zu Leimflecken als auch zu bindemittelfreien Stellen in der Platte.

Einen besonderen Einfluss auf die Viskosität haben der Kondensationsgrad und die Stoffkonzentration des Bindemittels. Diese beiden Faktoren wirken sich unmittelbar auf die Benetzungsfähigkeit, die Verarbeitbarkeit, das Fließverhalten und die Verwendungsdauer eines Bindemittels aus. Weiterhin wird die Viskosität eines Bindemittels vom Molekulaufbau und den polaren Gruppierungen sowie der Länge der vorhandenen Seitenketten bestimmt. Bindemittel werden hinsichtlich ihres Fließverhaltens als *idealviskos*, *scherverdünnend* und *scherverdickend* eingeteilt. Ein Bindemittel ist *idealviskos*, wenn eine Erhöhung der Scherbelastung keine Auswirkungen auf das Fließverhalten hat. Nimmt die Steigung der Fließkurve mit der Erhöhung der Scherbelastung ab, so spricht man von einem *scherverdünnendem Fließverhalten*. Steigt die Fließkurve eines Bindemittels mit zunehmender Scherbelastung, so handelt es sich um ein *scherverdickendes* Bindemittel.

Die Viskositätsmessungen des Weizenprotein-, der Harnstoff- und Phenol-Formaldehyd-Harz-Bindemittel werden mit einem Viskosimeter der Fa. PHYSICA, Ostfildern durchgeführt. Dabei handelt es sich um ein Schubspannungs-, Rotations- und Kriechrheometer des Typs Rheolab MC 1 Portable. Das Viskosimeter ist mit zwei unterschiedlichen Meßsystemen ausgestattet und wird über einen angeschlossenen PC mit Hilfe der Software US 200 bedient.

Die Viskosität beschreibt die Zähigkeit einer Substanz, d.h. die innere Reibung von Flüssigkeiten. Die Kraft, die für die Überwindung dieser Reibung erforderlich ist, wird als Schubspannung ( $\tau$ ) bezeichnet. Durch die Krafteinwirkung entsteht zwischen zwei Schichten der Flüssigkeit ein Geschwindigkeitsgefälle ( $D$ ). Die Viskosität beschreibt somit das Verhältnis der Schubspannung zum Geschwindigkeitsgefälle; sie wird nach AYL (1980) daher auch als dynamische Viskosität ( $\eta$ ) bezeichnet. Die Berechnung der dynamischen Viskosität ist im Anhang unter Kapitel 8.1.3.1 aufgeführt. Die dynamische Viskosität ist definiert durch die Kraft in Newton (N) die erforderlich ist, um in einer Flüssigkeitsschicht von 1 cm<sup>2</sup> Flächengröße und 1 cm Höhe eine Grenzfläche parallel zur gegenüberliegenden anderen Grenzfläche mit einer Geschwindigkeit von 1 cm·s<sup>-1</sup> zu verschieben. Dabei gilt der Grundsatz  $1 \text{ Pa}\cdot\text{s} = 1 \text{ Nsm}^{-2} = 1 \text{ kg m}^{-1} \text{ s}^{-1}$  (HABENICHT, 1997).

Vor der Viskositätsbestimmung werden die Bindemittel auf 20 °C ± 2 °C temperiert. Für die Messung wird ein Messzylinder vom Typ DIN Z3 verwendet. Bei diesem Verfahren befindet sich die zu messende Substanz im Messspalt zwischen dem feststehenden Messbecher und dem rotierenden Messkörper. Aus dem Fließwiderstand der zu messenden Substanz, der sich auf das Drehmoment des Messkörpers auswirkt, wird die Viskosität berechnet.

Jede Viskositätsbestimmung besteht aus 25 Messpunkten. Die Messdauer beträgt 7,2 Sekunden pro Messpunkt, woraus sich eine Gesamtzeit von 180 Sekunden pro Messung ergibt. Da sich eine Viskositätskurve über die Zeit und die Scherrate definiert, wird die Scherrate mit zunehmender Steigung im Verlauf der Messung vorgegeben. Die Viskositätsmessung beginnt mit einer Scherrate von 1 1/s und endet mit einer Scherrate von 999 1/s. Die genauen Versuchsparameter sind in den Kapiteln 3.1.3.2.1 bis 3.1.3.2.5 erläutert.

#### 3.1.3.2.1 Viskositäten des Harnstoff-Formaldehyd-Harz Bindemittels

Das in dieser Dissertation verwendete *Harnstoff-Formaldehyd-Harz* Kauritec 407<sup>®</sup> flüssig der Fa. BASF ist mit einer durchschnittlichen Viskosität von 150 – 300 mPa·s, bei einer

Materialtemperatur von 20 °C, angegeben. Auch bei diesem Bindemittel erhöht sich die Viskosität mit zunehmender Lagerungszeit (BASF, 2002). Das Bindemittel wird im Rahmen dieser Promotion alleine und in Kombination mit unterschiedlichen Hydrophobierungsmitteln, HYDROWAX 138 und HYDROWAX 730 der Fa. SASOL, als Leimflotte zur Herstellung von Referenzplatten verwendet. Daher ist die Viskosität der unterschiedlichen Leimflotten (siehe dazu Kapitel 4.1.3.1) ein entscheidender Faktor bei der Beurteilung der mechanisch-technologischen Eigenschaften der Referenzplatten (vgl. dazu Kapitel 4.2.1).

#### 3.1.3.2.2 Viskositäten des Phenol-Formaldehyd-Harz Bindemittels

Das für die Herstellung von PF-Harz gebundenen Mitteldichten Faserplatten verwendete Phenol-Formaldehyd-Harz vom Typ 1808 HW der Fa. BAKELITE ist seitens des Herstellers mit einer durchschnittlichen Viskosität von 150 – 200 mPa·s, bei einer Materialtemperatur von 20 °C, angegeben. Das PF-Harz ist bei 20 °C nur ca. 1 Woche, bei 15 °C 2 Wochen lagerfähig (BAKELITE AG, 2003). Das Phenol-Formaldehyd-Harz Bakelite® PF 1808 HW wurde für diese Promotion zur Herstellung von Referenzplatten verwendet. Dazu wird das Harz einerseits separat und andererseits als Leimflotte in Verbindung mit den Hydrophobierungsmitteln HYDROWAX 138 und HYDROWAX 730 der Fa. SASOL verwendet. Sowohl bei der Beleimung des Fasermaterials mit purem PF-Harz als auch mit den o. g. Leimflotten sind die Viskositäten (vgl. dazu auch Kapitel 4.1.3.2.2) ein wichtiges Kriterium bei der späteren Ermittlung der mechanisch-technologischen Eigenschaften der hergestellten Referenzplatten (vgl. dazu auch Kapitel 4.2.2).

#### 3.1.3.2.3 Viskositäten der UF-Harz/Weizenprotein Bindemittel

Bei der Durchführung der Versuchsreihen zur Substitution von Harnstoff-Formaldehyd-Harz (BASF *Kauritec407*® *flüssig*) durch das Weizenproteinbindemittel werden die beiden Bindemittel in unterschiedlichen Gewichtsanteilen (m / m bezogen auf atro Faser) gemischt und z. T. noch mit den Hydrophobierungsmitteln HYDROWAX 138 und HYDROWAX 730 der Fa. SASOL in unterschiedlichen Konzentrationen versetzt (siehe dazu auch Kapitel 3.2.4). Bedingt durch die unterschiedlichen prozentualen Gewichtsanteile der beiden Klebstoffe und die Verwendung von Hydrophobierungsmitteln ergeben sich auch unterschiedliche Viskositäten der Bindemittelflotten. Bei der Substitution von UF-Harz durch Weizenproteine

sind nicht nur die mechanisch-technologischen Eigenschaften der hergestellten Mitteldichten Faserplatten (vgl. auch Kapitel 4.2.3) sondern auch die Viskositäten der verwendeten Leimflotten (vgl. dazu auch Kapitel 4.1.3.2.3) von Bedeutung.

#### 3.1.3.2.4 Viskositäten der PF-Harz/Weizenprotein Bindemittel

Analog zur Substitution von Harnstoff-Formaldehyd-Harz durch Weizenproteine (vgl. Kapitel 3.1.3.2.3 und Kapitel 3.2.4) werden Phenol-Formaldehydharz gebundene Mitteldichte Faserplatten hergestellt (vgl. Kapitel 3.2.5), bei denen die Menge an PF-Harz (Typ 1808 HW der Fa. BAKELITE) durch eine Weizenprotein-Suspension in unterschiedlichen Gewichtsanteilen (m/m bezogen auf trockenes Fasergewicht) substituiert wird. Diese Bindemittelformulierungen mit unterschiedlichen Gewichtsanteilen werden sowohl ohne Hydrophobierungsmittel als auch mit den beiden unterschiedlichen Paraffine HYDROWAX 138 und HYDROWAX 730 der Fa. SASOL in industriell üblichen Dosierungen zur Herstellung von MDF-Platten verwendet. Zur Beurteilung der mechanisch-technologischen Eigenschaften der PF-Harz substituierten Mitteldichten Faserplatten (Kapitel 4.2.4) und für den Vergleich zum reinen Phenol-Formaldehyd-Harz (Kapitel 4.1.3.2.2) werden die Viskositäten der unterschiedlichen Bindemittelformulierungen herangezogen.

#### 3.1.3.2.5 Viskositäten des Weizenprotein Bindemittels

Das Weizenprotein der Fa. CERESTAR, das zur Herstellung von Mitteldichten Faserplatten im Rahmen dieser Dissertation verwendet wird, unterliegt bei seiner Produktion geringen Schwankungen, die sich z.B. im Feststoffgehalt des Bindemittels niederschlagen. Diese Schwankungen lassen sich mit der Tatsache begründen, dass das Weizenprotein ein Nebenprodukt der Stärkeherstellung ist, und die Ausgangsstoffe zur Stärkegewinnung nicht immer die gleichen Eigenschaften bzw. Mischungsverhältnisse aufweisen. Daher gibt es auch leichte Schwankungen bei dem daraus resultierenden Nebenprodukt, dem Weizenprotein. Aus diesem Grund wurden mehrere Proben aus der laufenden Produktion der Fa. CERESTAR über einen längeren Zeitraum kontinuierlich auf ihre Viskositäten und Feststoffgehalte hin untersucht.

Des Weiteren wurde das Weizenprotein sowohl separat als auch in Kombination mit den Hydrophobierungsmitteln HYDROWAX 138 und HYDROWAX 730 der Fa. SASOL als Leimflotte zur Herstellung von Mitteldichten Faserplatten verwendet. Durch die Variation der unterschiedlichen Bestandteile in den Leimflotten ändern sich auch die Viskositäten der im Rahmen dieser Promotion verwendeten Leimflotten. Auch bei der Beurteilung der mechanisch-technologischen Eigenschaften der mit Weizenprotein hergestellten Mitteldichten Faserplatten (vgl. dazu auch Kapitel 4.2.5) ist die Viskosität der verwendeten Leimflotten (siehe dazu auch Kapitel 4.1.3.2.5) ein wichtiges Kriterium.

### **3.1.3.3 Ermittlung der Stickstoffgehalte**

Die im Rahmen dieser Dissertation verwendeten konventionellen und naturnahen Bindemittel werden analytisch hinsichtlich ihres Stickstoffgehaltes mit Hilfe der KJELDAHL-Methode nach DIN EN 25663 untersucht. Dabei ist im Falle der Weizenprotein-Suspension eine Berechnung des Gesamtproteingehaltes mit Hilfe des Stickstoffgehaltes möglich. Von besonderer Bedeutung sind die Stickstoffgehalte für die in Kapitel 3.4.1 und Kapitel 3.4.2 beschriebenen Holzabbauversuche, da Stickstoff grundsätzlich eine wichtige Nährstoffquelle für Weißfäule-, Braunfäule- und Schimmelerreger (vgl. dazu Kapitel 2.6 und Kapitel 4.3 ff.) darstellt. Es wird seitens der konventionellen Bindemittel nur das Harnstoff-Formaldehyd-Harz Kauritec 407<sup>®</sup> flüssig der Fa. BASF auf seinen Stickstoffgehalt hin untersucht, da mit den in dieser Arbeit hergestellten Phenol-Formaldehyd-Harz gebundenen Mitteldichten Faserplatten kein Holzabbauversuch durchgeführt wird. Die genaue Versuchsbeschreibung zur Durchführung der KJELDAHL-Methode ist in Kapitel 3.1.3.3.1 dargelegt.

#### **3.1.3.3.1 KJELDAHL-Methode (DIN EN 25663)**

Auf der Suche nach einer Möglichkeit zur Bestimmung des Stickstoffgehaltes in Gerste und Hefe entwickelte Johan KJELDAHL (1849-1900) im Jahre 1883 ein geeignetes Verfahren. Die Stickstoffbestimmung nach KJELDAHL ist seit mehr als 120 Jahren ein akzeptierter Standard. Sie wird heute sowohl in der Lebensmittelchemie zur Proteinbestimmung von Bier, Getreide, Milch- und Fleischwaren als auch in der Umweltanalytik und Agroindustrie zur Bestimmung von Nitraten und Ammonium eingesetzt ([www.kmf-laborchemie.de/pdf/Kjeldahl\\_de1.pdf](http://www.kmf-laborchemie.de/pdf/Kjeldahl_de1.pdf), 14.12.2005).

Diese Methode unterteilt sich grob in drei Arbeitsschritte. Dabei werden die zu bestimmenden Proben zunächst mit Schwefelsäure in einem Kochprozess aufgeschlossen. Die in den Proben enthaltenen Stickstoffverbindungen wie z.B. Proteine, Amine und andere organische Verbindungen werden auf diese Weise in Ammoniumverbindungen überführt. Der Aufschluss wird anschließend mit Lauge und bidest. Wasser destilliert, so dass Ammoniak durch die Lauge freigesetzt und aufgrund der Destillation ausgetrieben werden kann. Das Destillat wird dann in einem letzten Arbeitsschritt auf einen bestimmten pH-Wert zurück titriert. Die chemische Reaktion bei diesem Verfahren ist in Tabelle 3-2 beispielhaft an einer Stickstoffhaltigen Probe erläutert. Um den Weg des Stickstoffs bei den Reaktionen einfacher verfolgen zu können, ist dieser blau markiert. Die einzelnen Arbeitsschritte werden in der darauf folgenden Versuchsbeschreibung ausführlich erläutert.

**Tabelle 3-2: Arbeitsschritte und chemische Reaktionen bei der KJELDAHL-Methode ([www.kmf-laborchemie.de/pdf/Kjeldahl\\_de1.pdf](http://www.kmf-laborchemie.de/pdf/Kjeldahl_de1.pdf), 14.12.2005)**

Arbeitsschritt	Chemische Reaktion	
Aufschluss	$\text{CHNO} + \text{H}_2\text{SO}_4$ [Probe]	$\longrightarrow$ [Katalysator] $\text{CO}_2 + \text{SO}_2 + \text{H}_2\text{O} + (\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$
Neutralisation	$\text{H}_2\text{SO}_4 + 2 \text{NaOH}$ $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4 + 2 \text{NaOH}$	$\longrightarrow$ $\text{Na}_2\text{SO}_4 + 2 \text{H}_2\text{O}$ $\text{Na}_2\text{SO}_4 + 2 \text{NH}_3 + 2 \text{H}_2\text{O}$
Wasserdampfdestillation		
Borsäure-Titration	$\text{H}[\text{B}(\text{OH})_4] + \text{NH}_3$ $2 \text{NH}_4[\text{B}(\text{OH})_4] + \text{H}_2\text{SO}_4$	$\longrightarrow$ $\text{NH}_4[\text{B}(\text{OH})_4]$ $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4 + 2 \text{H}[\text{B}(\text{OH})_4]$

### **Aufschluss**

Der Aufschluss der beiden im Rahmen dieser Dissertation untersuchten Bindemittel, dem Weizenprotein der Fa. CERESTAR und das Harnstoff-Formaldehyd-Harz Kauritec 407<sup>®</sup> flüssig der Fa. BASF, erfolgte unter Verwendung von Schwefelsäure (98 %) und Kjeltabs vom Typ CT. Ein Kjeltab ist zusammengesetzt aus 5 g K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, 0,15 g CuSO<sub>4</sub> x 5 H<sub>2</sub>O und 0,15 g TO<sub>2</sub>. Die Tabs wirken als Katalysatoren beim Aufschlussprozess, da sie den Siedepunkt der Schwefelsäure auf 400 °C herabsetzen. Der Aufschluss ist der einzige Arbeitsschritt bei der KJELDAHL-Methode, der aufgrund der eingesetzten Chemikalien unter einem Abzug stattfinden muss. Dafür werden zuerst die auf ihren Stickstoff- und/oder Proteingehalt zu untersuchenden Bindemittel in die für den Aufschluss vorgesehenen 400 ml fassenden Gefäße eingewogen. Anschließend gibt man pro Kolben zuerst 2 Kjeltabs und danach 25 ml Schwefelsäure (98 %) hinzu. Die Gefäße werden darauf hin in den KJELDAHLTHERM KB/KBL



der Fa. GERHARDT gestellt, mit den dazugehörigen Deckeln bedeckt und der integrierte Heizblock wird auf 400 °C erhitzt. Der beim Kochprozess entstehende schwefelsäurehaltige Dampf wird mit Hilfe eines angeschlossenen Absaugsystems, dem TURBOSOG TUR/TVK, in Natriumhydroxid (20 %) zweifach gewaschen. Wichtig dabei ist, dass man den Dampfabzug nicht zu stark einstellt, da ansonsten zuviel Schwefelsäure aus dem Aufschluss in Form von Dampf entzogen wird und so ein vollständiger Probenaufschluss nicht mehr gewährleistet ist. Der Großteil des schwefelsäurehaltigen Dampfes soll während des Kochprozesses an den Innenwänden des Gefäßes zurückfließen um auf dem Boden des Gefäßes wieder erhitzt zu werden.

Während des Kochprozesses nimmt die Probe eine grüne Farbe an; dieser Zeitpunkt dient als Messpunkt für die weitere Kochdauer. Nach dem Farbumschlag lässt man die Probe noch weitere 90 Minuten kochen, damit alle Bestandteile aufgeschlossen werden. Danach ist der Aufschluss beendet und der Heizblock des KJELDAHLTHERM wird ausgeschaltet. Die Proben müssen nun auf Zimmertemperatur abkühlen wobei die Gefäße immer noch geschlossen bleiben, damit eventuell noch entweichender schwefelsäurehaltiger Dampf über den TURBOSOG abgesaugt wird.

### ***Destillation***

Die aufgeschlossenen und abgekühlten Proben werden mit Hilfe der Destillationsapparatur VAPODEST 30 der Fa. GERHARDT anhand eines zuvor festgelegten Programms automatisch destilliert. Das Programm ist so eingestellt, dass vor der Destillation die Proben zunächst neun Sekunden lang mit bidestilliertem Wasser und anschließend vier Sekunden lang mit Natronlauge (32 %) vermengt werden, um den in den Proben enthaltenen Ammoniak freizusetzen. Danach beginnt der Destillationsprozess um den zuvor freigesetzten Ammoniak zu überführen. Die Destillation dauert exakt 4 Minuten, wobei der Dampfdruck im System konstant 100 % beträgt. Das Destillat wird in einem 250 ml fassenden Becherglas, in das vor der Destillation 50 ml Borsäure (4 %) gefüllt werden, aufgefangen. Die Borsäure ist mit einer TASHIRO-Indikator-Lösung versetzt, damit eventuell auftretende Verunreinigungen durch zurücklaufende Lauge bei der Destillation visuell feststellbar sind.

### ***Titration***

Nach der Destillation werden die Proben mit Hilfe der Titrationsapparatur TITROLINE EASY der Fa. SCHOTT automatisch anhand ihres pH-Wertes mit 0,05 M Schwefelsäure zurück

titriert. Der zu titrierende Ziel-pH-Wert beträgt bei der Stickstoffbestimmung nach KJELDAHL exakt 5,2. Die benötigte Menge an 0,05 M Schwefelsäure wird von der Titrationsapparatur festgehalten und dient dann anschließend zur Berechnung des Stickstoff- bzw. Proteingehaltes. Die Formeln zur Berechnung des Stickstoffgehaltes und des Gesamtproteingehaltes sind im Anhang unter Kapitel 8.1.4.1 aufgeführt. Die Ergebnisse der Stickstoff- und Proteinbestimmungen in den beiden zu untersuchenden Bindemitteln sind in Kapitel 4.1.3.3 ff. dargestellt.

### **3.2 Herstellung von Mitteldichten Faserplatten im Pilotmaßstab**

Die Herstellung von Mitteldichten Faserplatten im Pilotmaßstab erfolgt analog zu der bereits in den Kapiteln 2.4 bis 2.4.1.3 beschriebenen Herstellung von MDF-Platten im industriellen Maßstab. Der Aufbau der Pilot-MDF-Anlage ist an der Konstruktion moderner MDF-Industrieanlagen angelehnt, um einerseits die spätere Umsetzung vom Pilot- in den Industriemaßstab zu erleichtern und andererseits um sicherzustellen, dass die erprobten Verfahren auf bestehende MDF-Anlagen im Industriemaßstab übertragen werden können ohne dadurch kostenintensive Umbauten zu verursachen.

#### **3.2.1 Anlagenteile der Pilot-MDF-Anlage**

Die Herstellung aller im Rahmen dieser Promotion angefertigten Mitteldichten Faserplatten im Pilotmaßstab erfolgte an der Pilot-MDF-Anlage des Kompetenznetzes für Nachhaltige Holznutzung (NHN) im Technikum der Universität Göttingen. Diese MDF-Anlage ist die erste Anlage in Deutschland, mit der die vollautomatische Auflockerung, Trocknung und Beileimung von unterschiedlichen Fasermaterialien sowie die anschließende Streuung eines gleichmäßigen Faservlieses aus beileimtem Fasermaterial im Pilot-Maßstab realisiert werden können.

Im folgenden Text sollen die einzelnen Maschinenteile der Pilot-MDF-Anlage erläutert werden. Dabei werden die Anlagenteile einerseits separat hinsichtlich ihrer mechanischen Funktion sowie ihrer technischen Daten beschrieben und andererseits das Zusammenwirken der einzelnen Maschinen im Verfahrensablauf erläutert.

Die Anlage lässt sich hinsichtlich des Herstellungsablaufes in die vier Hauptbereiche *Beleimung, Trocknung, Vliesbildung und Verpressen/Konditionieren* unterteilen (vgl. Kapitel 3.2.1.1 bis 3.2.1.4). Der erste Bereich besteht aus dem Transportband, dem Mischer und der Pumpe, den zweiten Bereich bilden die Trocknereinheit, der Zyklon und das Speicher- und Zuführband, für den dritten Bereich werden der Faserbunker, der Streukopf und das Formband mit der Kaltpresse benötigt und der vierte Bereich bildet sich aus der Heißpresse und den Maschinen für das spätere Besäumen und Schleifen der Mitteldichten Faserplatten.

Da nahezu alle Motoren der Pilot-MDF-Anlage über einzelne Frequenzumformer (Poti) im zentralen Schaltschrank angesteuert werden, sind die unterschiedlichen Einstellungen dieser Frequenzumformer, d.h. die jeweils verwendeten Drehzahlgeschwindigkeiten der einzelnen Motoren, wichtige Parameter bei der Herstellung von Mitteldichten Faserplatten.

### **3.2.1.1 Beleimung**

#### **3.2.1.1.1 Transportband / Muldengurtförderer**

Mit Hilfe eines Muldengurtförderers wird das unbeleimte Fasermaterial von der Faseraufgabe zum Mischer hin transportiert daher ist das Band für einen gleichmäßigen Transport mit Mitnehmern aus Gummi versehen. Das Transportband ist 6000 mm lang, 400 mm breit, 170 mm tief und hat damit ein Volumen von 0,408 m<sup>3</sup>. Angetrieben wird das Förderband mit einem 0,55 kW starken, frequenzgesteuerten Getriebemotor, der durch einen Kettenantrieb mit der unteren Walze des Muldengurtförderers verbunden ist. Die Geschwindigkeit mit der das Transportband die unbeleimten Fasern in den Mischer befördert lässt sich über einen Poti von Schaltschrank aus steuern.

Auf dem Transportband werden die unbeleimten und aufgelockerten Fasern gleichmäßig, ohne Anpressdruck, per Hand in einer Höhe von ca. 200 mm gestreut. Auf dem Transportband ist eine gleichmäßige Strehöhe des unbeleimten Fasermaterials wichtig, um bei der späteren Beleimung im Mischer einen gleichmäßigen Faserdurchsatz und somit eine gleichmäßige Beleimung des Fasermaterials zu gewährleisten. Bei einer Strehöhe von ca. 200 mm, einem Schüttgewicht von 22,8 kg/m<sup>3</sup> des Fasermaterials, einer gleichmäßigen Geschwindigkeit des Transportbandes (Poti 90) und einer konstanten Umdrehung der Mischerwelle (Poti 4,5) ergibt sich ein Faserdurchsatz von 53 kg/h lutro. Ein gleichmäßiger Faserdurchsatz ist bei der Herstellung von MDF-Platten eine wichtige Stellgröße, da dieser

Wert die Grundlage zur Berechnung der Beleimmenge und des Bindemitteldurchsatzes pro Minute ist (siehe auch Kapitel 8.2.5). Diese Einstellung wurde daher bei allen im Rahmen dieser Dissertation angefertigten Mitteldichten Faserplatten verwendet um konstante Beleimungsbedingungen im Mischer, unabhängig von der verwendeten Bindemittelflotte, zu simulieren.

#### 3.2.1.1.2 Beleimungsmischer

Die Beleimung des Fasermaterials auf der Pilot-MDF-Anlage erfolgt mit Hilfe eines stationären Mixers. Der Mischer wird über einen frequenzgesteuerten Motor mit Keilriemenantrieb betrieben. Die Geschwindigkeit lässt sich über den im Mischerschaltschrank installierten Poti einstellen. Das Gehäuse, wie auch die Umschaltklappe sind aus ca. 2 mm starkem Blech angefertigt. Die Einfallöffnungen wie auch die beiden Ausfallöffnungen des Mixers haben eine Größe von ca. 300 x 300 mm. Die gesamte Konstruktion ist in etwa 800 mm hoch und kann einen maximalen Faserdurchsatz von 8 m<sup>3</sup> / h, d.h. 182,4 kg lutro / h bei dem Schüttgewicht des verwendeten Materials, realisieren.

Bei der Struktur des in dieser Promotion verwendeten Fasermaterials der Fa. STEICO wurde der Poti des Mixers auf 4,5 eingestellt, um bei allen durchgeführten Versuchen einen konstanten Faserdurchsatz von 53 kg lutro in der Stunde zu gewährleisten.

Der Mischer besteht aus einem zu öffnenden Gehäuse aus doppelwandigem Stahl und einer im Gehäuse gelagerten Stachelwalze. Die Stachelwalze ist hinsichtlich ihrer Konstruktion nur für Fasermaterial ausgelegt. Durch den doppelten Stahlmantel ist eine Kühlung des Mischergehäuses bei Langzeitbetrieb möglich um eine Überhitzung und Leimablagerungen in Inneren des Mixers zu vermeiden. Die im Gehäuse befindliche Stachelwalze besitzt drei Zonen, die sich durch unterschiedliche Stachelgeometrien und Stachelanordnungen kennzeichnen. Dies sind eine *Einzugszone* (Pflugscharen), eine *Beleimungszone* (große, konisch zulaufende Stacheln) und eine *Auflockerungszone* (kleine, konisch zulaufende Stacheln).

Das unbeleimte Fasermaterial gelangt vom Transportband über einen Einfallschacht in den Mischer und wird mit Hilfe der auf der Stachelwalze befindlichen Pflugscharen im Mischer weiter transportiert. Anschließend werden die Fasern in der Beleimungszone mit Hilfe einer Zweistoffdüse mit Bindemittel besprüht. Dazu ist über der Beleimungszone ein Loch im

Mischerdeckel, in dem die Beleimungsapparatur im Mischerdeckel arretiert ist. Durch die Verwendung von großen, konisch zulaufenden Stacheln in diesem Bereich der Walze wird das Fasermaterial auseinander gezogen und bildet auf diese Weise eine möglichst große Oberfläche für die Beleimung. Nach der Beleimung wird das Fasermaterial nochmals aufgelockert und vermischt. Durch die Verwendung von kleinen, konisch zulaufenden Stacheln wird im Mischer eine möglichst gleichmäßige Durchmischung des beleimten Materials gewährleistet.

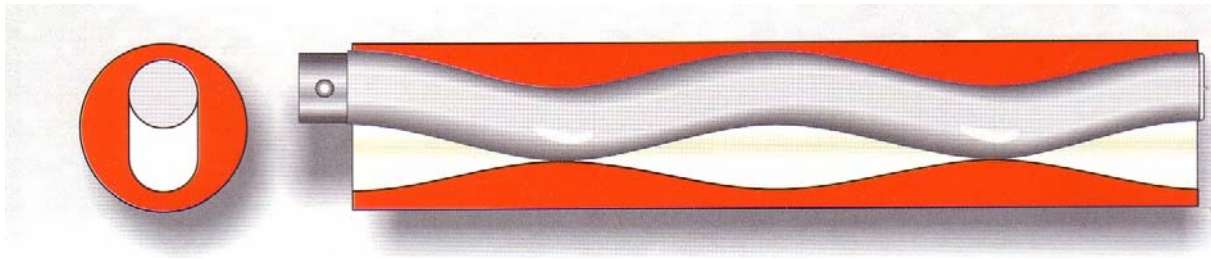
Am Ende der Stachelwalze befindet sich ein Trichter, durch den das beleimte und aufgelockerte Fasermaterial aus dem Mischer befördert wird. Unter dem Mischer ist ein Gehäuse mit einer Stellklappe angebracht, um das aus dem Beleimungsmischer kommende Fasermaterial mit Hilfe einer manuell zu betätigenden und schwenkbar gelagerten Umschaltklappe entweder auf das Zuführband zum Faserbunker oder über eine Ausfallschleuse in die Rohrtrocknerleitung weiterzuleiten.

#### 3.2.1.1.3 Leimpumpe

Die Beschickung der im Mischer zur Beleimung des Fasermaterials arretierten Zweistoffdüse mit unterschiedlichen Bindemitteln erfolgte ausnahmslos mit Hilfe einer NEMO<sup>®</sup>-Verdrängerpumpe der Fa. NETZSCH. Auf der Pumpe ist ein Trichter mit ca. 10 l Volumen angebracht, in dem sich die unterschiedlichen Bindemittel bzw. Leimflotten für die Faserbeleimung befinden. Diese Verdrängerpumpe bzw. der in der Pumpe installierte Rotor wird über einen frequenzgesteuerten Elektromotor mit 50 Hz betrieben. Die Fördermenge, d.h. die Geschwindigkeit mit der sich der Rotor bewegt, kann auf diese Weise über den im Steuerschrank befindlichen Poti geregelt werden.

Die Verdrängerpumpe arbeitet nach dem Rotor-Stator-Prinzip (vgl. Abbildung 3-2), d.h. sie besteht aus einem feststehendem Teil, dem *Stator*, und einem sich darin beweglichem Teil, dem *Rotor*. Der Rotor ist eine Gewindeschraube mit extrem großer Steigung, großer Gangtiefe und kleinem Kerndurchmesser. Den Rotor gibt es zwei unterschiedlichen Ausführungen: mit einem runden Querschnitt (1/2-gängig) oder einem elliptischen Querschnitt (2/3-gängig). Der Stator besitzt zwei oder drei Gewindegänge und die doppelte bzw. 1,5-fache Steigungslänge des Rotors. Aufgrund dieser Konstruktion ergeben sich

zwischen dem Stator und dem Rotor Förderräume, durch die das Fördergut von der Eintritts- zur Austrittsseite transportiert wird wenn der Rotor im Stator umläuft (Fa. NETZSCH, 1998).



**Abbildung 3-2: Rotor-Stator-Prinzip bei der Verdrängerpumpe (Fa. NETZSCH, 1998)**

Da die Viskositäten und Temperaturen der verwendeten Bindemittel bzw. Leimflotten einen erheblichen Einfluss auf die Fördermenge der Pumpe haben, muss die Pumpe vor jeder Beleimung erneut ausgelitert werden. Dazu wird zuerst die benötigte Bindemittelmenge errechnet (siehe dazu auch Kapitel 8.2.5). Das Bindemittel bzw. die fertig angerührte und vermischte Leimflotte wird in den Trichter der NEMO<sup>®</sup>-Verdrängerpumpe gefüllt und die Pumpe anschließend angestellt. Dabei ist darauf zu achten, dass der Poti der Pumpe am Schaltschrank zu Beginn auf „0“ eingestellt ist. Danach wird ein Behälter mit ca. 2000 ml Fassungsvermögen auf einer Tischwaage tariert und die Zweistoffdüse am Förderschlauch mit Hilfe von Gewindemuttern befestigt. Die Druckluftleitung für den Bindemitteltransport in der Zweistoffdüse wird eingeschaltet und der Poti der Pumpe am Schaltschrank auf „1“ hoch gedreht. Mit einer Stoppuhr wird für exakt eine Minute das Bindemittel in dem zuvor tarierten Behälter aufgefangen. Nach Ablauf der Minute wird der Behälter auf der Tischwaage gewogen und so die Fördermenge der Pumpe in g pro Minute ermittelt. Der Behälter wird anschließend inklusive des aufgefangenen Bindemittels auf der Tischwaage tariert und kann für die nächste Messung verwendet werden. Dieser Vorgang wird so lange wiederholt, bis die notwendige Fördermenge mit Hilfe des Frequenzumrichters an der Pumpe eingestellt ist.

### **3.2.1.2 Trocknung**

#### **3.2.1.2.1 Trocknereinheit**

Die Trocknung des beleimten Fasermaterials erfolgt in einer 50 m langen, mit einem Gasbrenner beheizten Rohrtrocknerleitung mit einem Durchmesser von 150 mm. Nach Angaben der Fa. BINOS können in der Rohrtrocknerleitung ca. 100 kg Fasermaterial mit einer Feuchte von 100 % in einer Stunde auf eine Endfeuchte von 10 % heruntergetrocknet werden.

Daraus ergibt sich eine Verdampfung von maximal 90 kg Wasser in der Stunde. Die Temperaturen für diese Trocknung betragen beim Materialeintritt in die Leitung 175 °C und am Zyklon 65 °C. Die Trocknereingangs- und Trocknerausgangstemperaturen lassen sich über das im Steuerschrank befindliche Display je nach vorhandener beleimter Faserfeuchte unterschiedlich voneinander einstellen. Auf Grundlage der berechneten theoretischen Feuchte des beleimten und ungetrockneten Fasermaterials (siehe dazu auch Kapitel 8.2.6) werden die Temperaturen für den Trocknereingang und Trocknerausgang gewählt. Nach der Trocknung sollte das beleimte Fasermaterial eine Pressfeuchte von ca. 9 % bis 14 % lutro, je nach späterer Plattendicke, aufweisen um eine optimale Verpressung unter Druck und Hitze zu gewährleisten.

Hinter der aus einem hitzebeständigem Werkstoff hergestellten Brennerkammer ist eine Ausfallschleuse installiert, durch die das beleimte Fasermaterial aus dem Mischer in die Rohrtrocknerleitung gelangt. Die Leitung ist aus 1 mm starkem Blech gefertigt und von außen vollständig mit feuerfester Holzwolle isoliert. Für den Transport des Fasermaterials in der Rohrtrocknerleitung ist ein 15 kW Ventilator eingebaut, der die Fasern über ca. 2/3 der Trocknungsstrecke ansaugt, anschließend durch den Ventilator befördert und dann über das letzte Drittel der Strecke zum Zyklon hin transportiert. Hinter dem Brenner und kurz vor dem Zyklon sind Temperaturfühler in der Rohrleitung angebracht, mit denen die Trocknereingangs- und Trocknerausgangstemperaturen gemessen und kontrolliert werden. Aus Sicherheitsgründen sind am Trocknereingang und Trocknerausgang Magnetventile vom Typ DIN 20 zur Feuerlöschung angebracht. Die Magnetventile werden über den Temperatur-Max-Kontakt am Trocknerausgang angesteuert.

Der Zyklon besteht aus 3 mm starkem Blech und ist an einem Profilstahlgerüst unter der Decke des Technikums befestigt. Das beleimte und getrocknete Fasermaterial wird vom Ventilator der Rohrtrocknerleitung aus in den Zyklon befördert und anschließend mit Hilfe einer unter dem Zyklon angebrachten Zellenradschleuse aus dem Zyklon auf das Speicher- und Zuführband überführt. Der bei der Trocknung entstandene Wasserdampf entweicht durch die im Zyklon befindliche Esse. Das Luftsystem der Rohrtrocknerleitung und des Zyklons muss dabei permanent geschlossen bleiben. Die an der Zellenradschleuse angebrachten Gummilippen dichten den Zyklon bei der Austragung des Fasermaterials ab und verhindern auf diese Weise eine Luftdurchwirbelung im Inneren des Zyklons. Dies hätte eine Aufwirbelung des Fasermaterials zur Folge und würde einen ungleichmäßigen Faseraustrag und evtl. ein Verstopfen des Zyklons bewirken.

### 3.2.1.2.2 Speicher- und Zuführband

Das Speicher- und Zuführband der Pilot-MDF-Anlage ist 800 mm breit, läuft auf einer selbsttragenden Konstruktion und wird mittels einer Antriebstrommel, einer Spannrolle und sechs unterstützenden Trommeln betrieben. Das Speicherband hat ein tatsächliches Nutzvolumen von 3 m<sup>3</sup>. Die konische Antriebstrommel hat einen Durchmesser von 190 mm und ist gummiert, die Spannrolle ist konisch und besitzt ebenfalls einen Durchmesser von 190 mm. Die sechs unterstützenden Trommeln, die das Band zwischen der Antriebs- und Spanntrommel stabilisieren, haben jeweils einen Durchmesser von 63 mm. Der Achsabstand zwischen der Antriebstrommel und der Spanntrommel beträgt 11000 mm. Der Bandantrieb wird über einen frequenzgesteuerten Elektromotor mit 3 kW vom Schaltschrank der Pilot-MDF-Anlage aus bedient.

Dieses Förderband übernimmt bei der Herstellung von Mitteldichten Faserplatten zwei Funktionen. Zum einen dient es als Transportband, daher die Bezeichnung *Zuführband*, zum anderen kann es als Lagerstelle für Fasermaterial, daher die Bezeichnung *Speicherband*, genutzt werden.

Das Zuführband dient zum Transport des Fasermaterials vom Zyklon zum Faserbunker hin. Um eine gleichmäßige Beschickung des Faserbunkers zu garantieren ist das Band mit Mitnehmern ausgestattet. Um eine erhöhte Staubentwicklung im Bereich des Faseraustrages unter dem Zyklon zu vermeiden, ist auf den 2 mm starken Blechwänden des Speicher- und Zuführbandes in diesem Bereich eine Plexiglasabdeckung angebracht.

Ist eine Inkubationszeit des beleimten Fasermaterials mit Bindemitteln unter Zuführung von Sauerstoff, wie z.B. bei der Verwendung von Laccase, notwendig, so kann das beleimte Fasermaterial auf diesem Förderband inkubiert werden (SCHÖPPER, 2002).

### 3.2.1.3 Vliesbildung

#### 3.2.1.3.1 Faserbunker

Der Faserbunker besteht aus einem Profilstahlrahmen mit Blechwänden sowie einer Abdichtung zum Dosierband. Er hat mit den Maßen (Länge/Breite/Höhe) 3500 mm x 800 mm x 1100 mm und der um 45° abgeschrägten Austragsfront ein Volumen von ca. 3 m<sup>3</sup>. Unter dem Einfallschacht, durch den das Fasermaterial über das Speicher- und Zuführband in den



Faserbunker gelangt, ist ein Austrags- bzw. Rückstreifrechen montiert. Der Rückstreifrechen wird über einen Getriebemotor mit 2,2 kW und Rollenketten betrieben. Das in den Bunker einfallende Fasermaterial wird durch den Austragsrechen, bestehend aus fünf Walzen von je 600 mm Durchmesser, gleichmäßig im hinteren Teil des Bunkers verteilt.

Das regelmäßige Befüllen des Faserbunkers mit beleimtem Fasermaterial ist für die spätere Qualität des gestreuten Faservlieses, insbesondere der konstanten Rohdichte, von entscheidender Relevanz. Das im Bunker installierte Dosierband befördert das Fasermaterial zur Austragsfront des Bunkers, wobei die Fasermenge über die Dosierbandgeschwindigkeit am Steuerschrank zu regeln ist. Das frequenzgesteuerte Dosierband arbeitet mit 0,75 kW. Im vorderen um 45° abgeprägten Bereich des Faserbunkers befinden sich vier Austragswalzen, jeweils mit 0,75 kW angetrieben, mit denen das Fasermaterial aus dem Bunker in den Faserstreukopf befördert wird.

#### 3.2.1.3.2 Faserstreukopf

Der Streukopf der Pilot-MDF-Anlage besteht aus einem höhenverstellbaren, schräg angeordneten Walzenbrett, in einer Rahmenkonstruktion mit Seitenwänden aus Blech. Sechs Stachelwalzen, jeweils mit einem Durchmesser von 230 mm, und ein Rückstreifrechen mit einem Durchmesser von 600 mm bilden das Walzenbrett. Die Walzen werden über frequenzgesteuerte Aufsteckgetriebemotoren, deren Geschwindigkeiten sich separat am Steuerschrank über die einzelnen Poti einstellen lassen, betrieben. Die sechs Stachelwalzen und der Rückstreifrechen sind mit 0,75 kW angegeben.

Da sich die Stachelwalzen immer abwechselnd im bzw. gegen den Uhrzeigersinn drehen, werden gleichzeitig Fasern gestreut und zu hoch gestreute Fasern zur nächsten wieder streuenden Walze transportiert. Man spricht daher auch von *ziehenden* und *streuenden* Walzen. Auf diese Weise wird durch den Faserstreukopf ein Faservlies mit einer Breite von 800 mm auf dem Formband gestreut. Dabei sorgt der manuell durch Gewindespindeln höhenverstellbare Rückstreifrechen für eine gleichmäßige Streuhöhe des Vlieses und somit für eine konstante Rohdichte in den späteren Platten. Die benötigte Streuhöhe richtet sich ausschließlich nach der späteren Zielrohichte der hergestellten Mitteldichten Faserplatten.

### 3.2.1.3.3 Formband

Das Formband wird über einen 800 mm hohen Tisch, bestehend aus zwei Spanplatten sowie zwei Stahlplatten im Bereich der Kaltpresse, mit Hilfe einer Antriebsrolle und einer Spannrolle gezogen. Die konisch konstruierte Antriebsrolle hat einen Durchmesser von 300 mm und ist gummiert. Sie wird durch einen 4,0 kW starken, frequenzgesteuerten Aufsteckgetriebemotor angetrieben. Die konische Spannrolle besitzt ebenfalls einen Durchmesser von 300 mm, ist jedoch nicht gummiert. Der Abstand zwischen der Antriebsrolle und der Spannrolle beträgt 12000 mm daher ergibt sich für das Formband eine Gesamtlänge von 24000 mm.

Durch den Streukopf wird auf dem 900 mm breiten Formband ein Faservlies von ca. 800 mm Breite gestreut. Das Formband ist außen mit 20 mm starken, beschichteten Spanplatten begrenzt, um ein Abbrechen bzw. Ankleben des Faservlieses an den Wänden des Formbandes zu vermeiden. Die Höhe des gestreuten Vlieses ist abhängig von der eingestellten Geschwindigkeit des Formbandes, der Höhe des Rückstreifrechens und der Geschwindigkeit des Dosierbandes im Faserbunker.

Wenn das Faservlies vollständig gestreut ist, wird es mit der Kaltpresse auf ca.  $\frac{1}{4}$  der ursprünglichen Streuhöhe vorverdichtet. Die Kaltpresse ist durch ein Stahlgestell über dem Formband angebracht und erzeugt einen maximalen Druck von  $1,5 \text{ N/cm}^2$ . Das Untergestell des Formbandes ist in diesem Bereich mit zwei Stahlplatten verstärkt um Beschädigungen an der Unterkonstruktion beim Kaltpressen zu vermeiden. Die maximal zu pressende Fläche unter dem Hydraulikstempel beträgt  $2200 \text{ mm} \times 800 \text{ mm}$ , d.h.  $1,76 \text{ m}^2$ . Gesteuert wird die hydraulisch arbeitende Presse über einen Getriebemotor. Aus dem vorverdichteten Faservlies werden anschließend mit einer Luftdruckpistole Platten im Format (Breite/Länge)  $400 \text{ mm} \times 800 \text{ mm}$  geschnitten. Bei einer Gesamtlänge von 2200 mm und einer Schnittfugenbreite von ca. 10 mm lassen sich aus einem vorgepressten Faservlies fünf Platten herstellen.

### 3.2.1.4 Verpressen/Konditionieren

#### 3.2.1.4.1 Heißpresse

Zum Verpressen der Mitteldichten Faserplatten unter Hitze und Druck wurde im Rahmen dieser Dissertation eine hydraulische Einetagen-Unterkolbenpresse der Fa. SIEMPELKAMP verwendet. Die Presse besteht aus einem Pressengestell und einem geschlossenen

Stahlrahmen, sie hat eine maximale Pressfläche von 600 mm x 800 mm und wird über ein Ölpumpen- und Steueraggregat gefahren. An die Presse angeschlossen ist ein Schaltschrank für die notwendige Elektrik. Die Einetagenpresse ist ca. 1955 mm hoch, 980 mm breit, 965 mm tief und wiegt ungefähr 4 Tonnen. Der Kolben hat einen Durchmesser von 300 mm und leistet einen maximalen Druck von ca. 280 bar bei einer Gesamtpresskraft von 200 kN. Aus diesen Angaben ergibt sich ein spezifischer Druck von max. 417 N/cm<sup>2</sup> auf der 600 mm x 800 mm großen Pressfläche.

Das Steuerungsaggregat ist konstruiert aus einem Ölbehälter und zwei auf- bzw. eingebauten Motorpumpen- und Ventileinheiten. Das ölhydraulische Steueraggregat ist für eine automatische Arbeitsweise konzipiert und wird von Schaltschrank aus bedient. Die hydraulischen Schaltventile werden elektromagnetisch direkt angesteuert. Das Steueraggregat ist 1000 mm lang, 700 mm breit, 1100 mm hoch und wiegt 365 kg. Die Hydraulik arbeitet mit einer Motorspannung von 220/380 V und mit einer Ventilspannung von 24 V bei einer Frequenz von 50 Hz.

Der elektrische Schaltschrank ist ein Teil des elektro-hydraulischen Steuerschranks. Er ist oberhalb der Hydraulik in abgeschotteter Ausführung angeordnet. In der linken Fronttür sind alle zur Bedienung der Einetagenpresse notwendigen Schalter, Taster und Anzeigeelemente installiert.

Der Schaltschrank ist ausgelegt für eine Betriebsspannung von 380 V ( $\pm 5\%$ ) bei einer Frequenz von 50 Hz. Die Steuerspannung beträgt 220 V ( $\pm 10\%$ ) bei 50 Hz und die Ventilspannung läuft mit 24 V Gleichstrom.

Alle Zylinder und Kolben sind mit Spezialdichtungen, Schmierabstreifern und Führungsbuchsen ausgestattet. Die Pressflächen im Ober- und Untertisch können elektrisch bis auf maximal 300 °C erhitzt werden. Der benötigte Pressdruck lässt sich mit Reglern exakt einstellen, die Presszeit wird mit Hilfe einer analogen Uhr auf Minuten und Sekunden eingestellt und läuft nachdem die Presse geschlossen ist zurück. Nach Ablauf der vorgegebenen Presszeit öffnet die Presse automatisch. Damit die beim Pressvorgang auftretenden Dämpfe sofort abgesaugt werden ist über der Presse eine Abzugshaube installiert.

Die mit Luftdruck geschnittenen Faserplatten (vgl. Kapitel 3.2.1.3.3) werden auf mit Presspapier belegte Aluminiumbleche gelegt. Auf die Oberseite der Faserplatte werden

ebenfalls ein Presspapier und ein Aluminiumblech gelegt. Das Presspapier ist mit einer Wachsschicht überzogen und verhindert ein Verkleben der Faserplatten auf den Aluminiumblechen. Die ist besonders bei der Verwendung von polymerem Diisocyanat wichtig, da dieses Bindemittel eine Affinität zu Metall besitzt.

In der gewünschten theoretischen Plattenstärke der fertig gepressten Mitteldichten Faserplatten werden Distanzleisten auf das untere Aluminiumblech gelegt. Die Presse fährt dann genau auf die Dicke der gewählten Distanzleisten zu und baut anschließend den benötigten Druck auf.

#### 3.2.1.4.2 Tischformatkreissäge und Langbandschleifmaschine

Nach einer Lagerzeit von mindestens 4 Stunden sind die Platten soweit ausgekühlt, dass sie besäumt werden können. Dies ist notwendig, da der Pressdruck und die Temperatur in der Heißpresse an den Rändern wesentlich geringer sind als in der Mitte der Pressfläche. Die Ränder weisen daher keine signifikanten Werte bzgl. der tatsächlichen mechanisch-technologischen Eigenschaften auf und werden vor der Prüfung der Platten entfernt. Zum Besäumen der Mitteldichten Faserplatten wird eine Tischformatkreissäge der Fa. METABO vom Typ TK 1685 D verwendet. Mit Hilfe der Kreissäge werden an allen Seiten mindestens 6 cm abgeschnitten.

Die Tischformatkreissäge wird auch für den Zuschnitt der Prüfkörper zur Ermittlung der mechanisch-technologischen Eigenschaften verwendet. Die genauen Parameter für diese Zuschnitte sind in den Kapiteln 3.3.2.1 bis 3.3.2.4 aufgeführt.

Nach dem Besäumen der Faserplatten ist der letzte Teil der Konditionierung das Abschleifen der Presshaut. Diese Presshaut bildet sich auf der Ober- und Unterseite der Faserplatten beim Pressen in der Heißpresse. Da die Presse langsam zufährt und auch den benötigten Druck langsam aufbaut, härtet das Bindemittel an der Ober- und Unterseite der Platten bereits am Anfang des Pressvorgangs ohne Druck aus. Das langsame Schließen der Presse ist wichtig, da der Wasserdampf zu Beginn des Pressvorgangs langsam und nicht schlagartig aus den Platten entweichen muss, um Platzer in den Platten zu vermeiden. Das an der Ober- und Unterseite der Platte verdampfende Wasser und der fast direkte Kontakt zu den Heizbacken der Presse bewirken, dass die Materialtemperaturen an diesen Flächen bis zu ca. 0,5 mm Plattentiefe fast den tatsächlichen Presstemperaturen der Heizbacken entsprechen.

Die Faserplatten werden mit einer Langbandschleifmaschine vor dem Zuschnitt der Prüfkörper für die Ermittlung der mechanisch-technologischen Eigenschaften abgeschliffen. Dabei werden von jeder Seite ca. 0,5 mm abgeschliffen. Die Presshaut würde, da sie die Klebefläche zu den Prüfjochen darstellt, ungenaue Werte bei der Prüfung der Faserplatten verursachen. Würde man ungeschliffene Platten für die Ermittlung der mechanisch-technologischen Eigenschaften verwenden, könnte der Prüfkörper nicht wie gewünscht in der Mitte reißen, sondern an einer Stelle an der er mit einer der Prüfjochen verklebt ist.

Um eine erhöhte Staubbelastung durch das Sägen und Schleifen der Mitteldichten Faserplatten zu vermeiden, sind beide Geräte an einen Entstauber vom Typ SMU 1500-S der Fa. SPÄNEX, Uslar angeschlossen.

### **3.2.2 Herstellung von UF-Harz gebundenen Mitteldichten Faserplatten**

Die Harnstoff-Formaldehyd-Harz gebundenen MDF-Platten werden in den theoretischen Endstärken 4 mm (Variante I), 6 mm (Variante II), 8 mm (Variante III), 10 mm (Variante IV), 12 mm (Variante V), 14 mm (Variante VI), 16 mm (Variante VII) und 18 mm (Variante VIII) angefertigt. Die Variation in der Plattenstärke ist darin begründet, da diese MDF-Platten sowohl bei der Beurteilung der mechanisch-technologischen Eigenschaften der Weizenprotein gebundenen MDF-Platten (vgl. Kapitel 4.2.5) als auch bei den mit Mischkondensaten angefertigten Mitteldichten Faserplatten (vgl. Kapitel 4.2.3) als Referenzplatten herangezogen werden. Als Bindemittel wird bei der Herstellung der UF-Harz Referenzplatten ausschließlich der Leim Kauritec 407<sup>®</sup> flüssig der Fa. BASF verwendet. Das Harnstoff-Formaldehyd-Harz wird sowohl alleine als auch in Kombination mit jeweils einer der Paraffindispersionen HYDROWAX 138 und HYDROWAX 730 der Fa. SASOL verwendet, um die Einflüsse dieser unterschiedlichen Hydrophobierungsmittel auf die Quellwerte nach 24 Stunden Wasserlagerung (DIN EN 317) und die Quersugfestigkeiten (DIN EN 319) der hergestellten Mitteldichten Faserplatten feststellen zu können.

In Tabelle 3-3 bis Tabelle 3-5 sind die exakten Herstellungsparameter der Harnstoff-Formaldehyd-Harz gebundenen Mitteldichten Faserplatten in den theoretischen Plattenstärken von 4 mm bis 18 mm (Variante I bis Variante VIII) ausführlich dargestellt. Der Beileimgrad für diese MDF-Platten beträgt 12 % bezogen auf trockene Faser, was den Herstellungsbedingungen unter industriellen Aspekten entspricht. Die leicht voneinander

abweichenden Ausgangsfaserfeuchten und die damit variierenden beleimten und getrockneten Faserfeuchten sind in Tabelle 3-3 bis Tabelle 3-5 angegeben. Nach der Beleimung im stationären Mischer der Pilot-MDF-Anlage wird das Fasermaterial getrocknet und daraus ein Vlies mit einer homogenen Rohdichte gestreut. Die daraus geschnittenen Faserplatten in den Maßen 400 mm x 800 mm werden dann anschließend in der Heißpresse bei 195 °C und einem Druck von 5,7 N/cm<sup>2</sup> verpresst. Beim Heißpressen wird der für Harnstoff-Formaldehyd gebundene MDF-Platten optimale Presszeitfaktor von 18 Sekunden pro mm Plattenstärke auf der Pilot-Heißpresse der Fa. SIEMPELKAMP verwendet. Versuche mit längeren Presszeiten bei UF-Harz gebundenen Mitteldichten Faserplatten auf dieser Presse zeigten, dass sowohl die Querkzugfestigkeiten als auch die Quellwerte nach 24 h Wasserlagerung dadurch negativ beeinflusst wurden (SCHÖPPER, 2002). Als einziger variabler Herstellungsparameter in einer Variante ergibt sich somit die Zugabe von Hydrophobierungsmitteln zur Leimflotte. Dies ist in den Fertigungsparametern (Tabelle 3-3 bis Tabelle 3-5) in blauer Schrift dargestellt. Durch die Verwendung von keinem bzw. einem der beiden Hydrophobierungsmittel ergeben sich drei Serien pro Variante. Pro Serie werden 5 Platten hergestellt, daraus resultiert pro Variante ein Gesamtumfang von 15 Mitteldichten Faserplatten.

Tabelle 3-3: Parameter zur Anfertigung der UF-Harz gebundenen Referenzplatten (Varianten I bis III)

Herstellungsparameter / Variante	I	II	III
<b>Werkstoffdimensionen</b>			
Theoretische Plattenlänge und -breite (mm)	800 x 400	800 x 400	800 x 400
Theoretische Plattendicke (mm)	4	6	8
Zielrohddichte (kg/m <sup>3</sup> )	800	800	800
<b>Fasermaterial</b> <i>Kiefernholz-Industriefaserstoff der Fa. STEICO</i>			
Ausgangsfeuchte (%)	11,5	12,0	12,0
Beleimte und getrocknete Feuchte (%)	9,0	9,5	9,5
<b>Bindemittel</b> <i>UF-Harz Kauritec 407<sup>®</sup> flüssig Fa. BASF</i>			
Feststoffgehalt (%)	66	66	66
Beleimgrad auf atro Fasermaterial (%)	12	12	12
<b>Zugabestoffe</b> <i>Hydrophobierungsmittel der Fa. SASOL</i>			
HYDROWAX 138 atro (%)	0	0	0
	1	1	1
HYDROWAX 730 atro (%)	0	0	0
	1	1	1
<b>Trocknung</b>			
Temperatur <sub>Eingang</sub> (°C)	60	60	60
Temperatur <sub>Ausgang</sub> (°C)	40	40	40
<b>Vorverdichtung</b>			
Pressdruck (N/cm <sup>2</sup> )	1,2	1,2	1,2
Presszeit (Min.)	2	2	2
<b>Heißpressen</b>			
Pressenschließzeit (Sek.)	15	15	15
Pressenöffnungszeit (Sek.)	10	10	10
Presstemperatur (°C)	195	195	195
Pressdruck (N/cm <sup>2</sup> )	5,7	5,7	5,7
Presszeit (Sek./mm Plattendicke)	18	18	18
<b>Gesamtanzahl der Platten</b>	<b>15 Stück</b>	<b>15 Stück</b>	<b>15 Stück</b>

Tabelle 3-4: Herstellungsparameter für die UF-Harz gebundenen Referenzplatten (Varianten IV bis VI)

Herstellungsparameter / Variante	IV	V	VI
<b>Werkstoffdimensionen</b>			
Theoretische Plattenlänge und -breite (mm)	800 x 400	800 x 400	800 x 400
Theoretische Plattendicke (mm)	10	12	14
Zielrohichte (kg/m <sup>3</sup> )	800	800	800
<b>Fasermaterial</b> <i>Kiefernholz-Industriefaserstoff der Fa. STEICO</i>			
Ausgangsfeuchte (%)	12,0	12,0	11,0
Beleimte und getrocknete Feuchte (%)	10,5	11,5	11,0
<b>Bindemittel</b> <i>UF-Harz Kauritec 407<sup>®</sup> flüssig Fa. BASF</i>			
Feststoffgehalt (%)	66	66	66
Beleimgrad auf atro Fasermaterial (%)	12	12	12
<b>Zugabestoffe</b> <i>Hydrophobierungsmittel der Fa. SASOL</i>			
HYDROWAX 138 atro (%)	0	0	0
	1	1	1
HYDROWAX 730 atro (%)	0	0	0
	1	1	1
<b>Trocknung</b>			
Temperatur <sub>Eingang</sub> (°C)	55	55	55
Temperatur <sub>Ausgang</sub> (°C)	40	40	40
<b>Vorverdichtung</b>			
Pressdruck (N/cm <sup>2</sup> )	1,2	1,2	1,2
Presszeit (Min.)	2	2	2
<b>Heißpressen</b>			
Pressenschließzeit (Sek.)	15	15	15
Pressenöffnungszeit (Sek.)	10	10	10
Presstemperatur (°C)	195	195	195
Pressdruck (N/cm <sup>2</sup> )	5,7	5,7	5,7
Presszeit (Sek./mm Plattendicke)	18	18	18
<b>Gesamtanzahl der Platten</b>	<b>15 Stück</b>	<b>15 Stück</b>	<b>15 Stück</b>



Tabelle 3-5: Parameter für die UF-Harz gebundenen Referenzplatten (Varianten VII und VIII)

Herstellungsparameter / Variante	VII	VIII
<b>Werkstoffdimensionen</b>		
Theoretische Plattenlänge und -breite (mm)	800 x 400	800 x 400
Theoretische Plattendicke (mm)	16	18
Zielrohddichte (kg/m <sup>3</sup> )	800	800
<b>Fasermaterial</b> <i>Kiefernholz-Industriefaserstoff der Fa. STEICO</i>		
Ausgangsfeuchte (%)	11,5	12,0
Beleimte und getrocknete Feuchte (%)	12,0	12,5
<b>Bindemittel</b> <i>UF-Harz Kauritec 407<sup>®</sup> flüssig Fa. BASF</i>		
Feststoffgehalt (%)	66	66
Beleimgrad auf atro Fasermaterial (%)	12	12
<b>Zugabestoffe</b> <i>Hydrophobierungsmittel der Fa. SASOL</i>		
HYDROWAX 138 atro (%)	0	0
	1	1
HYDROWAX 730 atro (%)	0	0
	1	1
<b>Trocknung</b>		
Temperatur <sub>Eingang</sub> (°C)	50	50
Temperatur <sub>Ausgang</sub> (°C)	40	40
<b>Vorverdichtung</b>		
Pressdruck (N/cm <sup>2</sup> )	1,2	1,2
Presszeit (Min.)	2	2
<b>Heißpressen</b>		
Pressenschließzeit (Sek.)	15	15
Pressenöffnungszeit (Sek.)	10	10
Presstemperatur (°C)	195	195
Pressdruck (N/cm <sup>2</sup> )	5,7	5,7
Presszeit (Sek./mm Plattendicke)	18	18
<b>Gesamtanzahl der Platten</b>	<b>15 Stück</b>	<b>15 Stück</b>

Die Maschineneinstellungen der Pilot-MDF-Anlage zur Herstellung der Harnstoff-Formaldehyd-Harz gebundenen Referenzplatten Variante I bis VIII (vgl. Tabelle 3-3 bis Tabelle 3-5) sind in Tabelle 3-6 aufgeführt. Da es sich bei den aufgelisteten Parametern um grundsätzliche Anlageneinstellungen zur Herstellung von Kunstharz gebundenen MDF-Platten mit einer Zielrohddichte von 800 kg/m<sup>3</sup> handelt, sind in Tabelle 3-6 nicht die im vorhergehenden Text beschriebenen Varianten I bis VIII sondern die theoretischen Fertigungsstärken der Mitteldichten Faserplatten angeführt.

**Tabelle 3-6: Maschineneinstellungen der Pilot-MDF-Anlage zur Herstellung von UF-Harz gebundenen MDF-Platten in den Stärken 4 bis 18 mm und einer Rohdichte von 800 kg/m<sup>3</sup> (SCHÖPPER, 2002)**

<b>Maschinenteil / Theoretische Plattenstärke</b>	<b>4 mm</b>	<b>6 mm</b>	<b>8 mm</b>	<b>10 mm</b>	<b>12 mm</b>	<b>14 mm</b>	<b>16 mm</b>	<b>18 mm</b>
Poti Mischer	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5
Zuführband Bunker (Hz)	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
Dosierband Bunker (Hz)	150	150	150	150	150	150	150	150
Austragswalzen (Hz)	225	225	225	300	300	300	375	375
Streuwalzen 1, 3, 5 (Hz)	400	400	400	500	500	500	600	600
Streuwalzen 2, 4, 6 (Hz)	200	200	200	250	250	250	300	300
Formband (Hz)	300	250	200	150	125	100	75	50
Muldengurttförderer (Hz)	50	50	50	50	50	50	50	50
Rückstreifrechen (cm)	25	30	35	40	45	50	55	60

Die mechanisch-technologischen Eigenschaften der mit dem Harnstoff-Formaldehyd-Harz Kauritec 407<sup>®</sup> flüssig der Fa. BASF hergestellten Mitteldichten Faserplatten werden nach den in Kapitel 3.3.2 beschriebenen DIN EN Normen ermittelt. Es werden die Querkzugfestigkeiten (DIN EN 319), die Dickenquellungen nach 24 Stunden Wasserlagerung (DIN EN 317) sowie die Rohdichten (DIN EN 323) der hergestellten MDF-Platten analysiert. Da die Harnstoff-Formaldehyd-Harz gebundenen MDF-Platten auch die Referenzplatten für die in Kapitel 3.2.4 beschriebenen mit Mischkondensaten hergestellten 10 mm starken Faserplatten darstellen, werden zusätzlich zu den oben genannten mechanisch-technologischen Eigenschaften noch die Formaldehydemissionen (DIN EN 120) der 10 mm starken UF-Harz gebundenen Mitteldichten Faserplatten geprüft. Durch den Vergleich der Formaldehydemissionen von rein UF-Harz gebundenen und mit Mischkondensaten hergestellten Mitteldichten Faserplatten, kann die Eignung des Weizenproteins als Formaldehydfängersubstanz abgeleitet werden. Diese Ergebnisse sind in Kapitel 4.2.1 graphisch aufgearbeitet und erläutert. Dabei werden jeweils die Ergebnisse einer Serie pro Variante als Mittelwerte dargestellt.

### 3.2.3 Herstellung von PF-Harz gebundenen Mitteldichten Faserplatten

Die im Rahmen dieser Arbeit mit Phenol-Formaldehyd-Harz gebundenen Mitteldichten Faserplatten dienen als Referenzplatten zu den mit PF-Harz und Weizenprotein hergestellten Faserplatten (vgl. Kapitel 3.2.5). Zur Anfertigung dieser Referenzplatten werden sowohl Leimflotten bestehend aus reinem Phenol-Formaldehyd-Harz vom Typ 1808 HW der Fa. BAKELITE ohne Zugabestoffe, als auch Leimflotten bestehend aus Phenol-Formaldehyd-Harz und den beiden Hydrophobierungsmitteln HYDROWAX 138 und HYDROWAX 730 der Fa. SASOL verwendet. Die exakten Herstellungsparameter sowie eine Versuchsmatrix der einzelnen Serien sind in Tabelle 3-7 dargestellt. Die Herstellungsparameter *Zugabestoffe* und *Presszeit*, durch die sich Unterschiede innerhalb der einzelnen Varianten ergeben und durch die sich die Varianten I bis III voneinander abgrenzen, sind in blauer Schrift hervorgehoben.

Die Mitteldichten Faserplatten, gebunden mit Mischkondensaten bestehend aus Phenol-Formaldehyd-Harz und Weizenprotein (vgl. Kapitel 3.2.5), werden in einer theoretischen Plattenstärke von 10 mm hergestellt, daher werden auch die Referenzplatten nur in dieser Plattendicke hergestellt. Durch die Verwendung von unterschiedlichen Presszeitfaktoren beim Heißpressen soll der Einfluss dieses Herstellungsparameters auf die mechanisch-technologischen Eigenschaften der Phenol-Formaldehyd-Harz gebundenen Mitteldichten Faserplatten untersucht werden. Pro Variante ergeben sich durch die drei unterschiedlichen Presszeitfaktoren drei Serien. Pro Serien werden 5 Platten hergestellt. Eine Variante umfasst somit 15 Platten. Die mechanisch-technologischen Eigenschaften dieser Faserplatten stellen die Grundlage zur Beurteilung der PF-Harz/Weizenprotein gebundenen Mitteldichten Faserplatten dar. Untersucht werden die Querkzugfestigkeiten (DIN EN 319), die Quellwerte nach 24 h Wasserlagerung (DIN EN 317), die Rohdichten (DIN EN 323) sowie die Formaldehydemissionen nach der Perforator-Methode (DIN EN 120). Aufgeführt und ausgewertet sind die Ergebnisse dieser Faserplatten in Kapitel 4.2.4. Um eine übersichtliche Darstellung zu erzielen, werden die Ergebnisse jeder Serie einer Variante jeweils als Mittelwerte dargestellt.

**Tabelle 3-7: Herstellungsparameter der Referenz-Faserplatten gebundenen mit Phenol-Formaldehyd-Harz**

<b>Herstellungsparameter / Variante</b>	<b>I</b>	<b>II</b>	<b>III</b>
<b>Werkstoffdimensionen</b>			
Theoretische Plattenlänge und -breite (mm)	800 x 400	800 x 400	800 x 400
Theoretische Plattendicke (mm)	10	10	10
Zielrohichte (kg/m <sup>3</sup> )	800	800	800
<b>Fasermaterial</b> <i>Kiefernholz-Industriefaserstoff der Fa. STEICO</i>			
Ausgangsfeuchte (%)	10,5	10,5	10,5
Beleimte und getrocknete Feuchte (%)	11,0	11,0	11,0
<b>Bindemittel</b> <i>Phenol-Formaldehyd-Harz HW 1808 Fa. BAKELITE</i>			
Feststoffgehalt (%)	29	29	29
Beleimgrad atro (%)	12	12	12
<b>Zugabestoffe</b> <i>Hydrophobierungsmittel der Fa. SASOL</i>			
HYDROWAX 138 atro (%)	0	1	0
HYDROWAX 730 atro (%)	0	0	1
<b>Trocknung</b>			
Temperatur <sub>Eingang</sub> (°C)	95	95	95
Temperatur <sub>Ausgang</sub> (°C)	75	75	75
<b>Vorverdichtung</b>			
Pressdruck (N/cm <sup>2</sup> )	1,2	1,2	1,2
Presszeit (Min.)	2	2	2
<b>Heißpressen</b>			
Pressenschließzeit (Sek.)	15	15	15
Pressenöffnungszeit (Sek.)	10	10	10
Presstemperatur (°C)	195	195	195
Pressdruck (N/cm <sup>2</sup> )	5,7	5,7	5,7
Presszeit (Sek./mm Plattendicke)	18	18	18
	24	24	24
	30	30	30
<b>Gesamtanzahl der Platten</b>	<b>15 Stück</b>	<b>15 Stück</b>	<b>15 Stück</b>

Die Maschineneinstellungen der Pilot-MDF-Anlage zur Anfertigung dieser Platten sind in Tabelle 3-8 aufgeführt. Dabei handelt es sich um die Standardeinstellungen für Kunstharz gebundene Mitteldichte Faserplatten im Pilotmaßstab mit einer theoretischen Plattenstärke von 10 mm und einer Zielrohichte von 800 kg/m<sup>3</sup> (SCHÖPPER, 2002). Diese Anlagenparameter werden zur Herstellung aller in diesem Kapitel beschriebenen Phenol-Formaldehyd-Harz gebundenen MDF-Platten verwendet.

**Tabelle 3-8: Maschineneinstellungen der Pilot-MDF-Anlage für die Herstellung der 10 mm starken, PF-Harz gebundenen MDF-Platten mit einer Rohdichte von 800 kg/m<sup>3</sup> (SCHÖPPER, 2002)**

Maschinenteil	Einstellung
Geschwindigkeit Transportband Mischer	50 Hz
Poti Mischer	4,5
Geschwindigkeit Zuführband Bunker	1000 Hz
Geschwindigkeit Dosierband Bunker	150 Hz
Austragswalzen	300 Hz
Streuwalzen 1, 3 und 5	500 Hz
Streuwalzen 2, 4 und 6	250 Hz
Formbandgeschwindigkeit	150 Hz
Streuhöhe Rückstreifrechen	40 cm

### 3.2.4 Herstellung von UF-Harz/Weizenprotein gebundenen Mitteldichten Faserplatten

Parallel zu den im folgenden Kapitel 3.2.5 beschriebenen Substitutionsversuchen von Phenol-Formaldehyd-Harz durch Weizenprotein werden Versuche im Pilotmaßstab mit Mischkondensaten, bestehend aus unterschiedlichen Mengenverhältnissen von Harnstoff-Formaldehyd-Harz und Weizenprotein, durchgeführt. Dabei soll das potentiell mögliche Substitutionsvolumen von petrochemischem Harnstoff-Formaldehyd-Harz durch das naturnahe Weizenproteinbindemittel, unter Variation der Mengenverhältnisse beider Bindemittelkomponenten in Bezug auf die mechanisch-technologischen Eigenschaften der hergestellten Mitteldichten Faserplatten untersucht werden. Als Bindemittelkomponenten zur Herstellung der unterschiedlichen Leimflotten werden das Harnstoff-Formaldehyd-Harz *Kauritec 407<sup>®</sup> flüssig* der Fa. BASF und das *Weizenprotein* der Fa. CERESTAR in den prozentualen Mengenverhältnissen 75/25 (Variante I), 50/50 (Variante II) sowie 25/75 (Variante III), immer bezogen auf die gesamte Bindemittelmenge von 12 % atro bezogen auf atro Faser, verwendet.

Die Mengenverhältnisse der einzelnen Mischkondensate werden pro Variante sowohl ohne als auch mit 1 % Hydrophobierungsmittel bezogen auf atro Faser hergestellt. Dabei handelt es sich um die zwei Hydrophobierungsmittel HYDROWAX 138 und HYDROWAX 730 der Fa. SASOL deren Verwendung voneinander getrennt in diesen Varianten untersucht werden soll. Ein Ziel dieser Untersuchungen ist es, mögliche Unterschiede der beiden Paraffine hinsichtlich ihrer hydrophobierenden Wirkungen und ihrer Verträglichkeit mit dem Weizenprotein festzustellen.

**Tabelle 3-9: Herstellungsparameter der mit Mischkondensaten aus Urease-Formaldehyd-Harz der Fa. BASF und Weizenprotein der Fa. CERESTAR gebundenen MDF-Platten**

<b>Herstellungsparameter / Variante</b>	<b>I</b>	<b>II</b>	<b>III</b>
<b>Werkstoffdimensionen</b>			
Theoretische Plattenlänge und -breite (mm)	800 x 400	800 x 400	800 x 400
Theoretische Plattendicke (mm)	10	10	10
Zielrohichte (kg/m <sup>3</sup> )	800	800	800
<b>Fasermaterial</b> <i>Kiefernholz-Industriefaserstoff der Fa. STEICO</i>			
Ausgangsfeuchte (%)	12,5	12,5	12,5
Beleimte und getrocknete Feuchte (%)	11	11	11,5
<b>Bindemittel I</b> <i>UF-Harz Kauritec 407<sup>®</sup> flüssig Fa. BASF</i>			
Feststoffgehalt (%)	66	66	66
<b>Bindemittel II</b> <i>Weizenprotein der Fa. CERESTAR</i>			
Feststoffgehalt (%)	43,5	43,5	43,5
<b>Mengenverhältnis PF/WP atro (%)</b>	<b>75/25</b>	<b>50/50</b>	<b>25/75</b>
Beleimgrad Mischkondensat atro (%)	12	12	12
<b>Zugabestoffe</b> <i>Hydrophobierungsmittel der Fa. SASOL</i>			
HYDROWAX 138 atro (%)	0	0	0
	1	1	1
HYDROWAX 730 atro (%)	0	0	0
	1	1	1
<b>Trocknung</b>			
Temperatur <sub>Eingang</sub> (°C)	65	65	65
Temperatur <sub>Ausgang</sub> (°C)	45	45	45
<b>Vorverdichtung</b>			
Pressdruck (N/cm <sup>2</sup> )	1,2	1,2	1,2
Presszeit (Min.)	2	2	2
<b>Heißpressen</b>			
Pressenschließzeit (Sek.)	15	15	15
Pressenöffnungszeit (Sek.)	10	10	10
Presstemperatur (°C)	195	195	195
Pressdruck (N/cm <sup>2</sup> )	5,7	5,7	5,7
Presszeit (Sek./mm Plattendicke)	18	18	18
	24	24	24
	30	30	30
<b>Gesamtanzahl der Platten</b>	<b>45 Stück</b>	<b>45 Stück</b>	<b>45 Stück</b>

Durch die Zugabe von zwei unterschiedlichen Hydrophobierungsmitteln, die Verwendung unterschiedlicher Presszeitfaktoren und die Anfertigung von MDF-Platten ohne Hydrophobierungsmittel ergibt sich bei einer Anzahl von 5 Platten pro Serie ein Umfang von 45 MDF-Platten (9 Serien) pro Variante. Die vollständigen Versuchsparameter aller Varianten und die farblich gekennzeichneten variablen Versuchsparameter sind in Tabelle 3-9 dargestellt.

Die Mitteldichten Faserplatten, die unter Verwendung der unterschiedlichen Mischkondensate bestehend aus UF-Harz und Weizenprotein hergestellt werden, haben ausschließlich eine Endstärke von 10 mm. Die Zielrohddichte dieser Platten beträgt  $800 \text{ kg/m}^3$  bei einem Format von 800 mm x 400 mm. Die Maschineneinstellungen der Pilot-MDF-Anlage zur Herstellung dieser Platten sind in Tabelle 3-10 aufgeführt. Diese Mitteldichten Faserplatten werden nach ihrer Herstellung und einer Konditionierungsphase auf ihre mechanisch-technologischen Eigenschaften, d.h. der Rohdichten (DIN EN 323) und Dicken sowie der Querkzugfestigkeiten (DIN EN 319), der Dickenquellung nach 24 h Wasserlagerung (DIN EN 317) und der Formaldehydabgabe nach der Perforator-Methode (DIN EN 120), hin untersucht. Die Ergebnisse sind in Kapitel 4.2.3 dargestellt. Die Ergebnisse dieser MDF-Platten werden als Mittelwerte dargestellt. Dabei werden jeweils die Ergebnisse einer Serie pro Variante zusammengefasst.

**Tabelle 3-10: Maschineneinstellungen der Pilot-MDF-Anlage für die Herstellung von 10 mm starken MDF-Platten mit einer Zielrohddichte von  $800 \text{ kg/m}^3$  (SCHÖPPER, 2002)**

<b>Maschinenteil</b>	<b>Einstellung</b>
Geschwindigkeit Transportband Mischer	50 Hz
Poti Mischer	4,5
Geschwindigkeit Zuführband Bunker	1000 Hz
Geschwindigkeit Dosierband Bunker	150 Hz
Austragswalzen	300 Hz
Streuwalzen 1, 3 und 5	500 Hz
Streuwalzen 2, 4 und 6	250 Hz
Formbandgeschwindigkeit	150 Hz
Streuhöhe Rückstreifrechen	40 cm

### 3.2.5 Herstellung von PF-Harz/Weizenprotein gebundenen Mitteldichten Faserplatten

Die mit Bindemittelflotten, bestehend aus Phenol-Formaldehyd-Harz Typ HW 1808 der Fa. BAKELITE und Weizenprotein, hergestellten Mitteldichten Faserplatten sollen das optimale Substitutionspotential dieser beiden Bindemittelkomponenten, bezogen auf die mechanisch-technologischen Eigenschaften der MDF-Platten, aufzeigen. Dabei setzen sich die verwendeten Leimflotten aus unterschiedlichen Mengenanteilen der beiden Bindemittelkomponenten zusammen. Die Leimflotten, bestehend aus Phenol-Formaldehyd-Harz und Weizenprotein, werden in den Mengenverhältnissen 75/25 (Variante I), 50/50 (Variante II) und 25/75 (Variante III) zur Herstellung der Faserplatten verwendet (vgl. auch Tabelle 3-11 ). Der Beleimgrad (atro) bei allen verwendeten Leimflotten beträgt 12 % bezogen auf atro Faser. Der ausgerechnete absolut trockene Bindemittelgehalt entspricht daher 100 Prozent und wird anschließend in die verschiedenen Mengenverhältnisse der beiden Bindemittelkomponenten aufgeteilt. Durch die unterschiedlichen Feststoffgehalte der beiden Bindemittel ergeben sich auf diese Weise abweichende Lutrowerte bei der Einwaage der Leimkomponenten.

Die verschiedenen Leimflotten werden sowohl ohne weitere Zugabestoffe als auch in Kombination mit den beiden Hydrophobierungsmitteln HYDROWAX 138 und HYDROWAX 730 der Fa. SASOL verwendet. Dadurch soll der Einfluss dieser Zugabestoffe auf die spätere Dickenquellung (DIN EN 317) der Mitteldichten Faserplatten untersucht werden. Die Hydrophobierungsmittel werden dabei nicht kombiniert sondern nur separat verwendet.

Als letzter Parameter bei der Durchführung dieser Versuche wird der Einfluss unterschiedlicher Presszeitfaktoren auf die mechanisch-technologischen Eigenschaften dieser Holzwerkstoffe untersucht. Dabei werden analog zu den Referenzplatten (vgl. Kapitel 3.2.3) die Presszeitfaktoren 18, 24 und 30 Sekunden pro mm Plattendicke bei der Herstellung dieser Faserplatten verwendet. Durch die Verwendung von drei unterschiedlichen Presszeitfaktoren und die Zugabe von Hydrophobierungsmitteln ergeben sich pro Variante 9 Serien. Pro Serie werden 5 Platten hergestellt, d.h. es werden pro Variante I bis III jeweils 45 Platten hergestellt. Die Versuchsmatrix zur Feststellung des optimal möglichen Substitutionspotentials von Phenol-Formaldehyd-Harz durch Weizenprotein bei der Herstellung von Faserplatten ist in Tabelle 3-11 dargestellt. Dabei sind die jeweils veränderten Herstellungsparameter durch die sich die einzelnen Varianten I bis III unterscheiden in blauer Schrift dargestellt.



**Tabelle 3-11: Herstellungsparameter der mit Mischkondensaten aus Phenol-Formaldehyd-Harz und Weizenprotein gebundenen Mitteldichten Faserplatten**

<b>Herstellungsparameter / Variante</b>	<b>I</b>	<b>II</b>	<b>III</b>
<b>Werkstoffdimensionen</b>			
Theoretische Plattenlänge und -breite (mm)	800 x 400	800 x 400	800 x 400
Theoretische Plattendicke (mm)	10	10	10
Zielrohichte (kg/m <sup>3</sup> )	800	800	800
<b>Fasermaterial</b> <i>Kiefernholz-Industriefaserstoff der Fa. STEICO</i>			
Ausgangsfeuchte (%)	12,0	12,0	11,5
Beleimte und getrocknete Feuchte (%)	11,0	11,5	11,0
<b>Bindemittel I</b> <i>Phenol-Formaldehyd-Harz HW 1808 Fa. BAKELITE</i>			
Feststoffgehalt (%)	29	29	29
<b>Bindemittel II</b> <i>Weizenprotein der Fa. CERESTAR</i>			
Feststoffgehalt (%)	43,5	43,5	43,5
<b>Mengenverhältnis PF/WP atro (%)</b>	<b>75/25</b>	<b>50/50</b>	<b>25/75</b>
Beleimgrad Mischkondensat atro (%)	12	12	12
<b>Zugabestoffe</b> <i>Hydrophobierungsmittel der Fa. SASOL</i>			
HYDROWAX 138 atro (%)	0	0	0
	1	1	1
HYDROWAX 730 atro (%)	0	0	0
	1	1	1
<b>Trocknung</b>			
Temperatur <sub>Eingang</sub> (°C)	85	85	85
Temperatur <sub>Ausgang</sub> (°C)	65	65	65
<b>Vorverdichtung</b>			
Pressdruck (N/cm <sup>2</sup> )	1,2	1,2	1,2
Presszeit (Min.)	2	2	2
<b>Heißpressen</b>			
Pressenschließzeit (Sek.)	15	15	15
Pressenöffnungszeit (Sek.)	10	10	10
Presstemperatur (°C)	195	195	195
Pressdruck (N/cm <sup>2</sup> )	5,7	5,7	5,7
Presszeit (Sek./mm Plattendicke)	18	18	18
	24	24	24
	30	30	30
<b>Gesamtanzahl der Platten</b>	<b>45 Stück</b>	<b>45 Stück</b>	<b>45 Stück</b>

Die Mitteldichten Faserplatten zur Ermittlung des optimalen Substitutionspotentials von Phenol-Formaldehyd-Harz durch Weizenprotein werden ausschließlich in einer Plattenstärke von 10 mm und einer Zielrohddichte von 800 kg/m<sup>3</sup> hergestellt. Die Einstellungen der Pilot-MDF-Anlage zur Herstellung dieser Werkstoffe sind in Tabelle 3-12 dargestellt. Diese Einstellungen gelten für alle in diesem Kapitel beschriebenen Faserplatten, unabhängig vom Mengenverhältnis der beiden Bindemittelkomponenten.

**Tabelle 3-12: Maschineneinstellungen der Pilot-MDF-Anlage für die Herstellung von 10 mm starken MDF-Platten mit einer Rohddichte von 800 kg/m<sup>3</sup> (SCHÖPPER, 2002)**

Maschinenteil	Einstellung
Geschwindigkeit Transportband Mischer	50 Hz
Poti Mischer	4,5
Geschwindigkeit Zuführband Bunker	1000 Hz
Geschwindigkeit Dosierband Bunker	150 Hz
Austragswalzen	300 Hz
Streuwalzen 1, 3 und 5	500 Hz
Streuwalzen 2, 4 und 6	250 Hz
Formbandgeschwindigkeit	150 Hz
Streuhöhe Rückstreifrechen	40 cm

Die mechanisch-technologischen Eigenschaften der unter Kapitel 3.2.3 hergestellten PF-Harz gebundenen Faserplatten dienen als Referenzwerte bei der Beurteilung dieser Werkstoffe zur Feststellung des optimalen Substitutionspotentials. Die Ergebnisse der mechanisch-technologischen Untersuchungen der mit Phenol-Formaldehyd-Harz/Weizenprotein gebundenen Mitteldichten Faserplatten sind in Kapitel 4.2.4 sowohl graphisch als auch tabellarisch aufgearbeitet. Dabei werden jeweils die Ergebnisse einer Serie pro Variante als Mittelwerte dargestellt. Hauptuntersuchungsmerkmale stellen hierbei die Rohddichte (DIN EN 323), die Plattenstärke, die Querkzugfestigkeiten (DIN EN 319), die Quellwerte nach 24 h Wasserlagerung (DIN EN 317) und die Perforatorwerte (DIN EN 120) der hergestellten Faserplatten dar.

### 3.2.6 Herstellung von Weizenprotein gebundenen Mitteldichten Faserplatten

Die Herstellung der im Rahmen dieser Dissertation mit einer Weizenprotein-Suspension gebundenen Mitteldichten Faserplatten erfolgt ebenfalls, wie die bereits beschriebenen Versuche zur Herstellung von MDF-Platten im Pilotmaßstab auf der Pilot-MDF-Anlage des

NHN. Dazu werden Faserplatten in den theoretischen Stärken 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16 und 18 mm hergestellt, um ein möglichst realistisches Anwendungsspektrum dieses naturnahen Bindemittels aus nachwachsenden Rohstoffen auf Weizenproteinbasis für eine spätere industrielle Produktion von Mitteldichten Faserplatten nach dem Trockenverfahren einschätzen zu können. Dazu wird das Weizenprotein alleine bzw. in Kombination mit den konventionellen Paraffinen HYDROWAX 138 und HYDROWAX 730 der Fa. SASOL als Leimflotte zur Herstellung der Mitteldichten Faserplatten im Pilotmaßstab mit einer Zielrohddichte von  $800 \text{ kg/m}^3$  verwendet.

Zusätzlich werden Mitteldichte Faserplatten mit einer Leimflotte, bestehend aus der Weizenprotein-Suspension und Haftvermittlern bzw. Additiven auf  $\text{SiO}_2$ -Basis ohne weitere Zugabe von Hydrophobierungsmitteln angefertigt. Die Verwendung dieser Additive in der Leimflotte soll Aufschluss darüber geben, ob es sich hierbei um einen Haftvermittler handelt, durch den verbesserte mechanisch-technologische Eigenschaften bei den hergestellten Mitteldichten Faserplatten erzielt werden können. Die Einflüsse dieses  $\text{SiO}_2$  basierten Additives auf die Eigenschaften der Mitteldichten Faserplatten sollen anhand der gemessenen Querkzugfestigkeiten und Dickenquellwerte nach 24 h Wasserlagerung ermittelt werden. Die Idee, Additive als Hydrophobierungsmittel zu verwenden, ergab sich erst zu einem späteren Zeitpunkt in diesem Forschungsvorhaben, so dass die Auswirkungen dieses Haftvermittlers aus Zeitgründen nicht bei allen Plattenstärken der mit Weizenprotein gebundenen MDF-Platten überprüft werden konnten.

Die genauen Herstellungsparameter der Weizenprotein gebundenen Mitteldichten Faserplatten der Variante I bis Variante VIII sind in Tabelle 3-13 bis Tabelle 3-15 aufgeführt. Die Varianten haben dabei einen Plattenumfang von 25 bzw. 30 Platten, da sich pro Variante 5 bzw. bei Verwendung des  $\text{SiO}_2$  basierten Additives 6 Serien á 5 Platten ergeben. Zur Herstellung dieser MDF-Platten wurde ausschließlich die Weizenprotein-Suspension mit dem einem Feststoffgehalt von 43,5 % verwendet um vergleichbare Ergebnisse zu erhalten. Änderungen des Feststoffgehaltes im Bindemittel würden sich auf die theoretische, beleimte Feuchte des Fasermaterials auswirken, was wiederum unterschiedliche Trocknungstemperaturen zum Erreichen der beleimten und getrockneten Faserfeuchten voraussetzen würde. Durch eine höhere Trocknung, aufgrund eines geringeren Feststoffgehaltes und dem damit verbundenen, höheren Wassergehalt im Bindemittel, käme es zu nicht vergleichbaren Ergebnissen.

Tabelle 3-13: Parameter zur Anfertigung der WP gebundenen MDF-Platten (Varianten I bis III)

Herstellungsparameter / Variante	I	II	III
<b>Werkstoffdimensionen</b>			
Theoretische Plattenlänge und -breite (mm)	800 x 400	800 x 400	800 x 400
Theoretische Plattendicke (mm)	4	6	8
Zielrohichte (kg/m <sup>3</sup> )	800	800	800
<b>Fasermaterial</b> <i>Kiefernholz-Industriefaserstoff der Fa. STEICO</i>			
Ausgangsfeuchte (%)	11,5	12,0	12,0
Beleimte und getrocknete Feuchte (%)	9,0	9,5	9,5
<b>Bindemittel</b> <i>Weizenprotein der Fa. CERESTAR</i>			
Feststoffgehalt (%)	43,5	43,5	43,5
Beleimgrad auf atro Fasermaterial (%)	15	15	15
<b>Zugabestoffe</b> <i>Hydrophobierungsmittel der Fa. SASOL</i>			
HYDROWAX 138 atro (%)	0	0	0
	1	1	1
	2	2	2
HYDROWAX 730 atro (%)	0	0	0
	1	1	1
	2	2	2
<i>Additiv auf SiO<sub>2</sub>-Basis</i>			
TYP 1 atro (%)	2	2	2
<b>Trocknung</b>			
Temperatur <sub>Eingang</sub> (°C)	60	60	60
Temperatur <sub>Ausgang</sub> (°C)	40	40	40
<b>Vorverdichtung</b>			
Pressdruck (N/cm <sup>2</sup> )	1,2	1,2	1,2
Presszeit (Min.)	2	2	2
<b>Heißpressen</b>			
Pressenschließzeit (Sek.)	15	15	15
Pressenöffnungszeit (Sek.)	10	10	10
Presstemperatur (°C)	195	195	195
Pressdruck (N/cm <sup>2</sup> )	5,7	5,7	5,7
Presszeit (Sek./mm Plattendicke)	24	24	24
<b>Gesamtanzahl der Platten</b>	<b>30 Stück</b>	<b>30 Stück</b>	<b>30 Stück</b>

Tabelle 3-14: Herstellungsparameter für die WP gebundenen MDF-Platten (Varianten IV bis VI)

Herstellungsparameter / Variante	IV	V	VI
<b>Werkstoffdimensionen</b>			
Theoretische Plattenlänge und -breite (mm)	800 x 400	800 x 400	800 x 400
Theoretische Plattendicke (mm)	10	12	14
Zielrohichte (kg/m <sup>3</sup> )	800	800	800
<b>Fasermaterial</b> <i>Kiefernholz-Industriefaserstoff der Fa. STEICO</i>			
Ausgangsfeuchte (%)	12,0	12,0	11,0
Beleimte und getrocknete Feuchte (%)	10,5	11,5	11,0
<b>Bindemittel</b> <i>Weizenprotein der Fa. CERESTAR</i>			
Feststoffgehalt (%)	43,5	43,5	43,5
Beleimgrad auf atro Fasermaterial (%)	15	15	15
<b>Zugabestoffe</b> <i>Hydrophobierungsmittel der Fa. SASOL</i>			
HYDROWAX 138 atro (%)	0	0	0
	1	1	1
	2	2	2
HYDROWAX 730 atro (%)	0	0	0
	1	1	1
	2	2	2
<i>Additiv auf SiO<sub>2</sub>-Basis</i>			
TYP 1 atro (%)	2	2	2
<b>Trocknung</b>			
Temperatur <sub>Eingang</sub> (°C)	55	55	55
Temperatur <sub>Ausgang</sub> (°C)	40	40	40
<b>Vorverdichtung</b>			
Pressdruck (N/cm <sup>2</sup> )	1,2	1,2	1,2
Presszeit (Min.)	2	2	2
<b>Heißpressen</b>			
Pressenschließzeit (Sek.)	15	15	15
Pressenöffnungszeit (Sek.)	10	10	10
Presstemperatur (°C)	195	195	195
Pressdruck (N/cm <sup>2</sup> )	5,7	5,7	5,7
Presszeit (Sek./mm Plattendicke)	24	24	24
<b>Gesamtanzahl der Platten</b>	<b>30 Stück</b>	<b>30 Stück</b>	<b>30 Stück</b>

Tabelle 3-15: Parameter für die WP gebundenen Faserplatten (Varianten VII und VIII)

Herstellungsparameter / Variante	VII	VIII
<b>Werkstoffdimensionen</b>		
Theoretische Plattenlänge und -breite (mm)	800 x 400	800 x 400
Theoretische Plattendicke (mm)	16	18
Zielrohichte (kg/m <sup>3</sup> )	800	800
<b>Fasermaterial</b> <i>Kiefernholz-Industriefaserstoff der Fa. STEICO</i>		
Ausgangsfeuchte (%)	11,5	12,0
Beleimte und getrocknete Feuchte (%)	12,0	12,5
<b>Bindemittel</b> <i>Weizenprotein der Fa. CERESTAR</i>		
Feststoffgehalt (%)	66	66
Beleimgrad auf atro Fasermaterial (%)	12	12
<b>Zugabestoffe</b> <i>Hydrophobierungsmittel der Fa. SASOL</i>		
HYDROWAX 138 atro (%)	0	0
	1	1
	2	2
HYDROWAX 730 atro (%)	0	0
	1	1
	2	2
<b>Trocknung</b>		
Temperatur <sub>Eingang</sub> (°C)	1,2	1,2
Temperatur <sub>Ausgang</sub> (°C)	40	40
<b>Vorverdichtung</b>		
Pressdruck (N/cm <sup>2</sup> )	50	50
Presszeit (Min.)	2	2
<b>Heißpressen</b>		
Pressenschließzeit (Sek.)	15	15
Pressenöffnungszeit (Sek.)	10	10
Presstemperatur (°C)	195	195
Pressdruck (N/cm <sup>2</sup> )	5,7	5,7
Presszeit (Sek./mm Plattendicke)	24	24
<b>Gesamtanzahl der Platten</b>	<b>25 Stück</b>	<b>25 Stück</b>

Zur Anfertigung der in Variante I bis VIII beschriebenen Weizenprotein gebundenen Mitteldichten Faserplatten in den Dicken 4 mm bis 18 mm werden die in Tabelle 3-16 aufgeführten Maschineneinstellungen der Pilot-MDF-Anlage verwendet. Da sich diese Parameter nicht nur auf die Herstellung der in Tabelle 3-13 bis Tabelle 3-15 beschriebenen Weizenprotein gebundenen MDF-Platten beziehen, sondern die grundsätzlichen Maschineneinstellungen der Pilot-MDF-Anlage für die Herstellung von Mitteldichten

Faserplatten mit einer Zielrohddichte von  $800 \text{ kg/m}^3$  darstellen, sind die Einstellungen nicht nach Variante I bis Variante VIII sondern ausschließlich nach der theoretischen Plattenstärke unterteilt.

**Tabelle 3-16: Maschineneinstellungen der Pilot-MDF-Anlage zur Herstellung von Weizenprotein gebundenen MDF-Platten in den Stärken 4 bis 18 mm und einer Rohddichte von  $800 \text{ kg/m}^3$**

<b>Maschinenteil / Theoretische Plattenstärke</b>	<b>4 mm</b>	<b>6 mm</b>	<b>8 mm</b>	<b>10 mm</b>	<b>12 mm</b>	<b>14 mm</b>	<b>16 mm</b>	<b>18 mm</b>
Poti Mischer	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5
Zuführband Bunker (Hz)	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
Dosierband Bunker (Hz)	150	150	150	150	150	150	150	150
Austragswalzen (Hz)	225	225	225	300	300	300	375	375
Streuwalzen 1, 3, 5 (Hz)	400	400	400	500	500	500	600	600
Streuwalzen 2, 4, 6 (Hz)	200	200	200	250	250	250	300	300
Formband (Hz)	300	250	200	150	125	100	75	50
Muldengurtförderer (Hz)	50	50	50	50	50	50	50	50
Rückstreifrechen (cm)	25	30	35	40	45	50	55	60

Die nach den Herstellungsparametern in Tabelle 3-13 bis Tabelle 3-16 angefertigten Weizenprotein gebundenen MDF-Platten werden nach einer Konditionierungsphase, die zum Abkühlen der Faserplatten und zur Einstellung der Ausgleichsfeuchte in den Werkstoffen dient, mit einer Formatkreissäge in Prüfkörper geschnitten und auf ihre mechanisch-technologischen Eigenschaften hin untersucht. Dazu werden die Mitteldichten Faserplatten, gebunden mit dem naturnahen Bindemittel aus nachwachsenden Rohstoffen auf Weizenproteinbasis, nach den gültigen Prüfvorschriften nach DIN (vgl. Kapitel 3.3.2 ff.) auf ihre Querkzugfestigkeiten (DIN EN 319), ihre Dickenquellung nach 24 h Wasserlagerung (DIN EN 317) und ihre Rohdichten (DIN EN 323) hin untersucht. Die 10 mm starken Weizenprotein gebundenen Mitteldichten Faserplatten werden zusätzlich auf ihre Formaldehydabgabe, ermittelt nach der Perforator-Methode (vgl. Kapitel 3.3.3.1), hin untersucht, da diese Messungen Referenzwerte zu den Formaldehydemissionen der mit Mischkondensaten gebundenen MDF-Platten (vgl. Kapitel 3.2.4 und 3.2.5) darstellen. Die Ergebnisse sind in Kapitel 4.2.5 jeweils als Mittelwerte einer Variante in Form von Balkendiagrammen dargestellt.

### 3.3 Ermittlung der mechanisch-technologischen Eigenschaften

#### 3.3.1 Universal-Prüfmaschine

##### Typbezeichnung & Funktionsbeschreibung

Im Rahmen dieser Dissertation wurde zur Ermittlung der mechanisch-technologischen Eigenschaften der hergestellten MDF-Platten eine Material-Prüfmaschine (MPM) der Fa. ZWICK/ROELL verwendet. Hierbei handelt es sich um eine Tischprüfmaschine des Typs T1-FR010TH.A50 mit einer maximalen Prüfkraft von 10 kN. Aus der Typenbezeichnung können alle markanten Angaben über diese MPM abgelesen werden. Dabei bedeuten:

- T1 = testControl-Elektronik
- FR = Material-Prüfmaschine
- 010 = maximale Prüfkraft von 10 kN
- T = Tischausführung
- H = verlängerte Bauform des Lastrahmens
- .A50 = AC-Antrieb 500 W

Der Rahmen der Material-Prüfmaschine bildet zusammen mit der elektronischen Mess-, Steuer- und Regeleinheit der testControl-Baureihe die Grundeinheit für die Prüfung unterschiedlichster Materialien. Der Lastrahmen besteht standardmäßig aus zwei Führungsprofilen mit integrierten, spielfreien Kugelgewindegetrieben, einer festen unteren und fahrbaren mittleren Traverse sowie einem Kopfblech. Der Antrieb befindet sich im Sockel.

Eine in das Führungsprofil integrierte Faltenbalgabdeckung schützt Spindeln und Führung selbst bei extremem Anfall von Faserresten, Splittern und Staub. Zum Anschluss von Prüfwerkzeugen oder des Kraftaufnehmers dient die einheitliche Zentralbefestigung in den Traversen. Durch die Verwendung der Standprofile ist der Arbeitsraum der Material-Prüfmaschine in beliebiger Höhe einrichtbar. Die MPM ist für quasistatische Beanspruchung mit zügigem, ruhendem, schwellendem oder wechselndem Verlauf durch einen elektromechanischen Antrieb konzipiert. Sie ist für Zug-, Druck- und Biegeversuche entwickelt.

Die Material-Prüfmaschine der Fa. ZWICK/ROELL wird mithilfe der Bedienelemente an der außen am Standprofil angebrachten testControl-Elektronik sowie der mitgelieferten Software testXpert über einen angeschlossenen PC gesteuert.



### **Kraftaufnehmer & Längenänderungsaufnehmer**

Der verwendete Kraftaufnehmer des Typs TC-LC010KN.G02 wandelt die physikalische Größe Kraft in eine elektrisch messbare Spannung um. Er besteht aus dem mechanischen Verformungskörper mit aufgeklebten Dehnungsmessstreifen (DMS). Die DMS sind dehnungsabhängige, elektrische Widerstände und zu einer Messbrücke zusammengeschaltet. Der Wert der Messspannung am Ausgang der Brückenschaltung ist analog zu der zu messenden Kraft ( $F$ ), die auf den Verformungskörper und auf das ganze Aufnahmesystem wirkt. Das Vorzeichen (Polarität) der Messspannung ändert sich mit der Zug- oder Druckbeanspruchung des Aufnehmers.

Der verwendete Längenänderungsaufnehmer vom Typ TC-EXCOMFL.001 der Fa. ZWICK/ROELL ist ein manuell ansetzbarer Aufnehmer. Beim 3-Punkt-Biegeversuch erfasst er die Durchbiegung. Bei der Durchführung von Druckversuchen wird mit Hilfe des Längenänderungsaufnehmers der Verformungsweg der zu prüfenden Probe ermittelt.

### **Software testXpert**

Die Software testXpert der Fa. ZWICK/ROELL dient zur Einrichtung und Steuerung der Prüfmaschine über einen angeschlossenen PC.

Zum Umfang der mitgelieferten Software testXpert gehören auch die *Masterprüfvorschriften*, die für die Durchführung von diversen Prüfungen zur Ermittlung der einzelnen mechanisch-technologischen Eigenschaften von Holzwerkstoffen notwendig sind. Für jedes einzelne Prüfverfahren (Querzugfestigkeit, Abhebefestigkeit, 3-Punkt-Biegefestigkeit, Schraubenausziehversuch, usw.) gibt es eine Masterprüfvorschrift, die der Benutzer hinsichtlich der Holzwerkstoffkategorie (Mitteldichte Faserplatten, Spanplatten, Oriented Strand Board, Furnier etc.) und weiterer Charakteristika (Plattenstärke, Rohdichte, Bindemittel, etc.) einrichten und unter einem beliebigen Namen speichern kann. Dabei wird die Prüfmaschine bei den einzelnen Prüfverfahren hinsichtlich der Startposition, Prüfgeschwindigkeit, Prüfkraft, zu messender Eigenschaften, etc. eingerichtet. Diese Einstellungen bleiben im jeweiligen Prüfprogramm gespeichert. Dies hat den Vorteil, dass man nach erfolgreicher Einrichtung der einzelnen Prüfprogramme schnell und unproblematisch die Prüfungen durchführen kann und eine umständliche Einstellung aller Parameter vor einer durchzuführenden Prüfung an der Maschine entfällt.

### 3.3.2 DIN-/EN-Vorgaben für die Prüfung von Mitteldichten Faserplatten

Die in den folgenden Kapiteln 3.3.2.1 bis 3.3.2.5 aufgeführten Prüfverfahren und Anforderungen nach DIN EN sind für die im Rahmen dieser Dissertation nach dem Trockenverfahren hergestellten Mitteldichten Faserplatten relevant. Nach diesen Prüfvorschriften werden die MDF-Platten auf ihre mechanisch-technologischen Eigenschaften hin untersucht. Die Ergebnisse der mechanisch-technologischen Prüfungen sind in den Kapiteln 4.2.1 bis 4.2.5 zusammengestellt.

#### 3.3.2.1 DIN EN 317 Bestimmung der Dickenquellung nach Wasserlagerung

Die Probenahme und der Zuschnitt der Prüfkörper werden nach der Vorschrift DIN EN 326-1 (vgl. Kapitel 3.3.2.4) durchgeführt. Dabei ist darauf zu achten, dass die Prüfkörper quadratisch sind und eine Seitenlänge von 50 mm ( $\pm 1$  mm) nicht über- bzw. unterschreiten (vgl. Abbildung 3-3). Die Prüfkörper werden vor der Prüfung bis zur Massekonstanz bei einer mittleren relativen Luftfeuchte von 65 % ( $\pm 5$  %) und einer Temperatur von 20 °C ( $\pm 2$  °C) klimatisiert. Nach der Klimatisierung ist die Dicke jedes einzelnen Prüfkörpers nach DIN EN 325 am Schnittpunkt der Diagonalen auf 0,01 mm zu ermitteln (vgl. Abbildung 3-3).

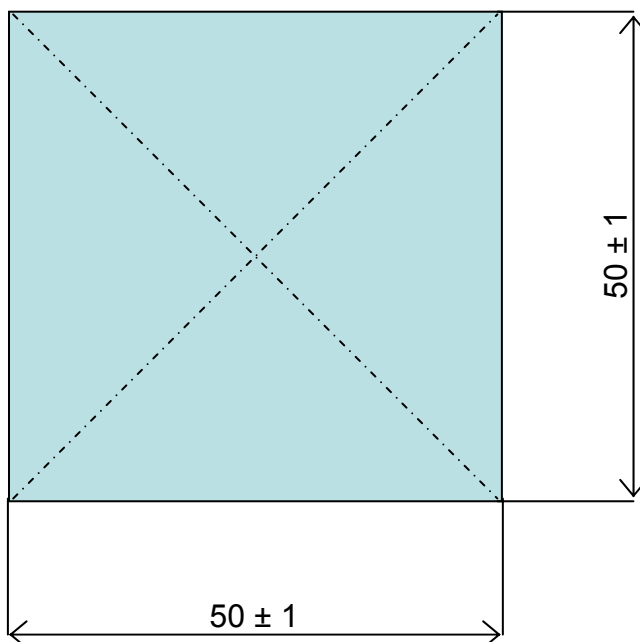


Abbildung 3-3: Prüfkörper für die Messung der Dickenquellung

Die Prüfkörper werden nach der Vermessung vertikal in sauberem, ruhendem Wasser mit einem pH-Wert von 7 ( $\pm 1$ ) und einer Temperatur von 20 °C ( $\pm 1$  °C) gelagert. Die Temperatur ist während der gesamten Versuchsdauer einzuhalten. Die Prüfkörper müssen dabei einen ausreichenden Abstand untereinander, zu den Seitenwänden sowie vom Boden aufweisen. Die Oberkante der Prüfkörper muss 25 mm ( $\pm 5$  mm) unter der Wasseroberfläche liegen. Die Wasserlagerungszeit beträgt 24 Stunden. Nach Ablauf der Wasserlagerungszeit werden die Prüfkörper aus dem Wasserbad entfernt und die Dicke jedes einzelnen Prüfkörpers wird nach DIN EN 325 bestimmt (DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG e. V., 1998). Die Berechnung der Dickenquellung ist im Anhang unter Kapitel 8.3.1 aufgeführt. Die Dickenquellung einer MDF-Platte wird als Mittelwert in Prozent der einzelnen Proben dieser Faserplatte angegeben.

### 3.3.2.2 DIN EN 319 Bestimmung der Zugfestigkeit senkrecht zur Plattenebene

Die Zugfestigkeit senkrecht zur Plattenebene, auch *Querzugfestigkeit* genannt, beschreibt das Verhältnis der Bruchkraft zur Querschnittsfläche eines Prüfkörpers. Dieser Test wird mit Hilfe der in Kapitel 3.3.1 beschriebenen Universal-Prüfmaschine unter Verwendung geeigneter Prüfjochen aus MULTIPLEX durchgeführt.

Dazu werden die Proben nach DIN EN 326-1 vorbereitet. Dabei ist darauf zu achten, dass die Prüfkörper präzise auf ein Maß von 50 x 50 mm ( $\pm 1$ mm) geschnitten werden, die Winkel sollen dabei exakt 90° betragen und die Kanten sauber und gerade sein. Die Maße werden nach dem Zuschnitt mit einem Messschieber überprüft. Die Proben und die Prüfjochen werden vor der Prüfung bei einer mittleren relativen Luftfeuchte von 65 % ( $\pm 5$  %) und einer Temperatur von 20 °C ( $\pm 2$  °C) klimatisiert.

Nach der Klimatisierung werden die Prüfkörper mit den Multiplex-Prüfjochen mit Heißkleber verklebt. Der Kleber wird zuvor auf einer Heizplatte bis zum Schmelzen erhitzt und anschließend gleichmäßig auf die Oberflächen der Prüfkörper und der Prüfjochen aufgebracht. Überflüssiger Klebstoff, der beim Zusammenpressen aus den Klebefugen herausgedrückt wird, wird sauber entfernt. Das Aushärten des Schmelzklebers erfolgt bei Normalklima, d.h. bei einer Temperatur von 20 °C ( $\pm 2$  °C) und einer relativen Luftfeuchte von 65 % ( $\pm 5$  %), für eine Dauer von 24 h. Ein vollständiges Aushärten des Schmelzklebers

vor der Prüfung der Proben ist notwendig, da man auf diese Weise Brüche in der Klebefuge beim Prüfvorgang verhindert.

Für die Prüfung werden die Prüfjochen zusammen mit dem eingeklebten Prüfkörper an beiden Seiten in Selbstausrichtende Wellengelenke in der Prüfmaschine eingespannt und bis zum Bruch belastet. Die Last ist mit einer während der Prüfung konstanten Geschwindigkeit des Lastkopfes aufzubringen. Die Belastungsgeschwindigkeit ist dabei so einzustellen, dass die Höchstkraft ( $F_{\text{Max}}$ ) innerhalb von 60 s ( $\pm 30$  s) erreicht wird (DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG e. V., 1998). Die Querkzugfestigkeit ( $F_{\text{Bruch}}$ ) wird dabei automatisch von der Universal-Prüfmaschine aus der maximal auf den Prüfkörper ausgeübten Kraft ( $F_{\text{Max}}$ ), bestimmt mit einer Genauigkeit von 1 %, ermittelt. Die Querkzugfestigkeit einer Mitteldichten Faserplatte wird in  $\text{N}/\text{mm}^2$  als Mittelwert aller geprüften Proben einer Platte angegeben. Die Berechnung der Zugfestigkeit senkrecht zur Plattenebene kann analog auch mit der im Anhang unter Kapitel 8.3.2 angegebenen Rechnung erfolgen.

### 3.3.2.3 DIN EN 323 Bestimmung der Rohdichte

Die Probennahme und der Zuschnitt der Prüfkörper erfolgen nach DIN EN 326-1 (vgl. Kapitel 3.3.2.4). Dabei ist darauf zu achten, dass die Form der Prüfkörper quadratisch ist und eine Seitenlänge von nominal 50 mm aufweist. Die Proben werden vor dem Vermessen bis zur Massekonstanz bei einer Luftfeuchte von 65 % ( $\pm 5$  %) und einer Temperatur von 20 °C ( $\pm 2$  °C) klimatisiert. Jeder Prüfkörper wird danach mit Hilfe einer Tischwaage auf 0,01 g genau gewogen.

Anschließend wird die Dicke  $t$  am Schnittpunkt der Diagonalen auf 0,05 mm gemessen, indem der Messschieber langsam auf die Oberfläche des Prüfkörpers herangeführt wird. Die Seitenlängen  $b_1$  und  $b_2$  werden parallel zu den Kanten des Prüfkörpers in Höhe des Diagonalschnittpunktes auf 0,1 mm exakt gemessen (DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG e. V., 1998). Zur Verdeutlichung der Maßermittlung dient die Abbildung 3-4. Die Berechnung der Rohdichte ist im Anhang in Kapitel 8.3.3 erläutert. Die Rohdichte einer Faserplatte wird als Mittelwert in  $\text{kg}/\text{m}^3$  aller gemessenen Proben einer MDF-Platte angegeben.

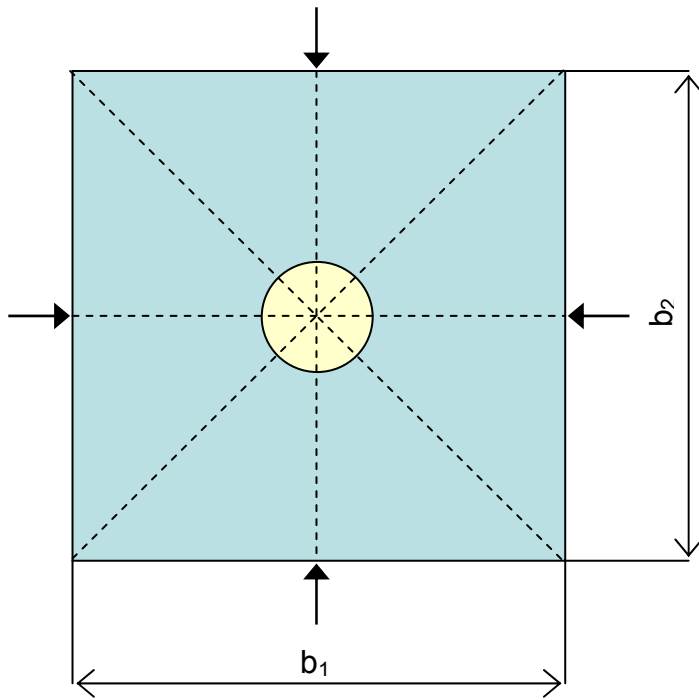


Abbildung 3-4: Messstellen für die Ermittlung der Seitenlängen und der Dicke des Prüfkörpers

### 3.3.2.4 DIN EN 326-1 Probennahme, Zuschnitt und Überwachung

In Abbildung 3-5 ist ein schematischer Schnittplan nach DIN EN 326-1 graphisch dargestellt.

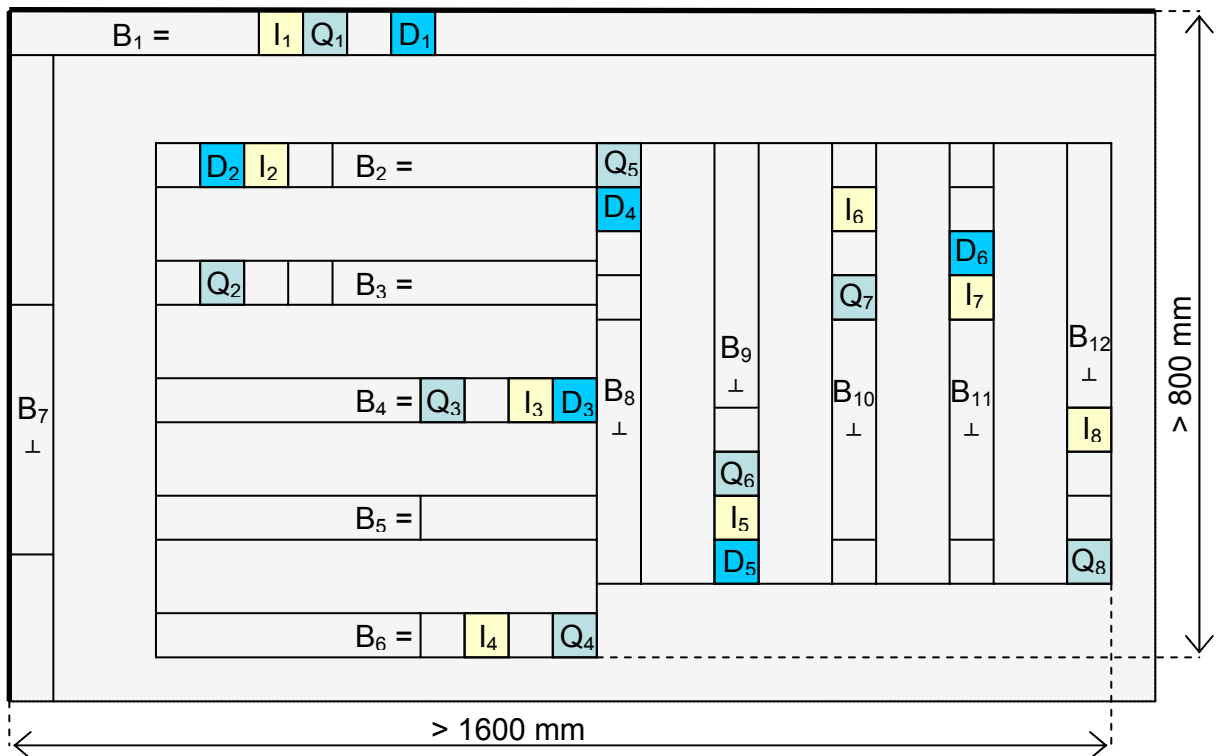


Abbildung 3-5: Schematischer Schnittplan für die Probennahme bei Holzwerkstoffen

Diese Europäische Norm legt Regeln für die Probennahme und Herstellung von Prüfkörpern sowie die Angabe und Aufbereitung der Prüfergebnisse fest, um Informationen über die Eigenschaften von Holzwerkstoffen zu erhalten.

Wegen der Streuung innerhalb und zwischen den Platten ist die Prüfung einer bestimmten Anzahl von  $n$  Platten und einer bestimmten Anzahl von  $m$  Prüfkörpern aus der Einzelplatte notwendig, um zuverlässige Prüfergebnisse zu erhalten. Die vorgeschriebenen Mengen  $m$  an Prüfkörpern einer Einzelplatte für die unterschiedlichen Prüfungen sind in Tabelle 3-17 aufgeführt. Die im Rahmen dieser Dissertation durchgeführten mechanisch-technologischen Prüfungen und die dafür vorgeschriebene Mindestmenge an Prüfkörpern sind in blauer Schrift hervorgehoben.

**Tabelle 3-17: Mindestzahl  $m$  von kleinen Prüfkörpern, die aus jeder einzelnen Platte herzustellen sind**

Platten-Eigenschaft	EN-Norm	$m$
Feuchtegehalt	En 322	4
Maßänderung	EN 318	
Rohdichte	EN 323	
Biege-Elastizitätsmodul und Biegefestigkeit	EN 310	6
Querzugfestigkeit	EN 319	
Dickenquellung nach Wasserlagerung	EN 317	8
Abhebefestigkeit	EN 311	
Qualität der Verklebung von Sperrholz	EN 314-2	10

### 3.3.2.5 DIN EN 622-5 Anforderungen an Platten nach dem Trockenverfahren (MDF)

Um einen Qualitätsstandard für in Europa produzierte Holzwerkstoffe zu garantieren, wurden für sämtliche Plattenwerkstoffe auf Holzbasis bestimmte Anforderungsprofile festgelegt und in Form von europäischen Normen definiert. Als Grundlage dienten dafür die bereits vorher in Deutschland existierenden DIN Normen, die dann z. T. in EU-Normen umgewandelt bzw. umbenannt wurden. Aus diesem Grund stehen bei vielen dieser Normen sowohl die Abkürzung DIN als auch das Kürzel EN vorweg. Die Definition dieser Normen erfolgte durch das DEUTSCHE INSTITUT FÜR NORMUNG e.V. in Zusammenarbeit mit weiteren Europäischen Komitees.

Die Anforderungsprofile wurden für sämtliche Span- und Faserplatten, für OSB und Furniere definiert. Dabei werden die Werkstoffe einer Kategorie zunächst hinsichtlich ihrer grundlegenden Verwendung, d.h. beispielsweise im Trocken- oder Nassbereich und ihres Herstellungsverfahrens klassifiziert. Bezug nehmend auf ihre spätere Verwendungsart werden

dann die mechanisch-technologischen Eigenschaften der Platten als Mindeststandard festgelegt. Dieser Standard muss von den Werkstoffen erfüllt werden, damit sie in den unterschiedlichen Anwendungsbereichen verarbeitet werden dürfen. Die mechanisch-technologischen Eigenschaften richten sich sowohl nach der Verwendungsart als auch nach der tatsächlichen Dicke, den Nenndickenbereichen, der Werkstoffe. Die Anforderungsprofile laut DIN EN 622-5 für Mitteldichte Faserplatten, hergestellt nach dem Trockenverfahren, sind in Tabelle 3-18 aufgeführt.

**Tabelle 3-18: Anforderungen an MDF-Platten für allgemeine Zwecke zur Verwendung im Trockenbereich (DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG e. V., 1998)**

Eigenschaft	Prüfverfahren	Einheit	Nenndickenbereiche (mm)								
			1,8 bis 2,5	> 2,5 bis 4,0	> 4 bis 6	> 6 bis 9	> 9 bis 12	>12 bis 19	> 19 bis 30	> 30 bis 45	> 45
Dickenquellung 24 h	EN 317	%	45	35	30	17	15	12	10	8	6
Querzugfestigkeit	EN 319	N/mm <sup>2</sup>	0,65	0,65	0,65	0,65	0,60	0,55	0,55	0,50	0,50
Biegefestigkeit	EN 310	N/mm <sup>2</sup>	23	23	23	23	22	20	18	17	15
Biege-Elastizitätsmodul	EN 310	N/mm <sup>2</sup>	-	-	2700	2700	2500	2200	2100	1900	1700

Diese Anforderungsprofile stellen die Bewertungsgrundlage für alle im Rahmen dieser Promotion hergestellten Mitteldichten Faserplatten dar. Die erzielten mechanisch-technologischen Eigenschaften der Werkstoffe sind z.B. neben den rheologischen Eigenschaften des Bindemittels ein wichtiger Faktor um das Potential der in dieser Dissertation entwickelten Weizenprotein-Suspension für die spätere industrielle Produktion von Holzwerkstoffen zu beurteilen. Bei Diskussion der mechanisch-technologischen Eigenschaften der mit UF-Harz, PF-Harz, Weizenprotein sowie Mischkondensaten beleimten MDF-Platten (vgl. Kapitel 4.2.1 bis 4.2.5) werden daher die in Tabelle 3-18 angegebenen Mindestanforderungen stets berücksichtigt.

### 3.3.3 Ermittlung der Formaldehydabgabe aus Mitteldichten Faserplatten

#### 3.3.3.1 Perforator-Methode (DIN EN 120)

Die Perforator-Methode (DIN EN 120) ist eine vom Europäischen Komitee für Normung akzeptierte Prüfnorm für die Bestimmung des ungebundenen Formaldehyds in unbeschichteten und/oder unlackierten Holzwerkstoffen. In der speziell für dieses Verfahren entwickelten Apparatur wird der nach dem Heißpressen noch freie Formaldehyd mit Hilfe

von siedendem Toluol aus den Werkstoffen extrahiert und an das im Kolben befindliche, destillierte Wasser abgegeben. Der Formaldehydgehalt der wässrigen Lösung wird dann anschließend photometrisch nach der Acetyl-Aceton-Methode bestimmt und auf das Trockengewicht des untersuchten Holzwerkstoffes hochgerechnet.

### ***Perforation***

Für die Extraktion werden 100 g des zu untersuchenden Prüfkörpers auf 0,1 g genau abgewogen und in den Rundkolben der Apparatur gegeben. Dabei muss der Prüfkörper nach DIN EN 120 eine Größe von 25 mm x 25 mm aufweisen. Nach der Zugabe von 600 ml Toluol wird der Rundkolben an den Perforator angeschlossen und anschließend werden 1000 ml destilliertes Wasser in den Perforatoreinsatz eingefüllt. Zwischen der Wasseroberfläche und dem Siphon müssen 20 bis 30 mm Freiraum verbleiben. Anschließend werden die Kühler- und Gasabsorptionsvorrichtung sowie der Vorlagekolben der Gasabsorptionsvorrichtung angeschlossen. Der Vorlagekolben wird mit ca. 100 ml destilliertem Wasser gefüllt, um eventuell entweichenden Formaldehyd einzufangen. Zum Abschluss werden die Kühlung und die Heizung eingeschaltet. Der Perforationsvorgang beginnt, wenn erstmals Toluol durch das Siphonrohr zurückläuft. Die Extraktion des Formaldehyds aus dem Werkstoff dauert ab diesem Zeitpunkt exakt zwei Stunden, wobei ein ständiger Toluolrücklauf gewährleistet sein muss. Nach Ablauf der zwei Stunden wird die Heizung ausgeschaltet und die Gasabsorptionsvorrichtung entfernt. Nachdem das Wasser in der Perforatorapparatur auf Zimmertemperatur abgekühlt ist, wird es über einen Ablasshahn in einen 2000 ml fassenden Messkolben gefüllt. Der Perforator wird zweimal mit je 200 ml destilliertem Wasser gespült. Das Spülwasser wird mit dem im Vorlagekolben befindlichen Wasser in den Messkolben gefüllt und das Toluol wird vorschriftsmäßig entsorgt. Der Messkolben wird anschließend mit destilliertem Wasser auf genau 2000 ml aufgefüllt. Zur Bestimmung der Qualität des verwendeten Toluols muss nach analoger Vorgehensweise ein Blindversuch ohne Prüfkörper mit frischem Toluol aus derselben Charge durchgeführt werden.

### ***Bestimmung des Formaldehydgehaltes***

Für die photometrische Bestimmung des Formaldehydgehaltes im Wasserextrakte werden 10 ml der wässrigen Extraktionslösung mit einer Pipette aus dem 2000 ml Messkolben



entnommen und in eine 50 ml Flasche gefüllt. In die Flasche werden anschließend 10 ml einer 0,04 M Acetyl-Aceton-Lösung und 10 ml einer 20 %igen Ammoniumacetat-Lösung pipettiert. Die Flasche wird dann für 15 Minuten in einem mit 40 °C warmen Wasser gefüllten Wasserschüttelbad gelagert. Mit destilliertem Wasser wird analog ein Blindversuch durchgeführt. Damit die grünlich-gelb gefärbte Lösung auf Zimmertemperatur abkühlen kann muss sie eine Stunde ohne Lichteinwirkung ruhig gelagert werden. Anschließend erfolgt die Absorptionsmessung der Lösung in einem Spektrophotometer bei einer Wellenlänge von 412 nm gegen destilliertes Wasser. Die Berechnung des Formaldehydgehaltes in der Lösung erfolgt nach der im Anhang unter Kapitel 8.3.4 aufgeführten Formel. Zur Berechnung des Perforatorwertes muss zuvor eine Kalibrierkurve mit Standard-Formaldehydlösungen angefertigt werden. Die Kalibrierkurve ist die graphische Darstellung der photometrischen Analyse von mindestens sieben Standardlösungen mit Formaldehyd-Konzentrationen zwischen 0,0 mg/ml und 0,015 mg/ml. Die Steigung dieser Kalibrierkurve wird in die Formel zur Berechnung des Perforatorwertes (vgl. Kapitel 8.3.4) eingesetzt. Weiterhin muss der Feuchtegehalt der zu untersuchenden Holzwerkstoffproben zuvor ermittelt werden, da dies eine wichtige Variable bei der Bestimmung des Perforatorwertes ist.

### **3.4 Mykologische Untersuchungen an Mitteldichten Faserplatten**

Die im Rahmen dieser Dissertation durchgeführten Mykologischen Untersuchungen an Mitteldichten Faserplatten sind in Kapitel 3.4.1 bis Kapitel 3.4.3 beschrieben. Dabei soll in Kapitel 3.4.1 der Holzabbau durch unterschiedliche Weiß-, Braun- und Moderfäuleerreger an ungeschützten und geschützten UF-Harz und Weizenprotein gebundenen MDF-Platten anhand des Masseverlustes ermittelt werden.

In Kapitel 3.4.2 soll der Holzabbau durch unterschiedliche Weiß-, Braun- und Moderfäuleerreger an ungeschützten UF-Harz und Weizenprotein gebundenen MDF-Platten nach der radiometrischen Messmethode ermittelt werden. Dabei wird in den ersten Versuchsreihen zunächst der gesamte Holzabbau nach der radiometrischen Methode an den MDF-Platten ermittelt. Daraus aufbauende Versuche sollen dann genaueren Aufschluss über den Abbau der Cellulose des in den MDF-Platten befindlichen Lignins durch diese Holzzerstörenden Pilze geben.

In einem weiteren Versuch sollen die Kompostierungsgrade an Weizenprotein gebundenen MDF-Platten in unterschiedlichen Substraten durch Mikroorganismen radiometrisch ermittelt werden.

### 3.4.1 Holzabbauversuch Mitteldichten Faserplatten

Ziel dieses Versuches ist es, einen unterschiedlich schnellen Holzabbau durch Weißfäule-, Braunfäule- und Schimmelpilze an Mitteldichten Faserplatten zu ermitteln. Dabei werden im Rahmen dieser Dissertation 10 mm starke Mitteldichte Faserplatten mit unterschiedlichen Bindemitteln, Harnstoff-Formaldehyd-Harz (BASF Kauritec 407<sup>®</sup> flüssig, 66 % Feststoffgehalt) und Weizenproteinleim (Weizenprotein-Suspension, 43,5 % Feststoffgehalt), verwendet. Um die hemmende Wirkung eines Pilzschutzmittels zu testen, wird bei der Herstellung einiger Faserplatten eine 0,1 %ige Konzentration (atro Fungizid (g) bezogen auf atro Faser (g)) des Fungizids MERGAL S 88 der Fa. TROY CHEMICAL EUROPE BV in das Bindemittel gemischt. Das in dieser Dissertation verwendete Fungizid MERGAL S 88 besteht aus den Chemikalien Ziram und 2-Benzimidazolecarbamic acid, ist weiß, flüssig, geruchlos und besitzt eine Dichte von 1,3 g / cm<sup>3</sup>. Das Fungizid ist mit Wasser mischbar und weist einen pH-Wert von 7 bis 9 auf. Bei der Arbeit mit MERGAL S 88 sind Handschuhe, Kittel und Spritzschutzbrille sowie bei unzureichender Lüftung auch ein Atemschutzgerät zu tragen (TROY CHEMICAL EUROPE BV, 2001).

Für den Holzabbauversuch werden die Pilzarten *Trametes versicolor* (Weißfäulepilz), *Coniophora puteana* (Braunfäulepilz) und *Trichoderma viridae* (Schimmelpilz) verwendet. Bevor der Holzabbauversuch gestartet werden kann, ist es notwendig, die benötigten Pilze in ausreichender Menge auf Nährmedien anzuziehen. Dazu wird das, für die jeweilige Pilzart optimale Anzuchtmedium verwendet. *Trametes versicolor* wird auf BSM-, *Coniophora puteana* auf MYA- und *Trichoderma viridae* auf Raulin-Medium herangezogen. Die Nährmedien werden nach den in Tabelle 8-1 bis Tabelle 8-4 im Anhang beschriebenen Rezepturen hergestellt und anschließend im Autoklaven feucht autoklaviert. Nachdem die Nährmedien auf ca. 50 °C abgekühlt sind, werden sie unter sterilen Bedingungen in Petrischalen unter der Impfbank gegossen und anschließend mit einem Deckel und Parafilm fest verschlossen. Am darauf folgenden Tag werden die Pilze unter der Impfbank auf den entsprechenden Nährmedien angeimpft. Die Bezeichnung der Nährmedien sowie die Anzahl der hergestellten Nährmedien sind in Tabelle 3-19 aufgeführt.

**Tabelle 3-19: Angesetzte Nährmedien zur Anzucht der unterschiedlichen Holzabbauenden Pilze**

Nährmedium/Pilz	<i>Trametes versicolor</i>	<i>Coniophora puteana</i>	<i>Trichoderma viridae</i>
BSM	10 Stück	-	-
MYA	-	10 Stück	-
Raulin	-	-	10 Stück
<b>Summe</b>	<b>10 Stück</b>	<b>10 Stück</b>	<b>10 Stück</b>

Aus den zuvor hergestellten Mitteldichten Faserplatten werden die Holzproben an der Tischformatkreissäge zurechtgeschnitten. Dabei ist darauf zu achten, dass die Klötzchen alle die gleichen Formate (50 mm x 25 mm x 10 mm) aufweisen. Es werden insgesamt 234 Holzproben benötigt, die sich aus 45 x UF + MERGAL, 45 x Protein + MERGAL, 72 x UF – Harz und 72 x Protein zusammensetzen. Die Klötzchen werden durchnummeriert und anschließend auf der Tischwaage gewogen. Das Gewicht wird in einer Tabelle notiert. Danach werden sie für 24 h bei 105 °C im Trockenschrank gelagert um das Trockengewicht der Proben bestimmen zu können. Dabei ist darauf zu achten, dass die Proben vor dem Wiegen kurz im Exsikkator gelagert werden um eventuell aufgenommenes Wasser bei der Entnahme aus dem Trockenschrank wieder abzugeben. Die Trockengewichtsbestimmung ist wichtig, damit später bei den Ergebnissen ein möglicher Wasserverlust nicht als Holzabbau angenommen wird. Anschließend werden die Holzproben im Autoklaven trocken autoklaviert (121 °C, 2,4 bar) und danach steril in Aluminiumfolie gelagert.

Die benötigten Spezialgläser werden im Autoklaven trocken autoklaviert und danach ebenfalls steril gelagert. Danach werden die benötigten Mengen an Nährmedien hergestellt. Es werden für die Pilzsorten dieselben Nährmedien wie bei der Anzucht der Pilze (siehe dazu auch Tabelle 3-19) verwendet. Mit einem so genannten „Kippautomat“ werden an der Sterilbank in jedes Spezialglas exakt 40 ml des jeweils benötigten Nährmediums (siehe dazu auch Kapitel 8 Tabelle 8-1 bis Tabelle 8-4) gefüllt.

Sind die Nährmedien in den Spezialgläsern geliert, so werden in jedes Gefäß unter sterilen Bedingungen drei Faserplattenproben am Rand positioniert. In die Mitte des Nährbodens wird mit einem sterilen Korkbohrer ein Stück des jeweiligen Mycels platziert. Die Gläser werden anschließend mit dem Datum, der Pilzart und dem Medium sowie den Probennummern beschriftet und mit einem Deckel und Parafilm verschlossen. Der Holzabbauversuch läuft über vier Monate, dabei werden die Gläser im Kulturraum gelagert. Nach Ablauf der vier Monate wird zunächst eine optische Bewuchsbonitierung des Mycels nach SHEKHOESLAMI

(1986) durchgeführt. Dabei wird der Überwachungsgrad des Mycels bestimmt. Die Einteilungen der Überwachungsgrade sind in Tabelle 3-20 dargestellt.

**Tabelle 3-20: Überwachungsgrad des Mycels modifiziert nach SHEKHOLESLAMI (1986)**

20 %	40 %	60 %	80 %	100 %	120 %
Seitenflächen zu $\frac{1}{4}$ überwachsen	Seitenflächen zu $\frac{1}{2}$ überwachsen	Seitenflächen zu $\frac{3}{4}$ überwachsen	Oberkante erreicht	Vollständig überwachsen	Üppig überwachsen

Nach dieser visuellen Untersuchung werden die Proben dann aus den Gläsern entnommen, vorsichtig vom Mycel befreit und im Trockenschrank bei 105 °C für 24 h getrocknet. Anschließend wird das Gewicht der Holzproben auf der Tischwaage ermittelt. Aus der Differenz der ermittelten Trockengewichte, vor dem Versuch und nach dem Versuch, ergibt sich der prozentuale Holzabbau.

### 3.4.2 Holzabbau an radioaktiv markierten Mitteldichten Faserplatten ( $^{14}\text{C}$ )

Um die im Holzabbauversuch (vgl. dazu Kapitel 3.4.1) quantitativ ermittelten Abbauraten (siehe auch Kapitel 4.3.1) durch die Holzerstörenden Pilze *Trametes versicolor*, *Coniophora puteana* und *Trichoderma viridae* genauer definieren zu können, wurde ein weiterer Holzabbauversuch mit unterschiedlich radioaktiv markierten Holzbestandteilen durchgeführt. Dazu wurde vollständig  $^{14}\text{C}$ -U markiertes Fichtenholz, Fichtenholz nur mit  $^{14}\text{C}$ -U markierter Cellulose und Fichtenholz nur mit  $^{14}\text{C}$ -U markiertem Lignin (FREUDENBERG, 1954 und 1968) verwendet.

Der Holzabbau wurde in der ersten Versuchsserie nur anhand der Trockengewichtsverluste der untersuchten MDF-Proben bestimmt (vgl. Kapitel 3.4.1). Dabei konnte im Einzelnen nicht festgestellt werden, wie viel Lignin, Hemicellulose und Cellulose mengenmäßig durch die Pilze abgebaut wurde. Hinsichtlich der verschiedenen Pilze und ihrer unterschiedlichen Abbaustrategien (vgl. Kapitel 2.6) ist es von hohem Interesse herauszufinden, in welchen Mengenanteilen die unterschiedlichen Holzbestandteile Lignin, Cellulose und Hemicellulose abgebaut werden. Diese Gewichtsanteile lassen sich anhand der  $^{14}\text{C}$ -Methode genau bestimmen.

Der Versuchsaufbau mit den  $^{14}\text{C}$ -U markierten Buchenspänen ist sehr nahe an den in Kapitel 3.4.1 beschriebenen Versuch angelehnt, damit sich die Ergebnisse der  $^{14}\text{C}$ -markierten MDF-Proben mit den MDF-Proben aus dem vorhergehenden Versuch vergleichen lassen. Es werden die gleichen Bindemittel, wie bereits in Kapitel 3.4.1 beschrieben, zur Herstellung der Mitteldichten Faserplatten verwendet. Im Gegensatz zum vorhergehenden Holzabbauversuch (Kapitel 3.4.1) wird in dieser Versuchsreihe ein größeres Spektrum an Holzabbauenden Pilzen und kein Fungizid eingesetzt. Zusätzlich zu den zuvor verwendeten Pilzen *Trametes versicolor*, *Coniophora puteana* und *Trichoderma viridae* werden zum Teil noch der Weißfäulepilz *Trametes villosa* und der Schimmelpilz *Chaetomium globosum* hinsichtlich ihrer Abbaufähigkeiten von Mitteldichten Faserplatten untersucht. *Trametes villosa* und *Chaetomium globosum* werden auf einem Malz-Pepton-Agar angeimpft. Die Herstellung und die dazu notwendigen Chemikalien sind im Anhang unter Kapitel 8.4.1.4 aufgeführt.

Für den Holzabbauversuch an  $^{14}\text{C}$ -markierten MDF-Platten werden unterschiedliche Nährmedien angesetzt (vgl. auch Tabelle 3-21), autoklaviert und anschließend jeweils genau 100 ml in einen 500 ml Erlenmeyerkolben mit engem Hals gegeben. Die Erlenmeyerkolben werden unter der Sterilbank mit einem Wattestopfen und Aluminiumfolie verschlossen. Danach werden sie zum Auskühlen bei  $+7\text{ }^{\circ}\text{C}$  im Kühlraum gelagert. Wenn die Erlenmeyerkolben abgekühlt und die Nährmedien ausgehärtet sind, wird das Mycel der Holzersetzenen Pilze unter sterilen Bedingungen auf die Kolben überimpft (vgl. Tabelle 3-21). Die Kolben werden anschließend wieder mit Wattestopfen und Aluminiumfolie verschlossen. Anschließend werden die Erlenmeyerkolben im Kulturraum bei  $+23\text{ }^{\circ}\text{C}$  gelagert, bis das Pilzmycel den Agar gleichmäßig überwachsen hat.

**Tabelle 3-21: Nährmedien und Pilze für den Holzabbauversuch mit  $^{14}\text{C}$ -U markierten MDF-Platten**

Nährmedium / Pilz	<i>Trametes versicolor</i>	<i>Trametes villosa</i>	<i>Coniophora puteana</i>	<i>Trichoderma viridae</i>	<i>Chaetomium globosum</i>
BSM	8 Kolben	-	-	-	-
MYA	-	-	8 Kolben	-	-
Raulin	-	-	-	8 Kolben	-
MPA	-	6 Kolben	-	-	6 Kolben
<b>Summe</b>	<b>8 Kolben</b>	<b>6 Kolben</b>	<b>8 Kolben</b>	<b>8 Kolben</b>	<b>6 Kolben</b>

Da die vollständige Herstellung von radioaktiv markierten Mitteldichten Faserplatten aus sicherheitstechnischen Gründen im Technikum des NHN nicht möglich ist, werden die MDF-

Platten für die Holzabbauversuche mit  $^{14}\text{C}$ -U markiertem Holz zum größten Teil im Labor für Radioisotope (LARI) des Instituts für Forstbotanik der Universität Göttingen angefertigt.

Die inaktiven Fasern werden zunächst auf der Pilot-MDF-Anlage des NHN mit UF-Harz (Kontrollen) bzw. der Weizenprotein-Suspension beleimt, danach bei geringen Temperaturen in der Rohrtrocknerleitung getrocknet und anschließend im LARI in eine zuvor aus Aluminium angefertigte Streuform mit den Maßen 25 mm x 50 mm gestreut. Dabei wird die insgesamt benötigte Menge an Fasermaterial für eine 10 mm starke Platte mit einer Sollrohddichte von 800 kg / m<sup>3</sup> (siehe Kapitel 8.2) in vier gleichmäßige Mengenanteile aufgeteilt. Die benötigte Menge an  $^{14}\text{C}$ -U markiertem Holz wird für jede herzustellende Probe zuvor ermittelt damit die genaue Aktivität jeder einzelnen Faserplatte bekannt ist. Die gesamte Menge an  $^{14}\text{C}$ -U markiertem Material wird auf drei gleichmäßige Schichten aufgeteilt. Auf diese Weise werden eine gleichmäßige Verteilung und ein gleichmäßiger Abbau des radioaktiven Materials in den Faserplatten garantiert. Dies ist wichtig für die spätere Auswertung der Ergebnisse, da nur der Abbau von  $^{14}\text{C}$ -U markiertem Holz gemessen werden kann. Um von Anfang an Messergebnisse zu erhalten, muss garantiert sein, dass die Pilze die ganze Versuchszeit über aktives Material abbauen können und nicht erst nach einer langen Durchwachsphase.

Die gestreuten Mitteldichten Faserplatten werden im LARI mit einer Kaltpresse auf eine Dicke von ca. 14 mm vorverdichtet. Abschließend werden die in Aluminiumfolie eingewickelten Faserplatten mit 10 mm Distanzleisten bei 5,7 N/cm<sup>2</sup> und 190 °C für 4 Minuten heiß verpresst. Die dicke Aluminiumfolie wird verwendet, um ein mögliches Entweichen von radioaktivem Wasserdampf zu verhindern. Da die beleimten Fasern zuvor getrocknet wurden, ist eine Dampfbildung beim Heißpressen optisch nicht feststellbar. Die Dampfbildung beim Heißpressvorgang wurde vor Versuchsbeginn mit inaktivem Material überprüft. Dabei lag die beleimte Feuchte der Fasern bei ca. 9,0 %. Da bei der  $^{14}\text{C}$ -Messmethode nur der Abbau des radioaktiven Materials nachgewiesen werden kann, werden von allen  $^{14}\text{C}$ -U markierten MDF-Proben auch die Frisch- und Trockengewichte ermittelt. Nach dem Verpressen wird das Trockengewicht der hergestellten Faserplatten im LARI bestimmt. Dazu werden die MDF-Platten für 24 h bei 105 °C ( $\pm 1$  °C) im Trockenschrank gelagert. Nach Ablauf der 24 h werden die Proben im Exsikkator deponiert und anschließend wird das Trockengewicht der Platten mit Hilfe einer Tischwaage bestimmt. Dadurch besteht die Möglichkeit, die nach der  $^{14}\text{C}$ -Messmethode ermittelten Abbauraten mit den Masseverlusten der MDF-Proben vergleichen zu können.

Tabelle 3-22: Mit  $^{14}\text{C}$ -U-markiertem Holz und UF-Harz hergestellte MDF-Proben

Bezeichnung der MDF-Probe	Einwaage $^{14}\text{C}$ -U markierte Buchenspäne (mg)	Aktivität (Bq)	Lutrogewicht der MDF-Probe (g)	Trockengewicht der MDF-Probe (g)
UF I	44,6	6856,878	11,356	10,963
UF II	45,4	6979,872	11,786	11,402
UF III	43,1	6626,267	11,711	11,357
UF IV	46,0	7072,117	11,782	11,424
UF V	47,6	7318,103	11,760	11,392
UF VI	46,4	7133,613	11,826	11,445

Es werden insgesamt sechs Harnstoff-Formaldehyd-Harz gebundene  $^{14}\text{C}$ -U markierte MDF-Proben (UF I bis UF VI) mit einer vergleichbaren Aktivität, gemessen in Bq, hergestellt (vgl. Tabelle 3-22). Die Proben UF I bis UF VI werden auf sechs Kolben verteilt, von denen immer zwei Kolben mit den gleichen Holzzerstörenden Pilzen beimpft und den gleichen Nährmedien befüllt sind, damit Doppelbestimmungen bzgl. der Holzabbauraten durchgeführt werden können. Dabei werden die Nährmedien BSM, MYA sowie Raulin und die Pilzarten *Trametes versicolor*, *Coniophora puteana* und *Trichoderma viridae* verwendet (vgl. dazu auch Tabelle 3-23).

Tabelle 3-23: Versuchsaufbau für die mit  $^{14}\text{C}$ -U-markiertem Holz und UF-Harz hergestellten MDF-Platten

Kolben Nr.	MDF-Probe	Nährmedium	Pilzart
1	UF I	BSM	<i>Trametes versicolor</i>
2	UF II		
3	UF III	MYA	<i>Coniophora puteana</i>
4	UF IV		
5	UF V	Raulin	<i>Trichoderma viridae</i>
6	UF VI		

Parallel zu den sechs UF- Harz gebundenen  $^{14}\text{C}$ -U markierten MDF-Proben werden ebenfalls sechs  $^{14}\text{C}$ -U markierte Mitteldichte Faserplatten angefertigt (WP I bis WP VI), die ausschließlich mit der entwickelten Weizenprotein-Suspension gebunden sind. Zusätzlich werden noch vier weitere Weizenprotein gebundene MDF-Platten angefertigt (WP VII bis WP X), da bei diesen Proben zusätzlich die Pilzarten *Trametes villosa* und *Chaetomium globosum* verwendet werden. Auch bei diesem Proben wird darauf geachtet, dass in den MDF-Proben vergleichbare Aktivitäten (Bq) vorherrschen (vgl. Tabelle 3-24).

Tabelle 3-24: Mit  $^{14}\text{C}$ -U-markiertem Holz und Weizenprotein hergestellte MDF-Proben

Bezeichnung der MDF-Probe	Einwaage $^{14}\text{C}$ -U markierte Buchenspäne (mg)	Aktivität (Bq)	Lutrogewicht der MDF-Probe (g)	Trockengewicht der MDF-Probe (g)
WP I	46,8	7195,110	11,36	10,96
WP II	48,6	7471,845	11,79	11,40
WP III	48,5	7456,472	11,64	11,29
WP IV	45,4	6979,872	11,71	11,36
WP V	46,3	7118,240	11,78	11,42
WP VI	47,5	7302,730	11,76	11,39
WP VII	58,7	9024,637	11,04	10,80
WP VIII	57,4	8824,772	11,42	11,20
WP IX	60,0	9224,500	11,15	10,96
WP X	57,5	8840,147	11,20	11,00

Die zehn mit Weizenprotein und  $^{14}\text{C}$ -U markiertem Material angefertigten MDF-Proben (WP I bis WP X) werden gleichmäßig auf die Nährmedien BSM, MYA, Raulin und MPA verteilt, so das auch hier die Ermittlung der Holzerstörung anhand von Doppelbestimmungen erfolgen kann. Die Nährmedien sind wahlweise mit den Pilzarten *Trametes versicolor*, *Coniophora puteana*, *Trichoderma viridae*, *Trametes villosa* bzw. *Chaetomium globosum* beimpft (vgl. Tabelle 3-25).

Tabelle 3-25: Versuchsaufbau für die mit  $^{14}\text{C}$ -U-markierten Buchenspänen und WP hergestellten MDF-Platten

Kolben Nr.	MDF-Probe	Nährmedium	Pilzart
1	WP I	BSM	<i>Trametes versicolor</i>
2	WP II		
3	WP III	MYA	<i>Coniophora puteana</i>
4	WP IV		
5	WP V	Raulin	<i>Trichoderma viridae</i>
6	WP VI		
7	WP VII	MPA	<i>Trametes villosa</i>
8	WP VIII		
9	WP IX	MPA	<i>Chaetomium globosum</i>
10	WP X		

Um den alleinigen Abbau von Cellulose in den MDF-Platten durch die Holzerstörenden Pilze zu überprüfen, werden wie in Tabelle 3-26 dargestellt, MDF-Proben mit rein  $^{14}\text{C}$ -U-



Cellulose markierten Buchenspänen hergestellt (CWP I bis CWP X). Dadurch wird nur die Aktivität der durch die Pilze zersetzten Cellulose nach der  $^{14}\text{C}$ -Messmethode ermittelt. Wichtig dabei sind eine möglichst gleichmäßige Verteilung wie auch eine möglichst homogene Ausgangsaktivität (Bq) des  $^{14}\text{C}$ -U-Cellulose markierten Materials.

**Tabelle 3-26: Mit  $^{14}\text{C}$ -U-Cellulose-markiertem Material und Weizenprotein hergestellte MDF-Proben**

Bezeichnung der MDF-Probe	Einwaage $^{14}\text{C}$ -U-Cellulose markierte Buchenspäne (mg)	Aktivität (Bq)	Lutrogewicht der MDF-Probe (g)	Trockengewicht der MDF-Probe (g)
CWP I	47,3	7305,092	11,33	11,28
CWP II	41,9	6471,107	11,14	11,10
CWP III	44,2	6826,322	11,30	11,26
CWP IV	46,3	7150,650	11,30	11,25
CWP V	52,3	8077,300	11,83	10,78
CWP VI	45,0	6949,875	11,33	11,28
CWP VII	49,6	7660,307	11,12	11,08
CWP VIII	46,6	7196,982	11,36	11,32
CWP IX	51,1	7891,970	11,51	11,47
CWP X	47,3	7273,558	11,40	11,34

**Tabelle 3-27: Mit  $^{14}\text{C}$ -U-Cellulose markierte und mit WP hergestellte MDF-Platten**

Kolben Nr.	MDF-Probe	Nährmedium	Pilzart
1	CWP I	BSM	<i>Trametes versicolor</i>
2	CWP II		
3	CWP III		
4	CWP IV	MYA	<i>Coniophora puteana</i>
5	CWP V		
6	CWP VI	Raulin	<i>Trichoderma viridae</i>
7	CWP VII	MPA	<i>Trametes villosa</i>
8	CWP VIII		
9	CWP IX	MPA	<i>Chaetomium globosum</i>
10	CWP X		

Die zehn mit  $^{14}\text{C}$ -U-Cellulose markiertem Holz hergestellten und mit Weizenprotein gebundenen MDF-Proben CWP I bis CWP X werden auf die mit den Nährmedien BSM, MYA, Raulin und MPA gefüllten Kolben verteilt. Dabei werden immer zwei parallele Kolben hinsichtlich ihres Nährmediums und der verwendeten Pilzart angesetzt, damit die

Holzerstörung in Doppelbestimmungen ermittelt werden kann (vgl. Tabelle 3-27). Um neben dem alleinigen Abbau der Cellulose auch den Zersetzungsgrad des Lignins durch die verwendeten Pilzarten zu überprüfen, werden Weizenprotein gebundene MDF-Proben hergestellt, in die  $^{14}\text{C}$ -U-Lignin markierte Buchenspäne verteilt werden. Die für diesen Versuch angefertigten MDF-Platten mit den eingewogenen Aktivitäten (Bq) sind in Tabelle 3-28 aufgeführt. Dabei wird, wie auch bei den bereits beschriebenen Versuchen, sowohl auf eine möglichst gleichmäßige Verteilung als auch auf eine ähnliche Ausgangsaktivität des  $^{14}\text{C}$ -U-Lignin markierten Materials geachtet um eine spätere Vergleichbarkeit der Ergebnisse sicher zu stellen.

**Tabelle 3-28: Mit  $^{14}\text{C}$ -U-Lignin-markiertem Material und Weizenprotein hergestellte MDF-Proben**

Bezeichnung der MDF-Probe	Einwaage $^{14}\text{C}$ -U-Lignin markierte Buchenspäne (mg)	Aktivität (Bq)	Lutrogewicht der MDF-Probe (g)	Trockengewicht der MDF-Probe (g)
LWP I	42,4	6090,760	11,68	11,14
LWP II	42,8	6148,220	11,81	11,26
LWP III	44,0	6320,600	12,42	11,80
LWP IV	40,9	5875,285	11,84	11,33
LWP V	41,3	5932,745	11,61	11,07
LWP VI	40,9	5875,285	11,99	11,57
LWP VII	41,3	5932,785	12,17	11,66
LWP VIII	43,7	6277,505	12,06	11,52
LWP IX	43,1	5291,315	12,12	11,53
LWP X	42,7	6133,855	12,84	11,35

**Tabelle 3-29: Mit  $^{14}\text{C}$ -U-Lignin markiertem Material und WP hergestellte MDF-Platten**

Kolben Nr.	MDF-Probe	Nährmedium	Pilzart
1	LWP I	BSM	<i>Trametes versicolor</i>
2	LWP II		
3	LWP III	MPA	<i>Trametes villosa</i>
4	LWP IV		
5	LWP V	MYA	<i>Coniophora puteana</i>
6	LWP VI		
7	LWP VII	Raulin	<i>Trichoderma viridae</i>
8	LWP VIII		
9	LWP IX	MPA	<i>Chaetomium globosum</i>
10	LWP X		

Die mit  $^{14}\text{C}$ -U-Lignin hergestellten MDF-Proben LWP I bis LWP X werden auf die mit den Nährmedien BSM, MPA, MYA und Raulin befüllten Kolben gleichmäßig verteilt. Die Kolben wurden zuvor je nach Nährmedium mit den Pilzarten *Trametes versicolor*, *Trametes villosa*, *Coniophora puteana*, *Trichoderma viridae* bzw. *Chaetomium globosum* beimpft. Dabei werden zur Anfertigung von Doppelbestimmungen jeweils zwei parallele Kolben angesetzt (vgl. Tabelle 3-29). Alle für diesen Holzabbauversuch hergestellten  $^{14}\text{C}$ -MDF-Platten (vgl. Tabelle 3-22 dazu bis Tabelle 3-29) werden nach der Trockengewichtsbestimmung einzeln in Aluminiumfolie verpackt und beschriftet. Danach werden sie bei  $105\text{ }^{\circ}\text{C}$  ( $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) für 72 h im Trockenschrank sterilisiert. Nach der Sterilisationszeit kühlen die MDF-Platten aus und werden, sobald sie die Raumtemperatur angenommen haben, unter sterilen Bedingungen auf die vollständig überwachsenen Nährmedien in den Erlenmeyerkolben gelegt. Die Erlenmeyerkolben werden dann mit zuvor autoklavierten Gummistopfen verschlossen.

In den Gummistopfen ist ein massives Glasröhrchen eingelassen an dessen Ende sich eine kleine Auffangschale befindet. Die Auffangschale im Erlenmeyerkolben wird mit 2 ml 1 M NaOH gefüllt. Zum Einfüllen der NaOH-Lauge wird eine 1000  $\mu\text{l}$  Pipette mit sterilen Pipettenspitzen verwendet. Das  $\text{CO}_2$ , das von den Pilzen ausgeschieden wird, enthält das radioaktive  $^{14}\text{C}$  aus den MDF-Platten und wird in der NaOH-Lauge aufgefangen. Die NaOH-Lauge wird in regelmäßigen Abständen, zu Versuchsanfang zwei Mal wöchentlich und nach 28 Tagen ein Mal pro Woche, unter sterilen Bedingungen gewechselt. Die NaOH-Lauge wird mit Hilfe einer 1000  $\mu\text{l}$  Pipette aus den Auffangschalen entnommen und gleichmäßig auf zwei SZINTI-Fläschchen pro Probe verteilt. In alle SZINTI-Fläschchen werden 200  $\mu\text{l}$  1 M NaOH und 10 ml LUMASAFE<sup>+</sup>, die Chemikalie mit der anschließend die Aktivität der entnommenen Lauge gemessen wird, gefüllt. Die Zugabe von NaOH ist notwendig, da das LUMASAFE<sup>+</sup> sauer reagiert und zuvor mit etwas Lauge neutralisiert werden muss. Die Menge von 2 ml NaOH muss auf zwei Fläschchen aufgeteilt werden, um bei der späteren Messung genaue Ergebnisse zu bekommen. Die Ergebnisse einer Probe werden dann nach der Messung addiert. Die Messung der Aktivität wird mit Hilfe eines computergesteuerten Liquid Scintillation Counter (Flüssigszintillationszähler) vom Typ Tricarb 2250 der Fa. PACKARD durchgeführt. Dazu werden die Proben auf Zimmertemperatur heruntergekühlt und anschließend für 20 Minuten gemessen. Anhand der Ausgangsaktivität der Mitteldichten Faserplatten und der in der Lauge gemessenen Aktivität kann der Holzabbau durch die Weiß-, Braun- und Moderfäulepilze ermittelt werden.

### 3.4.3 Kompostierungsversuch an $^{14}\text{C}$ markierten Mitteldichten Faserplatten

Analog zu den beschriebenen Abbauprobungen (vgl. Kapitel 3.4.1 und 3.4.2) an  $^{14}\text{C}$ -U markierten Weizenprotein gebundenen MDF-Platten werden Kompostierungsversuche mit diesen Werkstoffen durchgeführt. Ziel dieser Versuche ist es, neben einer mykologischen Abbaumöglichkeit weitere realisierbare Entsorgungsvarianten für diese Werkstoffe zu erforschen. Dazu werden Mitteldichte Faserplatten unter Verwendung von  $^{14}\text{C}$ -U-markierten Holzspänen angefertigt. Die Herstellung dieser Faserplatten erfolgt analog zu den in Kapitel 3.4.2 beschriebenen Mitteldichten Faserplatten unter Verwendung der im Rahmen dieses Forschungsvorhabens entwickelten Weizenprotein-Suspension als Bindemittel, inaktivem Fasermaterial der Fa. STEICO und  $^{14}\text{C}$ -U-markierten Buchenspänen. Der Beleimungsgrad mit dem naturnahen Bindemittel auf Weizenproteinbasis beträgt 15 % bezogen auf atro inaktives Fasermaterial. Das inaktive Fasermaterial wird nach der Beleimung im Mischer in der Rohrtrocknerleitung der Pilot-MDF-Anlage auf eine Feuchte von 10 % getrocknet. Die Zielrohndichten der jeweils 25 mm breiten und 50 mm langen Faserplatten betragen  $800 \text{ kg/m}^3$ . Alle Platten werden 4 Minuten lang bei  $190 \text{ }^\circ\text{C}$  und einem Druck von  $5,7 \text{ N/cm}^2$  auf eine Endstärke von 10 mm verpresst. Die Bezeichnung der Proben sowie die für die Anfertigung der Weizenprotein gebundenen MDF-Platten Mengen an  $^{14}\text{C}$ -U-markierten Buchenspänen sind in Tabelle 3-30 aufgeführt.

**Tabelle 3-30: Für den Kompostierungsversuch hergestellte  $^{14}\text{C}$ -U-markierte MDF-Platten**

<b>Bezeichnung der MDF-Probe</b>	<b>Einwaage <math>^{14}\text{C}</math>-U-Buchespäne (mg)</b>	<b>Aktivität der Buchenspäne (Bq)</b>	<b>Frischgewicht der MDF-Platten (g)</b>	<b>Trockengewicht der MDF-Platten (g)</b>
N	44,7	6872,253	11,248	10,874
L	46,4	7133,613	11,422	10,918
B	46,4	7133,613	11,342	10,859
R	46,5	7148,988	11,451	10,932

Nach dem Heißpressen und Klimatisieren werden zunächst die Frischgewichte der Mitteldichten Faserplatten auf einer Tischwaage ermittelt. Anschließend werden die MDF-Platten für 24 h bei  $103 \text{ }^\circ\text{C}$  ( $\pm 1^\circ\text{C}$ ) im Trockenschrank gelagert. Nach Ablauf der 24 h werden die MDF-Platten vorerst zum Abkühlen in einem Exsikkator gelagert und anschließend die Trockengewichte der Platten mit einer Tischwaage ermittelt. Nach der Ermittlung der Trockengewichte werden die MDF-Proben in Aluminiumfolie gewickelt und

für drei Tage bei 103 °C ( $\pm 1$  °C) im Trockenschrank sterilisiert. Zur Kompostierung werden drei handelsübliche Erden eingesetzt, die sich hinsichtlich ihrer Mineralzusammensetzung unterscheiden. Dabei handelt es sich um Nadelholz- (N), Laubholz-(L) und Blumenerde (B). Die Bezeichnungen dieser unterschiedlichen Erden beschreiben nicht das Ausgangssubstrat aus dem sie entstanden sind, sondern die Pflanzengruppen, für die diese Erden optimiert sind.

Die Kompostierungsversuche werden in Exsikkatoren mit einem nutzbaren Volumen von 1,5 Litern durchgeführt. Die Exsikkatoren müssen über einen Eingangs- und Ausgangsschliff verfügen. Die Kompostierungsgrade der einzelnen Substrate werden über einen Zeitraum von 300 Tagen ermittelt. In jedem Exsikkator wird pro Substratvariante (N, L, und B) mittig eine Protein gebundene,  $^{14}\text{C}$ -U-markierte Mitteldichte Faserplatte ca. vier cm tief im Substrat vergraben. Als „Blindversuch“ zu den durchgeführten Kompostierungsversuchen mit unterschiedlichen Erden wird eine Weizenprotein gebundene,  $^{14}\text{C}$ -U-markierte MDF-Platte in einem Exsikkator gelagert, ohne Zugabe von Erde (R). Die Füllhöhe mit Erde beträgt bei allen verwendeten Exsikkatoren exakt acht cm. Weitere Parameter dieses Versuches sind in Tabelle 3-31 aufgeführt.

**Tabelle 3-31: Versuchsaufbau des Kompostierungsversuches an  $^{14}\text{C}$ -U-markierten MDF-Platten**

<b>Substratvariante</b>	<b>Nummer des Exsikkators</b>	<b>Wassergehalt im Substrat (%)</b>	<b>Bezeichnung der MDF-Probe</b>
Nadelholzsubstrat	1	50,61	N
Laubholzsubstrat	2	50,46	L
Blumenerde	3	59,97	B
Kein Substrat	4	-	R

Die Messung des Kompostierungsgrades erfolgt über die bei der Kompostierung durch Mikroorganismen entstehende  $\text{CO}_2$ -Absorption. Das durch die Mikroorganismen verbrauchte und dadurch  $^{14}\text{C}$  enthaltende  $\text{CO}_2$  wird in Vials, die mit 10 %iger NaOH gefüllt sind, aufgefangen. Die Messung und das Wechseln der Natronlauge erfolgt analog zu der in Kapitel 3.4.2 beschriebenen Methode. Parallel zur Bestimmung der Kompostierungsrate über das verbrauchte  $^{14}\text{C}$ -U wird mit Hilfe der Trockengewichte der einzelnen MDF-Platten vor und nach dem Versuch der Kompostierungsgrad quantitativ bestimmt. Die Ergebnisse der Kompostierungsversuche sind in Kapitel 4.3.3 graphisch dargestellt und erläutert.

## **4 Ergebnisse und Diskussion**

### **4.1 Analytische Untersuchungen**

In Kapitel 4.1.1 bis Kapitel 4.1.3 sind die Ergebnisse der im Rahmen dieser Dissertation durchgeführten analytischen Untersuchungen aufgeführt. Dabei sind in Kapitel 4.1.1 ff. die Ergebnisse bzgl. der Zusammensetzung des Fasermaterials sowie der ermittelten Pentosan- und Ligningehalte im verwendeten Faserstoff dargestellt. In Kapitel 4.1.2 sind die Ergebnisse der morphologischen Untersuchungen am Fasermaterial in Form von REM-Aufnahmen dargestellt. In den Kapiteln 4.1.3 ff. sind die Analytikergebnisse der in diesem Forschungsvorhaben verwendeten konventionellen und natürlichen Bindemittel sowie den daraus hergestellten Mischkondensaten aufgeführt. Dabei handelt es sich um die Ermittlung der Hauptbestandteile in den Bindemitteln sowie den Viskositäten der verwendeten Bindemittel und Leimflotten.

#### **4.1.1 Ergebnisse der analytischen Untersuchungen des Faserstoffes**

##### **4.1.1.1 Siebkennlinien nach WIHS 74**

In Tabelle 4-1 sind die Ergebnisse der Siebfraktionierung nach WIHS 74 des STEICO Kiefernindustriefaserstoffes aufgeführt. Dabei ist ersichtlich, dass bei den Siebdurchmessern von 4 mm bis 0,630 mm keine hohen Rückstände aufgetreten sind. Ab einer Durchgangsfraction von 0,630 mm, verglichen mit der nachfolgenden Durchgangsfraction von 0,500 mm, ist jedoch eine deutliche prozentuale Zunahme in der Summenhäufigkeit des Rückstandes festzustellen. Bei einem Siebdurchmesser von 0,63 mm wurden 89,54 % der eingewogenen Menge des Fasermaterials durchgesiebt, bei einer Maschenweite von 0,500 mm konnten lediglich noch 71,39 % der Einwaage durchgesiebt werden. Diese Differenz von 18,15 % zwischen den beiden Siebdurchmessern  $D=0,630$  mm und  $D=0,500$  mm ist bereits ein deutlicher Unterschied, der bei der Siebfraktionierung des STEICO Industriefaserstoffes nach WIHSS 74 festzustellen war. Darüber hinaus wurde eine deutliche Differenz zwischen den Durchgangsfractionen  $D=0,315$  mm und  $D=0,100$  mm ermittelt. Bei einem Siebdurchmesser von 0,315 mm konnten 63,46 % der eingewogenen Menge durchgesiebt werden, wo hingegen bei einem Durchmesser von 0,100 mm nur noch 43,00 % der Einwaage durch den Siebeinsatz fielen. Daraus ergibt sich eine prozentuale Differenz von 20,46 %. Eine weitere Abnahme der Summenhäufigkeit des durchgesiebten Fasermaterials ist zwischen den

Fraktionen 0,100 mm und 0,001 mm ersichtlich. Hierbei handelt es sich um Feinstaub, der im Fasermaterial unerwünscht ist, da er bei der Herstellung von Mitteldichten Faserplatten einerseits zur Staubbildung führt und sich andererseits in den Platten nicht positiv auf die mechanisch-technologischen Eigenschaften der Werkstoffe auswirkt. Fasermaterial mit einem Durchmesser von  $> 0,100$  mm wird allgemein auch als „Leimfresser“ bezeichnet, da dieser Faserstaub prozentual verglichen mit den Oberflächen herkömmlicher Fasern sehr viel Leim aufnimmt, jedoch bei der Verarbeitung in Faserplatten keine positiven mechanisch-technologischen Eigenschaften bewirkt.

**Tabelle 4-1: Siebkennlinien des STEICO-Faserstoffes nach WIHS 74**

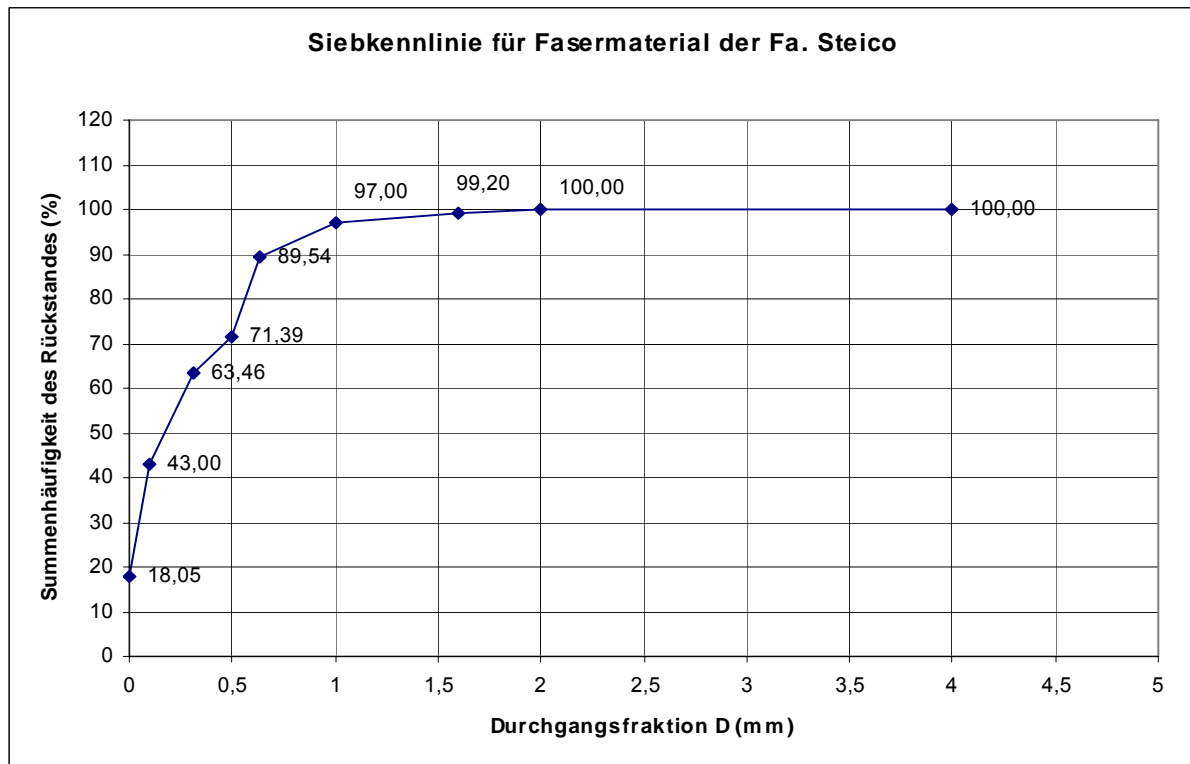
Rückstands- fraktion	Masse der Rückstände (g)			Rückstände der Fraktionierung		Summen- häufigkeit des Rückstandes (%)	Durchgangs- fraktion D (mm)
	1	2	3	in g	in %		
R 4,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	4,000
R 2,0	0,09	0,08	0,07	0,24	0,80	100,00	2,000
R 1,6	0,17	0,21	0,28	0,66	2,20	99,20	1,600
R 1,0	0,62	0,88	0,74	2,24	7,46	97,00	1,000
R 0,63	1,58	1,95	1,92	5,45	18,15	89,54	0,630
R 0,5	0,94	0,57	0,87	2,38	7,93	71,39	0,500
R 0,315	2,20	2,18	1,76	6,14	20,45	63,46	0,315
R 0,1	2,68	2,24	2,57	7,49	24,95	43,00	0,100
R 0,001	1,76	1,90	1,76	5,42	18,05	18,05	0,000

Die Ergebnisse der Siebfractionierung nach WIHS 74 des STEICO Kiefernfasernstoffes aus Tabelle 4-1 sind zur besseren Verdeutlichung in Abbildung 4-1 nochmals graphisch dargestellt. Dort sind die im vorhergehenden Text beschriebenen Differenzen zwischen den unterschiedlichen Siebfractionen deutlich ersichtlich.

Charakteristisch für eine Siebfractionierung ist, dass die prozentuale Menge an durchgesiebttem Material, bezogen auf die anfangs eingewogene Menge an Fasern mit sich verringermendem Siebdurchmesser abfällt. Wichtig bei der Beurteilung eines Faserstoffes sind die Unterschiede zwischen den einzelnen Siebdurchmessern.

Daraus ist zu schließen, dass ein Großteil des STEICO Fasermaterials aus einem Durchmesser von  $\geq 0,630$  mm besteht. Ein weiterer Großteil des Fasermaterials besteht aus Fasern mit einem Durchmesser von  $\leq 0,500$  mm. Den letzten größeren Anteil im Faserstoff bilden Fasern mit einem Durchmesser von  $\leq 0,500$  mm und  $\geq 0,315$  mm. Die Tatsache, dass die Menge des durchsiebbaren Fasermaterials ab einer Siebweite von  $\leq 0,100$  mm deutlich abnimmt, ist ein Anzeichen dafür, dass im Faserstoff nur ein sehr geringer Anteil von Staub vorhanden ist.

Aufgrund der erzielten Ergebnisse lässt sich aussagen, dass es sich bei dem nach dem ASPLUND-Verfahren hergestellten STEICO Kiefernindustriefaserstoff um einen morphologisch definierten und homogenen, d.h. sehr gut aufgeschlossenen Faserstoff handelt, dessen Verwendung bei der Herstellung von Mitteldichten Faserplatten nicht zu morphologisch bedingten Struktur- und damit verbundenen Qualitätsschwankungen bei den Werkstoffen führen wird.



**Abbildung 4-1:** Graphische Darstellung der Siebkennlinien des STEICO-Faserstoffes

#### 4.1.1.2 RAPID-KÖTHEN-Blattbildner

Alle aus dem Kiefernindustriefaserstoff der Fa. STEICO hergestellten RAPID-KÖTHEN-Blattbildner weisen eine sehr einheitliche Oberfläche auf, was ebenfalls bei der Betrachtung der abgebildeten Nahaufnahme eines dieser Blattbildner (vgl. Abbildung 4-2) zu erkennen ist. Der nach dem ASPLUND-Verfahren hergestellte Kiefernindustriefaserstoff der Fa. STEICO ist charakterisiert durch eine definierte Morphologie, wodurch ein definiertes Strukturbildungsverhalten bei den im Rahmen dieser Dissertation hergestellten Mitteldichten Faserplatten gewährleistet ist. Aufgrund des gleichmäßigen Strukturbildungsverhaltens dieses Faserstoffes bei der Herstellung der RAPID-KÖTHEN-Blattbildner ist bei konstanten Herstellungsparametern sowie optimalen Maschineneinstellungen nur mit sehr geringen



Rohdichteschwankungen, bedingt durch das verwendete Fasermaterial, bei den hergestellten MDF-Platten zu rechnen.



**Abbildung 4-2: RAPID-KÖTHEN-Blattbildner aus STEICO-Faserstoff, Nahaufnahme**

Auch die visuelle Beurteilung des Faserstoffes anhand der RAPID-KÖTHEN-Blattbildner bestätigt somit die bereits in Kapitel 4.1.1.1 dargestellten und erläuterten positiven Ergebnisse der Siebkennlinien nach WIHS 74.

#### **4.1.1.3 Hemicellulosegehalt**

Die Ergebnisse der Hemicellulosegehaltsbestimmungen des STEICO-Faserstoffes sind in Tabelle 4-2 aufgeführt. Da die Hemicellulose im Nadelholz nur maximal zu 50 % aus Pentosen (vgl. dazu auch Kapitel 2.1.2) und der Rest der Hemicellulose aus Hexosen gebildet wird, müssen die in Tabelle 4-2 angegebenen und in Abbildung 4-3 graphisch dargestellten Pentosengehalte verdoppelt werden, um den tatsächlichen Hemicellulosegehalt im STEICO-Industriefaserstoff zu ermitteln. Der in dieser Versuchsreihe erzielte durchschnittliche Pentosengehalt von 4,60 % würde verdoppelt einen Hemicellulosegehalt von 9,2 % im Fasermaterial ergeben. Dieser Wert ist jedoch sowohl für Laub- als auch für Nadelhölzer sehr gering und entspricht nicht dem Hemicellulosegehalt im gewachsenen Holz, der nach LOHMANN (1998) bei 24 % bis 40 % liegt (vgl. Tabelle 2-3).

Tabelle 4-2: Ergebnisse der Pentosanbestimmung des STEICO-Faserstoffes

Nr. der Probe	Blindwert Thiosulfat (ml)	Thiosulfat der Faserprobe (ml)	Feuchte des Faserstoffes (%)	Eingewogene Menge des Faserstoffes lutro (g)	Prozentualer Anteil des Pentosans im Fasermaterial (%)
1	17,30	7,52	11,5	2,230	4,599
2	17,30	7,51	11,3	2,226	4,604
3	17,30	7,52	11,6	2,232	4,599
4	17,30	7,48	11,2	2,224	4,618
5	17,30	7,45	11,8	2,236	4,632
6	17,30	7,49	11,6	2,232	4,613

Nach den Untersuchungen von FENGEL (1966) über das Verhalten von Hemicellulosen in unbehandeltem und thermisch behandeltem Nadelholz, ist mit einem Absinken des Pentosan- und damit auch des Hemicellulosegehaltes erst nach einer thermischen Behandlung des Holzes bei Temperaturen von 160 °C bis 180 °C zu rechnen. Diese Voraussetzung trifft auch auf Faserstoffe zu, die nach dem Defibrator-Verfahren hergestellt werden (siehe dazu auch Kapitel 2.3.2). Auf Grund der Tatsache, dass der in dieser Promotion verwendete Faserstoff der Fa. STEICO nach dem Defibrator-Verfahren hergestellt wurde, lässt sich der extreme Pentosanverlust gegenüber nativem Kiefernholz mit dem Verfahren der Faserstoffherstellung begründen.

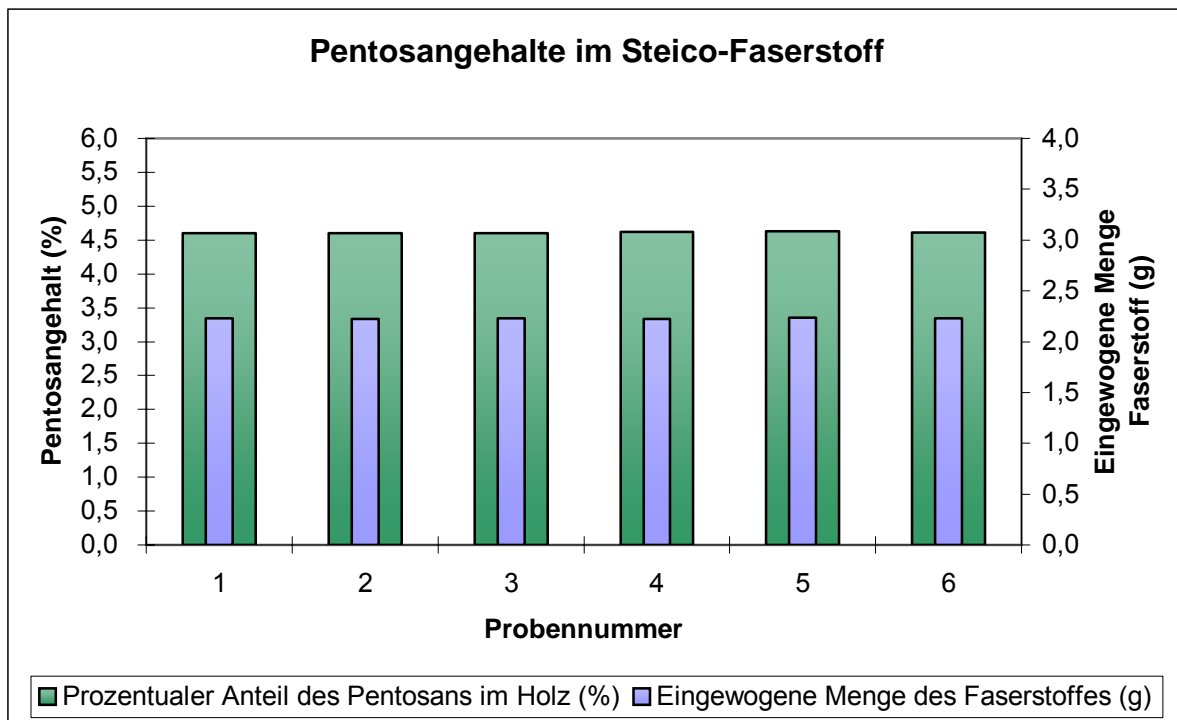


Abbildung 4-3: Graphische Darstellung der Pentosangehalte im STEICO-Industriefaserstoff

#### 4.1.1.4 Ligningehalt

In Tabelle 4-3 sind die Ergebnisse der Ligninbestimmungen des in dieser Promotion verwendeten Kiefern-Industriefaserstoffes der Fa. STEICO aufgeführt. Die relativ hohen Ligninwerte zeigen, dass es sich um einen Faserstoff handelt, der definitiv aus Nadelholz hergestellt wurde.

**Tabelle 4-3: Ergebnisse der Ligninbestimmung des STEICO-Faserstoffes nach HALSE (1940)**

Nr. der Probe	Glastiegel alleine getrocknet (g)	Glastiegel mit Überschuss getrocknet (g)	Lignin (g)	Prozentualer Ligninanteil im Faserstoff atro (%)	Feuchte der Fasern (%)	Eingewogene Menge lutro (g)
1	48,458	48,735	0,277	27,70	11,2	1,112
2	51,694	51,973	0,279	27,90	12,1	1,121
3	48,266	48,542	0,276	27,60	12,2	1,122
4	48,587	48,870	0,283	28,30	11,6	1,116
5	48,346	48,622	0,276	27,60	12,1	1,121
6	50,297	50,576	0,281	28,10	12,1	1,121

Die gemessenen Werte von 27,6 % bis 28,3 % liegen in den von LOHMANN (1998) ermittelten Bereichen und erreichen mit einem durchschnittlichen Ligningehalt von 27,95 %, fast den maximal angegebenen Ligningehalt von 30 % für einheimische Nadelholzarten. Die Verluste gegenüber dem Ligningehalt von nativem Kiefernholz sind sehr gering. Diese Abweichungen lassen sich mit der Annahme erklären, dass der vorliegende Faserstoff nicht nur aus Nadelholz, sondern zu einer geringen Menge auch aus dem weniger Lignin enthalten Laubholz bestehen könnte. Die zugegebene Menge an Laubholz würde in diesem Fall maximal 5 % betragen. Somit würden sich rein rechnerisch Ligningehalte von 25 % – 27 % ergeben, wie sich beim STEICO-Faserstoff gemessen wurden (vgl. dazu auch Abbildung 4-4).

Eine andere Begründung für einen eventuellen Ligninverlust ist die Erkenntnis, dass bei der Herstellung von Holzfasermaterial nach dem Defibrator-Verfahren (vgl. dazu auch Kapitel 1.1 und 2.3.2) die Glasumwandlungstemperatur des Lignins, welche bei ungefähr 123 °C liegt, infolge der deutlich höheren Aufschlusstemperaturen von 160 °C bis 180 °C weit überschritten wird (KHARAZIPOUR, 1996). Das Mittellamellenlignin geht dabei in einen plastischen Zustand über. Aufgrund dieser Tatsachen ist davon auszugehen, dass der ursprünglich im Holz vorhandene Ligningehalt etwas höher war, als der in diesen Untersuchungen ermittelte Ligningehalt.

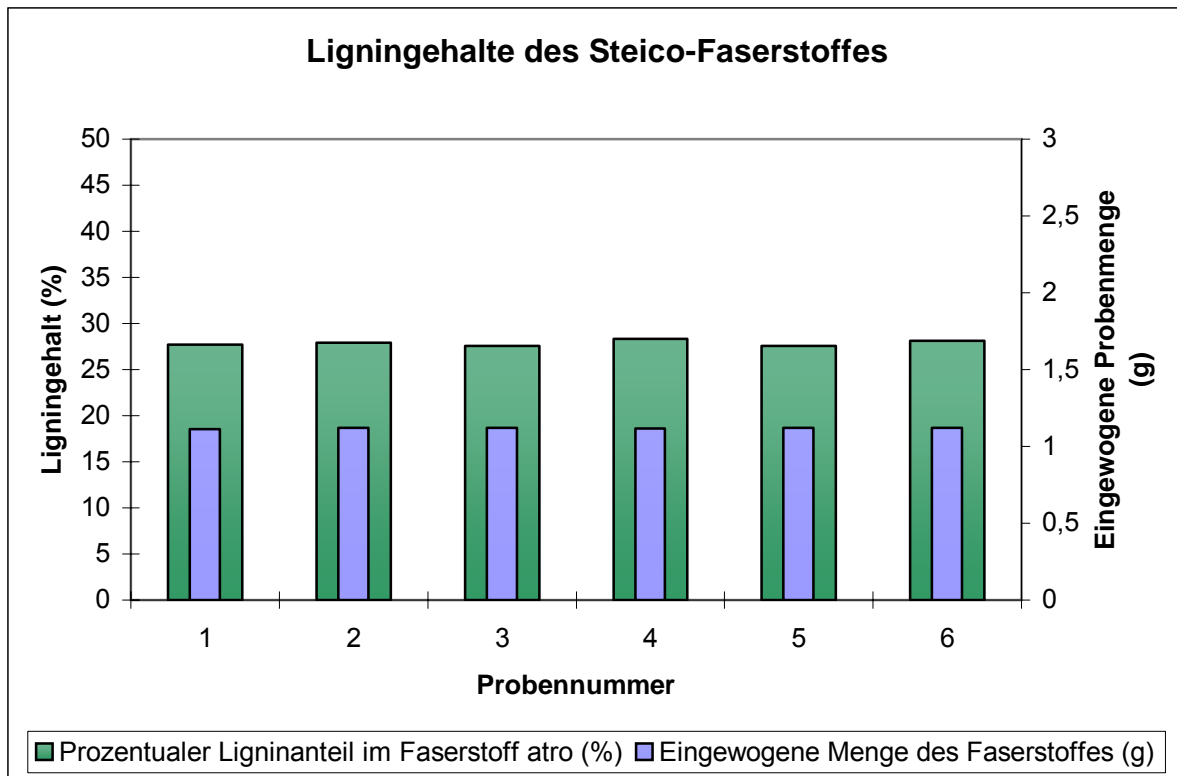


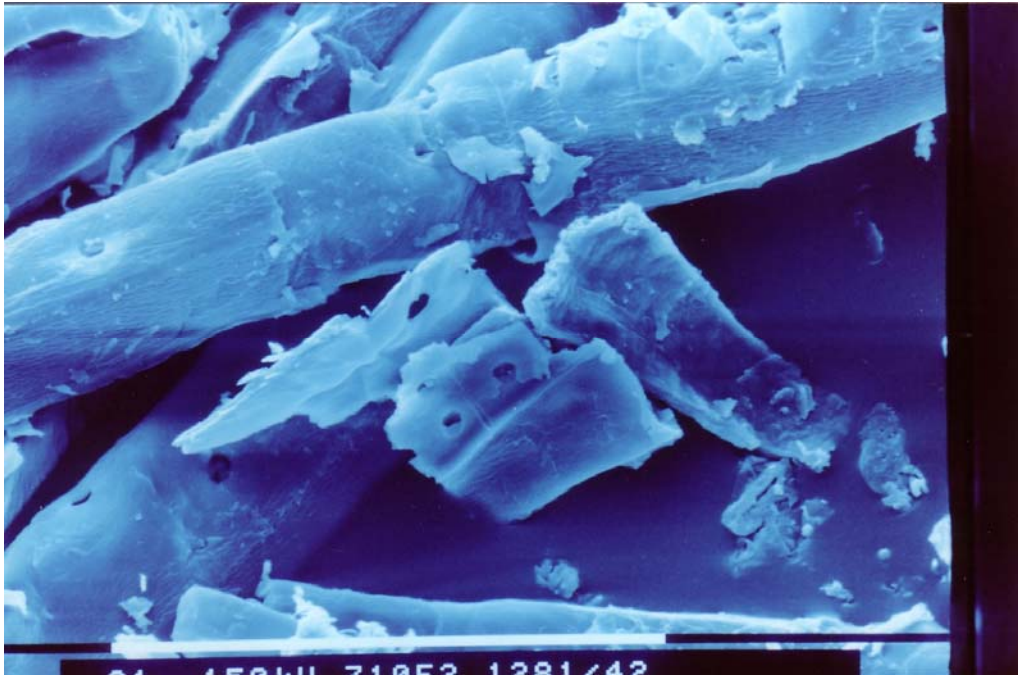
Abbildung 4-4: Graphische Darstellung der ermittelten Ligningehalte im STEICO-Faserstoff

#### 4.1.2 Ergebnisse der morphologischen Untersuchungen des Faserstoffes

Zur morphologischen Untersuchung des STEICO-Industriefaserstoffes aus Kiefernmaterial werden sowohl Aufnahmen des nativen Faserstoffes (vgl. Abbildung 4-5), wie auch des mit Harnstoff-Formaldehyd-Harz bzw. Weizenprotein beleimten Fasermaterials (vgl. Abbildung 4-6 und Abbildung 4-7) mit Hilfe eines Rasterelektronenmikroskops (REM) angefertigt.

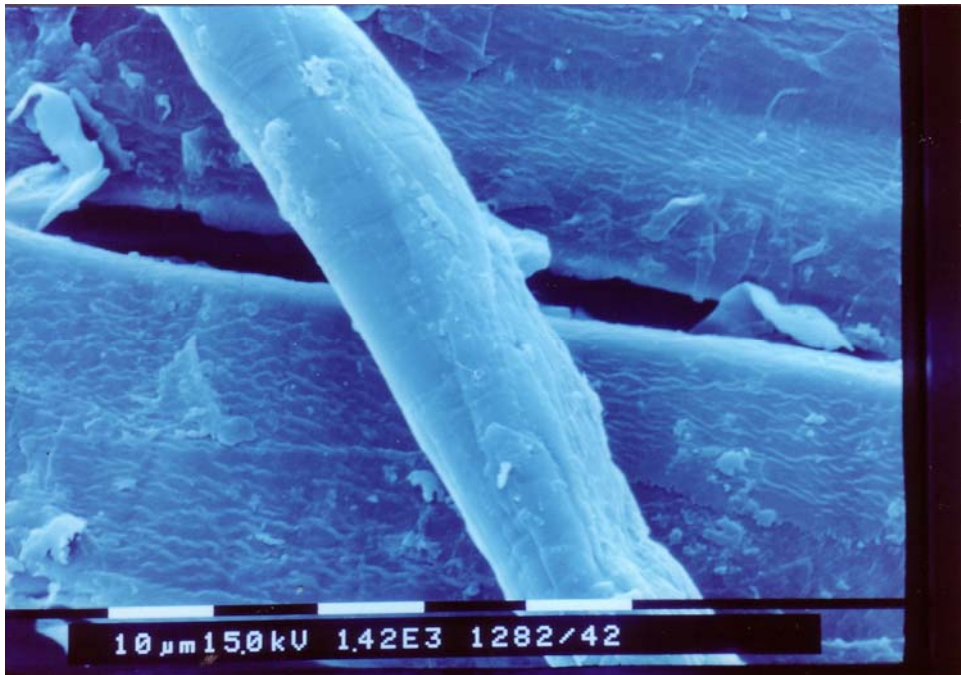
Bei Betrachtung des nativen Faserstoffes in Abbildung 4-5 sind die Folgen der thermischen Behandlung bei der Herstellung des Fasermaterials zu erkennen. Trotz der relativ milden Aufschlussbedingungen bei der Herstellung von Industriefaserstoff nach der ASPLUND-Methode (vgl. Kapitel 2.3.2) ist auf dem Bild zu erkennen, dass die Temperaturen bei der thermischen Behandlung über der Glasübergangstemperatur des Lignins (123 °C) lagen. Vorwiegend das in der Mittellamelle enthaltene Lignin ist bei diesem Herstellungsschritt plastifiziert worden, um die Fasern mit einem möglichst geringen Energieaufwand trennen zu können. Das nach dem Erkühlen erstarrte Mittellamellenlignin liegt nach dem Aufschluss noch als inaktive Kruste auf der Faseroberfläche vor. Die ebenfalls im Holz enthaltenen Cellulosefibrillen sind in den unter der Ligninkruste liegenden Cellulosekomplex eingebunden und können für mögliche Bindungen, beispielsweise bei der Herstellung von

Mitteldichten Faserplatten aus diesem Fasermaterial nicht mehr genutzt werden (KHARAZIPOUR, 1996).

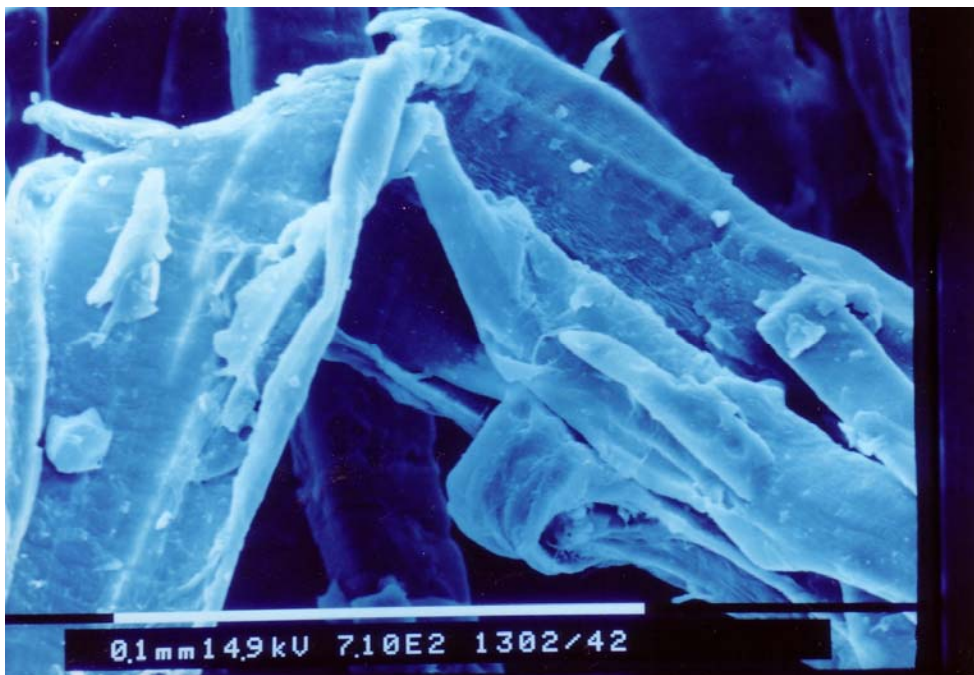


**Abbildung 4-5: REM-Aufnahme des nativen Industriefaserstoffes der Fa. STEICO, 710-fache Vergrößerung**

Bei den in Abbildung 4-6 dargestellten Aufnahmen des STEICO-Industriefaserstoffes, der mit Kauritec 407<sup>®</sup> flüssig der Fa. BASF auf der Pilot-MDF-Anlage beleimt und anschließend in der Rohrtrocknerleitung unter milden Bedingungen getrocknet wurde fällt auf, dass die beim nativen Faserstoff ersichtlichen Ligninkrusten auf dieser Aufnahme nicht mehr deutlich zu erkennen sind. Dies ist in der Tatsache begründet, dass durch eine gleichmäßige Besprühung des Fasermaterials mit einem Bindemittel sich dieser Leim auch gleichmäßig über die Fasern verteilt und die Fasern dadurch eine homogenere Oberfläche unter dem Mikroskop aufweisen. Die gleichmäßige Beleimung des Fasermaterials ist von immenser Bedeutung, da dies die späteren Haftungsstellen beim Heißpressvorgang darstellen. Je mehr Haftungsstellen vorliegen und beim Heißpressvorgang effektiv zur Bindung genutzt werden können, desto höher sind die späteren Quersugfestigkeiten der Faserplatte. Bei den auf der Aufnahme zu erkennenden, sehr kleinen Krusten auf der Faseroberfläche handelt es sich nicht um Lignin sondern um sehr geringe Mengen an Harnstoff-Formaldehyd-Harz die bereits durch die Temperaturen in der Rohrtrocknerleitung vorgehärtet sind.



**Abbildung 4-6: REM-Aufnahme von UF-Harz beleimtem und getrocknetem Fasermaterial, 1420-fache Vergrößerung**



**Abbildung 4-7: REM-Aufnahme von unverpresstem, mit Weizenprotein beleimten Faserstoff, 710-fache Vergrößerung**

Ein ähnliches Bild zeigt sich auch bei der Betrachtung des mit Weizenprotein der Fa. CERESTAR beleimten STEICO-Industriefaserstoffes unter dem Raterlektronenmikroskop (vgl. Abbildung 4-7). Auch in diesem Fall zeigt sich, dass durch die stationäre Mischerbeimung die Faseroberfläche sehr homogen wirkt, was auf die gleichmäßige Umschließung des

Fasermaterials mit dem naturnahen Bindemittel auf Weizenproteinbasis schließen lässt. Daraus ist auch zu folgern, dass das Fasermaterial auf der Pilot-MDF-Anlage im stationären Mischer (vgl. 3.2.1.1.2) sehr homogen mit dem Weizenprotein benetzt wird, was sich ebenfalls positiv auf die Anzahl der reaktiven Haftungsstellen auf dem beleimten Fasermaterial auswirkt, die beim Heißpressvorgang genutzt werden können.

### 4.1.3 Ergebnisse der analytischen Untersuchungen der Bindemittel

#### 4.1.3.1 Charakterisierung des Weizenproteins der Fa. CERESTAR

Die Charakterisierung der Hauptbestandteile des im Rahmen dieser Dissertation verwendeten naturnahen Bindemittels aus nachwachsenden Rohstoffen auf Proteinbasis, der entwickelten Weizenprotein-Suspension, erfolgte in enger Zusammenarbeit mit der Analytikabteilung der Fa. CERESTAR in Krefeld. Dabei stellt das Weizenprotein ein Nebenprodukt der Glucosesirupherstellung dar, das ganzjährig in großen Mengen durch die Verarbeitung von Weizen (*Triticum aestivum*) zu Glucosesirup, Stärke bzw. Vitalgluten anfällt.

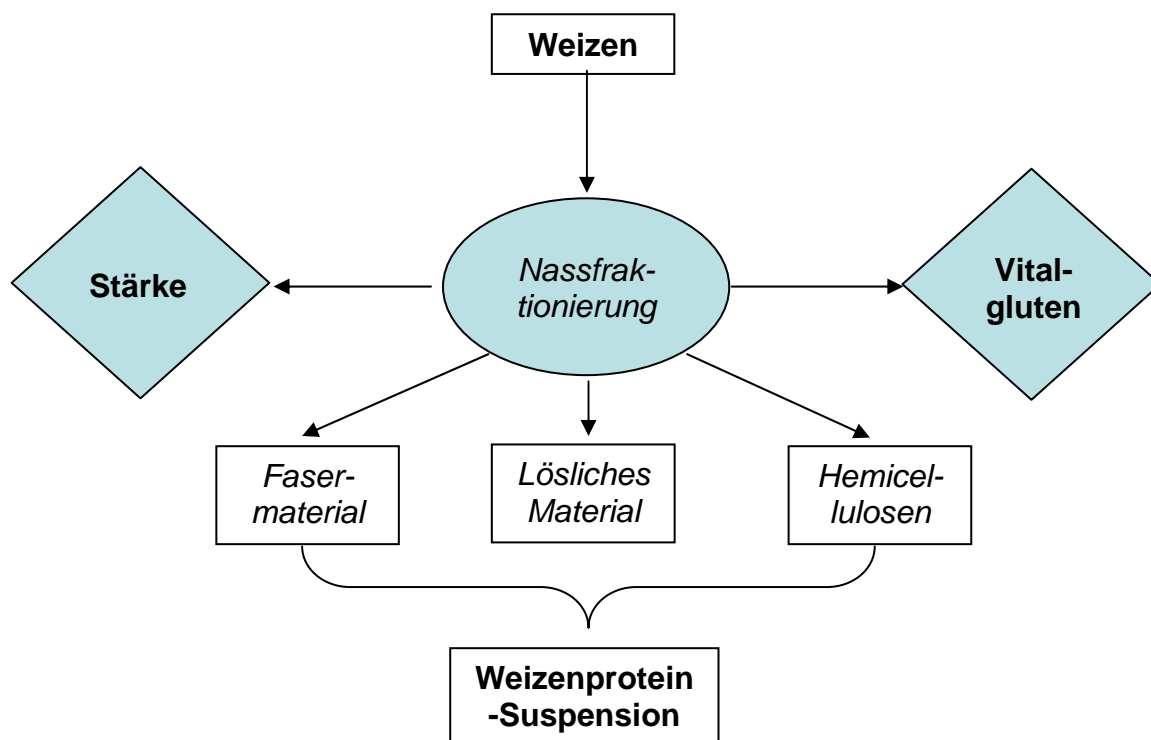


Abbildung 4-8: Entstehung des Weizenproteins bei der Gewinnung von Vitalgluten und Stärke aus *Triticum aestivum* (CERESTAR, 2004)

Dazu werden die Ähren des Weizens zunächst von den Halmen getrennt und daraufhin grob zermahlen. Anschließend werden die Ähren unter Zufuhr von Wasser weiter zermahlen. Auf

diese Weise können die gewünschten Hauptprodukte, die Stärke bzw. die Grundstoffe für die Glucosesirupherstellung unter Zufuhr von Chemikalien aus dem Rohstoff fraktioniert bzw. gefällt werden (vgl. dazu auch Abbildung 4-8). Die dabei zurückbleibende Masse, das Weizenprotein, besteht aus nicht nutzbaren bzw. nicht ausgewaschenen oder nicht gefällten Inhaltsstoffen, wie Fasern, Hemicellulosen und löslichen Stoffen. Durch die Verwendung von Chemikalien während der Gewinnung der Hauptprodukte aus dem Rohstoff verändert sich der pH-Wert des Weizenproteins.

#### 4.1.3.1.1 Ermittlung der Inhaltstoffe im Weizenprotein

Die entwickelte Weizenprotein-Suspension wird im Rahmen dieser Dissertation hinsichtlich des Feststoffgehaltes über die gesamte Projektlaufzeit optimiert. Dabei wird die anfänglich enthaltene Flüssigkeit, soweit es die technischen Voraussetzungen erlauben, auf ein Minimum reduziert. Dies geschieht durch schonende Eindampfung des Materials; jedoch ist der Grad der Eindampfung durch die maximal anwendbare Verdampfungstemperatur begrenzt, da bei zu hohen Temperaturen die Inhaltsstoffe des Weizenprotein, insbesondere die enthaltenen Proteine, geschädigt bzw. denaturiert werden können. Die sich im Laufe des Projektes geänderten Feststoffgehalte des naturnahen Bindemittels sind in Abbildung 4-9 dargestellt.

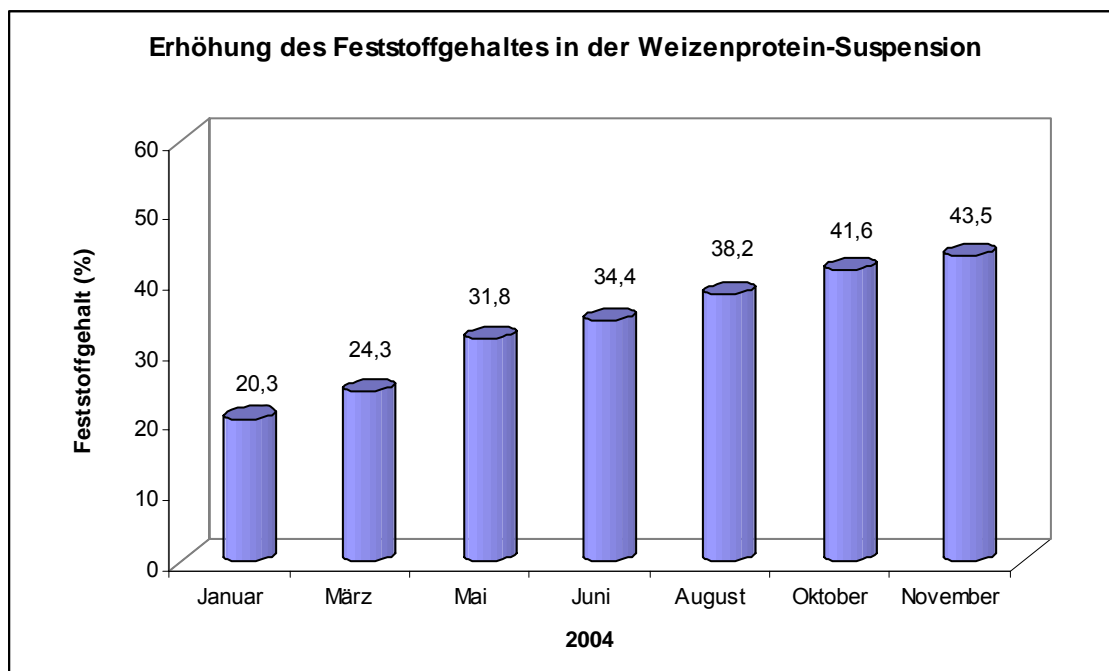


Abbildung 4-9: Veränderung des Feststoffgehaltes in der Weizenprotein-Suspension



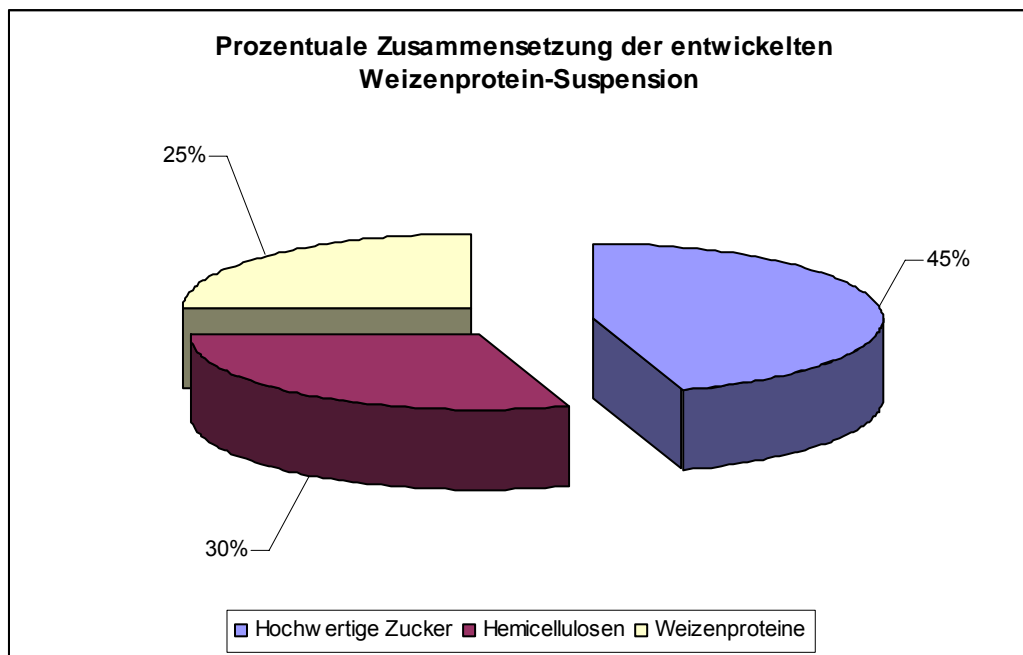
Bei der Betrachtung der Feststoffgehalte im Weizenprotein ist eine deutliche Erhöhung von anfangs 20,3 % (Januar 2004) auf 43,5 % (November 2004) festzustellen. Dabei wurde lediglich das anfänglich enthaltene Wasser in diesem Nebenprodukt der Glucosesirupherstellung verdampft. Der pH-Wert bewegt sich dabei, unabhängig vom ermittelten Feststoffgehalt, zwischen 4,5 und 4,9. Dadurch ist erstmals eine natürliche Suspension aus nachwachsenden Rohstoffen auf Weizenproteinbasis entwickelt worden, die mit einem Feststoffgehalt von 43,5 % als Bindemittel zur Herstellung von Mitteldichten Faserplatten verwendet werden kann. Der erzielte Feststoffgehalt von 43,5 % in der Weizenprotein-Suspension liegt deutlich über den Feststoffgehalten der in der Vergangenheit verwendeten Proteinleime zur Herstellung von Holzwerkstoffen im Labormaßstab.

Die Weizenprotein-Suspension mit einem Feststoffgehalt von 43,5 % und einem durchschnittlichen pH-Wert von 4,7 wurde auch zur Herstellung der in Kapitel 3.2.4 bis 3.2.6 und Kapitel 3.4.1 bis 3.4.3 beschriebenen Mitteldichten Faserplatten verwendet. Ebenfalls die in Kapitel 3.1.3.2.3 bis Kapitel 3.1.3.2.5 erläuterten Versuche zur Ermittlung der Viskositäten des nativen Weizenproteins bzw. der aus konventionellen Bindemitteln und Weizenprotein-Suspension zusammengesetzten Mischkondensate beziehen sich auf einen Feststoffgehalt von 43,5 % und einen pH-Wert von 4,7 im natürlichen Bindemittel.

Die Analyse des Weizenproteins, hinsichtlich der Zusammensetzung nach den Hauptbestandteilen, durchgeführt in Zusammenarbeit mit der Fa. CERESTAR in Krefeld, ist in Abbildung 4-10 dargestellt. Der Feststoffgehalt des Weizenproteins ist bei dieser Betrachtung nicht relevant, da sich die dargestellten prozentualen Angaben auf das Trockengewicht des zu untersuchenden Materials beziehen. Dabei ist festzustellen, dass den Hauptbestandteil, mit durchschnittlich 45 %, die hochwertigen Zucker ausmachen. Dies entspricht auch dem durch FRANKE (1997) ermittelten hohen Kohlenstoffgehalt im Weizen. Dabei handelt es sich offensichtlich um Zucker, deren Extraktion aus dem Weizenmaterial nur mit Hilfe kostenintensiver Verfahren möglich wäre. Bedingt durch höhere Herstellungskosten und eine nur geringe Ausbeute bleiben diese Stoffe im Nebenprodukt zurück und werden nicht zur Glucosesirupherstellung genutzt. Die Zucker wirken sich sowohl auf die Klebeeigenschaften des Bindemittels als auch auf die Abbauraten durch Pilze bzw. Kompostierungsmöglichkeiten durch Mikroorganismen positiv aus. Sie unterstützen beim Heißpressvorgang die entstehenden Vernetzungen des Bindemittels in der Faserplatte und dienen den Pilzen wie auch den Mikroorganismen als Nährstoffquelle. Die Zucker können sich jedoch auch negativ auf die Dickenquellung der Mitteldichten Faserplatten auswirken. Des Weiteren sind Zucker,

die beim Heißpressvorgang karamellisieren, nur noch bedingt für die Pilze als Nährstoffquelle nutzbar. Daher ist auch für die Verfügbarkeit der Zucker die Presstemperatur von entscheidender Bedeutung. Die im Weizenprotein enthaltenen Hemicellulosen sind Rückstände der zermahlenden Weizenähren und liegen größtenteils in Form von sehr kleinen Fasern vor, da diese durch die Mahlvorgänge sehr stark aufgeschlossen wurden. Die Hemicellulosen können sowohl negative als auch positive Auswirkungen bei der Verwendung des Weizenproteins als Bindemittel haben. Negativ können sich die Fasern bei der Beileimung des Fasermaterials auswirken, was unter Umständen zu einer Verstopfung der Beileimungsdüsen führen kann. Auch ist durch einen hohen Hemicellulose- wie auch Cellulosegehalt in den Holzwirkstoffen ein deutlicher Anstieg der Quellwerte dieser Werkstoffe zu erwarten, da sowohl die Cellulose als auch die Hemicellulose sehr viel Wasser aufnehmen können. Positive Auswirkungen haben diese Fasern jedoch beim Heißpressvorgang und bei den Holzabbau- bzw. Kompostierungsversuchen. Sie unterstützen, wie auch die bereits erwähnten Zucker, die beim Heißpressen entstehenden Vernetzungen innerhalb des Bindemittels bzw. zwischen dem Bindemittel und den Fasern. Auf diese Weise üben sie einen positiven Einfluss auf die späteren Quersugfestigkeiten der mit diesem Bindemittel hergestellten Mitteldichten Faserplatten aus. Des Weiteren stellen die Hemicellulosen im Bindemittel natürlich wie auch die Hemicellulosen im Faserstoff für die Bakterien bzw. Pilze einen Rohstoff dar, den sie zur Energiegewinnung zersetzen können. Der Anteil von Weizenproteinen ist mit durchschnittlich 25 % nicht so hoch, wie der nach KJELDAHL bestimmte Gesamtproteingehalt (vgl. dazu Kapitel 4.1.3.3.2 und Abbildung 4-21) im Weizenprotein. Dies ist einerseits durch produktionsbedingte Schwankungen sowie Schwankungen im Ausgangsmaterial bedingt und andererseits mit der Tatsache zu erklären, dass es sich bei den von der Analytikabteilung der Fa. CERESTAR angewandten Analysemethoden zur Bestimmung der Inhaltsstoffe um wesentlich genauere bzw. für dieses Material optimierte Verfahren handelt. Die Proteine bewirken aufgrund ihrer charakteristischen Merkmale (vgl. Kapitel 2.2.2.2.5) ein Verkleben des Bindemittels mit dem Fasermaterial unter Zuführung von Hitze und Druck. Die durch die physikalische Einwirkung des Heißpressvorgangs hervorgerufene Strukturveränderung der Proteine bewirkt, dass die Proteine dann nur noch in Form von Polypeptidketten vorliegen, deren Tertiärstruktur durch diesen Vorgang zerstört wurde (ULRICH, 2002). Diese Tatsache ermöglicht die Verwendung des Weizenproteins als Bindemittel zur Herstellung von Mitteldichten Faserplatten. Die Polypeptidketten stellen jedoch nach dem Heißpressen der Holzwirkstoffe für die

Holzerstörenden Pilze sowie die im Kompostsubstrat enthaltenen Bakterien eine bedeutende Nährstoffquelle dar.



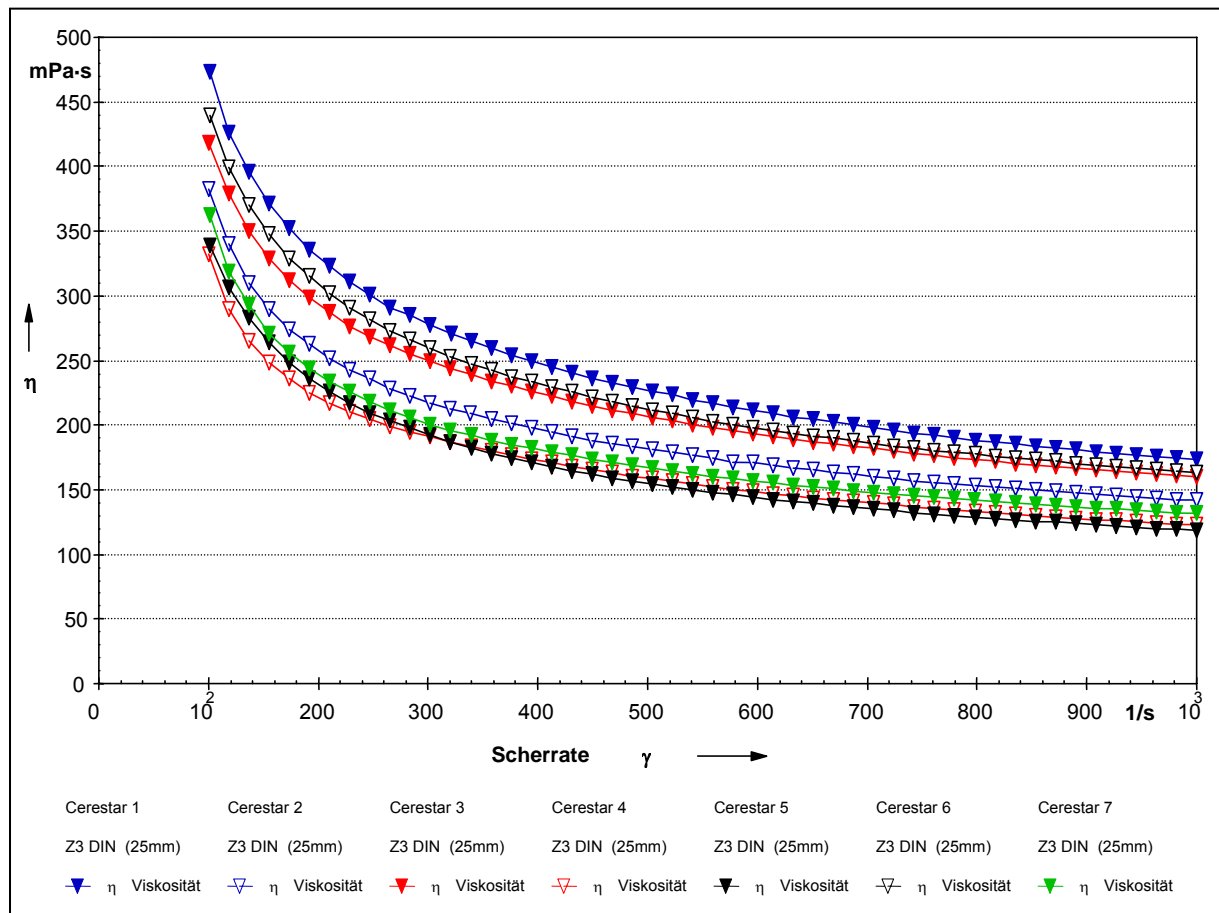
**Abbildung 4-10: Durchschnittliche prozentuale Zusammensetzung der Weizenprotein-Suspension bezogen auf Trockengewicht (CERESTAR, 2004)**

#### 4.1.3.1.2 Viskositäten des Weizenproteins aus der laufenden Produktion

Die rheologischen Ergebnisse der untersuchten Weizenproteinproben aus dem CERESTAR Werk in Barby sind in Abbildung 4-11 graphisch dargestellt. Dabei ist zu erkennen, dass die Messung der Viskositäten dieses naturnahen Bindemittels aus nachwachsenden Rohstoffen auf Weizenproteinbasis bei allen untersuchten Proben sehr homogene Ergebnisse aufweist. Die Feststoffgehalte der in Abbildung 4-11 dargestellten Viskositäten der untersuchten Weizenproteinproben waren mit Minimalwerten von 42,6 % und Maximalwerten von 44,1 % dabei recht gleichmäßig und erlauben somit eine Vergleichbarkeit der Proben.

Die durchschnittliche Viskosität, berechnet aus den in Abbildung 4-11 dargestellten Ergebnissen der rheologischen Untersuchungen, liegt bei 204 mPa·s und ist mit den Viskositäten der zurzeit bei der Herstellung von Mitteldichten Faserplatten verwendeten konventionellen Bindemitteln vergleichbar. Die Viskosität eines Bindemittels ist ein entscheidender Faktor, da aufgrund dieser rheologischen Eigenschaften die Zähflüssigkeit und somit die Besprühbarkeit des Bindemittels im Beileimungsprozess eingeschätzt werden kann. Bedingt durch die annähernd gleiche Viskosität des Weizenproteins, verglichen mit den

Viskositäten konventioneller Bindemittel, kann die Verwendung dieses natürlichen Bindemittels auf bestehenden MDF-Industrieanlagen zur Beleimung des Fasermaterials als durchaus positiv eingeschätzt werden.



**Abbildung 4-11: Viskositäten des Weizenproteins aus der Produktion im CERESTAR Werk/Barby**

Für eine genauere Einschätzung zur Verwendung des Weizenproteins auf MDF-Industrieanlagen müssen allerdings auch die Viskositäten des Bindemittels kombiniert mit Zuschlagstoffen wie beispielsweise Hydrophobierungsmitteln, ermittelt werden. Dazu werden in Kapitel 4.1.3.2.5 die gemessenen Viskositäten der im Rahmen dieser Dissertation verwendeten Leimflotten, bestehend aus Weizenprotein und den Hydrophobierungsmitteln HYDROWAX 138 und HYDROWAX 730 der Fa. SASOL in industriüblichen Dosierungen, gesondert dargestellt.

### 4.1.3.2 Viskositäten der untersuchten Bindemittel und Leimflotten

#### 4.1.3.2.1 Viskositäten des Harnstoff-Formaldehyd-Harz-Leims Kauritec 407<sup>®</sup> flüssig der Fa. BASF

Die ermittelten rheologischen Eigenschaften des im Rahmen dieser Dissertation verwendeten UF-Harzes Kauritec 407<sup>®</sup> flüssig der Fa. BASF mit einem Feststoffgehalt von 66 % sind in Abbildung 4-12 dargestellt. Die hier dargestellten Leimflotten sind identisch mit denen, die zur Herstellung der UF-Harz gebundenen Referenzfaserplatten (vgl. 3.2.2) verwendet wurden. Es sind sowohl die Viskositäten von reinem Harnstoff-Formaldehyd-Harz wie auch von UF-Harz mit Paraffinzugaben abgebildet. Alle untersuchten Leimflotten zeigen dabei ein scherverdünnendes Verhalten, d.h. mit steigender Scherrate sinkt die Viskosität.

Die in diesen Untersuchungen ermittelte durchschnittliche Viskosität des reinen Harnstoff-Formaldehyd-Harzes von durchschnittlich 200 mPa·s entspricht der Viskosität, die auch im technischen Merkblatt des UF-Harzes Kauritec 407<sup>®</sup> flüssig aufgeführt ist (BASF, 2002).

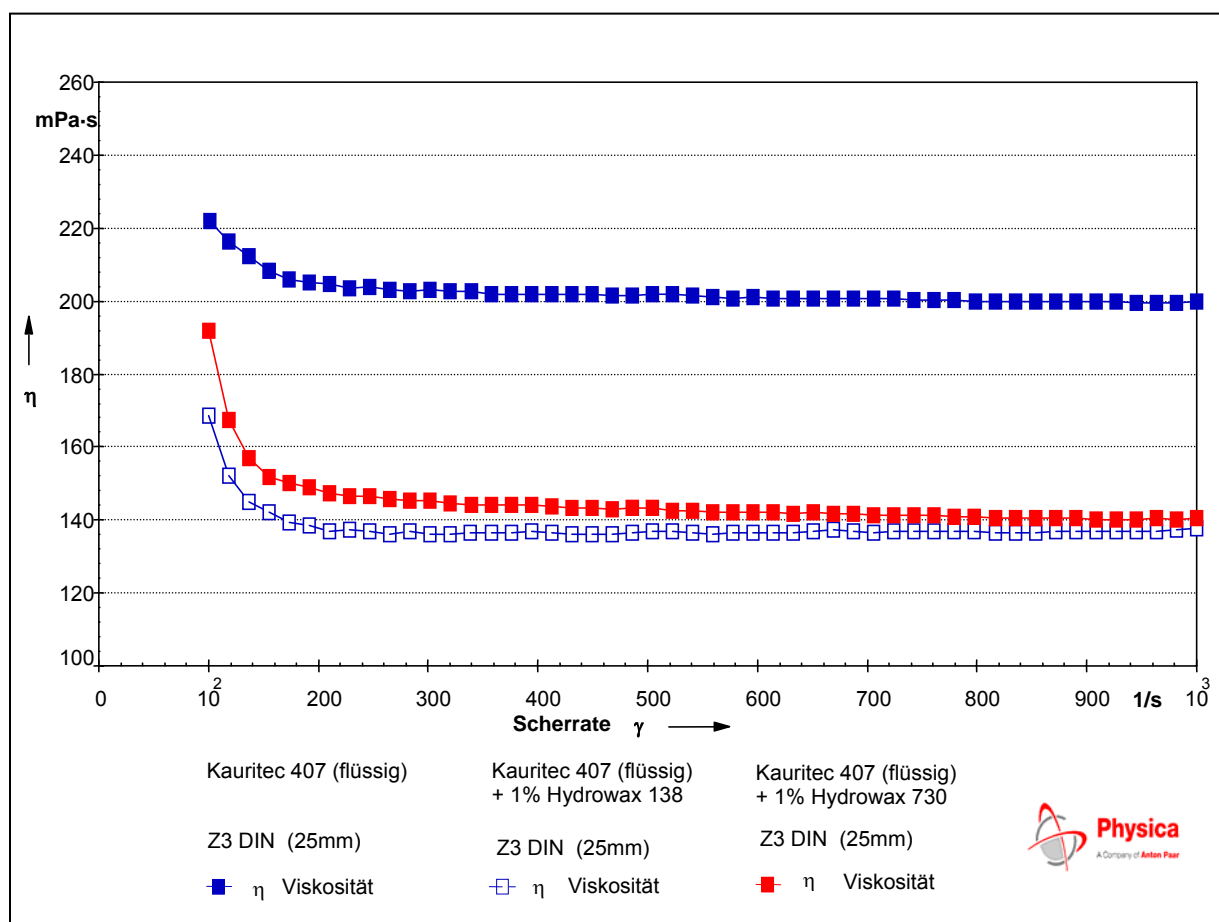


Abbildung 4-12: Viskositäten der BASF Bindemittels Kauritec<sup>®</sup> 407<sup>®</sup> flüssig ohne Zugabe von Paraffin und mit 1% HYDROWAX 138 bzw. 1 % HYDROWAX 730 der Fa. SASOL

Durch die Zugabe von 1 % HYDROWAX 138 der Fa. SASOL zum UF-Harz wird die Viskosität der Leimflotte deutlich gesenkt. Die durchschnittliche Viskosität dieser Leimflotte liegt bei gemessenen 140 mPa·s. Durch die Viskositätsverringeringung kann diese Bindemittelflotte noch leichter und gleichmäßiger auf das Fasermaterial aufgesprüht werden, als der reine UF-Harz.

Bei Zugabe von 1 % HYDROWAX 730 der Fa. SASOL zum Bindemittel Kauritec 407<sup>®</sup> flüssig ist ebenfalls eine Viskositätsverringeringung der Leimflotte durch das hinzugefügte Hydrophobierungsmittel zu erkennen (vgl. Abbildung 4-12). Die Leimflotte, bestehend aus Kauritec 407<sup>®</sup> flüssig und HYDROWAX 730 besitzt eine Viskosität von durchschnittlich 145 mPa·s und liegt damit leicht über der Viskosität der Leimflotte bestehend aus UF-Harz und HYDROWAX 138, jedoch deutlich unter der Viskosität des reinen Harnstoff-Formaldehyd-Harzes.

Die durch die Zugabe von Hydrophobierungsmitteln bewirkte Viskositätssenkung ist bei allen Leimflotten von Vorteil, da das Harnstoff-Formaldehyd-Harz bei der industriellen Herstellung von Mitteldichten Faserplatten nahezu ausschließlich im Kombination mit Paraffinen verarbeitet wird und durch die Viskositätsverringeringung der Leimflotten eine gleichmäßigere und leichtere Besprühung des Fasermaterials beim Herstellungsprozess gewährleistet wird.

#### 4.1.3.2.2 Viskositäten des Phenol-Formaldehyd-Harz Bindemittels 1808 HW der Fa. BAKELITE

Das Phenol-Formaldehyd-Harz vom Typ 1808 HW der Fa. BAKELITE, mit einem Feststoffgehalt von 29 %, weist hinsichtlich der rheologischen Untersuchungen eine sehr geringe Viskosität auf (vgl. Abbildung 4-13). Die Viskositätskurven zeigen, dass es sich hierbei um ein konventionelles Bindemittel mit einem geringen scherverdünnendem Verhalten handelt. Bereits im Bereich von 100 bis 160 s<sup>-1</sup> pro Minute fällt die Viskosität von 24 auf 17 mPa·s ab und pendelt sich danach im Bereich von 19 mPa·s ein. Das PF-Harz, das auch zur Herstellung der in dieser Arbeit angefertigten PF-Harz gebundenen MDF-Platten im Pilotmaßstab verwendet wurde (vgl. Kapitel 3.2.3 und 3.2.5), hat ohne Zusätze von Paraffin eine durchschnittliche Viskosität von lediglich 19 mPa·s im Scherbereich von 100 bis 1000 s<sup>-1</sup> pro Minute. Diese gemessenen Viskositäten der im Rahmen dieser Dissertation untersuchten PF-Harz Proben liegen unter den im technischen Merkblatt aufgelisteten Herstellerangaben (BAKELITE AG, 2003).

Durch die Zugabe von 1 % HYDROWAX 138 der Fa. SASOL zur PF-Harz Leimflotte wird die Viskosität leicht angehoben; die Viskosität bei  $100 \text{ s}^{-1}$  beträgt ca.  $34,5 \text{ mPa}\cdot\text{s}$  und fällt mit steigender Scherrate auf durchschnittlich  $19,3 \text{ mPa}\cdot\text{s}$  ab.

Die Zugabe von 1 % HYDROWAX 730 der Fa. SASOL zum Phenol-Formaldehyd-Harz hat eine Viskositätssenkende Wirkung auf die Bindemittelflotte im Verlauf der rheologischen Untersuchung zur Folge. Die Viskosität dieser Bindemittelflotte liegt zu Beginn der Messung bei  $100 \text{ s}^{-1}$  bei  $30 \text{ mPa}\cdot\text{s}$  und sinkt dann mit steigender Scherrate auf durchschnittlich  $14,8 \text{ mPa}\cdot\text{s}$  ab.

Da die erzielten Viskositäten des Phenol-Formaldehyd-Harzes von Typ 1808 der Fa. BAKELITE sehr nahe an der für den Beileimungsprozess optimalen Viskosität von  $0 \text{ mPa}\cdot\text{s}$  (Wasser) liegen, handelt es sich hierbei offensichtlich um ein technisch sehr weit entwickeltes Bindemittel, mit dem eine optimale Beileimung des Fasermaterials gewährleistet wird.

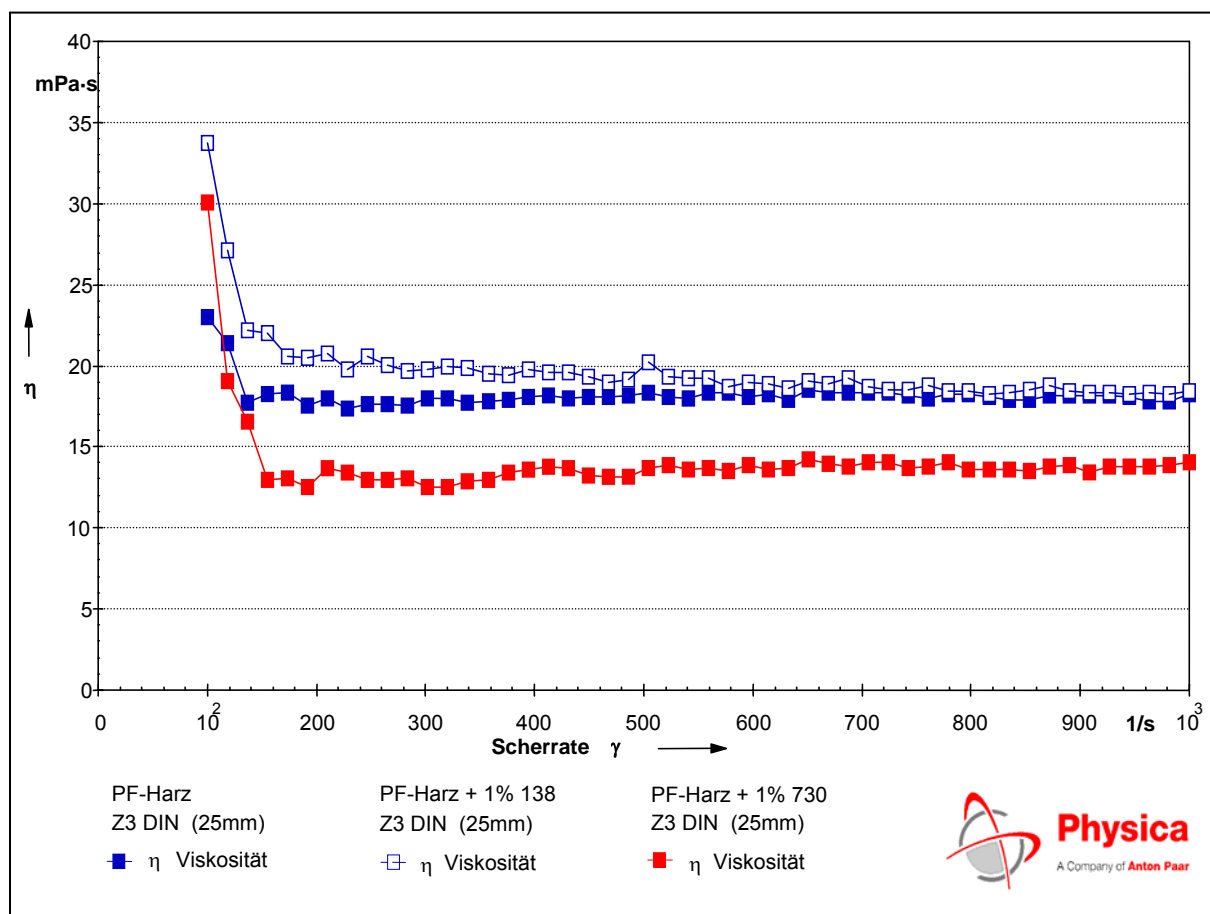


Abbildung 4-13: Viskositäten des PF-Harzes 1808 HW der Fa. BAKELITE ohne Zugabestoffe und mit 1 % HYDROWAX 138 bzw. 1 % HYDROWAX 730

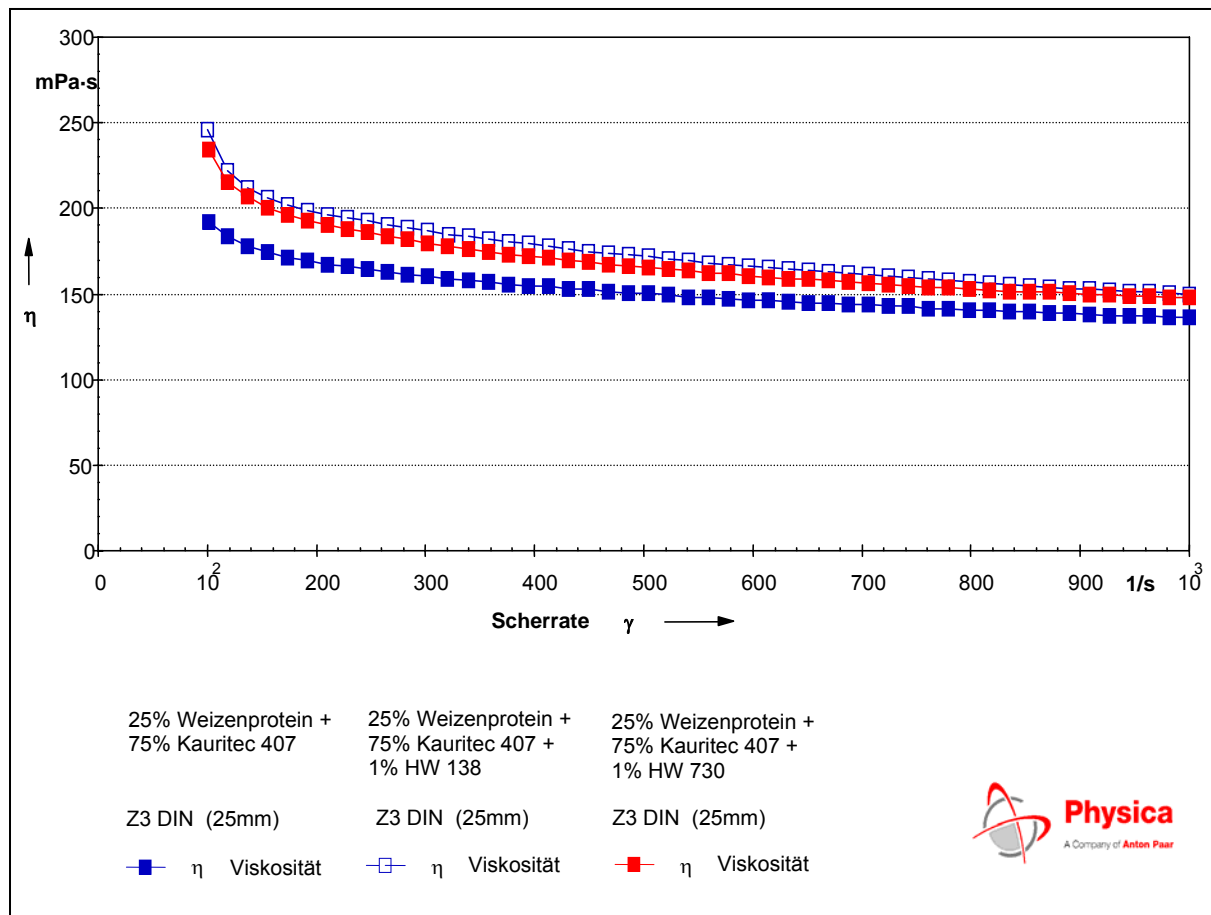
#### 4.1.3.2.3 Viskositäten der UF-Harz/Weizenprotein Bindemittel

Die Viskositäten der unterschiedlichen Mischkondensate, bestehend aus Kauritec 407<sup>®</sup> flüssig der Fa. BASF und Weizenproteinbindemittel, die zur Herstellung der UF/WP gebundenen Mitteldichten Faserplatten verwendet wurden (vgl. Kapitel 3.2.4), sind in Abbildung 4-14 bis Abbildung 4-16 graphisch dargestellt. Dabei wurden die Viskositäten der Mischkondensate in den Mengenverhältnissen 75:25, 50:50 und 25:75, jeweils UF-Harz zu Weizenprotein, mit und ohne Paraffinzugabe ermittelt.

Die Viskositätskurven der Mischkondensatleimflotten im Verhältnis 75:25 (UF/WP) zeigen alle ein scherverdünnendes Verhalten, d.h. die Viskositäten verringern sich mit zunehmender Scherrate. Dabei ist zu erkennen, dass die Viskositäten zu Beginn der Messungen relativ schnell aufgrund der veränderten Scherraten sinken. Die Viskositätskurven dieses Mischkondensats verlaufen nahezu parallel (vgl. Abbildung 4-14). Ohne die Zugabe von Paraffinen zu diesem Mischkondensat lässt sich eine durchschnittliche Viskosität von 150 mPa·s erzielen. Aufgrund des höheren UF-Harz-Anteils in diesem Mischkondensat wirkt sich die Viskosität des Harnstoff-Formaldehyd-Harzes stärker aus, so dass bereits die Anfangsviskosität von 190 mPa·s bei einer Scherrate von 100 s<sup>-1</sup> recht gering ausfällt.

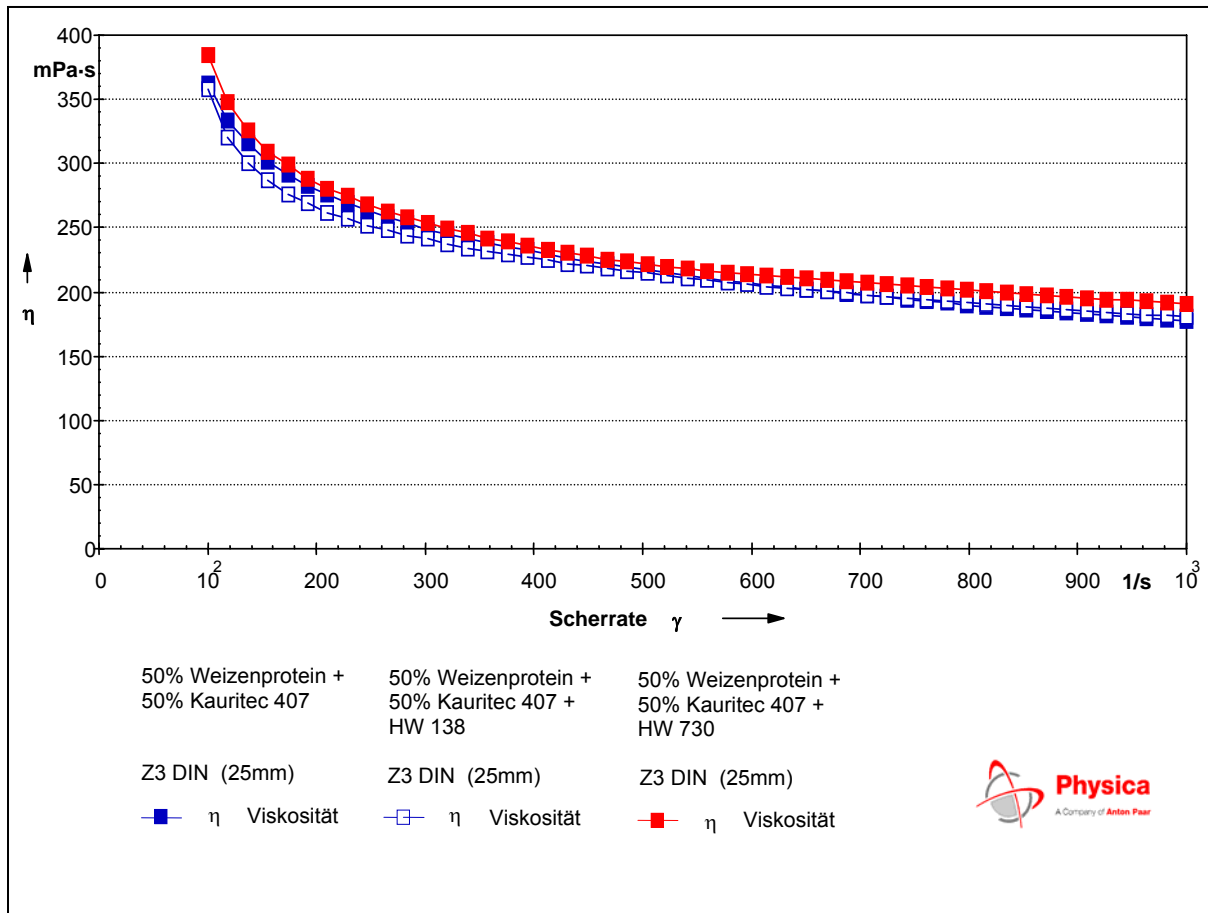
Bei Zugabe der Paraffine HYDROWAX 138 bzw. HYDROWAX 730 der Fa. SASOL zum Mischkondensat ist in beiden Fällen eine Viskositätserhöhung beider Leimflotten festzustellen. Dabei wirkt sich die Zugabe von 1 % HYDROWAX 138 noch etwas Viskositätserhöhender aus als die Zugabe von 1 % HYDROWAX 730. Im Durchschnitt ergeben sich Viskositäten von 170 mPa·s für das Mischkondensat mit 1 % HYDROWAX 730 und 175 mPa·s für das Mischkondensat mit 1 % HYDROWAX 138. Bei der abschließenden Scherrate der Viskositätsmessungen von 1000 s<sup>-1</sup> fallen die Viskositäten mit 155 mPa·s dieser beiden, mit Hydrophobierungsmitteln versetzten Leimflotten allerdings gleich aus, so dass aufgrund der rheologischen Eigenschaften dieser Leimflotten sowohl die Verwendung von HYDROWAX 138 als auch von HYDROWAX 730 als geeignet erscheint.





**Abbildung 4-14: Viskositäten der UF-Harz/WP Mischkondensate (75/25) mit HYDROWAX 138 und HYDROWAX 730**

Bei einem Mengenverhältnis der Komponenten Kauritec 407<sup>®</sup> flüssig der Fa. BASF und der Weizenprotein-Suspension von 50:50 im Mischkondensat, dargestellt in Abbildung 4-15, zeigt sich ein ähnlicher Verlauf der Viskositätskurven wie beim Mischkondensat 75:25 (UF/WP). Die Leimflotten zeigen ebenfalls alle ein scherverdünnendes Verhalten, allerdings sind die Viskositäten durch den höheren Weizenproteinanteil bereits zu Beginn der Messungen höher. Die Kurvenverläufe sind recht parallel, nahezu deckungsgleich, und zeigen keine großen Unterschiede hinsichtlich des reinen Mischkondensats bzw. des Mischkondensats in Kombination mit den verwendeten Paraffindispersionen. Aufgrund der Messungen kann bei diesen Mischkondensatleimflotten von einer durchschnittlichen Viskosität von ca. 210 mPa·s ausgegangen werden. Die zuvor festgestellten Viskositätserhöhenden bzw. Viskositätsverringenden Auswirkungen der verwendeten Paraffine HYDROWAX 138 und HYDROWAX 730 der Fa. SASOL konnten bei diesem Mischungsverhältnis nicht signifikant gemessen werden.



**Abbildung 4-15: Viskositäten der UF-Harz/WP Mischkondensate (50/50) mit HYDROWAX 138 und HYDROWAX 730**

Auch die Viskositätskurven des Mischkondensats, bestehend aus 25 % Harnstoff-Formaldehyd-Harz und 75 % Weizenprotein-Suspension, zeigen ebenfalls sehr parallele und auch nahezu deckungsgleiche Verläufe (vgl. dazu Abbildung 4-16). Dabei weisen alle Leimflotten ein scherverdünnendes Verhalten auf. Die Viskositäten sinken in allen Fällen durch eine Erhöhung der Scherrate.

Das Mischkondensat 25:75 ohne Paraffinzugabe hat eine durchschnittliche Viskosität von 275 mPa·s bei einer Scherrate von  $500 \text{ s}^{-1}$ . Die 1 %ige Zugabe der beiden im Rahmen dieser Dissertation verwendeten Paraffine HYDROWAX 138 bzw. HYDROWAX 730 der Fa. SASOL hat keine signifikanten Auswirkungen auf die Viskositäten des Mischkondensats im Verhältnis 25:75 (UF/WP). Auch unter Zugabe von Hydrophobierungsmitteln konnte eine durchschnittliche Viskosität von 275 mPa·s bei einer Scherrate von  $500 \text{ s}^{-1}$  gemessen werden. Daher kann keine der beiden verwendeten Paraffindispersionen in Kombination mit diesem Mischkondensat (25/75), begründet in den Ergebnissen der rheologischen Untersuchungen, als besonders vorteilhaft bezeichnet werden. Die Viskosität dieses Mischkondensats von 275

mPa·s ist höher als die des UF-Harzes bei einer vergleichbaren Scherrate, allerdings spricht aufgrund der gemessenen Viskosität nichts gegen die Verwendung dieses Mischkondensats auf bestehenden MDF-Industrieanlagen. Die Leimflotte lässt sich in Form dieses Mischkondensats ohne zusätzlichen Aufwand gleichmäßig auf das Fasermaterial, wie auch bereits bei der Herstellung der MDF-Platten im Pilotmaßstab, aufgetragen.

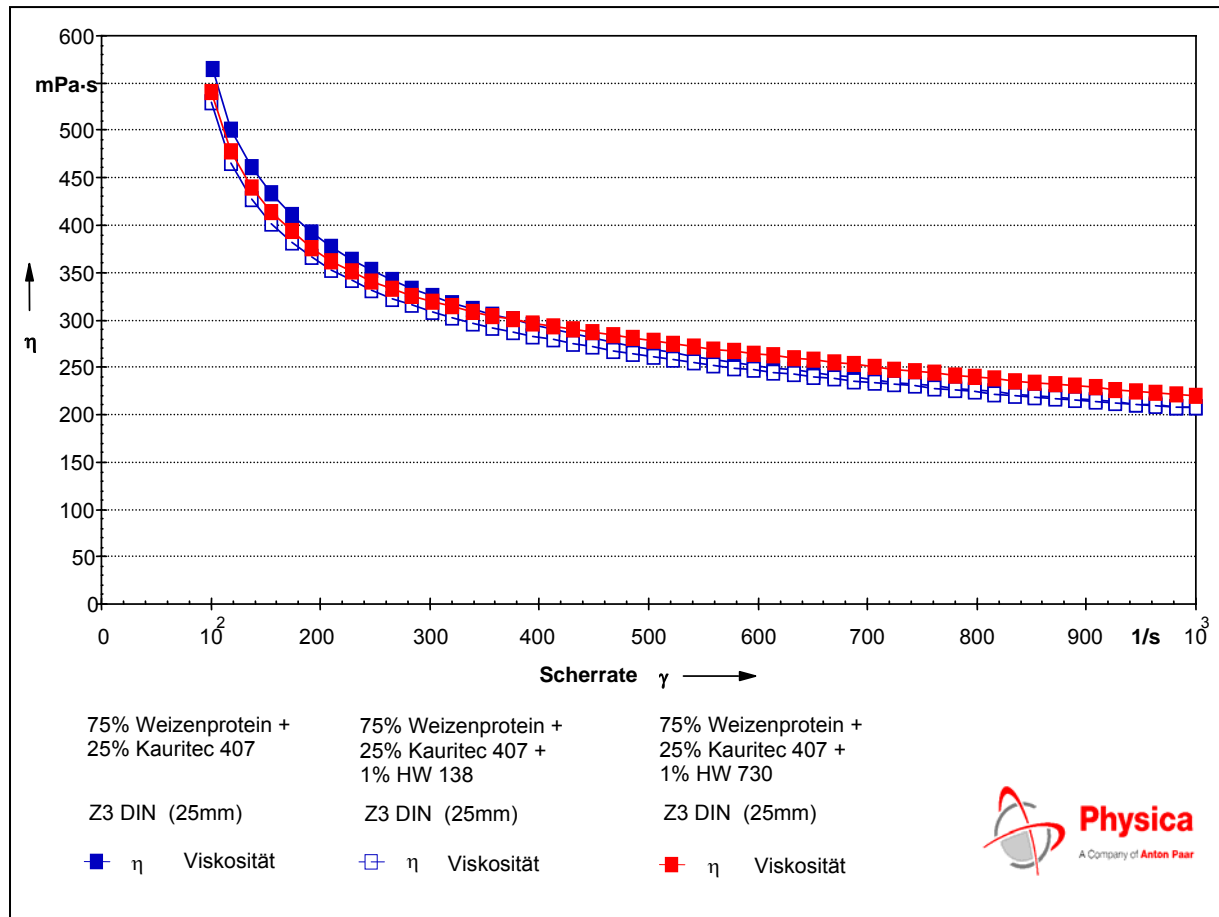
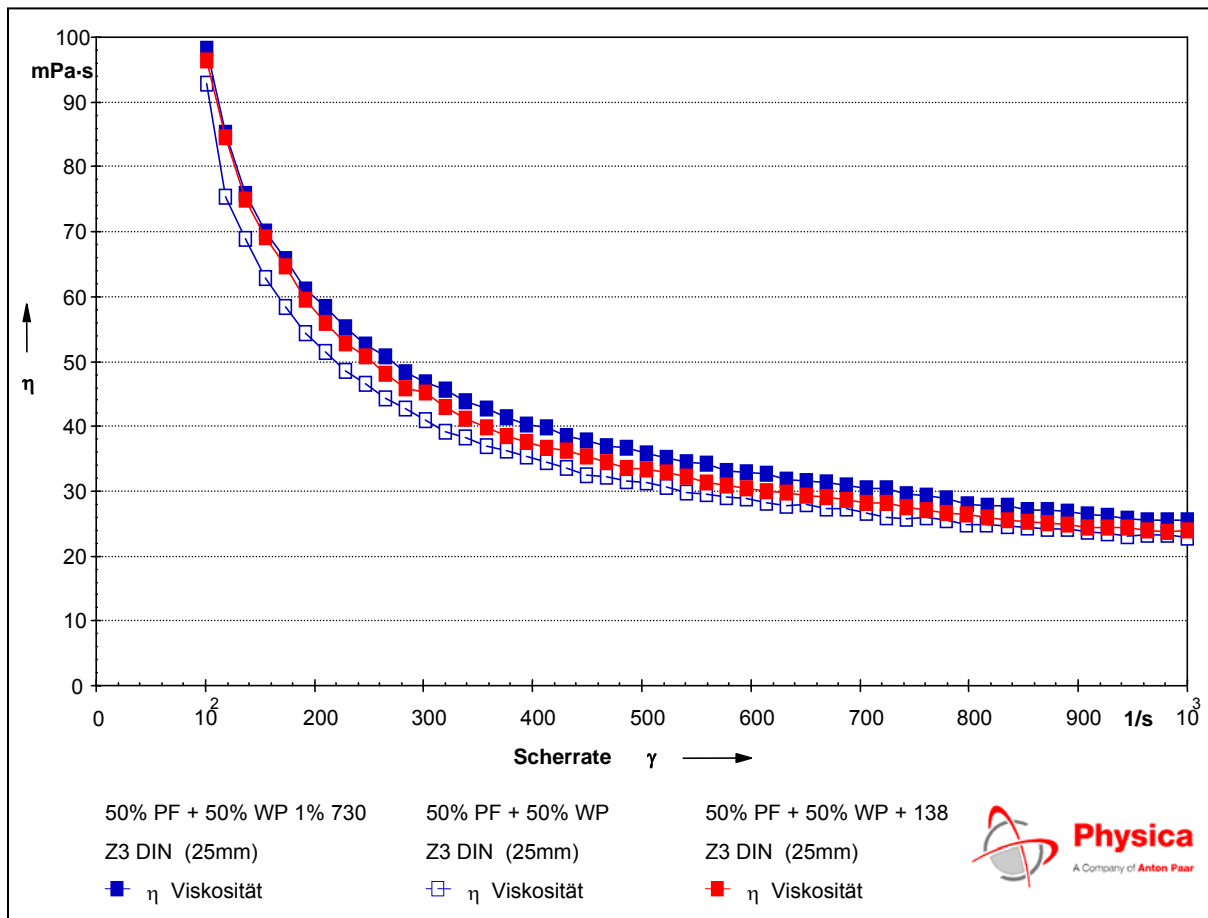


Abbildung 4-16: Viskositäten der UF-Harz/Weizenprotein Mischkondensate (25/75) mit HYDROWAX 138 und HYDROWAX 730

#### 4.1.3.2.4 Viskositäten der PF-Harz/Weizenprotein Bindemittel

Die Viskositäten des Mischkondensats, bestehend aus Phenol-Formaldehyd-Harz und Weizenprotein, im Mengenverhältnis 72:25 (PF/WP), das zur Anfertigung der Mitteldichten Faserplatten verwendet wurde (vgl. Kapitel 3.2.5) konnten mit Hilfe des eingesetzten Viskosimeters nicht ermittelt werden, da es während der Messung, bedingt durch die steigende Scherrate zur Ausflockung des Weizenproteins im Mischkondensat kam. Da die Scherkräfte bei der Viskositätsbestimmung höher sind als beim Anrühren der Leimflotte kam

es nur bei der Viskositätsbestimmung zum Ausflocken des Weizenproteins und nicht beim Anrühren der Leimflotten.

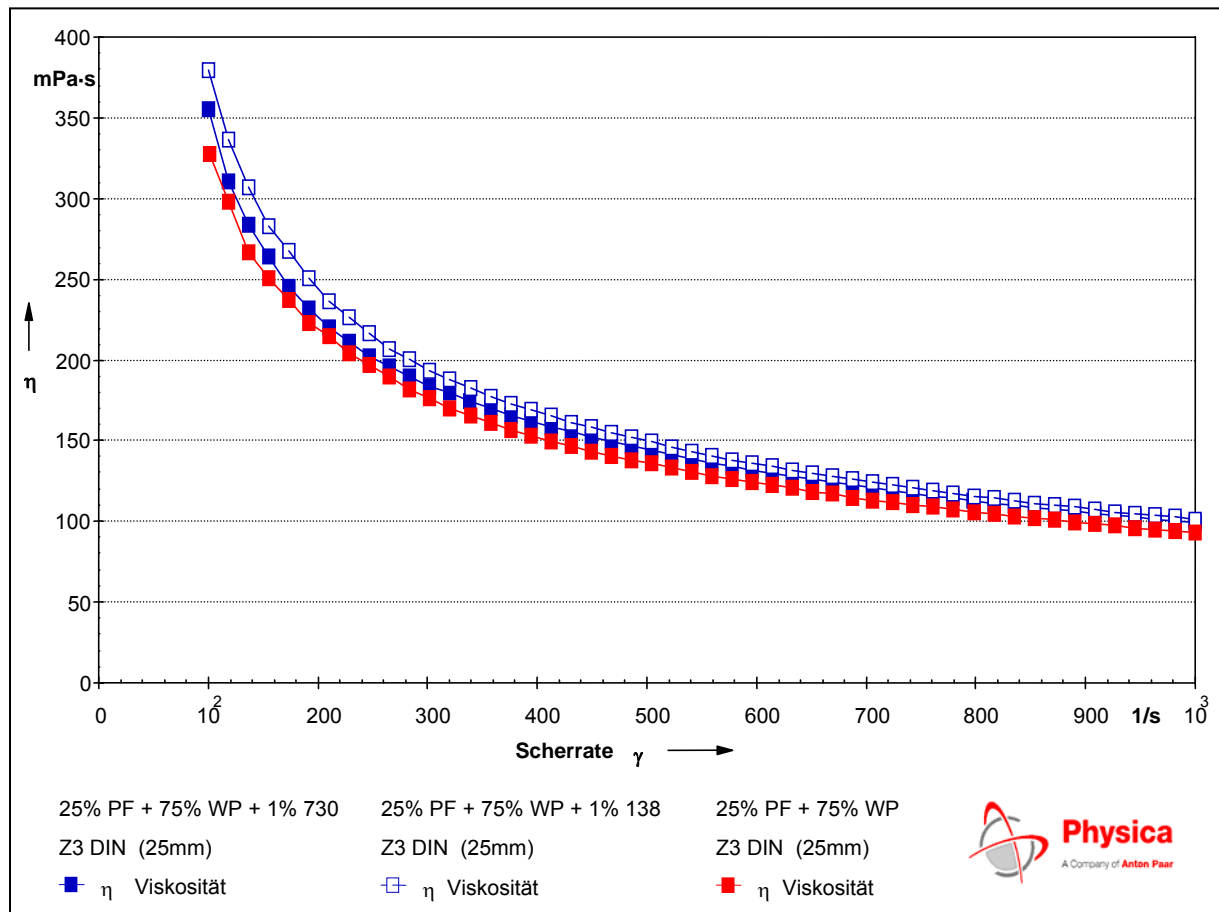


**Abbildung 4-17: Viskositäten der PF-Harz/Weizenprotein Mischkondensate (50/50) mit HYDROWAX 138 und HYDROWAX 730**

Im Mischungsverhältnis 50:50 der beiden Mischkondensatkomponenten PF-Harz und Weizenprotein konnten die Viskositäten dieser Leimflotte allein, sowie in Kombination mit den Paraffinen HYDROWAX 138 und HYDROWAX 730 der Fa. SASOL, ermittelt werden (vgl. Abbildung 4-17). Die Viskositätskurven zeigen, dass es sich auch in diesem Fall um ein Mischkondensat mit scherverdünnendem Verhalten handelt. Die Viskositäten des Mischkondensats PF/WP (50/50) fallen jedoch langsamer und über den gesamten Messvorgang konstanter ab im Vergleich zum reinen Phenol-Formaldehyd-Harz. Ohne Paraffine lässt sich eine durchschnittliche Viskosität des Mischkondensats von 35 bis 40 mPa·s berechnen. Entgegen zu den Beobachtungen beim reinen PF-Harz fällt auf, dass sowohl durch die 1 %ige Zugabe von HYDROWAX 138 als auch durch die 1 %ige Zugabe von HYDROWAX 730 eine Viskositätssenkende Wirkung der Paraffine bei diesem Mischkondensat festgestellt werden kann. Die durchschnittlichen Viskositäten dieser Leimflotten unter Zugabe

von Paraffinen liegen im Bereich von 30 bis 35 mPa·s und sind damit ebenfalls noch sehr niedrig im Vergleich zu den Viskositäten der Mischkondensate, die aus Harnstoff-Formaldehyd-Harz und Weizenproteinbindemittel (vgl. Kapitel 4.1.3.2.3) zur Herstellung von Mitteldichten Faserplatten im Rahmen dieser Dissertation verwendet wurden.

Beim Mischungsverhältnis von 25:75 der Komponenten PF-Harz und Weizenprotein kann anhand der Viskositäten dieses Mischkondensats deutlich der Einfluss des erhöhten Weizenproteinanteils festgestellt werden (vgl. Abbildung 4-18). Die Viskositätskurven zeigen bei der reinen Mischkondensatflotte wie auch unter Verwendung von Paraffinen ein scherverdünnendes Verhalten; jedoch ist ein Anstieg der Viskosität bei der reinen Mischkondensatflotte auf durchschnittlich 150 mPa·s, im Vergleich zu den Viskositäten der anderen PF/WP Mischkondensate, zu erkennen.



**Abbildung 4-18: Viskositäten der PF-Harz/Weizenprotein Mischkondensate (25/75) mit HYDROWAX 138 und HYDROWAX 730**

Die 1 %ige Zugabe des Paraffins HYDROWAX 138 der Fa. SASOL zum Mischkondensat wirkt sich leicht Viskositätserhöhend aus. Diese Leimflotte weist im Vergleich zum reinen Mischkondensat im Verhältnis 25:75 (PF/WP) eine durchschnittliche Viskosität von 155 bis

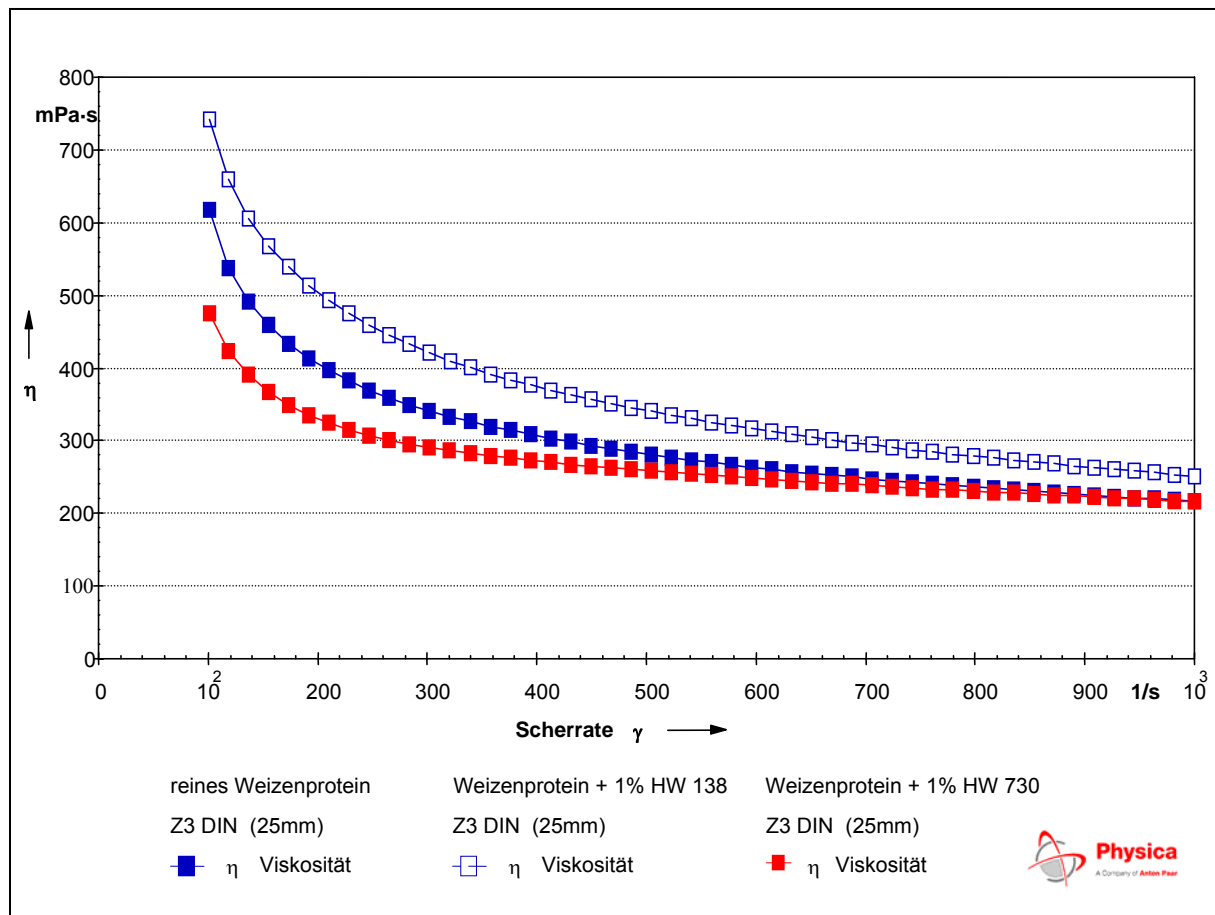
160 mPa·s auf. Durch die Zugabe von 1 % HydroWax 730 konnte die Viskosität der Leimflotte leicht abgesenkt werden. Diese Leimflotte hat eine durchschnittliche Viskosität von 140 bis 145 mPa·s.

Die Ergebnisse dieser rheologischen Untersuchungen der Mischkondensate, bestehend aus Phenol-Formaldehyd-Harz von Typ 1808 HW der Fa. BAKELITE und der im Rahmen dieses Forschungsvorhabens entwickelten Weizenprotein-Suspension, zeigen, dass eine Verwendung dieser beiden Komponenten in unterschiedlichen Mischungsverhältnissen als Leimflotte zur Herstellung von Mitteldichten Faserplatten aufgrund der erzielten Viskositäten als geeignet erscheint.

#### 4.1.3.2.5 Viskosität der Weizenprotein-Suspension

Die Viskositäten der Weizenprotein-Suspension mit einem Feststoffgehalt von 43,5 % sind in Abbildung 4-19 graphisch dargestellt. Dabei handelt es sich sowohl um das native Weizenprotein als auch um Leimflotten aus Weizenprotein und Paraffinen. Es werden genau die Leimflotten untersucht, die auch zur Herstellung der Weizenprotein gebundenen Mitteldichten Faserplatten im Pilotmaßstab verwendet wurden (vgl. Kapitel 3.2.6). Die durchschnittliche Viskosität des Weizenproteins ohne Zugabe von Paraffindispersionen liegt bei ca. 260 mPa·s. Die Viskosität fällt zunächst auf 350 mPa·s bei einer Scherrate von 280 s<sup>-1</sup> bis zuletzt auf 220 mPa·s bei der maximalen Scherrate von 1000 s<sup>-1</sup>.

Bei Zugabe von 1 % HYDROWAX 138 der Fa. SASOL zum Weizenprotein ist eine leichte Viskositätserhöhung festzustellen, verglichen mit dem nativen Weizenprotein. Diese Leimflotte besitzt mit einem gemessenen Wert von 748 mPa·s bei einer Scherrate von 100 s<sup>-1</sup> die höchste Anfangsviskosität in dieser Versuchsserie. Sie fällt mit steigender Scherrate langsam auf zunächst 350 mPa·s bei 500 s<sup>-1</sup> ab und schließt die Messung mit einer durchschnittlichen Viskosität von 250 mPa·s bei einer Scherrate von 1000 s<sup>-1</sup> ab. Durch die Zugabe von 1 % HYDROWAX 730 der Fa. SASOL zum Weizenprotein ist eine Viskositätsverringering durch die Paraffindispersion zu erkennen (vgl. Abbildung 4-19). Die Viskositätsmessung dieser Leimflotte startet mit der geringsten Viskosität von 476 mPa·s bei einer Scherrate von 100 s<sup>-1</sup>. Die Viskosität sinkt dann im Laufe der Messung mit steigender Scherrate auf durchschnittlich 220 mPa·s bei 1000 s<sup>-1</sup> ab und erreicht den gleichen Wert wie das native Weizenprotein.



**Abbildung 4-19: Viskositäten des Weizenproteins der Fa. CERESTAR ohne Paraffine und mit 1 % HYDROWAX 138 bzw. 1 % HYDROWAX 730**

Abschließend lässt sich über die Viskositäten der entwickelten Weizenprotein-Suspension aussagen, dass die Messungen in dieser Untersuchung den gemessenen Viskositäten des Weizenproteins aus der laufenden Produktion entsprechen (vgl. Abbildung 4-11). Die Beimischung von industriüblichen Paraffindispersionen zur Leimflotte wirkt sich im Fall einer 1 %igen Zugabe von HYDROWAX 138 Viskositätserhöhend aus, so dass das Hydrophobierungsmittel HYDROWAX 730 unter rein rheologischen Gesichtspunkten als geeigneter für die Herstellung von Mitteldichten Faserplatten erscheint, da es sich Viskositätssenkend auf das Weizenprotein auswirkt. Die bei der Weizenprotein-Suspension erzielten Viskositäten zeigen, dass alle Leimflotten ein scherverdünnendes Verhalten aufweisen. Die Viskositäten dieser Leimflotten sprechen nicht gegen eine Verwendung auf industriellen Anlagen zur Herstellung von Mitteldichten Faserplatten. Auch bei einer industriellen Anwendung wird sich das Weizenprotein aller Voraussicht nach, wie auch bereits bei der Herstellung der MDF-Platten im Pilotmaßstab, leicht und gleichmäßig auf das Fasermaterial besprühen lassen.

### 4.1.3.3 Stickstoffgehalte der untersuchten Bindemittel

#### 4.1.3.3.1 Stickstoffgehalte des Harnstoff-Formaldehyd-Harzes Kauritec 407<sup>®</sup> flüssig der Fa. BASF

Die Titrationsergebnisse der mit dem Harnstoff-Formaldehyd-Harz Kauritec 407<sup>®</sup> flüssig der Fa. BASF durchgeführten Stickstoffbestimmungen nach der KJELDAHL-Methode (vgl. dazu Kapitel 3.1.3.3.1) sind in Tabelle 4-4 aufgeführt. Dabei fällt auf, dass die titrierten Mengen an 0,05 M Schwefelsäure bei den untersuchten Proben I bis VIII sehr ähnlich sind, was eine Vergleichbarkeit der erzielten Ergebnisse ermöglicht. Da die titrierten Mengen im Ausgangsdestillat aus den UF-Harz Proben aufgrund der recht hohen Stickstoffgehalte sehr hoch und damit ungenau waren, wurde das Ausgangsdestillat 10fach verdünnt. Anschließend wurde dann das verdünnte Destillat zurücktitriert. Die in Tabelle 4-4 angegebenen titrierten Mengen beziehen sich auf das unverdünnte Ausgangsdestillat. Sie wurden nach der Titration zur Berechnung des Gesamtstickstoffgehaltes (vgl. Abbildung 4-20) mit dem Faktor 10 multipliziert, um den Gehalt an Stickstoff in der ursprünglichen Trockengewichtseinwaage zu ermitteln.

**Tabelle 4-4: Titrationsergebnisse der Stickstoffbestimmung des UF-Harzes Kauritec<sup>®</sup> 407 flüssig der Fa. BASF nach KJELDAHL**

Proben- nummer	Probenbezeichnung	Einwaage lutro (g)	Feststoff- gehalt (%)	Einwaage atro (g)	Titrierte Menge Schwefelsäure (ml)
I	BASF Kauritec <sup>®</sup> 407	1,057	66,00	0,698	19,34
II	BASF Kauritec <sup>®</sup> 407	1,105	66,00	0,729	20,68
III	BASF Kauritec <sup>®</sup> 407	1,078	66,00	0,711	19,78
IV	BASF Kauritec <sup>®</sup> 407	1,089	66,00	0,719	19,96
V	BASF Kauritec <sup>®</sup> 407	1,088	66,00	0,718	19,91
VI	BASF Kauritec <sup>®</sup> 407	1,098	66,00	0,725	20,18
VII	BASF Kauritec <sup>®</sup> 407	1,068	66,00	0,705	19,35
VIII	BASF Kauritec <sup>®</sup> 407	1,128	66,00	0,744	21,21

Die aus den Titrationsergebnissen des Harnstoff-Formaldehyd-Harzes Kauritec 407<sup>®</sup> flüssig der Fa. BASF (vgl. Tabelle 4-4) berechneten Stickstoffgehalte sind in Abbildung 4-20 graphisch dargestellt. Dabei ist ersichtlich, dass aufgrund der Tatsache, dass dieses Bindemittel mengenmäßig zu ca. 50 % des Trockengewichts aus Harnstoff besteht, im Leim Kauritec 407<sup>®</sup> flüssig der Fa. BASF mit durchschnittlich 25,75 % ein relativ hoher Stickstoffgehalt vorliegt. Die ermittelten prozentualen Anteile an Stickstoff sind sehr homogen und bewegen sich zwischen minimal 25,38 % und maximal 26,34 %, jeweils



bezogen auf das Trockengewicht an Harnstoff-Formaldehyd-Harz. Die sehr homogenen Werte zeigen, dass es sich bei dem Harnstoff-Formaldehyd-Harz der Fa. BASF um ein sehr hoch entwickeltes, konventionelles Bindemittel auf Harnstoffbasis mit einem hohen Qualitätsstandard handelt.

Der durchschnittliche Gehalt von 25,75 % Stickstoff ist realistisch, wenn man bedenkt, dass ca. 48 % des Harnstoffes aus Stickstoff bestehen (BASF, 2002) und der Harnstoff in diesem Produkt ca. die Hälfte des Trockengewichtes ausmacht. Rein rechnerisch läge der Stickstoffgehalt nach diesen Angaben bei ca. 25 %, bezogen auf das Trockengewicht des Bindemittels. Der hohe Harnstoffanteil ist notwendig, da Harnstoff als Reaktionspartner für den im Leim enthaltenen Formaldehyd während des Heißpressvorgangs dient (vgl. Kapitel 2.2.2.1.1) und dadurch die späteren Formaldehydemissionen aus den UF-Harz gebundenen Holzwerkstoffen deutlich gesenkt werden können.

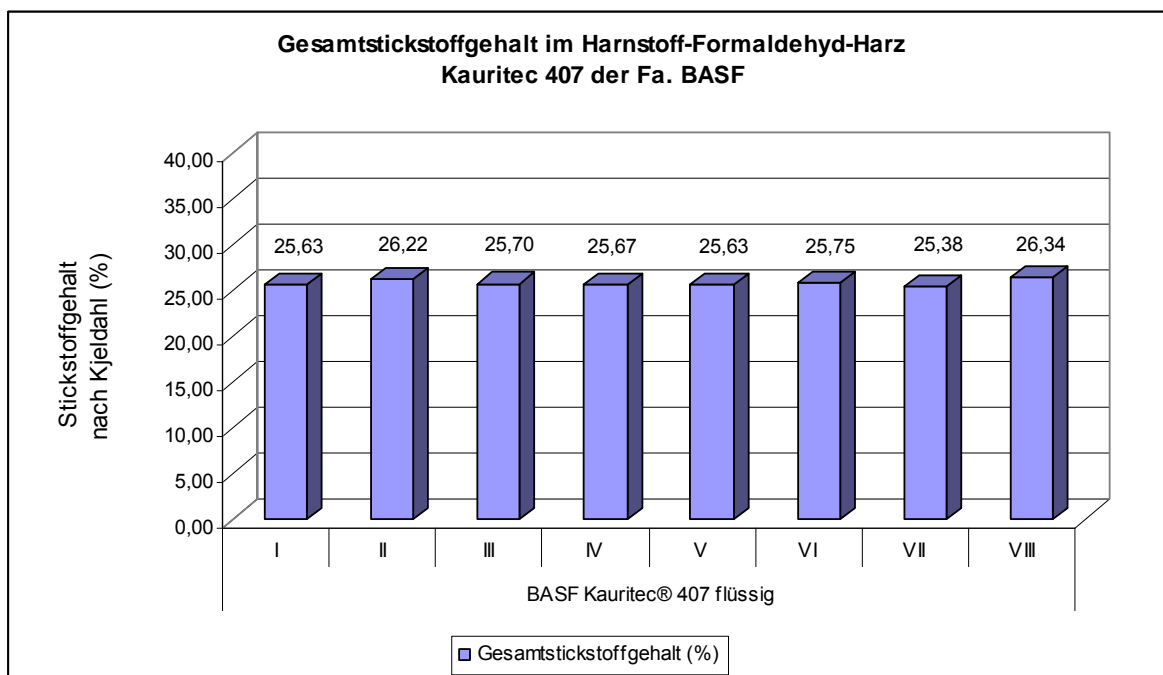


Abbildung 4-20: Graphische Darstellung der Gesamtstickstoffgehalte im UF-Harz Kauritec® 407 flüssig der Fa. BASF

#### 4.1.3.3.2 Stickstoff- und Proteingehalte der Weizenprotein-Suspension

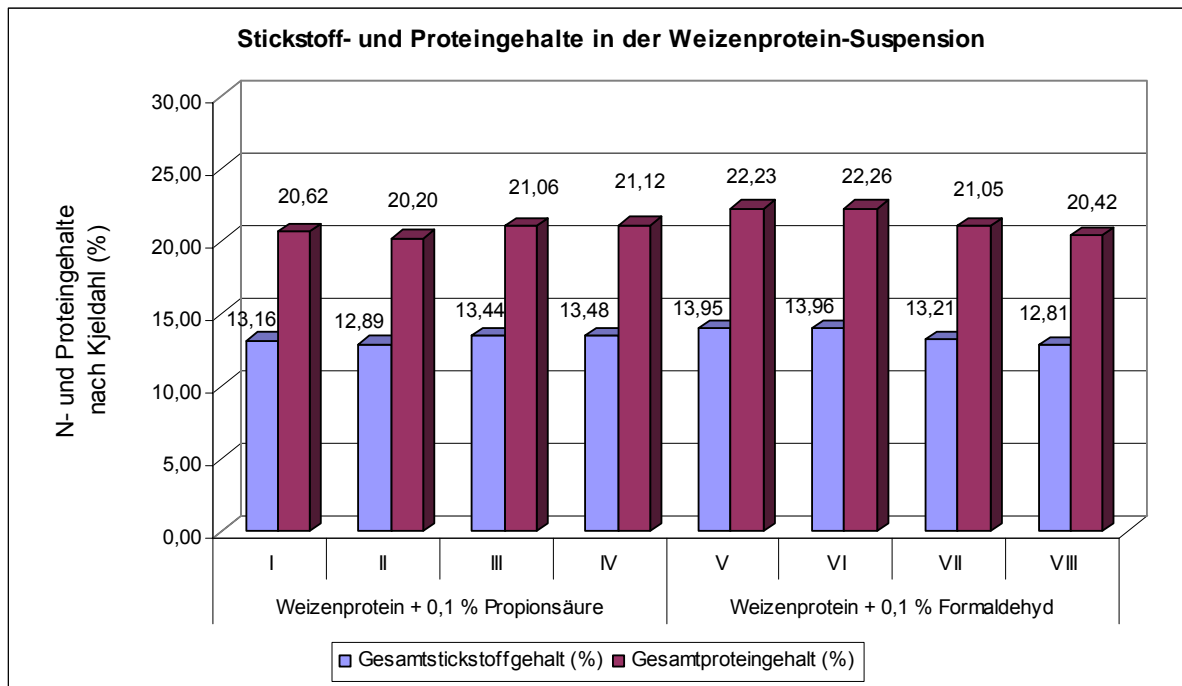
Auch die nach der KJELDAHL-Methode (vgl. Kapitel 3.1.3.3.1) bestimmten Stickstoffgehalte des Weizenproteins in Tabelle 4-5 verdeutlichen, dass es hinsichtlich der titrierten Mengen von 0,05 M Schwefelsäure keine Unterschiede zwischen den beiden verwendeten Konservierungsmitteln Propionsäure bzw. Formaldehyd gibt. Die titrierten Mengen der

Proben I bis VIII liegen mit Werten von minimal 19,37 ml bis maximal 25,66 ml, jeweils bezogen auf die anfangs eingewogene Menge an Weizenprotein, sehr dicht beieinander wodurch eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse gewährleistet ist. Daher können diese Titrationsergebnisse auch zur Berechnung des Gesamtproteingehaltes in den Weizenproteinproben genutzt werden.

**Tabelle 4-5: Titrationsergebnisse der Stickstoffbestimmung im Weizenproteins der Fa. CERESTAR nach KJELDAHL**

Proben- nummer	Probenbezeichnung	Einwaage lutro (g)	Feststoff- gehalt (%)	Einwaage atro (g)	Titrierte Menge Schwefelsäure (ml)
I	Weizenprotein + 0,1 % Propionsäure	2,173	39,90	0,867	20,42
II	Weizenprotein + 0,1 % Propionsäure	2,344	39,90	0,935	21,57
III	Weizenprotein + 0,1 % Propionsäure	2,021	39,90	0,806	19,39
IV	Weizenprotein + 0,1 % Propionsäure	2,013	39,90	0,803	19,37
V	Weizenprotein + 0,1 % Formaldehyd	2,139	39,22	0,839	21,30
VI	Weizenprotein + 0,1 % Formaldehyd	2,122	39,22	0,832	21,15
VII	Weizenprotein + 0,1 % Formaldehyd	2,721	39,22	1,067	25,66
VIII	Weizenprotein + 0,1 % Formaldehyd	2,603	39,22	1,021	23,81

Die aus den Titrationsergebnissen (vgl. Tabelle 4-5) berechneten prozentualen Stickstoff- und Gesamtproteingehalte des Weizenproteins der Fa. CERESTAR, mit einem Feststoffgehalt von 39,90 % bzw. 39,22 %, unterteilt nach dem jeweils verwendeten Konservierungsmittel, sind graphisch in Abbildung 4-21 dargestellt. Dabei lassen sich ein durchschnittlicher Gesamtstickstoffgehalt von 13,36 % sowie ein durchschnittlicher Proteingehalt von 21,12 %, bezogen auf die atro eingewogene Menge an Weizenprotein, ermitteln.



**Abbildung 4-21: Graphische Darstellung der Stickstoff- und Gesamtproteingehalte im Weizenprotein**

Bei Betrachtung der Gesamtproteingehalte, bezogen auf die Trockengewichtseinwaage des Bindemittels, fällt auf, dass die erzielten Ergebnisse von durchschnittlich 21,12 % nicht dem Proteingehalt entsprechen, der durch die Fa. CERESTAR ermittelt wurde (vgl. 4.1.3.1.1). Beim Vergleich dieser Ergebnisse ergibt sich eine Differenz von durchschnittlich 4 %. Dies liegt vermutlich daran, dass es sich grundsätzlich bei der KJELDAHL-Methode um ein recht genaues und auch schnelles Verfahren handelt, verglichen aber mit speziellen Analysemethoden zur direkten Bestimmung des Proteingehaltes doch noch Abweichungen aufgrund unspezifischerer Messtechnik beim Vergleich der beiden nach diesen Verfahren bestimmten Proteinmengen bestehen.

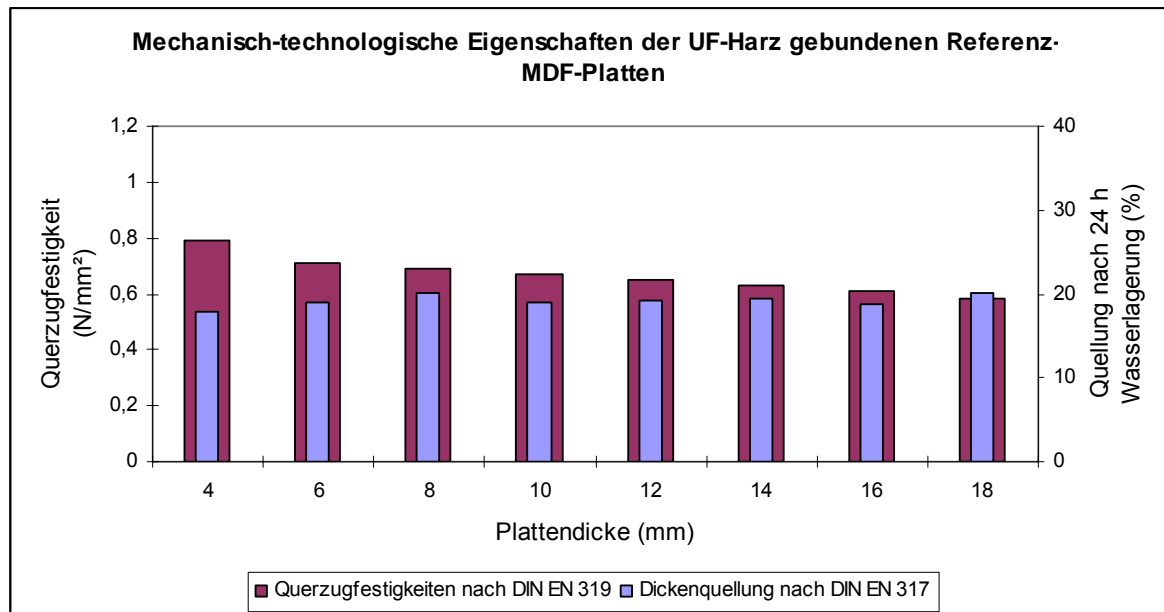
## 4.2 Herstellung von Mitteldichten Faserplatten im Pilotmaßstab

### 4.2.1 Ergebnisse der Harnstoff-Formaldehyd-Harz gebundenen MDF-Referenzplatten

Die mechanisch-technologischen Ergebnisse, d.h. die Querkzugfestigkeiten nach DIN EN 319 (vgl. Kapitel 3.3.2.2) und die Quellwerte nach DIN EN 317 (vgl. Kapitel 3.3.2.1), der mit Kauritec 407<sup>®</sup> flüssig der Fa. BASF gebundenen Referenz-MDF-Platten sind in Abbildung 4-22 bis Abbildung 4-24 graphisch dargestellt. Die mittlere Rohdichte aller 120 nach den in Variante I bis VIII angegebenen Herstellungsparametern angefertigten Mitteldichten

Faserplatten (vgl. Tabelle 3-3 bis Tabelle 3-6) beträgt  $807 \text{ kg/m}^3$  und erfüllt damit die angestrebte Zielrohddichte von  $800 \text{ kg/m}^3$ . Die Rohdichten der einzelnen UF-Harz gebundenen Mitteldichten Faserplatten werden nicht mehr im Einzelnen erläutert.

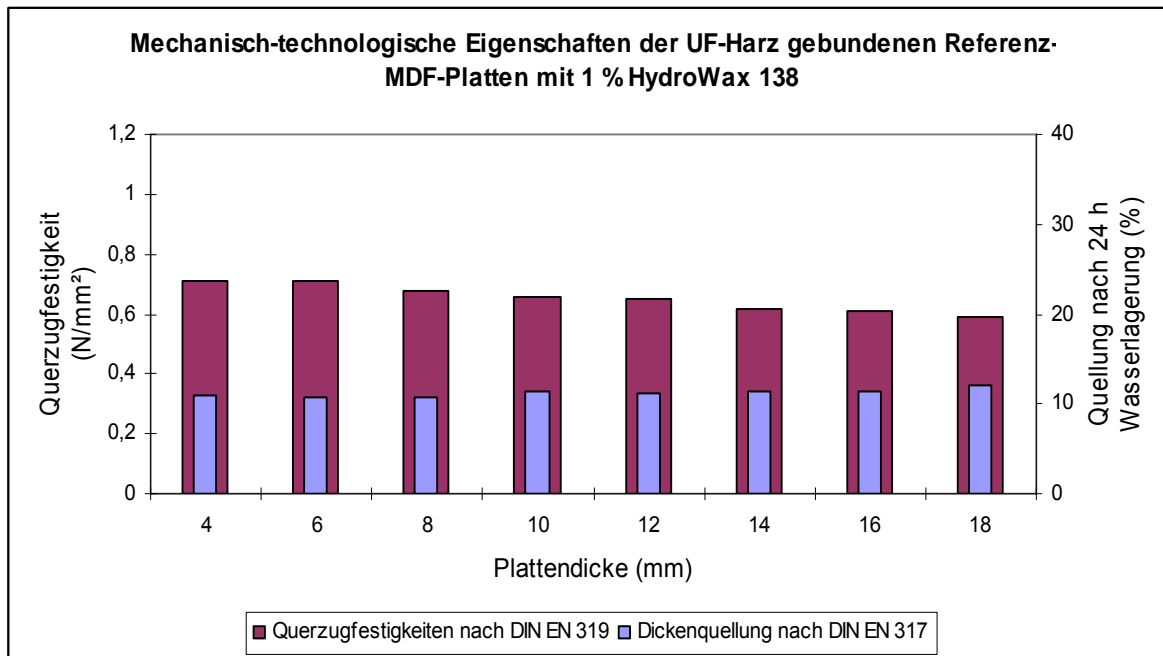
Bei den in Abbildung 4-22 dargestellten Ergebnissen der UF-Harz gebundenen Mitteldichten Faserplatten ohne Zusatz von Hydrophobierungsmitteln ist festzustellen, dass bereits die Platten von 4 mm und 6 mm Dicke ohne Zugabe von Paraffinen die durch DIN vorgegebenen Anforderungen (vgl. Tabelle 3-18) erfüllen. Die 8 mm starken MDF-Platten erfüllen hinsichtlich der Querkzugfestigkeiten mit einem Ergebnis von  $0,69 \text{ N/mm}^2$  auch die Anforderungen nach DIN, jedoch liegen sie mit einem Quellwert von durchschnittlich 20,07 % gering über den für diese Kategorie zulässigen 17 %. Die Tendenz, dass mit steigender Plattenstärke auch die Quellwerte ansteigen und die Querkzugfestigkeiten sinken, zeigt sich auch bei den mechanisch-technologischen Ergebnissen dieser Referenzplatten. Auch hier fallen die Querkzugfestigkeiten von  $0,79 \text{ N/mm}^2$  (4 mm) bis auf  $0,58 \text{ N/mm}^2$  (18 mm) recht gleichmäßig ab, erfüllen jedoch in allen Fällen die Mindestanforderung nach DIN. Das Absinken der Querkzugfestigkeiten hängt unter anderem daran, dass aufgrund der höheren Plattendicken die Vernetzungen des UF-Harzes beim Heißpressvorgang nicht mehr so stark sind wie bei dünneren Platten. Bei einer Erhöhung der Plattenstärke wird auch der Presszeitfaktor beibehalten, der eine gewisse Presszeit pro mm Plattendicke beschreibt. Dadurch ist gewährleistet, dass die Platten, unabhängig von ihrer späteren Stärke, unter gleichen Bedingungen verpresst werden. Allerdings wird es mit steigender Plattendicke trotz effektiv längerer Presszeit schwierig, die gleiche Temperatur in der Plattenmitte beim Heißpressvorgang zu erreichen. Da in den meisten Fällen die Presstemperatur in der Plattenmitte mit steigender Plattenstärke sinkt, verschlechtern sich auch die mechanisch-technologischen Eigenschaften dieser Werkstoffe, da das Bindemittel aufgrund geringerer Temperaturen nicht mehr optimal ausreagieren kann. Darin ist auch die mit steigender Plattestärke ansteigende Dickenquellung nach 24 h zu erklären. Ab einer theoretischen Plattenstärke von 8 mm werden die nach DIN geforderten Eigenschaften hinsichtlich des Quellverhaltens nicht mehr erfüllt. Daher ist die Verwendung von Hydrophobierungsmitteln in der Harnstoff-Formaldehyd-Harz Leimflotte erforderlich, um auch diese Anforderungen neben den Querkzugfestigkeiten zu erfüllen.



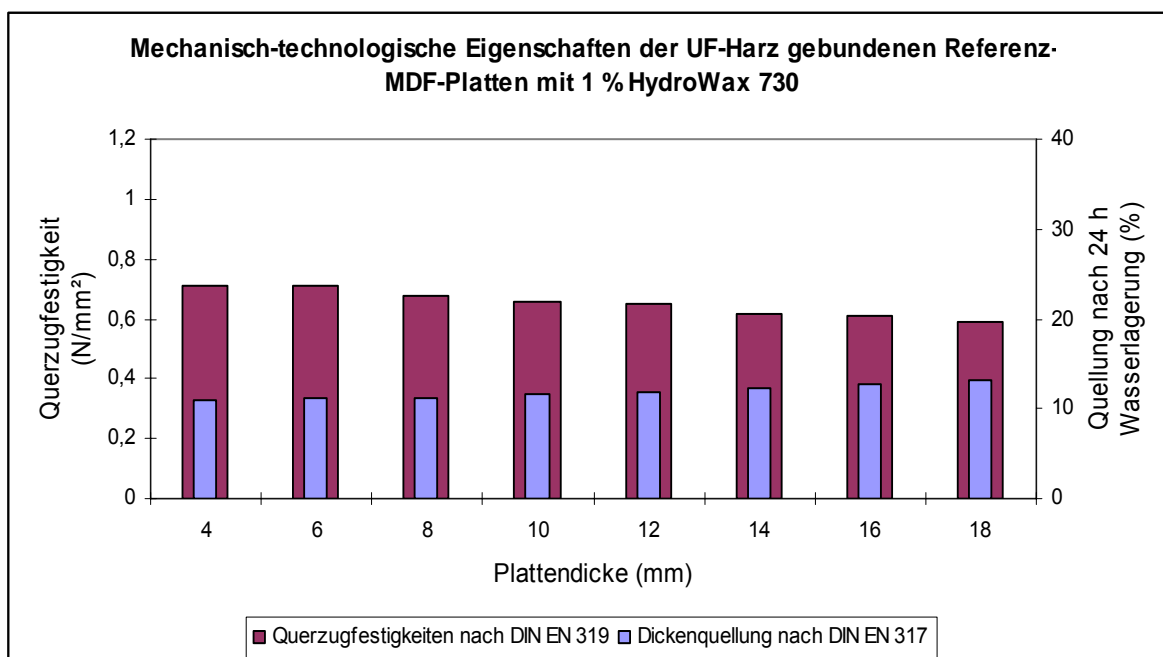
**Abbildung 4-22: Mechanisch-technologische Eigenschaften der 4 mm bis 18 mm starken UF-Harz gebundenen Mitteldichten Faserplatten ohne Hydrophobierungsmittel**

Die in Abbildung 4-23 und Abbildung 4-24 dargestellten Ergebnisse der mit Kauritec 407<sup>®</sup> flüssig der Fa. BASF gebundenen MDF-Platten, hergestellt nach den in Tabelle 3-3 bis Tabelle 3-6 aufgeführten Herstellungsparametern, unter Verwendung von 1 % HYDROWAX 138 bzw. 1 % HYDROWAX 730 zur Leimflotte (beides atro auf atro Fasermaterial), erfüllen die durch DIN vorgegebenen Anforderungen hinsichtlich der Querzugfestigkeiten und Dickenquellwerte nach 24 h Wasserlagerung. Dabei wurden im Falle von der 1 %igen Zugabe von HYDROWAX 138 durchschnittliche Querzugfestigkeiten von 0,71 N/mm<sup>2</sup> (4 mm) bis 0,58 N/mm<sup>2</sup> (18 mm) erzielt, die die nach DIN geforderten Mindestanforderungen erfüllen. Mit den ermittelten Werten sind die Querzugfestigkeiten dieser MDF-Platten, bedingt durch die Verwendung des Hydrophobierungsmittels, etwas geringer als die vergleichbaren Festigkeiten der UF-Harz gebundenen MDF-Platten ohne Zugabe von Hydrophobierungsmitteln. Die Dickenquellwerte der hergestellten Referenzplatten unter Zugabe von 1 % HYDROWAX 138 zur Harnstoff-Formaldehyd-Harz Leimflotte sind mit durchschnittlichen Resultaten von 10,81 %, bei den 4 mm dicken Platten, bis zu 12,1 % bei den 18 mm starken Faserplatten vollkommen in den Mindestanforderungen. Auch die Querzugfestigkeiten und Quellwerte der unter Verwendung von 1 % HYDROWAX 730 angefertigten Harnstoff-Formaldehyd-Harz gebundenen Mitteldichten Faserplatten in den Stärken von 4 mm bis 18 mm erreichen die durch DIN vorgegebenen Anforderungen hinsichtlich der Festigkeiten senkrecht zur Plattenebene und der Dickenquellung nach 24 h Wasserlagerung (vgl. dazu Abbildung 4-24). Die Querzugfestigkeiten von 0,75 N/mm<sup>2</sup> (4 mm) bis 0,56 N/mm<sup>2</sup> (18 mm) sind mit den

Ergebnissen der unter Zugabe von HYDROWAX 138 angefertigten Platten vergleichbar. Auch in diesen Versuchsvarianten zeigt sich, dass die Querkzugfestigkeiten durch die Verwendung von Hydrophobierungsmitteln, verglichen mit den rein UF-Harz gebundenen MDF-Platten ohne Paraffine, leicht geringer ausfallen.

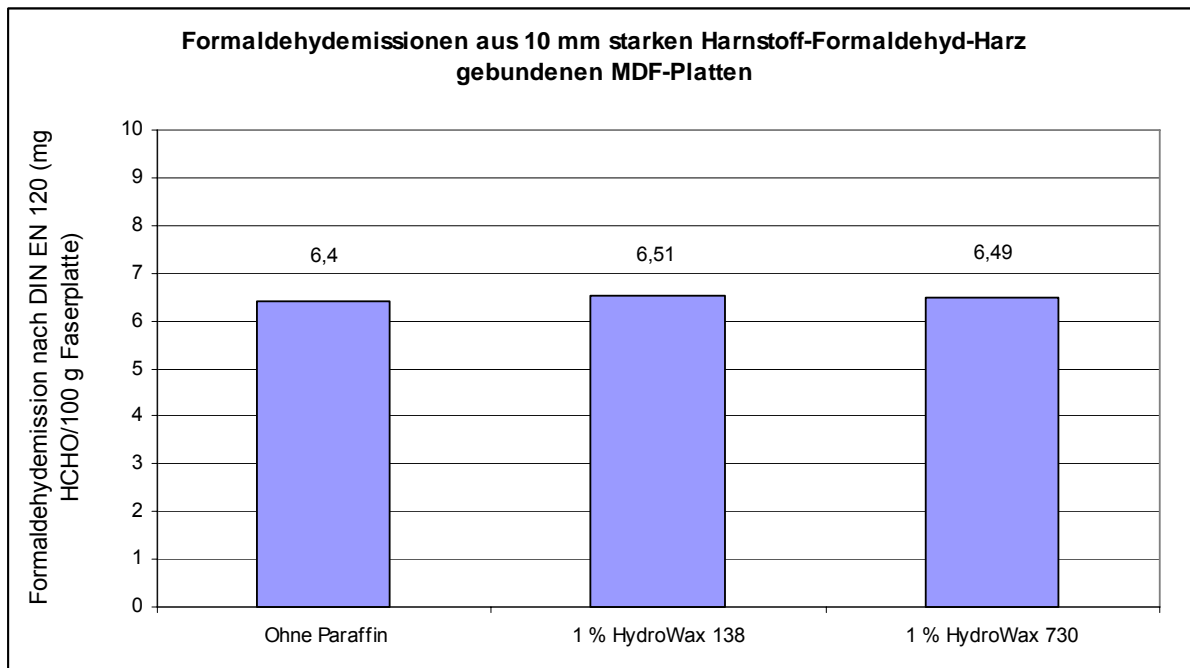


**Abbildung 4-23: Mechanisch-technologische Eigenschaften der 4 mm bis 18 mm starken UF-Harz gebundenen Mitteldichten Faserplatten mit HYDROWAX 138**



**Abbildung 4-24: Mechanisch-technologische Eigenschaften der 4 mm bis 18 mm starken UF-Harz gebundenen Mitteldichten Faserplatten mit HYDROWAX 730**

Die Bestimmung der Formaldehydemissionen aus den 10 mm starken UF-Harz gebundenen Mitteldichten Faserplatten nach der Perforator-Methode (vgl. auch Abbildung 4-25) zeigte, dass diese Platten alle den nach der DiBt-Richtlinie 100 (1994) vorgegebenen Emissionswert von 7 mg Formaldehyd pro 100 g Faserplatte nicht überschreiten. Allerdings ist bei der Verwendung der beiden Paraffine HYDROWAX 138 und HYDROWAX 730 der Fa. SASOL in Dosierungen von 1 % atro bezogen auf atro Fasermaterial zu erkennen, dass die Formaldehydemissionen leicht ansteigen. Dies ist vermutlich dadurch bedingt, dass durch die Zugabe von Paraffin zur Leimflotte die Komponenten Harnstoff und Formaldehyd während des Heißpressvorgangs nicht vollständig ausreagieren und das Formaldehyd dadurch später leichter emittieren kann. Somit ergeben sich hinsichtlich der Formaldehydemission Differenzen von ca. 0,1 mg Formaldehyd pro 100 g Faserplatte zwischen der Verwendung reiner UF-Leimflotten bzw. der Verwendung von UF-Harz/Paraffin-Leimflotten.



**Abbildung 4-25: Formaldehydemissionen aus 10 mm starken mit Kauritec 407<sup>®</sup> flüssig gebundenen MDF-Platten nach der Perforator-Methode**

Abschließend kann bezüglich der mit Kauritec 407<sup>®</sup> flüssig der Fa. BASF gebundenen Mitteldichten Faserplatten unter Zugabe eines Hydrophobierungsmittels ausgesagt werden, dass sich unter den verwendeten Herstellungsparametern auf der Pilot-MDF-Anlage des NHN Referenzplatten herstellen lassen, die den Anforderungen durch DIN hinsichtlich der Querkzugfestigkeiten und der Quellwerte wie auch der Formaldehydemission nach DiBt-Richtlinie 100 genügen.

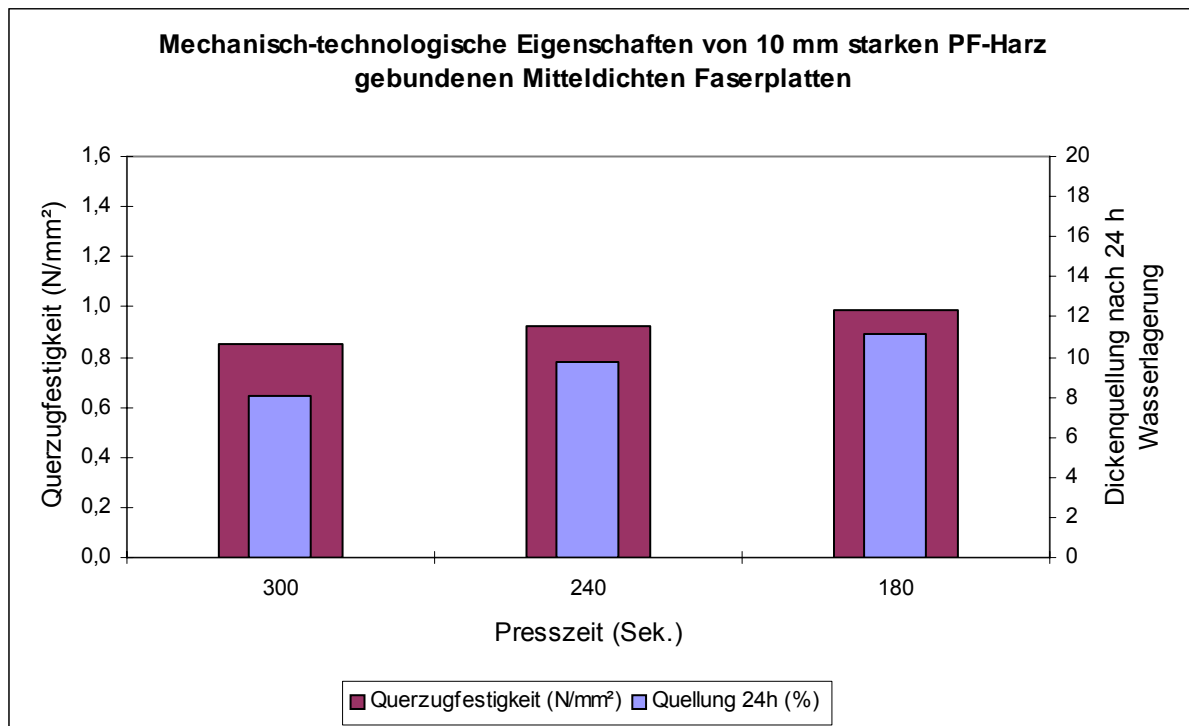
#### 4.2.2 Ergebnisse der Phenol-Formaldehyd-Harz gebundenen MDF-Referenzplatten

Aus allen 45 Phenol-Formaldehyd-Harz gebundenen Referenz-Faserplatten, hergestellt nach den in Tabelle 3-7 und Tabelle 3-8 aufgeführten Parametern, konnte eine durchschnittliche Rohdichte von  $798 \text{ kg/m}^3$  ermittelt werden, so dass die angestrebte Zielrohddichte von  $800 \text{ kg/m}^3$  bei diesen Platten erreicht wurde. Die durchschnittliche Rohdichte wurde im Mittel zu ungefähr  $13 \text{ kg/m}^3$  unter- bzw. überschritten. Es werden daher bei der folgenden Diskussion der mechanisch-technologischen Eigenschaften dieser PF-Harz gebundenen Faserplatten der Variante I bis III ausschließlich die Querkzugfestigkeiten und die Quellwerte betrachtet. Die einzelnen Rohdichten werden nicht mehr gesondert aufgeführt.

Die mechanisch-technologischen Eigenschaften, ermittelt nach den gültigen DIN EN Vorschriften (vgl. Kapitel 3.3.2 ff.) der mit Phenol-Formaldehyd-Harz HW 1808 der Fa. BAKELITE hergestellten MDF-Platten ohne Zugabe von Hydrophobierungsmitteln sind in Abbildung 4-26 graphisch dargestellt.

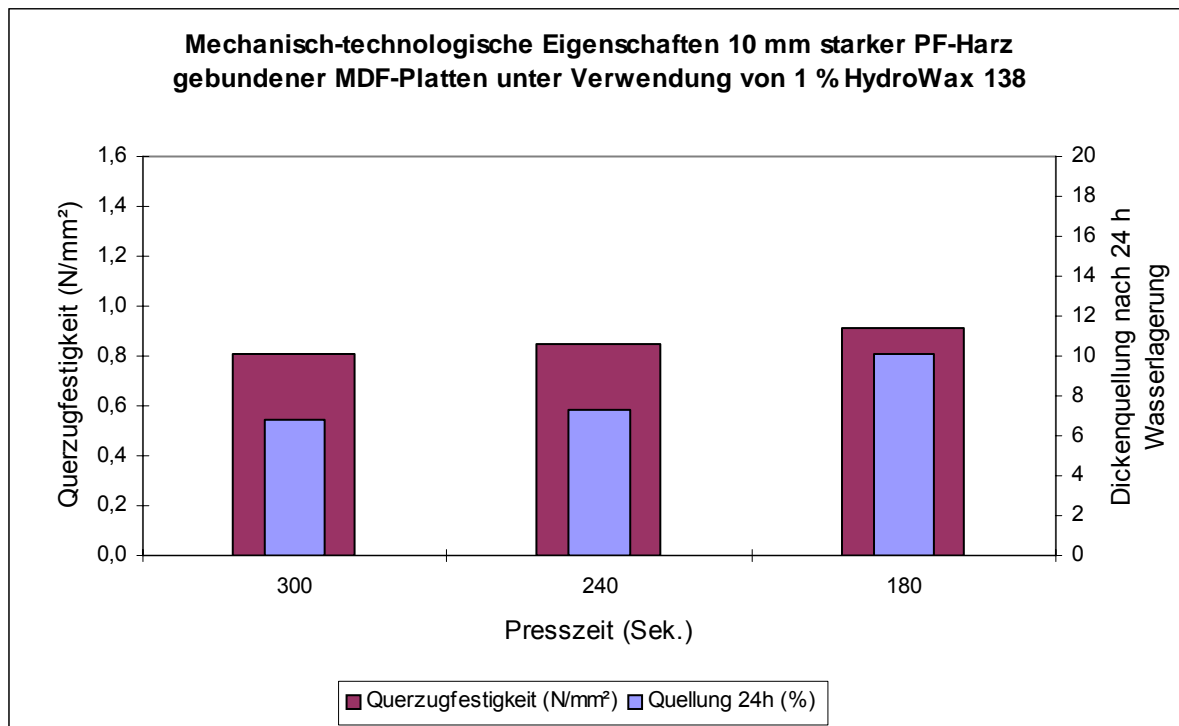
Die abgebildeten Querkzugfestigkeiten und Dickenquellwerte nach 24 h Wasserlagerung erfüllen bei allen verwendeten Pressfaktoren die zurzeit vorgegebenen DIN EN Normen von  $0,6 \text{ N/mm}^2$  für die Querkzugfestigkeit und  $> 15 \%$  für die Dickenquellung nach 24 h Wasserlagerung. Dabei ist eine sehr geringe Abnahme der Querkzugfestigkeiten mit steigenden Presszeitfaktoren ersichtlich. Bei 18 Sekunden pro mm Plattendicke wurden durchschnittliche Querkzugfestigkeiten von  $0,99 \text{ N/mm}^2$  erzielt. Mit steigender Presszeit verringern sich die Querkzugfestigkeiten zunächst auf  $0,93 \text{ N/mm}^2$  (240 Sekunden) und schließlich auf  $0,85 \text{ N/mm}^2$  (300 Sekunden). Dies ist ein charakteristisches Merkmal der Phenol-Formaldehyd-Harze, da es bei längeren Presszeiten zu einer Vergütung der Dickenquellwerte, ähnlich wie bei einer thermischen Nachbehandlung, kommt. Konträr zu den mit steigender Presszeit leicht sinkenden Querkzugfestigkeiten werden durch den längeren Heißpressvorgang bessere Quellwerte nach 24 h Wasserlagerung erzielt. Die Quellwerte verbessern sich von  $11,16 \%$  bei einer Presszeit von 180 Sekunden über  $9,78 \%$  bei 240 Sekunden bis hin zu  $8,09 \%$  bei einer Pressdauer von insgesamt 300 Sekunden. Dies ist eine Vergütung der mechanisch-technologischen Eigenschaften, die bei PF-Harz gebundenen Platten durch eine thermische Nachbehandlung oder längere Presszeiten erzielt werden kann, da es bei diesem Bindemittel mit steigenden Presszeiten nicht zu einer Hydrolysereaktion, wie beispielsweise beim UF-Harz, kommt.





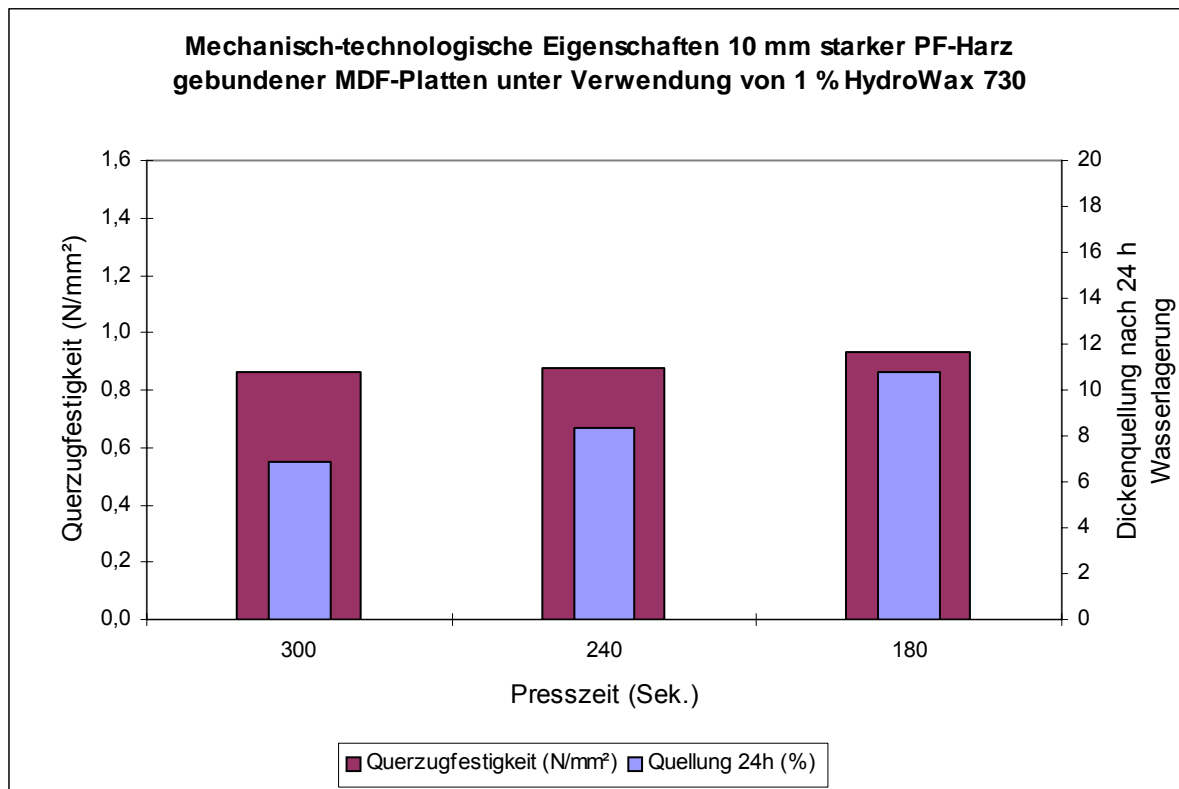
**Abbildung 4-26: Mechanisch-technologische Eigenschaften der PF-Harz gebundenen MDF-Platten ohne Zugabe von Hydrophobierungsmitteln**

Durch eine 1 %ige Zugabe (atro auf atro Faser) des Hydrophobierungsmittels HYDROWAX 138 der Fa. SASOL zum Phenol-Formaldehyd-Harz Bindemittel HW 1808 der Fa. BAKELITE unter Beibehaltung der übrigen Herstellungsparameter zeigen sich veränderte mechanisch-technologische Eigenschaften (vgl. Abbildung 4-27) gegenüber den nur mit PF-Harz hergestellten Faserplatten (vgl. Abbildung 4-26). Die unter Verwendung von HYDROWAX 138 angefertigten Mitteldichten Faserplatten erfüllen, unabhängig vom verwendeten Presszeitfaktor, bezüglich der Querzugfestigkeiten und der Dickenquellwerte nach 24 h Wasserlagerung die vorgegebenen Mindestanforderungen nach DIN EN (vgl. Tabelle 3-18). Die Querzugfestigkeiten sind jedoch, bedingt durch die Verwendung der Paraffindispersion in der Leimflotte, etwas geringer als bei den PF-Harz gebundenen MDF-Platten ohne Hydrophobierungsmittel. Sie fallen mit steigender Presszeit von 0,91 N/mm<sup>2</sup> (180 Sekunden) über 0,85 N/mm<sup>2</sup> (240 Sekunde) auf 0,81 N/mm<sup>2</sup> (300 Sekunden) ab. Die Dickenquellwerte nach 24 h Wasserlagerung hingegen sind, bedingt durch das HYDROWAX 138, besser als die entsprechenden Werte bei den rein mit Phenol-Formaldehyd-Harz gebundenen MDF-Platten. Die Quellwerte verbessern sich auch in diesem Versuch von 10,08 % (180 Sekunden) über 7,35 % (240 Sekunden) bis auf 6,78 % (300 Sekunden) mit steigendem Presszeitfaktor.



**Abbildung 4-27: Mechanisch-technologische Eigenschaften der PF-Harz gebundenen MDF-Platten unter Verwendung von HYDROWAX 138**

Die Auswirkungen der Paraffindispersion HYDROWAX 730 der Fa. SASOL auf die mechanisch-technologischen Eigenschaften der PF-Harz gebundenen Mitteldichten Faserplatten sind in Abbildung 4-28 dargestellt. Dabei erfüllen alle Platten dieses Versuches die vorgegebenen DIN EN Normen bezüglich der Querzugfestigkeiten von  $0,60 \text{ N/mm}^2$  und der Dickenquellung nach 24 h von  $\leq 15 \%$ , unabhängig von der verwendeten Heißpresszeit. Auch in diesem Versuch wird die Beimischung der Paraffindispersion an den verbesserten Quellwerten und den leicht geringeren Querzugfestigkeiten der Mitteldichten Faserplatten deutlich. Die Werte liegen unter den Quellwerten der nur mit Phenol-Formaldehyd-Harz gebundenen Faserplatten (vgl. Abbildung 4-26). Die Quellwerte nach 24 h Wasserlagerung verbessern sich mit diesem Paraffin von anfänglich  $10,82 \%$  (180 Sekunden) über  $8,32 \%$  (240 Sekunden) bis hin zu  $6,91 \%$  (300 Sekunden) bei einem steigenden Presszeitfaktor. Die erzielten Querzugfestigkeiten fallen aufgrund der längeren Presszeit von  $0,91 \text{ N/mm}^2$  (180 Sekunden) auf  $0,88 \text{ N/mm}^2$  und letztlich auf  $0,86 \text{ N/mm}^2$  mit steigenden Presszeitfaktoren nur in einem sehr geringen Umfang ab.

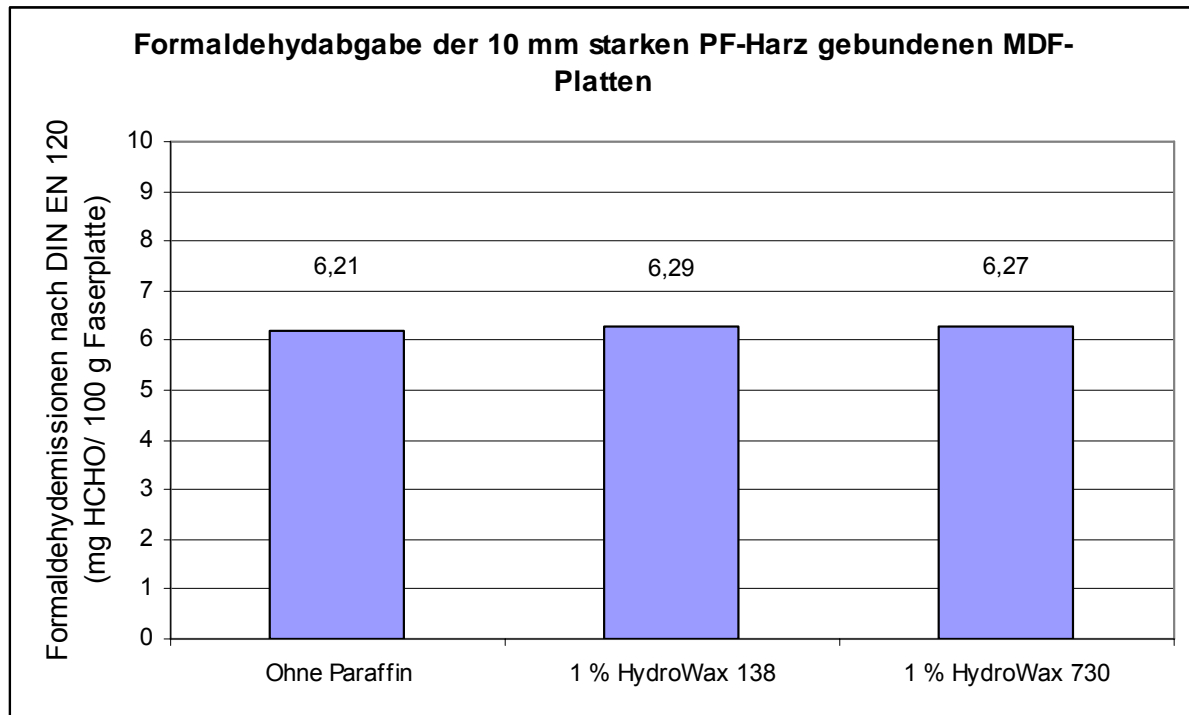


**Abbildung 4-28: Mechanisch-technologische Eigenschaften der PF-Harz gebundenen MDF-Platten unter Verwendung von HYDROWAX 730**

Die nach der Perforator-Methode ermittelten Formaldehydemissionen aus den Phenol-Formaldehyd-Harz gebundenen Mitteldichten Faserplatten sind in Abbildung 4-29 graphisch dargestellt. Dabei handelt es sich ausschließlich um MDF-Platten mit einer Plattenstärke von 10 mm, da diese Werte als Referenzwerte zu den 10 mm starken mit Mischkondensaten, bestehend aus PF-Harz und Weizenprotein, hergestellten MDF-Platten (vgl. dazu auch Kapitel 3.2.5) benötigt werden.

Die errechneten Formaldehydemissionen liegen mit Werten von 6,21, 6,27 und 6,29 mg HCHO pro 100 g Faserplatte noch deutlich unter dem durch die DiBt-Richtlinie 100 vorgegebenen Wert von 7,0 mg HCHO pro 100 g Faserplatte. Dabei liegen die durchschnittlichen HCHO-Emissionswerte, bei den unter Verwendung von Phenol-Formaldehyd-Harz Leimflotten mit Zugabe von 1 % HYDROWAX 138 bzw. 1 % HYDROWAX 730 der Fa. SASOL hergestellten MDF-Platten im Pilotmaßstab, etwas über den durchschnittlichen Emissionswert der PF-Harz gebundenen MDF-Platten ohne Paraffinzusatz. Auch bei den Phenol-Formaldehyd-Harzen ist dies darauf zurückzuführen, dass aufgrund der Paraffinzugabe die Komponenten Phenol und Formaldehyd während des Heißpressvorgangs nicht vollständig ausreagieren können und daher der Formaldehyd später leichter aus den

Werkstoffen entweichen kann. Die gemessenen Formaldehydemissionen sind für PF-Harz gebundene MDF-Platten relativ hoch, was auf zu geringe Presstemperaturen bei der Herstellung der Holzwerkstoffe zurückzuführen ist.



**Abbildung 4-29: Formaldehydemissionen der 10 mm starken MDF-Platten gebundenen mit Phenol-Formaldehyd-Harz vom Typ 1808 HW der Fa. BAKELITE**

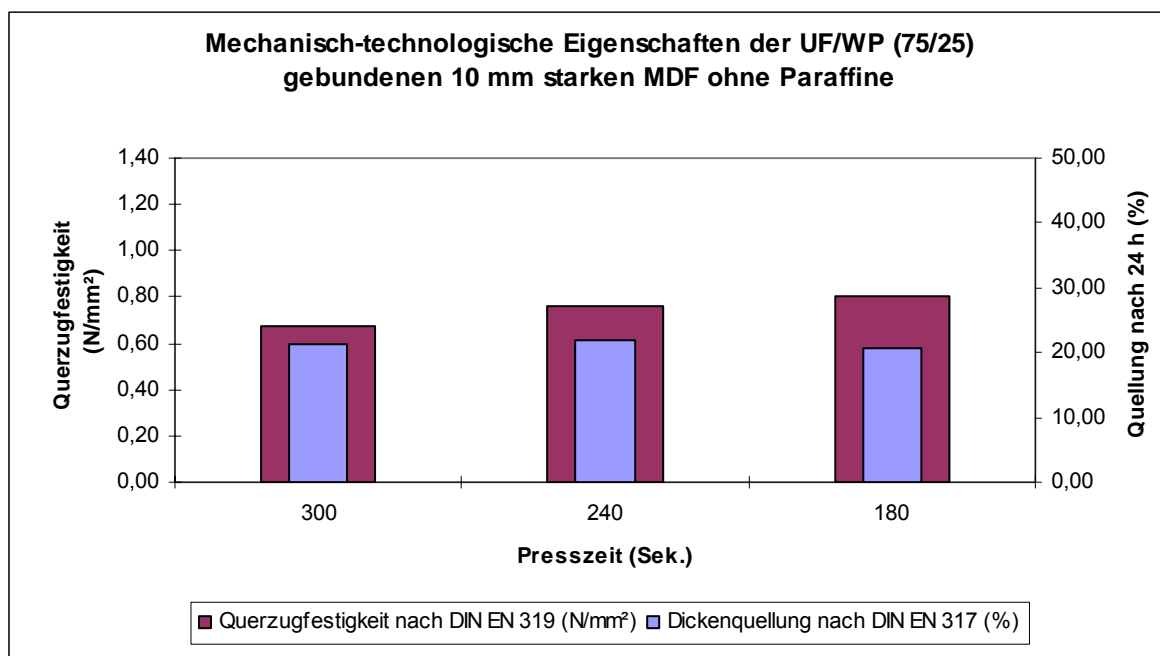
Abschließend lässt sich aussagen, dass die auf der Pilot-MDF-Anlage des NHN hergestellten Phenol-Formaldehyd-Harz gebundenen Mitteldichte Faserplatten alle die erforderlichen DIN EN Normen hinsichtlich der Querkzugfestigkeiten und Quellwerte nach 24 h Wasserlagerung erzielen. Bei den Versuchen zeigte sich, dass die optimale Presszeit bei der Anfertigung dieser Faserplatten 18 Sekunden pro mm Plattenstärke ist, da sich die Querkzugfestigkeiten mit den steigenden Presszeitfaktoren verschlechtert und sich die Quellwerte aufgrund der längeren Presszeiten nur gering verbessert haben. Die Beimischung der Hydrophobierungsmittel HYDROWAX 138 und HYDROWAX 730 in die Leimflotten zeigte, dass beide Paraffindispersionen sowohl eine Verringerung der Quellwerte nach 24 h als auch eine Verringerung der Querkzugfestigkeiten, verglichen mit den rein PF-Harz gebundenen Platten, bewirkte. Auch die Ergebnisse der Formaldehydemissionsmessungen aller in diesen Versuchen hergestellten, Phenol-Formaldehyd-Harz gebundenen MDF-Platten liegen unter dem nach der DiBt-Richtlinie 100 vorgegebenen Wert von 7,0 mg HCHO pro 100 g Mitteldichten Faserplatte.

### 4.2.3 Ergebnisse der UF-Harz/Weizenprotein gebundenen Mitteldichten Faserplatten

In den folgenden Diagrammen Abbildung 4-30 bis Abbildung 4-38 sind die Ergebnisse der mit Mischkondensaten aus Harnstoff-Formaldehyd-Harz Kauritec 407<sup>®</sup> flüssig der Fa. BASF und der entwickelten Weizenprotein-Suspension hergestellten Mitteldichten Faserplatten graphisch dargestellt. Dabei sind in den Graphiken ausschließlich die nach DIN EN 317 ermittelten Quellwerte (vgl. Kapitel 3.3.2.1) und die nach DIN EN 319 ermittelten Querszugfestigkeiten (vgl. Kapitel 3.3.2.2) dargestellt. Die Rohdichten aller in diesen Serien angefertigten Mitteldichten Faserplatten liegen mit durchschnittlich 795 kg/m<sup>3</sup> im Bereich der angestrebten Zielrohddichte von 800 kg/m<sup>3</sup>. Dazu wurden die Rohdichten von allen 135 für die Serien der Variante I bis III (vgl. Tabelle 3-9) hergestellten MDF-Platten nach DIN EN 323 (vgl. Kapitel 3.3.2.3) gemessen. Die aus diesen Faserplatten berechnete mittlere Rohddichte liegt bei 795 kg/m<sup>3</sup>. Auf die gleiche Weise wurde ein Mittelwert für die Stärke der 135 angefertigten Mitteldichten Faserplatten errechnet. Dazu wurde von jeder Platte die Enddicke auf zwei Stellen hinter dem Komma mit Hilfe einer digitalen Schieblehre gemessen. Im Mittel wiesen die MDF-Platten der Variante I bis III, gebunden mit UF-Harz und Weizenprotein, eine Stärke von 9,52 mm auf.

Die mechanisch-technologischen Ergebnisse der mit einer Leimflotte bestehend aus Harnstoff-Formaldehyd-Harz und Weizenprotein im Mengenverhältnis von 75/25 hergestellten Mitteldichten Faserplatten sind in Abbildung 4-30 bis Abbildung 4-32 graphisch dargestellt. Dabei handelt es sich um die drei Serien der Variante I bestehend aus insgesamt 45 Platten (vgl. dazu Tabelle 3-9). Bei den dargestellten Ergebnissen der Querszugfestigkeiten und Quellwerte handelt es sich ebenfalls um Mittelwerte. Dabei werden pro Presszeitfaktor die aus den fünf zusammengehörigen Platten einer Serie ermittelten Ergebnisse dargestellt. Bei der ersten Serie der Variante I (Abbildung 4-30), der Verwendung des Mischkondensats UF/WP im Verhältnis 75/25 ohne Hydrophobierungsmittel, fällt auf, dass die hier erzielten Querszugfestigkeiten von 0,80 N/mm<sup>2</sup> (180 Sekunden), 0,76 N/mm<sup>2</sup> (240 Sekunden) sowie 0,68 N/mm<sup>2</sup> (300 Sekunden) über dem vom DIN vorgegebenen Mindestwert von 0,60 N/mm<sup>2</sup> liegen (vgl. Tabelle 3-18). Die Tatsache, dass die Querszugfestigkeiten mit ansteigender Presszeit abfallen, ist in der Hydrolysereaktion des Harnstoff-Formaldehyd-Harzes begründet. Da diese Bindemittelkomponente 75 % der gesamten atro Bindemittelmenge ausmacht, hat sie auch einen wesentlichen Einfluss auf die mechanisch-technologischen Eigenschaften der Mitteldichten Faserplatten.

Die Dickenquellwerte nach 24 h Wasserlagerung erfüllen jedoch in keinem Fall den für MDF-Platten in den Stärken von 9 bis < 12 mm zulässigen Höchstwert von weniger als 15 %. Die gemessenen Quellwerte von 20,80 % (180 Sekunden), 21,77 % (240 Sekunden) und 21,21 % (300 Sekunden) liegen sehr dicht beieinander, woraus zu schließen ist, dass die Hydrolysereaktion des UF-Harzes bei längeren Presszeiten in diesem Fall keine positiven Auswirkungen auf das Quellverhalten der unter diesen Parametern hergestellten Faserplatten hat. Da die Quellwerte nicht höher sondern sogar etwas geringer sind als bei den UF-Referenzplatten, kann dies auf eine Erhöhung der Wasserresistenz durch Beimischung von Proteinen zurückzuführen sein. Dieses Verhalten von Protein/UF-Leimen wurde bereits von WANG und PIZZI (1997) bei der Verleimung von Sperrholz mit UF/Protein Mischkondensaten beobachtet.



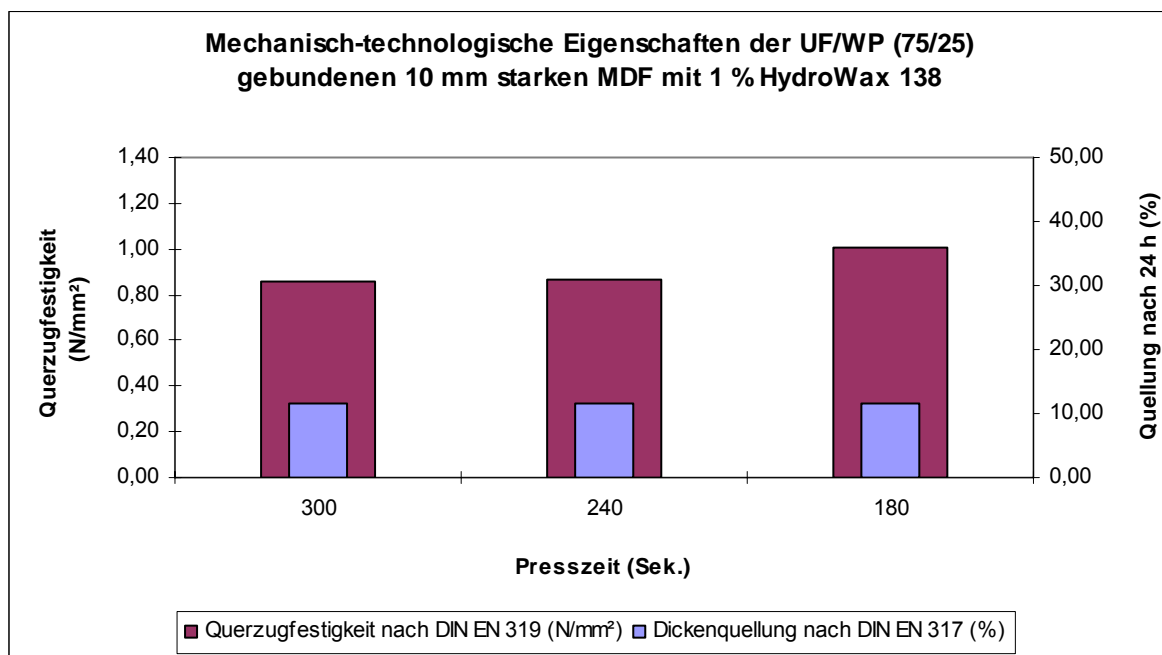
**Abbildung 4-30: Mechanisch-technologische Eigenschaften der UF/WP (75/25) gebundenen MDF-Platten ohne Hydrophobierungsmittel**

Werden der Leimflotte Hydrophobierungsmittel beigemischt, so wirkt sich dies enorm auf die mechanisch-technologischen Eigenschaften der MDF-Platten aus. Durch eine 1 %ige Beimischung der Paraffindispersion HYDROWAX 138 der Fa. SASOL (atro Paraffin auf atro Fasermaterial) zur Leimflotte, bestehend aus dem Mischkondensat UF WP (75/25), können die von DIN vorgegebenen Anforderungen an MDF-Platten in der Stärke von 9 bis < 12 mm erfüllt werden (vgl. Abbildung 4-31). Die höheren Querzugfestigkeiten dieser Platten im Vergleich zu den ohne Hydrophobierungsmitteln hergestellten MDF-Platten weisen darauf hin, dass die Paraffindispersion HYDROWAX 138 in Verbindung mit dem Mischkondensat die

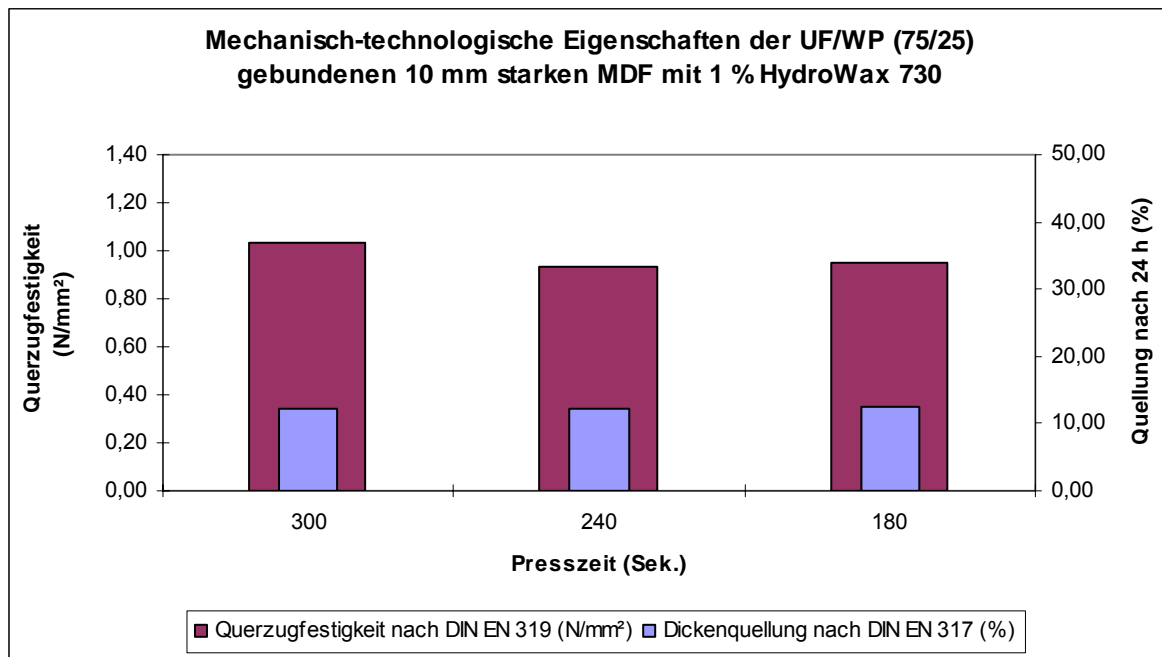
Klebeigenschaften des Mischkondensats unterstützt und nicht, wie bereits häufig beobachtet wurde, die Querszugfestigkeiten durch die Zugabe von Hydrophobierungsmitteln gesenkt werden. Unter Verwendung dieser Herstellungsparameter werden Querszugfestigkeiten von 1,01 N/mm<sup>2</sup> (180 Sekunden), 0,86 N/mm<sup>2</sup> (240 Sekunden) und 0,85 N/mm<sup>2</sup> (300 Sekunden) bei den Mitteldichten Faserplatten erreicht. Die Querszüge fallen auch in dieser Serie mit ansteigender Presszeit leicht ab, was jedoch auf den hydrolysierten Harnstoff-Formaldehyd-Harz zurückzuführen ist.

Die gemessenen Dickenquellwerte nach DIN EN 317 liegen mit 11,58 % (180 Sekunden), 11,62 % (240 Sekunden) und 11,54 % (300 Sekunden) alle sehr nah beieinander und erfüllen durchweg den vorgegebenen Wert von weniger als 15 %. Dies ist auf die in dieser Serie verwendete Paraffindispersion HYDROWAX 138 der Fa. SASOL zurückzuführen.

Aufgrund dieser Ergebnisse kann ausgesagt werden, dass 25 % des bisher verwendeten Harnstoff-Formaldehyd-Harzes vom Typ Kauritec 407<sup>®</sup> flüssig der Fa. BASF (atro) durch die im Rahmen dieser Dissertation entwickelte Weizenprotein-Suspension zur Herstellung von 10 mm starken Faserplatten im Pilotmaßstab substituiert werden können. Durch die Zugabe von 1 % HYDROWAX 138 in die Bindemittelflotte lassen sich auf diese Weise MDF-Platten herstellen, die die mechanisch-technologischen Anforderungen, vorgegeben durch DIN, erfüllen.



**Abbildung 4-31: Mechanisch-technologische Eigenschaften der UF/WP (75/25) gebundenen MDF-Platten mit 1 % HYDROWAX 138**



**Abbildung 4-32: Mechanisch-technologische Eigenschaften der UF/WP (75/25) gebundenen MDF-Platten mit 1 % HYDROWAX 730**

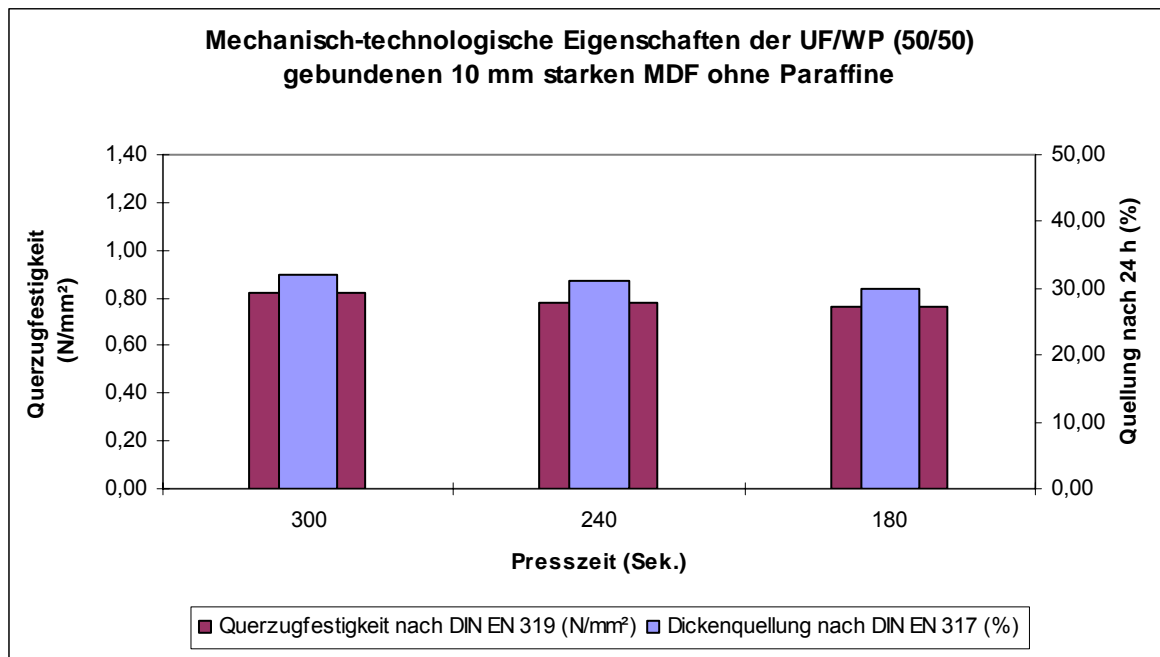
Auch die in Kombination mit dem Mischkondensat UF/WP (75/25) verwendete 1 %ige Paraffindispersion HYDROWAX 730 der Fa. SASOL (atro auf atro Fasermaterial) führt zu sehr guten mechanisch-technologischen Platteneigenschaften (vgl. Abbildung 4-32). Die Querzugfestigkeiten bewegen sich im Bereich von 0,95 N/mm<sup>2</sup> (180 Sekunden), 0,94 N/mm<sup>2</sup> (240 Sekunden) bis zu 1,03 N/mm<sup>2</sup> (300 Sekunden). Sie fallen, verglichen mit den unter Verwendung von HYDROWAX 138 hergestellten MDF-Platten, hinsichtlich der erzielten Querzugfestigkeiten sehr ähnlich aus. Dabei zeigt sich jedoch eine für das Mengenverhältnis dieses UF/WP-Mischkondensats (75/25) untypische Eigenschaft; bei dem höchsten in dieser Serie verwendeten Presszeitfaktor von 30 Sekunden pro mm Plattenstärke wurden im Mittel die besten Querzugfestigkeiten erzielt. Dies liegt vermutlich daran, dass die Rohdichte mit 815 kg/m<sup>3</sup> etwas höher bei diesen fünf Platten war. Verglichen mit den in Abbildung 4-30 dargestellten Ergebnissen unterstützt auch in diesem Fall möglicherweise das Hydrophobierungsmittel die Klebeigenschaften des verwendeten Mischkondensats da die Querzugfestigkeiten auch mit diesem Paraffin höher sind.

Die gemessenen Dickenquellwerte nach 24 h Wasserlagerung fallen bei einer 1 %igen Zugabe des Paraffins HYDROWAX 730 mit 12,54 % (180 Sekunden), 12,26 % (240 Sekunden) und 12,27 % (300 Sekunden) etwas höher aus als bei den mit HYDROWAX 138 hergestellten Platten unter Verwendung des UF/WP Mischkondensats im Mengenverhältnis 75:25. Es



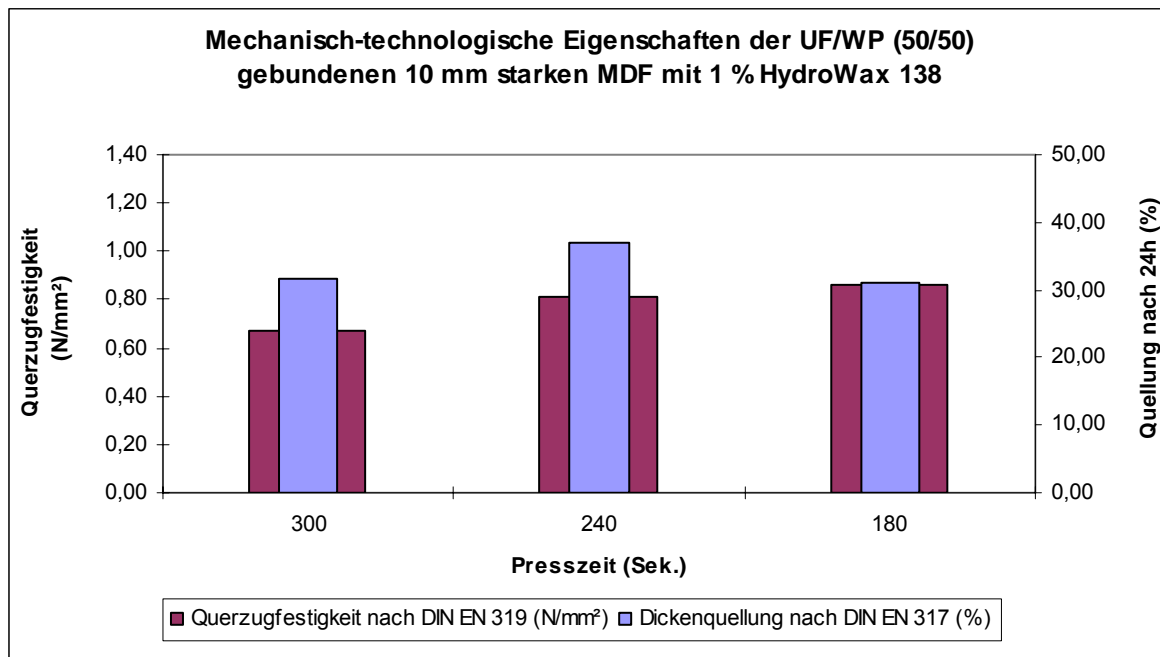
lassen sich mit ansteigender Presszeit keine deutlichen Unterschiede bei den Quellwerten feststellen. Bei der Betrachtung dieser Ergebnisse ist zu erkennen, dass auch durch eine 1 %ige Beimischung des Paraffins HYDROWAX 730 zum UF/WP-Mischkondensat (75/25) die Anforderungen nach DIN hinsichtlich der mechanisch-technologischen Eigenschaften der mit dieser Bindmittelflotte hergestellten MDF-Platten vollständig erfüllt werden.

Ändert man das Mengenverhältnis des Mischkondensats, bestehend aus Kauritec 407<sup>®</sup> flüssig und Weizenprotein, von 75:25 auf 50:50, so ist dies an den mechanisch-technologischen Eigenschaften der mit dieser Leimflotte hergestellten Mitteldichten Faserplatten feststellbar. Auch bei der Variante II wurde das Mischkondensat im Mengenverhältnis 50:50 ohne Hydrophobierungsmittel (vgl. Abbildung 4-33) bzw. wahlweise entweder mit 1 % HYDROWAX 138 (vgl. Abbildung 4-34) oder mit 1 % HYDROWAX 730 (vgl. Abbildung 4-35) der Fa. SASOL als Leimflotte zur Herstellung von 10 mm starken MDF-Platten verwendet. Bei der Verwendung des UF/WP-Mischkondensats (50/50) ohne Hydrophobierungsmittel ist in Abbildung 4-33 ersichtlich, dass alle mit dieser Leimflotte hergestellten MDF-Platten die durch DIN vorgegebenen Mindestanforderungen von  $>0,60 \text{ N/mm}^2$  bezüglich der Festigkeiten senkrecht zur Plattenebene bei sämtlichen, verwendeten Presszeitfaktoren erfüllen. Die gemessenen Querkzugfestigkeiten von  $0,76 \text{ N/mm}^2$  (180 Sekunden),  $0,78 \text{ N/mm}^2$  (240 Sekunden) und  $0,82 \text{ N/mm}^2$  (300 Sekunden) weisen bei diesem Mischkondensat die besten Querkzugfestigkeiten bei fünf Minuten Presszeit auf. Dies liegt vermutlich am geänderten Mischungsverhältnis der beiden in der Leimflotte enthaltenen Komponenten. Da der Anteil an Harnstoff-Formaldehyd-Harz verglichen mit den zuvor durchgeführten Versuchen der Variante I geringer geworden ist, wirkt sich auch die durch eine zu lange Presszeit hervorgerufene Hydrolysereaktion nicht mehr so extrem auf diese Festigkeiten aus. Das Weizenprotein benötigt zum Ausreagieren eine längere Presszeit als das Harnstoff-Formaldehyd-Harz. Der im Kauritec 407<sup>®</sup> flüssig enthaltene Formaldehyd dient den im Weizenprotein enthaltenen Proteinen als „*Crosslinker*“ (CERESTAR, 2004). Dabei kann es aufgrund der Reaktion dieser beiden Komponenten zu höheren Querkzugfestigkeiten kommen. Allerdings handelt es sich beim Kauritec 407<sup>®</sup> flüssig um einen Formaldehydarmen Leim, wie er in der Holzwerkstoffindustrie zurzeit verwendet wird. Daher wird der Großteil des Formaldehyds mit dem Harnstoff und möglicherweise nur ein sehr geringer Teil des Formaldehyds mit den Proteinen reagieren. Aufgrund dieser Tatsachen ist bei der Verwendung dieses Mischkondensats in dem vorliegenden Mengenverhältnis theoretisch bei ansteigenden Presszeiten mit höheren bzw. nicht stark veränderten Querkzugfestigkeiten zu rechnen. Dies spiegelt sich auch in den erzielten Ergebnissen wieder.



**Abbildung 4-33: Mechanisch-technologische Eigenschaften der UF/WP (50/50) gebundenen MDF-Platten ohne Hydrophobierungsmittel**

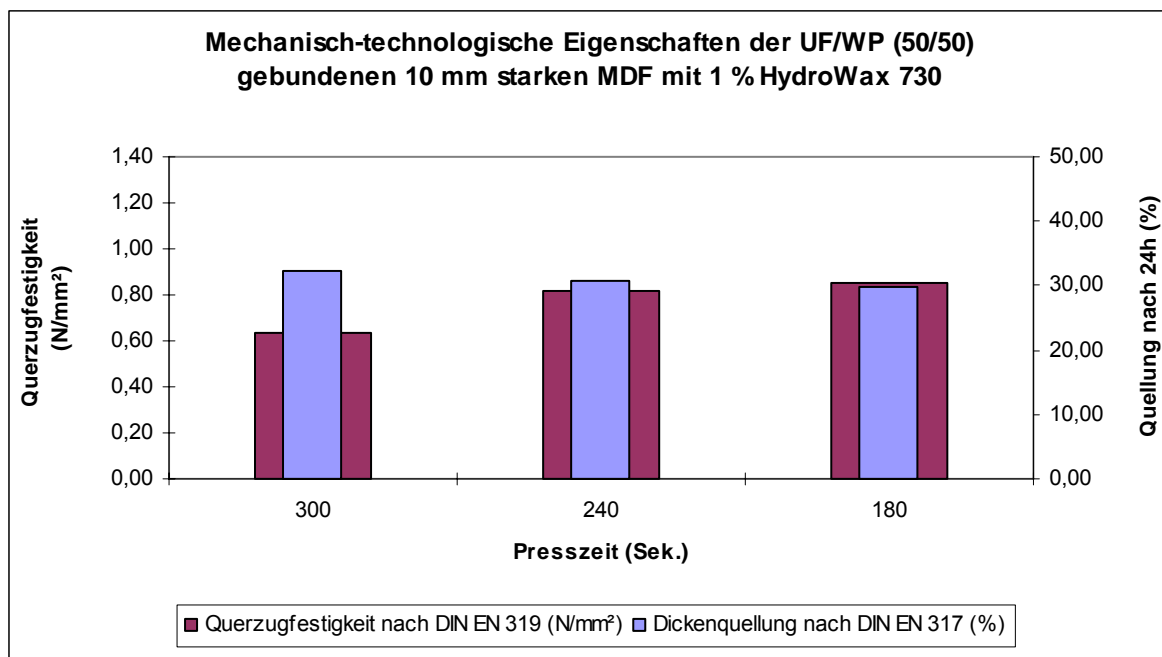
Die Dickenquellwerte nach 24 h Wasserlagerung liegen bei diesem UF/WP-Mischkondensat (50/50) ohne Hydrophobierungsmittel im Schnitt um 10 % höher als die vergleichbaren Werte der mit dem Mischkondensat im Verhältnis 75:25 ohne Hydrophobierungsmittel angefertigten MDF-Platten. Das ist bedingt durch den im Mischkondensat erhöhten Anteil an Weizenprotein. Dadurch wurde auch der Gehalt an Proteinen und mehrwertigen Zuckern in der Bindemittelflotte erhöht, was sich anhand einer gestiegenen Wasseraufnahme charakterisieren lässt. Bei der Erhöhung des Presszeitfaktors sind die Quellwerte von 29,80 % (180 Sekunden), 31,15 % (240 Sekunden) und 32,17 % (300 Sekunden) annähernd gleich geblieben. Sie liegen jedoch alle über dem durch DIN vorgegebenen Wert von  $\leq 15$  % und erfüllen damit diese Anforderung nicht.



**Abbildung 4-34: Mechanisch-technologische Eigenschaften der UF/WP (50/50) gebundenen MDF-Platten mit 1 % HYDROWAX 138**

Weder durch die 1 %ige Beimischung der Paraffindispersionen HYDROWAX 138 noch durch die 1 %ige Zugabe von HYDROWAX 730 (beide atro auf atro Fasermaterial) in das UF/WP-Mischkondensat (50/50) konnten die Quellwerte bei den mit diesen Bindemittelfloten hergestellten Mitteldichten Faserplatten gesenkt werden (vgl. dazu Abbildung 4-34 und Abbildung 4-35). Mit HYDROWAX 138 konnten, wie in Abbildung 4-34 dargestellt, Quellwerte von 31,13 % (180 Sekunden), 36,85 % (240 Sekunden) und 31,71 % (300 Sekunden) erreicht werden. Aufgrund der geringen Differenzen zu den Ergebnissen in Abbildung 4-33 kann beim direkten Vergleich der ermittelten Quellwerte nicht festgestellt werden, das überhaupt ein Hydrophobierungsmittel verarbeitet wurde. Erstaunlich bei den MDF-Platten dieser Serie sind die Querzugfestigkeiten. Diese liegen mit 0,86 N/mm<sup>2</sup> (180 Sekunden), 0,81 N/mm<sup>2</sup> (240 Sekunden) und 0,67 N/mm<sup>2</sup> (300 Sekunden) über den vom DEUTSCHEN INSTITUT FÜR NORMUNG vorgegebenen Anforderungen von 0,60 N/mm<sup>2</sup>. Die unter Verwendung von HYDROWAX 730 und dem UF/WP-Mischkondensat (50/50) angefertigten Faserplatten zeigen ähnliche Werte hinsichtlich der Querzugfestigkeiten und der Dickenquellung nach 24 h Wasserlagerung (vgl. Abbildung 4-35). Auch bei diesem Hydrophobierungsmittel sind keine positiven Einflüsse auf die Quellwerte in Kombination mit diesem Mischkondensat erzielt worden. Die Werte von 29,81% (180 Sekunden), 30,82 % (240 Sekunden) und 32,23 % (300 Sekunden) unterscheiden sich kaum von den Ergebnissen die mit HYDROWAX 138 bzw. ganz ohne Hydrophobierungsmittel erzielt wurden. Parallelen

zu diesen Versuchen zeigen sich auch bei den gemessenen Querkzugfestigkeiten dieser Mitteldichten Faserplatten. Werte von 0,85 N/mm<sup>2</sup> (180 Sekunden), 0,82 N/mm<sup>2</sup> und 0,64 N/mm<sup>2</sup> (300 Sekunden) erfüllen bei allen verwendeten Presszeitfaktoren die DIN-Norm hinsichtlich der Festigkeit senkrecht zur Plattenebene. Die erhöhten Querkzugfestigkeiten sind vermutlich auf die bereits bei den Platten der Variante I festgestellte Verbesserung der Klebeigenschaften durch die Hydrophobierungsmittel zurückzuführen. Allerdings kommt es anscheinend zwischen dem Weizenprotein und den Paraffinen zu einer Reaktion, durch die die Wirkungsweise der Hydrophobierungsmittel nahezu vollständig aufgehoben wird und die Verbesserung der Klebeigenschaften des Mischkondensats nicht so optimal durch die Paraffine unterstützt werden wie bei den in Variante I mit dem UF/WP-Mischkondensat 75:25 hergestellten Mitteldichten Faserplatten. Auch die Querkzugfestigkeiten sind in den beiden Serien, in denen die Hydrophobierungsmittel verwendet wurden, bei der jeweils längsten Presszeit am geringsten. Diese Eigenschaft ist möglicherweise auf eine negative Wechselwirkung zwischen den Paraffinen und dem Weizenprotein bei längeren Presszeiten zurückzuführen.



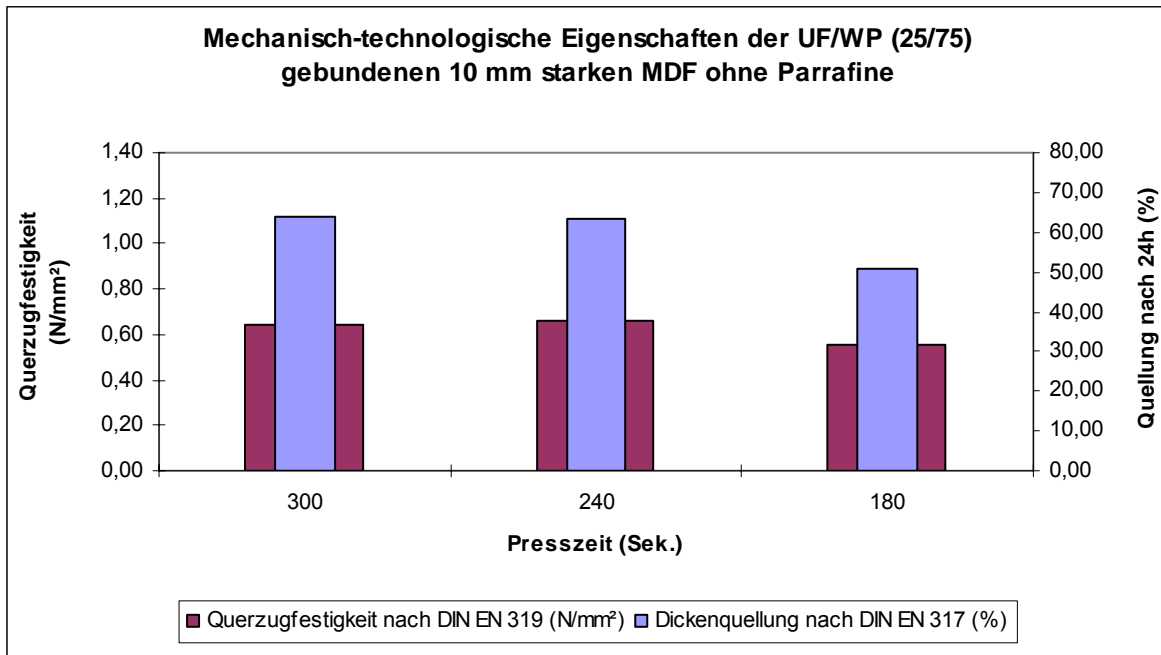
**Abbildung 4-35: Mechanisch-technologische Eigenschaften der UF/WP (50/50) gebundenen MDF-Platten mit 1 % HYDROWAX 730**

Wird das Mischungsverhältnis der beiden Komponenten Harnstoff-Formaldehyd-Harz und Weizenprotein im Mischkondensat von 50:50 auf 25:75 geändert so sind die Einflüsse des erhöhten Weizenproteinanteils an auch in den mechanisch-technologischen Eigenschaften der mit diesem Mischkondensat hergestellten Mitteldichten Faserplatten zu erkennen. In

Abbildung 4-36 sind die mechanisch-technologischen Eigenschaften der mit dem UF/WP-Mischkondensat (25/75) gebundenen und ohne Zugabe weiterer Paraffine hergestellten, 10 mm starken Mitteldichten Faserplatten der Variante III in Form von Balkendiagrammen dargestellt. Dabei zeigt sich, dass sich die Querkzugfestigkeiten mit ansteigendem Presszeitfaktor leicht verbessern. Bei den gemessenen Querkzugfestigkeiten von 0,56 N/mm<sup>2</sup> (180 Sekunden), 0,66 N/mm<sup>2</sup> (240 Sekunden) und 0,64 N/mm<sup>2</sup> (300 Sekunden) ist ersichtlich, dass erst ab mit einem Pressfaktor von 24 Sekunden pro mm Plattenstärke höhere Querkzugfestigkeiten erzielt werden mit denen die Vorgaben durch DIN erfüllt werden können. Die mit steigender Presszeit ansteigenden Querkzugfestigkeiten im Bereich von drei, vier und fünf Minuten sind charakteristisch für das Weizenprotein. Dieses typische Merkmal wird noch durch die Tatsache verstärkt, dass sich bei diesen MDF-Platten das Harnstoff-Formaldehyd-Harz nur noch geringfügig auf die Querkzugfestigkeiten auswirkt da es mengenmäßig nur noch 25 Prozent des Mischkondensats ausmacht. Auch die Funktion des im UF-Harz enthaltenen Formaldehyds als Crosslinker mit dem in der Weizenprotein-Suspension enthaltenen Proteinen kann aufgrund des sehr geringen UF-Harz-Anteils im Mischkondensat nur noch sehr begrenzt bis gar nicht mehr ablaufen. Daher sind die Querkzugfestigkeiten geringer als bei den anderen Mengenverhältnissen der Mischkondensate.

Die erzielten Quellwerte liegen mit 50,77 % (180 Sekunden), 63,28 % (240 Sekunden) und 63,77 % (300 Sekunden) alle über dem durch DIN geforderten Höchstwert von weniger als 15 Prozent. Dies ist durch die nur noch gering auftretende Hydrolysereaktion des UF-Harzes bei zu langen Presszeiten und vor allem durch das typische Wasseraufnahmeverhalten von Zuckern und Hemicellulosen im Weizenprotein bedingt.

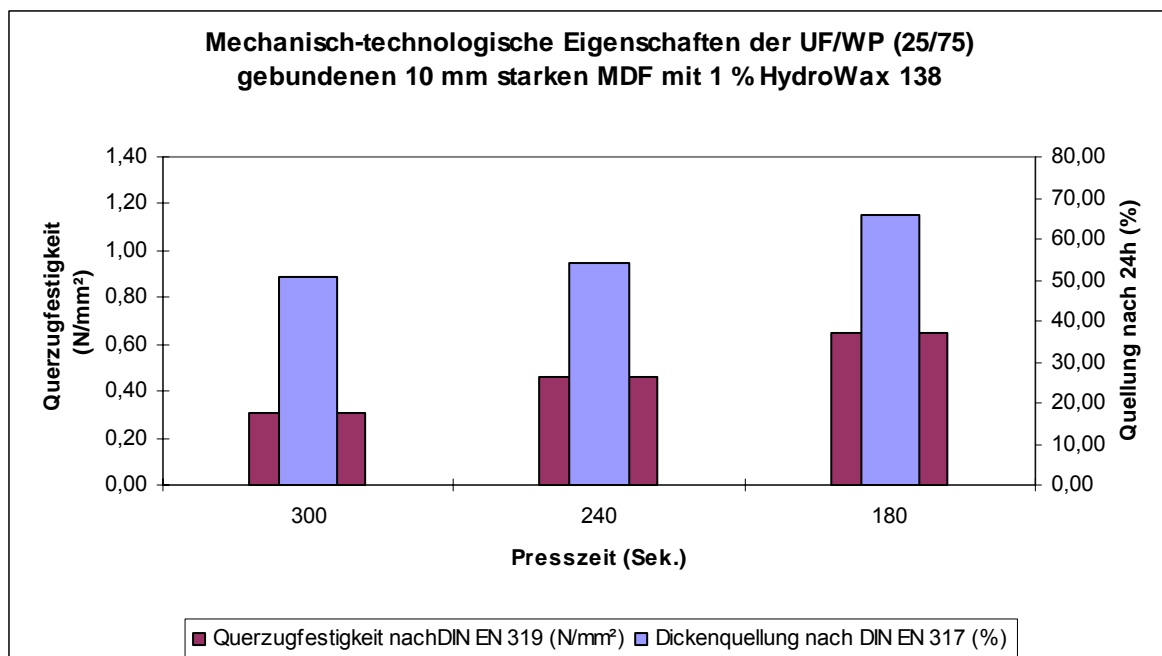
Abschließend lässt sich über diese Serie der Variante III aussagen, dass eine Kombination der beiden Bindemittelkomponenten Kauritec 407<sup>®</sup> flüssig der Fa. BASF und der Weizenprotein-Suspension im Mischungsverhältnis 25:75 ohne Zugabe von Hydrophobierungsmitteln bei dem verwendeten Beleimungsgrad von 12 % (atro Mischkondensat auf atro Faser) zur Zeit nicht zur Herstellung von 10 mm starken MDF-Platten als Leimflotte geeignet ist, da die Dickenquellwerte nach 24 h Wasserlagerung der hergestellten MDF-Platten deutlich über dem vorgegebenen Wert von 15 Prozent liegen.



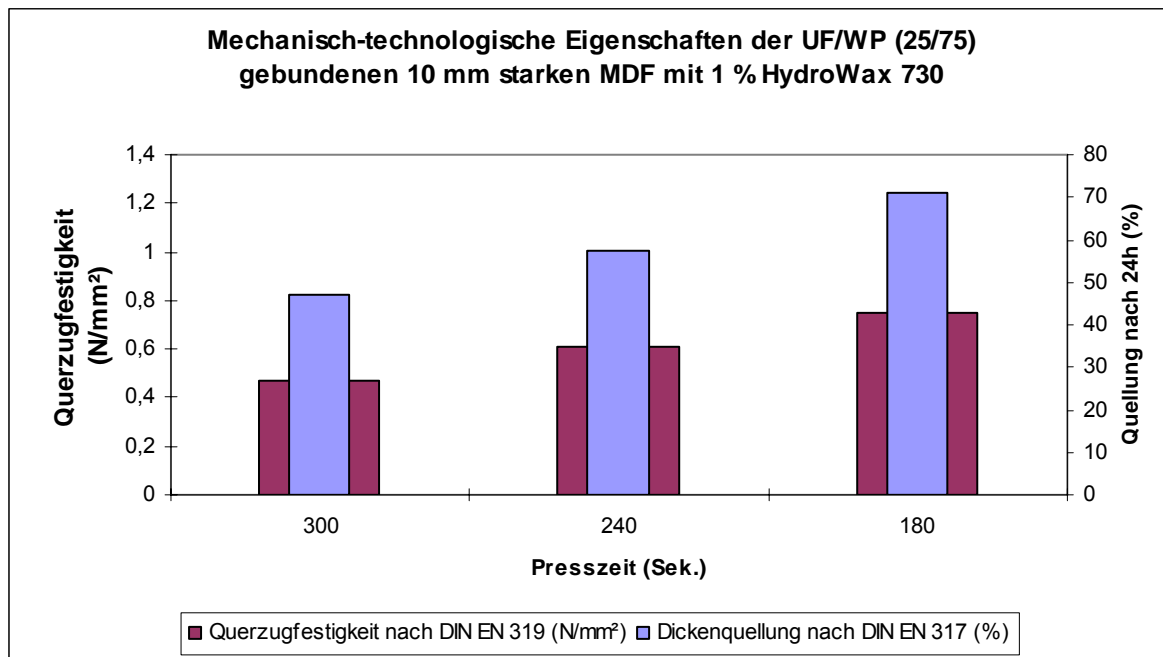
**Abbildung 4-36: Mechanisch-technologische Eigenschaften der UF/WP (25/75) gebundenen MDF-Platten ohne Hydrophobierungsmittel**

Die mechanisch-technologischen Eigenschaften der unter Verwendung der Hydrophobierungsmittel HYDROWAX 138 und HYDROWAX 730 der Fa. SASOL hergestellten mit dem UF/WP-Mischkondensat (25/75) gebundenen 10 mm starken Mitteldichten Faserplatten sind in Abbildung 4-37 und Abbildung 4-38 dargestellt. Dabei zeigt sich bei beiden Serien, dass sowohl durch die Beimischung von 1 % HYDROWAX 138 als auch durch die Zugabe 1 % HYDROWAX 730 zur Bindemittelflotte die Quellwerte der MDF-Platten nach 24 h Wasserlagerung nur bedingt verbessert werden können. Die unter Verwendung von HYDROWAX 138 erzielten Quellwerte von 66,08 % (180 Sekunden), 54,01 % (249 Sekunden) und 50,77 % (300 Sekunden) liegen alle weit über dem geforderten Höchstwert von  $\leq 15$  Prozent. Allerdings ist mit ansteigender Presszeit eine Verbesserung der hydrophoben Eigenschaften der MDF-Platten ersichtlich. Das gleiche Verhalten zeigt sich bei der Zugabe von HYDROWAX 730 zum Mischkondensat. Die Dickenquellwerte verbessern sich auch in dieser Serie von 71,05 % (180 Sekunden) über 57,54 % (240 Sekunden) bis zu 47,25 % (300 Sekunden) mit steigendem Presszeitfaktor. Jedoch erfüllen auch die in dieser Serie erzielten Quellwerte nicht die gültige DIN-Norm. Es ist weiterhin in diesen Serien festzustellen, dass die verwendeten Paraffine sich anscheinend negativ auf die erzielten Querzugfestigkeiten auswirken. Die mit HYDROWAX 138 gemessenen Querzugfestigkeiten von 0,65 N/mm<sup>2</sup> (180 Sekunden), 0,46 N/mm<sup>2</sup> (240 Sekunden) und 0,31 N/mm<sup>2</sup> (300 Sekunden) fallen deutlich mit ansteigender Presszeit ab und erfüllen nur bei einem Presszeitfaktor von 18 Sekunden pro mm

Plattendicke die vorgegebenen DIN-Normen. Auch bei der Zugabe von 1 % HYDROWAX 730 zur Bindemittelflotte zeigte sich mit gemessenen Querkzugfestigkeiten von 0,75 N/mm<sup>2</sup> (180 Sekunden), 0,61 N/mm<sup>2</sup> (240 Sekunden) und 0,47 N/mm<sup>2</sup> (300 Sekunden) ein ähnliches Verhalten der MDF-Platten hinsichtlich ihrer mechanisch-technologischen Eigenschaften. Bei der Betrachtung von Abbildung 4-37 und Abbildung 4-38 fällt auf, dass bei einem Mengenverhältnis von 25:75 (UF/WP) im Mischkondensat die Verbesserung der Quellwerte mit einer Verschlechterung der Querkzugfestigkeiten zusammenhängt. Diese nicht unbekannt, negative Auswirkung von Hydrophobierungsmitteln auf die Klebeigenschaften des Bindemittels, ist in den Varianten I bis III erst bei einem Mischungsverhältnis von 25:75 (UF/WP) festzustellen.



**Abbildung 4-37: Mechanisch-technologische Eigenschaften der UF/WP (25/75) gebundenen MDF-Platten mit 1 % HYDROWAX 138**

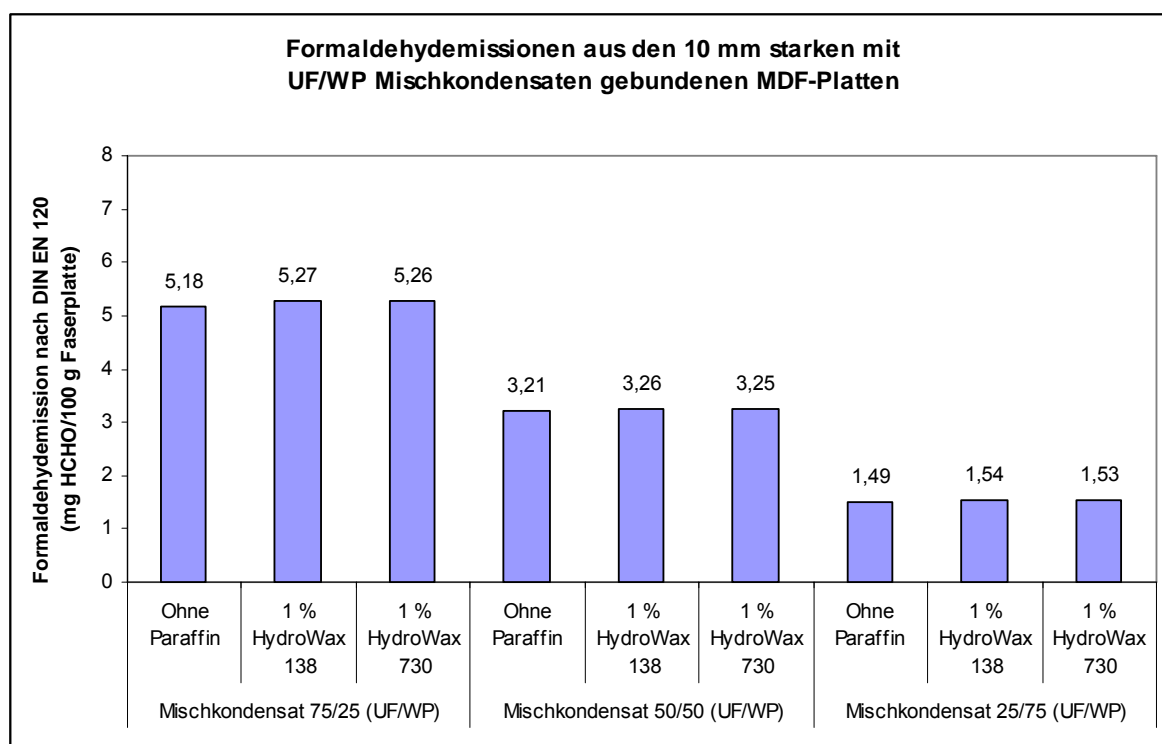


**Abbildung 4-38: Mechanisch-technologische Eigenschaften der UF/WP (25/75) gebundenen MDF-Platten mit 1 % HYDROWAX 730**

Bei Betrachtung der Formaldehydemissionen aus den mit Mischkondensaten, bestehend aus UF-Harz und Weizenprotein, hergestellten Mitteldichten Faserplatten ist zu erkennen, dass die Formaldehydemission mit den verwendeten Mischungsverhältnissen der beiden Komponenten und den verwendeten Paraffinen HYDROWAX 138 und HYDROWAX 730 der Fa. SASOL zusammenhängen (vgl. Abbildung 4-39). Es ist ersichtlich, dass bei der Verwendung von Paraffinen in der Leimflotte die Formaldehydemissionen immer etwas höher sind, vergleichen mit den Leimflotten eines Mischungsverhältnisses ohne Paraffin. Bei einer Reduzierung des UF-Harz Anteils im Mischkondensat verringern sich natürlich auch die Formaldehydemissionen prozentual, da von Anfang an weniger Formaldehyd, bei gleich bleibendem Plattengewicht, eingesetzt wird. Vergleicht man diese Werte nun mit den Formaldehydemissionen aus rein UF-Harz gebundenen, 10 mm starken Mitteldichten Faserplatten (vgl. Abbildung 4-25), so sind die Formaldehydemissionen bei den verwendeten Mischkondensaten grundsätzlich etwas geringer als die, unter Berücksichtigung der eingesetzten Menge an Formaldehyd, erzielten Ergebnisse bei den rein UF-Harz gebundenen MDF-Platten. Dies ist mit dem Einsatz des Weizenproteins zu erklären, da die im natürlichen Bindemittel enthaltenen Proteine als Formaldehydfängersubstanz fungieren können. Der Formaldehyd, der beim Heißpressen der Faserplatten nicht mit dem Harnstoff reagiert, wird über chemische Prozesse durch die Einwirkung von Hitze und Druck von den Proteinen gebunden (CERESTAR, 2004). Dies ist der bereits bei den Querzugfestigkeiten der mit UF/WP-



Mischkondensaten hergestellten Mitteldichten Faserplatten beschriebene „*Crosslinking-Effekt*“ zwischen dem Formaldehyd und den Proteinen. Die deutlichste Reduzierung der Formaldehydabgabe ist bei dem Mischungsverhältnis 50:50 feststellbar, da in diesem Fall genügend Proteine und genügend Formaldehyd für diese Reaktion vorliegen. Aber auch bei dem Verhältnis von UF zu WP von 75:25 sind Unterschiede hinsichtlich der Formaldehydabgabe, verglichen mit den rein UF-Harz gebundenen Faserplatten, ersichtlich. Das bedeutet, dass es bereits bei diesem Mischungsverhältnis zum „*Crosslinking-Effekt*“ zwischen dem Formaldehyd und den Proteinen kommt. Nur beim Verhältnis von UF zu WP von 25:75 ist die nur gering erzielte Formaldehydreduzierung auf den von vorn herein geringen Formaldehydgehalte des Mischkondensats zurückzuführen.



**Abbildung 4-39: Formaldehydemissionen aus den mit Mischkondensaten aus UF-Harz und WP hergestellten, 10 mm starken MDF-Platten nach der Perforator-Methode**

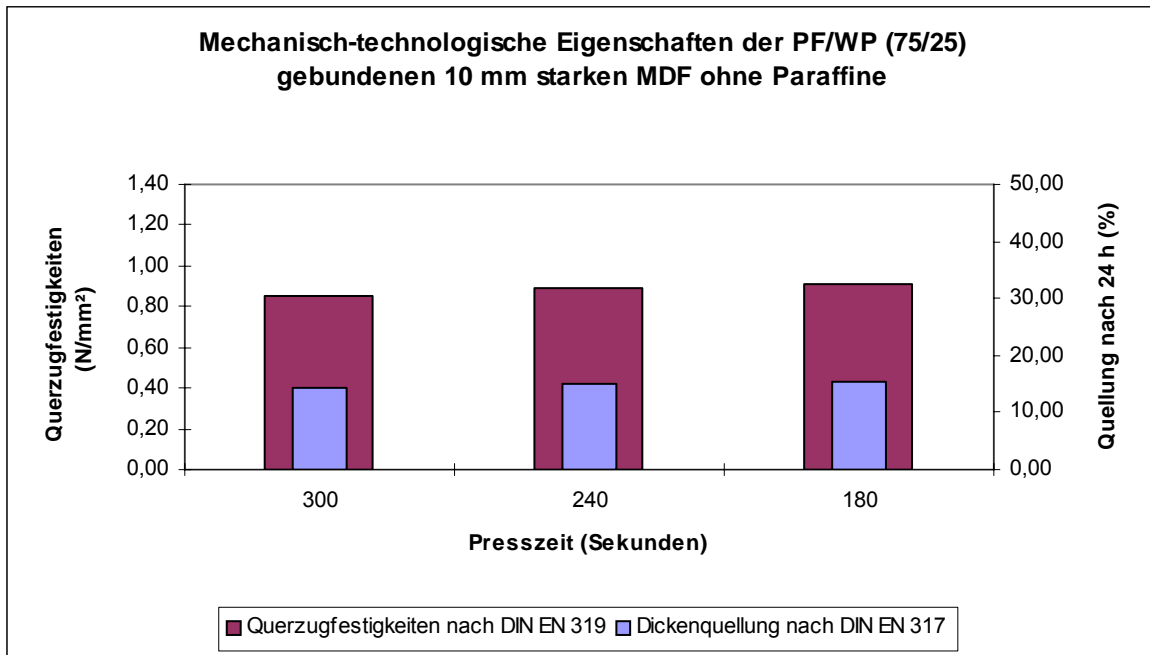
Abschließend lässt sich über die Versuchsserien Variante I bis III aussagen, dass eine Substitution des Harnstoff-Formaldehyd-Harzes Kauritec 407<sup>®</sup> flüssig der Fa. BASF durch die entwickelte Weizenprotein-Suspension zu 25 % bei der Herstellung von 10 mm starken Mitteldichten Faserplatten im Pilotmaßstab realisieren lässt. Dabei ist die Zugabe von 1 % HYDROWAX 138 der Fa. SASOL notwendig um die vorgegebenen Anforderungen hinsichtlich der Dickenquellwerte nach 24 h Wasserlagerung zu erfüllen. Die durch DIN vorgegebenen, maximalen Formaldehydemissionen wurden in allen Fällen deutlich unterschritten. Die

höchsten Querzugfestigkeiten kombiniert mit sehr guten Quellwerten wurden bei einem Presszeitfaktor von 18 Sekunden pro mm Plattendicke auf der Pilotheißpresse der Fa. SIEMPELKAMP erzielt. Dabei stellt eine 25 %ige Substitution von Harnstoff-Formaldehyd-Harz durch die Weizenprotein-Suspension einen bedeutenden Entwicklungsschritt dar, durch den auch die späteren Formaldehydemissionen dieser Platten deutlich gesenkt werden können. Die Verwendung dieses Mischkondensats ist eine wichtige Alternative zur effektiven Senkung der Formaldehydemissionen aus Mittellichten Faserplatten und könnte im weiteren Verlauf der anhaltenden aktuellen Formaldehyddiskussion eine entscheidende Rolle spielen. Des Weiteren stellte sich bei den angefertigten Serien der Variante I bis III heraus, dass die verwendeten Hydrophobierungsmittel HYDROWAX 138 und HYDROWAX 730 der Fa. SASOL, je nach Mengenverhältnis der Komponenten UF-Harz und Weizenprotein im Mischkondensat, sowohl die Querzugfestigkeiten als auch die Quellwerte der MDF-Platten unterschiedlich beeinflussten. Bei dem zuerst untersuchten Mischungsverhältnis von 75:25 (UF/WP) unterstützten die Paraffine die Klebeeigenschaften des Mischkondensats bzw. zeigten keinen negativen Einfluss auf die Querzugfestigkeiten und führten zusätzlich zu guten Ergebnissen bei den Quellwerten. Beim Mischungsverhältnis von 50:50 (UF/WP) zeigte sich durch die erzielten Ergebnisse ein anderes Bild. Die Querzugfestigkeiten haben sich gegenüber dem zuerst verwendeten Mischungsverhältnis von 75:25 (UF/WP) nicht wesentlich geändert, jedoch hatte keines der beiden verwendeten Paraffine einen positiven Einfluss auf die Dickenquellwerte nach 24 h Wasserlagerung der mit diesem Mischkondensat (50/50) hergestellten Mitteldichten Faserplatten. Beim Mischungsverhältnis von 25:75 (UF/WP) zeigte sich der negative Einfluss der Hydrophobierungsmittel auf die Querzugfestigkeiten der MDF-Platten mit ansteigender Presszeit. Es konnte zwar eine leichte hydrophobierende Wirkung der beiden Paraffine festgestellt werden allerdings fielen die Querzugfestigkeiten der mit diesem Mischkondensat und diesen Hydrophobierungsmitteln hergestellten MDF-Platten mit einem Anstieg der Presszeiten deutlich ab.

#### 4.2.4 Ergebnisse der PF-Harz/Weizenprotein gebundenen Mitteldichten Faserplatten

Die mechanisch-technologischen Eigenschaften der im Rahmen dieser Dissertation angefertigten Mitteldichten Faserplatten, gebunden mit Mischkondensaten aus Phenol-Formaldehyd-Harz und Weizenprotein (vgl. Kapitel 3.2.5), sind in Abbildung 4-40 bis Abbildung 4-48 dargestellt. Die Rohdichtermittlung der Faserplatten aus Variante I bis III (vgl. Tabelle 3-11) ergab ein durchschnittliches Gewichts/Volumen-Verhältnis von  $807 \text{ kg/m}^3$ . Die Platten liegen somit im Bereich der angestrebten Zielrohddichte von  $800 \text{ kg/m}^3$ . Die Dicke der Platten ergab einen Durchschnittswert von  $9,56 \text{ mm}$ , womit die theoretische Stärke von  $10 \text{ mm}$  erreicht ist. Die graphischen Darstellungen sind sowohl im Hinblick auf die einzelnen Varianten bezüglich der unterschiedlichen Mengenverhältnisse der Bindemittelkomponenten als auch hinsichtlich der Zugabe der Paraffine HYDROWAX 138 bzw. HYDROWAX 730 zur Leimflotte unterteilt. Die Verwendung der drei unterschiedlichen Presszeitfaktoren ist dabei immer pro Serie in den graphischen Darstellungen berücksichtigt. Die graphischen Darstellungen beinhalten zur übersichtlicheren Darstellung nur die Querkzugfestigkeiten nach DIN EN 319 und die Dickenquellwerte nach DIN EN 317 der untersuchten Mitteldichten Faserplatten.

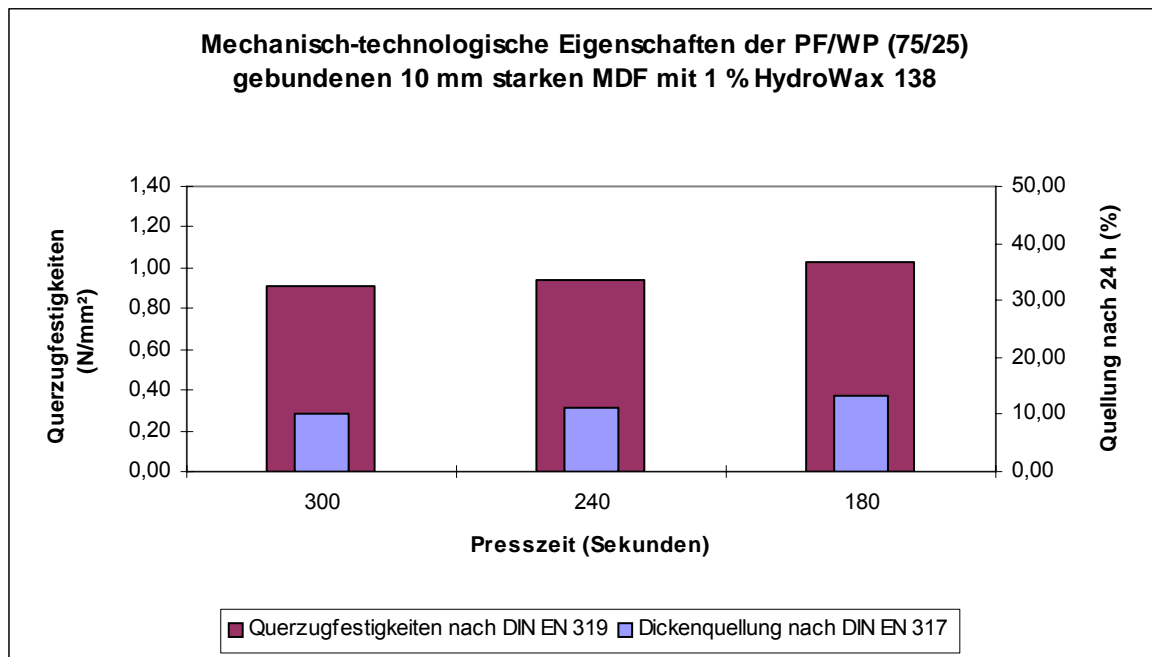
Bei der Betrachtung der mit dem PF/WP Mischkondensat im Verhältnis 75:25 ohne Zugabe von Hydrophobierungsmitteln gebundenen  $10 \text{ mm}$  starken Mitteldichten Faserplatten (vgl. Abbildung 4-40) fällt auf, dass die erzielten Querkzugfestigkeiten von  $0,91 \text{ N/mm}^2$  (180 Sekunden),  $0,89 \text{ N/mm}^2$  (240 Sekunden) und  $0,85 \text{ N/mm}^2$  (300 Sekunden) mit ansteigender Presszeit etwas geringer werden, in allen Fällen jedoch die durch DIN geforderten  $0,60 \text{ N/mm}^2$  bzgl. der Festigkeiten senkrecht zur Plattenebene grundsätzlich erfüllt werden. Die leicht abfallenden Querkzugfestigkeiten sind durch die längeren Presszeiten bedingt. Dabei handelt es sich jedoch nur um einen leichten Rückgang der Querkzugfestigkeiten. Die hohen Querkzugfestigkeiten beruhen zum einen auf dem erhöhten Anteil an Phenol-Formaldehyd-Harz in der Leimflotte und zum anderen auf dem während des Heißpressvorgangs stattfindendem „Crosslinking-Effekt“ zwischen den Proteinen in der Weizenprotein-Suspension und dem Formaldehyd im PF-Harz (KRUG und SIRCH, 1998; CERESTAR, 2004). Die Reaktion von Proteinen und Formaldehyd wurde auch bereits unter anderem von KAMOUN et al. (1998) erforscht.



**Abbildung 4-40: Mechanisch-technologische Eigenschaften der PF/WP (75/25) gebundenen MDF-Platten ohne Hydrophobierungsmittel**

Die positiven Auswirkungen der längeren Presszeiten bei dem PF/WP gebundenen Mitteldichten Faserplatten sind bei den sinkenden Dickenquellwerten nach 24 h Wasserlagerung zu beobachten. Sie sinken von durchschnittlich 15,37 % (180 Sekunden) über 14,89 % auf 14,51 % ab und erfüllen bei einer Zugabe von 25 % Weizenprotein zum PF-Harz bereits bei den Presszeitfaktoren 24 und 30 Sekunden pro Millimeter Plattendicke den durch DIN vorgegebenen Maximalwert von 15 % bei einer Plattenstärke von 9 bis 12 mm. Die längeren Presszeiten wirken sich wie eine thermische Nachbehandlung positiv auf die Quellwerte der PF/WP gebundenen MDF-Platten aus; ähnlich wie es auch bereits bei den rein PF-Harz gebundenen Mitteldichten Faserplatten (vgl. Kapitel 4.2.2) zu erkennen war.

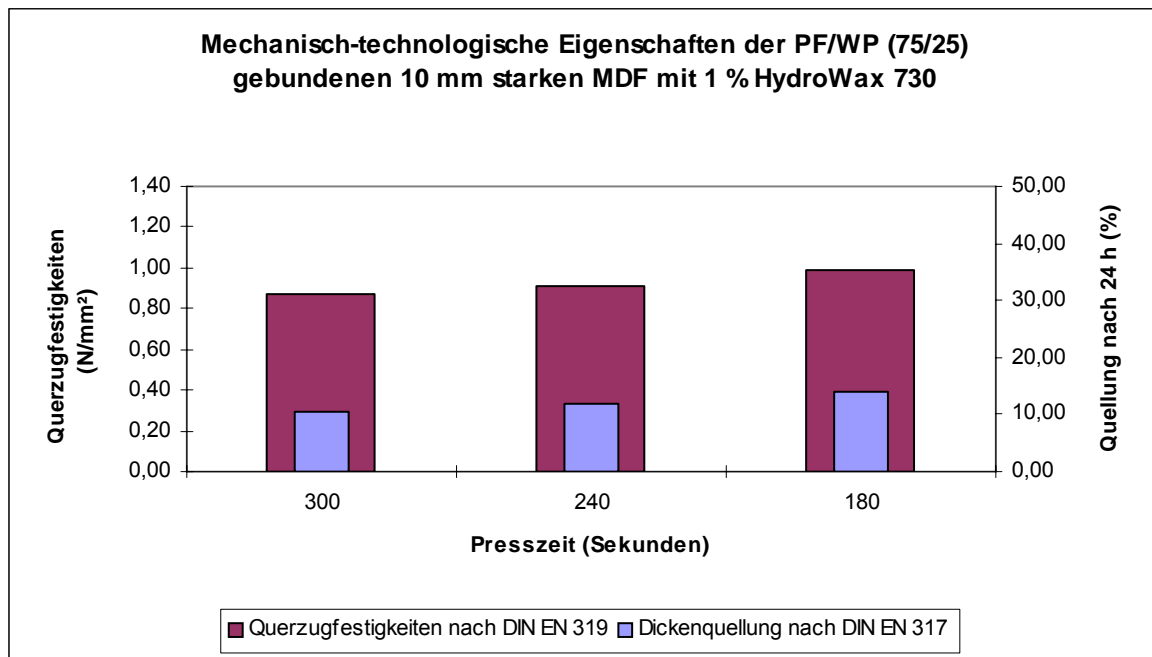
Bei Zugabe von 1 % HYDROWAX 138 der Fa. SASOL zur PF/WP Leimflotte im Verhältnis 75:25 ist zu erkennen, dass die Querzugfestigkeiten auch in dieser Serie mit ansteigender Presszeit etwas schwächer werden (vgl. Abbildung 4-41) allerdings sind sie durchweg höher als bei den ohne Paraffin hergestellten Platten. Die erzielten Werte von 1,03 N/mm<sup>2</sup>, 0,94 N/mm<sup>2</sup> und 0,91 N/mm<sup>2</sup> liegen über dem Richtwert von 0,60 N/mm<sup>2</sup>. Aufgrund der höheren Querzugfestigkeiten ist davon auszugehen, dass das verwendete Hydrophobierungsmittel HYDROWAX 138 in dieser Mischkondensatleimflotte die Festigkeiten der Platten unterstützt, indem es sich möglicherweise positiv auf die Klebeeigenschaften der in der Leimflotte befindlichen Bindemittelkomponenten auswirkt.



**Abbildung 4-41: Mechanisch-technologische Eigenschaften der PF/WP (75/25) gebundenen MDF-Platten mit 1 % HYDROWAX 138**

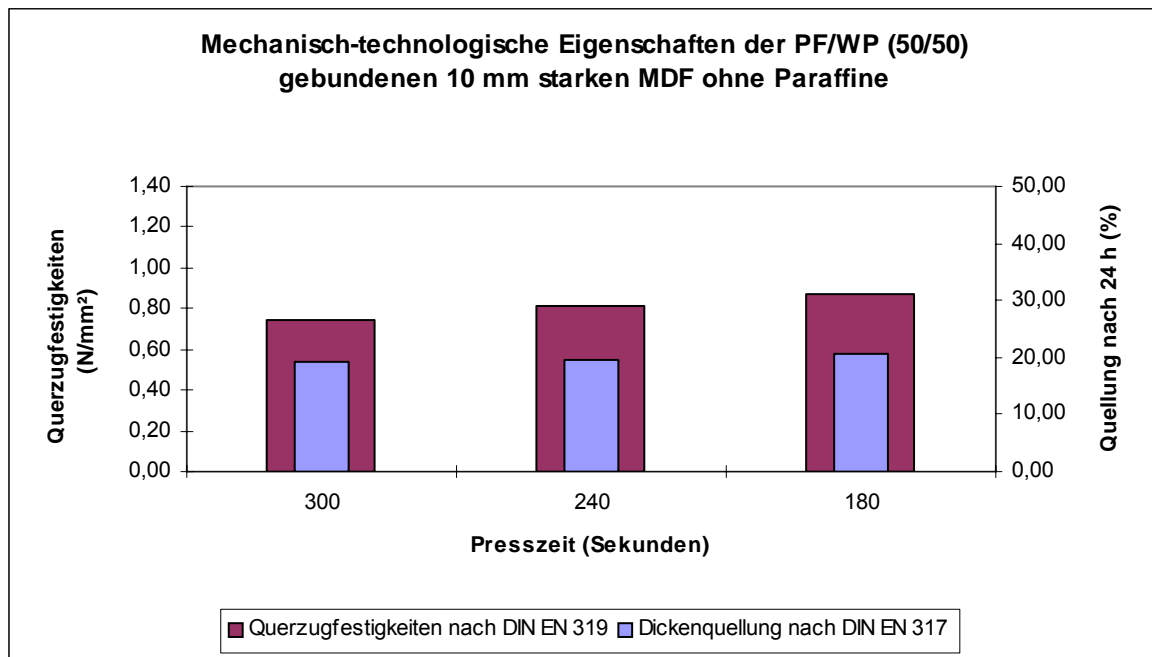
Diese Auswirkung des Hydrophobierungsmittels war bereits auch bei den mit Harnstoff-Formaldehyd-Harz und Weizenproteinen im Verhältnis 75:25 gebundenen MDF-Platten (vgl. Kapitel 4.2.3) zu erkennen. Die Quellwerte der PF/WP (75/25) gebundenen MDF-Platten liegen aufgrund der Zugabe von 1 % HYDROWAX 138 zur Leimflotte mit 13,21 % (180 Sekunden), 11,34 % (240 Sekunden) und 10,07 % (300 Sekunden) deutlich unter dem Richtwert von  $\leq 15$  %. Sie fallen mit steigender Presszeit weiter ab, was bereits auch bei den PF/WP gebundenen MDF-Platten ohne Paraffinzugabe zu erkennen war.

Auch die Zugabe von 1 % HYDROWAX 730 der Fa. SASOL zum PF/WP Mischkondensat im Mengenverhältnis 75:25 hat Auswirkungen auf die erzielten Querzugfestigkeiten und Dickenquellwerte der mit dieser Leimflotte hergestellten Mitteldichten Faserplatten (vgl. Abbildung 4-42). Die gemessenen Querzugfestigkeiten liegen mit Werten von 0,99 N/mm<sup>2</sup> (180 Sekunden), 0,91 N/mm<sup>2</sup> (240 Sekunden) und 0,87 N/mm<sup>2</sup> (300 Sekunden) auch über den Festigkeiten der ohne Zugabe von Paraffinen hergestellten MDF-Platten (vgl. dazu Abbildung 4-40). Daher lässt sich auch über dieses Hydrophobierungsmittel aussagen, dass es möglicherweise die Klebeigenschaften des verwendeten PF/WP Mischkondensats im Verhältnis 75:25 positiv beeinflusst hat. Auch die durch die Zugabe von 1 % HYDROWAX 730 erzielten Quellwerte nach 24 h Wasserlagerung der MDF-Platten liegen mit Werten von 13,93 % (180 Sekunden), 11,78 % (240 Sekunden) und 10,41 % (300 Sekunden) unter dem Maximalwert von 15 %.



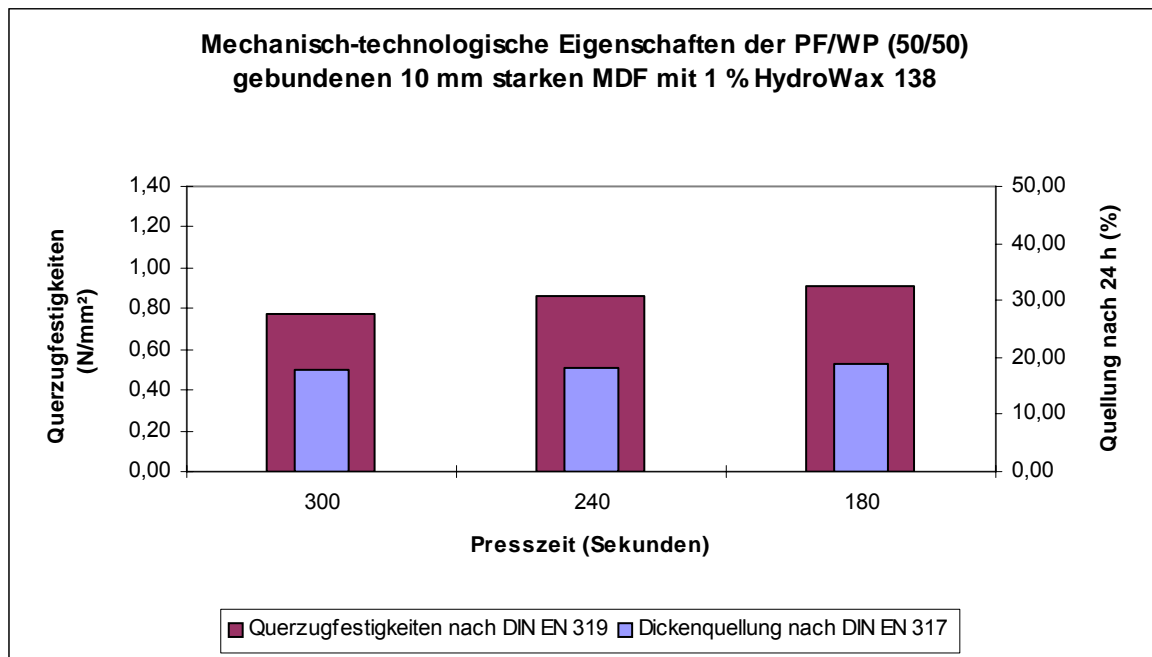
**Abbildung 4-42: Mechanisch-technologische Eigenschaften der PF/WP (75/25) gebundenen MDF-Platten mit 1 % HYDROWAX 730**

Durch die Änderung des Mengenverhältnisses der beiden Leimflottenkomponenten Phenol-Formaldehyd-Harz und Weizenprotein von 75:25 in 50:50 können Auswirkungen des erhöhten Weizenproteingehaltes an den mechanisch-technologischen Eigenschaften der mit diesem Mischkondensat gebundenen MDF-Platten beobachtet werden. Die mit dem PF/WP-Mischkondensat (50/50) ohne Zugabe von Hydrophobierungsmitteln gebundenen Mitteldichten Faserplatten weisen, wie in Abbildung 4-43 zu erkennen durchschnittliche Querzugfestigkeiten von 0,87 N/mm<sup>2</sup> (180 Sekunden), 0,81 N/mm<sup>2</sup> (240 Sekunden) und 0,74 N/mm<sup>2</sup> (300 Sekunden) auf. Sie liegen vermutlich aufgrund des erhöhten Weizenproteingehaltes unter den Festigkeiten der mit PF/WP Mischkondensaten im Verhältnis 75:25 hergestellten MDF-Platten, erfüllen aber den Mindestwert von 0,60 N/mm<sup>2</sup>. Die Ergebnisse des Quelltests dieser MDF-Platten nach 24 h Wasserlagerung liegen mit Werten von 20,75 % (180 Sekunden), 19,53 % (240 Sekunden) und 19,13 % (300 Sekunden) nur gering über dem durch DIN geforderten Höchstwert von 15 Prozent. Dies lässt sich mit dem erhöhten Anteil an Weizenprotein und der damit verbundenen höheren Menge an Zuckern und Hemicellulosen in der Leimflotte begründen. Allerdings ist auch bei dieser Serie feststellbar, dass die Quellwerte mit steigender Presszeit geringer werden.



**Abbildung 4-43: Mechanisch-technologische Eigenschaften der PF/WP (50/50) gebundenen MDF-Platten ohne Hydrophobierungsmittel**

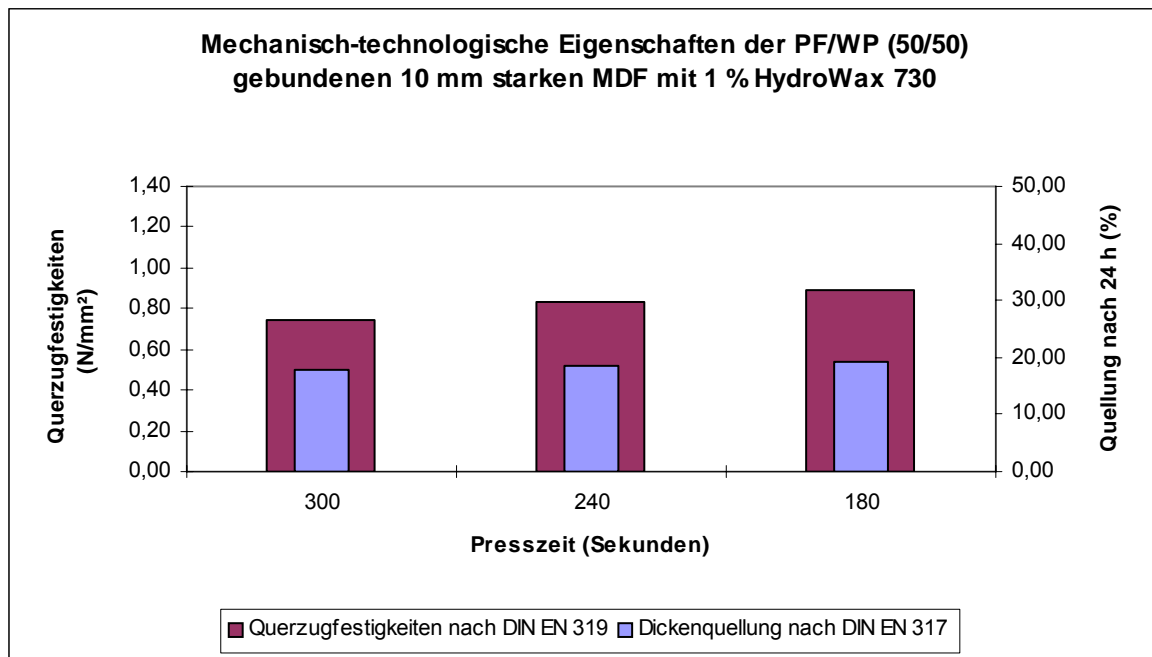
Durch die Beimischung von 1 % HYDROWAX 138 der Fa. SASOL zur PF/WP Mischkondensat Leimflotte (50/50) können die Quellwerte der damit gebundenen Mitteldichten Faserplatten nach 24 h Wasserlagerung nur gering verbessert werden (vgl. Abbildung 4-44). Quellwerte von 19,01 % (180 Sekunden), 18,32 % (240 Sekunden) und 17,89 % lassen kaum die Zugabe eines Hydrophobierungsmittels erkennen. Durch das geänderte Mischungsverhältnis der beiden Bindemittelkomponenten PF-Harz und Weizenprotein wird die hydrophobierende Eigenschaft des Paraffins beim Heißpressvorgang nahezu vollständig unterbunden. Auch der bei dem mit Mischungsverhältnissen von 75:25 (PF/WP) hergestellten MDF-Platten im Pilotmaßstab erkennbare positive Einfluss des Hydrophobierungsmittels auf die Quersugfestigkeiten fällt bei dem Mischungsverhältnis von 50:50 (PF/WP) nicht so deutlich aus. Die durchschnittlichen Quersugfestigkeiten dieser Serie liegen mit 0,91 N/mm<sup>2</sup> (180 Sekunden), 0,86 N/mm<sup>2</sup> (240 Sekunden) und 0,77 N/mm<sup>2</sup> (300 Sekunden) immer noch weit über dem geforderten Mindestwert von 0,60 N/mm<sup>2</sup>, sind jedoch verglichen mit den Ergebnissen der mit PF/WP Mischkondensaten im Verhältnis 75:25 und HYDROWAX 138 hergestellten MDF-Platten (vgl. Abbildung 4-41) geringer.



**Abbildung 4-44: Mechanisch-technologische Eigenschaften der PF/WP (50/50) gebundenen MDF-Platten mit 1 % HYDROWAX 138**

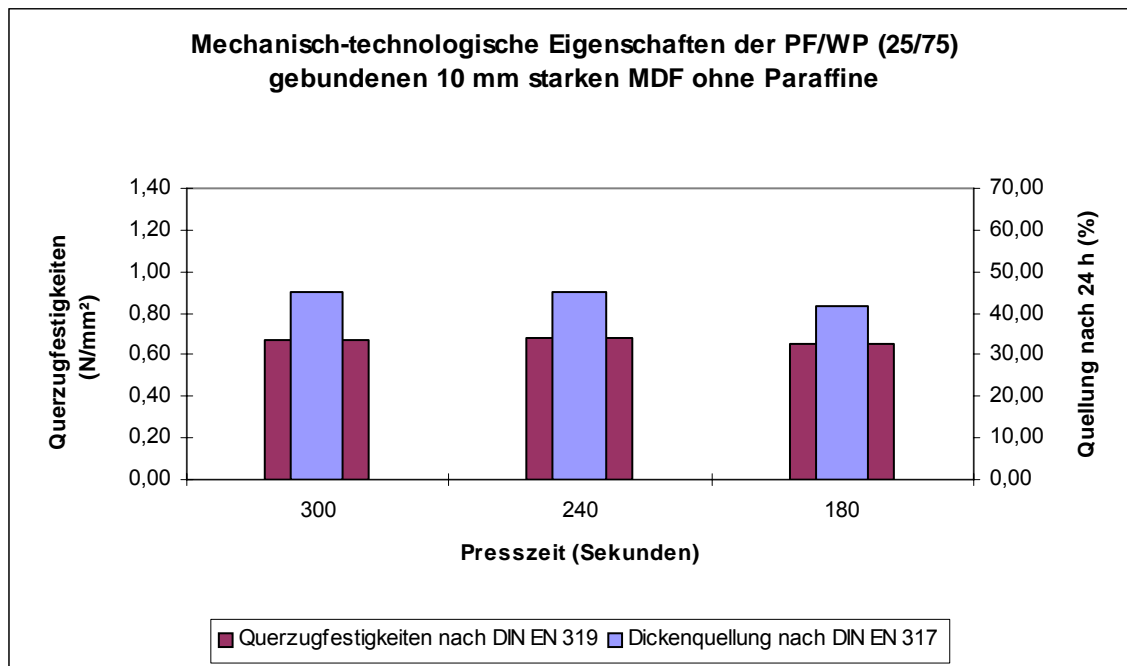
Auch bei der Zugabe von 1 % HYDROWAX 730 zur PF/WP Mischkondensat (50/50) zeigt sich ein ähnliches Bild wie bei der bereits beschriebenen Serie mit 1 % HYDROWAX 138. Auch durch das Paraffin HYDROWAX 730 konnten die Quellwerte der Mitteldichten Faserplatten nicht wesentlich gesenkt werden. Bei Quellwerten von 19,36 % (180 Sekunden), 18,67 % (240 Sekunden) und 17,93 % zeigt sich kein deutlicher Unterschied zu den Quellwerten der angefertigten Serie ohne Paraffine (vgl. Abbildung 4-43). Das Hydrophobierungsmittel HYDROWAX 730 der Fa. SASOL kann auch bei diesem PF/WP Mischkondensat im Verhältnis 50:50 keine signifikanten Verbesserungen hinsichtlich des Quellverhaltens der hergestellten Mitteldichten Faserplatten im Pilotmaßstab erzielen. Die gemessenen Dickenquellwerte nach 24 h Wasserlagerung liegen trotz der Zugabe von Paraffinen geringfügig über dem vom DEUTSCHEN INSTITUT FÜR NORMUNG e. V. festgesetzten Höchstwert von  $\leq 15\%$ .





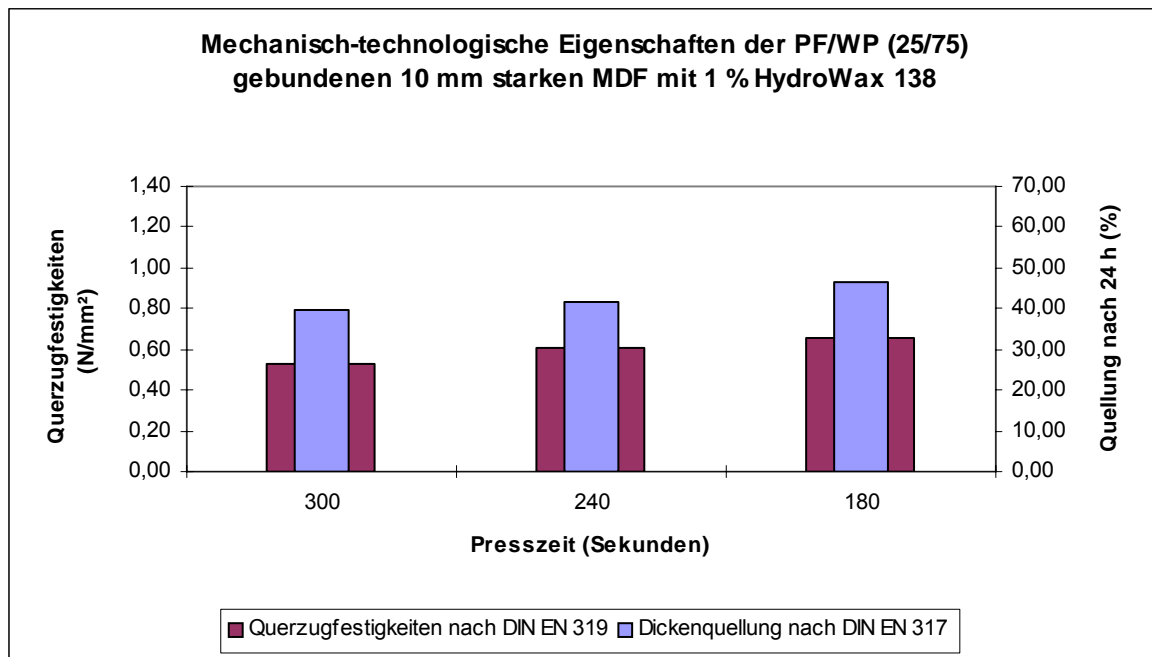
**Abbildung 4-45: Mechanisch-technologische Eigenschaften der PF/WP (50/50) gebundenen MDF-Platten mit 1 % HYDROWAX 730**

Ändert man das Mengenverhältnis der Komponenten Phenol-Formaldehyd-Harz und Weizenprotein in 25:75 so zeigt sich dies in deutlich erhöhten Quellwerten und geringeren Querzugfestigkeiten der damit hergestellten Mitteldichten Faserplatten im Vergleich zu Mischkondensaten in anderen Mengenverhältnissen. Bei der Verwendung der PF/WP Mischkondensats im Verhältnis 25:75 ohne Zugabe von Hydrophobierungsmitteln werden durchschnittliche Querzugfestigkeiten von 0,65 N/mm<sup>2</sup> (180 Sekunden), 0,68 N/mm<sup>2</sup> (240 Sekunden) und 0,67 N/mm<sup>2</sup> bei den mit dieser Leimflotte gebundenen MDF-Platten erzielt (vgl. Abbildung 4-46). Es ist keine deutliche Erhöhung der Querzugfestigkeiten mit steigender Presszeit feststellbar, wie es bei den anderen PF/WP Mischkondensat (75/25 und 50/50) gebundenen Mitteldichten Faserplatten der Fall ist. Dies ist vermutlich im geringeren Anteil an Formaldehyd in der Leimflotte und dem dadurch nur noch im geringen Umfang stattfindenden „*Crosslinking-Effekt*“ zwischen den Proteinen und dem Formaldehyd begründet (CERESTAR, 2004). Auch die gemessenen Quellwerte liegen aufgrund des erhöhten Weizenproteinanteils in der Leimflotte mit durchschnittlichen Werten von 41,74 % (180 Sekunden), 44,91 % (240 Sekunden) sowie 45,26 % (300 Sekunden) deutlich über den maximal erlaubten 15 Prozent.



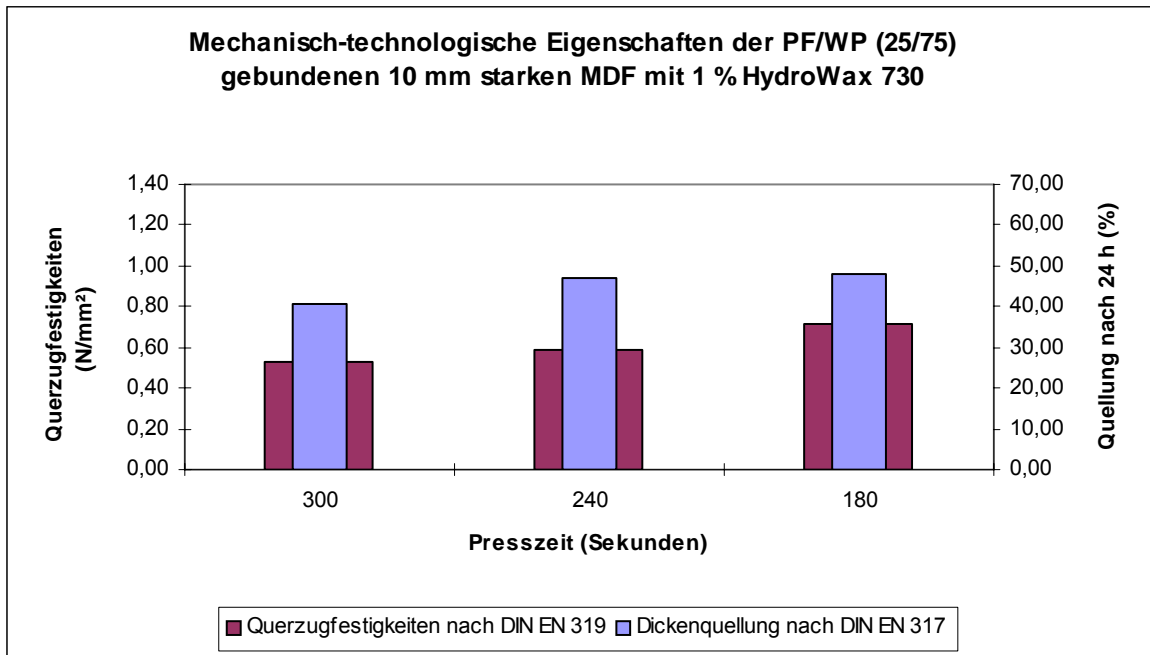
**Abbildung 4-46: Mechanisch-technologische Eigenschaften der PF/WP (25/75) gebundenen MDF-Platten ohne Hydrophobierungsmittel**

Auch durch die Verwendung von 1 % HYDROWAX 138 der Fa. SASOL im PF/WP Mischkondensat (25/75) lassen sich die Quelleigenschaften der mit dieser Leimflotte hergestellten Mitteldichten Faserplatten im Pilotmaßstab nicht wesentlich verbessern (vgl. Abbildung 4-47). Die erzielten Werte von 46,41 % (180 Sekunden), 41,63 % (240 Sekunden) sowie 39,87 % (300 Sekunden) zeigen, dass die hydrophoben Eigenschaften des verwendeten Paraffins bei den mechanisch-technologischen Eigenschaften der MDF-Platten dieser Serie nicht zum Tragen kommen. Aufgrund des Mischungsverhältnisses der beiden Bindemittelkomponenten wird die Wirkungsweise des Paraffins unterbunden und die Quellwerte dieser MDF-Platten liegen deutlich über den geforderten maximalen 15 %. Die Querzugfestigkeiten der Mitteldichten Faserplatten in dieser Serie liegen mit Werten von durchschnittlich 0,66 N/mm<sup>2</sup> (180 Sekunden), 0,61 N/mm<sup>2</sup> (240 Sekunden) und 0,53 N/mm<sup>2</sup> nur noch bei den Pressfaktoren 18 und 24 Sekunden pro mm Plattendicke über den durch DIN geforderten 0,60 N/mm<sup>2</sup>. Der Einsatz der Hydrophobierungsmittel HYDROWAX 138 und HYDROWAX 730 hat bei den Mischkondensat gebundenen Mitteldichten Faserplatten dieser Variante offensichtlich sogar einen negativen Einfluss auf die Querzugfestigkeiten der Holzwerkstoffe (vgl. Abbildung 4-47).



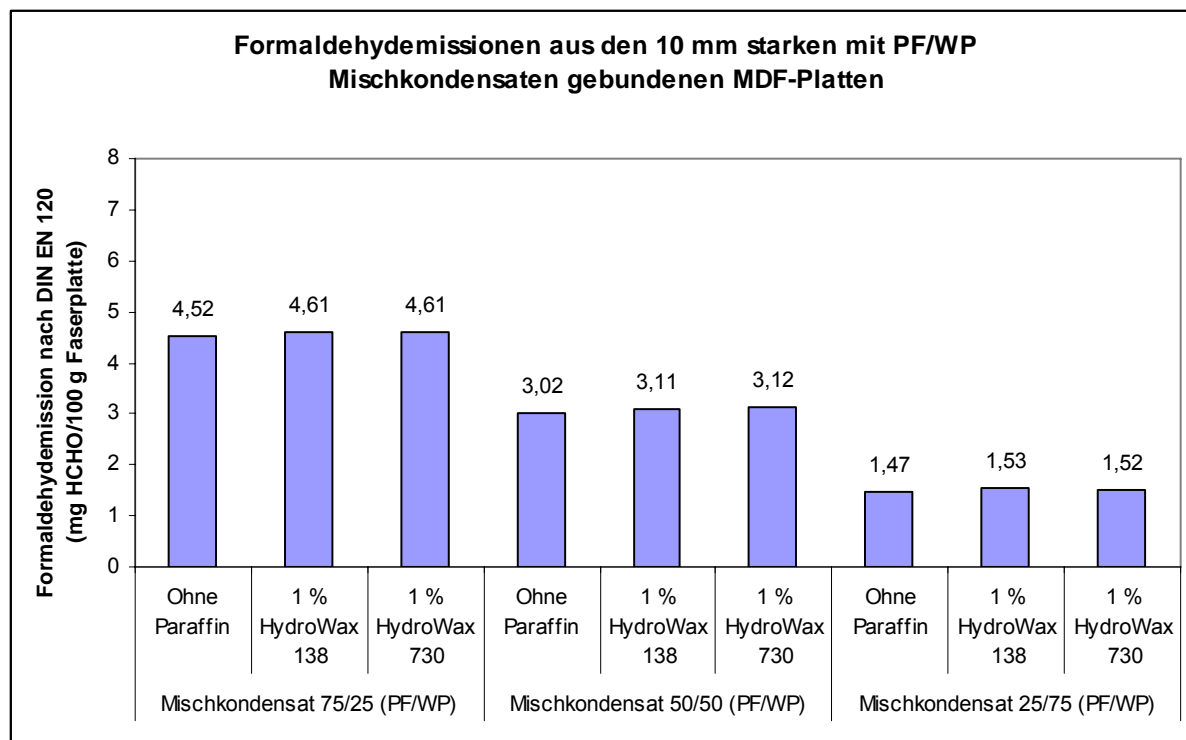
**Abbildung 4-47: Mechanisch-technologische Eigenschaften der PF/WP (25/75) gebundenen MDF-Platten mit 1 % HYDROWAX 138**

Bei Zugabe von 1 % HYDROWAX 730 der Fa. SASOL zum PF/WP Mischkondensat ändern sich die mechanisch-technologischen Eigenschaften der mit dieser Leimflotte angefertigten MDF-Platten im Pilotmaßstab nicht wesentlich (vgl. Abbildung 4-48), verglichen mit den Ergebnissen der ohne Hydrophobierungsmittel hergestellten PF/WP Mischkondensat (25/75) gebundenen Mitteldichten Faserplatten (vgl. Abbildung 4-46). Die durchschnittlichen Querzugfestigkeiten fallen mit ansteigender Presszeit deutlich von 0,71 N/mm<sup>2</sup> (180 Sekunden) über 0,59 N/mm<sup>2</sup> auf 0,53 N/mm<sup>2</sup> ab und liegen mit Ausnahme der mit einem Pressfaktor von 18 Sekunden pro mm Plattestärke hergestellten Mitteldichten Faserplatten im Pilotmaßstab unter den geforderten 0,60 N/mm<sup>2</sup>. Auch kommt es in diesem Fall vermutlich aufgrund des geringeren Formaldehydgehaltes in dieser Leimflotte nur noch zu sehr wenigen Verbindungen zwischen den Proteinen im Weizenprotein und dem Formaldehyd im PF-Harz während des Heißpressvorgangs. Die Quellwerte der mit 1 % HYDROWAX 730 und diesem Mischkondensat hergestellten MDF-Platten liegen mit durchschnittlich 48,06 % (180 Sekunden), 47,09 % (240 Sekunden) und 40,86 % einerseits sehr eng beieinander, andererseits aber auch deutlich über der maximal erlaubten Quellung von 15 %. Auch in dieser Serie ist zu erkennen, dass die hydrophobierende Wirkung des verwendeten Paraffins in Kombination mit diesem Mischkondensat nicht zum Tragen kommt.



**Abbildung 4-48: Mechanisch-technologische Eigenschaften der PF/WP (25/75) gebundenen MDF-Platten mit 1 % HYDROWAX 730**

Bei Betrachtung der nach der Perforator-Methode (DIN EN 120) ermittelten Formaldehydemissionen aus den mit Mischkondensaten auf PF-Harz und Weizenprotein hergestellten Mitteldichten Faserplatten im Pilotmaßstab fällt auf, dass auch in diesen Varianten die Formaldehydabgabe mit der Menge des verwendeten PF-Harzes in der Leimflotte korreliert ist (vgl. Abbildung 4-49). Dabei werden bei den PF/WP Mischkondensaten im Verhältnis 75:25 durchschnittlich 4,52 mg HCHO Emissionen pro 100 g Werkstoff gemessen. Dabei ist, verglichen mit den Perforatorwerten der rein mit PF-Harz gebundenen Mitteldichten Faserplatten (vgl. Abbildung 4-29) eine Differenz hinsichtlich der HCHO Emissionen von 1,6 mg HCHO pro 100 g Faserplatte feststellbar. Durch die Verwendung von Hydrophobierungsmitteln zeigt sich an den gemessenen Werten von durchschnittlich 4,61 mg HCHO pro 100 g Faserplatten eine leicht erhöhte Formaldehydemission aus den Werkstoffen bei diesem Mischkondensat. Verringert man die Menge an Phenol-Formaldehyd-Harz in der Leimflotte so zeigt sich bei den PF/WP Mischkondensaten 50:50 und 25:75 ein weiterer Rückgang der Formaldehydemissionen. Allerdings ist auch bei diesem Mischkondensaten zu erkennen, dass durch die Verwendung von Paraffinen in der Leimflotte die Formaldehydemissionen etwas höher liegen. Dies liegt vermutlich daran, dass aufgrund der Paraffine die Reaktion zwischen dem Formaldehyd und dem Phenol beim Heißpressvorgang in geringem Umfang negativ beeinflusst wird.

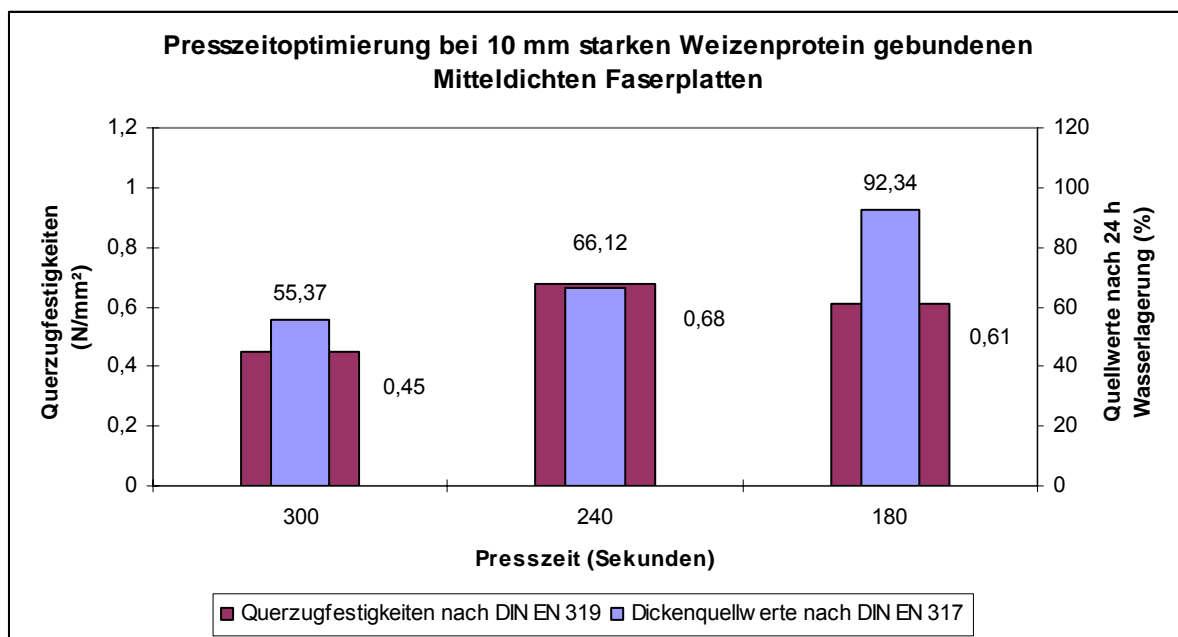


**Abbildung 4-49: Formaldehydemissionen aus den mit Mischkondensaten aus PF-Harz und WP hergestellten, 10 mm starken MDF-Platten nach der Perforator-Methode**

Abschließend lässt sich aufgrund der erzielten Ergebnisse zur Verwendung von Mischkondensaten, bestehend aus PF-Harz und der entwickelten Weizenprotein-Suspension in unterschiedlichen Mischungsverhältnissen aussagen, dass die besten mechanisch-technologischen Resultate bei einem Mengenverhältnis der Komponenten PF-Harz zu Weizenprotein von 75:25 unter Zugabe von 1 % HYDROWAX 138 zur Leimflotte erzielt wurden. Dies zeigte sich auch bereits in den von KRUG und SIRCH (1998) und KRUG (2003) erzielten Ergebnissen bei der Substitution von 25 % PF-Harz durch Weizenproteine. Der optimale Presszeitfaktor, bei den im Rahmen dieser Dissertation mit PF/WP Mischkondensaten (75/25) durchgeführten Versuche, betrug hinsichtlich optimaler Querzugfestigkeiten 18 Sekunden pro mm Plattenstärke. Die besten Quellwerte konnten unter Verwendung dieser Leimflotte bei 30 Sekunden pro mm Plattendicke erzielt werden. Auch die ermittelten Formaldehydabgaben, gemessen nach der Perforator-Methode, der mit diesem Mischkondensat gebundenen MDF-Platten erfüllten die vorgegebenen Mindestanforderungen deutlich. Die von KRUG und HEEP (2006) erzielten Formaldehydemissionen von 0,32 mg /100g bis 0,53 mg/100 g aus PF-Protein-Hybrid gebundenen Spanplatten konnten bei diesen Versuchen nicht erzielt werden., da auch bei diesen Varianten die Presstemperaturen zu gering waren, um ein vollständiges Ausreagieren des Bindemittels zu bewirken.

#### 4.2.5 Ergebnisse der mit Weizenprotein hergestellten Mitteldichten Faserplatten

Die Parameter zur Anfertigung der Weizenprotein gebundenen Mitteldichten Faserplatten sind mit den Parametern zur Herstellung der mit Harnstoff-, Phenol-Formaldehyd-Harz und Mischkondensaten gebundenen Mitteldichten Faserplatten im Pilotmaßstab (vgl. dazu Kapitel 3.2.2 bis 3.2.5) zu großen Teilen vergleichbar. Ein Unterschied ist jedoch bei der verwendeten Presszeit zum Heißpressen der Weizenprotein gebundenen MDF-Platten ohne Zugabe von Hydrophobierungsmitteln zu erkennen. Verglichen mit den UF-Harz-Platten (vgl. Kapitel 3.2.2), bei denen ausschließlich ein Presszeitfaktor von 18 Sekunden pro mm Plattendicke verwendet wurde, werden die Weizenprotein gebundenen Mitteldichten Faserplatten ausschließlich mit einem Presszeitfaktor von 24 Sekunden pro mm Plattenstärke in der Heißpresse verpresst. Dies ist in den vor Projektbeginn durchgeführten Versuchen zur Presszeitoptimierung Weizenprotein gebundener Mitteldichter Faserplatten begründet (vgl. Abbildung 4-50).



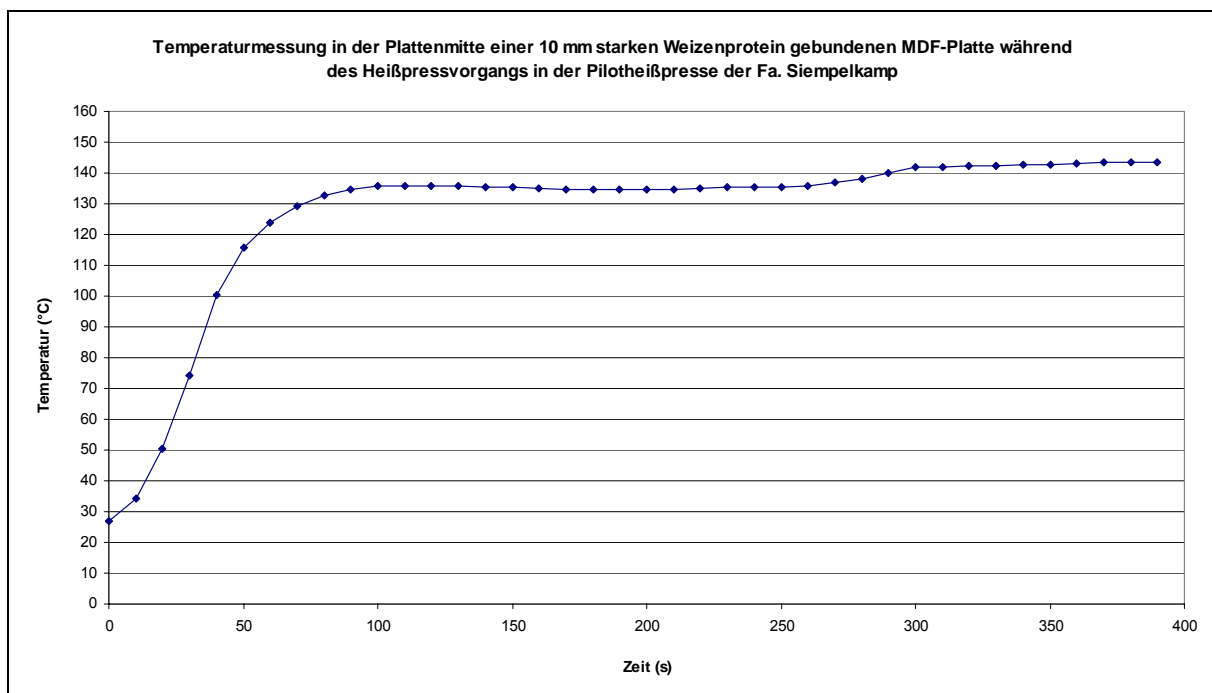
**Abbildung 4-50: Presszeitoptimierung bei 10 mm starken mit Weizenprotein gebundenen Mitteldichten Faserplatten im Pilotmaßstab (SCHÖPPER, 2003)**

Dabei zeigte sich, dass bei einer Presszeit von 24 Sekunden pro mm die besten mechanisch-technologischen Eigenschaften hinsichtlich der Querzugfestigkeiten bei Weizenprotein gebundenen MDF-Platten im Pilotmaßstab erzielt werden konnten. Bei Verwendung dieses Presszeitfaktors werden die Proteine in der entwickelten Weizenprotein-Suspension durch die aufgrund der hohen Temperatur entstehende thermische Reaktion, in eine unlösliche Form

umgewandelt (KRUG, 2001a). Die Querkzugfestigkeiten betragen  $0,68 \text{ N/mm}^2$ , die Quellwerte der im Rahmen dieser Presszeitoptimierung hergestellten MDF-Platten ergaben einen durchschnittlichen Wert von  $66,12 \%$ . Durch eine Erhöhung des Presszeitfaktors auf 30 Sekunden pro mm Plattendicke stellte sich heraus, dass damit einerseits wesentlich geringere Querkzugfestigkeiten ( $0,45 \text{ N/mm}^2$ ) aber auch andererseits niedrigere Dickenquellwerte ( $55,37 \%$ ) korreliert waren. Bei einem Presszeitfaktor von 18 Sekunden pro mm Plattendicke zeigte sich, dass die Querkzugfestigkeiten dieser Mitteldichten Faserplatten im Vergleich zu denen mit einem Presszeitfaktor von 24 Sekunden pro mm Plattendicke hergestellten MDF-Platten niedriger ( $0,61 \text{ N/mm}^2$ ), die Quellwerte hingegen mit  $92,34 \%$  wesentlich höher waren (SCHÖPPER, 2003).

Dies zeigt sich auch bei der Betrachtung des Temperaturverlaufs während des Heißpressvorgangs in der Mitte einer 10 mm starken, ausschließlich mit Weizenprotein gebundenen MDF-Platte, dargestellt in Abbildung 4-51. Es ist bei der Temperaturkurve zu erkennen, dass bei einer verwendeten Presstemperatur von  $195 \text{ }^\circ\text{C}$  innerhalb der ersten 80 Sekunden des Heißpressvorgangs eine Temperatur von ca.  $138,5 \text{ }^\circ\text{C}$  in der Plattenmitte der 10 mm starken MDF-Platte aufgrund des in der Platte enthaltenen Wassers erreicht wird. Diese Temperatur steigt im weiteren Pressverlauf nur noch gering auf  $140,5 \text{ }^\circ\text{C}$  nach 300 Sekunden Pressdauer an, da ein Großteil des Wassers bereits verdampft ist und das Fasermaterial die Hitze nicht effektiv in die Plattenmitte transportieren kann. Aufgrund dieser Tatsachen kann die Temperatur in der Plattenmitte nur noch um  $2 \text{ }^\circ\text{C}$  gesteigert werden. Dabei wird deutlich, dass bereits nach 180 Sekunden Presszeit (18 Sekunden/mm Plattendicke) das Bindemittel soweit ausreagiert ist, dass bereits gute Querkzugfestigkeiten erzielt werden können. Die Verlängerung der Presszeit von 180 Sekunden auf 240 Sekunden (24 Sekunden/mm Plattendicke) bewirkt auf der einen Seite eine leichte Erhöhung der Querkzugfestigkeiten, auf der anderen Seite wirkt es sich auch positiv in Form geringerer Quellwerte aus. Nach 300 Sekunden steigt die Temperatur auf  $140,5 \text{ }^\circ\text{C}$  an; bei diesen Weizenprotein gebundenen MDF-Platten wurden einerseits deutlich schlechtere Querkzugfestigkeiten jedoch andererseits auch geringere Quellwerte nach 24 h Wasserlagerung ermittelt (SCHÖPPER, 2003). Die Änderung der mechanisch-technologischen Eigenschaften bei den 300 Sekunden lang gepressten Weizenprotein gebundenen MDF-Platten ist vermutlich auf den Temperaturanstieg auf über  $140 \text{ }^\circ\text{C}$  im Werkstoff zurückzuführen. Die Verbesserung der Quellwerte der Weizenprotein gebundenen MDF-Platten liegt vermutlich an den im Weizenprotein enthaltenen mehrwertigen Zuckern. Der Anstieg der Temperatur in der Mitteldichten Faserplatte beim Heißpressvorgang auf über  $140 \text{ }^\circ\text{C}$  bewirkt aller Wahrscheinlichkeit nach,

dass die Zucker karamellisieren und sie damit weniger Wasser bei dem späteren Quelltest aufnehmen können. Aufgrund dieser Ergebnisse wurde bei der Herstellung aller im Rahmen dieser Dissertation angefertigten Weizenprotein gebundenen Mitteldichten Faserplatten im Pilotmaßstab ein Presszeitfaktor von 24 Sekunden pro mm Plattendicke beim Heißpressvorgang in der Presse der Fa. SIEMPELKAMP verwendet. Die Querszugfestigkeiten sind hierbei der entscheidende Grund für diesen Presszeitfaktor, da eine Reduzierung der Quellwerte der Mitteldichten Faserplatten durch die Zugabe geeigneter Hydrophobierungsmittel zur Leimflotte bewirkt werden soll.



**Abbildung 4-51: Temperaturverlauf in der Plattenmitte einer 10 mm starken mit Weizenprotein gebundenen MDF-Platte während des Heißpressens in der Pilotpresse der Fa. SIEMPELKAMP (SCHÖPPER, 2003)**

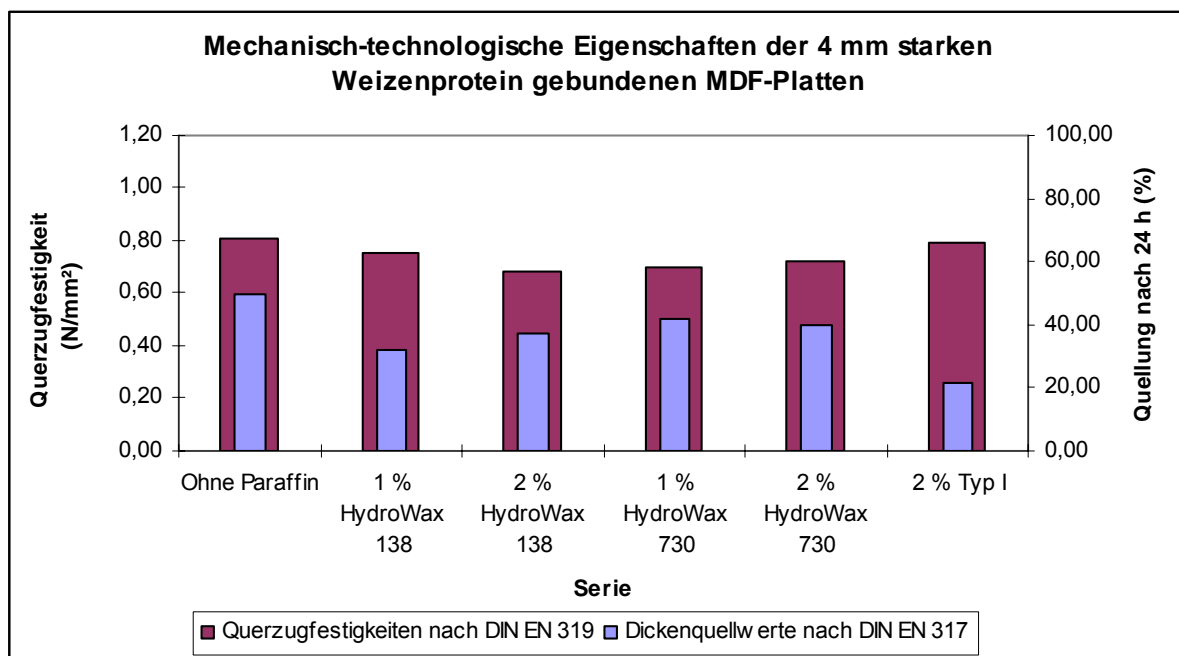
Die 30 Weizenprotein gebundenen 4 mm starken Mitteldichten Faserplatten der Variante I weisen eine durchschnittliche Rohdichte von  $796 \text{ kg/m}^3$  auf und liegen somit im Bereich der angestrebten Zielrohichte von  $800 \text{ kg/m}^3$ . Es konnte ein Mittelwert basierend auf den praktisch gemessenen Werkstoffstärken von 3,47 mm errechnet werden.

Die mechanisch-technologischen Eigenschaften, d.h. die Querszugfestigkeiten und die Dickenquellwerte, der 4 mm starken mit Weizenprotein gebundenen Mitteldichten Faserplatten der Variante I (vgl. Tabelle 3-13) sind in Abbildung 4-52 graphisch dargestellt. Dabei werden die Platten hinsichtlich der verwendeten Hydrophobierungsmittel unterschieden. Die Platten weisen in den angefertigten Serien Querszugfestigkeiten von 0,81



N/mm<sup>2</sup> (ohne Paraffin), 0,75 N/mm<sup>2</sup> (1 % HYDROWAX 138), 0,68 N/mm<sup>2</sup> (2 % HYDROWAX 138), 0,70 N/mm<sup>2</sup> (1 % HYDROWAX 730), 0,72 N/mm<sup>2</sup> (2 % HYDROWAX 730) und 0,79 N/mm<sup>2</sup> (2 % Typ I) auf. Es ist festzustellen, dass durch die Zugabe von Hydrophobierungsmitteln zur Leimflotte die Festigkeiten in allen Fällen gesenkt werden, die Festigkeiten aller 4 mm starken rein Protein gebundenen MDF-Platten jedoch über dem vom DIN geforderten Mindestwert von 0,65 N/mm<sup>2</sup> (vgl. Tabelle 3-18) liegen. Somit hat eine ausreichende Denaturierung und Vernetzung der Proteine (KAMOUN et al., 1998; KRUG, 2001a) in der Weizenprotein-Suspension unter den verwendeten Pressbedingungen während des Heißpressens stattgefunden.

Die erzielten Quellwerte fallen hinsichtlich der verwendeten Hydrophobierungsmittel unterschiedlich aus. Dabei ergaben sich Werte von 49,59 % (ohne Paraffin), 31,73 % (1 % HYDROWAX 138), 37,25 % (2 % HYDROWAX 138), 42,12 % (1 % HYDROWAX 730), 39,61 % (2 % HYDROWAX 730) und 21,39 % (2 % Typ I). Aus den Ergebnissen ist ersichtlich, dass die Zugabe von Hydrophobierungsmitteln in allen Serien eine Reduzierung der Wasseraufnahme durch die MDF-Platten zur Folge hat. Durch Zugabe von 1 % HYDROWAX 138 bzw. von 2 % Typ I zum Weizenprotein wird der durch DIN geforderte Maximalwert von 35 % für Platten dieser Stärke unterschritten.



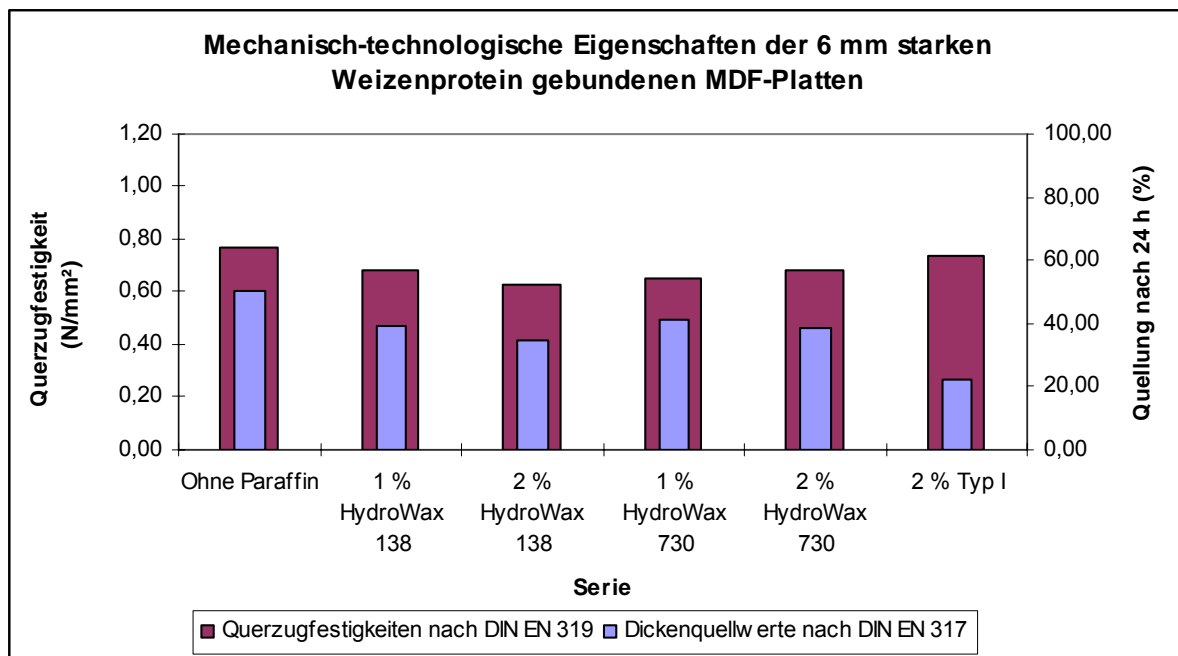
**Abbildung 4-52: Mechanisch-technologische Eigenschaften der 4 mm starken Weizenprotein gebundenen Mitteldichten Faserplatten**

Die Erhöhung der Hydrophobierungsmittel von 1 % auf 2 % hatte nicht grundsätzlich bessere Quellwerte zur Folge. Im Falle von HYDROWAX 730 ist bei Erhöhung des Paraffinanteils eine leichte Verbesserung der Quellwerte festzustellen. Im Falle von HYDROWAX 138 werden durch die Erhöhung des Paraffins sowohl die Querszugfestigkeiten als auch die Dickenquellwerte negativ beeinflusst. Daraus ist zu schließen, dass sich die Zugabe von HYDROWAX 138 vermutlich sowohl auf die Denaturierung der Proteine als auch auf die Karamellisierung der Zucker negativ auswirkt. Die besten mechanisch-technologischen Eigenschaften werden durch die Zugabe von 2 % Typ I zum Weizenprotein erzielt. Unter Verwendung dieser Leimflotte, wie auch durch Zugabe von 1 % HYDROWAX 138 lassen sich 4 mm starke rein Weizenprotein gebundenen MDF-Platten im Pilotmaßstab herstellen, mit denen die vorgegebenen Anforderungen durch DIN erfüllt werden.

Die Variante II der Weizenprotein gebundenen Mitteldichten Faserplatten (vgl. Tabelle 3-13) besteht aus 30 Platten mit einer durchschnittlichen Rohdichte von  $804 \text{ kg/m}^3$  und einer praktischen Plattenstärke von 5,49 mm. Die mechanisch-technologischen Eigenschaften der MDF-Platten aus Variante II sind in Abbildung 4-53 dargestellt. Dabei wurden Querszugfestigkeiten von  $0,77 \text{ N/mm}^2$  (ohne Paraffin),  $0,68 \text{ N/mm}^2$  (1 % HYDROWAX 138),  $0,63 \text{ N/mm}^2$  (2 % HYDROWAX 138),  $0,65 \text{ N/mm}^2$  (1 % HYDROWAX 730),  $0,68 \text{ N/mm}^2$  (2 % HYDROWAX 730) und  $0,74 \text{ N/mm}^2$  (2 % Typ I) erzielt. Die vorgegebene Mindestfestigkeit von  $0,65 \text{ N/mm}^2$  für Platten dieser Stärke durch DIN wird mit einer Ausnahme in allen Serien erfüllt. Auch bei diesen Platten zeigt sich, dass sich die Zugabe von Hydrophobierungsmitteln in unterschiedlichen Mengen bei allen angefertigten Mitteldichten Faserplatten negativ auf die Querszugfestigkeiten auswirkt. Im Falle einer 2 %igen Zugabe von HYDROWAX 138 zur Proteinleimflotte werden die Querszugfestigkeiten der Mitteldichten Faserplatten soweit gesenkt, dass die Mindestanforderungen hinsichtlich der Festigkeiten nicht mehr erfüllt werden. Die Quellwerte dieser 6 mm starken Protein gebundenen MDF-Platten variieren je nach verwendetem Hydrophobierungsmittel. Es wurden Werte von 50,55 % (ohne Paraffin), 29,17 % (1 % HYDROWAX 138), 34,86 % (2 % HYDROWAX 138), 41,29 % (1 % HYDROWAX 730), 38,71 % (2 % HYDROWAX 730) und 21,93 % (2 % Typ I) ermittelt. Dabei fällt auf, dass bei einer 1 %igen Zugabe von HYDROWAX 138 bzw. bei der 2 %igen Zugabe des Hydrophobierungsmittels Typ I zur Weizenproteinleimflotte der geforderte Maximalquellwert von 30 % für diese Plattenstärke unterschritten wurde. Auch bei diesen Serien zeigte sich, dass die Erhöhung der Hydrophobierungsmittelanteile nicht immer mit besseren Quellwerten korreliert ist. Durch die Erhöhung des Hydrophobierungsmittels HYDROWAX 138 von 1 % auf

2 % verschlechterten sich die Querkzugfestigkeiten und die Quellwerte der Weizenprotein gebundenen MDF-Platten.

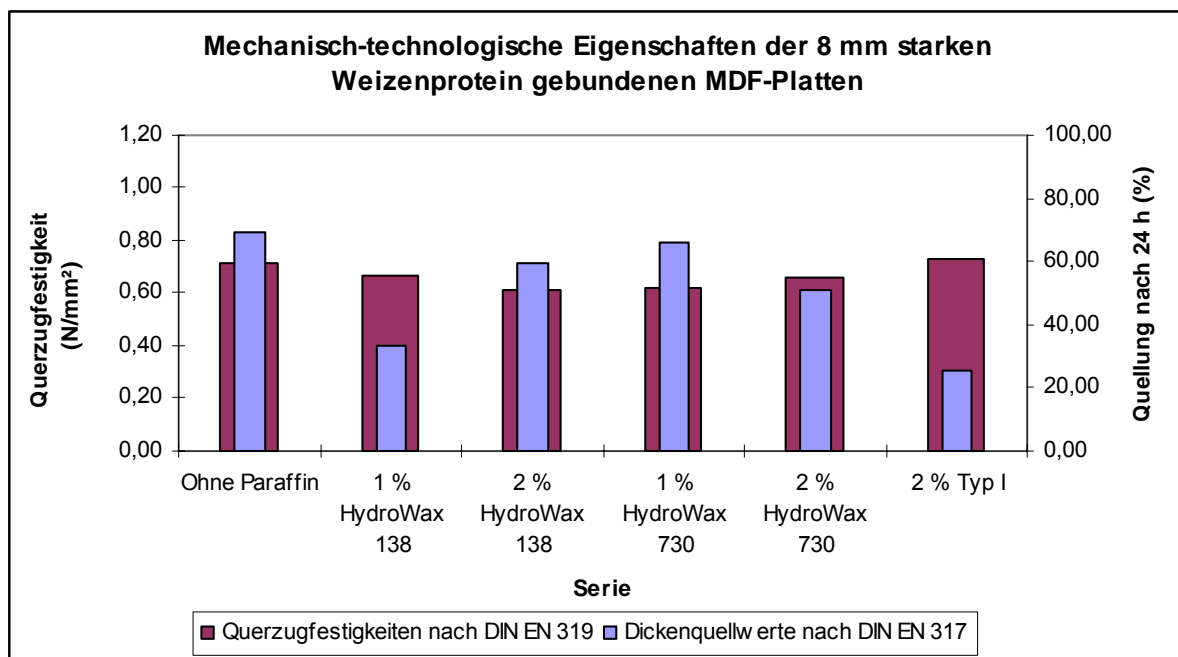
Aufgrund dieser Ergebnisse kann festgestellt werden, dass durch die Zugabe von 1 % HYDROWAX 138 bzw. 2 % Typ I zum Weizenprotein der Fa. CERESTAR rein Protein gebundene Mitteldichte Faserplatten in einer Stärke von 6 mm im Pilotmaßstab hergestellt werden können, die hinsichtlich ihrer Festigkeiten und Quellwerte die von DIN vorgeschriebenen Anforderungen erfüllen. Bei dieser Plattenstärke sind der Pressdruck und die Presstemperatur ausreichend, um eine gute Vernetzung der Proteine unter Druck und Hitze zu bewirken (NUHN, 1997; KRUG 2001a).



**Abbildung 4-53: Mechanisch-technologische Eigenschaften der 6 mm starken Weizenprotein gebundenen Mitteldichten Faserplatten**

In Abbildung 4-54 sind die Eigenschaften der 30 im Rahmen dieser Dissertation angefertigten 8 mm starken mit Weizenprotein gebundenen MDF-Platten unter Verwendung unterschiedlicher Hydrophobierungsmittel graphisch dargestellt (vgl. Tabelle 3-13). Diese Mitteldichten Faserplatten erfüllen mit einer durchschnittlichen Rohdichte von 795 kg/m<sup>3</sup> und einer praktischen Stärke von 7,52 mm sowohl die Zielrohichte als auch die vorgegebenen Zielstärke (vgl. Tabelle 3-13). Die Querkzugfestigkeiten dieser Protein gebundenen MDF-Platten bewegen sich durchschnittlich zwischen 0,71 N/mm<sup>2</sup> (ohne Paraffin), 0,67 N/mm<sup>2</sup> (1 % HYDROWAX 138), 0,61 N/mm<sup>2</sup> (2 % HYDROWAX 138), 0,62 N/mm<sup>2</sup> (1 % HYDROWAX 730), 0,66 N/mm<sup>2</sup> (2 % HYDROWAX 730) und 0,73 N/mm<sup>2</sup> (2 % Typ I). Durch Zugabe von 2

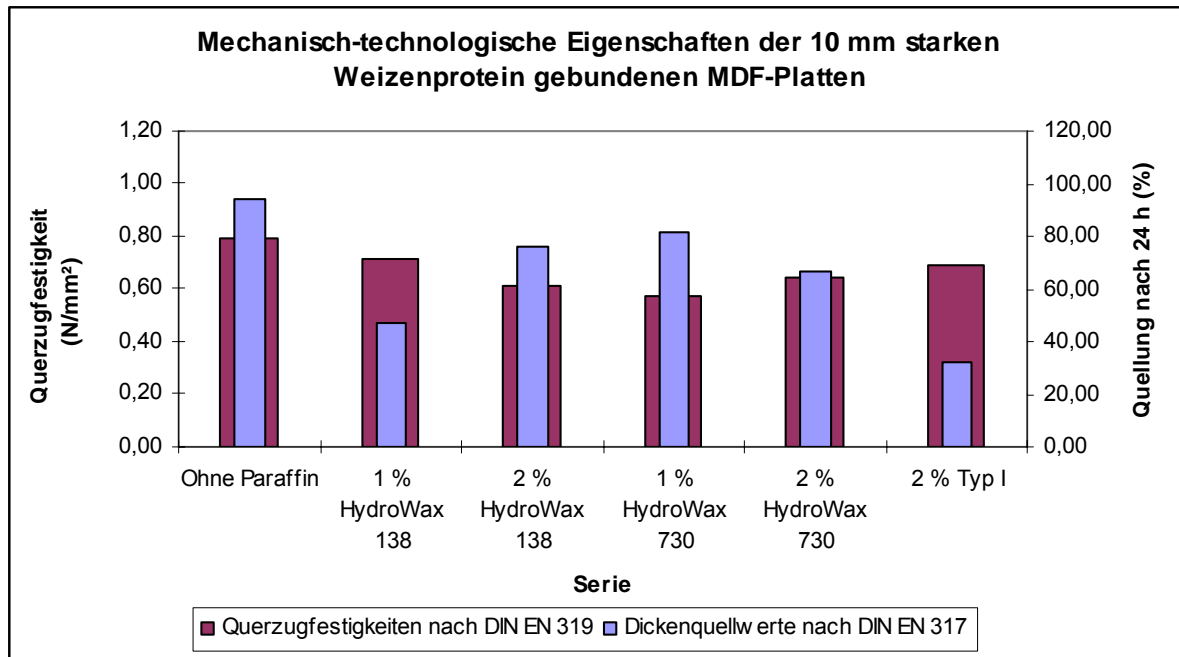
% HYDROWAX 138 bzw. 1 % HYDROWAX 730 zur Weizenproteinleimflotte werden die geforderten Mindestfestigkeiten von 0,65 N/mm<sup>2</sup> für Platten dieser Stärke leicht unterschritten. Die gemessenen Quellwerte von 69,27 % (ohne Paraffin), 33,60 % (1 % HYDROWAX 138), 59,64 % (2 % HYDROWAX 138), 65,83 % (1 % HYDROWAX 730), 51,22 % (2 % HYDROWAX 730) und 25,81 % (2 % Typ I) unterscheiden sich deutlich von den Quellwerten der dünneren Protein gebundenen Mitteldichten Faserplatten in den Stärken 4 mm und 6 mm. Dies ist möglicherweise auf den höheren Gehalt an Weizenprotein, bedingt durch die höhere Einwaage an beleimtem Fasermaterial gegenüber dünneren Platten, sowie in leicht geringeren Temperaturen in der Plattenmitte während des Heißpressvorgangs aufgrund der erhöhten Plattendicke begründet. Durch die Erhöhung des beleimten Fasermaterials erhöht sich auch der Gehalt an mehrwertigen Zuckern und Hemicellulosen in der MDF-Platten. Diese Zucker und Hemicellulosen beeinflussen das Quellverhalten der MDF-Platten erheblich. Durch geringere Temperaturen gegenüber dünneren Platten kommt es nicht mehr so schnell zum Karamellisieren der Zucker und dadurch können diese Zucker in den MDF-Platten später mehr Wasser aufnehmen. Bei den Serien dieser Variante III der Weizenprotein gebundenen MDF-Platten konnte gezeigt werden, dass sich unter Verwendung der reinen Weizenprotein-Suspension Querszugfestigkeiten erzielen ließen, die über den geforderten 0,65 N/mm<sup>2</sup> liegen. Die besten Quellwerte konnten auch in dieser Variante nicht mit den konventionellen Paraffinen sondern mit dem Hydrophobierungsmittel auf SiO<sub>2</sub>-Basis in Kombination mit dem Weizenprotein erzielt werden.



**Abbildung 4-54: Mechanisch-technologische Eigenschaften der 8 mm starken Weizenprotein gebundenen Mitteldichten Faserplatten**

Die mechanisch-technologischen Eigenschaften der 30 Weizenprotein gebundenen 10 mm starken Mitteldichten Faserplatten im Pilotmaßstab der Variante IV (vgl. Tabelle 3-14) sind in Abbildung 4-55 aufgeführt. Aus dem Umfang dieser 30 Weizenprotein gebundenen MDF-Platten konnte eine durchschnittliche Rohdichte von  $799 \text{ kg/m}^3$  berechnet werden; die praktische Plattenstärke liegt im Mittel bei 9,51 mm. Es wurden Querkzugfestigkeiten von durchschnittlich  $0,79 \text{ N/mm}^2$  (ohne Paraffin),  $0,71 \text{ N/mm}^2$  (1 % HYDROWAX 138),  $0,61 \text{ N/mm}^2$  (2 % HYDROWAX 138),  $0,57 \text{ N/mm}^2$  (1 % HYDROWAX 730),  $0,64 \text{ N/mm}^2$  (2 % HYDROWAX 730) und  $0,69 \text{ N/mm}^2$  (2 % Typ I) bei diesen 10 mm starken Weizenprotein gebundenen MDF-Platten gemessen. Dabei zeigt sich, dass mit Ausnahme der 2 %igen Zugabe von HYDROWAX 138 sowie der 1 %igen Zugabe von HYDROWAX 730, die Querkzugfestigkeiten dieser Protein gebundenen MDF-Platten über dem für Platten dieser Stärke festgelegten Mindestwert von  $0,60 \text{ N/mm}^2$  liegen. Die Quellwerte der 10 mm starken Protein gebundenen MDF-Platten lagen zwischen 94,13 % (ohne Paraffin), 46,92 % (1 % HYDROWAX 138), 76,38 % (2 % HYDROWAX 138), 81,25 % (1 % HYDROWAX 730), 66,92 % (2 % HYDROWAX 730) und 32,24 % (2 % Typ I).

Bei Betrachtung dieser Ergebnisse fällt auf, dass die verwendeten Hydrophobierungsmittel die Quellwerte der Weizenprotein gebundenen MDF-Platten einerseits noch senken, diese Werte jedoch deutlich über dem vorgegebenen Mindestwert von 15 % bei dieser Plattenstärke liegen. Auffallend aber ist, dass die Funktion der Hydrophobierungsmittel nicht aufgehoben wird, wie beispielsweise bei den 10 mm starken mit Mischkondensaten hergestellten MDF-Platten (vgl. dazu Kapitel 4.2.3 und Kapitel 4.2.4). Auch bei den 10 mm starken Weizenprotein gebundenen MDF-Platten der Variante IV ist zu erkennen, dass sich sowohl die grundsätzliche Paraffinzugabe als auch die Erhöhung der Paraffindosis in der Leimflotte negativ auf die erzielten Querkzugfestigkeiten der Platten auswirken. Eine Ausnahme ist hierbei das HYDROWAX 730, bei dem sich die Querkzugfestigkeiten wie auch die Dickenquellwerte der MDF-Platten durch Erhöhung der Paraffinzugabe auf 2 % verbessern. Eine wesentliche Reduzierung der Quellwerte kann durch die 2 %ige Zugabe des Hydrophobierungsmittels vom Typ I zur Weizenproteinflotte erzielt werden. Dabei kann abschließend über diese Versuchsvariante ausgesagt werden, dass sich 10 mm starke ausschließlich mit Weizenprotein gebundene Mitteldichte Faserplatten im Pilotmaßstab herstellen lassen, die auch den Anforderungen hinsichtlich der Festigkeiten senkrecht zur Plattenebene genügen. Die Quellwerte dieser Mitteldichten Faserplatten können nicht mit konventionellen Paraffinen sondern mit Hydrophobierungsmitteln auf  $\text{SiO}_2$ -Basis am deutlichsten verbessert werden.

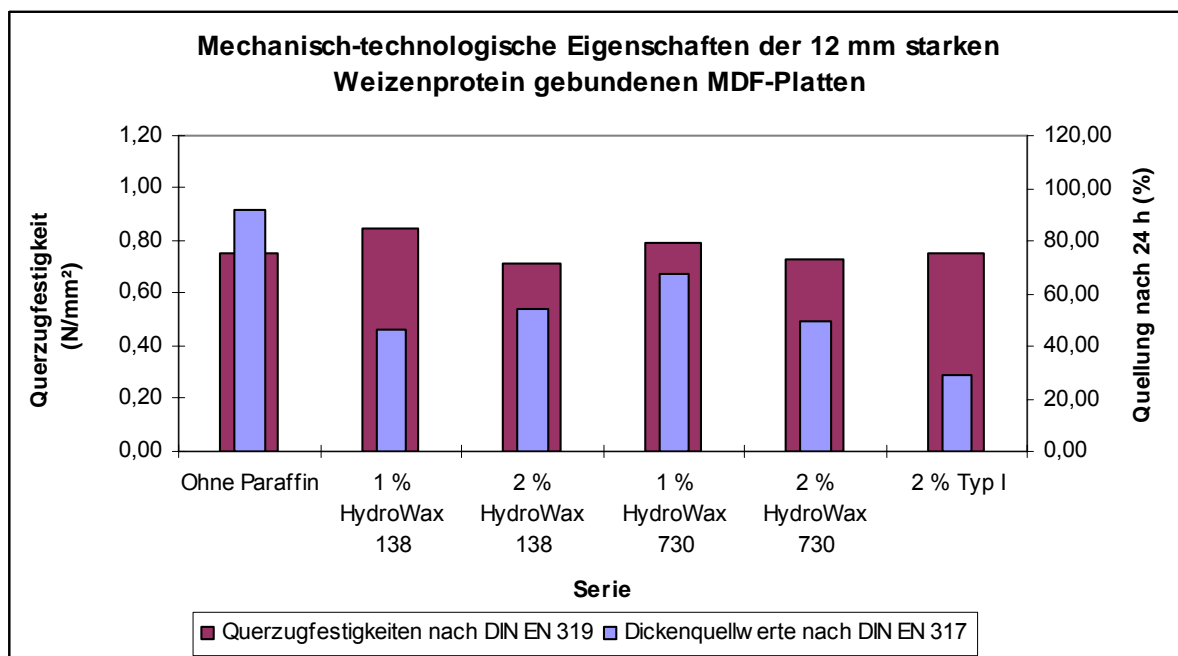


**Abbildung 4-55: Mechanisch-technologische Eigenschaften der 10 mm starken Weizenprotein gebundenen Mitteldichten Faserplatten**

Die Ergebnisse der mechanisch-technologischen Eigenschaften von 12 mm starken Weizenprotein gebundenen Mitteldichten Faserplatten im Pilotmaßstab unter Verwendung unterschiedlicher Hydrophobierungsmittel (vgl. Tabelle 3-14) sind in Abbildung 4-56 graphisch dargestellt. Dabei konnte bei den 30 MDF-Platten dieser Variante V eine durchschnittliche Rohdichte von  $796 \text{ kg/m}^3$  ermittelt werden. Die Berechnung der praktischen Stärke dieser MDF-Platten ergab im Mittel einen Wert von 11,44 mm. Die Querzugfestigkeiten der 12 mm starken Weizenprotein gebundenen Mitteldichten Faserplatten fallen mit Werten von  $0,75 \text{ N/mm}^2$  (ohne Paraffin),  $0,85 \text{ N/mm}^2$  (1 % HYDROWAX 138),  $0,71 \text{ N/mm}^2$  (2 % HYDROWAX 138),  $0,79 \text{ N/mm}^2$  (1 % HYDROWAX 730),  $0,73 \text{ N/mm}^2$  (2 % HYDROWAX 730) und  $0,75 \text{ N/mm}^2$  (2 % Typ I) relativ homogen aus. Auffällig ist, dass durch die Zugabe von 1 % HYDROWAX 138 zum Weizenprotein höhere Querzugfestigkeiten gemessen werden als bei den ohne Paraffinzusatz angefertigten Mitteldichten Faserplatten. Da dies der einzige Fall ist, bei dem die Festigkeiten durch Zugabe von Paraffinen ansteigen, ist dies vermutlich in einem nicht optimalen Fertigungsprozess der ohne Paraffinzugabe hergestellten MDF-Platten begründet. Bei allen durchgeführten Serien der Variante V ist zu erkennen, dass mit der Erhöhung der Paraffindosis im Weizenprotein eine Verschlechterung der Querzugfestigkeiten einhergeht. Allerdings erfüllen die erzielten Querzugfestigkeiten aller in dieser Variante hergestellten Weizenprotein gebundenen

Mitteldichten Faserplatten den für Faserplatten dieser Stärke durch DIN vorgegebenen Mindestwert von 0,55 N/mm<sup>2</sup>.

Die in diesen Versuchen erzielten Quellwerte von 91,99 % (ohne Paraffin), 45,92 % (1 % HYDROWAX 138), 54,33 % (2 % HYDROWAX 138), 67,41 % (1 % HYDROWAX 730), 49,76 % (2 % HYDROWAX 730) und 28,97 % (2 % Typ I) liegen alle über dem durch DIN geforderten Maximalwert von 15 Prozent. Dabei zeigt sich, dass durch die grundsätzliche Zugabe von konventionellen Hydrophobierungsmitteln auf Paraffinbasis sowie die Erhöhung der Paraffinzugaben in den Leimflotten keine ausreichenden Dickenquellwerte bei den mit diesen Leimflotten hergestellten Mitteldichten Faserplatten erzielen lassen. Festzuhalten ist aber, dass durch das verwendete Hydrophobierungsmittel auf SiO<sub>2</sub>-Basis in diesen Versuchen die Quellwerte nahezu um 2/3 gegenüber den MDF-Platten ohne Hydrophobierungsmittel gesenkt werden konnten. Durch diese Versuche zeigt sich, dass 12 mm starke nur mit Weizenprotein gebundene MDF-Platten im Pilotmaßstab hergestellt werden können, die die Mindestanforderungen hinsichtlich der Festigkeiten erfüllen. Durch weitere Forschungs- und Entwicklungsarbeiten mit dem neuartigen Hydrophobierungsmittel aus SiO<sub>2</sub>-Basis könnten die Quellwerte dieser rein Weizenprotein gebundenen MDF-Platten soweit optimiert werden, dass auch hinsichtlich dieser Eigenschaften die Anforderungen nach DIN erfüllt werden.



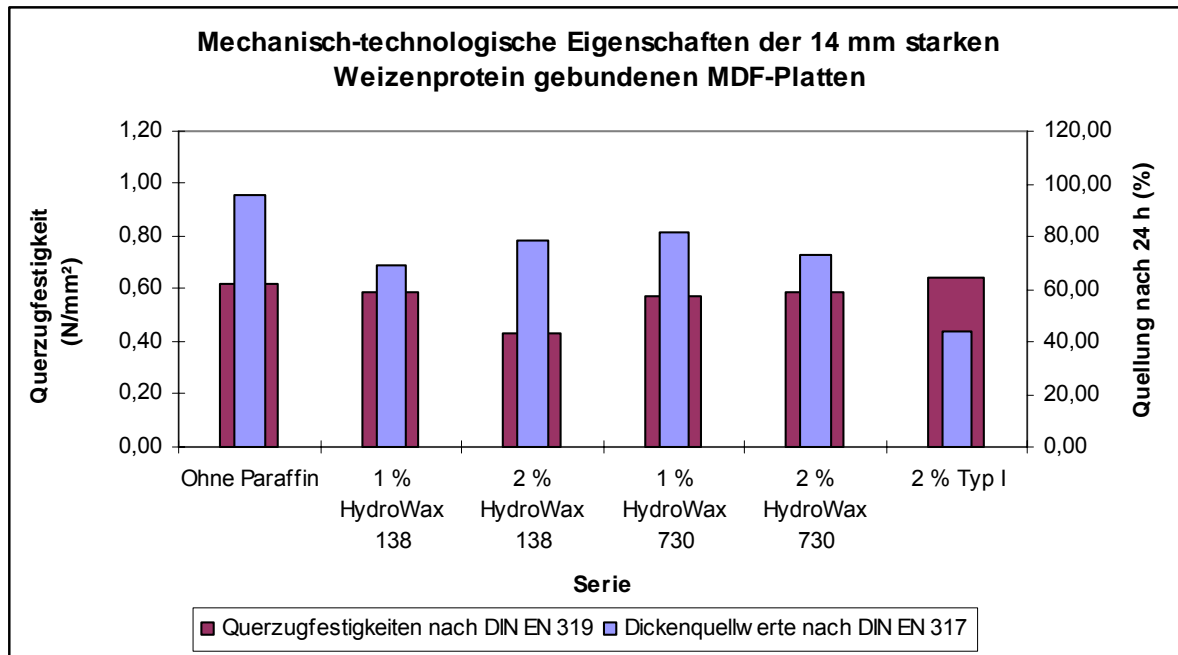
**Abbildung 4-56: Mechanisch-technologische Eigenschaften der 12 mm starken Weizenprotein gebundenen Mitteldichten Faserplatten**

Die angefertigten 30 Weizenprotein gebundenen 14 mm starken Mitteldichten Faserplatten im Pilotmaßstab der Variante VI (vgl. Tabelle 3-14) weisen bei einer Plattenstärke von 13,41 mm im Mittel eine durchschnittliche Rohdichte von 809 kg/m<sup>3</sup> auf. Damit sind die angestrebten Herstellungsparameter von 800 kg/m<sup>3</sup> Zielrohichte und 14 mm theoretischer Plattenstärke in diesen Serien der Variante VI erfüllt worden. Bei Betrachtung der mechanisch-technologischen Eigenschaften der 14 mm starken mit Weizenprotein gebundenen Mitteldichten Faserplatten ist zu erkennen, dass mit zunehmender Plattendicke auch die Quellwerte ansteigen und ein leichter Rückgang der Querkzugfestigkeiten gegenüber den bereits beschriebenen, dünneren Weizenprotein gebundenen MDF-Platten feststellbar ist (vgl. Abbildung 4-57). Es wurden durchschnittliche Querkzugfestigkeiten von 0,62 N/mm<sup>2</sup> (ohne Paraffin), 0,59 N/mm<sup>2</sup> (1 % HYDROWAX 138), 0,43 N/mm<sup>2</sup> (2 % HYDROWAX 138), 0,57 N/mm<sup>2</sup> (1 % HYDROWAX 730), 0,59 N/mm<sup>2</sup> (2 % HYDROWAX 730) und 0,64 N/mm<sup>2</sup> (2 % Typ I) bei den 14 mm starken Weizenprotein gebundenen MDF-Platten gemessen. Daraus ist ersichtlich, dass die Mindestfestigkeiten senkrecht zur Plattenebene von  $\geq 0,55$  N/mm<sup>2</sup> bei allen MDF-Platten dieser Variante erfüllt wurden. Einzige Ausnahme bilden die Mitteldichten Faserplatten, die mit einer Proteinleimflotte unter Zugabe von 2 % HYDROWAX 138 hergestellt wurden. Die Erhöhung der Paraffindosis in der Leimflotte hatte eine deutliche Reduzierung der Querkzugfestigkeiten bei den Werkstoffen dieser Serie zur Folge.

Die Quellwerte fallen im Vergleich zu den dünneren Weizenprotein gebundenen MDF-Platten mit Werten von 95,63 % (ohne Paraffin), 69,39 % (1 % HYDROWAX 138), 78,71 % (2 % HYDROWAX 138), 81,47 % (1 % HYDROWAX 730), 73,22 % (2 % HYDROWAX 730) und 43,91 % (2 % Typ I) höher aus. Dies ist in der höheren Weizenproteinkonzentration, bedingt durch den höheren Anteil beleimter Fasern gegenüber dünneren Faserplatten begründet. Dadurch erhöht sich ebenfalls der Anteil der hochwertigen Zucker und Hemicellulosen in den Mitteldichten Faserplatten, die einen Anstieg der Quellwerte der Faserplatten bewirken (KUO et al., 1998). Da aufgrund der höheren Plattendicke die Temperatur in der Plattenmitte während des Heißpressens nicht mehr so hoch ist, karamellisieren die Zucker nicht mehr in der gesamten MDF-Platte und können auf diese Weise später mehr Wasser aufnehmen. Auch bei diesen Serien ist zu erkennen, dass die Wirkungsweise der konventionellen Hydrophobierungsmittel durch die Kombination mit dem Weizenprotein nicht aufgehoben wird. Die Reduzierung der Dickenquellung ist jedoch zu gering und eine Erhöhung des Paraffingehaltes ist deutlich mit einer Verschlechterung der Querkzugfestigkeiten korreliert. Ausnahmen bilden hier das HYDROWAX 730, durch dessen Anteilserhöhung in der Leimflotte von 1 % auf 2 % die Querkzugfestigkeiten und Dickenquellwerte der MDF-Platten leicht



verbessert werden konnten. Am deutlichsten wirkt sich aber die 2 %ige Zugabe des Hydrophobierungsmittels vom Typ I zur Weizenproteinflotte bei der Reduzierung der Dickenquellwerte aus. Es ist sogar eine Zunahme der Querszugfestigkeiten durch die Beimischung dieses Hydrophobierungsmittels gegenüber den Platten ohne Hydrophobierungsmittel feststellbar.

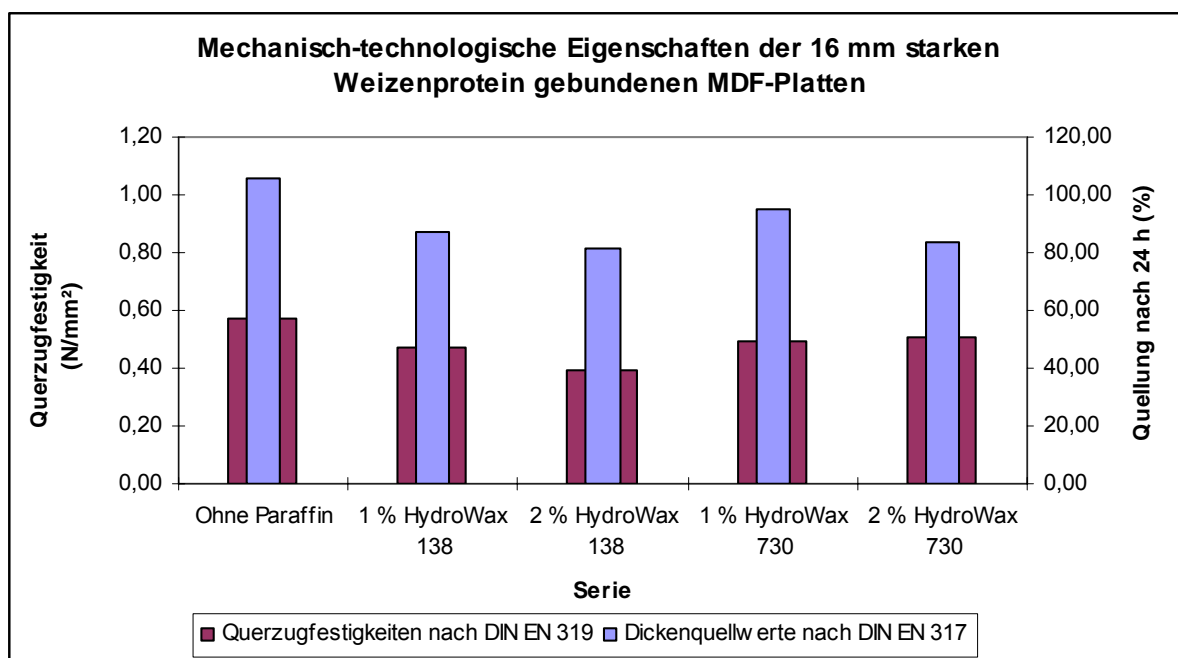


**Abbildung 4-57: Mechanisch-technologische Eigenschaften der 14 mm starken Weizenprotein gebundenen Mitteldichten Faserplatten**

Erhöht man die Plattenstärke von 14 mm auf 16 mm bei den Weizenprotein gebundenen Mitteldichten Faserplatten, so ist dies auch in den mechanisch-technologischen Eigenschaften der MDF-Platten zu erkennen (vgl. Abbildung 4-58). Die 25 Platten dieser Variante VII (vgl. Tabelle 3-15) wiesen eine Rohdichte von  $803 \text{ kg/m}^3$  im Mittel bei einer durchschnittlichen Werkstoffstärke von 15,42 mm auf. Die Querszugfestigkeiten fallen im Vergleich zu den dünneren Mitteldichten Faserplatten, die in den vorhergehenden Versuchen beschrieben wurden, mit durchschnittlichen Werten von  $0,57 \text{ N/mm}^2$  (ohne Paraffin),  $0,47 \text{ N/mm}^2$  (1 % HYDROWAX 138),  $0,39 \text{ N/mm}^2$  (2 % HYDROWAX 138),  $0,49 \text{ N/mm}^2$  (1 % HYDROWAX 730) und  $0,51 \text{ N/mm}^2$  (2 % HYDROWAX 730) geringer aus. Die für 16 mm starke Mitteldichte Faserplatten durch DIN vorgeschriebene Mindestfestigkeit von  $0,55 \text{ N/mm}^2$  wird nur von den MDF-Platten ohne Hydrophobierungsmitteln erreicht. Die übrigen Querszugfestigkeiten der Mitteldichten Faserplatten unterschreiten vermutlich aufgrund der Paraffinzugabe zum Weizenprotein den vorgeschriebenen Mindestwert. Die sinkenden Querszugfestigkeiten sind möglicherweise auf die geringeren Temperaturen während des Heißpressvorgangs in der

Plattenmitte zurückzuführen. Aufgrund der höheren Plattendicke kommt es zu einer geringeren Hitzentwicklung in der Platte; die Temperatur ist bei dieser Plattendicke vermutlich nicht mehr ausreichend, um eine wirksame Vernetzung der Proteine im Weizenprotein zu bewirken (NUHN, 1997; KRUG 2001a).

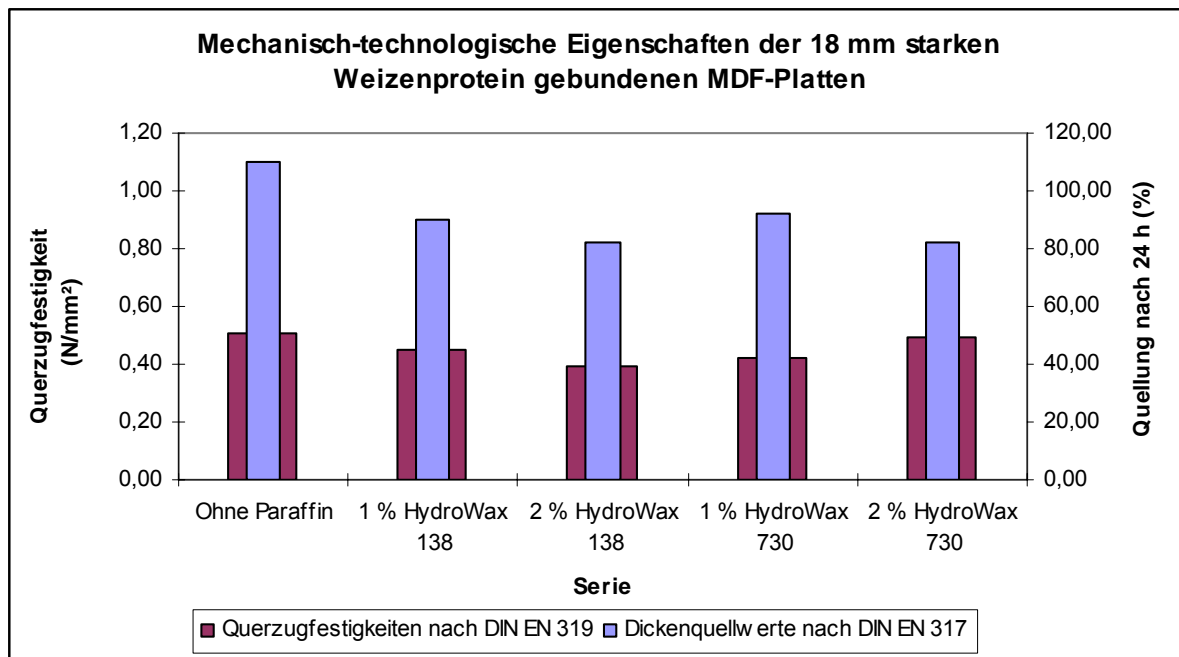
Die Auswirkungen der verwendeten Hydrophobierungsmittel bei diesen Serien der Variante VII beschränken sich nahezu ausschließlich auf eine Verschlechterung der Querszugfestigkeiten der mit diesen Leimflotten hergestellten Mitteldichten Faserplatten. Eine effektive Reduzierung der Dickenquellwerte durch die Zugabe von Hydrophobierungsmitteln bzw. die Erhöhung der Paraffindosis in den Leimflotten konnte bei den gemessenen Mittelwerten von 105,70 % (ohne Paraffin), 87,18 % (1 % HYDROWAX 138), 81,62 % (2 % HYDROWAX 138), 95,23 % (1 % HYDROWAX 730) und 83,22 % (2 % HYDROWAX 730) nicht ermittelt werden. Dies ist vermutlich in der nicht mehr stattfindenden Karamellisierung der im Weizenprotein enthaltenen mehrwertigen Zucker bedingt. Aufgrund nicht mehr ausreichender Temperaturen in der Platte während des Heißpressvorgangs können die Zucker im Weizenprotein nicht mehr karamellisieren und nehmen so später bedeutend mehr Wasser auf. Auch die im Weizenprotein befindlichen Hemicellulosen werden aufgrund dieser Pressbedingungen nicht mehr ausreichend in die vernetzten Strukturen des Bindemittels während des Heißpressvorgangs mit eingebunden und nehmen daher einen bedeutenden Anteil an Wasser auf.



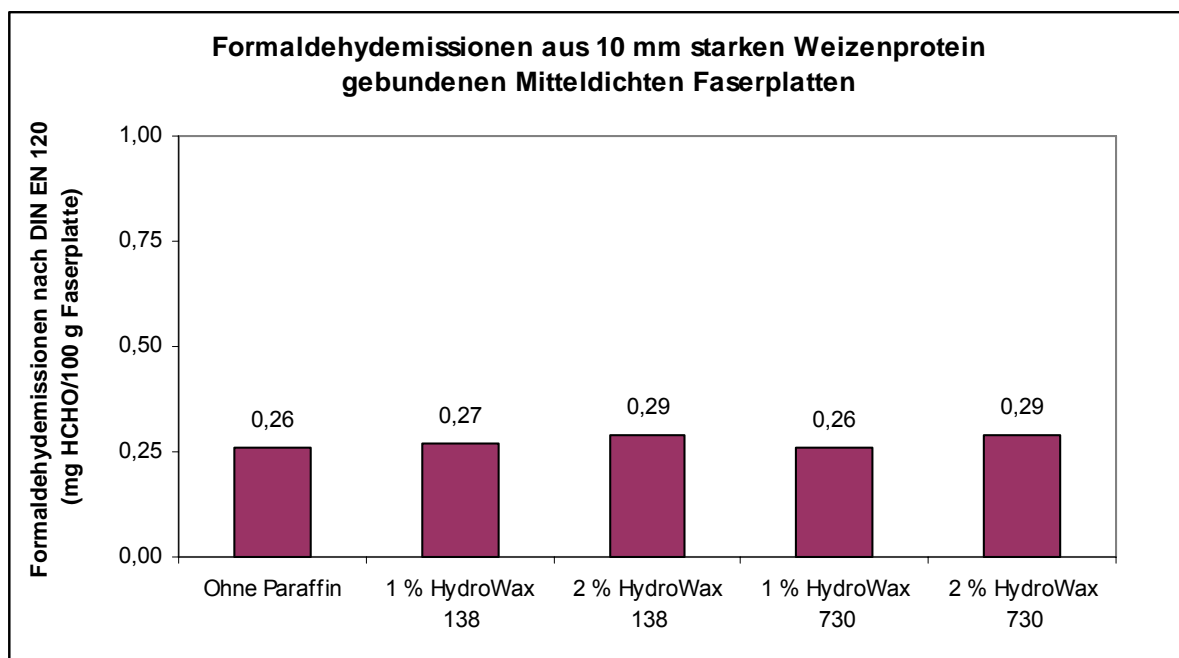
**Abbildung 4-58: Mechanisch-technologische Eigenschaften der 16 mm starken Weizenprotein gebundenen Mitteldichten Faserplatten**

Bei den 18 mm starken mit Weizenprotein gebundenen Mitteldichten Faserplatten der Variante VIII (vgl. Tabelle 3-15) zeigt sich die nicht mehr ausreichende Presstemperatur ebenfalls in deutlich abfallenden mechanisch-technologischen Eigenschaften (vgl. Abbildung 4-59). Die Platten weisen trotz einer durchschnittlichen Rohdichte von  $801 \text{ kg/m}^3$  nur sehr geringe Querkzugfestigkeiten auf. Es wurden bei den 25 Platten dieser Variante VIII durchschnittliche Festigkeiten senkrecht zur Plattenebene von  $0,51 \text{ N/mm}^2$  (ohne Paraffin),  $0,45 \text{ N/mm}^2$  (1 % HYDROWAX 138),  $0,39 \text{ N/mm}^2$  (2 % HYDROWAX 138),  $0,42 \text{ N/mm}^2$  (1 % HYDROWAX 730) und  $0,49 \text{ N/mm}^2$  (2 % HYDROWAX 730) gemessen. Die geforderte minimale Festigkeit von  $0,55 \text{ N/mm}^2$  nach DIN für Platten mit 18 mm Stärke konnte von keiner Serie dieser Variante erzielt werden. Dabei konnten die besten Querkzugfestigkeiten bei den MDF-Platten ermittelt werden, die ohne Hydrophobierungsmittel angefertigt wurden. Die Zugabe von Hydrophobierungsmitteln, kombiniert mit zu geringen Temperaturen während des Heißpressvorgangs in den Platten führten möglicherweise zu einer reversiblen Denaturierung der Proteine (NUHN,1997). Dadurch konnten keine ausreichenden Festigkeiten in den 18 mm starken Mitteldichten Faserplatten erzielt werden.

Auch die gemessenen Quellwerte dieser Weizenprotein gebundenen Mitteldichten Faserplatten zeigen, dass die im natürlichen Bindemittel enthaltenen mehrwertigen Zucker aufgrund zu geringer Temperaturen während des Heißpressens nicht karamellisiert worden sind und damit eine erhöhte Wasseraufnahme der MDF-Proben verbundenen ist. Auch die grundsätzliche Zugabe von Hydrophobierungsmitteln und die Änderung der Paraffindosis ist bei den ermittelten Quellwerten von 110,27 % (ohne Paraffin), 89,73 % (1 % HYDROWAX 138), 82,25 % (2 % HYDROWAX 138), 91,88 % (1 % HYDROWAX 730) und 82,43 % (2 % HYDROWAX 730) nicht erkennbar. Trotz der Verwendung von Hydrophobierungsmitteln gibt es keine effektive Reduzierung der Dickenquellwerte. Lediglich der negative Einfluss der Hydrophobierungsmittel auf die Querkzugfestigkeiten der Weizenprotein gebundenen Mitteldichten Faserplatten scheint sich auch in den Serien dieser Variante VIII zu wiederholen. Dabei ist es in diesem Fall allerdings schwierig, definitiv eine Absenkung der Querkzugfestigkeiten mit der Zugabe von Hydrophobierungsmitteln zu korrelieren, da bei diesen 18 mm starken MDF-Platten mehrere Faktoren, wie bereits bei der Beschreibung der Festigkeiten oben im Text erläutert, das zustande kommen optimaler Querkzugfestigkeiten unterbunden haben.



**Abbildung 4-59: Mechanisch-technologische Eigenschaften der 18 mm starken Weizenprotein gebundenen Mitteldichten Faserplatten**



**Abbildung 4-60: Formaldehydemissionen aus den Weizenprotein gebundenen MDF-Platten nach der Perforator-Methode (DIN EN 120)**

Die Messung der Formaldehydabgabe aus den 10 mm starken mit Weizenprotein gebundenen Mitteldichten Faserplatten zeigt, dass die berechneten Werte von 0,26 mg (ohne Paraffin), 0,27 mg (1 % HYDROWAX 138), 0,29 (2 % HYDROWAX 138), 0,26 (1 % HYDROWAX 730) und 0,29 mg HCHO pro 100 g Faserplatte (2 % HYDROWAX 730), dargestellt in Abbildung 4-60,

sehr gering sind und den durch die DiBt-Richtlinie 100 (1994) vorgegeben, maximalen Emissionswert von 7 mg Formaldehyd pro 100 g Faserplatten unterschreiten. Dies ist nicht verwunderlich, denn in dem Weizenprotein befindet sich, mit Ausnahme der 0,1 %igen Zugabe von Formaldehyd als Konservierungsmittel, kein weiteres Formaldehyd. Diese Formaldehydemission kann noch weiter gesenkt werden, da als Konservierungsmittel alternativ auch Propionsäure in der Weizenprotein-Suspension verwendet werden kann, die kein Formaldehyd enthält. Die Weizenprotein-Suspension weist bei der Zugabe von 0,1 % Propionsäure ebenso wie bei der Zugabe von 0,1 % Formaldehyd eine Haltbarkeit von durchschnittlich 6 Monaten auf. Die nach der Perforator-Methode ermittelten und berechneten Formaldehydemissionen setzten sich daher einerseits aus den geringen Anteilen des Konservierungsmittels und andererseits dem im Holz natürlich vorkommenden Formaldehyd, der auch noch im Fasermaterial enthalten ist, zusammen. Dabei entsprechen die ermittelten Formaldehydemissionen nahezu den natürlichen Formaldehydemissionen aus Holz (SIRCH und KEHR, 1997).

#### **4.2.5.1 Fazit der mechanisch-technologischen Eigenschaften Weizenprotein gebundener MDF-Platten unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten**

Die ermittelten mechanisch-technologischen Eigenschaften der Weizenprotein gebundenen Mitteldichten Faserplatten zeigen, dass ein Einsatz dieses natürlichen Bindemittels aus nachwachsenden Rohstoffen zur Herstellung von Mitteldichten Faserplatten zurzeit eingeschränkt realisierbar ist. Bei der Verwendung dieses Bindemittels in Kombination mit den konventionellen Bindemitteln Harnstoff- bzw. Phenol-Formaldehyd-Harz konnte festgestellt werden, dass eine 25 %ige Substitution der konventionellen Bindemittel durch die in diesem Forschungsvorhaben entwickelte Weizenprotein-Suspension unter Verwendung herkömmlicher Hydrophobierungsmittel möglich ist, ohne Verschlechterungen bei den mechanisch-technologischen Eigenschaften dieser Mitteldichten Faserplatten in Kauf nehmen zu müssen.

Soll das Weizenprotein als alleiniges Bindemittel zur Herstellung von Mitteldichten Faserplatten verwendet werden, so ist dies in Kombination mit Paraffinen in industrieüblichen Dosierungen bis zu einer Plattenstärke von 6 mm realisierbar. Bei Plattendicken über 6 mm stellte sich heraus, dass aufgrund des höheren Werkstoffgewichts und des damit verbundenen höheren Proteinanteils in der Platte die hydrophobierenden Eigenschaften der Paraffine

aufgrund von Wechselwirkungen zwischen den Hydrophobierungsmitteln und dem Weizenprotein unterbunden wurden. Die durch DIN vorgegebenen Maximalwerte bzgl. der Dickenquellung nach 24 h Wasserlagerung konnten bei den Weizenprotein gebundenen MDF-Platten nicht mehr realisiert werden. Zudem konnten aufgrund der Wechselwirkungen zwischen den naturnahen Bindemittel und den Hydrophobierungsmitteln auch geringere Quersugfestigkeiten der Weizenprotein gebundenen MDF-Platten gemessen werden. Allerdings erfüllten diese Platten bis zu einer Stärke von 16 mm die nach DIN geforderten Mindestfestigkeiten senkrecht zur Plattenebene.

Des Weiteren konnten sehr gute mechanisch-technologische Eigenschaften der Weizenprotein gebundenen Mitteldichten Faserplatten unter Zugabe von Hydrophobierungsmitteln auf SiO<sub>2</sub>-Basis zur Leimflotte ermittelt werden. Da sich diese Möglichkeit erst zu einem späteren Zeitpunkt dieses Vorhabens ergab, besteht auf diesem Gebiet sicherlich noch erheblicher Optimierungsbedarf.

Abschließend lässt sich aussagen, dass bei einem durchschnittlichen Preis von 300 € pro Tonne Weizenprotein atro (CERESTAR, 2005) sich erhebliche Einsparungen bei den Leimkosten konventioneller Bindemittel erzielen lassen. Der Preis für Harnstoff-Formaldehyd-Harz lag im Jahr 2005 bei durchschnittlich 363 € pro Tonne Festharz (PFLEIDERER, 2005), so dass sich bei der Verwendung von Weizenprotein eine Einsparung von 63 € pro Tonne verwendeten naturnahen Bindemittel erzielen lassen. Die Erkenntnis, dass bis zu 25 % der konventionellen Bindemittel durch das Weizenprotein unter Beibehaltung konstanter mechanisch-technologischer Eigenschaften substituiert werden können, stellt für die Holzwerkstoffindustrie eine enorme Möglichkeit zur Kosteneinsparung dar, da zurzeit die Gesamtherstellungskosten von Holzwerkstoffen bis zu 20 % von den Leimkosten bestimmt werden (KHARAZIPOUR, 2004).

### **4.3 Mykologische Untersuchungen an Mitteldichten Faserplatten**

#### **4.3.1 Holzabbauversuch an Mitteldichten Faserplatten**

Die in Abbildung 4-61 graphisch dargestellten Ergebnisse der optischen Bewuchsbonitierung der mit Weizenprotein gebundenen Faserplatten weisen nach SHEKHOLESLAMI (1986) durchschnittlich alle einen guten bis üppigen Bewuchs auf. Lediglich die mit MERGAL S 88 geschützten Mitteldichten Faserplatten, die mit *Coniophora puteana* und *Trichoderma viridae*

beimpft sind, zeigen abweichende Werte. Dabei fällt besonders der mit 20 % bonitierte, nur spärliche Bewuchs des Schimmelpilzes (*Trichoderma viridae*) auf. Aber auch der Braunfäulepilz, *Coniophora puteana*, wächst nur sehr langsam auf den geschützten MDF-Proben (64 %).

Bei allen mit Weizenprotein gebundenen Mitteldichten Faserplatten war festzustellen, dass die Pilze durchschnittlich 5 bis 7 Tage mehr benötigten, um die Holzwerkstoffproben zu be- und überwachsen, als bei den Harnstoff-Formaldehyd-Harz gebundenen Faserplatten. Dies ist in der stärkeren Wasseraufnahme der mit Weizenprotein hergestellten Faserplatten begründet. Zu erkennen war dies auch an der leichten Dickenquellung der Faserplattenproben, die durch eine Feuchtigkeitsaufnahme bewirkt wird. Die Platten haben geringe Mengen der Flüssigkeit aus dem Nährmedium aufgenommen, und damit das Pilzwachstum auf den Nährböden etwas erschwert. Bei den mit Harnstoff-Formaldehyd-Harz hergestellten Mitteldichten Faserplatten war keine Wasseraufnahme zu erkennen.

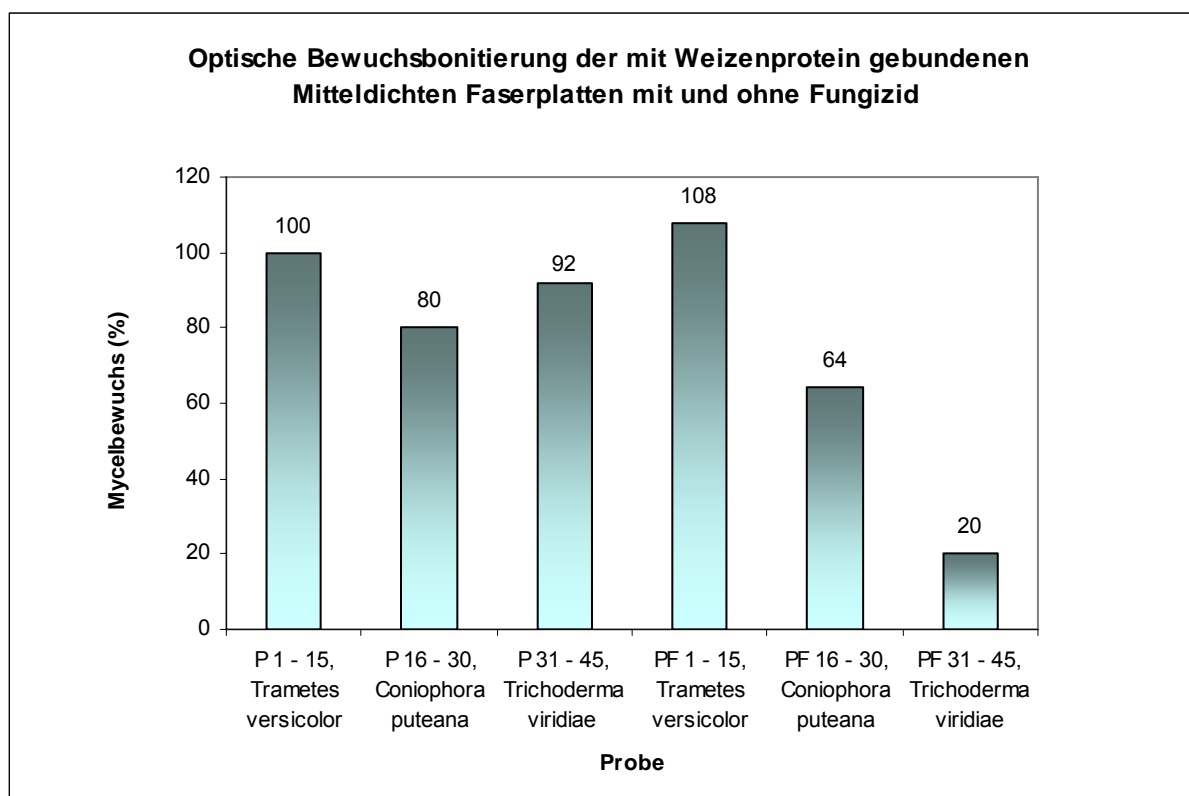
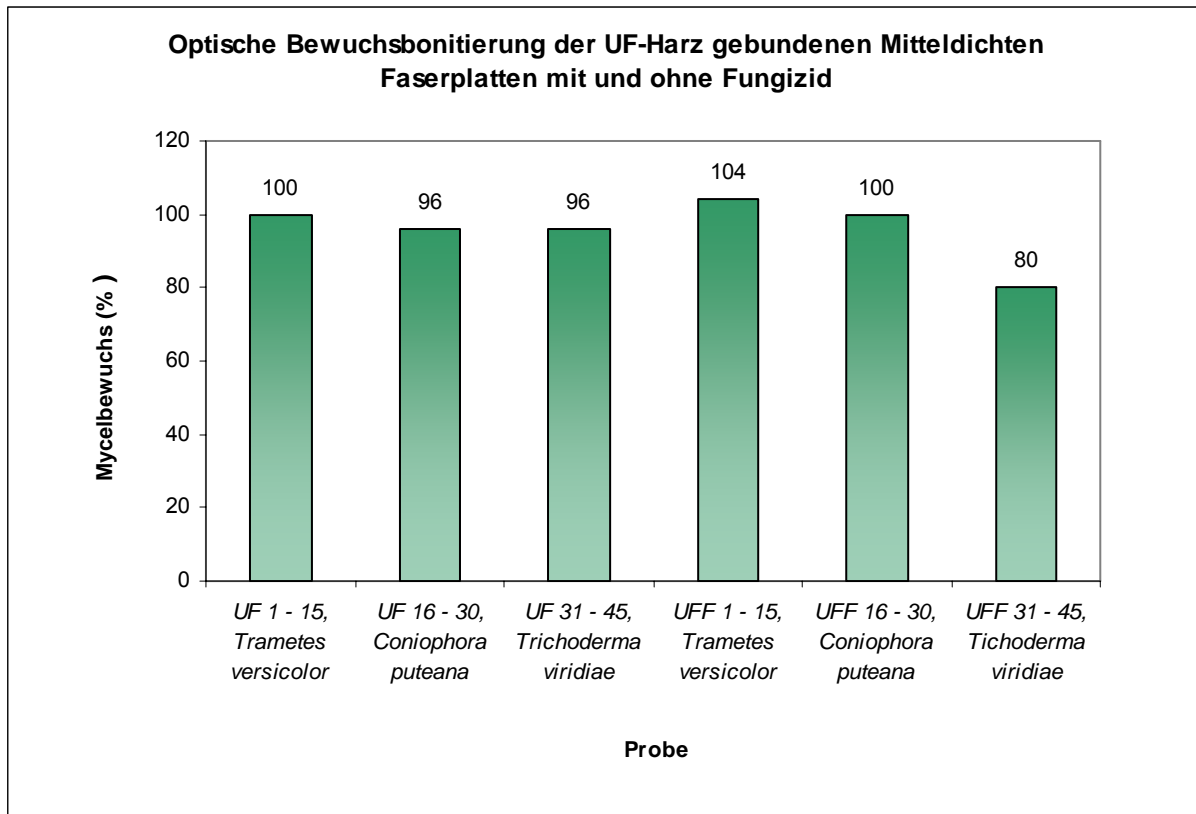


Abbildung 4-61: Überwachungsgrade der Weizenprotein gebundenen MDF-Platten mit (PF 1–45) und ohne (P 1-45) Fungizid

Die in Abbildung 4-62 dargestellten Ergebnisse der optischen Bewuchsbonitierung der Harnstoff-Formaldehyd-Harz gebundenen Mitteldichten Faserplatten bewegen sich durchschnittlich alle um einen Wert von 100 %. Die geschützten wie auch die ungeschützten

Faserplattenproben sind durchgehend vollständig bewachsen. Eine Ausnahme in dieser Versuchsreihe ist der Schimmelpilz auf den geschützten Holzfaserwerkstoffen UFF 31 – 45. *Trichoderma viridae* liegt mit einem Überwachungsgrad von nur 80 %, d.h. der Pilz hat nur die Oberkante der Faserplattenprobe erreicht, deutlich unter den anderen Ergebnissen der mit Harnstoff-Formaldehyd-Harz hergestellten Mitteldichten Faserplatten.



**Abbildung 4-62: Überwachungsgrade der UF-Harz gebundenen MDF-Platten mit (UFF 1-45) und ohne (UF 1-45) Fungizid**

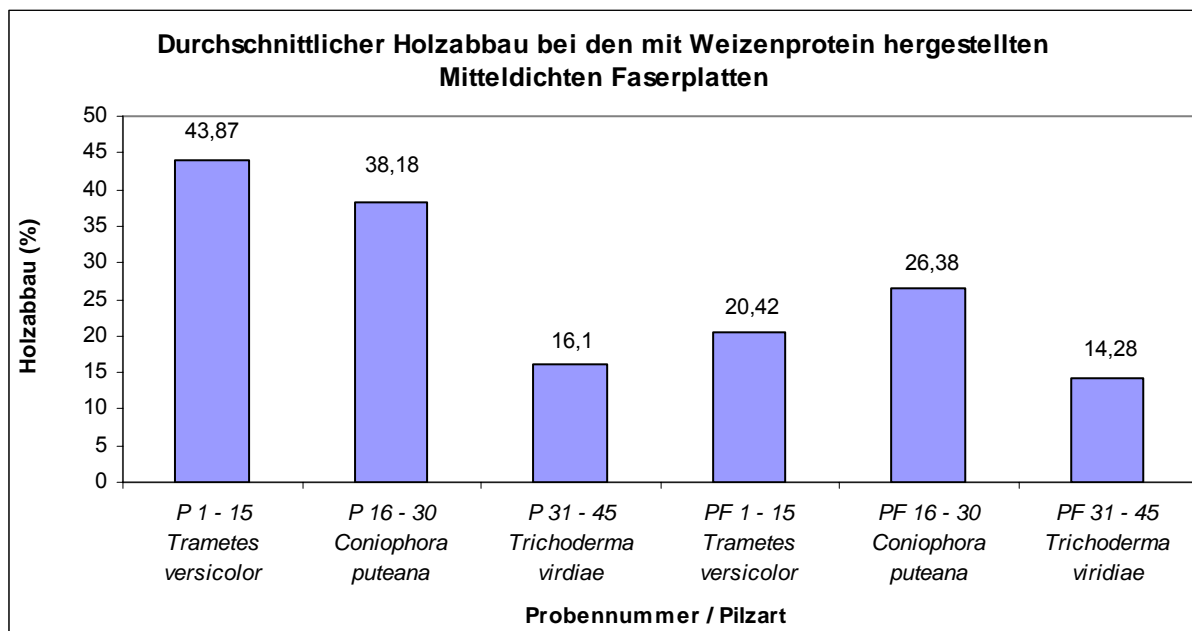
Bei Betrachtung der durchschnittlichen Holzabbauraten der unterschiedlichen Mitteldichten Faserplatten in Abbildung 4-63 fällt auf, dass der Einsatz des verwendeten Fungizids MERGAL S 88 eine Reduzierung des Holzabbaues bei allen Faserplattenproben bewirkt. Am deutlichsten ist dies bei *Trametes versicolor* zu erkennen. Die Holzzerstörung der ungeschützten Platten beträgt durchschnittlich 43,87 %, die der geschützten Platten nur 20,42 %. Durch den Einsatz des Fungizids lässt sich der Holzabbau bei diesem bevorzugt Lignin abbauenden Weißfäulepilz um 53,45 % senken.

Der Holzabbau beim Braunfäulepilz *Coniophora puteana* ist mit 38,18 % bei den ungeschützten Mitteldichten Faserplatten nicht so hoch wie bei dem Weißfäulepilz, aber für einen Versuchszeitraum von 4 Monaten trotzdem beachtlich. Durch das im Versuch



verwendete Pilzschutzmittel MERGAL S 88 lässt sich die Holzerstörung aber um ca. 1/3 auf 26,38 % reduzieren.

Der im Versuch verwendete Schimmelpilz *Trichoderma viridae* hat die ungeschützten Faserplattenproben mit durchschnittlichen 16,1 % im Vergleich zu den Weiß- und Braunfäulepilzen nur gering abgebaut. Der Einsatz des Fungizids MERGAL S 88 hat bei den geschützten Proben nur zu einem minimalen Rückgang der Holzerstörung geführt (14,28 %). Die Differenz zu den ungeschützten Proben beträgt nur 1,82 %, umgerechnet auf den Holzabbau der ungeschützten Faserplatten sind dies aber immer noch 11,3 %.



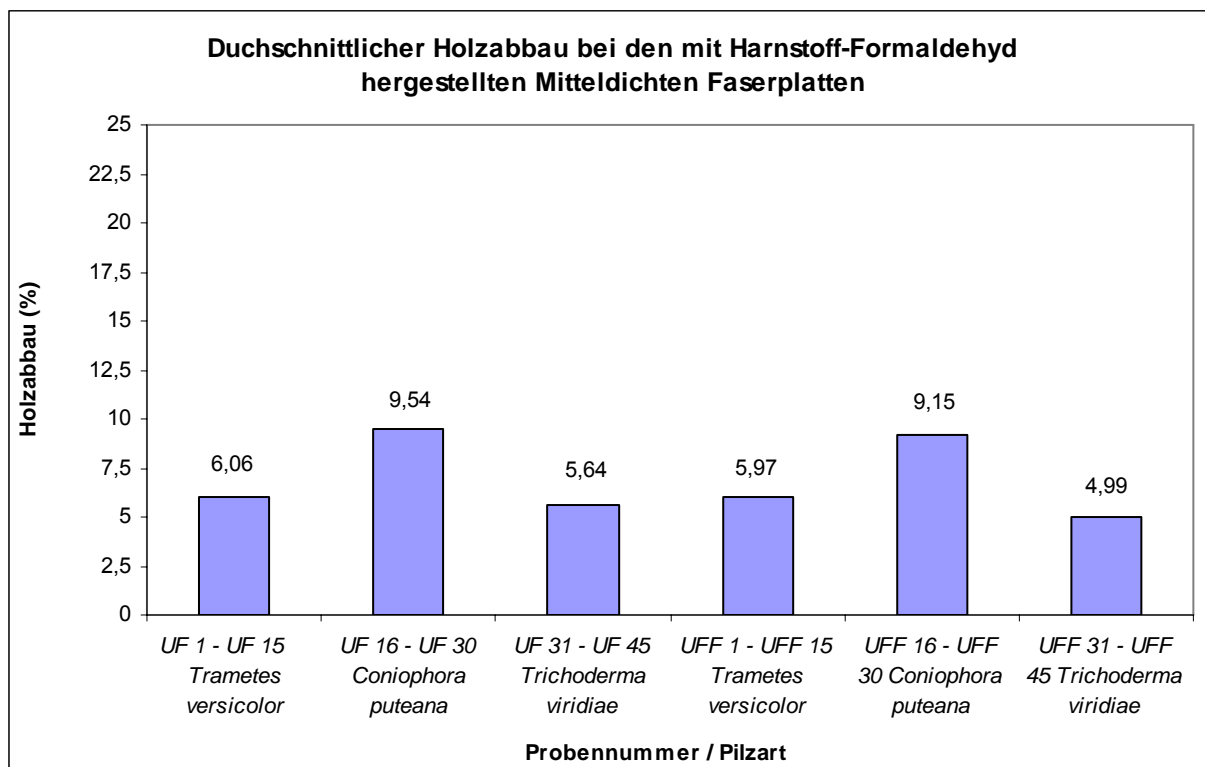
**Abbildung 4-63: Durchschnittliche Holzerstörung der mit Weizenprotein gebundenen MDF-Platten mit (PF 1-45) und ohne (P 1-45) Fungizid**

Die in Abbildung 4-64 dargestellte durchschnittliche Holzerstörung der mit Harnstoff-Formaldehyd-Harz gebundenen Mitteldichten Faserplatten liegt deutlich unter den Abbauraten der zuvor beschriebenen, mit Weizenprotein hergestellten Mitteldichten Faserplatten. Dabei zeigt sich, dass die mit synthetischen Bindemitteln hergestellten Holzwerkstoffe eine höhere Widerstandsfähigkeit gegenüber Holzerstörenden Pilzen haben (KUO et al., 1998). Auch in dieser Versuchsreihe ist zu erkennen, dass durch den Einsatz des Fungizids MERGAL S 88 eine Reduzierung des Holzabbaues bewirkt wird. Im Vergleich zu den Weizenprotein gebundenen Faserplatten ist die Reduzierung der Holzerstörung durch die Fungizidzugabe jedoch gering.

Durch *Trametes versicolor* wurden die Holzbestandteile in dieser Versuchsreihe, hauptsächlich Lignin, zu 6,06 % abgebaut. Die geschützten Proben wiesen einen Abbau der Holzbestandteile von 5,97 % auf. Basierend auf diesen Ergebnissen ist abzuleiten, dass der Einsatz des Fungizids bei dem Weißfäulepilz nur minimal eine Reduzierung des Holzabbaues zur Folge hat.

Der Braunfäulepilz *Coniophora puteana* weist bei den ungeschützten Harnstoff-Formaldehyd-Harz gebundenen Faserplatten mit 9,54 % den höchsten Holzerstörungsgrad auf. Das verwendete Fungizid reduziert den Holzabbau, in diesem Fall vorwiegend Cellulose, bei den geschützten Holzfaserverwerkstoffen um 0,39 % auf 9,15 %.

Die Holzerstörung der Mitteldichten Faserplattenproben durch den Schimmelpilz *Trichoderma viridae* war in dieser Versuchsserie mit 5,64 % bei den ungeschützten und mit 4,99 % bei den geschützten Proben ähnlich gering wie der Holzabbau durch den Weißfäulepilz *Trametes versicolor*. Das verwendete Fungizid MERGAL S 88 reduzierte in diesem Fall den Holzabbau um lediglich 0,65 %.



**Abbildung 4-64:** Durchschnittliche Holzerstörung der mit Harnstoff-Formaldehyd-Harz gebundenen MDF-Platten mit (UFF 1-45) und ohne (UF 1-45) Fungizid

Betrachtet man nun die Ergebnisse der visuellen Bewuchsbonitierung mit den Ergebnissen der Holzabbauraten, so kann man bei allen Holzwerkstoffproben in dieser Versuchsreihe feststellen, dass es nicht möglich ist, Rückschlüsse aus der Bewuchsbonitierung auf die Holzabbauraten zu ziehen. Auf Grund der Tatsache, dass eine Probe mit Pilzmycel be- und überwachsen ist, ist nicht zu folgern, dass das Pilzmycel auch in die Probe wächst und das Holz abbaut. Ein Beispiel hierfür ist der Schimmelpilz *Trichoderma viridae*. Dieser hat bei den geschützten, mit Weizenprotein gebundenen Faserplatten nur einen Überwachungsgrad von 20 % erreicht, jedoch die Proben durchschnittlich zu 14,28 % abgebaut. Die geschützten mit Harnstoff-Formaldehyd-Harz gebundenen Faserplatten wurden von diesem Pilz zu 80 % bewachsen, jedoch nur zu 4,99 % abgebaut. Die gleiche Beobachtung tritt auch bei dem Braunfäulepilz *Coniophora puteana* auf. Die geschützten mit Weizenprotein hergestellten Faserplatten sind nur zu 64 % bewachsen aber zu 26,38 % zerstört. Die mit UF-Harz gebundenen Faserplatten sind zu 100 % bewachsen jedoch lediglich zu 9,15 % abgebaut. Diese Beobachtungen lassen sich anhand von zwei mechanisch-technologischen Eigenschaften der Mitteldichten Faserplatten erklären. Dafür sind zum einen die Querkzugfestigkeiten sowie zum anderen die hydrophoben Eigenschaften der verwendeten Holzwerkstoffproben von entscheidender Bedeutung. Durch eine stärkere Bindung und die hydrophoben Eigenschaften der Faserplatten wird das Wachstum des Mycels in die Platte erschwert. Der Holzabbau findet somit nur zu geringem Maße an der bewachsenen Oberfläche der Faserproben statt. Die in diesem Holzabbauversuch verwendeten Mitteldichten Faserplatten wurden alle unter den gleichen Konditionen hergestellt. Daher müssen die besseren Festigkeiten und hydrophoben Eigenschaften der mit Harnstoff-Formaldehyd-Harz gebundenen Faserplatten im verwendeten Bindemittel begründet sein.

Da jedoch ein Großteil der mit Weizenprotein gebundenen Mitteldichten Faserplatten aber die nach DIN-Norm geforderten Querkzugfestigkeiten aufweisen und somit für viele Einsatzzwecke verwendet werden können, ist die leichtere Abbaubarkeit durch Holzzerstörende Pilze ein positiver Aspekt dieser Platten, wenn man an die umweltfreundliche Entsorgung dieser Platten nach ihrer Verwendung denkt. Laut dem TA-Siedlungsabfallgesetz, das im Juni 2005 in Kraft trat, dürfen nur noch Materialien mit weniger als 5 % organischen Bestandteilen auf Deponien gelagert werden. Aufgrund der Tatsache, dass die mit Weizenprotein hergestellten Mitteldichten Faserplatten verglichen mit den UF-Harz gebundenen MDF-Platten durch Holzzerstörende Pilze mengenmäßig zu einem höheren Grad abgebaut werden, stellt die Zersetzung durch Pilze eine alternative Entsorgungsvariante dar.

### 4.3.2 Holzabbau an $^{14}\text{C}$ markierten Mitteldichten Faserplatten

Die Ergebnisse der Holzabbauversuche an  $^{14}\text{C}$ -U markierten Mitteldichten Faserplatten, gebunden mit Harnstoff-Formaldehyd-Harz Kauritec 407<sup>®</sup> flüssig der Fa. BASF bzw. mit der Weizenprotein-Suspension, sind in Abbildung 4-65 bis Abbildung 4-72 graphisch dargestellt. Dabei ist erkennbar, dass es deutliche Unterschiede hinsichtlich der eingesetzten Pilzarten zum Abbau der Holzbestandteile, sowie bei den verwendeten Bindemitteln zur Herstellung der MDF-Proben gibt. Die Graphiken geben dabei den mit der  $^{14}\text{C}$ -Messmethode ermittelten Abbau des  $^{14}\text{C}$ -U markierten Holzes über einen definierten Versuchszeitraum wieder. Um die absoluten Abbauraten anhand des Masseverlustes parallel zu den nach der  $^{14}\text{C}$ -Messmethode ermittelten Ergebnisse zu erhalten, werden in allen durchgeführten Versuchen die Trockengewichte der Weizenprotein gebundenen MDF-Proben vor und nach dem Abbauversuch ermittelt. Setzt man einen parallelen Abbau von radioaktivem und inaktivem Material voraus, so sollten die Abbauraten, gemessen anhand der Masseverluste in etwa doppelt so hoch sein, wie die nach der  $^{14}\text{C}$ -Messmethode ermittelten Werte, da zwischen radioaktivem und inaktivem Kohlenstoff keine chemischen Unterschiede bestehen.

In Abbildung 4-65 sind die Ergebnisse des Holzabbaus an  $^{14}\text{C}$ -U markierten UF-Harz gebundenen MDF-Proben durch den Weißfäulepilz *Trametes versicolor* dargestellt. Dabei fällt auf, dass die beiden parallel durchgeführten Doppelbestimmungen einen sehr gleichmäßigen Kurvenverlauf aufzeigen. Der durchschnittliche Abbau von ca. 4 % über eine Versuchsdauer von 120 Tagen ist für einen Weißfäulepilz sehr gering, zumal er die unterschiedlichen Holzbestandteile Lignin, Cellulose und Hemicellulose, wie in Kapitel 2.6.1 beschrieben, z. T. simultan zersetzen kann (LIESE, 1981; RAYNER und BODDY, 1988). Die erzielten Ergebnisse sind, ein gleichmäßiger Abbau von radioaktivem und inaktivem Material vorausgesetzt, jedoch durchaus mit den geringen Abbauraten aus dem Holzabbauversuch an nur mit inaktivem Material hergestellten MDF-Platten vergleichbar (siehe Abbildung 4-64). Der in diesem Fall zur Herstellung der MDF-Platten verwendete Harnstoff-Formaldehyd-Harz weist auf der einen Seite einen sehr hohen Stickstoffanteil auf (vgl. dazu Abbildung 4-20), was für das Mycelwachstum grundsätzlich förderlich ist, auf der anderen Seite wirkt der enthaltene Formaldehyd jedoch wie ein Fungizid, was die Holzzerstörung möglicherweise unterbindet. Aufgrund dieser möglichen fungiziden Wirkung des Formaldehyds wächst das Pilzmycel hauptsächlich nur auf der Oberfläche der Proben und kann nicht in die Werkstoffe eindringen, wodurch eine höhere Holzdegradation verhindert wird.

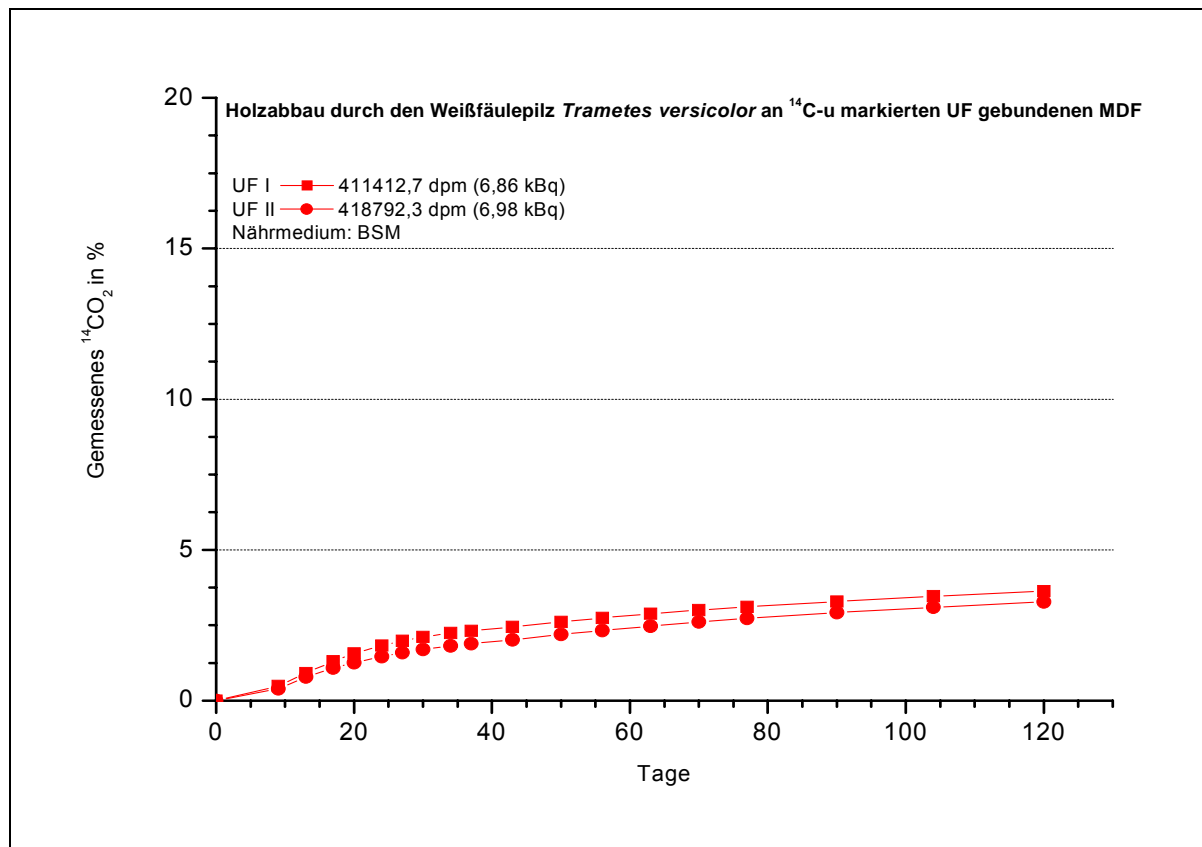


Abbildung 4-65: Holzersetzung an den  $^{14}\text{C}$ -U markierten UF-Harz gebundenen MDF durch *Trametes versicolor*

Ebenso die durch den Braunfäulepilz *Coniophora puteana* erzielten Ergebnisse im Holzabbauversuch an den  $^{14}\text{C}$ -U markierten und mit UF-Harz gebundenen MDF-Proben fallen mit nur ca. 2,5 % relativ gering aus (vgl. Abbildung 4-66). Sie liegen noch unter den in Kapitel 4.3.1 dargestellten Ergebnissen an vollständig mit inaktivem Material hergestellten MDF-Proben. Auch in diesem Fall zeigen die Kurven der beiden parallel durchgeführten Versuche einen recht gleichmäßigen Verlauf. Die Abbauraten bei Braunfäulepilzen sind erwartungsgemäß geringer als die von Weißfäulepilzen, da die Braunfäulepilze nur in sehr geringen Mengen das im Holz enthaltene Lignin abbauen können (DUNCAN, 1960; HAIDER und TROJANOWSKI, 1975). Die Braunfäulepilze sind, wie in Kapitel 2.6.2 beschrieben, spezialisiert auf den Abbau von Cellulosen und Hemicellulosen (DUNCAN, 1960; SCHWARZE, 1999). Die auch in diesem Fall nur sehr geringen Abbauraten sind wahrscheinlich auf die fungizide Wirkung des in den MDF-Proben enthaltenen Formaldehyds zurückzuführen (PARAMESWARAN und ROFFAEL, 1985). Auch das Mycel des Braunfäulepilzes wächst nur sehr spärlich in die UF-Harz gebundenen MDF-Proben ein, wie unter dem Lichtmikroskop nach der Beendigung des Versuches festzustellen war.

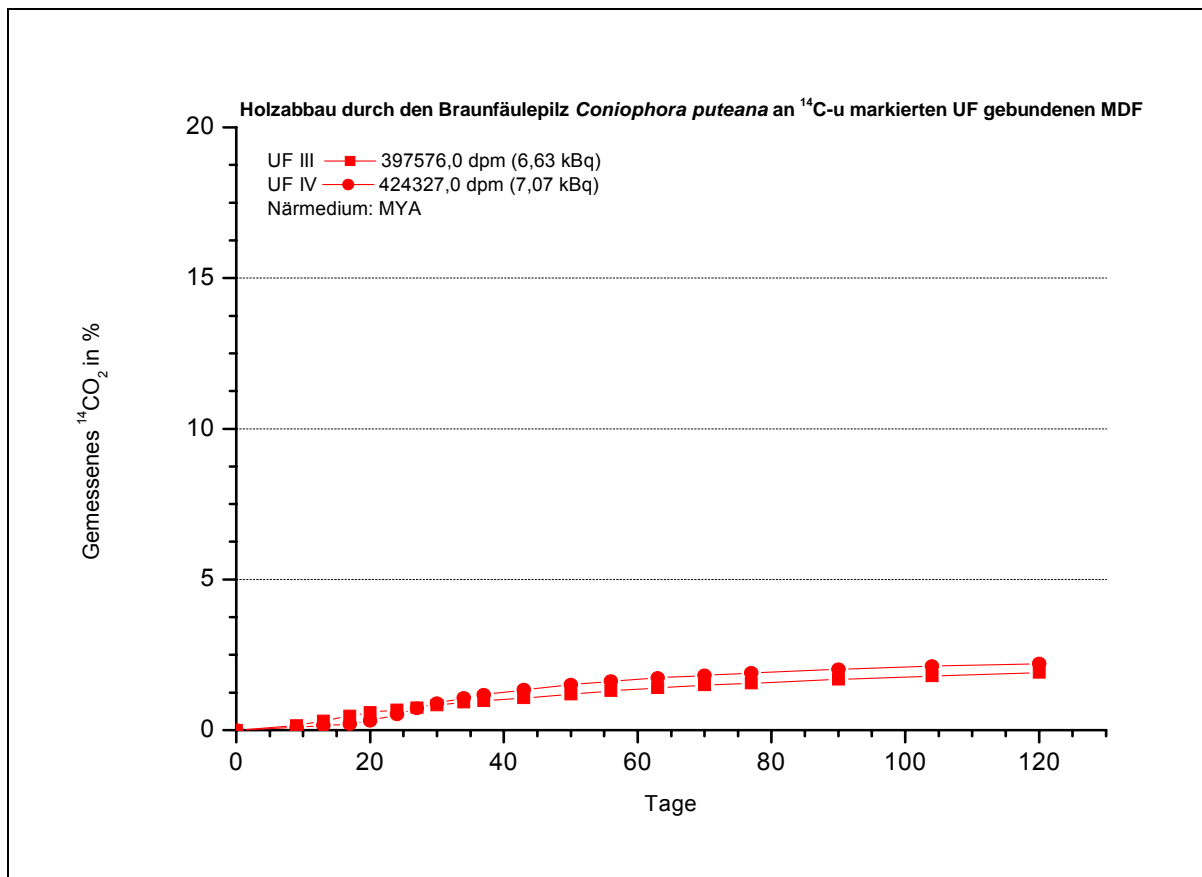


Abbildung 4-66: Holzzerersetzung an den  $^{14}\text{C}$ -U markierten UF-Harz gebundenen MDF durch *Coniophora puteana*

Die durch den Moderfäuleerreger *Trichoderma viridae* in diesem Versuch erzielten Zersetzungsgrade von ca. 3,75 % an den UF-Harz gebundenen Mitteldichten Faserplatten über eine Dauer von 120 Tagen fallen nur minimal aus (vgl. Abbildung 4-67). Der durchschnittliche Zersetzungsgrad von 3,75 % ist noch geringer als der an nur mit inaktivem Material erzielte Holzabbau (vgl. dazu auch Abbildung 4-65). Die Moderfäuleerreger bauen vorrangig die im Holz enthaltene Cellulose ab (vgl. Kapitel 2.6.3) und lassen sich daher im Allgemeinen auch nur durch sehr geringe Abbauraten am Holz charakterisieren (SCHWARZE, 1999). In diesem Fall werden die geringe Zersetzungsaktivität des Pilzes und das Wachstum des Pilzmycels in die Werkstoffprobe durch die fungizide Wirkung des zur Herstellung der MDF-Proben verwendeten konventionellen Bindemittels noch weiter unterbunden (PARAMESWARAN und ROFFAEL, 1985).

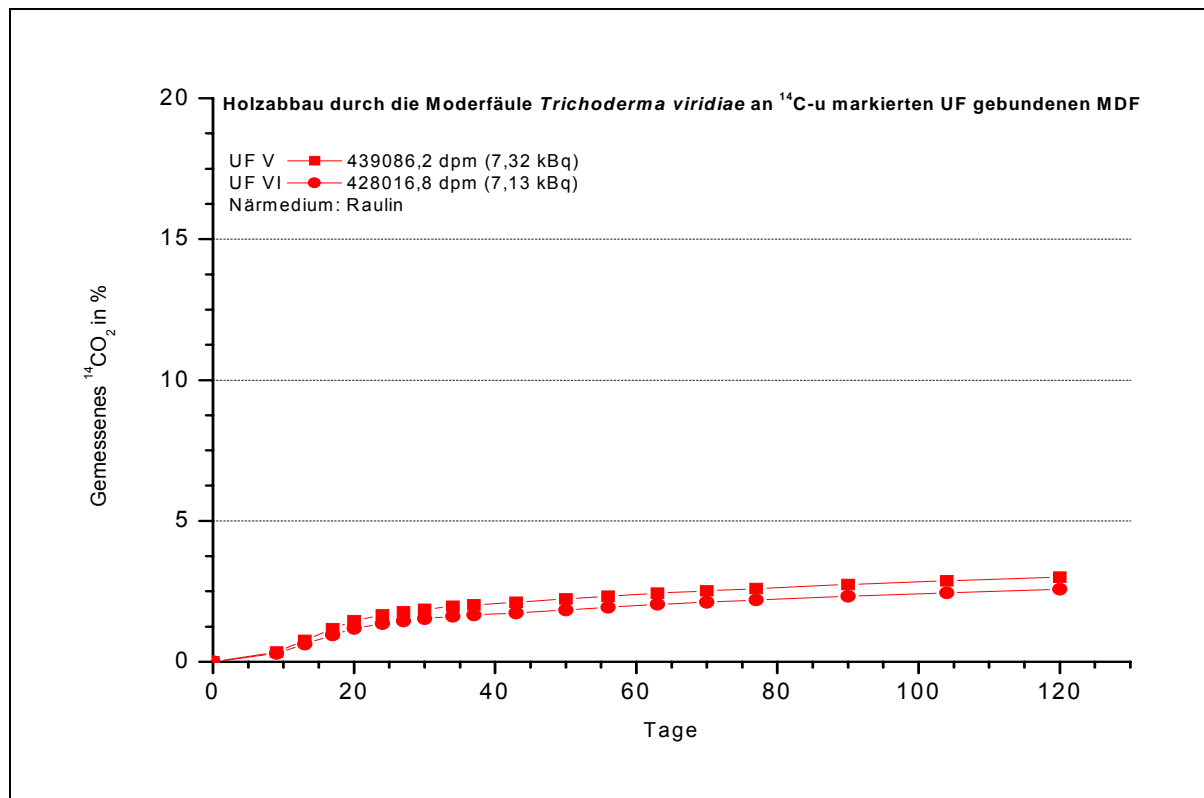
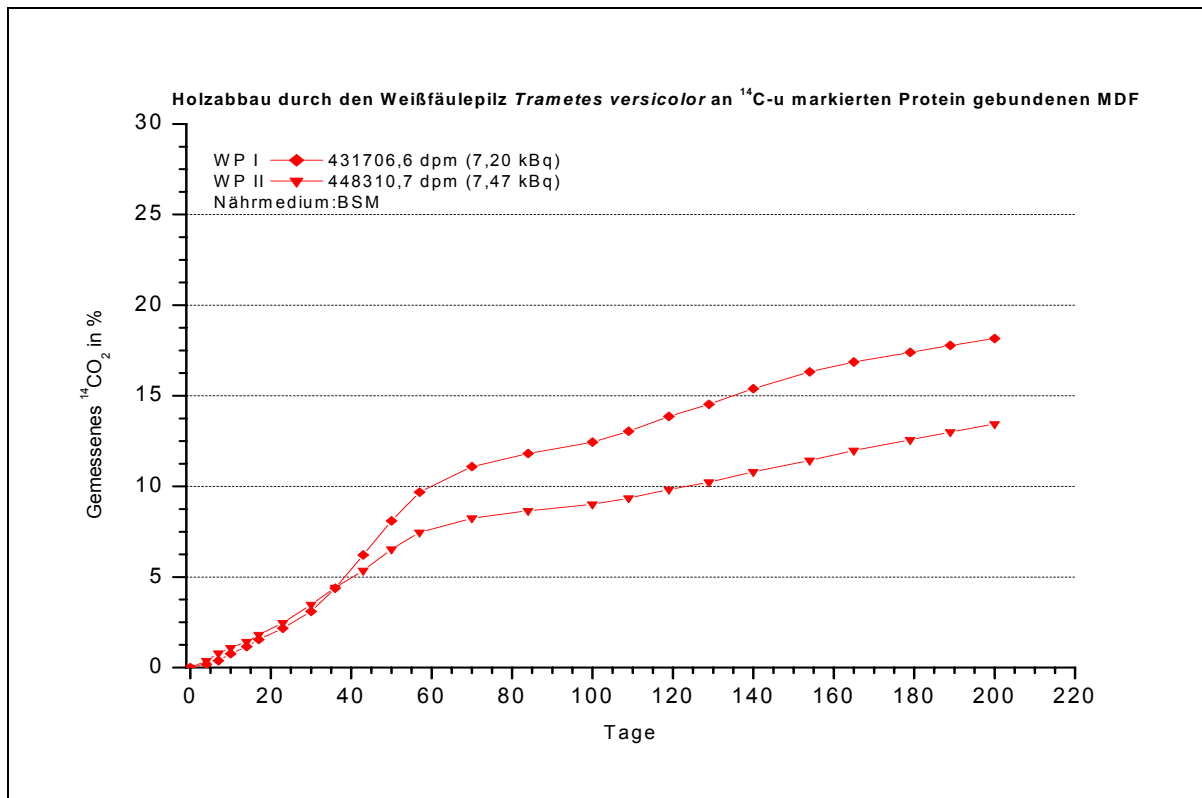


Abbildung 4-67: Holzzerstörung an den  $^{14}\text{C}$ -U markierten UF-Harz gebundenen MDF durch *Trichoderma viridae*

Bei den mit Weizenprotein gebundenen und mit  $^{14}\text{C}$ -U markiertem Material hergestellten Mitteldichten Faserplatten werden, verglichen mit den UF-Harz gebundenen Proben, höhere Abbaugrade durch die Holzzerstörenden Pilze erzielt. Die mit synthetischen Bindemitteln hergestellten MDF-Platten besitzen eine höhere Widerstandsfähigkeit gegenüber Holzzerstörenden Pilzen (KUO et al., 1998). Die Ergebnisse dieser Versuche sind in Abbildung 4-68 bis Abbildung 4-72 als Graphiken dargestellt.

Der Weißfäulepilz *Trametes versicolor* zeigt im Vergleich zu UF-Harz gebundenen MDF-Proben signifikante Unterschiede in der Degradation der Holzbestandteile. Die mit Protein gebundenen MDF-Proben wurden zu 12,5 % bzw. zu 18,5 % abgebaut. Die beiden Kurven weisen unterschiedliche Zersetzungsraten auf, was auf unterschiedliche Versuchsbedingungen zurückzuführen ist. Die hohen Stickstoffgehalte im Weizenprotein (vgl. Abbildung 4-21) stellen für die Pilze eine sehr gute Nährstoffquelle dar, die auch für die Pilze zugänglich und vermutlich vollständig nutzbar ist. Dadurch ist es für den Weißfäulepilz *Trametes versicolor* möglich, die Proben nicht nur an der Oberfläche zu besiedeln, sondern auch in die Holzwerkstoffe hereinzuwachsen. Aufgrund dieser Bedingungen und durch die Möglichkeit des simultanen Holzabbaus können in diesem Fall höhere Zersetzungsgrade erzielt werden

(LIESE, 1981; ERIKSON et al., 1990). Die Ergebnisse sind unter Vorbehalt eines gleichmäßigen Abbaus von inaktivem und radioaktivem Material, mit den in Kapitel 4.3.1 dargestellten Abbauraten an inaktiven MDF-Proben vergleichbar (vgl. dazu Abbildung 4-63).



**Abbildung 4-68: Holzabbau durch *Trametes versicolor* an Protein gebundenen  $^{14}\text{C}$ -U markierten MDF**

Die Degradationsraten des Braunfäulepilzes *Coniophora puteana* sowie des Moderfäuleerregers *Trichoderma viridae* an den Protein gebundenen Mitteldichten Faserplatten sind nur unwesentlich höher, verglichen mit den erzielten Ergebnissen der Harnstoff-Formaldehyd-Harz verleimten Mitteldichten Faserplatten (vgl. Abbildung 4-69 und Abbildung 4-70). Der Braunfäulepilz zeigte durchschnittlich eine Holzersetzung von 4 %, bei der Moderfäule wurden ebenfalls 4 % Holzabbau nach der  $^{14}\text{C}$ -Messmethode ermittelt. Der im Weizenprotein enthaltene Stickstoff stellt auch für diese Pilzarten eine wichtige Nährstoffquelle dar. Somit wäre eigentlich, da auch in diesen Versuchen der Stickstoff für die Pilze zugänglich war, mit höheren Abbauraten zu rechnen gewesen. Die geringen Abbauraten sind daher auf evtl. schwache Pilzkulturen zurückzuführen, da die Versuchsbedingungen über den gesamten Zeitraum von 200 Tagen konstant gehalten wurden. Ein weiterer Aspekt, der für schwache Kulturen spricht, ist die Tatsache, dass das Pilzmycel über den gesamten Versuchszeitraum nicht sehr tief in die MDF-Proben eingewachsen ist.



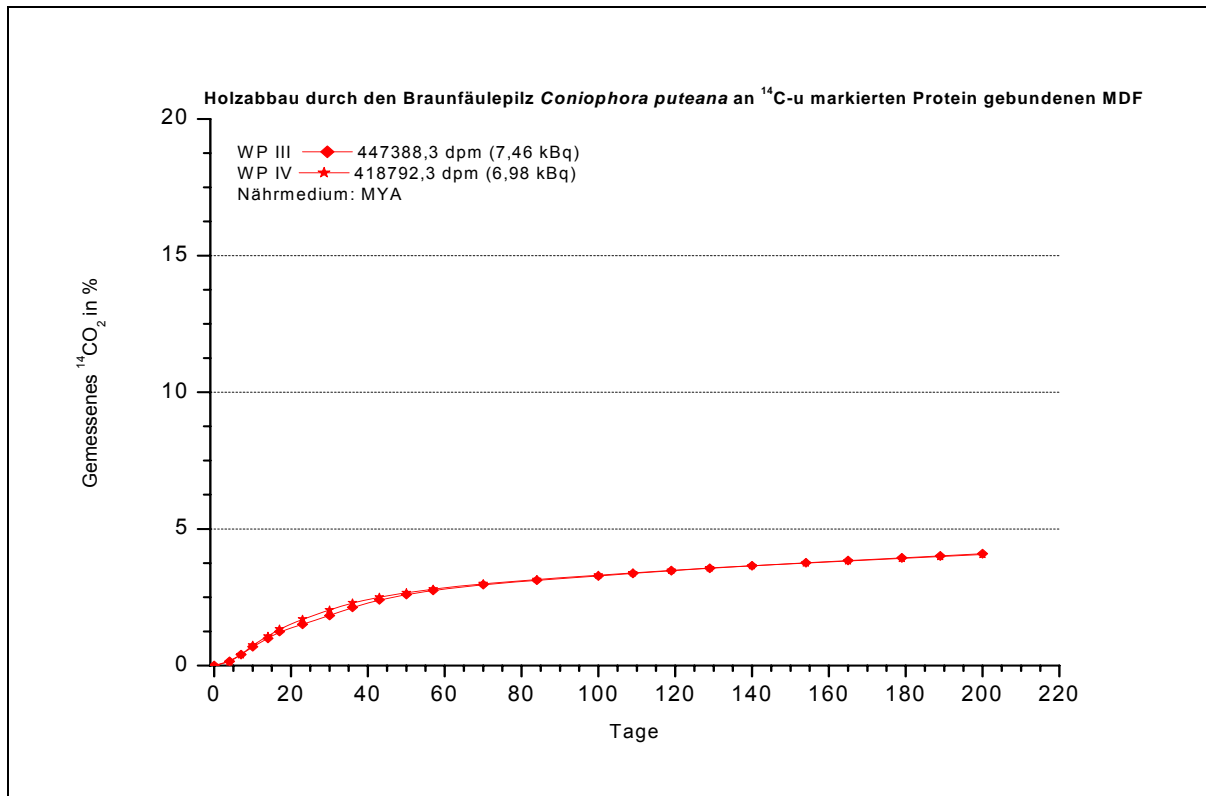


Abbildung 4-69: Holzzersetzung durch *Coniophora puteana* an Protein gebundenen  $^{14}\text{C}$ -U markierten MDF-Proben

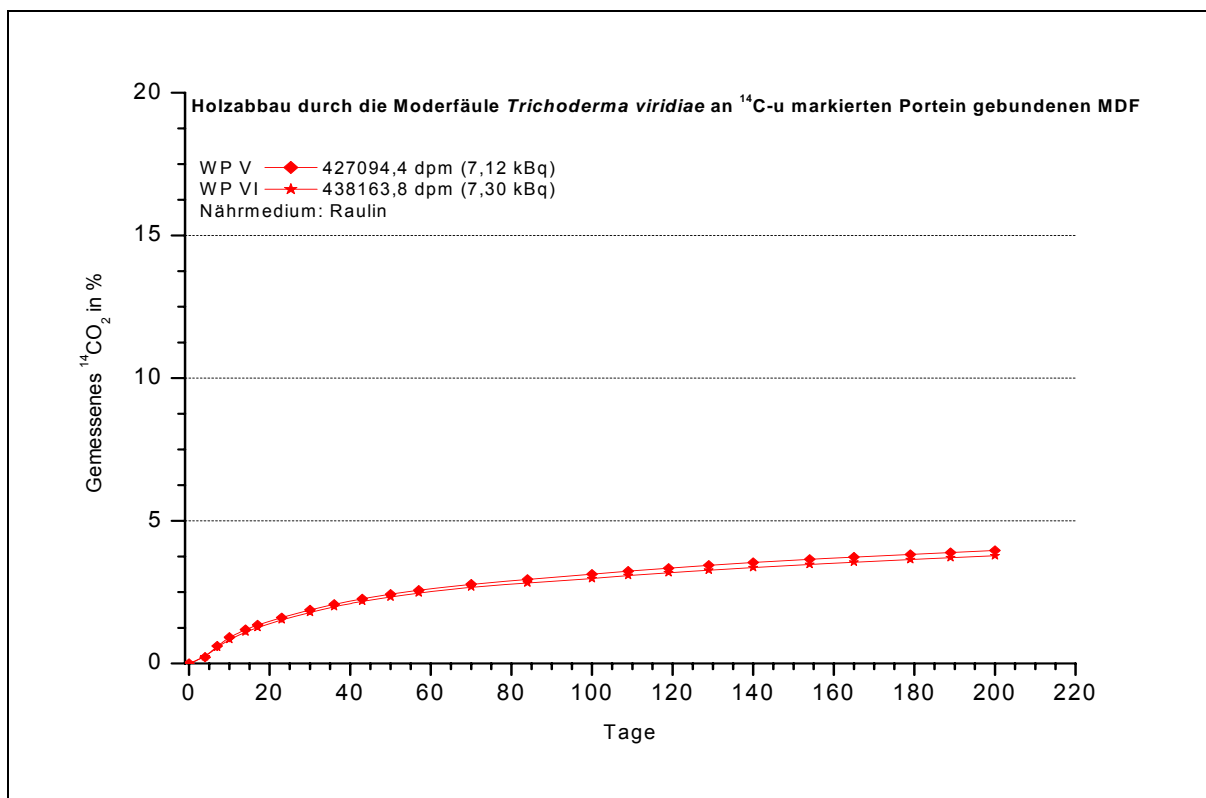


Abbildung 4-70: Holzerstörung durch *Trichoderma viridae* an Protein gebundenen  $^{14}\text{C}$ -U markierten MDF-Platten

Auch bei dem zweiten in diesen Versuchsserien verwendeten Weißfäulepilz *Trametes villosa* konnte nach Beendigung des Versuches eine deutliche Holzersetzung bei den  $^{14}\text{C}$ -U markierten und mit Weizenprotein gebundenen MDF-Proben festgestellt werden. Dieser Weißfäulepilz kann aufgrund seiner enzymatischen Ausstattung, genau wie *Trametes versicolor*, die im Holz enthaltenen Hauptbestandteile Lignin, Cellulose und Hemicellulose abbauen (HAIDER und TROJANOWSKI, 1975; LIESE, 1981; RAYNER und BODDY, 1988)). Die Verläufe der beiden parallelen Holzabbauversuche, dargestellt in Abbildung 4-71, zeigen unterschiedliche Degradationsraten von 9,5 % bzw. 16 %. Die Kurven weisen ab dem 20. Versuchstag ungleichmäßige Degradationsraten auf. Später durchgeführte Lichtmikroskopische Untersuchungen der zersetzten MDF-Proben zeigten, dass das Mycel von *Trametes villosa* die Proben in beiden Kolben fast vollständig durchwachsen hat und auf diese Weise ein relativ hoher Abbaugrad erzielt werden konnte.

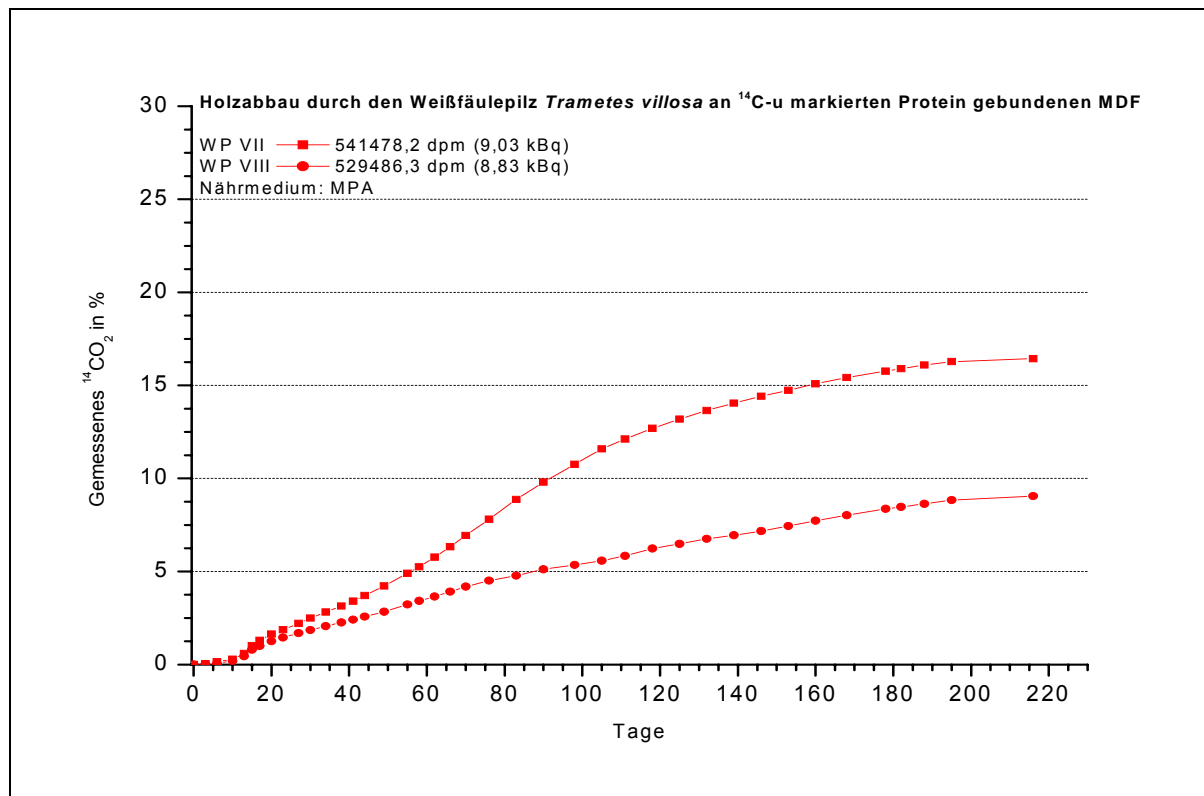
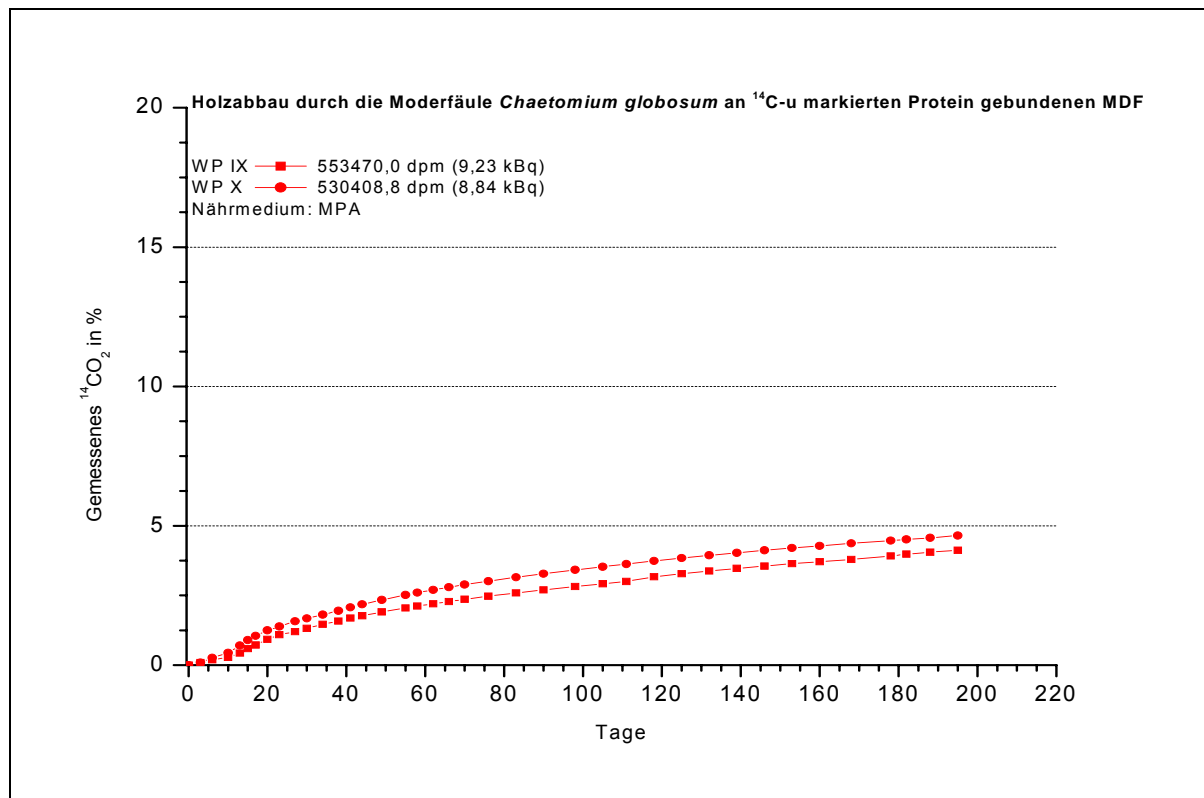


Abbildung 4-71: Holzabbau durch *Trametes villosa* an Protein gebundenen  $^{14}\text{C}$ -U markierten MDF-Proben

*Chaetomium globosum*, ebenfalls ein Moderfäuleerreger wie *Trichoderma viridae*, weist Holzersetzen an den mit Protein gebundenen  $^{14}\text{C}$ -U markierten MDF-Proben von 4,30 % bzw. 4,75 % auf (vgl. Abbildung 4-72). Diese Werte sind für einen Schimmelpilz, der hauptsächlich die im Holz enthaltenen C-Atome sowie die Cellulose abbaut (SEIFERT, 1966)

sehr gering, da dieser Holzbestandteil in einer für Pilze einfach aufzuschließenden Form vorliegt (vgl. Kapitel 2.1.3.2). *Chaetomium globosum* ist unter optimalen Bedingungen ein sehr aggressiver Holzzerstörer, da er die Cellulose sofort zu CO<sub>2</sub> und H<sub>2</sub>O abbaut und keine Depolymerisate entstehen (AMMER und LIESE, 1965). Setzt man den gleichmäßigen Abbau von radioaktivem und inaktivem Material voraus, so würden Abbauraten von ca. 8,60 % bis 9,50 % über den Zeitraum von 200 Tagen erreicht. Diese Werte fallen dann jedoch immer noch wesentlich geringer aus als die in Kapitel 4.3.1 dargestellten Abbauraten von 16,1 %, die von *Trichoderma viridae* an vollständig inaktiven MDF-Proben gemessen wurden. Auch die Lichtmikroskopischen Untersuchungen der mit *Chaetomium globosum* infizierten MDF-Proben zeigten, dass das Pilzmycel über den gesamten Versuchszeitraum nicht bis in die Mitte der Proben gewachsen war. Rein äußerlich hingegen waren die Proben sehr homogen mit dem Pilzmycel überzogen und zeigten auch keine Fremdinfectionen.

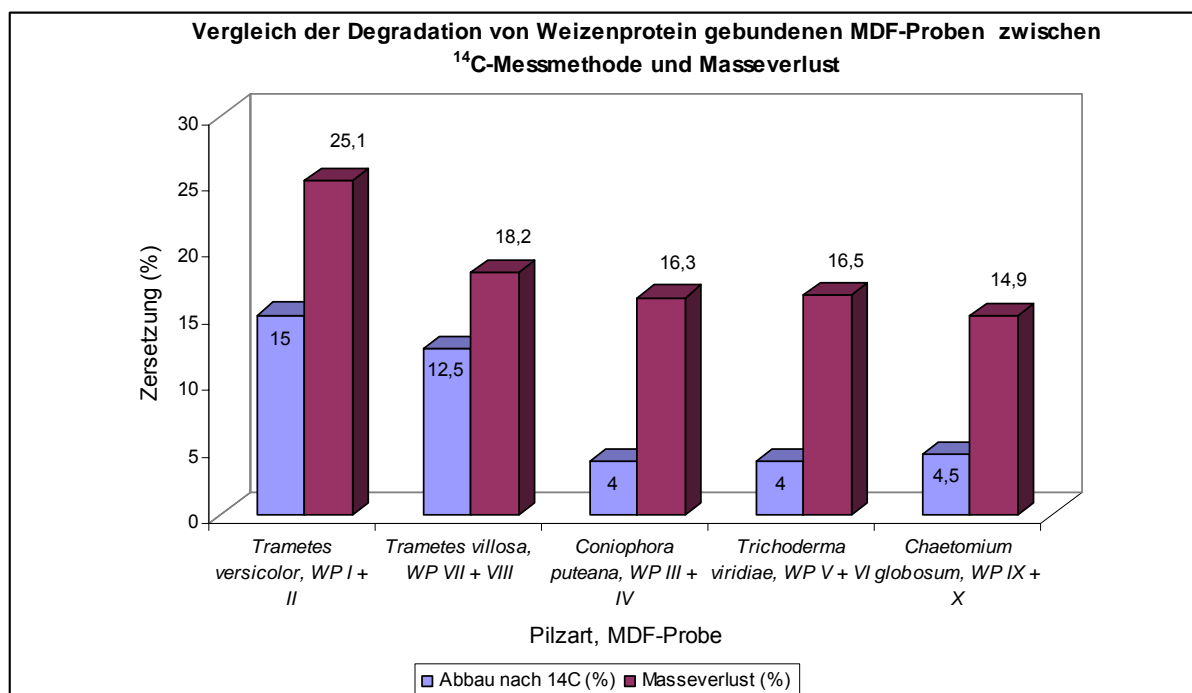


**Abbildung 4-72: Holzdegradation durch *Chaetomium globosum* an Protein gebundenen <sup>14</sup>C-U markierten Mitteldichten Faserplatten**

Um festzustellen, ob das <sup>14</sup>C-U markierte Material in den verwendeten Weizenprotein gebundenen MDF-Proben im gleichen Umfang durch die Holzzerstörenden Pilze degradiert wurde wie das inaktive Material, werden die nach der <sup>14</sup>C-Messmethode ermittelten Resultate der Weizenprotein gebundenen Proben WP I bis X mit den Masseverlusten dieser MDF-

Proben über den Versuchszeitraum als Mittelwerte verglichen. Diese Ergebnisse sind in Abbildung 4-73 graphisch dargestellt. Dabei ist ersichtlich, dass bei keiner der in diesen Versuchen verwendeten Pilzarten ein gleichmäßiger Abbau von radioaktivem und inaktivem Material stattgefunden hat. Mit Ausnahme der beiden Weißfäulepilze *Trametes versicolor* und *Trametes villosa* ist in allen Versuchen ein wesentlich höherer Prozentsatz an inaktivem Material als an radioaktivem  $^{14}\text{C}$ -U markiertem Material abgebaut worden. Dies ist unter anderem durch den Abbau des in den MDF-Proben befindlichen Bindemittels, bestehend aus Weizenproteinen, Hemicellulosen, hochwertigen Zuckern und den Fasern des Weizenmaterials (vgl. Kapitel 4.1.3.1.1) begründet. Das Bindemittel hat an den MDF-Proben einen Masseanteil von 15 %. Der Abbau dieser Stoffe kann bei der radimetrischen Messmethode nicht berücksichtigt werden, da es sich um inaktives Material handelt. Bei der Zersetzung anhand der Masseverluste hingegen wird auch der Abbau des Bindemittels berücksichtigt. Ein weiteres Indiz für den Abbau des naturnahen Weizenproteins durch die Holzzersetzenden Pilze ist die Tatsache, dass bei allen untersuchten Protein gebundenen MDF-Proben nach der Beendigung des Abbauversuches keine Querzugfestigkeiten mehr messbar waren, da alle MDF-Proben nach der Trockengewichtsbestimmung unter leichtem Druck zerfielen. Den Weiß-, Braun- und Moderfäulepilzen diene anscheinend das Bindemittel als wichtige Nahrungsquelle, da es sich hierbei um wichtige und leicht zersetzbare Komponenten für die Pilze handelt. Alleine mit dem Bindemittelabbau können die Differenzen bei *Coniophora puteana*, *Trichoderma viridae* und *Chaetomium globosum* jedoch nicht begründet werden, da in diesem Fall auch die Weißfäulepilze stärkere Unterschiede in den Ergebnissen aufweisen müssten. Da die Lichtmikroskopischen Untersuchungen zeigten, dass nur die mit Weißfäulepilze beimpften Proben vollständig mit Mycel durchzogen waren, haben sie auch die Möglichkeit gehabt möglichst viel aktives Material abzubauen. Die Braun- und Moderfäuleerreger hingegen haben die Proben mit ihrem Mycel nicht vollständig durchwachsen und konnten somit das in der Plattenmitte befindliche radioaktive Material nicht abbauen. Bei der Herstellung der Proben wurde sehr darauf geachtet, dass das radioaktive Material möglichst homogen in den MDF-Platten verteilt wurde, damit von Versuchsbeginn an Werte nach der  $^{14}\text{C}$ -Messmethode ermittelt werden konnten. Die Braun- und Moderfäuleerreger zählen jedoch nicht zu den simultan abbauenden Pilzarten. Das bedeutet nicht nur, dass sie die Holzbestandteile nicht simultan abbauen können, sondern dass auch das Mycelwachstum und die Zersetzung der Holzkomponenten nicht parallel ablaufen (SCHWARZE, 1999). In diesem konkreten Fall erklärt dies auch die hohen Differenzen, die bei diesen Pilzen im Vergleich zu den Ergebnissen nach der  $^{14}\text{C}$ -Methode und nach dem

Masseverlust der Proben ermittelt wurden. Zu Versuchsbeginn ist das Pilzmycel vermutlich unter Zersetzung von Lignin in die Proben eingewachsen. Danach wurden vorwiegend die im Bereich der Hyphen befindlichen Komponenten Cellulose, Hemicellulose, Zucker sowie die Bestandteile des Bindemittels unter Reduzierung der Lignindegradation abgebaut. Dadurch wurde das radioaktive Material nur in einem begrenzten Bereich der Probe abgebaut, was die niedrigen Ergebnisse der  $^{14}\text{C}$ -Messmethode erklärt. Auch die flachen Verläufe der Abbauraten des mit  $^{14}\text{C}$ -U markierten Materials durch die Braun- und Moderfäuleerreger (vgl. dazu auch Abbildung 4-69, Abbildung 4-70 und Abbildung 4-72) untermauern diese Theorie. Dagegen ist bei beiden Weißfäulepilzen ein deutlicher Anstieg der Abbauraten (vgl. Abbildung 4-68 und Abbildung 4-71) zu verzeichnen, der sich durch das stetige Mycelwachstum und den simultanen Abbau der Holzbestandteile erklären lässt. Die Weißfäulepilze haben aufgrund ihres stärkeren Mycelwachstums in den Proben neben dem höheren Anteil an radioaktivem Material auch mengenmäßig mehr von dem enthaltenen Bindemittel abgebaut, was dazu führte, dass sich die Ergebnisse der  $^{14}\text{C}$ -Messmethode nicht wesentlich von den Ergebnissen des Masseverlustes unterscheiden.



**Abbildung 4-73: Masseverluste und Ergebnisse der  $^{14}\text{C}$ -Messung der Proben WP I bis X während der Degradation durch Holzzerstörende Pilze**

Die Ergebnisse der Holzabbauraten an den  $^{14}\text{C}$ -U-Cellulose und  $^{14}\text{C}$ -U-Lignin markierten MDF-Proben, dargestellt in Abbildung 4-74 bis Abbildung 4-83, ermöglichen es, die bei den  $^{14}\text{C}$ -U markierten und Protein gebundenen MDF-Platten beschriebene Holzzerersetzung (vgl.

Abbildung 4-65 bis Abbildung 4-72) hinsichtlich der Holzbestandteile Lignin (vgl. Kapitel 2.1.3.1) und Cellulose (vgl. Kapitel 2.1.3.2) genauer zu quantifizieren. Da die Abbauraten von Cellulose und Lignin in den meisten Fällen zusammenhängen bzw. parallel ablaufen (vgl. dazu Kapitel 2.6), werden in der folgenden Diskussion immer die abgebauten Mengen der einzelnen Holzbestandteile einer Pilzart zusammen betrachtet und abschließend anhand dieser Ergebnisse der Grad der Holzdegradation bestimmt. Die Ergebnisse zur Bestimmung des Ligninabbaus wurden über einen Versuchszeitraum von 128 Tagen ermittelt. Daher können die Ergebnisse des  $^{14}\text{C}$ -U-Celluloseabbauversuchs, der insgesamt über 220 Tage verlief, nur bis zum 120. Tag mit den Ligninabbauraten verglichen werden. Es ist zu erkennen, dass die Ligninabbauraten bereits nach 120 Tagen bei den meisten verwendeten Pilzarten bereits stagnieren. Nur bei den Weißfäulepilzen ist zu erkennen, dass noch mit einer weiteren Steigerung des Ligninabbaus über den 128. Tag hinaus zu rechnen wäre.

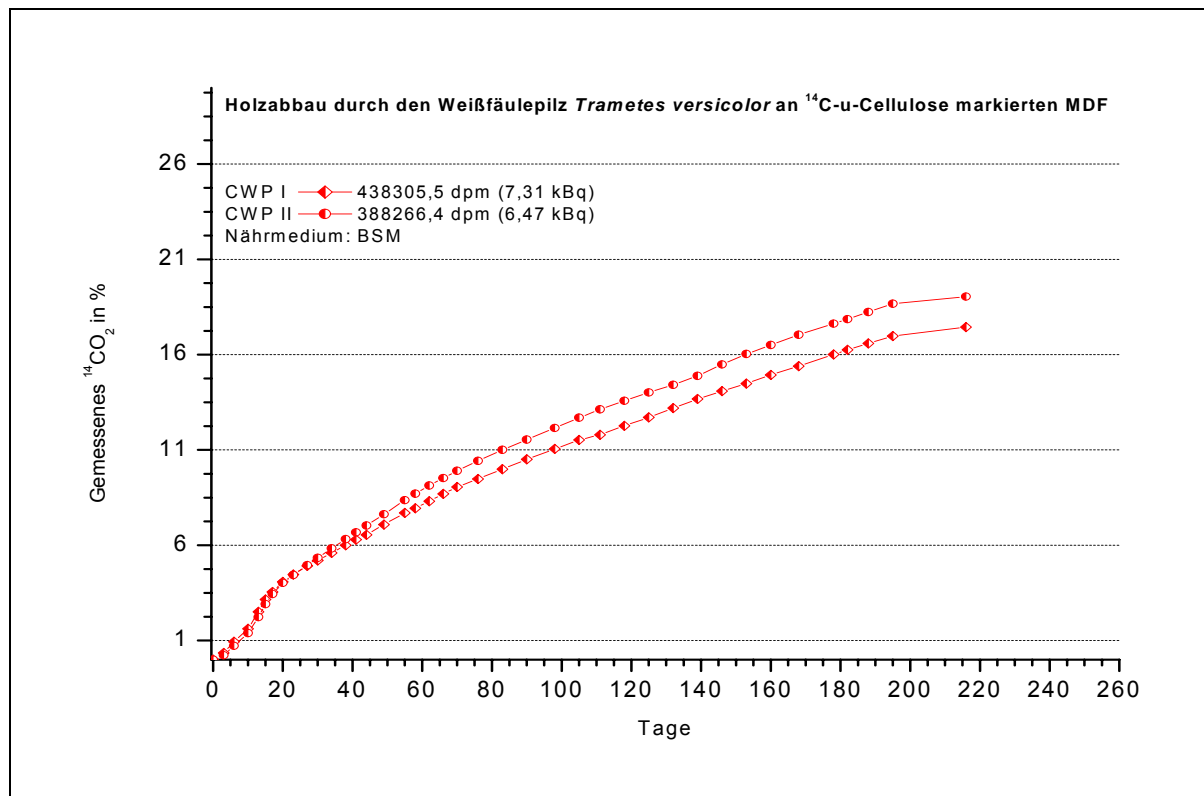


Abbildung 4-74: Abbau des  $^{14}\text{C}$ -U-Cellulose markierten Materials in den MDF-Proben durch *Trametes versicolor*

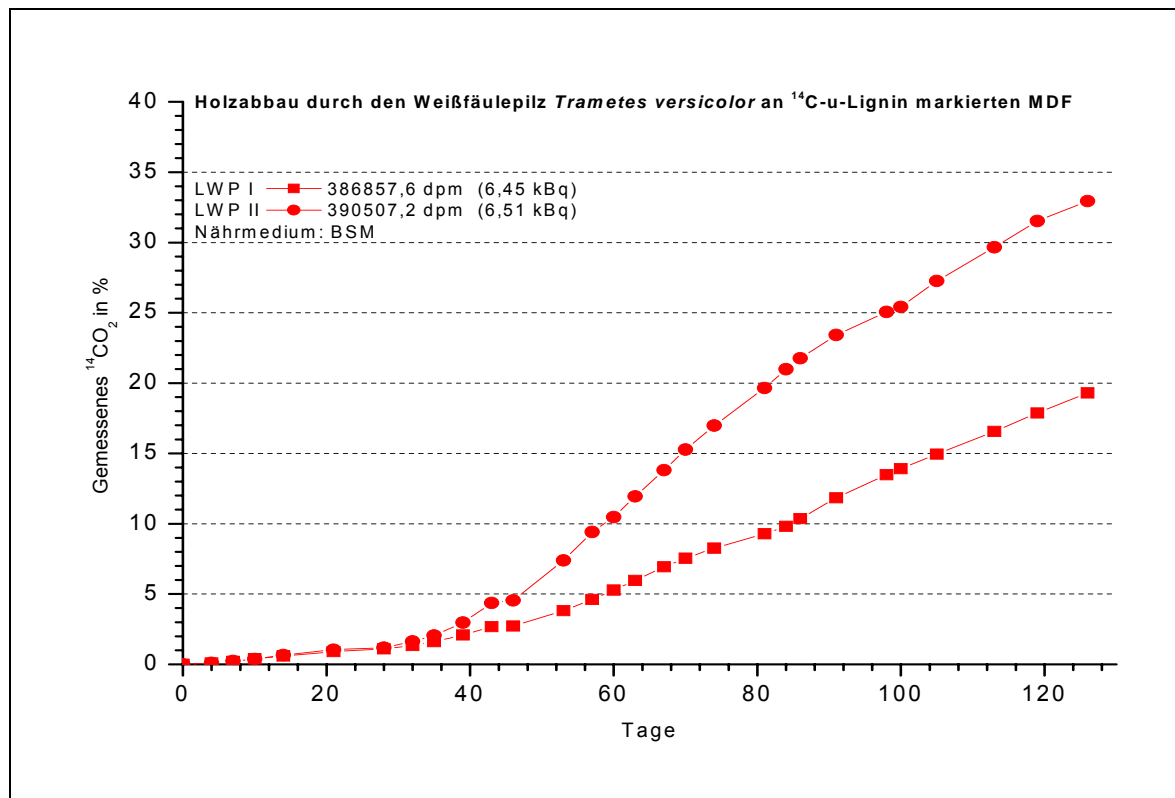


Abbildung 4-75: Abbau des  $^{14}\text{C}$ -U-Lignin markierten Materials in den MDF-Proben durch *Trametes versicolor*

Die beiden in Abbildung 4-74 dargestellten Kurven der Weizenprotein gebundenen MDF-Proben, deren  $^{14}\text{C}$ -U-Cellulose durch den Weißfäulepilz *Trametes versicolor* abgebaut wurde, weisen über den gesamten Versuchszeitraum von 220 Tagen einen sehr homogenen Verlauf auf. Dabei werden Abbauraten bzgl. der Cellulose von 17,25 % bzw. 19,75 % erzielt. Ein Beweis dafür, dass es sich bei der Cellulose um ein für Weißfäulepilze relativ leicht aufzuschließendes Material handelt, zeigen die raschen Anstiege beider Degradationskurven innerhalb der ersten 40 Versuchstage. Am 40. Tag wurde ein Gesamtabbau von ca. 6,0 % ermittelt, was bezogen auf die gesamte Versuchsdauer von 220 Tagen bereits über ein Drittel der in diesem Zeitraum abgebauten Menge an Cellulose darstellt. Der Abbau steigt auch über den weiteren Versuchszeitraum noch an. Der Kurvenverlauf zeigt zu Versuchsende noch keine Stagnation an, was auf einen weiteren Celluloseabbau schließen lässt.

Wie in Abbildung 4-75 zu sehen zeigen die Abbauraten des  $^{14}\text{C}$ -U markierten Lignins in den MDF-Proben durch *Trametes versicolor*, über den gesamten Versuchszeitraum einen nicht so gleichmäßigen Verlauf wie die Degradationskurven des  $^{14}\text{C}$ -U-Cellulosematerials. In den ersten 40 Tagen des Versuches ist ein deckungsgleicher Verlauf der beiden Kurven feststellbar, wobei nur sehr geringe Abbauraten von 2,5 % bis 3,5 % bis zum 40. Tag erzielt

wurden. Dies lässt sich eventuell auch mit dem vorwiegenden Abbau der Cellulose in diesem Zeitraum begründen. Die Weißfäulepilze sind zwar in der Lage, die Holzbestandteile simultan abzubauen (RAYNER und BODDY 1988, ERIKSON et al., 1990), jedoch werden zuerst die leicht verfügbaren Bestandteile wie C-Atome, Zucker und Cellulose abgebaut (LIESE, 1981). Von diesen Bestandteilen ist hier jedoch nur die Menge der abgebauten Cellulose (6,0 %) bekannt. Ab dem 40. Tag ist in beiden Fällen zu erkennen, dass die Mengen des abgebauten  $^{14}\text{C}$ -U markierten Lignins ansteigen. Dies ist ein Indiz für den stärkeren simultanen Abbau, da die Degradation der Cellulose auch weiter ansteigt und nicht stagniert. Bei Versuchsende werden Abbauraten bzgl. des in den MDF-Proben enthaltenen Lignins von 20,0 % und 33,0 % nach 128 Tagen durch *Trametes versicolor* erzielt. Die Kurven stagnieren zu diesem Zeitpunkt noch nicht, was auf einen weiteren Anstieg des Ligninabbaus schließen lässt.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass am 128. Tag des Versuches durchschnittlich ca. 26,5 % Lignin und 15,5 % Cellulose durch den Weißfäulepilz abgebaut wurden. Der ermittelte Gesamtabbau an  $^{14}\text{C}$ -U markiertem Material von 12,5 % nach 128 Tagen (vgl. Abbildung 4-68) kann damit hinsichtlich der Komponenten Cellulose und Lignin bestimmt werden.

Am 220. Versuchstag sind, wie in Abbildung 4-68 dargestellt, nachweislich ca. 15,5 % des  $^{14}\text{C}$ -U markierten Materials abgebaut, wovon im Durchschnitt 18,5 % Cellulose sind. Da es sich bei dem Weißfäulepilz *Trametes versicolor* um einen simultanen Abbau der Holzkomponenten Lignin, Cellulose und Hemicellulose handelt, liegt der Anstieg des gesamt abgebauten Materials von 12,5 % nach 128 Tagen auf 15,5 % nach 220 Tagen nicht nur in der abgebauten Menge an Cellulose sondern vermutlich auch in einer weiteren Steigerung des abgebauten Lignins begründet.

Prognostiziert man nach 220 Tagen für den, nach dem 120. Tag noch weiter ansteigenden Ligninabbau realistische Werte von 40 % bis 50 %, so würden prozentual bei einem weiteren simultanen Abbau der Holzbestandteile Cellulose und Lignin durch *Trametes versicolor* zu diesem Zeitpunkt noch theoretisch 41,5 % bis 31,5 % der vollständig abgebauten Menge von 15,5 % übrig bleiben, die anhand der  $^{14}\text{C}$ -Messmethode nicht genauer bestimmt werden können, da es sich um nicht radioaktiv markiertes Material handelt.



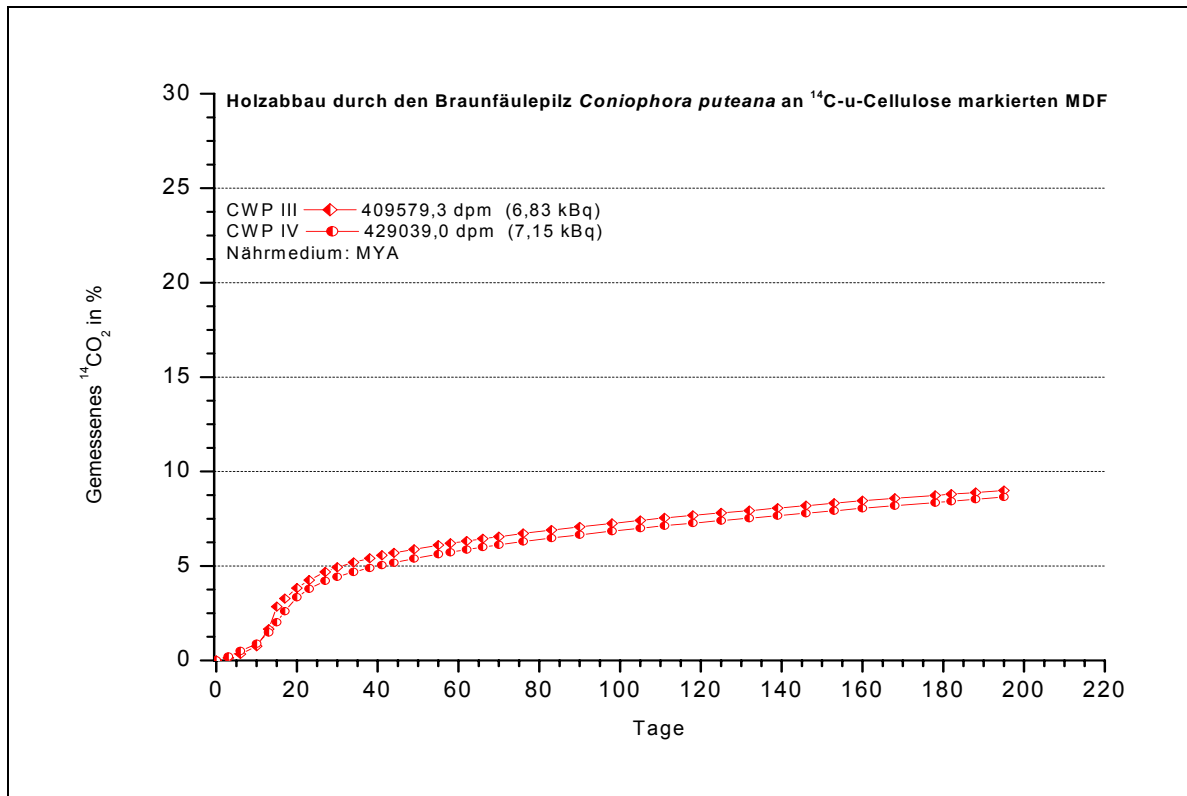


Abbildung 4-76: Abbau des  $^{14}\text{C}$ -Cellulose markierten Materials in den MDF-Proben durch *Coniophora puteana*

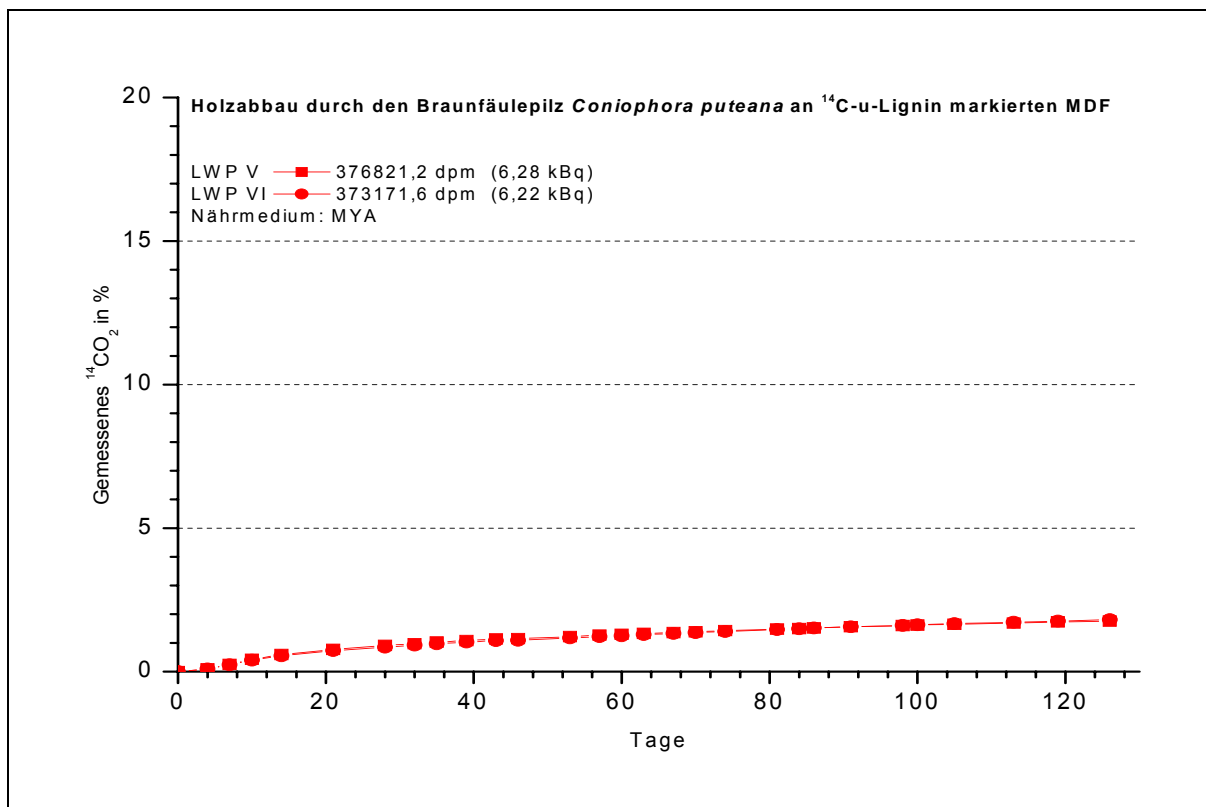


Abbildung 4-77: Abbau des  $^{14}\text{C}$ -Lignin markierten Materials in den MDF-Proben durch *Coniophora puteana*

Der in Abbildung 4-76 graphisch dargestellte Abbau der  $^{14}\text{C}$ -U markierten Cellulose durch den Braunfäulepilz *Coniophora puteana* ist mit 8,75 % über einen Zeitraum von 200 Tagen ein durchschnittlicher Wert. Die Kurven der beiden Proben zeigen einen sehr gleichmäßigen Verlauf und bereits nach einer kurzen Anwachsphase von 10 Tagen ist zu erkennen, dass der Pilz anfängt die  $^{14}\text{C}$ -U-markierte Cellulose in der MDF-Probe zu zersetzen. Dies liegt auch in der Eigenart der Braunfäulepilze ein Depot von leicht hydrolysierbaren Zwischenprodukten anzulegen und sie zur späteren Deckung des Energiebedarfs zu nutzen (SEIFERT, 1965). Ab dem 10. Tag ist ein deutlicher Anstieg der abgebauten Mengen an Cellulose feststellbar. Nach 20 Tagen hat der Braunfäulepilz 4,75 % der  $^{14}\text{C}$ -U markierten Cellulose in der MDF-Probe abgebaut. Dies entspricht mehr als der Hälfte des über den gesamten Versuchsverlauf gemessenen Celluloseabbaus von 8,75 %. Nach dem 20. Tag ist bei beiden der parallel durchgeführten Versuche nur noch ein leichter, jedoch konstanter Anstieg der Abbauraten feststellbar. Die Cellulose ist für den Braunfäulepilz *Coniophora puteana* ein leicht zu zersetzendes Material, aber auch dieser Pilz wählt zunächst die leicht abzubauenen Stoffe wie C-Atome oder Zucker (LIESE, 1981).

Die durch *Coniophora puteana* erzielten Abbauraten hinsichtlich des in den MDF-Proben verarbeiteten  $^{14}\text{C}$ -U markierten Lignins über einen Zeitraum von 128 Tagen sind, wie in Abbildung 4-77 dargestellt, mit durchschnittlich 2,0 % relativ gering. Dabei verlaufen die Kurven der beiden Doppelbestimmungen fast deckungsgleich, was auf sehr homogene Versuchsbedingungen schließen lässt. Der erste Abbau des  $^{14}\text{C}$ -U markierten Lignins war bereits nach 4 bis 8 Tagen messbar. Das Lignin wurde zu diesem Zeitpunkt zu 0,2 % abgebaut; dies entspricht einem Anteil von 10 % der über den kompletten Versuchszeitraum abgebauten Menge an Lignin. Die Kurven der Ligninabbauraten sind nach dem leichten Anstieg in den ersten vier Tagen jedoch durch einen sehr flachen, sogar fast stagnierenden Verlauf charakterisiert. In diesem Verlauf zeigt sich, dass der Braunfäulepilz *Coniophora puteana* aufgrund seiner enzymatischen Ausstattung durchaus zum Abbau von Lignin befähigt ist, jedoch andere Holzbestandteile, wie C-Atome, Zucker, Cellulosen und Hemicellulosen dem Lignin vorzieht (LIESE, 1981). Der Pilz hat die Oberfläche der MDF-Probe mit seinem Mycel in allen angesetzten Kolben sehr gut überwachsen. Um in die MDF-Probe hineinzuwachsen, musste er zu Beginn vermutlich das in der Probe enthaltene Lignin abbauen. Damit ist dieser erste, im Vergleich zum Gesamtabbau höhere Abbaugrad von 0,2 % nach 4 bis 8 Tagen zu erklären. Danach ist das Mycel vermutlich nur noch langsam in der Probe weiter gewachsen. Der Pilz hat sich anscheinend stärker auf den Abbau der anderen Holzbestandteile konzentriert. Die nur leicht ansteigende und nicht stagnierende Abbauraten

des Lignins ist wahrscheinlich ein Anzeichen dafür, dass das Pilzmycel nur sehr langsam weiter durch die MDF-Probe gewachsen ist.

Abschließend kann hinsichtlich des Abbauverhaltens von  $^{14}\text{C}$ -U,  $^{14}\text{C}$ -U-Cellulose und  $^{14}\text{C}$ -U-Lignin durch *Coniophora puteana* festgestellt werden, dass der nach 128 Tagen erzielte Gesamtabbau von ca. 3,75 % (vgl. Abbildung 4-69) sich in 7,5 % Cellulose und 2,0 % Lignin aufteilen lässt. Dadurch ergibt sich ein prozentualer, theoretischer Rest von 90,5 % bezogen auf die gesamt abgebaute Menge von 3,75 %. Diese 90,5 % bilden sich aus den nicht markierten Komponenten Lignin, Cellulose, Hemicellulose, Zucker und dem verwendeten naturnahem Bindemittel auf Proteinbasis. Diese Werte entsprechen bereits in etwa den nach 200 Tagen erzielten Ergebnissen des Holzabbaus. Von den gesamt durch *Coniophora puteana* abgebauten 4,0 % entfallen zu diesem Zeitpunkt 8,75 % auf die abgebaute Cellulose, das Lignin wäre eventuell zu 2,5 % zu diesem Zeitpunkt abgebaut, wodurch sich ca. 88,75 % der ursprünglich zersetzten MDF-Probe nach 200 Tagen hinsichtlich der Komponenten nach der  $^{14}\text{C}$ -Messmethode nicht genauer bestimmen lassen. Bei Betrachtung dieser Ergebnisse fällt auf, dass durch die Zunahme des Versuchsumfangs von 128 auf 200 Tage der gesamte Abbau nur noch von 3,75 % auf ca. 4,0 % erhöht werden kann und *Coniophora puteana* damit, einen gleichmäßigen Abbau von radioaktivem und inaktivem Material vorausgesetzt, zu den eher langsam Cellulose- und Ligninabbauenden Pilzen zählt.

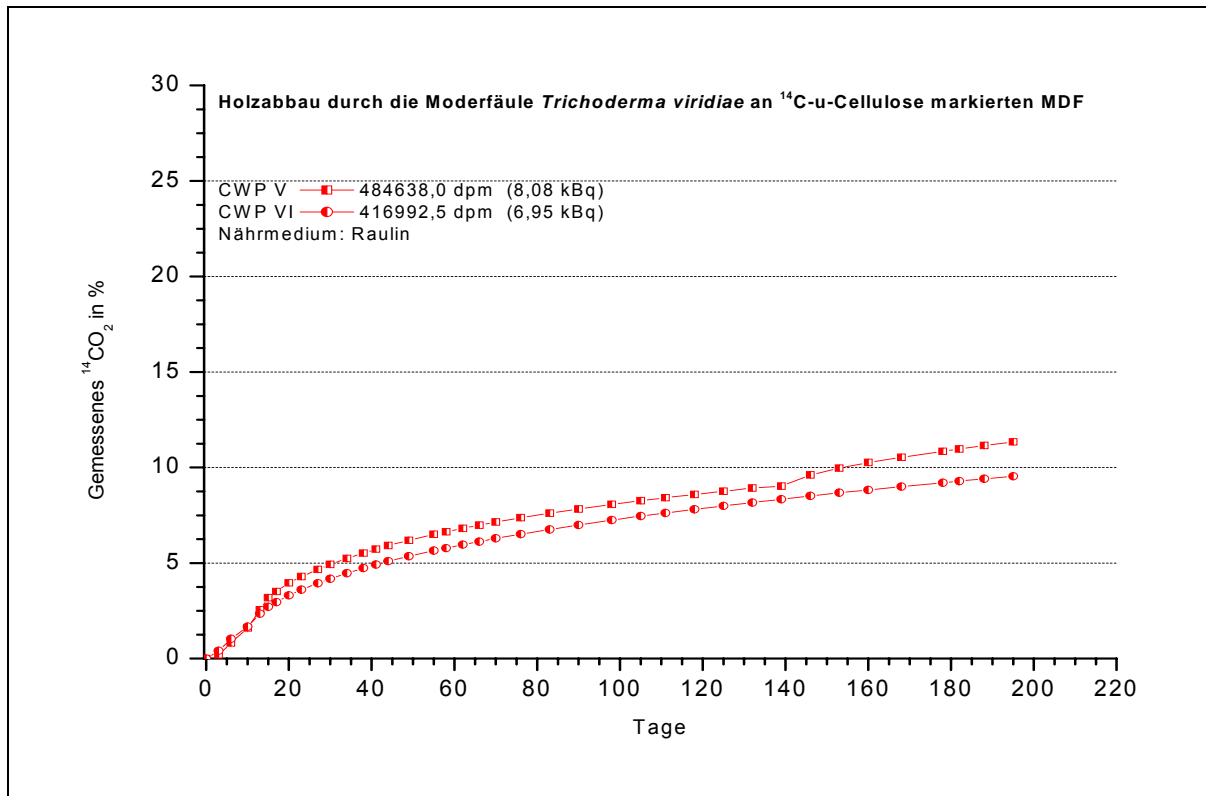


Abbildung 4-78: Abbau des  $^{14}\text{C}$ -Cellulose markierten Materials in den MDF-Proben durch *Trichoderma viridae*

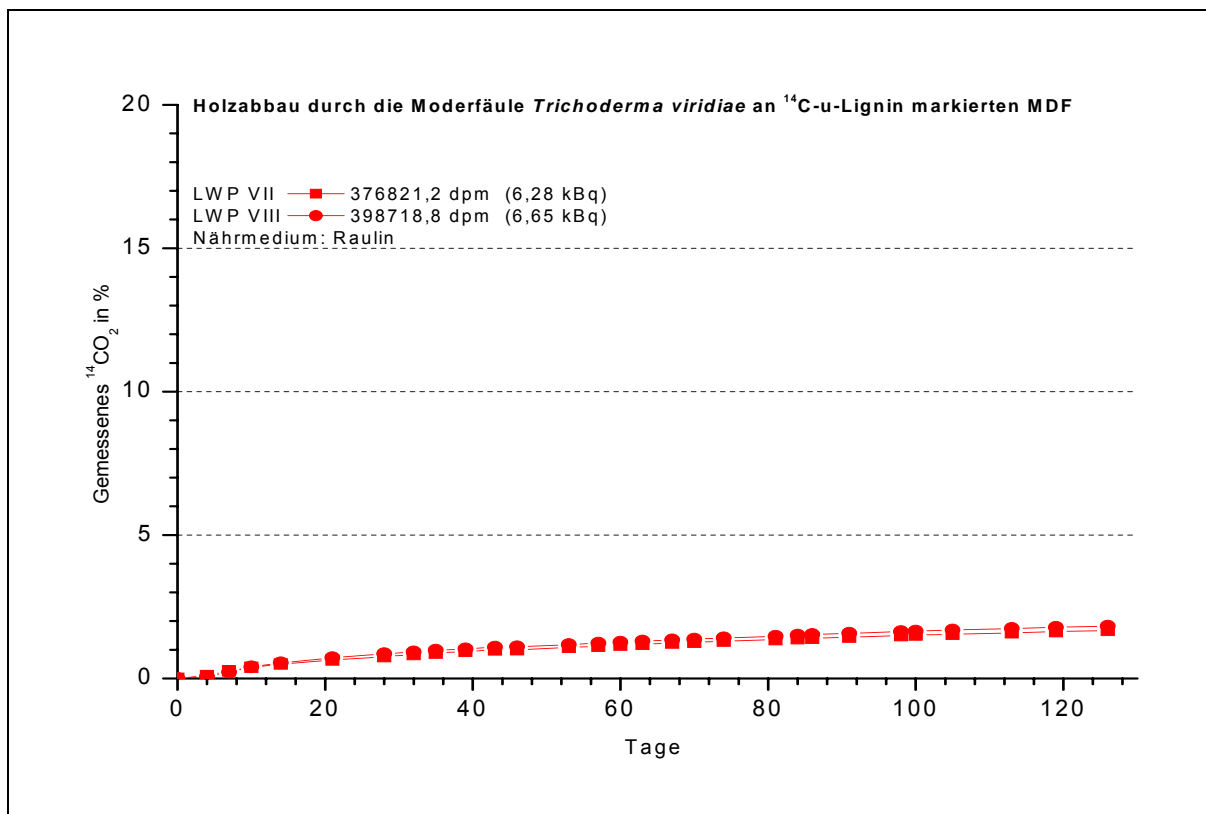


Abbildung 4-79: Abbau des  $^{14}\text{C}$ -Lignin markierten Materials in den MDF-Proben durch *Trichoderma viridae*

Die Abbaugrade, die durch die Moderfäule *Trichoderma viridae* an den  $^{14}\text{C}$ -U-Cellulose markierten MDF-Proben erzielt wurden sind in Abbildung 4-78 dargestellt. Es sind dabei Holzdegradationen der  $^{14}\text{C}$ -U-markierten Cellulose von 9,75 % bzw. 11,25 % nach der  $^{14}\text{C}$ -Messmethode ermittelt worden. Dieses Ergebnis ist für eine Moderfäule, verglichen mit den geringeren Ergebnissen von *Coniophora puteana* (vgl. Abbildung 4-76), relativ hoch. Auffällig ist, dass bei *Trichoderma viridae* bereits 5 Tage nach Versuchsbeginn ein Celluloseabbau messbar war. Auch die Besiedlung der MDF-Proben in beiden Kolben verlief relativ schnell. Innerhalb von nur 10 Tagen waren die Proben vollständig mit dem Pilzmycel überwachsen. Neben der schnellen Besiedlung der beiden MDF-Proben zeigen beide mit *Trichoderma viridae* beimpften MDF-Proben hinsichtlich des Abbaus von  $^{14}\text{C}$ -U markiertem Material einen fast deckungsgleichen Kurvenverlauf. Die Cellulose stellt auch für Schimmelpilze eine einfach zu zersetzende Holzkomponente dar (SAVORY, 1958), die schnell in Energie umgewandelt werden kann. Bei beiden Proben ist festzustellen, dass schon nach 20 Tagen ca. ein Drittel (3,75 %) der durchschnittlich über die gesamte Versuchszeit abgebauten Cellulose (10,5 %) zersetzt sind. Nach dem 20. Versuchstag sind beide Kurven durch einen leichten aber konstanten Anstieg charakterisiert. Dieser leichte Anstieg ist möglicherweise darin begründet, dass neben der Cellulose auch andere Holzkomponenten sowie im naturnahen Bindemittel befindliche Substanzen durch den Moderfäuleerreger abgebaut werden.

Der Abbau des  $^{14}\text{C}$ -U markierten Lignins in den MDF-Proben durch *Trichoderma viridae* ist in Abbildung 4-79 wiedergegeben. Dabei ist ein ähnlicher, fast deckungsgleicher Verlauf wie bei dem zuvor diskutierten Ergebnis des Braunfäulepilzes *Coniophora puteana* zu erkennen. Moderfäuleerreger können aufgrund ihrer enzymatischen Voraussetzungen Lignin nur sehr langsam und daher nur in sehr begrenztem Umfang zersetzen (SAVORY, 1958; SEIFERT, 1966; SCHWARZE 1999). Dies zeigt sich auch bei der durchschnittlichen Degradationsrate von 2,5 % innerhalb von 128 Tagen. Es ist jedoch auch bei *Trichoderma viridae* zu erkennen, dass Lignin hauptsächlich zu Beginn des Versuches abgebaut wird. Nach 20 Tagen sind bereits 1,25 %, d.h. die Hälfte des im gesamten Versuch abgebauten Lignins zersetzt. Danach zeigt die Abbaukurve nur noch einen leichten Anstieg. Dies hängt vermutlich mit der Besiedlungsphase der MDF-Probe durch den Pilz zusammen. Auch die beiden mit  $^{14}\text{C}$ -U-Lignin hergestellten MDF-Proben waren bereits nach 10 Tagen vollständig mit Pilzmycel überwachsen. Die Strategie des Pilzes ist es anscheinend, möglichst schnell in die Probe einzuwachsen, und danach dann andere Holzkomponenten, wie z.B. die Cellulose, C-Atome

und Zucker abzubauen. Der Abbau des Lignins scheint bei diesem Pilz auch an die Wachstumsphase des Pilzmycels gekoppelt zu sein.

Der in Abbildung 4-70 dargestellte Abbau von 3,0 % des  $^{14}\text{C}$ -U markierten Materials in der MDF-Probe nach 128 Tagen durch *Trichoderma viridae* kann aufgrund dieser Erkenntnisse in ca. 8,5 % Cellulose und 2,5 % Lignin aufgeteilt werden. Die übrigen 89 % der total abgebauten Masse verteilen sich auf die Holzkomponenten und die festen Bestandteile des Weizenproteins, die nicht radioaktiv markiert waren. Bei Betrachtung dieser Ergebnisse fällt auf, dass auch der Moderfäuleerreger *Trichoderma viridae* zu den eher langsamen Cellulose- und Ligninabbauenden Pilzen gehört.

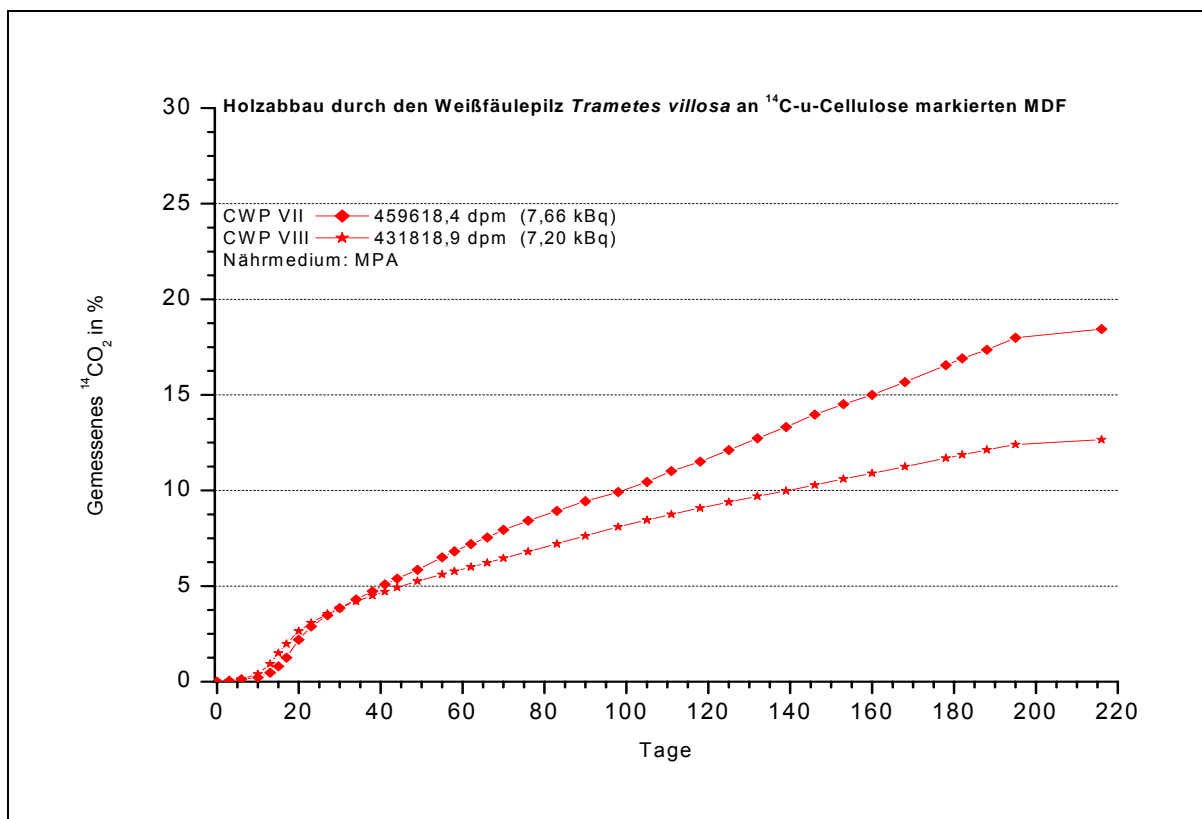


Abbildung 4-80: Abbau des  $^{14}\text{C}$ -Cellulose markierten Materials in den MDF-Proben durch *Trametes villosa*

Der zweite verwendete Weißfäulepilz, *Trametes villosa*, zeigt hinsichtlich der Zersetzung des  $^{14}\text{C}$ -U-Cellulose markierten Materials in den untersuchten MDF-Proben voneinander abweichende Werte. Dabei wurden in den beiden Kolben, wie in Abbildung 4-80 graphisch dargestellt, Degradationsraten von 12,5 % bzw. 18,25 % erzielt. Im Bereich der ersten 20 Versuchstage ist ein sehr flacher Verlauf der beiden Kurven festzustellen. Bis zum 15. Tag des Versuches wurden in beiden Versuchsansätzen durchschnittlich 1,1 % der eingesetzten radioaktiven Cellulose von dem Weißfäulepilz abgebaut. Der Bewuchs der MDF-Proben

durch *Trametes villosa* war nach 14 Tagen soweit vorangeschritten, dass die Proben vollständig mit dem Pilzmycel überzogen waren. Ab dem 20. Tag steigen die Abbauraten in den beiden Kolben auf 2,5 % an; danach ist ein gleichmäßiger Anstieg der beiden Kurven bis zum 40. Versuchstag zu erkennen. Ab dem 40. Tag weisen die Kurven einen unterschiedlichen Verlauf auf, was auf geänderte Versuchsbedingungen in den Kolben zurückzuführen ist, da die äußeren Bedingungen, wie z.B. die Temperaturen im Wärmeschrank, über den gesamten Versuchsverlauf von 220 Tagen konstant gehalten wurden. Es war auch visuell keine Infektion durch andere Pilze zu erkennen, so dass sich die voneinander abweichenden Abbauraten nur durch unterschiedlich aktives Mycel bzw. durch eine unterschiedliche Morphologie der zu zersetzenden MDF-Proben erklären lassen. Obwohl die Herstellung der  $^{14}\text{C}$ -U radioaktiven MDF-Proben für alle hier beschriebenen Versuche analog verlief, können unterschiedliche Verdichtungen beim abschließenden Heißpressvorgang nicht kategorisch ausgeschlossen werden. Auffällig bei der Betrachtung des  $^{14}\text{C}$ -U-Celluloseabbaus durch *Trametes villosa* ist, dass diese Kurven ähnlich verlaufen wie die in Abbildung 4-65 dargestellten Abbauraten durch *Trametes versicolor* an  $^{14}\text{C}$ -U markierter Cellulose.

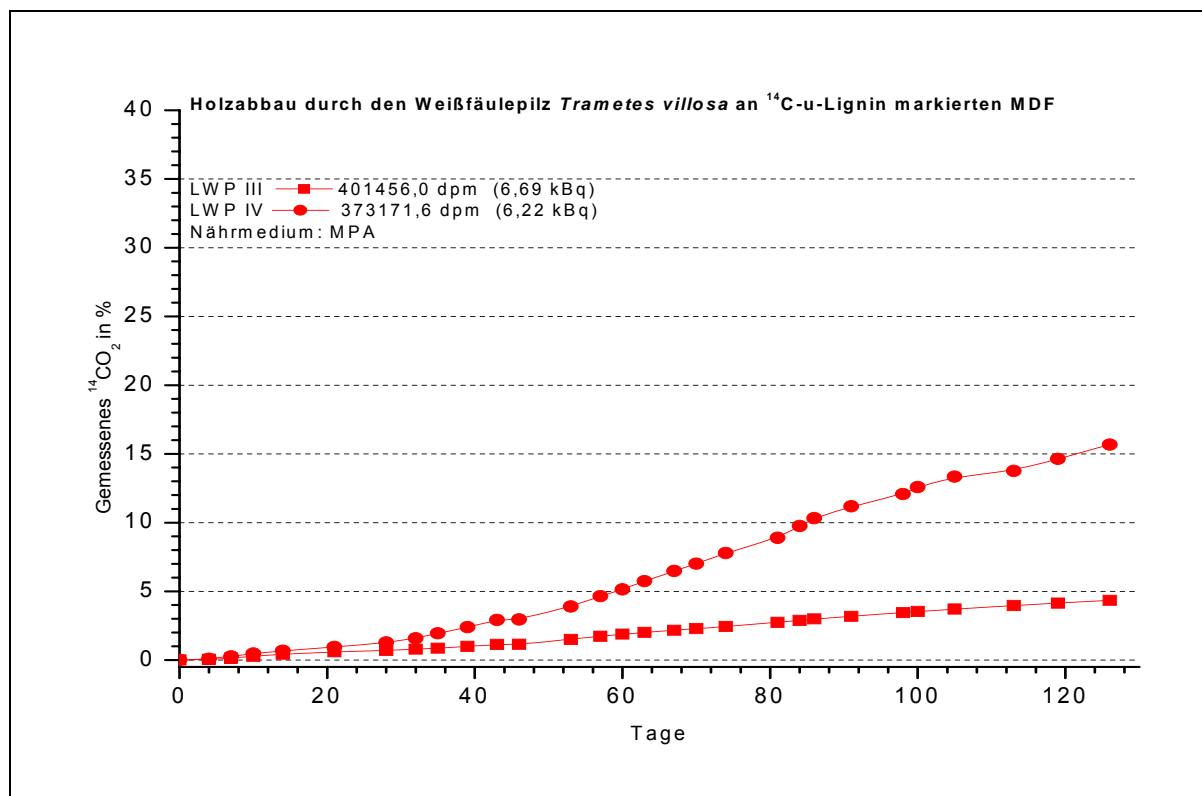


Abbildung 4-81: Abbau des  $^{14}\text{C}$ -Lignin markierten Materials in den MDF-Proben durch *Trametes villosa*

Ein relativ inhomogener Verlauf ist bei den graphischen Darstellungen des  $^{14}\text{C}$ -U-Lignin markierten Materials der MDF-Proben durch *Trametes villosa* zu erkennen (vgl. dazu

Abbildung 4-81). Dies wird vor allem bei den unterschiedlichen Gesamtabbauraten von einerseits 4 % bzw. im parallel angesetzten Kolben von 16 % deutlich. Die Tatsache, dass sich die hier nach der  $^{14}\text{C}$ -Messmethode ermittelten Werte der beiden Doppelbestimmungen um den Faktor vier unterscheiden, lässt sich nur durch eine unterschiedliche Grundaktivität des verwendeten Pilzmycels erklären. Da die Kolben einen gleichmäßigen Bewuchs auf den Nährmedien wie auch auf den zu zersetzenden MDF-Proben durch das Pilzmycel aufwiesen, war davon auszugehen, dass es sich um parallele verlaufene und damit vergleichbare Versuchsansätze handelte. Es konnte im Verlauf des Versuches auch keine Fremdinfection durch andere Pilze in den Kolben festgestellt werden. Das Mycel in beiden Kolben wurde von der gleichen Agarplatte überimpft. Somit können die voneinander abweichenden Abbauraten nur darin begründet sein, dass bei dem Ausstechen des Mycels mit Hilfe eines Korkbohrers bzw. dem Überimpfen des Mycels mit Hilfe einer Nadel, im Falle des geringeren Abbaus an  $^{14}\text{C}$ -U markiertem Lignin das Mycel beschädigt und damit die Aktivität der Kultur negativ beeinflusst wurde. Für die weitere Diskussion werden nur die höheren Abbauraten verwendet, da die geringeren Abbauraten aufgrund der beschriebenen Beschädigung des Mycels keine realistischen Werte darstellen. Die daraus gefolgerten Schlüsse sind daher rein theoretischer Art, da es sich aufgrund des geringen Umfangs der erzielten Resultate um keine signifikanten Ergebnisse handelt.

Nach 128 Tagen wurde durch *Trametes villosa* an den  $^{14}\text{C}$ -U markierten MDF-Platten ein Abbau des radioaktiven Materials von 13,0 % nach der  $^{14}\text{C}$ -Messmethode errechnet (vgl. dazu Abbildung 4-71). Diese 13,0 % lassen sich zu diesem Zeitpunkt anhand der zusätzlichen Abbauprobe mit  $^{14}\text{C}$ -U markierter Cellulose bzw.  $^{14}\text{C}$ -U markiertem Lignin in 16,0 % Lignin und 12,5 % Cellulose unterteilen. Die übrigen 71,5 % des abgebauten  $^{14}\text{C}$ -U markierten Materials in der MDF-Probe teilen sich in die inaktiven Bestandteile Lignin, Cellulose, Hemicellulose sowie Zucker und die Komponenten des naturnahen Bindemittels auf. Ähnlich wie bei den erzielten Abbauraten durch *Trametes versicolor* baut auch *Trametes villosa* prozentual auf den Gesamtabbau der Holzkomponenten mehr Lignin als Cellulose ab. Dies ist im simultanen Abbau der Holzkomponenten durch Weißfäulepilze begründet. Der Abbau von Lignin ist bei den Weißfäulepilzen nicht nur an das Mycelwachstum gekoppelt, wie beispielsweise bei den Braunfäulepilzen und Moderfäuleerregern, sondern dient dem Pilz auch neben dem Abbau der anderen Holzkomponenten wie Hemicellulose und Cellulose als Nahrungs- und somit auch als Energiequelle (TROJANOWSKI et al., 1985).



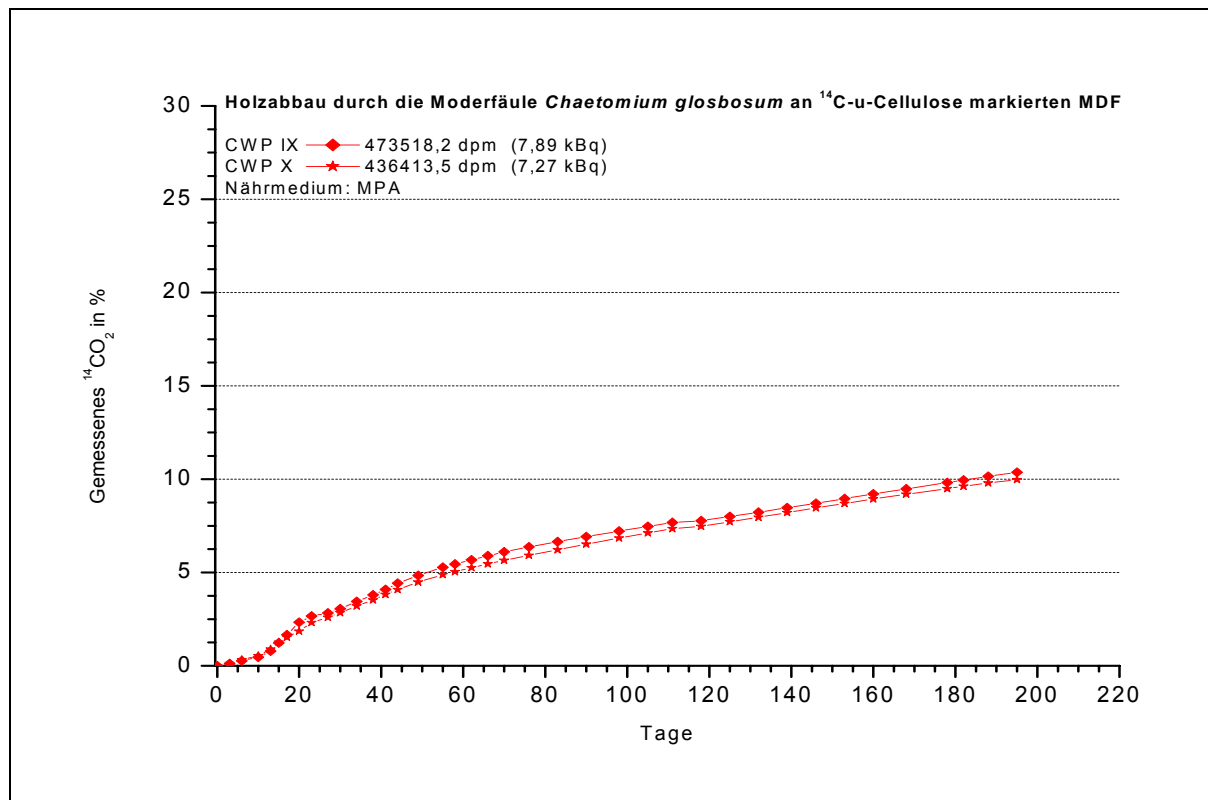


Abbildung 4-82: Abbau des  $^{14}\text{C}$ -Cellulose markierten Materials in den MDF-Proben durch *Chaetomium globosum*

Die Moderfäule *Chaetomium globosum* zeigt in der graphischen Darstellung hinsichtlich des  $^{14}\text{C}$ -U-Cellulose markierten Materials sehr homogene Ergebnisse (vgl. Abbildung 4-82). Die beiden fast deckungsgleich verlaufenden Kurven zeigen bezüglich der in den MDF-Proben enthaltenen und markierten Cellulose einen durchschnittlichen Gesamtabbau von 10 % über den Versuchszeitraum von 220 Tagen. Dieser Mittelwert ist durchaus mit dem von *Trichoderma viridae* erzielten Abbauraten (vgl. dazu Abbildung 4-78) vergleichbar. Die Proben waren innerhalb von 10 Tagen vollständig mit dem Pilzmycel von *Chaetomium globosum* überwachsen. Da beide Kurven einen sehr gleichmäßigen Verlauf aufweisen, können relativ homogene Versuchsbedingungen und damit realistische Werte zugrunde gelegt werden. Die Kurven weisen jeweils einen sehr flachen Anstieg in den ersten 5 Tagen des Versuches auf. Nach 10 Tagen Laufzeit war die markierte Cellulose erst zu 0,4 % abgebaut. Bis zum 20. Versuchstag jedoch konnte bereits ein Abbau von 2,5 % der Cellulose ermittelt werden. Das entspricht einem Viertel der in diesem Versuch gesamt abgebauten Cellulose. Zwischen dem 20. und dem 40. Tag des Versuches kam es, verglichen mit den ersten 20 Tagen, in beiden Kolben zu einem geringeren Abbau. Ab dem 40. Tag steigen die beiden Kurven wieder eindeutig an und halten diesen Anstieg bis zur Beendigung des Versuchs am 200. Tag konstant. Verglichen mit der Degradation der  $^{14}\text{C}$ -U markierten Cellulose durch

*Trichoderma viridae* zeigt sich auch bei *Chaetomium globosum* in dieser Versuchsreihe ein ähnliches Abbauverhalten bezüglich dieser Holzkomponente.

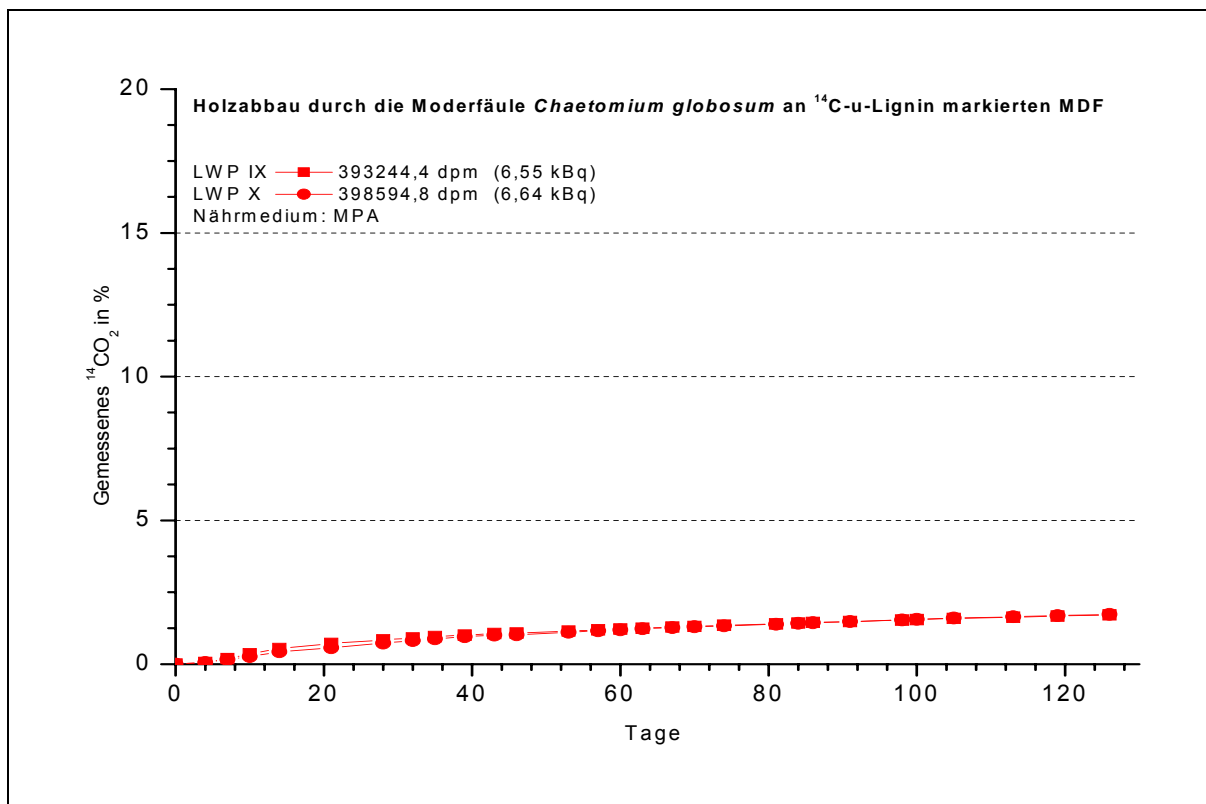


Abbildung 4-83: Abbau des  $^{14}\text{C}$ -Lignin markierten Materials in den MDF-Proben durch *Chaetomium globosum*

Auch die durch *Chaetomium globosum* abgebauten Mengen an  $^{14}\text{C}$ -U-Lignin unterscheiden sich nicht sehr von den durch *Trichoderma viridae* erzielten, geringen Degradationsraten. Dies ist in der graphischen Darstellung der Ergebnisse ersichtlich (vgl. dazu auch Abbildung 4-83). Obwohl die MDF-Proben innerhalb von 10 Tagen vollständig mit Pilzmycel überwachsen waren, wurde nur sehr wenig Lignin abgebaut, was auch in dem sehr flachen Anstieg der dargestellten Kurven zu erkennen ist. Bis zum 20. Tag wurden lediglich 0,7 % des markierten Lignins durch den Pilz zersetzt, was bereits die Hälfte des in diesem Versuch gesamt abgebauten Lignins. Nach 128 Tagen wurden lediglich 1,3 % des  $^{14}\text{C}$ -U-Lignins abgebaut. Das ist 0,7 % weniger verglichen mit *Trichoderma viridae*. Beide Kurven dieser Doppelbestimmung sind zwischen dem 20. und dem 60. Versuchstag durch einen flacheren Verlauf charakterisiert, verglichen mit den ersten zwanzig Tagen dieses Versuches. Ab dem 60. Versuchstag ist nur noch eine sehr geringe Steigung zu erkennen. Die Kurven stagnieren fast.

Auch bei dem Moderfäuleerreger *Chaetomium globosum* kann festgestellt werden, dass der Ligninabbau anscheinend mit dem Mycelwachstum im Holz zusammenhängt, da nur während der ersten Bewuchsphase ein erhöhter Ligninabbau zu verzeichnen war. Lichtmikroskopische Aufnahmen zeigten, dass das Pilzmycel über den gesamten Versuchszeitraum nicht sehr tief in die MDF-Proben hineingewachsen war. Der Pilz baut über den gesamten, vergleichbaren Zeitraum erwartungsgemäß deutlich mehr Cellulose als Lignin ab (SEIFERT, 1966), jedoch dienen dem Pilz vermutlich vorwiegend die C-Atome und Zucker als Nahrungsquelle (SAVORY et al., 1958), da sie die am einfachsten zu zersetzenden Komponenten im Holz und im Bindemittel darstellen.

Bei allen verwendeten Weißfäule- und Braunfäulepilzen sowie auch bei den untersuchten Moderfäuleerregern ist festzustellen, dass sich mit Hilfe der  $^{14}\text{C}$ -Messmethode die Abbauraten des vollständig  $^{14}\text{C}$ -U markierten Materials hinsichtlich der Komponenten Lignin und Cellulose unter Verwendung von  $^{14}\text{C}$ -U markierter Cellulose und  $^{14}\text{C}$ -U markiertem Lignin genauer bestimmen lassen. Des Weiteren war bei allen Versuchen deutlich zu erkennen, dass sich nach dieser Messmethode die einzelnen Bestandteile Lignin und Cellulose bezogen auf die gesamte abgebaute Menge, genauer quantifizieren ließen. Bei den Weißfäulepilzen konnten bis zu ca. ein Drittel der vollständig abgebauten Menge im Hinblick auf die abgebauten Anteile an Lignin und Cellulose genauer bestimmt werden. Bei den Braunfäulepilzen konnte der vollständig nach der  $^{14}\text{C}$ -Messmethode ermittelte Abbaugrad zu ca. einem Zehntel hinsichtlich dieser Holzhauptbestandteile genauer bestimmt werden. Bei den Moderfäuleerregern ließen sich die Abbaugrade des  $^{14}\text{C}$ -U markierten Materials zu ca. einem Sechstel in die Bestandteile Cellulose und Lignin differenzieren. Diese geringen Bestimmungsgrade sind unter anderem in der Tatsache begründet, dass von dem radioaktiven Material mengenmäßig wesentlich weniger in den MDF-Proben verarbeitet war, verglichen mit dem inaktiven Material. Die Verteilung des radioaktiven Materials in den MDF-Proben war jedoch sehr homogen, so dass der Abbau dieses Materials mit der gleichen Wahrscheinlichkeit stattfinden konnte wie der Abbau der inaktiven Komponenten. Andererseits konnte dies nur erreicht werden, wenn die MDF-Proben vollständig durchwachsen wurden. Wurden die Proben jedoch, wie im Fall der Braun- und Moderfäuleerreger, nicht vollständig mit Mycel durchzogen, konnten auch nur geringere Mengen des radioaktiven Materials zersetzt werden.

Ein weiterer Grund für die nicht genauer zu differenzierenden Abbaugrade lässt sich mit den unterschiedlichen Abbaustrategien dieser Pilz erklären (vgl. Kapitel 2.6 ff.). Da nicht alle

Pilze aufgrund ihrer enzymatischen Voraussetzungen in der Lage sind die Komponenten Lignin, Cellulose, Hemicellulose sowie weitere Holzbestandteile gleichmäßig abzubauen (KIRK und KELMAN, 1965; TROJANOWSKI und HÜTTERMANN, 1987; ERIKSON, 1990), ergeben sich Unterschiede hinsichtlich der abgebauten Mengen an Cellulose und Lignin. Die Braunfäulepilze und Moderfäuleerreger können Lignin nicht in den Mengen abbauen wie es bei den Weißfäulepilzen der Fall ist, da sie nicht zum simultanen Abbau der Bestandteile befähigt sind (SCHWARZE et al., 1999). Das Lignin wird bei den Moderfäuleerregern und den Braunfäulepilzen anscheinend hauptsächlich während des Mycelwachstums abgebaut und dient dem Pilz nicht als Hauptgrundlage zur Energiegewinnung (LIESE, 1981). Setzt man die Abbauraten der beiden in diesen Versuchen untersuchten Komponenten Cellulose und Lignin nach 128 Tagen Versuchslaufzeit in Zusammenhang, so können aus diesen Beziehungen Schlüsse der einzelnen Pilzarten hinsichtlich ihres Abbauverhaltens gezogen und Präferenzen bzgl. der abgebauten Holzbestandteile festgestellt werden. Diese Abbauraten zwischen Lignin und Cellulose, unterschieden nach den verwendeten Pilzarten, sind in der folgenden Tabelle 4-6 aufgeführt.

**Tabelle 4-6: Abbauverhältnisse zwischen  $^{14}\text{C}$ -U markierter Cellulose und  $^{14}\text{C}$ -U markiertem Lignin bei den verwendeten Weißfäule-, Braunfäule und Moderfäuleerregern**

Pilzart	Abbau nach 128 Tagen	
	Cellulose Verhältnis	Lignin Verhältnis
<i>Trametes versicolor</i>	1	2,1
<i>Trametes villosa</i>	1	1,28
<i>Coniophora puteana</i>	3,75	1
<i>Trichoderma viridae</i>	3,50	1
<i>Chaetomium globosum</i>	5,77	1

Bei Betrachtung der in Tabelle 4-6 dargestellten Verhältnisse zwischen den Abbaugraden von  $^{14}\text{C}$ -U markierter Cellulose und  $^{14}\text{C}$ -U markiertem Lignin wird ersichtlich, dass die beiden in diesen Holzabbauversuchen verwendeten Weißfäulepilze *Trametes versicolor* und *Trametes villosa* nicht nur die höchsten Ligninabbauraten aufweisen, sondern diesen Holzhauptbestandteil auch im Verhältnis zur einfacher aufzuschließenden Cellulose stärker abbauen. Die beiden zum simultanen Abbau der Holzkomponenten befähigten Weißfäulepilze weisen Verhältnisse von abgebauter Cellulose zu abgebautem Lignin von 1:2,1 bzw. 1:1,28 auf. Der Braunfäulepilz *Coniophora puteana* baut, wie auch die in diesen Versuchen verwendeten Moderfäuleerreger *Trichoderma viridae* und *Chaetomium globosum* mehr

Cellulose als Lignin ab. Wobei die Verhältnisse von abgebauter Cellulose zu abgebautem Lignin von 3,75:1 bei *Coniophora* über 3,50:1 bei *Trichoderma* bis hin zu 5,77:1 bei *Chaetomium* reichen.

#### 4.3.3 Kompostierung von $^{14}\text{C}$ -U markierten Mitteldichten Faserplatten

In Abbildung 4-84 sind die Ergebnisse des Kompostierungsversuches mit  $^{14}\text{C}$ -U markierten Mitteldichten Faserplatten graphisch dargestellt. Die Weizenprotein gebundenen MDF-Platten weisen hinsichtlich der drei verwendeten, unterschiedlichen Substrate von einander abweichende Kompostierungsgrade auf. Dabei wurde der Grad der Kompostierung anhand des über die Versuchsdauer von den Bodenmikroorganismen abgegebenen und mit Hilfe der Natronlauge aufgefangenen  $^{14}\text{CO}_2$  ermittelt. Die Aktivität des durch die Kompostierung freigesetzten  $^{14}\text{CO}_2$  wurde prozentual zur anfangs im Holzwerkstoff gesamt eingesetzten Menge (vgl. Tabelle 3-30) berechnet. Diese Werte addiert ergeben die in Abbildung 4-84 dargestellten Graphiken.

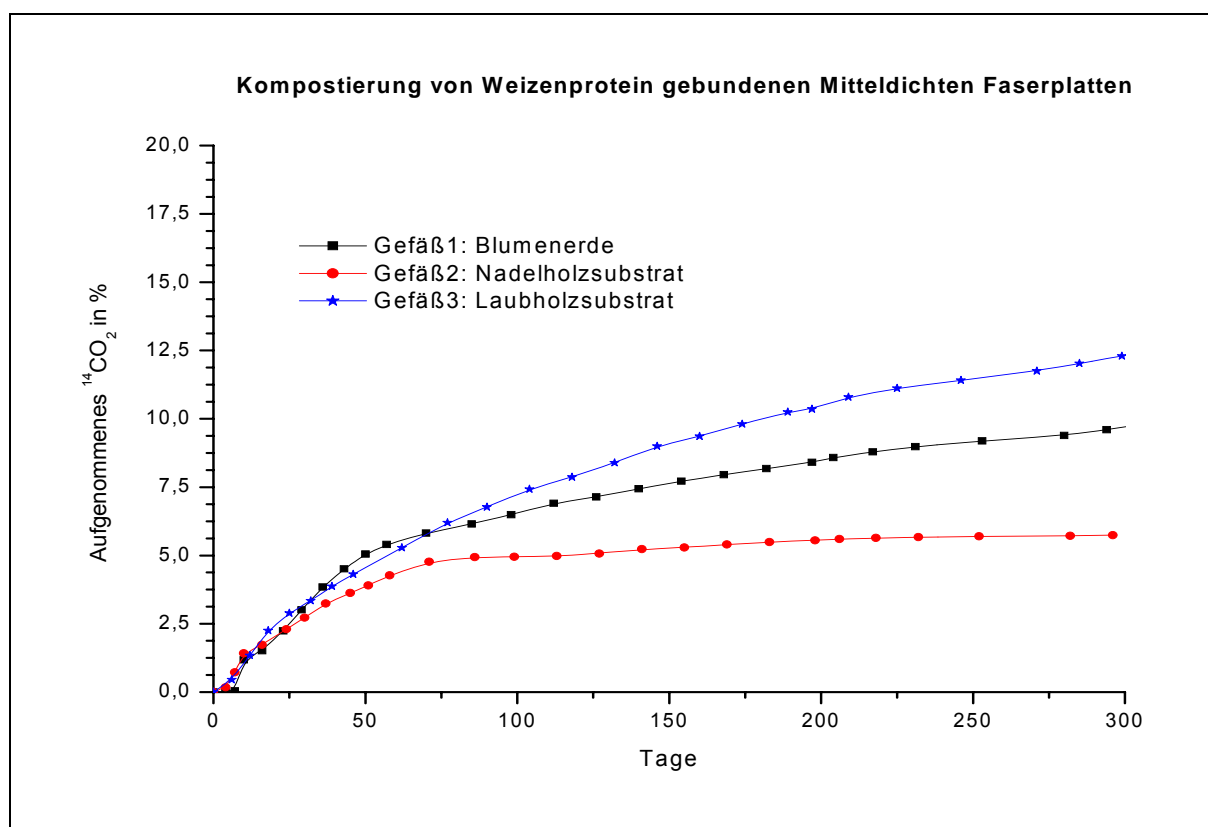


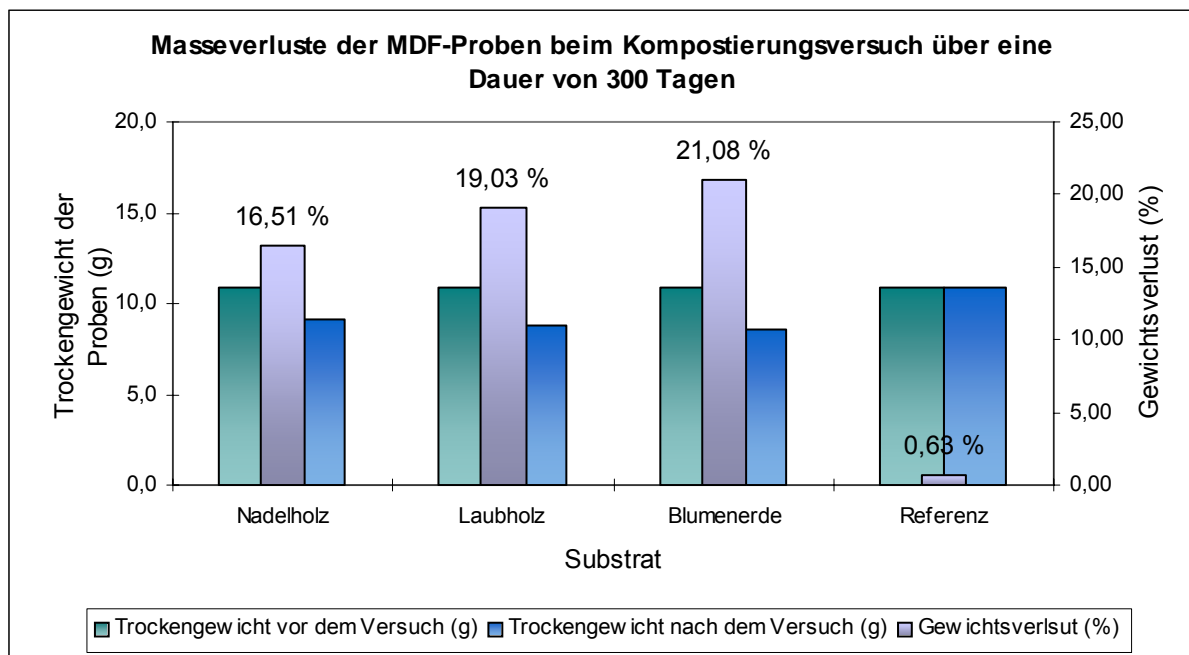
Abbildung 4-84: Ergebnisse der Kompostierungsversuche mit Weizenprotein gebundenen MDF-Platten

Es ist deutlich zu erkennen, dass nach dieser radiometrischen Messmethode das beste Kompostierungsergebnis mit dem Laubholzsubstrat (Gefäß 3, Probe L) erzielt wurde. Die Weizenprotein gebundene Mitteldichte Faserplatte wurde im Laubholzsubstrat über eine Versuchsdauer von 300 Tagen zu ca. 12,5 % kompostiert. Die Weizenprotein gebundene MDF-Probe, die in der Blumenerde (Gefäß 1, Probe B) gelagert wurde, konnte über den gleichen Versuchszeitraum zu 9,4 % kompostiert werden, was auf eine geringere Aktivität der in der Blumenerde befindlichen Mikroorganismen im Vergleich zu den im Laubholzsubstrat enthaltenen Mikroorganismen schließen lässt. Die im Nadelholzsubstrat gelagerte, Weizenprotein gebundene Mitteldichte Faserplatte (Gefäß 1, Probe N) wurde nach der  $^{14}\text{C}$ -Messmethode über den Versuchszeitraum von 300 Tagen zu lediglich 4,9 % durch die im Substrat befindlichen Mikroorganismen kompostiert. Bei der Referenz, nicht in Abbildung 4-84 dargestellt, wurde über den gesamten Versuchszeitraum von 300 Tagen keine Aktivität in der Natronlauge festgestellt. Somit fand bei der Weizenprotein gebundenen Mitteldichten Faserplatte ohne Substrat auch keine Kompostierung statt.

Da es sich bei der  $^{14}\text{C}$ -Messmethode um ein Verfahren handelt, bei dem lediglich der Verbrauch der anfangs eingesetzten Aktivität über einen definierten Versuchszeitraum ermittelt wird, gibt diese radiometrisch Messmethode nicht die tatsächlichen Kompostierungsgrade wieder. Es werden ausschließlich die Mengen an  $^{14}\text{C}$ -markiertem Material gemessen, die durch die Mikroorganismen zersetzt wurden (HAIDER et al., 1964, 1978; KIRK, 1971). Die je nach Substratvariante unterschiedlichen Bodenmikroorganismen zersetzen über die gesamte Versuchsdauer selbstverständlich neben dem messbaren radioaktiven Material auch das in der Weizenprotein gebundenen MDF-Probe enthaltene nicht radioaktive Material. Dabei werden durch die Mikroorganismen vermutlich alle Holzbestandteile gleichermaßen abgebaut (HAIDER et al., 1978). Rein rechnerisch müssten, einen gleichmäßigen Abbau von radioaktivem und inaktivem Material vorausgesetzt, die Ergebnisse der Kompostierung doppelt so hoch sein, wie nach der  $^{14}\text{C}$ -Messmethode berechnet.

Um einen vollständigen Kompostierungsgrad, bei dem das inaktive Material mit berücksichtigt wird, feststellen zu können, wurden die Trockengewichte der Weizenprotein gebundenen und mit  $^{14}\text{C}$ -U markiertem Material hergestellten Mitteldichten Faserplatten vor Versuchsbeginn ermittelt (vgl. Tabelle 3-30). Auf diese Weise ist eine Überprüfung des Kompostierungsgrades anhand des Masseverlustes der zu untersuchenden MDF-Proben möglich. Die Ergebnisse der Trockengewichtsmessungen vor und nach dem Versuch, sowie

die daraus resultierenden Kompostierungsgrade sind in der folgenden Abbildung 4-85 graphisch dargestellt.



**Abbildung 4-85: Masseverluste der MDF-Platten während des Kompostierungsversuches**

Die Ergebnisse der Masseverluste zeigen einen anderen Trend, als die nach der  $^{14}\text{C}$ -Messmethode berechneten Kompostierungsgrade in Abbildung 4-84. Der höchste Kompostierungsgrad mit 21,08 %, konnte anhand der Masseverluste bei der in der Blumenerde gelagerten mit Weizenprotein gebundenen Mitteldichten Faserplatte erzielt werden. Im Vergleich zu dem nach der  $^{14}\text{C}$ -Messmethode berechnetem Kompostierungsgrad von 9,4 % ergibt sich somit eine totale Differenz von 11,68 %. Das bedeutet, dass das inaktive Material nicht wie das radioaktive Material ebenfalls zu 9,4 %, sondern zu 2,28 % mehr kompostiert wurde. Die zusätzlichen 2,28 % beim inaktiven Material stellen, bezogen auf die beim radioaktiven Material berechneten 9,4 %, einen um fast 25 % höheren Kompostierungsgrad dar. Daraus ist ersichtlich, dass die Bodenmikroorganismen in der Blumenerde das inaktive Material in der MDF-Probe stärker zersetzen als das radioaktive Material.

Beim Laubholzsubstrat, das nach der  $^{14}\text{C}$ -Messmethode mit einem Kompostierungsgrad von 12,5 % das höchste Ergebnis erzielt (vgl. Abbildung 4-84), zeigt der anhand des Masseverlustes berechneten Kompostierungsgrad von 19,03 % einen abweichenden Trend. Vergleicht man das Kompostierungsergebnis des radioaktiven Materials mit dem inaktiven Material, so ergibt sich eine Differenz zwischen beiden Materialien von 6,53 %. Dies zeigt,

dass auch im Laubholzsubstrat das radioaktive und inaktive Material über den gleichen Versuchszeitraum von 300 Tagen anscheinend nicht gleichmäßig von den Mikroorganismen zersetzt wird. Es ist erkennbar, dass im Vergleich zum radioaktiven Material (12,5 %) nur fast halb soviel inaktives Material (6,53 %) über den gleichen Zeitraum zersetzt wird. In diesem Fall zeigt sich, dass das radioaktive Material von den im Laubholzsubstrat enthaltenen Mikroorganismen schneller abgebaut wird, als das inaktive Material.

Ein überraschendes Ergebnis zeigte das Nadelholzsubstrat. Nach der  $^{14}\text{C}$ -Messmethode wurde über 300 Tage lang ein Kompostierungsgrad von lediglich 4,9 % an Weizenprotein gebundenen Mitteldichten Faserplatten berechnet (vgl. Abbildung 4-84). Die im Nadelholzsubstrat gelagerte MDF-Probe wurde jedoch, ermittelt anhand ihres Masseverlustes, zu insgesamt 16,51 % durch die Mikroorganismen abgebaut. Vergleicht man diese nach der  $^{14}\text{C}$ -Messmethode und dem Masseverlust berechneten Werte so ergibt sich eine totale Differenz von 11,61 %. Dies ist eine Zunahme von über 200 % beim Kompostierungsgrad des inaktiven Materials verglichen mit dem radioaktiven Material. Daraus ist ersichtlich, dass die im Nadelholzsubstrat befindlichen Pilze und Bakterien das in der Weizenprotein gebundenen Mitteldichten Faserplatte enthaltene inaktive Material über einen Zeitraum von 300 Tagen deutlich schneller kompostieren als das in der Probe befindliche radioaktive Material.

Abschließend kann man aus diesem Versuch mehrere Schlüsse ziehen. Die Kompostierung von Weizenprotein gebundenen Mitteldichten Faserplatten stellt neben der Zersetzung durch Holzerstörende Pilze eine alternative Entsorgungsform dar. Der Grad der Kompostierung durch Mikroorganismen ist jedoch nicht so hoch wie der Grad der Holzerstörung durch die Pilze. Der höchste Kompostierungsgrad konnte anhand des Masseverlustes bei der Blumenerde erzielt werden. Es wurde bei dieser Substratvariante sowohl aktives als auch inaktives Material zu fast gleich Anteilen kompostiert. Da es sich bei einer späteren Kompostierungsform der Mitteldichten Faserplatten um rein inaktives Material handeln würde, ist das Nadelholzsubstrat eine weitere Alternative, da bei dieser Substratvariante der höchste Anteil an inaktivem Material durch die Bodenmikroorganismen abgebaut wurde.



## 5 Zusammenfassung

Die bei der Produktion von Holzwerkstoffen verwendeten konventionellen Kunstharze auf petrochemischer Basis sind in letzter Zeit zunehmend kritisiert worden. Grund dafür sind die Abhängigkeit vom ständig ansteigenden Rohölpreis und die später unter Umständen auftretenden, vermutlich gesundheitsschädlichen Formaldehydemissionen aus den mit diesen Kunstharzen gebundenen Holzwerkstoffen. Aufgrund dieser Situation gibt es Bestrebungen sowohl seitens der Holzwerkstoffhersteller als auch der Bindemittelproduzenten, ein natürliches Bindemittel zu entwickeln, das sich zur industrieller Herstellung von Formaldehydfreien bzw. Formaldehydreduzierten Holzwerkstoffen eignet.

Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens wurde eine besprühbare Weizenprotein-Suspension entwickelt, mit der Intention, es als natürliches Bindemittel bei der Herstellung von Mitteldichten Faserplatten zu verwenden. Dazu wurde der Feststoffgehalt dieser Suspension von anfänglich 20 % auf 43,5 % erhöht. Aufgrund geeigneter analytischer Untersuchungen sowie der durchgeführten F&E-Arbeiten mit der entwickelten Weizenprotein-Suspension konnten neue, bedeutende Erkenntnisse bzgl. der Verwendung dieser Suspension als natürliches Bindemittel zur Herstellung von Mitteldichten Faserplatten gewonnen werden. Die Herstellung der Mitteldichten Faserplatten erfolgte dabei ausschließlich im Pilotmaßstab, so dass zur Absicherung der gewonnenen Erkenntnisse noch Versuche im Industriemaßstab durchgeführt werden müssen.

Die in dieser Arbeit analysierte Weizenprotein-Suspension ist ein Nebenprodukt der Stärke- bzw. Glucosesirupherstellung, das ganzjährig in großen Mengen anfällt. Es konnte bei den durchgeführten analytischen Verfahren festgestellt werden, dass die Zusammensetzung dieses Produktes hinsichtlich seiner Hauptbestandteile, den mehrwertigen Zuckern, Hemicellulosen, Proteinen und Fasern, über den gesamten Produktionszeitraum sehr homogen ist. Es handelt sich hierbei um ein Bindemittel, das sich durch eine konstante Qualität über das ganze Jahr hin auszeichnet und das unter Zugabe von 0,1 % Propionsäure mindestens 6 Monate haltbar ist. Der bis zum heutigen Zeitpunkt erreichte Feststoffgehalt von 43,5 % in der Weizenprotein-Suspension kann sicherlich noch durch weitere geeignete Verfahren optimiert werden. Ein Feststoffgehalt von 50 % ist dabei sicherlich eine realistische Zielvorgabe. Durch den im Jahr 2005 vorkalkulierten Preis dieses Bindemittels von 300 € pro Tonne Festharz ergeben sich keine höheren Kosten für die Holzwerkstoffherstellung, da dieser Preis sogar noch unter den Kosten für Harnstoff-Formaldehyd-Harze liegt. Die UF-Harze sind im Jahr

2005 mit einem durchschnittlichen Kaufpreis von 363 € pro Tonne Festharz taxiert. Dadurch ergibt sich bei der Verwendung des Weizenbindemittels sogar noch ein finanzieller Vorteil von 63 € pro verbrauchter Tonne Bindemittel Festharz. Eine Verwendung der Weizenprotein-Suspension als Bindemittel würde sich für die Holzwerkstoffindustrie, die den weltweit größten Abnehmer konventioneller Kunstharze darstellt, in bedeutenden Kosteneinsparungen widerspiegeln.

Bei den rheologischen Untersuchungen des Weizenproteinbindemittels stellte sich heraus, dass es sich bei der entwickelten Weizenprotein-Suspension um ein natürliches Bindemittel handelt, das bzgl. der Viskositäten sehr ähnliche Eigenschaften aufweist, die mit den Viskositäten der zur Zeit am häufigsten zur Herstellung von MDF-Platten verwendeten konventionellen Bindemitteln, den Harnstoff-Formaldehyd-Harzen, vergleichbar sind. Auch bei der Zusammenstellung von unterschiedlichen Leimflotten, bestehend aus der Weizenprotein-Suspension und herkömmlichen, konventionellen Hydrophobierungsmitteln, ergaben sich keine Wechselwirkungen zwischen diesen Komponenten, die eine Verwendung des Weizenproteins als Bindemittel untersagen würden. Dabei wurden ausschließlich Hydrophobierungsmittel auf Paraffinbasis eingesetzt, die zurzeit auch bei der industriellen Herstellung von MDF-Platten verwendet werden. Die gemessenen Viskositäten der Mischkondensate, bestehend aus UF-Harzen und Weizenprotein bzw. PF-Harzen und Weizenprotein in unterschiedlichen Mengenanteilen, erlauben ebenfalls ohne kostenintensive Umbaumaßnahmen an bestehenden Industrieanlagen den Einsatz der Weizenprotein-Suspension als Bindemittel zur Herstellung von Mitteldichten Faserplatten.

Dies bestätigte sich auch in den mechanisch-technologischen Eigenschaften der mit diesen Mischkondensaten hergestellten Mitteldichten Faserplatten im Pilotmaßstab. Dabei stellte sich heraus, dass sowohl UF-Harze als auch PF-Harze zu maximal 25 % durch die entwickelte Weizenprotein-Suspension unter Zugabe von Hydrophobierungsmitteln zur Leimflotte substituiert werden können, ohne Einbußen in den mechanisch-technologischen Eigenschaften der MDF-Platten in Kauf nehmen zu müssen. Allerdings konnten bei einem Mischungsverhältnis von 50:50 der Komponenten UF-Harz zu Weizenprotein bzw. PF-Harz zu Weizenprotein Wechselwirkungen zwischen dem Mischkondensat und den verwendeten Hydrophobierungsmitteln festgestellt werden, die sich negativ auf die erzielten Quersugfestigkeiten und Quellwerte auswirkten. Aufgrund dieser Ergebnisse ist ein höherer Anteil des Weizenproteins in diesen Mischkondensaten, ohne eine Beeinträchtigungen der mechanisch-technologischen Eigenschaften zu bewirken, zurzeit nicht realisierbar. Die

gemessenen Formaldehydemissionen dieser mit Mischkondensaten gebundenen Mitteldichten Faserplatten zeigten, dass die in der Weizenprotein-Suspension enthaltenen Proteine als Formaldehydfängersubstanzen fungieren können. Aufgrund der ermittelten mechanisch-technologischen Eigenschaften dieser mit Mischkondensaten gebundenen MDF-Platten unter Verwendung eines Presszeitfaktors von 18 Sekunden pro mm Plattendicke kann der Einsatz solcher Mischkondensate bereits in naher Zukunft eine entscheidende Rolle spielen, wenn es um die Reduzierung der Formaldehydemissionen und das Erreichen einer F<sup>\*\*\*\*</sup>-Qualität bei Mitteldichten Faserplatten geht.

Die mechanisch-technologischen Eigenschaften der nur mit Weizenprotein und Paraffinen gebundenen Mitteldichten Faserplatten zeigten, dass es möglich ist, rein Weizenprotein gebundene MDF-Platten unter Verwendung von unterschiedlichen Hydrophobierungsmitteln bis zu einer praktischen Stärke von 6 mm im Pilotmaßstab herzustellen, mit denen die mechanisch-technologischen Anforderungen nach DIN erfüllt werden können. Die rein Weizenprotein gebundenen Mitteldichten Faserplatten im Pilotmaßstab mit praktischen Dicken von 8 mm bis 18 mm konnten die Anforderungen nach DIN hinsichtlich der Querkzugfestigkeiten senkrecht zur Plattenebene größtenteils erfüllen. Allerdings zeigte sich bei diesen Holzwerkstoffen, dass bedingt durch die Plattendicke und dem damit verbundenen, höheren Anteil an Weizenprotein, die Quellwerte dieser Mitteldichten Faserplatten nach 24 h Wasserlagerung über den nach DIN geforderten Höchstwerten lagen. Auch bei der Zugabe von konventionellen Hydrophobierungsmitteln zur Weizenprotein-Suspension zeigte sich, dass es hierbei zu Wechselwirkungen zwischen dem Bindemittel und den Paraffinen beim Heißpressen kommt, wodurch sich die Querkzugfestigkeiten verschlechtern und auch die Wasseraufnahme der mit diesen Leimflotten hergestellten Faserplatten nicht wesentlich reduziert werden konnte. Allerdings sind die ermittelten Ergebnisse der mechanisch-technologischen Eigenschaften der mit Weizenprotein und Additiven auf SiO<sub>2</sub>-Basis angefertigten Mitteldichten Faserplatten sehr viel versprechend. Die Zugabe von Additiven auf SiO<sub>2</sub>-Basis mit hydrophobierenden Eigenschaften zum naturnahen Bindemittel auf Proteinbasis ergab sich erst zu einem späteren Zeitpunkt in diesem Forschungsvorhaben, so dass lediglich eine Additivart in einer Dosierung getestet werden konnte. Dabei stellte sich heraus, dass es sich bei diesem Additiv um einen Zusatz handelte, durch den positive Quellwerte erzielt werden konnten und keine negativen Wechselwirkungen mit den verwendeten Weizenproteinen auftraten, die sich in den mechanisch-technologischen Eigenschaften dieser Protein gebundenen MDF-Platten widerspiegeln. Da es aber aktuell eine Vielzahl dieser SiO<sub>2</sub>-basierten Additive gibt, die sich hinsichtlich ihrer technischen

Merkmale oder ihrer chemischen Charakteristika, wie z.B. dem pH-Wert usw. unterscheiden, besteht auf diesem Gebiet sicherlich noch Entwicklungsbedarf. Auch die positiven Klebeeigenschaften dieser Additive, sowie ihre laut Herstellerangaben fungizide Wirkung sollten neben ihren hydrophoben Eigenschaften noch in weiteren Versuchen bei der Herstellung von Mitteldichten Faserplatten im Pilotmaßstab untersucht werden.

Die Entsorgungsmöglichkeiten der Weizenprotein gebundenen Mitteldichten Faserplatten durch Kompostierung oder Holzzerstörende Pilze stellen interessante und alternative Möglichkeiten zu den zurzeit recht kostenintensiven Entsorgungsmöglichkeiten UF- und PF-Harz gebundener Holzwerkstoffe dar. Aufgrund der mit  $^{14}\text{C}$ -U markiertem Material durchgeführten Abbau- und Kompostierungsversuche an Weizenprotein und UF- Harz gebundenen Mitteldichten Faserplatten konnten neue Erkenntnisse bzgl. des Abbauverhaltens von Holzzerstörenden Pilzen bei der Zersetzung von Holzwerkstoffen gewonnen werden. Aufgrund der durchgeführten radiometrischen Versuche war es möglich, den Abbau durch Holzzerstörende Pilze hinsichtlich des in den Fasern enthaltenen Lignins und der enthaltenen Cellulose genauer zu charakterisieren. Verglichen mit dem Abbau von vollständig  $^{14}\text{C}$ -markiertem Fasermaterial konnte an Protein gebundenen MDF-Platten festgestellt werden, dass die Holzzerstörenden Pilze die gleichen charakteristischen Zersetzungsmerkmale aufweisen wie bei den bereits bekannten Abbaustrategien im Vollholz.

Abschließend lässt sich aufgrund der in dieser Dissertation gewonnenen Erkenntnisse aussagen, dass es sich bei der Weizenprotein-Suspension um ein natürliches Bindemittel aus nachwachsenden Rohstoffen handelt, das nach weiteren Optimierungsverfahren und orientierenden Versuchen sicherlich ein alternatives Bindemittel zu den zurzeit genutzten petrochemischen Bindemitteln aus nicht erneuerbaren Ressourcen darstellt. Die durchgeführten Substitutionsversuche mit unterschiedlichen Mischharzen zeigten bereits, dass die Verwendung der Weizenprotein-Suspension in dieser Form bereits realisierbar ist. Bereits durch den Einsatz dieses Nebenproduktes als Substitutionsbindemittel für konventionelle Kunstharze zur Herstellung von Mitteldichten Faserplatten könnten jährlich enorme Mengen dieses Materials industriell und wirtschaftlich sinnvoll genutzt werden, und auf diese Weise ein Beitrag zum effektiven Einsatz von nachwachsenden Rohstoffen geleistet werden.

## 6 Ausblick

Da der im Kunstharz enthaltene Formaldehyd als Crosslinker für die Weizenproteine dient, sollte in weiteren Untersuchungen der Formaldehydanteil in den Mischkondensaten erhöht werden um auf diese Weise eine Erhöhung des Weizenproteinanteils im Mischkondensat zu erreichen und/oder die Festigkeiten der MDF-Platten zu optimieren. Des Weiteren könnten auch Formaldehyd, UF- und PF-Harze in unterschiedlichen Mengen in die entwickelte Weizenprotein-Suspension mit einkondensiert werden, um bei den ausschließlich mit Weizenprotein und den mit Mischkondensaten gebundenen MDF-Platten die mechanisch-technologischen Eigenschaften weiter zu optimieren.

Auch ohne Zugabe von konventionellen Bindemitteln konnte die in diesem Forschungsvorhaben entwickelte Weizenprotein-Suspension als Bindemittel zur Herstellung von Mitteldichten Faserplatten im Pilotmaßstab verwendet werden. Dennoch sollte in weiteren, orientierenden Forschungsarbeiten der Einsatz unterschiedlicher SiO<sub>2</sub>-basierter Additive als Hydrophobierungsmittel bei der Herstellung von Weizenprotein gebundenen MDF-Platten untersucht werden, um die Quelleigenschaften der Weizenprotein gebundenen MDF-Platten weiter zu verbessern. Anhand der ermittelten mechanisch-technologischen Eigenschaften der mit diesen Leimflotten unter Verwendung von Additiven auf SiO<sub>2</sub>-Basis gebundenen Mitteldichten Faserplatten sollte sowohl eine geeignete Additivart als auch eine optimale Zugabemenge dieses Hydrophobierungsmittels erforscht werden.

Der Feststoffgehalt der im Rahmen dieser Dissertation entwickelten Weizenprotein-Suspension sollte in Zukunft noch weiter optimiert werden, so dass durch den höheren Proteinanteil noch bessere mechanisch-technologische Eigenschaften bei den Holzwerkstoffen erzielt werden können. Durch geeignete Verfahren ist ein Feststoffgehalt von 50 % bis 60 % in der Weizenprotein-Suspension anzustreben.

Abschließend müsste eine Übertragung der in diesem Forschungsvorhaben durchgeführten Versuche vom Pilot- in den Industriemaßstab erfolgen, um mögliche Probleme bei der Verwendung dieser Weizenprotein-Suspension alleine wie auch in Kombination mit unterschiedlichen Kunstharzen bei der industriellen Herstellung von Mitteldichten Faserplatten zu untersuchen. Probleme könnten aufgrund des vergrößerten Plattenformates, einer stärkeren Dampfungwicklung wie auch durch geänderte Presszeiten und -drücke bei der industriellen Herstellung auftreten.

## 7 Literaturverzeichnis

- ADAM, W. (1988): Melaminharze, Kunststoffhandbuch. Becker/Braun, Bd. 10 Duroplaste, S. 41-50, München Wien
- ADASKAVEG, J. E., R. L. GILBERTSON (1986): In vitro decay studies of selective delignification and simultaneous decay by the white-rot fungi *Ganoderma lucidum* and *Ganoderma tsugae*, Can. J. Bot. 64, S. 1611-1619
- ADLER, E. (1977): Lignin chemistry. Past, present and future, Wood Science Technology 11
- AMMER, U., W. LIESE (1965): Das Abbauvermögen holzerstörender Pilze. In: Holz und Organismen. Nr. 1. Hrsg. G. BECKER und W. LIESE. Beihefte zu Material und Organismen. Duncker & Humboldt, Berlin
- ARNOLD, W. (1964): Verhalten gebräuchlicher Streckmittel in Harnstoffharz-Leimen und deren Prüfung ohne Verleimung. In: Holz als Roh- und Werkstoff (22), S. 8-13
- AUGUSTIN, H., J. PULS (1982): Perspectives on the production of chemicals from wood. Chemical processing of wood, Supplement 13 to Volume XXXIV of the Timber Bulletin for Europe, 8-24, FAO, Geneva, April 1982
- AYLA, (1980): Herstellung von feuchtigkeitsbeständigen Leimen aus nachwachsenden Rohstoffen für die Holzindustrie – dargestellt am Beispiel des Rindenextraktes von *Pinus brutia* Tenore und das Äthanollignins. Dissertation, Hamburg
- BAKELITE AG (2003): Technische Information BAKELITE<sup>®</sup> PF 1808 HW, BAKELITE AG, Duisburg
- BASF (2000): Technisches Merkblatt Kauritec 350<sup>®</sup>. BASF Aktiengesellschaft, Ludwigshafen
- BASF (2002): Technisches Merkblatt Kauritec 407<sup>®</sup> flüssig. BASF Aktiengesellschaft, Ludwigshafen
- BERGMANN, K. (1998): Enzymatische Aktivierung der holzeigenen Bindekräfte zur Herstellung einer bindemittelfreien Mitteldichten Faserplatte. Als Dissertation an der forstwissenschaftlichen Fakultät der Georg-August-Universität Göttingen, Tectum Verlag, 166 S.

- BERGTHALLER, W. (1997): New uses of wheat gluten and non-starch wheat components. Proceedings of the International Wheat Quality Conference 1997. In: STEELE, J. L. und CHUNG, K. O. (Hrsg.): Grain Industry Alliance. Manhattan / KS 1997
- BETRAND, W. (1894): Chimie Industrielle – Sur le latex de l'arbre à laque. Bulletin de la Société Chimique de Paris 3<sup>e</sup> ser 11
- BIETZ, J. A., G. L. LOOKHART (1996): Gluten: properties and non food potential. Cereal Foods World 41. S. 376
- BLANCHETTE, R. A. (1984): Selective delignification of eastern hemlock by *Ganoderma tsugae*, Phytopath. 74, S. 153-160
- BORCHERDING, A., T. LUCK (1995): Pflanzliche Proteine für technische Anwendungen. In: VON WEIZECKER, E. U. (Hrsg.): Mensch, Umwelt, Wirtschaft. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg
- BUNDESMINISTERIUM FÜR VERBRAUCHERSCHUTZ, ERNÄHRUNG UND LANDWIRTSCHAFT (2005): Die zweite Bundeswaldinventur, BWI<sup>2</sup>. Verlag des BMVEL.
- BUTIN, H., T. KOWALSKI (1983): Die natürliche Astreinigung und ihre biologischen Voraussetzungen in Die Pilzflora der Buche (*Fagus sylvatica* L.), European. J. For. Path. 13, S. 322-334
- CARLOWITZ VON, H. C. (1713): *Sylvicultura Oeconomica*, oder Hauswirtschaftliche Anweisung zur wilden Baumzucht. In: Forstliche Klassiker, Skript der Fachschaft Forst der Georg-August-Universität Göttingen
- CERESTAR AG (2004): Mündliche Mitteilungen. Göttingen 2004
- CERESTAR AG (2005): Mündliche Mitteilung. Göttingen 2005
- CORBETT, N. H. (1965): Micro-morphological studies on the degradation of lignified cell walls by Ascomycetes and Fungi Imperfecti, J. Inst. Wood Science 14, S. 18-29
- DALTON, L. K. (1953): Resins from sulphited tannins as adhesives for wood. Australian Journal of Applied Science 4
- DEPPE, H. J., K. ERNST (1964): Technologie der Spanplatten. Holz-Zbl.-Verlags-GmbH, Stuttgart
- DEPPE, H. J., K. ERNST (1996): MDF – Mitteldichte Faserplatten, DRW-Verlag, Leinfelden-Echterdingen, 200 S.

- DEPPE, H. J., K. ERNST (2000): Taschenbuch der Spanplattentechnik. DRW-Verlag. Leinenfeld-Echterdingen
- DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG e.V. (Band 30, 1998 a): Klebstoffe, Richtlinien für die Einteilung (DIN 16920), Beuth-Verlag GmbH, Berlin
- DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG e.V. (Band 60, 1998 b): Holzfasерplatten, Spanplatten, Sperrholz: Normen, Richtlinien, Beuth-Verlag GmbH, Berlin
- DIX, B., R. MARUTZKY (1985): Tannin extracts from spruce and pine barks. J. Appl. Polym. Sc. Appl. Polym. Symp. 40, S. 91-100
- DIX, B., R. MARUTZKY (1988): Verwendung von Stärke und Protein als Streckmittel für Diisocyanat bei der Herstellung von Spanplatten. In: Holz als Roh- und Werkstoff (46), S. 191
- DUNCAN, C. G. (1960): Wood attacking capacities and physiology of soft-rot fungi. USDA Forest Serv.. Rep. 2173
- DUNKY, M. (2005): F\*\*\*\*-Verleimungen für den Japanischen Markt – Neue Span- und Faserplattenleime. In: MARUTZKY, R. (Hrsg.): Klebstoffe für Holzprodukte. WKI-Bericht Nr. 39, Tagungsband zum Workshop am 10./11. November 2005
- ENGELS, J. (1998): Studien zur Besiedlung und Holzzersetzung an ausgewählten Laub- und Nadelbäumen durch wurzelbürtige Pilze, FZKA 6068, Forschungszentrum Karlsruhe, Diss. Universität Freiburg
- EUROPEAN PANELBOARD FEDERATION (2004): Opening 4<sup>th</sup> European wood based panel symposium, 15.-17. September 2004 in Hanover, EUROPEAN PANELBOARD FEDERATION
- ERIKSON, K. E. L., R. A. BLANCHETTE, P. ANDER (1990): Microbial and enzymatic degradation of wood and wood components, Springer, Berlin
- 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): S. 98-109
- FENGEL, D., G. WEGENER (2003): Wood Chemistry, Ultra structure, Reactions. Kessel Verlag Remagen
- FRANKE, W. (1997): Nutzpflanzenkunde. Georg Thieme Verlag, Stuttgart



- FREUDENBERG, K., M. REICHERT (1954): Die Anwendung radioaktiver Isotope bei der Erforschung des Lignins. V. Chem. Ber. 87, S. 1834-1840
- FREUDENBERG, K., A. NEISH (1968): Constitution and Biosynthesis of Lignin. Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, New York, S. 129
- GÄUMANN, E. (1928): Die chemische Zusammensetzung der Fichten- und Tannenholzes in den verschiedenen Jahreszeiten. Flora N.F., 123, S. 344-385
- GRAMMEL, R. (1989): Forstbenutzung: Technologie und Verwertung des Holzes. Parey-Verlag, Hamburg, Berlin, S. 12-17
- GREEN, F. III, HIGHLEY, T. L. (1997): Mechanism of brown-rot decay: paradigm or paradox, International Biodeterioration & Biodegradation 39, S. 113-124
- HABENICHT, G. (1986): Kleben. Springer Verlag Berlin, Heidelberg, New York, Tokyo
- HABENICHT, G. (1997): Kleben, Grundlagen, Technologie, Anwendungen. 3. Auflage Springer Verlag, Heidelberg, New York, Tokyo
- HAIDER, K. S. U. LIM, W. FLAIG (1964): Experimente und Theorien über den Ligninabbau bei der Weißfäule des Holzes und bei der Verrottung pflanzlicher Substanz im Boden. Holzforsch. 18, S- 81-88
- HAIDER, K., J. TROJANOWSKI (1975): Decomposition of Specifically  $^{14}\text{C}$ -Labelled Phenols and Dehydrogenpolymers of Coniferyl Alcohol as Models for Lignin Degradation by Soft and White Rot Fungi. Arch. Microbiol. 105, S. 33-41. Springer Verlag
- HAIDER, K., J. TROJANOWSKI, V. SUNDMAN (1978): Screening for lignin degrading bacteria by means of  $^{14}\text{C}$ -labelled lignins. Arch. Mikrobiol. 119, S. 103-106
- HAIDER, K., J. TROJANOWSKI (1989): Mikrobieller Abbau von  $^{14}\text{C}$ - und  $^{35}\text{S}$ -markierter Ligninsulfonsäure durch Pilze, Bakterien oder Mischkulturen. Holzforschung 35, S. 33-38
- HALE, M. D. C. , R. A. EATON (1985 a): Oscillatory growth of fungal hyphae in wood cell walls, Trans. Br. Mycol. Soc. 84, S. 277-288
- HALE, M. D. C. , R. A. EATON (1985 b): The ultra structure of soft-rot fungi, Cavity forming hyphae in wood cell walls, Mycologia 77, S. 594-605
- HALSE, O. M. (1926): Bestimmung von Zellstoff und Holzstoff im Papier. Papier-Journalen 14, Nr. 10, S. 121-123

- HARTIG, R. (1878): Die Zersetzungserscheinungen des Holzes der Nadelbäume und der Eiche in forstlicher, botanischer und chemischer Richtung, Springer, Berlin
- HINTERWALDNER, R. (1986): Polymerisierbare Stärken. Coating 19, S. 364-368
- HÜTTERMANN, A., M. GEBAUER, C. VOLGER, C. RÖSGER (1977): Polymerisation und Abbau von Natrium-Ligninsulfonat. In: Holzforschung 31 (3), S. 83-89
- HÜTTERMANN, A., A. KHARAZIPOUR, A. HAARS, K. NONNINGER (1990): Ersetzt ein biologisches Bindemittel herkömmliche Kunstleime? Holz und Kunststoff, 11, S. 1215-1219
- HÜTTERMANN, A., A. KHARAZIPOUR (1993): Biochemie der Synthese und des Abbaus der pflanzlichen Zellwand. In HÜTTERMANN A., A. KHARAZIPOUR (Hrsg.) Die pflanzliche Zellwand als Vorbild für Holzwerkstoffe. Schriften aus der forstlichen Fakultät der Universität Göttingen und der Nds. Forstlichen Versuchsanstalt. Band 113, J. D. Sauerländer's Verlag, Frankfurt am Main, S. 5-22
- INTERNATIONAL AGENCY FOR RESEARCH ON CANCER (2004): IARC classifies Formaldehyde as carcinogenic to humans. International Agency for Research on Cancer. Press release nr. 153, 15.06.2004
- JAYME, G., BÜTTEL, H. (1968): Vergleich verschiedener Verfahren zur Pentosanbestimmung einschließlich einer neuen ISO-Methode. Das Papier, 22. Jahrgang, Nr. 5, S. 249-253
- JOHNS, W., LENZ, M., HUFFACKER, E., a. SAUNDERS, J. (1984): Proc. Particleboard Symposium Wash.-State Univ. Pullman 18
- JUNG, A., E. ROFFAEL (1989): Verwendung von Tanninen als Bindemittel in Holzwerkstoffen. Adhäsion, 33 (7/8), S. 28-34
- KAMOUN, C., A. PIZZI, R. GARCIA (1998): The effect of humidity on crosslinked and entanglement networking of formaldehyde-based wood adhesives. In: Holz als Roh- und Werkstoff (56), S. 235-243, Springer-Verlag, Berlin
- KEILISCH, G., P. BAILEY, W. LIESE (1970): Enzymatic degradation of cellulose, cellulose derivatives and hemicelluloses in relation to the fungal decay of wood, Wood Sci. Technol. 4, S. 273-283
- KHARAZIPOUR, A. (1983): Optimierung eines Verfahrens zur Herstellung von Bindemitteln für Holzwerkstoffe auf der Basis von Ligninsulfonat und Laccase. Diss. Schr. Universität Göttingen

- KHARAZIPOUR, A., A. HÜTTERMANN (1993): Enzymatische Behandlung von Holzfasern als Weg zu vollständig bindemittelfreien Holzwerkstoffen. In: HÜTTERMANN, A., A. KHARAZIPOUR (Hrsg.): Schriften an der Forstlichen Fakultät der Universität Göttingen und der Niedersächsischen Forstlichen Versuchsanstalt, Band 113, J. D. Sauerländer's Verlag, Frankfurt am Main, S. 83-98
- KHARAZIPOUR, A. (1996): Enzyme von Weißfäulepilzen als Grundlage für die Herstellung von Bindemitteln für Holzwerkstoffe. Band 121, J. D. Sauerländer's Verlag, Frankfurt am Main
- KHARAZIPOUR, A., A. HAARS (1998): Bindemittel für Holzwerkstoffe auf der Basis von pilzlichen Exopolysacchariden und Lignin. In: KHARAZIPOUR, A., A. POLLE (Hrsg.): Schriften an der Forstlichen Fakultät der Universität Göttingen und der Niedersächsischen Forstlichen Versuchsanstalt, Band 124, J. D. Sauerländer's Verlag, Frankfurt am Main, S. 32-41
- KHARAZIPOUR, A. (2004): Wirtschaftsfaktor Biomasse Holz als Werkstoff. In: C.A.R.M.E.N (Hrsg.): Jahrbuch 2004/2005 Nachwachsende Rohstoffe.
- KINDL, H. (1991): Biochemie der Pflanzen. Springer Lehrbuch. Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York
- KIRCHNER, R., A. KHARAZIPOUR (1999): Herstellung von Laborspanplatten. Vorlesungsskript, Georg-August-Universität Göttingen, S. 1-2
- KIRK, T. K., A. KELMAN (1965): Lignin degradation as related to the phenoloxidases of selected wood-decaying basidiomycetes. *Phytopath.* 55, S. 739-745
- KOENIGS, J. W. (1974 a): Hydrogen peroxide and iron: a proposed system for decomposition of wood by brown rot Basidiomycetes. *Wood Fibre* 6, S. 66-79
- KOENIGS, J. W. (1974 b): Production of hydrogen peroxide by wood-rotting fungi in wood and its correlation with weight loss, Depolymerisation and pH changes, *Arch. Microbiol.* 99, S. 129-145
- KRAMER, H. (1985): Begriffe der Forsteinrichtung. Schriften aus der forstlichen Fakultät der Universität Göttingen und der Nds. forstlichen Versuchsanstalt. Band 48, 88 S., J. D. Sauerländer's Verlag, Frankfurt am Main
- KRUG, D., H. J. SIRCH (1999): Protein als Kleber – Anteilige PF-Harz Substitution möglich. In: *Holz-Zentralblatt* (125), S. 773, DRW-Verlag, Leinfelden-Echterdingen

- KRUG, D. (2001 a): Proteine zur anteiligen Substitution von Phenol-Formaldehyd-Harzen als Bindemittel für die Herstellung von Holzwerkstoffen. In: 4. Holzwerkstoff-Kolloquium „Feuchtebeständigkeit von Holzwerkstoffen“, Dresden, Dezember 2001
- KRUG, D., H. J. SIRCH, J. LANG, W. HEEP, R. HÖPCKE (2001 b): DE 102 53 455 A1
- KRUG, D. (2003): Proteins for the Gluing of Wood-based materials. STICK! 3<sup>rd</sup> European Congress on Adhesive and Sealant Raw Materials, 09.-10.04.2003, Nürnberg, Tagungsband
- KRUG, D., A. WEBER (2005): Untersuchungen zum Einsatz von Proteinen als alternative Bindemittel zur Herstellung ein- oder mehrlagiger Massivholzplatten. Unveröff. Abschlussbericht, IHD Dresden
- KRUG, D., W. HEEP (2006): Proteine als Klebstoffgrundlage. VHI-Workshop „Leimbörse Kassel“, 16. und 17. Januar 2006, Kassel
- KRUSENBAUM, J. (1991): Versuche zur Optimierung eines Substrates auf Basis von Kartoffelpülpe und Kartoffelfruchtwasser für die Anzucht von Pilzen. Als Diplomarbeit der forstwirtschaftlichen Fakultät der Georg-August-Universität Göttingen. 101 S.
- KUO, M., D. ADAMS, D. MYERS, D. CURRY, H. HEEMSTRA, J. L. SMITH, Y. BIAN (1998): Properties of wood/agricultural fibreboard bonded with soybean-based adhesives. In: Forest Products Journal Vol. 48, No. 2, S. 71-75
- LAMPERT, H. (1966): Faserplatten. VEB Fachbuchverlag Leipzig. 453 S.
- LIESE, W. (1963): Phenomena of fracture in wood, *Holzforschung* 17, S. 65-71
- LIESE, W. (1970): Ultra structural aspects of woody tissue disintegration, *Annu. Rev. Phytopath.* 8, S. 231-257
- LIESE, W. (1981): Der Wald als Rohstoffquelle. Schriften aus der Forstlichen Fakultät der Universität Göttingen und der Niedersächsischen Versuchsanstalt. Band 69. Sauerländer's Verlag. Frankfurt/M
- LIIRI, O., SAIRANEN, H., KILPELÄINEN, H. (1982): Bark extractives from spruce as constituents of plywood bonding agents. *Holz als Roh- und Werkstoff* 40, S. 51-60
- LOHMANN, U. (1998): Holzhandbuch, DRW-Verlag, 349 S.
- MARUTZKY, R. (2005): Formaldehyde: Actual Situation and Possible Impact on the Wood-based Panel Industries. In: SASOLWAX (Hrsg.): Holzwerkstoff-Symposium. Dresden-Radebeul. 23. September 2005.

- MAYER, F. (1993): Bestandteile der primären Zellwand als Matrixelement und Bindemittel für Holzwerkstoffe am Beispiel der Kartoffelpülpe. Schriften der Forstlichen Fakultät der Universität Göttingen und der Niedersächsischen Forstlichen Versuchsanstalt. Band 113, J.D. Sauerländer's Verlag Frankfurt am Main, S. 46-54
- MCLAUGHLIN, FARRISAY, A., ALBERINO, L., a. WASZESIAK, D. (1981): Proc. Particleboard Symposium Wash.-State Univ. Pullman 15
- MEIER, H. (1955): Über den Zellwandabbau durch Holzvermorschungspilze und die submikroskopische Struktur von Fichtentracheiden und Birkenholzfasern. Holz als Roh- und Werkstoff 13, S. 323-338
- MOHR, H., P. SCHOPFER (1992): Pflanzenphysiologie. 4. Auflage, Springer-Lehrbuch, Springer Verlag Berlin, Heidelberg, New York, London, Paris, Tokyo, Hong Kong, Barcelona, Budapest
- MÜLLER, C. (2001): Versuche zur Optimierung eines biotechnologischen Verfahrens für die Gewinnung von parenchymatischen Zellwandbestandteilen. Masterarbeit an der Universität Göttingen
- MÜLLER C. (2005): Mechanisch-enzymatischer Aufschluss von Kartoffelpülpe als Bindemittel zur Herstellung von Holzwerkstoffen. Als Dissertation an der forstwissenschaftlichen Fakultät der Georg-August-Universität Göttingen, Onlineveröffentlichung, 166 S.
- MYERS, G. (1987): For. Prod. J. 10 No. 10, p. 63-67
- NETZSCH (1998): Technische Zeichnungen und Angaben zu Rotor-Stator-Pumpen.
- NIELSSON, T. (1973): Studies on wood degradation and cellulotic activity of micro-fungi. Stud. For. Suecica, 104
- NOACK, D. (1963): Eigenschaften des Kern- und Splintholzes der mitteleuropäischen Eiche. Holz als Roh- und Werkstoff, 21, S. 108-121
- NOWAK, A., H. DRACH (1949): Ligninaktivierter Faserstoff. Internationaler Holzmarkt, Wien Nr. 24, S. 12-18
- NUHN, P. (1997): Naturstoffchemie – Mikrobielle, pflanzliche und tierische Naturstoffe. S. Hirzel Verlag, Stuttgart
- OKAMURA, K. (1991): Structure of cellulose. In: Wood and cellulosic chemistry. Ed: HON, D. N. S., N. SHIRAIISHI, Marcel Decker Verlag. New York, Basel, S. 89-112

- PARAMESWARAN, N., E. ROFFAEL (1985): Zum biologischen Abbau von Harnstoffformaldehydharz gebundenen Spanplatten unterschiedlichen Formaldehydgehaltes. WKI Bericht 397
- PEISACH, J., J. AISEN, W. E. BLUMBERG (1966): The Biochemistry of copper. New York and London
- PFLEIDERER HOLZWERKSTOFFE GMBH & CO. KG (2005): Mündliche Mitteilung. Göttingen 2005
- PIZZI, A. (1982): Pine tannin adhesives for particleboard. Holz als Roh- und Werkstoff 40, S 293-301
- PLOMLEY, K. F., W. E. HILLS, K. HIRST (1976): The influence of wood extractives on the glue-wood bond. The effect of kind and amount of commercial tannins and crude wood. Holzforschung 30 (1), S. 14-19
- PRÄVE, P., U. FAUST, W. SITTING, D. A. SUKATSCH (1994): Handbuch der Biotechnologie. R. Oldenbourg Verlag München Wien
- PRATT, J. E. (1979): *Fomes anosus* butt-rot of Sitka Spruce II. Loss of strength of wood in various categories of rot, Forestry 52, S. 31-45
- RAVEN, P. H., R. F. EVERT, S. E. EICHHORN (2000): Biologie der Pflanzen. Walter de Gruyter Verlag, Berlin, New York, S. 608 ff.
- RAYNER, A. D. M., BODDY, L. (1988): Fungal decomposition of wood: its biology and ecology, Wiley, Chichester
- ROFFAEL, E. (1982): Die Formaldehydabgabe von Spanplatten und anderer Werkstoffe. DRW-Verlag, Stuttgart
- ROFFAEL, E., B. DIX (1992): Neuere Entwicklungen bei Holzbindemitteln. In: Adhäsion 36 (5), S. 25-26
- ROFFAEL, E., B. DIX, H. MIERTZSCH, M. SCHEITHAUER, KEHR, E. HOFRICHTER (1993): Feuchtebeständigkeit und Hydrolyseeinsatz von Holz-zu-Holz-Bindungen in Spanplatten, hergestellt mit formaldehydarmen modifizierten Harnstoff-Formaldehyd-Harzen unter Einsatz verschiedener Härtungsbeschleunigersysteme, WKI Mitteilung 570/1993
- ROFFAEL, E., B. DIX (1994): Tannine als Bindemittel für Holzwerkstoffe / von E. Roffael und B. Dix – Braunschweig: Willhelm-Klauditz-Institut, 1994. WKI-Mitteilung, 601

- ROFFAEL, E., B. DIX, T. SCHNEIDER (2001): Zur Verwendung von Tanninen als Bindemittel in der Holzwerkstoffindustrie. Hrsg. Institut für Holzbiologie und Holztechnologie Georg-August-Universität Göttingen
- ROFFAEL, E., M. SCHÄFER (2002): Bedeutung der Extraktstoffe des Holzes in biologischer, chemischer und technologischer Hinsicht, Vorlesungsskript des Institutes für Holzbiologie und Holztechnologie, Georg-August-Universität Göttingen
- ROFFAEL, E., T. SCHNEIDER, B. KÖNIG, C. BEHN (2004): Holzchemie & Holztechnologie, Vorlesungsskript des Institutes Holzbiologie und Holztechnologie, Georg-August-Universität Göttingen
- RÜHL, H. (2002): Proteine im Holzbau. In: BMBF Statusseminare „Integrierter Umweltschutz im Bereich der Holzwirtschaft“, Göttingen im Januar 2002
- SASOL WAX GmbH (2003): EG-Sicherheitsdatenblatt Wachsdispersionen, Sasol Wax GmbH, Worthdamm 13-27, 20457 Hamburg
- SASOL WAX GmbH (2004 a): Produktinformations-Blatt HydroWax 138, Sasol Wax GmbH, Worthdamm 13-27, 20457 Hamburg
- SASOL WAX GmbH (2004 b): Produktinformations-Blatt HydroWax 730, Sasol Wax GmbH, Worthdamm 13-27, 20457 Hamburg
- SAVORY, J. G. (1954): Breakdown of timber by Ascomycetes and Fungi Imperfecti. *Ann. Appl. Biol.* 41, S. 336-347
- SAVORY, J. G., L. C. PINION (1958): Chemical aspects of decay of beech wood by *Chaetomium globosum*. *Holzforsch.* 12, S. 99-103
- SCHACHT, H. (1863): Über die Veränderungen durch Pilze in abgestorbenen Pflanzenzellen, *Jahrbücher für Wissenschaftliche Botanik* 3, S. 442-483
- SCHÖPPER, C. (2002): Entwicklung und Optimierung der Pilot-MDF-Anlage und Herstellung von Mitteldichten Faserplatten unter Verwendung konventioneller Kunstharze und naturnaher Bindemittel aus nachwachsenden Rohstoffen, Masterarbeit an der Georg-August-Universität Göttingen
- SCHÖPPER, C. (2003): Unveröffentlichte Untersuchungsergebnisse.
- SCHÜTT, P., H. J. SCHUCK, B. STIMM (1992): Lexikon der Forstbotanik, Ecomed Verlagsgesellschaft mbh, Landsberg/Lech

- SCHWARZE, F. W. M. R. (1995): Entwicklung und biomechanische Auswirkungen von holzersetzenen Pilzen in lebenden Bäumen und *in vitro*, Dissertation Universität Freiburg, SVK-Verlag, Erndtebrück
- SCHWARZE, F. W. M. R., J. ENGELS (1998): Cavity formation and the exposure of peculiar structures in the secondary wall (S<sub>2</sub>) of tracheids and fibers by wood degrading Basidiomycetes, *Holzforschung* 52, S. 117-123
- SCHWARZE, F. W. M. R., J. ENGELS, C. MATTHECK (1999): Holzersetzenen Pilze in Bäumen / Strategien der Holzersetzenen, Rombach-Verlag
- SCHWARZE, F. W. M. R., S. FINK (1998): Host and cell type affect the mode of degradation by *Meripilus giganteus*, *New Phytol.* 139, S. 721-731
- SEIFERT, K. (1965): Über den Abbau der Holzcellulose durch Organismen. In: Holz und Organismen. Nr. 1. Hrsg. G. BECKER und W. LIESE. Beihefte zur Material und Organismen. Duncker & Humbolt, Berlin
- SEIFERT, K. (1966): Chemical changes in beech wood cell walls by soft-rot (*Chaetomium globosum*). *Holz als Roh- und Werkstoff* 24, S. 185-189
- SHEKHOLESAMI, M. (1986): Untersuchungen zur biologischen Abbaubarkeit von ungeschützten Holzspanplatten durch Weiß- und Braunfäulepilze, Diplomarbeit an der Georg-August-Universität Göttingen
- SIRCH, H. J., E. KEHR (1997): Untersuchungen zur Eignung von Proteinen als Bindemittel für Holzpartikel-Werkstoffe. In: KLEIN, J., R. MARUTZKY (Hrsg.) (1997): Klebstoffe für Holzwerkstoffe und Faserformteile, WKI-Bericht Nr. 32
- SITTE, P., H. ZIEGLER, F. EHRENDORFER, A. BRESINSKY (1998): Strasburger Lehrbuch der Botanik. Gustav Fischer Verlag, Stuttgart, Lübeck, Jena, Ulm
- SUNDIN, E. B., E. ROFFAEL (1989): Einfluss der Alterung auf die Formaldehydemissionen von UF-Spanplatten mit niedrigen Formaldehydabgabepotential. *Holz-Zentralblatt* 115, 47, S. 704
- THOLE, V., R. MARUTZKY (2006): Holzwerkstoffe und Klebstoffe – eine kurze Einführung in das Thema. VHI-Workshop „Leimbörse Kassel“, 16. und 17. Januar 2006, Kassel
- TROJANOWSKI, J., A. HÜTTERMANN, K. HAIDER, J. G. H. WESSELS (1985): Degradation of lignin and lignin related compounds by protoplasts isolated from *Fomes annosus*. *Arch. Microbiol.* 140, S. 326-330



- TROJANOWSKI, J. A. HÜTTERMANN (1987): Screening of wood inhabiting fungi for their capacity to degrade and to solubilize <sup>14</sup>C-labelled lignin. *Microbios* 50, S. 91-97
- TROTHA, VON W. T. (2005): Aufkommen und Verwendung von Sägenebenprodukten. Bachelorarbeit an der forstwirtschaftlichen Fakultät der Georg-August-Universität Göttingen.
- TROY CHEMICAL EUROPE BV (2001): Sicherheitsdatenblatt Mergal S88, Uiverlaan 12e, 3145 XN Maassluis, The Netherlands
- ULRICH, H. D. (2002): *Curr. Top. Microbiol. Immunol.* 268, S. 151
- WAGENFÜHR, R. (1999): *Anatomie des Holzes*. DRW-Verlag Weinbrenner GmbH & Co, Leinfelden-Echterdingen
- WAGNER, B. (1997): Untersuchungen zur Formaldehydabgabe von Holz und mit Aminoplastharz gebundenen Buchensperrholz. Dissertation an der forstwirtschaftlichen Fakultät der Georg-August-Universität Göttingen. S. 7-16
- WANG, S., A. PIZZI (1997): Improving UF plywood adhesives water resistance by co reaction with proteins. In: *Holz als Roh- und Werkstoff* (158), Springer-Verlag, Berlin
- WEAKLEY, F. B., C. L. MEHLRETTNER (1963): Low cost protein glue for southern pine plywood. In: *Forest Products Journal* (1965), S. 8-12
- WEGENER, G. (2004): Holz als Baustoff. In: C.A.R.M.E.N (Hrsg.): *Jahrbuch 2004/2005 Nachwachsende Rohstoffe*. Seite 311-324
- WILCOX, W. W. (1978): Review of literature on the effects of early stages of decay on wood strength, *Wood Fibre* 9, S. 252-257
- WINKELMANN, A. (1997): Herstellung von emissionsarmen Holzwerkstoffen auf der Basis von nachwachsenden Rohstoffen. Dissertation an der forstwirtschaftlichen Fakultät der Georg-August-Universität Göttingen, S. 24
- YOSHIDA, H. (1883): Zur Chemie des Urushi. *Firmess. J. chem. Soc.* 43
- ZEPPENFELD, G. (1991): *Klebstoffe in der Holz- und Möbelindustrie*. Fachbuchverlag-Leipzig, Leipzig

## 8 Anhang

### 8.1 Berechnungen Analytik

#### 8.1.1 Pentosanbestimmung

##### 8.1.1.1 Probeneinwaage

Um den exakten Pentosangehalt der Probe zu ermitteln wird die benötigte Probenmenge in g  $atro$  angegeben. Da das Material jedoch immer Feuchtigkeit enthält, muss die Menge an Feuchtigkeit zu dem  $atro$  Probenwert hinzuaddiert werden. Mit der nachfolgenden Formel wird die Probenmenge in g  $lutro$  errechnet. Die Feuchte der Proben wird wie unter 8.2.2 beschrieben ermittelt.

$$Pr\ obeneinwaage\ lutro\ (g) = Pr\ obe\ atro\ (g) + \left[ \frac{Pr\ obe\ atro\ (g) \times praktische\ Feuchte\ (\%)}{100\ (\%)} \right]$$

##### 8.1.1.2 Pentosangehalt

Die Menge des Pentosans der in Kapitel 3.1.1.3 untersuchten Faserproben lässt sich anhand der folgenden Formel berechnen.

$$x = \frac{33,03 \times (b - a) \times n}{d \times w}$$

Dabei sind:

a = ml Thiosulfatlösung beim Versuch

b = ml Thiosulfatlösung beim Blindversuch

n = Normalität der Thiosulfatlösung

d = 0,878; Destillationsausbeute (empirisch aus vielen Versuchen ermittelter Wert)

w = Probeneinwaage in g  $atro$

x = Pentosangehalt der Probe

## 8.1.2 Ligninbestimmung

### 8.1.2.1 Probeneinwaage

Berechnung der Probeneinwaage für die Ligninbestimmung erfolgt analog zur Ermittlung der Probeneinwaage für die Pentosanbestimmung wie in Kapitel 8.1.1.1 beschrieben.

### 8.1.2.2 Ligningehalt

Die Gesamtmenge an Lignin der untersuchten Probe in g atro wird zunächst mit Hilfe einer Subtraktion errechnet.

$$\text{Ligninmenge (g atro)} = \text{Glastiegel mit Überschuss (g atro)} - \text{Glastiegel alleine (g atro)}$$

Die prozentuale Menge des Lignins (%) bezogen auf die insgesamt eingewogene Probenmenge in g atro wird anschließend mit einem Dreisatz ermittelt.

$$\text{Anteil Lignin (\%)} = \frac{\text{Ligninmenge (g atro)} \times 100 (\%)}{1 (\text{g atro})}$$

## 8.1.3 Ermittlung rheologischer Eigenschaften

### 8.1.3.1 Dynamische Viskosität

Die dynamische Viskosität ( $\eta$ ), d.h. das Verhältnis der Schubspannung ( $\tau$ ) zum Geschwindigkeitsgefälle (D) wird mit Hilfe der folgenden Formel berechnet.

$$\eta = \frac{\tau}{D}$$

Dabei sind:

$\eta$  = Dynamische Viskosität angegeben in mPa·s oder Pa·s

$\tau$  = Schubspannung

D = Geschwindigkeitsgefälle

## 8.1.4 Bestimmung des Stickstoffgehaltes

### 8.1.4.1 Berechnung nach KJELDAHL

Nach der KJELDAHL-Methode lassen sich die Mengen an Stickstoff in festen und flüssigen Proben bestimmen. Dabei kann über den Gesamtstickstoffgehalt mit Hilfe eines Faktors auch der Gesamtproteingehalt der untersuchten Proben bestimmt werden. Beide Formeln, mit denen die Gesamtstickstoff- sowie Gesamtproteingehalte in dieser Dissertation berechnet wurden, sind im Folgenden dargestellt.

Berechnung des *Gesamtstickstoffgehaltes*:

$$\text{Gesamtstickstoffgehalt (\%)} = \frac{(a-b) \times 1,4008}{E}$$

Dabei sind:

a = Verbrauch der Salzsäure-Maßlösung (0,1 mol/l) im Hauptversuch in ml

b = Verbrauch der Salzsäure-Maßlösung (0,1 mol/l) im Blindversuch in ml

E = Probeneinwaage in g

1,4008 = 1 ml Salzsäure-Maßlösung (0,1 mol/l) entsprechen 1,4008 mg Stickstoff

Berechnung des *Gesamtproteingehaltes*:

$$\text{Gesamtproteingehalt (\%)} = \frac{(a-b) \times 1,4008 \times F}{E}$$

Dabei sind:

a = Verbrauch der Salzsäure-Maßlösung (0,1 mol/l) im Hauptversuch in ml

b = Verbrauch der Salzsäure-Maßlösung (0,1 mol/l) im Blindversuch in ml

F = 6,25; Umrechnungsfaktor zur Berechnung des Proteingehaltes

E = Probeneinwaage in g

1,4008 = 1 ml Salzsäure-Maßlösung (0,1 mol/l) entsprechen 1,4008 mg Stickstoff

## 8.2 Berechnungen zur Herstellung von Mitteldichten Faserplatten

### 8.2.1 Volumen und Rohdichte der herzustellenden Mitteldichten Faserplatten

Das Volumen der Mitteldichten Faserplatten errechnet sich aus folgenden Angaben:

- Länge (mm)
- Breite (mm)
- Stärke (mm)

$$\text{Volumen (cm}^3\text{)} = \frac{\text{Länge (mm)} \times \text{Breite (mm)} \times \text{Stärke (mm)}}{1000}$$

Die Rohdichte wird in der Maßeinheit kg/m<sup>3</sup> angegeben und errechnet sich daher aus dem Gewicht (kg) und dem Volumen (m<sup>3</sup>) der herzustellenden Mitteldichten Faserplatten.

$$\text{Rohdichte (kg / m}^3\text{)} = \frac{\text{Gewicht der MDF – Platte (kg)}}{\text{Volumen der MDF – Platte (m}^3\text{)}}$$

### 8.2.2 Unbeleimte Faserfeuchte

Zur Ermittlung der unbeleimten Faserfeuchte werden mindestens drei Proben der unbeleimten Fasern benötigt. Mit Hilfe eines Feuchtemeßgerätes wird die Feuchte der Proben bestimmt. Aus den Ergebnissen errechnet man anschließend den Mittelwert.

$$\text{Durchschnittliche unbeleimte Faserfeuchte (\%)} = \frac{\text{Pr obe}_1 (\%) + \text{Pr obe}_2 (\%) + \dots + \text{Pr obe}_n (\%)}{\text{Anzahl der Proben}_{(n+1)}}$$

### 8.2.3 Fasermenge lutro / atro

Die Berechnung der absolut trockenen Fasermenge aus der lufttrockenen Fasermenge ist wichtig zur Bestimmung der benötigten Leimmenge. Sie berechnet sich aus folgenden Angaben:

- Fasermenge lutro (kg)
- Durchschnittliche unbeleimte Faserfeuchte (%)

$$\text{Fasermenge atro (kg)} = \frac{\text{Fasermenge lutro (kg)} \times \text{durchschnittliche unbeleimte Faserfeuchte (\%)}}{100 (\%)}$$

Das in der Fasermenge lutro (kg) enthaltene Wasser (kg) ist daher:

$$\text{Enthaltenes Wasser (kg)} = \text{Fasermenge lutro (kg)} - \text{Fasermenge atro (kg)}$$

#### 8.2.4 Leimmenge lutro / atro

Um die benötigte Leimmenge lutro (kg) für die eingewogene Fasermenge atro (kg) zu errechnen, benötigt man zuerst die Leimmenge atro (kg). Da alle Leimarten sowohl aus Wasser als auch aus Feststoffen bestehen, ist es für die praktische Arbeit unumgänglich aus der Leimmenge atro (kg) die praktische Leimmenge lutro (kg) zu ermitteln.

$$\text{Leim atro (kg)} = \frac{\text{Fasermenge atro (kg)} \times \text{Beleimung auf atro Faser (\%)}}{100 (\%)}$$

$$\text{Leim lutro (kg)} = \frac{\text{Leim atro (kg)} \times 100 (\%)}{\text{Feststoffgehalt des Leims (\%)}}$$

Das im Leim enthaltene Wasser (kg) berechnet sich dann wie folgt:

$$\text{Im Leim enthaltene } H_2O \text{ (kg)} = \text{Leim lutro (kg)} - \text{Leim atro (kg)}$$

#### 8.2.5 Beleimungszeit / Pumpgeschwindigkeit

Um die Beleimungszeit bzw. die Pumpgeschwindigkeit bei allen durchgeführten Versuchen mit einer Formel errechnen zu können, ist ein konstanter Faserdurchsatz im Mischer eine wichtige Voraussetzung. Dazu wird die Mischerumdrehung und die Streuhöhe der unbeleimten Fasern auf dem Zuführband zum Mischer genau definiert. Mit der verwendeten Mischereinstellung (Poti 4,5) und der Streuhöhe (200 mm) ergibt sich bzgl. des Faserdurchsatzes folgende Vorgabe: In 60 Minuten werden 50 kg Fasermaterial lutro durch den Mischer gefahren.

$$\text{Benötigte Zeit (min)} = \frac{60(\text{min}) \times \text{Fasermenge lutro (kg)}}{50(\text{kg}) \text{ Fasern lutro}}$$

$$\text{Pumpgeschwindigkeit Leim (kg / min)} = \frac{\text{Leim lutro (kg)} \times 1(\text{min})}{\text{Benötigte Zeit (min)}}$$

### 8.2.6 Theoretische Feuchte

Die theoretische Feuchte setzt sich aus der Feuchte der unbeleimten Fasern und der Menge Wasser im hinzugefügten Bindemittel zusammen. Bei einer zu hohen Feuchte ist das beleimte Fasermaterial vor dem Verpressen noch zu trocknen, da sonst bei der Erwärmung zuviel Feuchtigkeit in Form von Dampf entweicht. Dies hat Spalter und Platzer in der Platte zur Folge. Berechnet wird die theoretische Feuchte mit Hilfe der summierten Lutrowerte (kg), bestehend aus lutro Fasern (kg), lutro Bindemittel (kg) und lutro Zusatzstoffe (kg), und den summierten Atrowerten (kg), bestehend aus atro Fasern (kg), atro Bindemittel (kg) und atro Zusatzstoffe (kg).

$$\text{Theoretische Feuchte (\%)} = \frac{\sum \text{Lutro (kg)} - \sum \text{Atro (kg)}}{\sum \text{Atro (kg)}} \times 100 (\%)$$

### 8.2.7 Fasereinwaage / Ausgleichsfeuchte

Bei der Fasereinwaage der Mitteldichten Faserplatten sind zum einen das Volumen (cm<sup>3</sup>) und die Rohdichte (g / cm<sup>3</sup>) der herzustellenden Faserplatten von Bedeutung. Zum anderen haben die beleimte Feuchte der Fasern (%) und die spätere Ausgleichsfeuchte der Faserplatten (%) Einfluss auf die benötigte Menge an Fasermaterial.

Multipliziert man die gewünschte Rohdichte mit dem theoretischen Volumen der Faserplatte, so erhält man die benötigte Fasereinwaage (Fasereinwaage 1). Die beleimte Feuchtigkeit der Fasern wird im nächsten Schritt noch zu der bereits errechneten Fasermenge 1 addiert (Fasereinwaage 2). Da die Feuchtigkeit der Fasern in der Heißpresse verdampft, muss diese in Form von Fasern hinzugerechnet werden um späterer die gewünschte Rohdichte zu erhalten.

Die Ausgleichsfeuchte (%) ist die Menge an Feuchtigkeit, die nach dem Verpressen der Faserplatte noch im Material enthalten sein soll (Fasereinwaage 3). Dadurch soll eine spätere

Feuchtigkeitsaufnahme und auch das damit in Korrelation stehende Quellen und Schwinden der Mitteldichten Faserplatten verhindert werden. Die Ausgleichsfeuchte der in dieser Dissertation hergestellten Mitteldichten Faserplatten liegt bei 7 % bezogen auf die zuvor errechnete Fasermenge (Fasereinwaage 2).

$$Fasereinwaage1(g) = \text{Theoretisches Volumen}(cm^3) \times \text{Sollrohddichte}(g/cm^3)$$

$$Fasereinwaage2(g) = Fasereinwaage1(g) + \left[ \frac{Fasereinwaage1(g) \times \text{theoretische Feuchte}(\%)}{100(\%)} \right]$$

$$Fasereinwaage3(g) = \left[ \frac{Fasereinwaage2(g) \times 100(\%)}{\text{Ausgleichsfeuchte}(107(\%))} \right]$$

### 8.3 Berechnungen zur Ermittlung der mechanisch-technologischen Eigenschaften von Mitteldichten Faserplatten

#### 8.3.1 Berechnung der Dickenquellung nach Wasserlagerung (DIN EN 317)

Die Dickenquellung  $G_t$  jedes Prüfkörpers in Prozent der Anfangsdicke ist nach folgender Formel zu berechnen und auf eine Dezimalstelle anzugeben:

$$G_t = \frac{t_2 - t_1}{t_1} \times 100$$

Dabei sind:

$t_1$  = Dicke des Prüfkörpers vor der Wasserlagerung in mm

$t_2$  = Dicke des Prüfkörpers nach der Wasserlagerung in mm

#### 8.3.2 Berechnung der Zugfestigkeit senkrecht zur Plattenebene (DIN EN 319)

Die Zugfestigkeit senkrecht zur Plattenebene,  $f_t$ , wird anhand folgender Formel berechnet. Dabei wird die Querkzugfestigkeit für jeden Prüfkörper, angegeben in N/mm<sup>2</sup>, auf zwei Dezimalstellen berechnet.

$$f_t = \frac{F_{\max}}{a \times b}$$



Dabei sind:

$F_{\max}$  = Bruchkraft in Newton

a, b = Länge und Breite des Prüfkörpers in mm

### 8.3.3 Berechnung der Rohdichte (DIN EN 323)

Die Rohdichte  $\zeta$  jedes Prüfkörpers, angegeben in  $\text{kg/m}^3$ , ist nach folgender Formel zu berechnen.

$$\zeta = \frac{m}{b_1 \times b_2 \times t} \times 10^6$$

Dabei ist

m = die Masse des Prüfkörpers in g

b1, b2 = die Kantenlängen des Prüfkörpers in Höhe des Diagonalenschnittpunktes, gemessen auf 0,05 mm

t = die Dicke des Prüfkörpers am Schnittpunkt der Diagonalen, gemessen auf 0,1 mm

### 8.3.4 Berechnung der Formaldehydabgabe von Holzwerkstoffen (DIN EN 120)

Die Ermittlung des Perforatorwertes, d.h. der Menge an ungebundenem Formaldehyd (HCHO) die bei einer späteren Lagerung/Verwendung der Holzwerkstoffe als Emission aus der Platte entweicht, erfolgt nach der in Kapitel 3.3.3.1 beschriebenen *Perforator-Methode*.

Die Formaldehydabgabe von unbeschichteten Holzwerkstoffen wird anschließend nach folgender Formel berechnet. Der Perforatorwert wird dabei immer in *mg HCHO/100 g atro Platte* angegeben.

$$P \left[ \frac{\text{mg HCHO}}{100 \text{ g atro Platte}} \right] = \frac{(A_S - A_B) \times f \times (100 + H) \times V}{m_H}$$

Dabei sind:

P = Perforatorwert

$A_S$  = gemessene Extinktion der Probe bei 412 nm

$A_B$  = gemessene Extinktion des Blindversuches bei 412 nm

f = Steigungsfaktor der Kalibrierfunktion in Milligramm pro Milliliter

H = Feuchtegehalt der Probe in Prozent

V = Volumen des Messkolbens (2000 ml)

$m_H$  = Masse des Prüfkörpers in Gramm

## 8.4 Berechnungen Mykologie

### 8.4.1 Zusammensetzung von Nährmedien

#### 8.4.1.1 BSM-Nährmedium

Tabelle 8-1: Zusammensetzung des BSM-Nährmediums

<b>BSM-Nährmedium</b>			
Agar	15,00 g	<b>Stammlösung I</b>	
Glucose	5,00 g	Fe(II)SO <sub>4</sub> x 7 H <sub>2</sub> O	0,20 g
L-Asparagin	0,65 g	Auf 1000 ml mit bidest. H <sub>2</sub> O auffüllen.	
KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>	1,00 g		
MgSO <sub>4</sub> x 7 H <sub>2</sub> O	0,50 g	<b>Stammlösung II</b>	
KCl	0,50 g	Mn(CHCOO) <sub>2</sub> x 4 H <sub>2</sub> O	0,16 g
Hefeextrakt	0,50 g	ZnNO <sub>3</sub> x 4 H <sub>2</sub> O	0,04 g
Stammlösung I	50 ml	Ca(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> x 4 H <sub>2</sub> O	1,00 g
Stammlösung II	50 ml	CuSO <sub>4</sub> x 5 H <sub>2</sub> O	0,06 g
Auf 1000 ml mit bidest. H <sub>2</sub> O auffüllen.		Auf 1000 ml mit bidest. H <sub>2</sub> O auffüllen und einen pH-Wert von 5,5 einstellen	

#### 8.4.1.2 Raulin-Nährmedium

Tabelle 8-2: Zusammensetzung Raulin-Nährmedium

<b>Raulin-Nährmedium</b>	
Agar	15,00 g
Weinsäure	2,65 g
Ammoniumnitrat	2,65 g
Ammoniumphosphat	0,40 g
MgCl <sub>2</sub>	0,26 g
Ammoniumsulfat	0,16 g

ZnSO <sub>4</sub> x 7 H <sub>2</sub> O	0,045 g
FeSO <sub>4</sub> x 7 H <sub>2</sub> O	0,045 g
Kaliumcarbonat	0,40 g
Glucose	33,40 g

---

Auf 1000 ml mit bidest. H<sub>2</sub>O auffüllen und einen pH-Wert von 5,5 einstellen.

#### 8.4.1.3 MYA-Nährmedium

**Tabelle 8-3: Zusammensetzung MYA-Nährmedium**

---

<b>MYA-Nährmedium</b>	
Agar	15,00 g
Glucose	4,00 g
Malzextrakt	10,00 g
Hefeextrakt	4,00 g

---

Auf 1000 ml mit bidest. H<sub>2</sub>O auffüllen.

#### 8.4.1.4 MPA-Nährmedium

**Tabelle 8-4: Zusammensetzung MPA-Nährmedium**

---

<b>MPA-Nährmedium</b>	
Agar	15,00 g
Malzextrakt	20,00 g
Pepton	5,00 g

---

Auf 1000 ml mit bidest. H<sub>2</sub>O auffüllen.

**Eidesstattliche Erklärung**

Hiermit versichere ich gemäß § 4 (2e) der Promotionsordnung des Fachbereichs für Forstwissenschaften und Waldökologie der Georg-August-Universität Göttingen vom 08.01.1986, das ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst habe und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe.

(Christian Schöpfer)

**Curriculum vitae**

Name	Schöpfer
Vornamen	<u>Christian</u> , Holger
Geburtstag	12.11.1974
Geburtsort	Coesfeld, Nordrhein-Westfalen
Adresse	Burgstrasse 10-12 37120 Bovenden
Familienstand	Verheiratet
Staatsangehörigkeit	Deutsch
<b>Schulausbildung</b>	1981 – 1985 Grundschule in Coesfeld 1985 – 1995 Gymnasium Nepomucenum, Coesfeld Abschluss: Abitur
<b>Militärdienst</b>	1995 – 1996 Grundwehrdienst im Fernmeldewesen
<b>Studium</b>	1996 – 2002 Studium der Forstwissenschaften und Waldökologie an der Georg-August-Universität Göttingen  „Forstwissenschaften und Waldökologie“ Abschluss: Bachelor of Science „Holzbiologie & Holztechnologie“ Abschluss: Master of Science
<b>Dissertation</b>	2002 – 2006 <i>„Entwicklung eines naturnahen Bindemittels aus nachwachsenden Rohstoffen auf Proteinbasis zur Herstellung von Mitteldichten Faserplatten (MDF)“</i>
<b>Sprachkenntnisse</b>	Englisch in Wort und Schrift
<b>EDV-Kenntnisse</b>	Sicherer Umgang mit den Programmen MICROSOFT WORD, EXCEL, ACCESS und POWERPOINT