

**Verwendung von biotechnologisch durch den
Rotfäulepilz *Heterobasidion annosum in vivo*
degradiertem Fichtenholz als Rohstoff für die
Herstellung von Holzwerkstoffen**

Dissertation

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

vorgelegt von

CHRISTIAN BOHN

geboren in Stendal / Sachsen-Anhalt

Göttingen im April 2009

Themenbearbeitung am Büsgen-Institut
Abteilung Molekulare Holzbiotechnologie und Technische Mykologie
der Georg-August-Universität Göttingen

1. Berichtstatter: Prof. Dr. A. KHARAZIPOUR

2. Berichtstatter: Prof. Dr. E. ROFFAEL

Tag der mündlichen Prüfung: 21.08.2009

VORWORT

Die vorliegende Arbeit wurde am BÜSGEN-INSTITUT der GEORG-AUGUST-UNIVERSITÄT Göttingen in Zusammenarbeit mit der PFLEIDERER HOLZWERKSTOFFE GMBH & Co. KG Neumarkt, unter Leitung von Herrn Prof. Dr. A. Kharazipour erstellt. Die Koordination dieses Verbundprojektes oblag dem NIEDERSÄCHSISCHEN KOMPETENZNETZ FÜR NACHHALTIGE HOLZNUTZUNG e. V. Göttingen. Finanziell unterstützt wurde die Durchführung dieses Vorhabens durch das BUNDESMINISTERIUM FÜR ERNÄHRUNG, LANDWIRTSCHAFT UND VERBRAUCHERSCHUTZ (BMELV) über die FACHAGENTUR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE (FNR) Gülzow. Weiterhin waren die NORDWESTDEUTSCHE FORSTLICHE VERSUCHSANSTALT Göttingen und das WILHELM KLAUDITZ INSTITUT FÜR HOLZFORSCHUNG (WKI) Braunschweig an diesem Teilprojekt beteiligt.

An erster Stelle bedanke ich mich bei meinem Doktorvater, Herrn Prof. Dr. A. Kharazipour für die Themenvergabe und die Unterstützung in fast jeder Lebenslage. Er hatte sowohl für fachliche Fragestellungen, als auch für ein persönliches Gespräch stets ein offenes Ohr und motivierte mich stets aufs Neue.

Bei den Mitarbeitern des ehemaligen Institutes für Forstbotanik möchte ich mich für jegliche Unterstützung bedanken. Besonders zu erwähnen sind hier die Angehörigen meiner Arbeitsgruppe – Cora Müller, Christian Schöpfer, Kai Ludwig, Hubert Vos, Lars Kloeser, Michael Bartholme, Markus Euring, Georg Geigl und Michael Reichel – die mir jeder Zeit mit Rat und Tat zur Seite standen.

Weiterhin gilt mein Dank Herrn Prof. Dr. E. Roffael, dass er sich dazu bereit erklärt hat dieses Werk als zweiter Gutachter zu beurteilen.

Natürlich bedanke ich mich auch besonders bei meinen Eltern, die es mir ermöglichten diesen Weg einzuschlagen und bei meinen Freunden. Hier möchte ich Burkhard Rütther erwähnen, der mir nicht nur als ehemaliger Koordinator des NHN stets zur Seite stand, sondern mich immer wieder motiviert und gelegentlich auf den Boden der Tatsachen zurück geholt hat.

INHALTSVERZEICHNIS

1	Einleitung	1
1.1	Gemeine Fichte (<i>Picea abies</i> (L.)).....	2
1.2	Holzwerkstoffe	2
1.3	Ziel der Arbeit.....	6
2	Allgemeiner Teil	8
2.1	Die Gemeine Fichte (<i>Picea abies</i> (L.) Karst.).....	8
2.2	Der Wurzelschwamm (<i>Heterobasidion annosum</i> (Fr.) Bref.)	11
2.3	Holz	16
2.3.1	<i>Anatomischer Aufbau des Holzes</i>	17
2.3.1.1	Gefäßzellen	19
2.3.1.2	Sklerenchymzellen	19
2.3.1.3	Parenchymzellen.....	19
2.3.2	<i>Chemische Bestandteile des Holzes</i>	20
2.3.2.1	Cellulose	20
2.3.2.2	Hemicellulose	21
2.3.2.3	Lignin.....	22
2.3.3	<i>Aufbau der verholzten Zellwand</i>	23
2.4	Delignifizierung der verholzten Zellwand durch Fäulepilze	26
2.5	Spanplattenproduktion.....	29
2.5.1	<i>Rohstofflagerung</i>	31
2.5.2	<i>Zerspanung des Holzes</i>	31
2.5.3	<i>Trocknung des Spanmaterials</i>	32
2.5.4	<i>Siebung und Sichtung des Spanmaterials</i>	32
2.5.5	<i>Beleimung der Späne</i>	32
2.5.6	<i>Streuung und Formgebung</i>	33
2.5.7	<i>Verpressung</i>	34
2.5.8	<i>Endfertigung</i>	34
2.6	Faserplattenproduktion.....	35
2.6.1	<i>Aufschlussverfahren von Holz zur Faserstoffherstellung</i>	37
2.6.2	<i>Nassverfahren</i>	38
2.6.3	<i>Trockenverfahren</i>	38
2.6.4	<i>Halbtrockenverfahren</i>	39
3	Material und Methoden.....	40
3.1	Ausgangsmaterial.....	40
3.1.1	<i>Spanmaterial</i>	41
3.1.2	<i>Fasermaterial</i>	44
3.1.3	<i>Bindemittel</i>	45
3.1.4	<i>Hilfs- und Zuschlagstoffe</i>	46
3.2	Technische Geräte zur Spanplattenherstellung im Labormaßstab.....	46
3.2.1	<i>Beleimungstrommeln</i>	46
3.2.2	<i>Beleimungspistole</i>	46
3.2.3	<i>Laborheißpresse</i>	47
3.3	Technische Geräte zur Spanplattenherstellung im Pilotmaßstab	47

3.3.1 Mischerzuführband	47
3.3.2 Beleimungsmischer	47
3.3.3 Leimpumpe	48
3.3.4 Zuführbandsystem	48
3.3.5 Mittelschichtspanbunker mit Streueinrichtung.....	49
3.3.6 Deckschichtspanbunker mit Streukopf.....	49
3.3.7 Formband	49
3.4 Technische Geräte zur Faserplattenherstellung	50
3.4.1 Muldengurtförderer	50
3.4.2 Mischer	50
3.4.3 Leimpumpe	51
3.4.4 Rohrtrockner	51
3.4.5 Hochleistungszyklon	51
3.4.6 Speicher- und Zuführband	51
3.4.7 Dosierbunker mit Rückstreifrechen.....	52
3.4.8 Faserstreukopf.....	52
3.4.9 Formband	53
3.5 Analytische Geräte	53
3.5.1 pH-Meter.....	53
3.5.2 Feuchtemessgerät	53
3.5.3 Rohdichteprofilmessgerät DA-X.....	53
3.5.4 Kjeldahl - Apparatur	54
3.5.5 Rasterelektronenmikroskop (REM).....	54
3.6 Analytische Untersuchungen	54
3.6.1 Ligninbestimmung.....	54
3.6.2 Bestimmung des Pentosangehaltes nach DIN 54 361.....	55
3.6.3 Aschegehalt.....	56
3.6.4 Kaltwasserextraktion.....	56
3.6.5 Heißwasserextraktion	57
3.6.6 Ethanol-Cyclohexan-Extraktion.....	57
3.6.7 Ermittlung des Stickstoffgehaltes nach Kjeldahl (DIN EN 25 663)	58
3.6.8 Siebanalyse nach DIN 66 165	59
3.6.9 Bestimmung des Schüttgewichtes nach DIN EN 12 580	60
3.7 Rasterelektronenmikroskopische Untersuchungen von rotfaulem Fichtenholz	60
3.8 Spanplattenherstellung im Labormaßstab	60
3.8.1 Herstellungsparameter von Laborspanplatten aus rotfaulem Spangut	61
3.8.2 Herstellungsparameter für Spanplatten aus Industriespänen	63
3.9 Herstellung von maschinengestreuten Spanplatten im Pilotmaßstab.....	64
3.9.1 Herstellungsparameter maschinengestreuter Spanplatten aus rotfaulem Spangut	66
3.9.2 Herstellungsparameter von Pilotspanplatten aus industriell aufbereitetem Spanmaterial	67
3.10 MDF-Herstellung im Labor- und Pilotmaßstab	68
3.10.1 Herstellungsparameter der Faserplatten aus rotfaulen Fasern.....	69
3.10.2 Herstellungsparameter der Faserplatten aus STEICO – Fasern	71
3.11 Bestimmung der Materialeigenschaften von Holzwerkstoffen	73
3.11.1 Probeentnahmen, Zuschnitt und Überwachung.....	73

3.11.2	<i>Bestimmung der Rohdichte</i>	74
3.11.3	<i>Bestimmung des Rohdichteprofiles mit dem Labor-Dichteprofilmessgerät DA-X</i>	75
3.11.4	<i>Bestimmung der Dickenquellung nach Wasserlagerung</i>	75
3.11.5	<i>Bestimmung der Querkzugfestigkeit</i>	76
3.11.6	<i>Bestimmung der Abhebefestigkeit</i>	76
3.11.7	<i>Bestimmung des Feuchtegehaltes</i>	76
3.11.8	<i>Bestimmung von Biegefestigkeit und Biege-Elastizitätsmodul</i>	77
3.11.9	<i>Bestimmung der Formaldehydabgabe nach der Perforator-Methode</i>	78
3.11.10	<i>Anforderungen an Spanplatten</i>	80
3.11.11	<i>Anforderungen an Faserplatten nach dem Trockenverfahren</i>	81
3.12	Versuch zur Erhöhung der Wertschöpfung von rotfaulem Holz	82
4	Ergebnisse und Diskussion	83
4.1	Analytische Untersuchungen	83
4.1.1	<i>Ligninbestimmung</i>	83
4.1.2	<i>Hemicellulosegehalt (Pentosangehalt)</i>	85
4.1.3	<i>Aschegehalt</i>	86
4.1.4	<i>Extraktion von gesundem und mit <i>H. annosum</i> befallendem Fichtenholz</i>	87
4.1.4.1	<i>Extraktstoffgehalt nach Kaltwasserextraktion</i>	87
4.1.4.2	<i>Extraktstoffgehalt nach Heißwasserextraktion</i>	90
4.1.4.3	<i>Extraktstoffbestimmung mit Ethanol-Cyclohexan</i>	93
4.1.5	<i>Stickstoffbestimmung nach der Kjeldahl-Methode (DIN EN 25 663)</i>	94
4.1.6	<i>Energieverbrauch</i>	94
4.1.7	<i>Siebanalysen</i>	95
4.1.7.1	<i>Siebanalyse der rotfaulen Fichtenholzspäne</i>	95
4.1.7.2	<i>Siebanalyse der Industriespäne</i>	96
4.1.8	<i>Schüttdichte nach DIN EN 12 580</i>	97
4.1.9	<i>Bestimmung der pH-Werte</i>	98
4.2	Mechanisch-technologische Eigenschaften von Laborspanplatten	98
4.2.1	<i>Dreischichtige Spanplatten aus rotfaulem Fichtenholz</i>	98
4.2.2	<i>Dreischichtige Spanplatten aus Industriespänen</i>	102
4.2.3	<i>Querkzug-, Abhebe- und Biegefestigkeit</i>	104
4.2.4	<i>Dickenquellung</i>	111
4.3	Mechanisch-technologische Eigenschaften der Pilotspanplatten	115
4.3.1	<i>UF-Harz gebundene Spanplatten aus rotfauler Fichte und Industriespan</i>	115
4.3.2	<i>MUF-Harz gebundene Spanplatten aus rotfauler Fichte und Industriespangut</i>	119
4.3.3	<i>UF-Harz/Weizenquellwasser-Mischkondensat gebundene Pilotspanplatten aus rotfauler Fichte</i>	121
4.4	Mechanisch-technologische Eigenschaften von MDF-Platten	124
4.4.1	<i>Mitteldichte Faserplatten aus rotfaulem Fichtenholz</i>	124
4.4.2	<i>Mitteldichte Faserplatten aus Referenzfasern der Fa. STEICO</i>	125
4.4.3	<i>Querkzugfestigkeit</i>	126
4.4.4	<i>Quellung</i>	128
4.4.5	<i>MDF aus rotfaulem Fichtenholz unter Variation des Beleimgrades</i>	129
4.4.6	<i>Presszeitfaktoren</i>	133
4.4.7	<i>Beleimgrad</i>	135
4.4.8	<i>MUF-Harz gebundene MDF aus rotfaulem Fichtenholz</i>	136
4.4.9	<i>PF-Harz gebundene MDF aus rotfaulem Fichtenholz</i>	139

4.4.10 MDF aus rotfaulem Fichtenholz verleimt mit einem Mischkondensat aus UF- Harz und Weizenquellwasser.....	140
4.5 Rasterelektronenmikroskopische Untersuchung von rotfaulem Fichtenholz	143
4.6 Betriebsversuch zur Erhöhung der Wertschöpfung von rotfaulem Holz	146
5 Zusammenfassung	148
6 Ausblick.....	153
7 Literaturverzeichnis.....	154
8 Abkürzungsverzeichnis	166
9 Tabellenverzeichnis.....	168
10 Abbildungsverzeichnis	170
11 Bildverzeichnis	173
12 Anhang	174
12.1 Parameter für die Herstellung von Laborspanplatten.....	174
12.1.1 Theoretische Plattenmaße.....	174
12.1.2 Unbeleimte Feuchte.....	174
12.1.3 Berechnung der Bindemittelzusammensetzung.....	174
12.1.4 Beleimte Feuchte.....	176
12.1.5 Spaneinwaage und Ausgleichsfeuchte	176
12.2 Berechnungen für die Herstellung von Spanplatten im Pilotmaßstab..	177
12.2.1 Beleimungszeit / Pumpgeschwindigkeit.....	177
12.2.2 Formbandgeschwindigkeit / Spankuchengewicht	177
12.3 Berechnungen für die Herstellung von mitteldichten Faserplatten.....	178
12.3.1 Theoretische Plattenmaße.....	178
12.3.2 Unbeleimte Feuchte.....	179
12.3.3 Fasermenge lutro / atro	179
12.3.4 Benötigte Leimmenge atro / lutro.....	179
12.3.5 Beleimungszeit / Pumpgeschwindigkeit.....	180
12.3.6 Theoretische Feuchte	180
12.3.7 Fasereinwaage und Ausgleichsfeuchte	180

1 Einleitung

Von Deutschland sind etwa 11,1 Millionen ha mit Wald bedeckt, das sind ca. 30 Prozent der Gesamtfläche. Davon werden 9 Millionen Hektar durch etwa 28.000 Forstbetriebe und 1,5 Millionen Hektar durch etwa 230.000 landwirtschaftliche Betriebe bewirtschaftet (BMELV, 2007). Bei der Holzernte in Europa nimmt Deutschland die Spitzenposition ein. Rund 20 Prozent der EU-weit eingeschlagenen Holzmenge kam im Jahr 2007 aus deutschen Wäldern. Im Jahr 2007 wurden in den 27 Mitgliedsländern der Europäischen Union nach vorläufigen Angaben rund 382 Millionen Festmeter Holz eingeschlagen (ZMP, 2008). Das Volumen des Rundholzeinschlages steigerte sich damit um 11 Prozent gegenüber dem Vorjahr. Die deutliche Zunahme ist eine Folge des Orkans „Kyrill“, der im Januar 2007 über weite Teile Europas zog und insgesamt rund 65 Millionen Festmeter Sturmholz verursachte. Da dieser riesige Holzanfall zu Beginn des Jahres anfiel, konnte die Forstwirtschaft bei der Planung der Holzernte reagieren. In vielen Regionen wurde für den Rest des Jahres der Frischholzeinschlag eingestellt oder zumindest drastisch reduziert. Die Abbildung 1 - 1 verdeutlicht den Anstieg des Holzeinschlages in den letzten 10 Jahren. Auffällig hierbei ist der überdimensionale Anstieg der Einschlagstätigkeit im Privatwald.

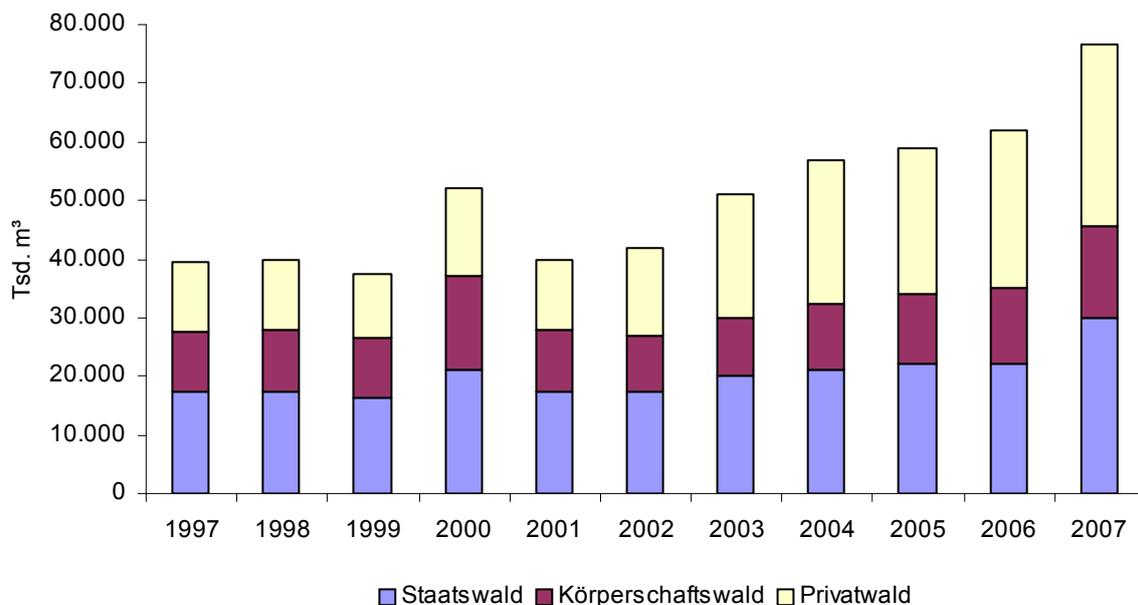


Abbildung 1 - 1: Holzeinschlag in Deutschland von 1997 bis 2007 nach Waldbesitzarten (ZMP, 2008)

1.1 Gemeine Fichte (*Picea abies* (L.))

Die Gemeine Fichte *Picea abies* (L.) ist die wirtschaftlich bedeutsamste Baumart der deutschen Forstwirtschaft. Sie wird aus diesem Grund auch häufig als „Brotbaum“ bezeichnet. Etwa 32 % der Waldfläche Deutschlands sind mit Fichte bestockt (BMELV, 2007). Davon sind ca. 25 % vom Weißfäulepilz *Heterobasidion annosum* befallen (DIMITRI & TOMICZEK, 1998). Seit langem beobachtet man mit Sorge, dass dem jährlichen Zuwachs an Holz ein nicht unbeträchtlicher Holzverlust durch Rotfäule, ausgelöst von *Heterobasidion annosum*, gegenübersteht. KATÓ (1969) ermittelte in den staatlichen Forstämtern Niedersachsens einen Massenanteil von 20,1 % an rotfaulem Holz an der eingeschlagenen Fichtenholzgesamtmasse. Wenn man davon ausgeht, dass 20 % der Holzmasse durch den Holzabbau entwertet sind, fallen bei einem Einschlag von 18,5 Mio. m³/a jährlich ca. 3,7 Mio. m³ rotfaules Fichtenholz an. KATÓ (1969) bezifferte den jährlichen Schaden in den niedersächsischen Landesforsten durch Stammfäulen auf rund 2,7 Mio. Euro. Die wirtschaftlichen Verluste ergeben sich vor allem aus der Notwendigkeit einer frühzeitigen Nutzung, aus der Herabsetzung der Holzqualität sowie durch die zusätzlichen Kosten für die Aufarbeitung von geschädigtem Holz (METZLER ET AL., 2005).

Noch vor wenigen Jahren gab es für den Rohstoff „rotfaules Fichtenholz“ keinerlei Verwendungsmöglichkeiten die eine rentable wertschöpfende Nutzung dieses Holzes ermöglichten. Somit verblieb dieses Material zum Großteil ungenutzt im Wald. Aktuell wird rotfaules Fichtenholz aus Gründen der Holzknappheit in größeren Mengen zur Herstellung von Zellstoffen eingesetzt. Angesichts des für die nächsten Jahrzehnte prognostizierten Industrieholzmangels könnte dieses Holz erheblich an Bedeutung gewinnen, wenn für dieses Holzsortiment weitere Verwendungsmöglichkeiten gefunden würden. Dadurch könnte u. a. für die Holzwerkstoffindustrie eine weitere Rohstoffquelle erschlossen werden.

1.2 Holzwerkstoffe

Die Herstellung von Holzwerkstoffen basiert stets auf den gleichen Prozessschritten. Im ersten Schritt wird natives Holz in kleine Partikel, wie Fasern, Späne, Strands oder Furniere zerkleinert. Diese Holzpartikel werden mit Bindemitteln beaufschlagt

und unter Druck und Temperatur zu Holzwerkstoffen geformt (MALONEY, 1993). Die wichtigsten Holzwerkstoffe sind, je nach Herstellungsverfahren und Größe der verwendeten Holzpartikel:

- Spanplatten und Spanformteile
- Mitteldichte Faserplatten
- OSB-Platten
- Sperrholz und Sperrformteile

Aktuell werden bei der Holzwerkstoffproduktion fast ausschließlich synthetische Bindemittel wie Harnstoff-Formaldehydharze, Phenol-Formaldehydharze oder organische Isocyanate verwendet. Jedoch gibt es Bestrebungen diese synthetischen Leimsysteme durch natürliche oder naturnahe Bindemittel zu ersetzen (KHARAZIPOUR & HÜTTERMANN, 1992, 1998; PIZZI, 2000, 2006; MÜLLER, 2005; SCHÖPPER, 2006). Eine andere umweltfreundliche Möglichkeit zur MDF-Herstellung besteht in der enzymatischen Aktivierung natürlicher, holzeigender Bindekräfte (KHARAZIPOUR, 1996; KHARAZIPOUR ET AL., 1998; HÜTTERMANN ET AL., 2001; MAI ET AL., 2004; EURING & KHARAZIPOUR, 2007).

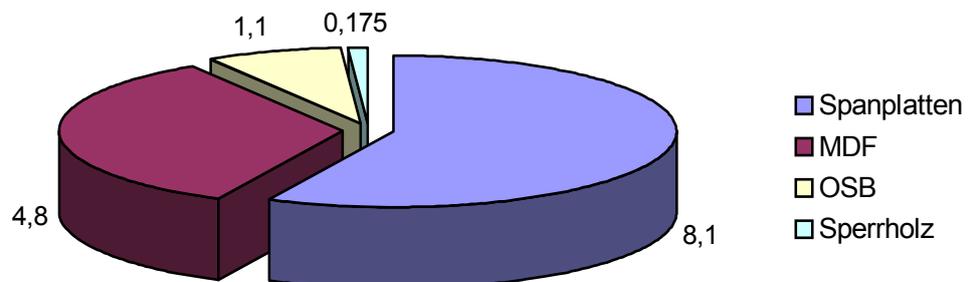


Abbildung 1-2: Holzwerkstoffproduktion in Deutschland 2007 in Mio. m³ (VHI, 2008)

Holzwerkstoffe sind in Deutschland heute nach der Sägeholzproduktion das zweitwichtigste Segment der Rohholznutzung (MARUTZKY, 2004). In Deutschland wurden im Jahr 2007 etwa 23,8 % der 62,4 Mio. m³ in Europa hergestellten Holzwerkstoffe produziert (VHI, 2008). Bei Betrachtung der Produktionsmengen von Holzwerkstoffen in Deutschland (Abbildung 1-2) fällt auf, dass die

Spanplattenindustrie mit 8,1 Mio. m³ produzierten Holzwerkstoffen (57,1 %) und die Faserplattenindustrie mit 4,8 Mio. m³ hergestellten Faserplatten (33,8 %) das größte Produktionsvolumen auf dem Gebiet der Holzwerkstoffe besitzen. Die vielfältigen Einsatzgebiete von Span- und Faserplatten im Baugewerbe und der Möbelindustrie deuten auf eine weitere Produktionssteigerung in den kommenden Jahren hin (VHI, 2008).

Durch den Prozess der Zerkleinerung und des Zusammenfügens der Holzpartikel können diverse Eigenschaften des Holzes wesentlich verbessert werden. Bei der Herstellung von Span- und MDF-Platten geht z. B. die Anisotropie des Holzes weitestgehend verloren. Im Vergleich zum Holz können Holzwerkstoffe in nahezu beliebiger Dimension hergestellt werden. Diesen positiven Auswirkungen stehen jedoch auch Nachteile gegenüber. Diese sind im Wesentlichen der höhere Energieeinsatz bei der Zerkleinerung des Holzes bzw. des Holzaufschlusses und die Verwendung von Kunstharzen bei der Herstellung von Holzwerkstoffen sowie der im Allgemeinen deutlich höheren Umweltbelastung durch die Holzwerkstoffproduktion.

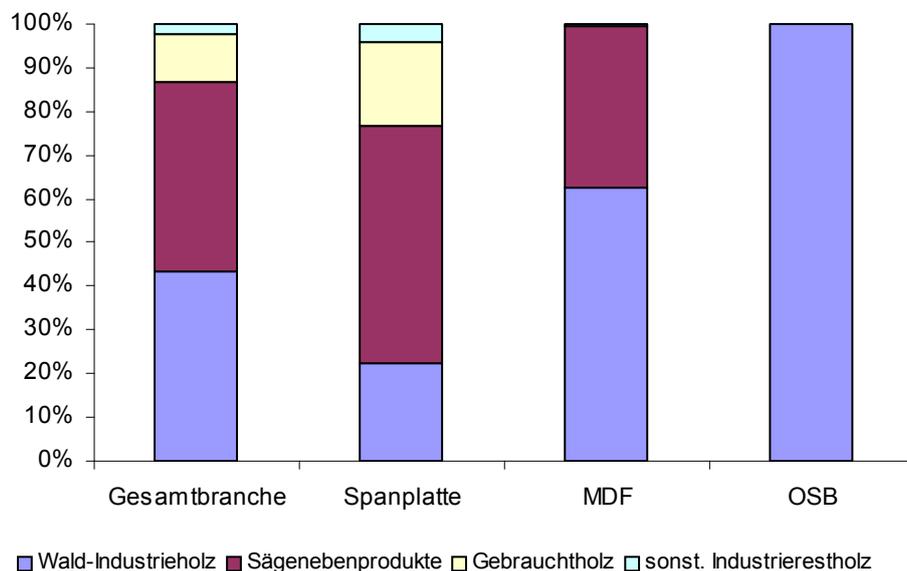


Abbildung 1-3: Rohstoffzusammensetzung in der deutschen Holzwerkstoffindustrie (SÖRGEL & MANTAU, 2006)

Der Rohstoffeinsatz für die Herstellung von Holzwerkstoffen, insbesondere der von Spanplatten, hat sich im Laufe der Zeit erheblich verändert (s. Abbildung 1-3). Während zum Anfang der Spanplattenherstellung hauptsächlich Rundholz verarbeitet wurde, nahm der Einsatz von Industrierestholz, das als Nebenprodukt in

der Sägeindustrie anfällt, im Laufe der letzten Jahrzehnte ständig zu (MARUTZKY, 1999). In den letzten Jahren nahm, insbesondere aus Gründen des Umweltschutzes und der Recourcenschonung, die Nutzung von Gebrauchtholz in der Holzwerkstoffindustrie zu (MANTAU ET AL., 2003). Beispielsweise weist die Studie von MANTAU & BILITEWSKI (2005) für Deutschland im Jahr 2002 bereits ein Altholzaufkommen von 11,2 Mio. t aus. Es ist damit zu rechnen, dass die Nutzung von Gebrauchtholz auch künftig an Bedeutung gewinnt, angesichts des anhaltenden Bestrebens neue Biomasse-Kraftwerke in Deutschland zu bauen, die u. a. auf den Rohstoff Industrieholz zurückgreifen und die Holzwerkstoffindustrie vor mögliche Rohstoffengpässe stellen könnte.

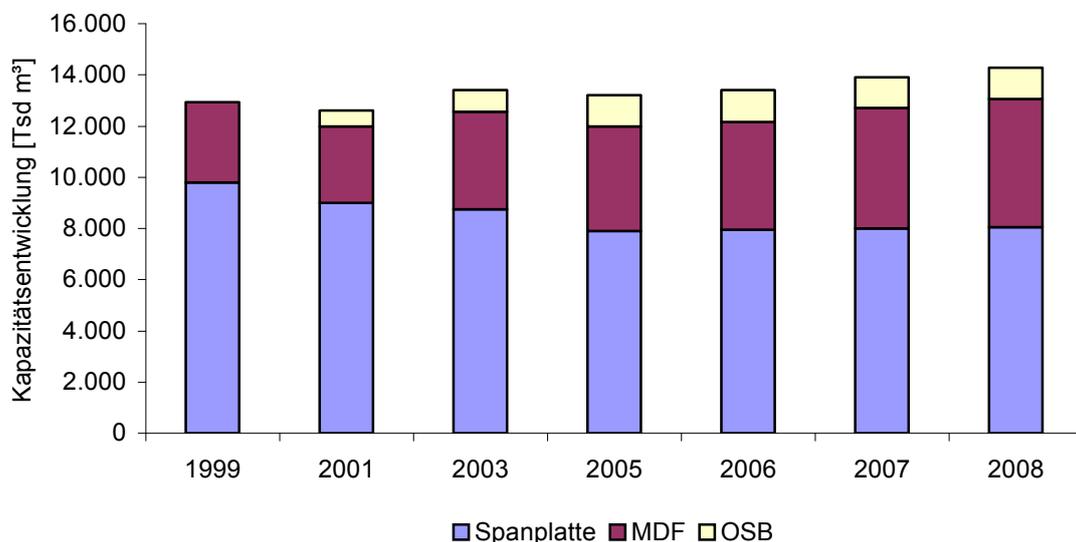


Abbildung 1-4: Kapazitätsentwicklung und Planungen der deutschen Holzwerkstoffbranche (SÖRGEL & MANTAU, 2006)

Im Vergleich zu 1999 hat sich die Kapazität der Spanplattenindustrie 2001 um 761.000 m³ verringert. Im Jahr 2002 kam es zu einem weiteren leichten Abbau der Kapazität, allerdings ist langfristig eine Ausweitung um etwa 10 % geplant (Abbildung 1-4). SÖRGEL & MANTAU (2006) bezifferten die Kapazitätsauslastung der deutschen Spanplattenindustrie mit 95 %.

Die Abbildung 1-5 zeigt die Anwendungsbereiche für Spanplatten in Deutschland. Auffällig ist, dass ca. 77,6 % der produzierten Spanplatten für die Möbelherstellung genutzt werden. Der zweitgrößte Anwendungsbereich mit 19,5 %

ist die Baubranche. Der Bereich „Sonstige“ mit 1,5 % Marktanteil deckt den Fahrzeug-, Waggon- und Schiffsbau ab.

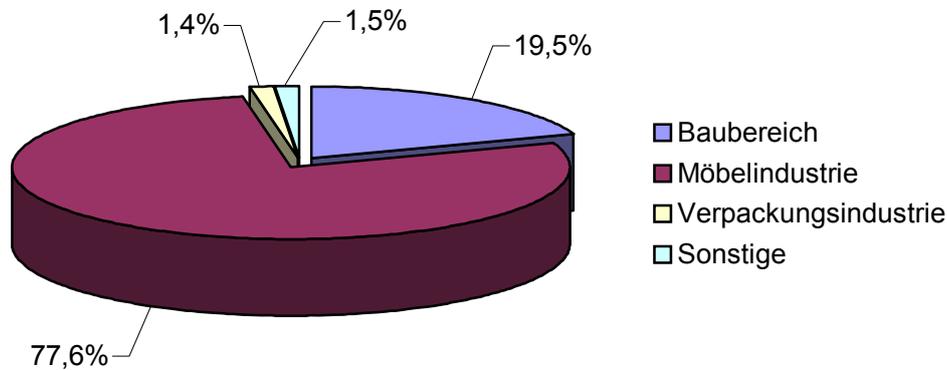


Abbildung 1-5: Schätzung der Verwendung von Spanplatten nach Bereichen (Rüter & Kreißig, 2007)

Da die Möbelindustrie mehr als drei viertel des Marktes ausmacht, ist es sinnvoll für diesen Markt neue hochwertige Holzwerkstoffe zu entwickeln, die sich durch ihre Eigenschaften besonders für diesen Verwendungszweck eignen. Besonders praktisch wären z. B. Spanplatten mit einer verringerten Rohdichte. Dadurch würde sich das Gewicht der Möbel deutlich verringern. Durch eine relativ hohe Abhebefestigkeit oder eine besonders helle Oberfläche würde sich die Beschichtung mit dünnen Melaminpapieren erheblich erleichtern, da der Untergrund nicht so leicht durchscheint und Steck- und Schraubverbindungen nicht so leicht ausreißen.

1.3 Ziel der Arbeit

Das Hauptziel der vorliegenden Arbeit ist es, aus rotfaulem Fichtenholz hochwertige Span- und Faserplatten herzustellen, um für diesen zurzeit unverkäuflichen Rohstoff eine rentable Wertschöpfung zu erzielen. Dabei soll untersucht werden, inwieweit ein Einsatz des *in vivo* biotechnologisch transformierten rotfaulen Fichtenholzes möglich ist. Im Einzelfall sollen folgende Ziele verfolgt werden:

- Eine in der Natur stattfindende Biokonversion von nachwachsenden Rohstoffen soll zur Herstellung von hochwertigen Produkten genutzt werden.

- Es soll gezeigt werden, dass die Zerfaserung bzw. die Zerspannung dieses Materials mit einem erheblich reduzierten Einsatz von Energie möglich ist, da durch den Pilzbefall der Faserverbund schon frühzeitig stark gelockert wurde. Dies führt zu einer Einsparung an elektrischer Energie bei der Zerspannung und Zerfaserung.
- Die Faser- und Spanplatten aus rotfaulem Fichtenholz sollen gleiche mechanisch-technologische Festigkeiten aufweisen wie die Vergleichsplatten.
- Bei höheren Festigkeiten sollte eine Reduktion des Bindemittelanteils möglich sein.
- Die Rohdichten der hergestellten Holzwerkstoffe sollen bis auf 500 kg/m^3 abgesenkt werden.
- Die hergestellten Spanplatten und MDF-Platten sollen die durch die EN- und DIN-Normen geforderten Festigkeitswerte erfüllen.

2 Allgemeiner Teil

2.1 Die Gemeine Fichte (*Picea abies* (L.) Karst.)

Fichten (*Picea*) sind eine Gattung von Nadelbäumen in der Familie der Kieferngewächse (*Pinaceae*) mit ca. 50 immergrünen Arten, die zumeist in den gemäßigten Zonen Ost-Asiens und Nord-Amerikas beheimatet sind. Die einzige in Mitteleuropa heimische Art ist die Gemeine Fichte (*Picea abies*), die wegen ihrer schuppigen, rotbraunen Rinde fälschlich auch als „Rottanne“ bezeichnet wird. Fichten sind immergrüne und einstämmige Bäume. Sie werden in der Regel 20 bis 60 Meter hoch. Die Krone ist kegelförmig bis walzenähnlich. Der Stammdurchmesser beträgt bis einen Meter, maximal bis 2,5 Meter (SCHÜTT ET AL., 1992). Bei einzelnen Arten treten Extremwerte von bis zu vier Metern auf. Auf sehr guten Standorten erreicht die Fichte einen jährlichen Zuwachs von bis zu 12 Vfm/a (SCHÖBER, 1987). Sie lässt sich sehr gut natürlich verjüngen und wird in einer Umtriebszeit von 80 bis 160 Jahren genutzt. Mit 47 % stellt die Holzartengruppe Fichte fast die Hälfte des potentiellen Rohholzaufkommens in den nächsten vier Jahrzehnten, obwohl ihr Anteil an der Gesamtwaldfläche nur 32 % ausmacht (BMELV, 2007).

Tabelle 2-1: Taxonomie der Gemeinen Fichte (BUGALA, 2007)

Abteilung	Nadelholzgewächse (<i>Pinophyta</i>)
Klasse	<i>Pinopsida</i>
Ordnung	Kiefernartige (<i>Pinales</i>)
Familie	Kieferngewächse (<i>Pinaceae</i>)
Unterfamilie	<i>Piceoideae</i>
Gattung	Fichten (<i>Picea</i>)
Art	Gemeine Fichte (<i>Picea abies</i>)

Für alle Fichten charakteristisch ist eine monopodiale, akroton (an den oberen bzw. äußeren Knospen) geförderte Verzweigung. Dies führt zu einem etagenartigen

Kronenaufbau und einer spitzwipfeligen Krone. Die Seitensprosse erster Ordnung stehen in Astquirleln in scheinquirlicher Anordnung und bilden so einzelne Stockwerke. Mit zunehmendem Alter tritt vermehrt proventive Triebbildung auf (PRZYBYLSKI, 2007). An älteren Zweigen treiben schlafende Knospen aus. Bei älteren Bäumen können diese einen wesentlichen Teil der Zweige und Nadelmasse der Krone aufbauen. Kronenform und Sprosssystem variieren je nach Umweltbedingungen und sind zum Teil auch genetisch bedingt. SCHÜTT ET AL. (1992) unterscheiden beim Verzweigungstyp mehrere Formen:

- Bei der Plattenfichte sind auch die Seitensprosse höherer Ordnung horizontal angeordnet, so dass die Etagen einzelne „Platten“ bilden (besonders bei *Picea pungens*, *Picea torano*).
- Bei Kammfichten hängen die Seitensprosse ab der zweiten Ordnung wie ein Vorhang lang herab (z.B. besonders bei *Picea breweriana*, *Picea smithiana*).
- Bürstenfichten sind eine Zwischenform, bei der die Seitenzweige nach allen Seiten abstehen.

Jungfichten weisen meist eine plattige Verzweigung auf. Die Kammform stellt sich meist erst ab einem Alter von 30 Jahren ein. Schmalkronigkeit, wie sie bei den sogenannten „Spitzfichten“ auftritt, kann wie bei *Picea omorika* artspezifisch, also genetisch fixiert sein. Sie kann aber auch bei spezifischen Ökotypen oder Mutanten („Spindelfichten“) auftreten. Meistens ist sie jedoch eine Standortmodifikation („Walzenfichten“) unter hochmontan-subalpinen oder boreal-subarktischen Klimabedingungen. Diese Modifikation tritt auch bei der in Mitteleuropa heimischen Gemeinen Fichte (*Picea abies*) auf.

Die Fichten haben als Gattung eine holarktische Verbreitung. Nur in Mexiko und auf Taiwan reicht ihr Verbreitungsgebiet bis zum nördlichen Wendekreis. Verschiedene Fichtenarten sind bestandsbildend in der borealen Nadelwaldzone und in der Nadelwaldstufe vieler Gebirge in den klimatisch temperaten, submeridionalen und meridionalen Teilen Eurasiens und Nordamerikas. Viele der asiatischen Arten sind in den Gebirgen der submeridionalen und meridionalen Zonen vertreten. In China und Zentralasien kommen mehrere Arten in den kontinentalen Gebirgen (Osttibet, Turkestan) vor. Sie bilden ein pflanzengeographisches Bindeglied zur Sibirischen Fichte (*Picea obovata*), deren Areal von Ostsibirien und der Mongolei bis westlich des Urals reicht. Westlich davon schließt die in Europa heimische Gemeine

Fichte an. Die Parallelarten zur *Picea obovata* in Nordamerika sind *Picea glauca* und *Picea mariana*, die ebenfalls einen breiten Waldgürtel in der borealen Zone bilden. In den Rocky Mountains sind einige kontinental verbreitete Arten heimisch, etwa *Picea engelmannii* und *Picea chihuahuana*, die bis Mexiko reicht. Ozeanisch verbreitete Arten gibt es in Nordamerika nur zwei (*Picea breweriana* und *Picea rubens*). Fichten sind generell anspruchslos bei der Nährstoffversorgung. Die ozeanisch verbreiteten Arten brauchen aber feuchte und zugleich gut durchlüftete Böden. Staunässe wird von Fichten nicht vertragen.



Abbildung 2-1: Natürliches Verbreitungsgebiet von *Picea abies* (L.) in Europa (SCHMIDT-VOIGT, 1977)

Fichten zählen auf der Nordhalbkugel zu den wichtigsten forstwirtschaftlich genutzten Baumarten. Nur in Resten werden noch Naturwälder genutzt, meist sind es bewirtschaftete oder künstlich geschaffene Reinbestände. In Mitteleuropa ist die Gemeine Fichte der „Brotbaum“ der Forstwirtschaft. Ausschlaggebend sind hier wie auch bei den anderen Arten der gerade Wuchs, das rasche Wachstum, die geringen Ansprüche an den Standort und die gute Verwendbarkeit des Holzes (BURSCHEL & Huss, 1997).

Das Holz wird als Bau- und Schnittholz verwendet, als Böttcher- und Grubenholz, für Schindeln, Kisten, Streichhölzer oder zum Bau von Brücken. Fichtenholz von besonderen Standorten ist als Klangholz im Musikinstrumentenbau

begehrt, beispielsweise als Decken für Geigen und Gitarren und als Resonanzboden bei Klavier und Cembalo. Weitere wichtige Verwendungszwecke sind Möbel-, Flugzeug-, Boots- und Schiffbau. Mindere Qualitäten und schwächere Stämme werden zur Zellstoff- und Papierherstellung verwendet. Auch zum Heizen wird Fichtenholz häufig verwendet (SURMINSKI, 2007).

Eine wichtige Schutzfunktion haben die Fichtenwälder in vielen Hochgebirgen und Steillagen, da sie als Schutzwälder die besiedelten Täler vor Lawinen und Steinschlägen schützen. Der Anteil der Fichte an der Baumartenverteilung beträgt in Europa 20 % und in Deutschland etwa 32 %. Der weitaus wichtigste parasitäre Schaderreger bei dieser Baumart ist *Heterobasidion annosum*. In Deutschland sind ca. 25 % der Fichtenbestände von diesem Pilz befallen. Weiterhin ist die Fichte durch Windwurf, Schneebruch, Borkenkäfer, Nonne und das Schälen des Rotwildes stark gefährdet (ESSER, 2000).

2.2 Der Wurzelschwamm (*Heterobasidion annosum* (Fr.) Bref.)

Der Wurzelschwamm (*Heterobasidion annosum* (Fr.) Bref.) oder auch Gemeine Wurzelschwamm ist als gefürchteter Forstschädling bekannt. Er ist der Erreger der Rotfäule bei der Fichte und somit der wirtschaftlich wichtigste pathogene Pilz in den Nadelwäldern der Nordhalbkugel (BUTIN, 1989). Die Kernfäule durch den Wurzelschwamm bei Fichten ist ökonomisch sehr bedeutend. *Heterobasidion annosum* ist in früheren Veröffentlichungen auch unter den folgenden Namen zu finden:

- *Trametes rediciperda* (Hartig)
- *Polyporus annosus* (Fr.)
- *Fomes annosus* (Fr.) Coocke
- *Fomitopsis annosa* (Fr.) Karst.

Betroffene Stämme weisen oft eine Glockenform am Stammfuß und Harzfluss auf. Ein Antagonist ist der Riesenrindenpilz (*Phlebiopsis gigantea* (Fr.) Jülich). Die Rotfäule ist eine Form der Holzfäule, die ihren Namen auf Grund einer rötlichen Verfärbung hat, die mit der Schädigung des Holzes einhergeht. Der Erreger der Rotfäule ist taxonomisch in die Klasse der Basidiomyceten einzuordnen. Die weitere Klassifizierung ist der Tabelle 2-2 zu entnehmen.

Tabelle 2-2: Taxonomie von *Heterobasidion annosum* (Fr.) Bref. (ZYCHA ET AL., 1976)

Klasse	<i>Basidiomycetes</i>
Unterklasse	<i>Agaricomycetidae</i>
Ordnung	<i>Russulales</i>
Familie	<i>Bondarzewiaceae</i>
Gattung	<i>Heterobasidion</i>
Art	<i>Heterobasidion annosum</i>

Bäume werden meist über die Wurzel infiziert, entweder durch die im Boden eingewaschenen Basidiosporen oder durch den Wurzelkontakt mit bereits infizierten Bäumen. Die Basidiosporen können auch sehr leicht die frischen Schnittflächen von gefälltten Bäumen befallen. Besonders gefährdet sind Erstaufforstungen auf ehemals landwirtschaftlich genutzten Flächen, wobei ein hoher pH-Wert (>6) die Krankheit begünstigt. Für Bestände, die von dem Pilz bereits befallen sind, besteht weiterhin ein hohes Risiko.

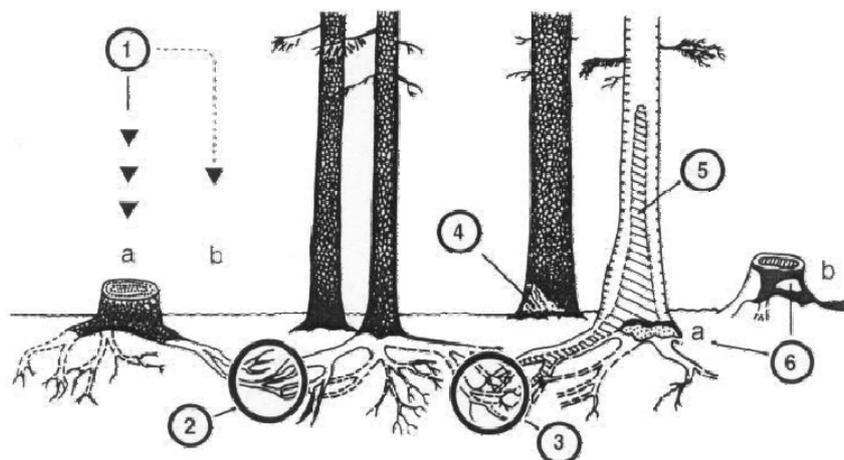


Abbildung 2-2: *Heterobasidion annosum* (Wurzelschwamm), Infektions- und Ausbreitungsmöglichkeiten im Bestand (nach HEYDECK, 2003)

Die Abbildung 2-2 zeigt die Infektions- und Ausbreitungsmöglichkeiten im Bestand. Dabei ist:

- 1) Die Besiedlung der frischen Schnittflächen eines Stubbens durch auskeimende Sporen (a); ferner auch Einwaschung von Sporen in den Boden mit nachfolgender Wurzelinfektion (b).
- 2) Von befallenem Stubben ausgehende Infektion eines benachbarten Baumes durch Wurzelkontakte.
- 3) Übertragung der Pilzinfektion im Bestand von Baum zu Baum (Entstehung von Sterbelücken).
- 4) Wundinfektion über Wurzelanlauf- bzw. Stammbasisverletzungen (beim Wurzelschwamm ein relativ seltener Infektionsweg).
- 5) Fäuleausprägung in einem Fichtenstamm (fortgeschrittenes Stadium).
- 6) Fruchtkörperausbildung an der Stammbasis (a) und an einem Stubben (b).

Stockoberflächen, gefolgt vom raschen Einwachsen des Pilzes in das Wurzelsystem des gefälltten Baumes und vom Überwachsen in Wurzeln lebender, noch gesunder Fichten wird ebenfalls als häufiger Infektionsweg angesehen. Über die Wurzeln kann der Wurzelschwamm auf den Stamm übergehen und dort die so genannte Rotfäule verursachen. Dabei wird wie bei Weißfäuleerregern zuerst Lignin, später dann auch Cellulose abgebaut. Das befallene Holz verfärbt sich anfangs streifig violett bis grau. Später wird eine ringförmige rotbraune Fäule sichtbar, die von kleinen weißen, spindelförmigen Nestern mit schwarzem Kern durchsetzt ist.



Bild 2-1: Fruchtkörper von *Heterobasidion annosum* (HARTMANN ET AL., 1995)

Bei Fichten und Douglasien sind die Schäden am gravierendsten, da der Pilz das Reifholz bis in die Kronen hinauf abbauen kann. Bei Kiefern und Lärchen dringt die

Fäule nur wenig in den Stamm hinauf. Von außen ist die Rotfäule nicht eindeutig erkennbar. Betroffene Bäume weisen jedoch häufig eine Glockenform am Stammfuß und Harzfluss auf. Mehrjährige Fruchtkörper der Pilze treten meist an Stubben, an der Stammbasis oder an Wurzeln auf. Sie sind konsolenförmig und werden 10–20 cm groß. Die Oberseite besteht aus einer dunklen Kruste, die Unterseite ist hell mit feinen Poren (vgl. Bild 2-1).

Um weitere Infektionen zu verhindern kann auf frischen Schnittflächen eine 20 %ige Harnstofflösung aufgetragen werden, die das Eindringen des Pilzes verhindert. Eine Förderung von antagonistischen Pilzen wie *Phlebia gigantea* (Riesenrindenpilz) oder *Trichoderma viride* ist ebenfalls möglich (RISHBETH, 1950; ANNESI ET AL., 2005; VASILIAUSKAS ET AL., 2004; 2005). Zur Eindämmung werden von METZLER (2001) aus waldbaulicher Sicht folgende präventive Aspekte empfohlen:

- Keine Fichtenanpflanzungen auf Standorten mit kalkreichen Böden sowie auf Flächen mit starkem Vorbefall
- Weitständige Bestandesbegründung oder Laubholzbeimischung zur Vermeidung von Wurzelkontakten zwischen den Fichten
- Auf Erstaufforstungsflächen keine Durchforstungen in den Herbstmonaten, da bei starkem Sporenflug eine Stubbeninfektion durch den Wurzelschwamm am wahrscheinlichsten ist
- Naturverjüngung oder Anbau von Laubbäumen, die gegen den Wurzelschwamm resistent sind

Darüber hinaus wurden weitere Bekämpfungsmaßnahmen erarbeitet. Hier einige Beispiele der empfohlenen Maßnahmen:

- Eindämmung der Infektion durch „Stichgräben“ um das infizierte Areal (HARTIG, 1877)
- Behandlung der Stubben mit Fungiziden (RISHBETH, 1959; DRIVER, 1963; BERRY & BRETZ, 1964; PRATT ET AL., 1998)
- Resistenzforschung (DIMITRI, 1980)
- Anlage eines Fungizid-Depots in der Stammbasis (CWIELONG, 1986)

Als wichtigste Verbreitungseinheiten dienen in Fruchtkörpern gebildete Basidiosporen, die während des ganzen Jahres gebildet werden, durch Niederschläge in Streu und Boden gelangen und noch in 25 cm Bodentiefe in großer

Zahl vorkommen. Wegen starker mikrobiologischer Konkurrenz kann sich das Mycel des Wurzelschwammes nicht lange im Boden halten. Deswegen sind für Infektionsprozesse vornehmlich die direkt auf Wurzeln oder auf frischen Stockoberflächen keimenden Sporen von Belang. So gelangt der Pilz unmittelbar beziehungsweise über den Umweg von Wurzelfusionen in das Wurzelsystem des Wirtsbaumes, bringt dieses zum Absterben oder dringt in das Reifholz des Stammes vor.

Weißfäuleerreger verfügen über eine besonders trickreiche und sinnvolle Enzymausstattung, mit deren Hilfe sie sowohl Lignin als auch Cellulose und Hemicellulosen abbauen können (HÜTTERMANN & VOLGER, 1973). Das befallene Holz erhält eine faserige Struktur, das Holzvolumen nimmt ab und so können Hohlräume entstehen. Wird das Lignin nicht vollständig abgebaut bzw. umgewandelt kann dies zu rötlichen Verfärbungen führen.

Die Infektion des Kernholzes von Fichte zeichnet sich durch eine schnelle Verbreitung in Längsrichtung aber nur durch eine langsame Verbreitung in radialer Richtung aus (SCHWARZE ET AL. 1999). Bei einer Stammscheibe aus rotfaulem Holz ergibt sich das folgende Bild (Bild 2-2):



Bild 2-2: Typische Verfärbungen bei rotfaulen Fichtenstämmen (Foto: BOHN, 2004)

Innen befindet sich die Kernzone, in der der Holzabbau bereits begonnen hat. Ihre Farbe ist schmutzig braun. Nach außen hin schließt sich eine dünne unregelmäßig

schwarz-braun gefärbte Zone an. Hier beginnt der Holzabbau gerade. Darauf folgt die dunkel grün-braune Reaktionszone, in der der Pilz mit dem Abwehrsystem des Baumes kämpft. Der Baum wiederum setzt eine Vielzahl von phenolischen Verbindungen zur Abwehr des Pilzes ein. Dominierend sind hier die Lignane, von denen zehn bisher identifiziert werden konnten. Jedoch hat eine Vielzahl der nachgewiesenen Verbindungen keine toxische Wirkung auf den Pilz, sodass dieser zwar in seinem Wachstum gehemmt aber nicht gestoppt werden kann (POPOFF ET AL., 1975; ASIEGBU ET AL., 1998). Außerhalb der Reaktionszone ist die weiße „Trockenzone“ (Übergangszone) lokalisiert und schließlich das gesunde Frühholz (WOODWARD ET AL., 1998).

Bei *Heterobasidion annosum* wurden bisher die folgenden holzabbauenden Enzyme nachgewiesen und partiell untersucht: Peroxidasen, Laccasen, Pektinasen und Cellulose abbauende Enzyme (ASIEGBU ET AL., 1998). Bei der Reaktion zwischen Baum und Pilz spielt das Enzym Laccase eine besondere Schlüsselrolle, indem es Phenole, die vom Baum zur Abwehr des Pilzes abgeschieden werden, polymerisiert zugleich aber auch beim Ligninabbau beteiligt ist. Dort setzt es niedermolekulare Bruchstücke des Lignins frei.

2.3 Holz

Als Holz bezeichnet man im allgemeinen Sprachgebrauch das feste bzw. harte Gewebe der Sprossachsen von Bäumen und Sträuchern. Holz stellt eine bedeutende natürliche Ressource dar. Als vielseitiger und vor allem nachwachsender Rohstoff gehört das Holz zu den bedeutendsten pflanzlichen Produkten. Sowohl in den Entwicklungsländern als auch in Industrieländern nimmt Holz als Rohstoff gegenwärtig eine wichtige Rolle ein. In vielen hochindustriell entwickelten Ländern kommt es bereits zu einer Verknappung von wertvolleren Holzsortimenten, während Schwachhölzer oder Sortimente minderer Qualität oftmals ungenutzt bleiben. Daher wird in einzelnen Zweigen der Wirtschaft, wie der Holz- und Möbelindustrie sowie der chemischen Industrie, der Übergang zur schonenden Nutzung des Waldes und zu effektiven Verarbeitungsweisen auch der geringwertigen Sortimente propagiert.

Holz ist ein organischer Körper und bildet den Hauptbestandteil von Bäumen und Sträuchern. Im Aufbau eines Baumes werden anatomisch vier Elemente im Querschnitt von außen nach innen unterschieden:

- Rinde
- Kambium
- Holzteil
- Mark

Von diesen Elementen nimmt der Holzteil das weitaus größte Volumen ein. Für die Verarbeitung in der Holzwerkstoffindustrie wird vorrangig der Holzteil eingesetzt. Aufgrund dessen wird innerhalb oben genannter Punkte lediglich der Holzteil in seiner anatomischen und chemischen Struktur abgehandelt.

2.3.1 Anatomischer Aufbau des Holzes

Pflanzenzellen unterschiedlichster Form bilden die grundlegenden Baueinheiten des Holzes. Diese Pflanzenzellen formen Gewebe mit verschiedenartigen Funktionen.

Lediglich die meristematischen und kambialen Zellen leben, während der überwiegende Teil der Holzzellen abgestorben ist. Ihre Vakuolen fließen in der Regel in einem breiten unausgefüllten Raum zusammen, der den größten Teil des Zellenhohlraumes (Lumens) ausmacht. Die Zellmembran verstärkt sich zur Zellwand unterschiedlicher Dicke, Struktur und Härte. Der überwiegende Teil der Zellen weist die Form von geschlossenen Röhrchen auf, die entlang der Vertikalachse des Stammes verstreut angeordnet sind. Diese Zellen sind durch eine Zwischenzellenmaterie, die Mittellamelle, zu einem kompakten Ganzen verbunden. Wird ein solcher Zellenkomplex mittels thermomechanischer Kräfte aufgelöst, entstehen isolierte Zellen (Fasern), die zur Herstellung von Faserwerkstoffen verwendet werden. Die Abbildung 2-3 zeigt den schematischen Aufbau des Nadelholzes.

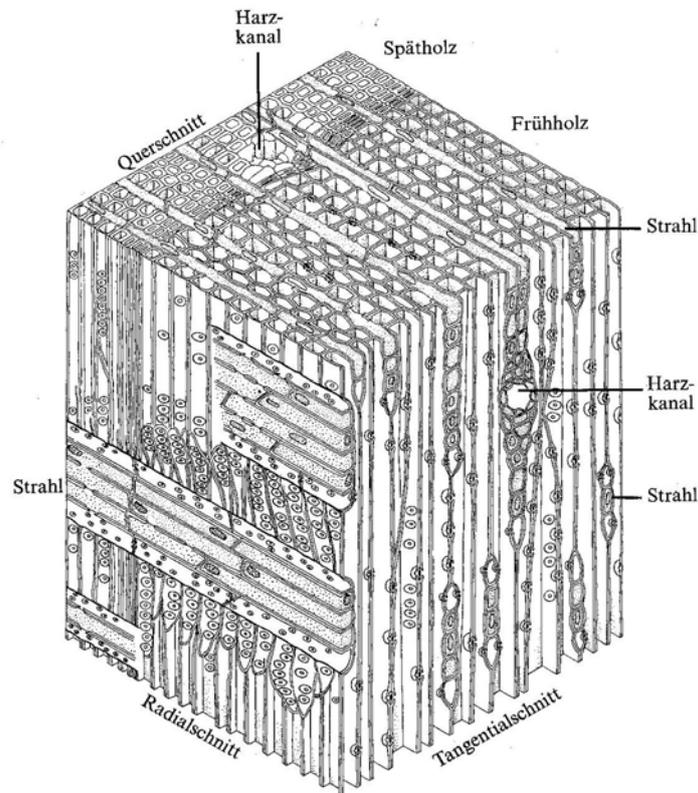


Abbildung 2-3: Blockdiagramm des Holzes von Nadelhölzern (nach RAVEN ET AL., 1988)

Durch die Form und die übrigen strukturellen Merkmale der Zellen werden die Eigenschaften der verschiedenen Baumarten bestimmt. Die Zellen des Holzes werden nach ihrer Funktion, ihrer Form und ihrer Anordnung im Holz in drei grundlegende Gruppen unterteilt:

- Gefäßzellen (Leit- und Festigungszellen)
- Sklerenchymatische Zellen
- Parenchymatische Zellen (Ernährungs- und Leitzellen).

Auf die einheimischen Holzarten verteilen sich die einzelnen Zellarten wie folgt (GRAMMEL, 1989):

Nadelholz:	90 – 95 %	Tracheiden
	4 – 10 %	Parenchym
	1 %	Harzkanäle
Laubholz:	40 – 60 %	Fasern und Tracheen
	20 – 40 %	Gefäße
	10 – 30 %	Parenchym

2.3.1.1 Gefäßzellen

Gefäßzellen sind abgestorbene Zellen mit breitem Zellenhohlraum, deren Zellwände ungleichmäßig verdickt und zahlreich perforiert sind. Sie haben Leitfunktionen, wobei die Leitung durch die Lumen und die perforierten Wände erfolgt. Beim Holz wird zwischen echten Gefäßen (Tracheen), die nur im Laubholz vorkommen und Siebröhren (Tracheiden) unterschieden.

Die Tracheen bilden das Leitsystem der Angiospermen in Richtung der Vertikalachse des Stammes. Sie können eine Länge von bis zu 2 m und einen Durchmesser von bis zu 0,5 mm erreichen. Das Leitsystem entsteht durch die Verschmelzung der geschlossenen trachealen Zellen, so dass es zunächst durch die aneinanderstoßenden Zellwände – die Perforationsplatten – gestört ist (RAVEN ET AL., 1988; LOHMANN, 1999).

Im Holz der Gymnospermen befinden sich im Gegensatz zum Holz der Angiospermen keine echten Gefäße. Hier übernehmen die Tracheiden die Leit- und Versteifungsfunktionen. Bei den Tracheiden handelt es sich um 2 bis 7 m lange und 0,004 bis 0,009 mm breite, axial gerichtete Zellen, mit einer typischen Faserstruktur. Aufgrund dessen nimmt das Nadelholz den größten Anteil in Faserverbundwerkstoffen ein.

2.3.1.2 Sklerenchymzellen

Sklerenchymzellen sind Faserzellen mit einem sehr engen Lumen und einer verdickten Zellwand. Ihre Länge beträgt bis zu 1,2 mm und die Breite nimmt bis zu 30 µm ein. Die Zellwände sind nur spärlich getüpfelt. Sklerenchymzellen treten im Holz von Bedecktsamern auf und erfüllen Versteifungsfunktionen.

2.3.1.3 Parenchymzellen

Parenchymzellen sind dünnwandige, wenig langgestreckte und oft getüpfelte Ernährungs- und Leitelemente. Sie sind lange lebensfähig und enthalten große Mengen an Harzsäuren, Gerbstoffen und Mineralstoffen. Die Form und Funktion der Parenchymzellen ist vielfältig. In diesen Zellen können Reservestoffe eingelagert werden (Speicherparenchym). Das Parenchym kann der Gewebedurchlüftung dienen

(Aerenchym). Beim Holz ist das Markstrahlenparenchym und das Holzparenchym zu unterscheiden.

Die parenchymatischen Markstrahlzellen entstehen nicht aus dem Kambium, sondern aus dem primären Teilungsgewebe. Sie haben die Form eines Rechtecks oder einer Spindel, deren Enden zugespitzt sind. Die Markstrahlzellen sind zumeist ziegelsteinförmig und im Holz horizontal sowie radial angeordnet.

Das Holzparenchym wird wie folgt eingeteilt:

- Paratracheales Parenchym: Es umgibt die Gefäße und bildet Thyllen.
- Metatracheales Parenchym: Es bildet die Zellen, die unabhängig von der Gefäßlänge ringförmig gruppiert sind.
- Diffusionsparenchym: Es stellt zwischen anderen Zellenarten verstreute parenchymatische Zellen dar.
- Terminalparenchym: Es ist am Rande der Jahrringe gruppiert.

2.3.2 Chemische Bestandteile des Holzes

Holz ist fast ausschließlich aus den chemischen Elementen Kohlenstoff (ca. 50 %), Sauerstoff (43 %) und Wasserstoff (6 %) zusammengesetzt. Mit einem Anteil von etwa 0,2 % bis 0,4 % ist Stickstoff enthalten. Der Anteil anorganischer Elemente liegt durchschnittlich bei 0,5 %. Die genauen Anteile der einzelnen Holzbestandteile sind baumartenspezifisch und unterliegen gewissen Schwankungen (LELIS, 1992).

Pflanzen haben als wichtigste Komponenten für ihren Aufbau mit dem sie große Stabilität, maximale Elastizität, Zugfestigkeit und Druckfestigkeit erreichen drei grundsätzliche chemische Bestandteile:

- Cellulose
- Lignin
- Hemicellulose

2.3.2.1 Cellulose

Cellulose ist der Hauptbestandteil der Pflanzen, der es ihnen ermöglicht aufrecht zu stehen. Das Polysaccharid, Cellulose, stellt ein lineares Makromolekül dar, und setzt sich aus (1 – 4)- β - Glucopyranose Bausteinen zusammen (vgl. Abbildung 2-4).

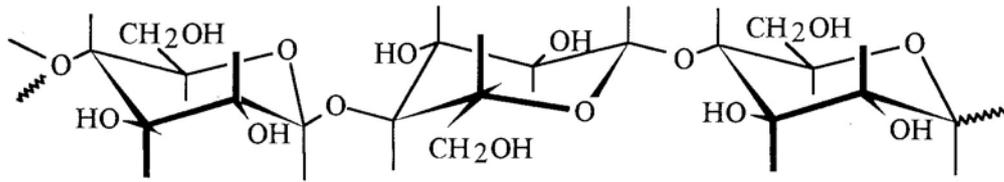


Abbildung 2-4: Struktur der Cellulose (ELIAS, 1981)

Die Zugfestigkeit des Holzes basiert auf diesen linearen und mäßig kristallinen Cellulosemolekülen (OKAMURA, 1991). Sie bilden lange, lineare Kettenmoleküle, die sich übermolekular durch vielfaches Aneinanderlagern zu mikrokristallinen Bereichen formieren (Mikrofibrillen) und vor Angriffen von chemischen Stoffen und Wasser schützen. Die Mikrofibrillen schlingen sich wiederum umeinander und bilden feine Kabel von etwa 0,5 µm Durchmesser (RAVEN ET AL., 1988). Nur etwa 10 % der Cellulose sind amorph und somit leichter von Wasser und Chemikalien erreichbar. Diese amorphen Teile quellen leicht und bewirken auf diese Weise die Elastizität der Cellulosefasern (ZEPPENFELD, 1991). Der Celluloseanteil im Holz liegt im Durchschnitt bei 45 % (GRAMMEL, 1989).

2.3.2.2 Hemicellulose

Die Cellulosefibrillen der Zellwand sind in eine Grundsubstanz andersartiger Moleküle eingebettet, so unter anderem in Hemicellulosen (RAVEN ET AL., 1988). Hemicellulose (siehe Abbildung 2-5) stellt ein weiteres Polysaccharid im Holz dar. Es weist wesentlich geringere Polymerisationsgrade als die Cellulose auf (ZEPPENFELD, 1991). Die Hemicelluloseketten sind wenig verzweigt, mit kurzen Seitengliedern und zum größten Teil amorph. Hemicellulose ist ein Sammelbegriff für alkalilösliche Polysaccharide der sekundären Pflanzenzellwand und setzt sich sowohl aus Hexosen, Kohlenhydraten mit 6 C-Atomen (D-Glukose, D-Mannose, D-Galaktose) als auch aus Pentosen, Kohlenhydrate mit 5 C-Atomen (D-Xylose, L-Arabinose) und Uronsäuren zusammen (BLAZEJ, 1979). Der Anteil im Holz liegt durchschnittlich bei 25 % (GRAMMEL, 1989).

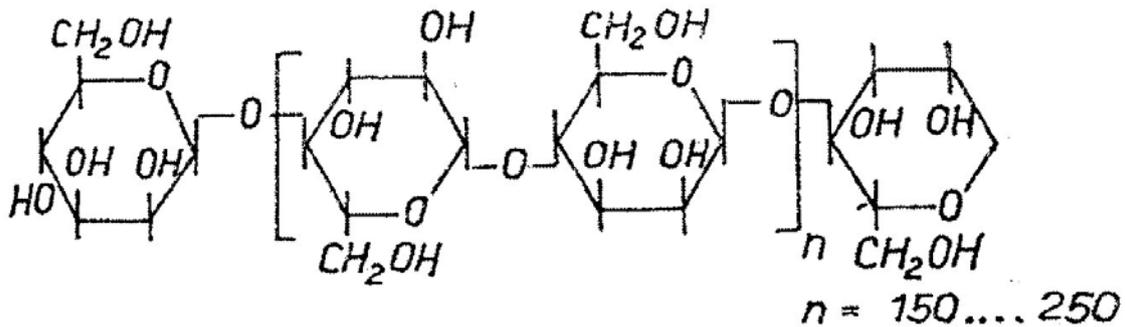


Abbildung 2-5: Hemicellulosemolekül (ZEPPENFELD, 1991)

In der verholzten Zelle sind die Hemicellulosen weitestgehend vor chemischen Angriffen und Wasser geschützt. In Nadelhölzern sind sie durch chemische Bindung an das Lignin, in Laubhölzern durch Veresterung mit Ameisen- oder Essigsäure blockiert. Wird die Hemicellulose vom Lignin getrennt, ist sie leicht kolloid wasserlöslich und relativ gut abbaubar (FUCHS, 2007). Sie quillt leicht mit Wasser und ist sehr reaktiv. In diesem Zustand kann sie als holzeigenes Bindemittel eingesetzt werden (ZEPPENFELD, 1991).

2.3.2.3 Lignin

Lignin ist ein weiterer wichtiger Bestandteil in der Zellwand der Pflanzenzelle. Es ist nach der Cellulose das häufigste Polymer. Der Anteil in der Pflanze beträgt zwischen 10 und 30 % (RAVEN ET AL., 1988). Lignin ist ein typischer Bestandteil der Mittellamelle und als Kruste in das Cellulosegrundgerüst eingelagert. Es verleiht der Wand die Druckfestigkeit. Lignin ist der „Kitt“, der die Cellulosefasern zusammenhält. Anders als bei der Cellulose und der Hemicellulose besteht Lignin überwiegend aus aromatischen Komponenten, die sich kaum hydrolytisch spalten lassen (HÜTTERMANN ET AL., 1990 b). Es ist ein Stoff, der die Zelle wegen seines phenolischen Charakters vor biologischer und chemischer Schädigung schützt (ZEPPENFELD, 1991).

Lignin ist ein aromatisches Polymer, das durch die enzymatische Dehydrogenation von Phenylpropanmonomeren gebildet wird, die mit einer radikalischen Verknüpfung einhergeht. Die Grundbausteine des Lignins sind die Alkohole (Monolignole) p-Coumaryl, Coniferyl und Sinapyl. Über Ether- und C-C-

Bindungen sind die Monomere miteinander verknüpft (HIGUCHI, 1990). Die Abbildung 2-6 zeigt den komplexen Aufbau eines Nadelholzligninmoleküls.

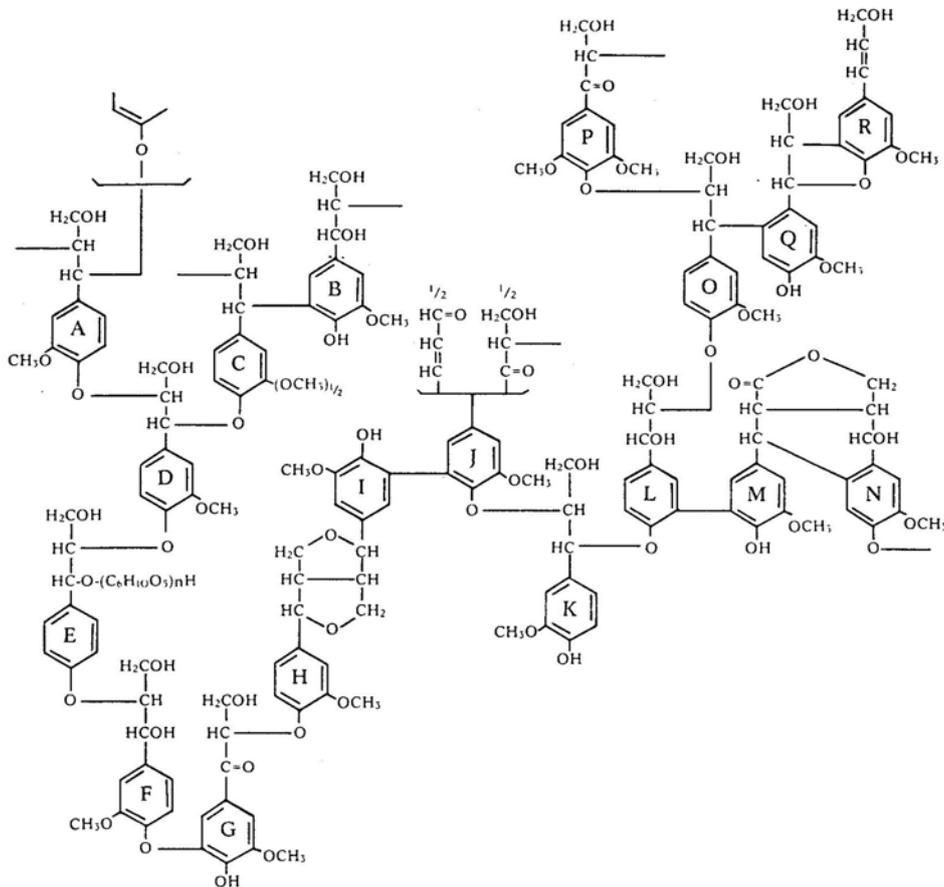


Abbildung 2-6: Strukturmodell eines Nadelholzligninmakromoleküls (FREUDENBERG, 1968)

2.3.3 Aufbau der verholzten Zellwand

Um festes Land erobern und dort überleben zu können, mussten die Pflanzen Schutzvorrichtungen schaffen, die sie vor der permanenten Verdunstung von Wasser schützten. Es entwickelten sich Zellwände und Leitsysteme, die für die technischen Gegebenheiten erforderlich waren. Daraus entstand innerhalb der Evolution die für viele technische Entwicklungen als Vorbild dienende verholzte Zellwand.

Die Zellwand hält im Verband, wie z. B. bei einem Baum oder Getreidehalm, Höhen-Durchmesser-Verhältnissen stand, die noch kein vom Menschen konstruierter Werkstoff erreicht hat (HÜTTERMANN & KHARAZIPOUR, 1993).

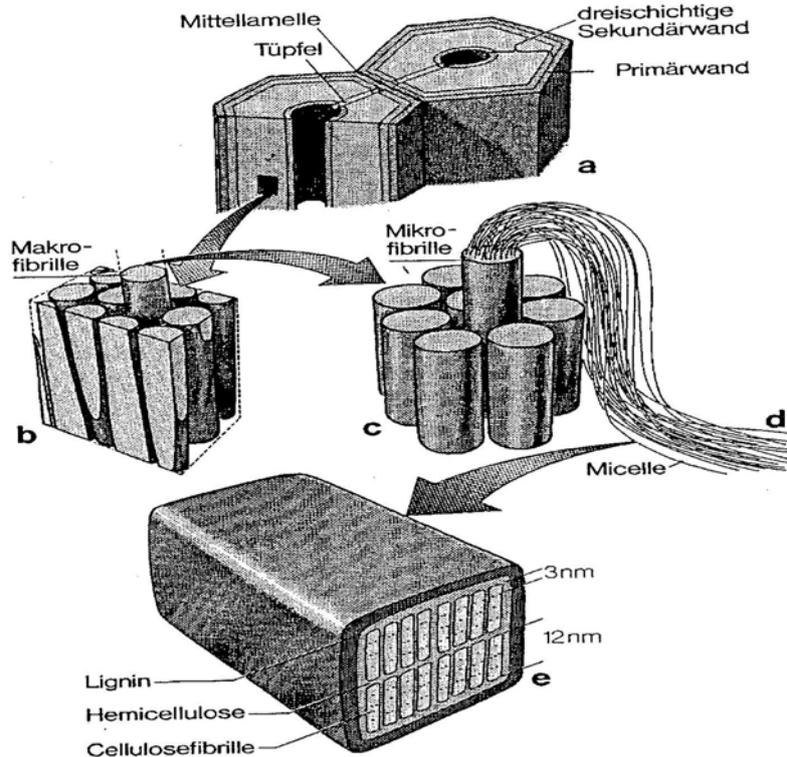


Abbildung 2-7: Die Ultrastruktur der verholzten Zellwand (verändert nach RAVEN ET AL., 1988, FENGEL & WEGENER, 1989)

Erst die Anordnung und Verknüpfung der drei Bestandteile Lignin, Hemicellulose und Cellulose auf der Ebene der Ultrastruktur der verholzten Zellwand verleihen dem Holz die besondere mechanische Stabilität, die Landpflanzen ihr Höhenwachstum ermöglicht (Abbildung 2-7). Hohe Druckfestigkeit wird durch die amorphe, harte Matrix aus Lignin gewährleistet, während die Zugfestigkeit auf die in der Matrix eingebetteten elastischen Cellulosefasern zurückzuführen ist. Da Lignin und Cellulose in der Natur wahrscheinlich keine Bindungen eingehen, ist im Verbundstoff „Zellwand“ außerdem noch ein Kontaktvermittler zwischen Faser und Matrix nötig. Diese Aufgabe wird gemäß zahlreichen Modellen dem Hemicellulose-Anteil der verholzten Zellwand zugeschrieben (vgl. FENGEL & WEGENER, 1989). Die Schichten der Zellwand (Mittellamelle, Primärwand und Sekundärwand) tragen noch zusätzlich zur Stabilität bei.

Die Mittellamelle besteht hauptsächlich aus Pektinen und Lignin, wobei der Ligninanteil bis zu 70 % beträgt (BLAZEJ, 1979). Bei der verholzten Zellwand beginnt die Lignifizierung an der Mittellamelle und greift dann auf die Primärwand über. Sie

entsteht bei der Zellteilung aus der Zellplatte, die in der Äquatorialebene angelegt wird. Die Mittellamelle verbindet benachbarte Zellen fest miteinander (RAVEN ET AL., 1988).

Die Primärwand wird vor und während des Zellwachstums als cellulosehaltige Wandschicht an beiden Seiten der Mittellamelle abgelagert. Neben Cellulose, Hemicellulose und Pektin enthält sie Glykoproteine, Makroproteine aus Kohlenhydraten und Eiweiß. Das Pektin verleiht der Wand die elastischen Eigenschaften. Die Primärwand kann folglich beim Streckungswachstum von Wurzel, Sprossachse und Blatt ständig gedehnt und vergrößert werden. Primärwände können aber auch verholzen und starr werden. Sie sind nicht überall gleich dick und besitzen dünne Felder, die sogenannten primären Tüpfelfelder (RAVEN ET AL., 1988). Die Primärwand ändert ihre Dimension beim Quellen nur geringfügig. Dieser Teil der Zellwand zeigt sich auch als der beständigste beim thermischen Aufschluss des Holzes (BLAZEJ, 1979).

Der Celluloseanteil in der Sekundärwand ist höher als in der Primärwand. Da das Pektin fehlt, ist sie starr und schwer dehnbar. Die Glykoproteine sind nicht vorhanden. Innerhalb der Sekundärwand lassen sich drei Schichten unterscheiden: Eine äußere Schicht S_1 , eine mittlere Schicht S_2 und eine innere Schicht S_3 . Die Schichten sind unterschiedlich dick und die Cellulosemikrofibrillen verschieden orientiert. Durch diesen sperrholzartigen Aufbau erhält die Sekundärwand ihre hohe Stabilität. Die Cellulosemikrofibrillen liegen dichter, deshalb ist die Grundsubstanz anderer Polysaccharide weniger kompakt als in der Primärwand. Häufig ist sie lignifiziert (RAVEN ET AL., 1988).

Eine kovalente Bindung von Lignin mit Hemicellulosen, vor allem mit Arabinose, Xylose und Galactose in Holz ist belegt (ERIKSSON ET AL., 1990; KOSHIJIMA ET AL., 1989). Es wird angenommen, dass diese Bindung nach Aktivierung des Lignins zu Oligolignol-Chinonmethiden zustande kommt (HIGUCHI, 1997). Zwischen Hemicellulose und Cellulose sorgen Wasserstoffbrücken für eine stabile Bindung. Nach neusten Erkenntnissen wird eine Aufgabenverteilung vorgeschlagen, derzufolge xylanhaltige Hemicellulose vor allem mit Lignin assoziiert ist und glucomannanhaltige Hemicellulose für den stabilen Kontakt zur Cellulose verantwortlich ist (SALMEN & OLSSON, 1998).

2.4 Delignifizierung der verholzten Zellwand durch Fäulepilze

Wenig ist über enzymatische pilzliche Aktivitäten direkt im kompakten Holz im Allgemeinen und bei *Heterobasidion* im Besonderen bekannt. Am Holzabbau beteiligte oder vermutlich beteiligte Enzyme wurden in Flüssigmedium-Kulturen und anderen künstlichen Medien einschließlich Sägemehlmedien identifiziert und partiell untersucht: Laccasen (JOHANSSON ET AL., 1999, IAKOVLEV & STENLID, 2000), Hemicellulasen (MAIJALA ET AL., 1995) und Pektinasen sind daher prinzipiell in *Heterobasidion* bekannt. Peroxidasen und β -Glucanasen gibt es vermutlich ebenfalls, schlussfolgernd aus isolierten DNA-Fragmenten von potentiellen Mn-Peroxidase-Genen (MAIJALA ET AL., 2003). Ob und zu welchen Zeitpunkten des Befalls irgendwelche dieser bekannten Proteine bzw. Gene aktiv sind, ist nicht bekannt. Solche Aktivitäten festzustellen kann zum einem Einblick in das generelle Verständnis des Holzabbaus führen. Die Arbeiten von KHARAZIPOUR ET AL. (1991, 1997, 2002) und HÜTTERMANN et al. (2001) haben gezeigt, dass pilzliche Enzyme bei der Aktivierung von Lignin und der Verklebung der Fasern umweltfreundlich eingesetzt werden können. Schon im Holz vorhandene pilzliche Enzyme können eventuell eine Zugabe von externen Enzymen ersparen.

Eine Möglichkeit, den Zusammenhalt der Fasern innerhalb der Holzstruktur zu lockern und so die Energiekosten bei der Zerfaserung zu senken, wird derzeit in der Transformation des Holzes durch Weißfäulepilze gesehen (AKTHAR ET AL., 1998; UNBEHAUN ET AL., 1999 a & b). Aus Kulturen des Weißfäulepilzes *Phanerochaete chrysosporium* wurde eine Peroxidase gewonnen, die in relativ unspezifischer Reaktion Seitenketten und Benzolringe von Ligninmodellsubstanzen oxidiert (TIEN & KIRK, 1983, GLENN ET AL., 1983). Ein Merkmal dieser Peroxidase, die den Namen Ligninperoxidase erhielt, ist, dass sie monomere Aromate als Radikal-Carrier zur Oxidation von Phenolen benötigt (KERSTEN ET AL., 1985). Die Ligninperoxidase ist ein Häm-Glykoprotein mit einem Molekulargewicht von 41 kDa. Eine andere hämhaltige Peroxidase aus Weißfäulepilzen benötigt zur Oxidation von phenolischen Modellsubstanzen die Anwesenheit von Mangan-II und H_2O_2 . Diese Manganperoxidase oxidiert zunächst Mn-II zu Mn-III; das Mn-III diffundiert im Komplex mit einer organischen Säure daraufhin vom Enzym ab und oxidiert seinerseits das phenolische Substrat (GLENN & GOLD, 1985). Als drittes Enzym wurde in Kulturen vieler Weißfäulepilze eine sauerstoffabhängige kupferhaltige

Polyphenoloxidase (Laccase) nachgewiesen (REINHAMMAR, 1984). Auch sie katalysiert wahrscheinlich wie Manganperoxidase nur indirekt die Oxidation von phenolischen und nicht-phenolischen Aromaten, indem sie Radikal-Kationen erzeugt, die in einer nicht enzymbasierten Reaktion Aromaten oxidieren.

In den bisherigen Ansätzen zum Einsatz von Weißfäulepilzen wurde stets unbefallenes Holz zunächst zu Hackschnitzeln zerkleinert und dann, nach entsprechender Sterilisation, mit Pilzbrut und Nährmedium für die Pilze versetzt und schließlich für mehrere Wochen inkubiert. Dieses vorinkubierte Holz zeigte deutlich verbesserte Aufschlusseigenschaften. Jedoch ist die Vorbehandlung aufwendig. Die biotechnologische Umwandlung von Holz oder Holzderivaten mit Hilfe von Weißfäulepilzen stellt in Zukunft einen wichtigen Aspekt dar, der mehr und mehr Beachtung findet. Ein Verfahren der biotechnologischen Vorbehandlung des Buchenholzes zur gezielten Veränderung seiner mechanischen Bearbeitbarkeit wurde von LUTHARDT (1969) als Myko-Verfahren vorgestellt. Durch die Degradation mit bestimmten Weißfäulepilzen (*Pleurotus ostreatus* und *Trametes versicolor*) wurde die Holzstruktur so aufgelockert, dass mit einer geringen Dichte und Festigkeit bestimmte Produkte wie Bleistifte und Holzmodelle hergestellt werden konnten. Der Einsatz pilzlicher, lignolytischer Enzyme, aber auch von Cellulasen und Xylanasen als Ergänzung oder Ersatz konventioneller Faserbehandlungsmethoden hat sich inzwischen unter dem Namen „Biopulping“ und „Biobleaching“ in Wissenschaft und Technik fest etabliert. Mittlerweile wurden auch Verfahren entwickelt, die es ermöglichen, lignolytische Enzyme von Weißfäulepilzen in technisch nutzbaren Mengen produzieren zu lassen (HÜTTERMANN ET AL., 1990 a; KHARAZIPOUR ET AL., 1991, 1997, 1998; KHARAZIPOUR, 2002).

Lignolytische Enzyme können erfolgreich bei der Klärung ligninhaltiger Abwässer von Zellstofffabriken eingesetzt werden (EK & ERIKSSON, 1980; CALL ET AL., 1990, CALL & STRITTMATTER, 1992). Die Anwendung von lignolytischen Enzymen in der Zellstoff- und Papierindustrie wurde in verschiedenen Bereichen untersucht und erfolgreiche Ansätze für den Einsatz von derartigen biotechnischen Verfahren wurden gefunden. Hier wurde der Einsatz von lignolytischen Enzymen auf hauptsächlich vier Gebieten analysiert und optimiert: Deinking von Altpapier, Vorbleiche von Sulfatzellstoffen, Vorbleiche von Holzstoffen (Holzfaser) und Behandlung (Ligninentfernung) von Schleiferei- und TMP-Abwässern (CALL &

STRITTMATTER, 1992). Die Untersuchungen wurden hauptsächlich im Labor und in Technikumanlagen ausgeführt, aber bereits teilweise auch schon in Produktionsanlagen. EK & ERIKSSON (1980) zeigten, dass durch eine Behandlung von Hackschnitzeln mit cellulasefreien Mutanten von Weißfäulepilzen der Energiebedarf bei der nachfolgenden Zerfaserung für die Herstellung von thermo-mechanischem Zellstoff vermindert wird. Bei den Untersuchungen wurden cellulasefreie Mutanten von *Sporotrichum pulverulentum*, *Phlebia radiata* und *Phlebia gigantea* verwendet, um eine Delignifizierung der Hackschnitzel zu erreichen. Schon bald nach ihrer Entdeckung wurden lignolytische Enzyme aus Weißfäulepilzen auf ihre Einsetzbarkeit bei der biotechnologischen Delignifizierung von Faserstoff hin untersucht (MESSNER ET AL., 1993 a & b; MESSNER & SREBOTNIK, 1994; KEREM & HADAR, 1998).

Die Untersuchungen von BEHRENDT & BLANCHETTE (1997) und von BEHRENDT ET AL. (2000) haben gezeigt, dass *Phlebiopsis gigantea* innerhalb von acht Wochen die frisch geschnittenen Kiefernstämme bis zu 100 % besiedelt hat. Die mit *Phlebiopsis gigantea* behandelten Proben zeigten einen Rückgang der harzhaltigen Extraktstoffe von bis zu 61 % gegenüber unbehandelten Kontrollstämmen. Weiterhin zeigte sich, dass bei der Zerfaserung der mit *Phlebiopsis gigantea* beimpften Kiefernstämme eine Energieeinsparung bis zu 27 % erreicht werden kann. Dabei wurde ein Mahlgrad (CSF) von 100 gegenüber den nicht behandelten Proben erzielt. Im Folgeversuch wurde aus dem behandelten und zerfaserten Material Papier hergestellt. Dabei stellte man fest, dass die Bruchfestigkeit um 17 %, die Abrissfestigkeit um 20 % und die Zugfestigkeit um 13 % gegenüber dem aus unbehandeltem Holz hergestelltem Papier höher waren. Großes Interesse an einem schonend und kostengünstig delignifizierten Faserstoff besteht auch in der Landwirtschaft, die hofft, auf diese Weise bisher unzugängliche Kohlenhydratreserven in Fasern einjähriger Pflanzen als Futtermittel erschließen zu können. In zahlreichen verschiedenen Ansätzen wurden lignocellulosehaltige Rohstoffe und Zwischenprodukte des Faseraufschlusses entweder direkt mit selektierten Pilzstämmen inkubiert oder mit zellfreien Enzymextrakten behandelt. Als Ergebnis war in den meisten Fällen eine Abnahme des Ligningehaltes des Fasermaterials zu beobachten. Eine Vorbehandlung von Weizenstroh mit dem Weißfäulepilz *Lentinus edodes* ermöglichte zusätzlich eine Reduktion des Energieeinsatzes beim Faseraufschluss um 50 % bei verbesserten

Fasereigenschaften des Endproduktes (SERMANINI ET AL, 1994). Durch vorherige Inkubation mit dem Weißfäulepilz *Ceriporiopsis subvermispota* konnten ähnliche Ergebnisse auch beim Aufschluss von Pappel- und Kiefern hackschnitzel erzielt werden. (AKHTAR ET AL, 1998).

Thermomechanischer Faserstoff (TMP) konnte nach Inkubation mit Laccase oder Peroxidase ohne Zugabe weiterer Bindemittel zu mitteldichten Faserplatten verpresst werden, deren mechanische Stabilität weit über derjenigen von unbehandelten, bindemittelfreien Kontrollen lag (KHARAZIPOUR ET AL., 1997 & 1998; LUND & FELBY, 2001; FELBY ET AL., 2002, WIDSTEIN, 2002; KHARAZIPOUR, 2002). Die Ultrastruktur dieser neuen Faser-Faser-Bindung wurde bisher noch nicht untersucht. WIDSTEIN (2002) stellte fest, dass für eine gute Bindung zwischen den Fasern sowohl das Lignin der Faseroberfläche als auch die niedermolekularen Ligninbruchstücke, die während des Refiningprozesses auf der Faseroberfläche entstehen, notwendig sind.

In den genannten Untersuchungen ging es um die Verwendung des Pilzes an sich bzw. dessen Enzyme. Bis jetzt sind nur die Arbeiten von LUDWIG (2007) und KHARAZIPOUR (2005, 2006 a, 2006 b, 2006 c) bekannt, in denen versucht wurde das durch den Pilz degradierte Holz als Pflanzensubstrat und Torfersatz einer wertschöpfenden Nutzung zuzuführen. Hingegen wurden in der Vergangenheit Maßnahmen erarbeitet, um die Verbreitung und das Auftreten der Rotfäule einzudämmen bzw. zu verhindern (vgl. Kap. 2.2).

2.5 Spanplattenproduktion

In der industriellen Spanplattenproduktion sind hauptsächlich 3 Verfahren gebräuchlich. Dazu gehören das Flachpressverfahren, das Strangpressverfahren und das Kalanderverfahren. Strang- und Kalanderpresse werden fast ausschließlich zur Herstellung von Nischenprodukten, wie Röhrenspanplatten oder Dünnsplattplatten genutzt. Die Massenproduktion von Standardplatten erfolgt im Flachpressverfahren. Typisch für die heutige Spanplattenherstellung ist ein kontinuierlicher Fertigungsablauf, wobei eine endlose Spanplatte entsteht. Die Produktion einer dreischichtigen Spanplatte gliedert sich grundlegend in die aus Abbildung 2-8 ersichtlichen Fertigungsschritte.



Abbildung 2-8: Fertigungsablauf für Spanplatten nach dem kontinuierlichen Flachpressverfahren

2.5.1 Rohstofflagerung

Aufgrund wirtschaftlicher und technischer Überlegungen erfordert die Holzspanplattenproduktion eine bestimmte Lagerhaltung des Rohstoffes. Diese erfolgt in den Spanplattenwerken auf dem Holzplatz, der durch die unterschiedlichen Ausgangsmaterialien, wie Industriewaldholz, Industrierestholz und Recyclingholz gekennzeichnet ist. Eine Trennung der verschiedenen Ausgangsmaterialien auf dem Holzplatz ist notwendig, da diese über unterschiedliche Zerkleinerungsprozesse der Spanplattenproduktion zugeführt werden. Die Lagerhaltung ermöglicht es den Werken, auftretende Holzmarktveränderungen infolge von Preisschwankungen für die Ausgangsmaterialien auszunutzen. Weiterhin bildet der Holzvorrat einen Puffer, der die Weiterführung der Produktion bei Versorgungsengpässen über einen gewissen Zeitraum gewährleistet. Demgegenüber stehen einer großen Lagerhaltung einige technische Schwierigkeiten gegenüber. Diese ergeben sich hauptsächlich aus der Tatsache, dass das Holz bei längerer Lagerung stark austrocknet, wodurch die Ausbeute bei der Zerspannung erheblich gemindert wird. Es besteht auch die Gefahr der Fäulnisbildung und der Verstockung. Durch eine größere Bevorratung an Holz wird auch verstärkt Kapital gebunden. Eine Abwägung der genannten Punkte führt zu dem Ergebnis, dass größere Werke eine Lagerhaltung betreiben sollten, die eine Produktionsaufrechterhaltung von mindestens einem Monat erlaubt. Außerdem soll die gesamte Holzmenge innerhalb eines Jahres umgeschlagen werden, um Qualitätseinbußen vorzubeugen (DEPPE & ERNST, 2000).

2.5.2 Zerspannung des Holzes

Die Art der Zerspannung hängt von der gewünschten Plattenqualität, den zur Verfügung stehenden Holzsortimenten und den Produktionsbedingungen ab. Aufgrund dieser Tatsache wurden für die Spanplattenproduktion verschiedene Zerspanungsmaschinen, wie zum Beispiel Messerscheibenzerspanner oder Messerringzerspanner, entwickelt.

Zur Zerspannung werden in der Regel kürzere Rundholz-Sortimente einem Hacker zugeführt, der aus dem Vollholz Hackschnitzel produziert, die in einem darauf folgenden Arbeitsschritt zu Spänen verarbeitet werden.

2.5.3 Trocknung des Spanmaterials

Nach der Rohstoffaufbereitung wird das Spanmaterial auf einen Endfeuchtgehalt von 1,5 % bis 3 % getrocknet. Dazu sind heute Rohrbündeltrockner bzw. Röhrentrommeltrockner üblich, in denen das Material für ca. 20 Minuten bei 160 °C bis 200 °C getrocknet wird (DEPPE & ERNST, 2000).

2.5.4 Siebung und Sichtung des Spanmaterials

Da moderne Spanplatten einen dreischichtigen Aufbau aufweisen, ist es notwendig das Spanmaterial in Deck- und Mittelschichtspäne zu fraktionieren. Die einfachste Sichtung von Spänen ist die Siebung. Hierbei wird das Spangut auf Siebe mit bestimmter Maschenweite aufgebracht.

Nach der Anordnung der Siebböden kann man zwischen einer Plan- und einer Wurfsiebung unterscheiden. Bei der Plansiebung sind die Siebböden waagrecht angeordnet. demgegenüber stehen die Siebböden bei der Wurfsiebung senkrecht. Eine Kombination dieser beiden Sichtungsarten stellt die Taumelbewegung dar. In der Regel werden heute überwiegend Rollsieber oder Taumelsiebe verwendet. Aufgrund der Tatsache, dass die Siebdauer einen wesentlichen Einfluss auf das Siebergebnis hat, müsste man zur Erzielung einer für die Spanplattenherstellung erforderlichen Trennschärfe durch Siebung, einen unwirtschaftlich hohen Aufwand betreiben.

Eine wirtschaftlich tragbare Sichtung ist durch die Wurfseparierung gegeben. Bei der Wurfseparierung wird das Spangut durch eine Wurfwalze stufenlos in die einzelnen Fraktionen getrennt. Dabei hängt die Feinheit der Trennung von der Art und dem Aufbau der Wurfwalze ab. Eine große Bedeutung bei der Sichtung des Spanmaterials hat auch die Windsichtung erlangt. Hierbei wird das Spangut durch einen Luftstrom entsprechend ihrer massenspezifischen Oberfläche bewegt und somit separiert.

2.5.5 Beleimung der Späne

Das Bindemittel ist nach dem Holz der bedeutendste Rohstoff und Kostenfaktor bei der Spanplattenherstellung. Aufgrund dessen müssen die Beleimungs- und

Dosiersysteme wirtschaftlich und effektiv arbeiten. In der Geschichte der Spanplattenindustrie wurden aus diesem Grund verschiedene Beleimungssysteme entwickelt. In heutiger Zeit verwendet man bei der Beleimung des Spanmaterials überwiegend schnelllaufende, kleinvolumige Mischer.

Die Zugabe des Leimes erfolgt über von außen in den Mischertrog hineinragende Röhrchen. Beim Austritt aus diesen Röhrchen wird der Leim von den vorbeifließenden Spänen aufgenommen. Bei der folgenden Mischung des Spangutes wird der Leim durch Kontakte zwischen den einzelnen Spänen gleichmäßig auf das gesamte Spanmaterial verteilt. Dieser Vorgang wird als „Wischeffekt“ bezeichnet (DEPPE & ERNST, 2000).

2.5.6 Streuung und Formgebung

Nachdem das Spanmaterial den Beleimungsprozess durchlaufen hat, muss es im nächsten Schritt für die Heißverpressung vorbereitet werden. Da die mechanisch-technologischen Eigenschaften von Spanplatten stark durch ihre Rohdichte bestimmt werden, muss die Flächengewichtsverteilung innerhalb der Platten möglichst geringe Schwankungen aufweisen. Nur so können gleichmäßige Festigkeitseigenschaften erreicht werden.

In der konventionellen Plattenfertigung werden üblicherweise Wind- und Wurfstreuungssysteme verwendet. Bei der Windstreuung werden die aus dem Dosierbunker kommenden Späne zunächst vereinzelt. Anschließend werden die Späne gleichmäßig in den Luftstrom eingeleitet. Dieser Luftstrom führt beim Herabfallen der Späne auf das Formband zu einer derartigen Verteilung, dass die feineren Spanfraktionen die äußeren Schichten und die gröberen Späne die inneren Schichten der Spanplatte bilden. Demgegenüber wird bei der Wurfstreuung der aus dem Dosierbunker ausgetragene Spanstrom durch die Streuungselemente selbst aufgelockert. Als Streuungselemente werden rotierende Auflösewalzen verwendet. Werden die einzelnen Späne von der Walzenoberfläche geworfen, beschreiben sie in Abhängigkeit von ihrer Masse und ihrer Form einen unterschiedlichen Fallweg auf das Formband, wodurch ein bestimmter Separierungseffekt erzielt wird. Aufgrund dieses Effektes wird ein stufenloser Aufbau des Spankuchens erreicht, bei dem die feineren Späne in der Deckschicht und die gröberen Späne in der Mittelschicht liegen.

2.5.7 Verpressung

Die Verpressung des Spankuchens erfolgt überwiegend über eine kalte Vorverdichtung mit anschließender Heißverpressung. Die Vorverdichtung des Spankuchens soll dafür sorgen, dass diese möglichst unzerstört in die Heißpresse gelangen. Hinsichtlich der Arbeitsweise unterscheidet man taktweise und kontinuierlich arbeitende Vorpressen. Zu den kontinuierlich arbeitenden Vorpressen gehören die Walzen-, Band- und Plattenbandvorpressen. Die taktweise arbeitenden Vorpressen können in stationäre und bewegliche Pressen eingeteilt werden.

In der Heißpresse wird der Spankuchen unter Einwirkung von Druck, Temperatur und Presszeit verdichtet. Auch bei den Heißpressen unterscheidet man taktweise und kontinuierlich arbeitende Pressen. Die taktweise arbeitenden Heißpressen können in Ein- und Mehretagenpressen unterteilt werden.

2.5.8 Endfertigung

Die Endfertigung der Spanplatten umfasst das Konditionieren, das Besäumen, das Schleifen und das Sortieren, sowie das Zuschneiden zur Fixmaßherstellung.

Eine Reifelagerung der frisch verpressten Spanplatten ist unbedingt notwendig, da bei UF-Harz gebundenen Spanplatten bei sofortiger Einstapelung nach dem Pressen die Gefahr eines Hydrolyse-Effektes besteht. Dieser besteht aufgrund der Tatsache, dass die Harnstoff-Formaldehyd-Bindung bei Temperaturen über 70 °C, verbunden mit einer bestimmten Feuchte, ihre Festigkeit zu einem bestimmten Teil einbüßt. Dieser Effekt kann zu einem Rückgang der Querkzugfestigkeit der Platten um mehr als 40 % führen. Bei Spanplatten mit kochfester Verleimung ist diese Erscheinung nicht nachweisbar. Ein weiterer Grund für eine Reifelagerung ist die ungleichmäßige Feuchteverteilung in den Platten. So nehmen die nach dem Verpressen übertrockenen Deckschichtlagen bei der Abkühlung Feuchtigkeit aus der Umgebungsluft und aus der Mittellage auf. Demgegenüber besteht in der Mittellage ein Feuchtestau. Dieser wird mit zunehmender Abkühlung abgebaut, so dass die Platten nach der Abkühlung in der Mittelschicht trockener als in der Deckschicht sind. Aufgrund dieses Effektes tritt in der Mittellage ein Volumenschwund ein. Die Plattenränder quellen aufgrund der Feuchtigkeitsaufnahme dagegen an. Somit entsteht in der Platte eine Spannungsdifferenz zwischen Deck- und Mittellage. Die

Platte bleibt nur dann formstabil, wenn die Spannungen zwischen Ober- und Unterschicht gleich sind. Ist dies nicht der Fall, führen die auftretenden Spannungen zu irreversiblen Verziehungen der Platte. Zur Steuerung dieses Prozesses werden in der Spanplattenindustrie Kühlwender eingesetzt.

Aufgrund des fächerartigen Aufbaus dieser Wender hat die Luft allseitig freien Zugang zu den heißen Platten, so dass die hohen Temperaturen von der Plattenoberfläche schnell und gleichmäßig abgeführt und somit Verwerfungen vermieden werden. Nach der Abkühlung werden die Platten besäumt. Zum Besäumen werden Sägen verschiedener Ausführungen verwendet. Um eine optimale Oberflächenqualität zu erreichen, werden die Spanplatten beidseitig geschliffen. Nach dem Schleifen erfolgt eine automatische Dickenkontrolle der Rohplatten. Anschließend werden die Platten überwiegend auf Standardabmessungen zugeschnitten und an die Verbraucher ausgeliefert.

2.6 Faserplattenproduktion

Die natürlichen Fasern im Holz werden vom Menschen auf vielfältige Weise genutzt. Die Schwerpunkte sind hierbei die Herstellung von Papier und Faserplatten. Für die Herstellung beider Produktionslinien müssen die Holzfasern jedoch zuvor mit technisch aufwendigen Methoden voneinander getrennt werden. Für die Bereitstellung von Faserstoff für die Faserplattenindustrie werden im thermomechanischen Aufschluss (TMP) hoher Druck, hohe Temperaturen und Scherkräfte eingesetzt, um das Mittellamellen-Lignin zu plastifizieren und die Holzfasern voneinander zu trennen. Die Energiekosten für die Faserauftrennung stellen den größten Einzelposten in der Kalkulation der Herstellungskosten dar.

Bei der Produktionstechnologie und dem Verfahrensablauf zur Faserplattenherstellung können grundsätzlich drei Verfahrensvarianten unterschieden werden. Diese Verfahren sind:

- Nassverfahren
- Trockenverfahren
- Halbtrockenverfahren

ALLGEMEINER TEIL

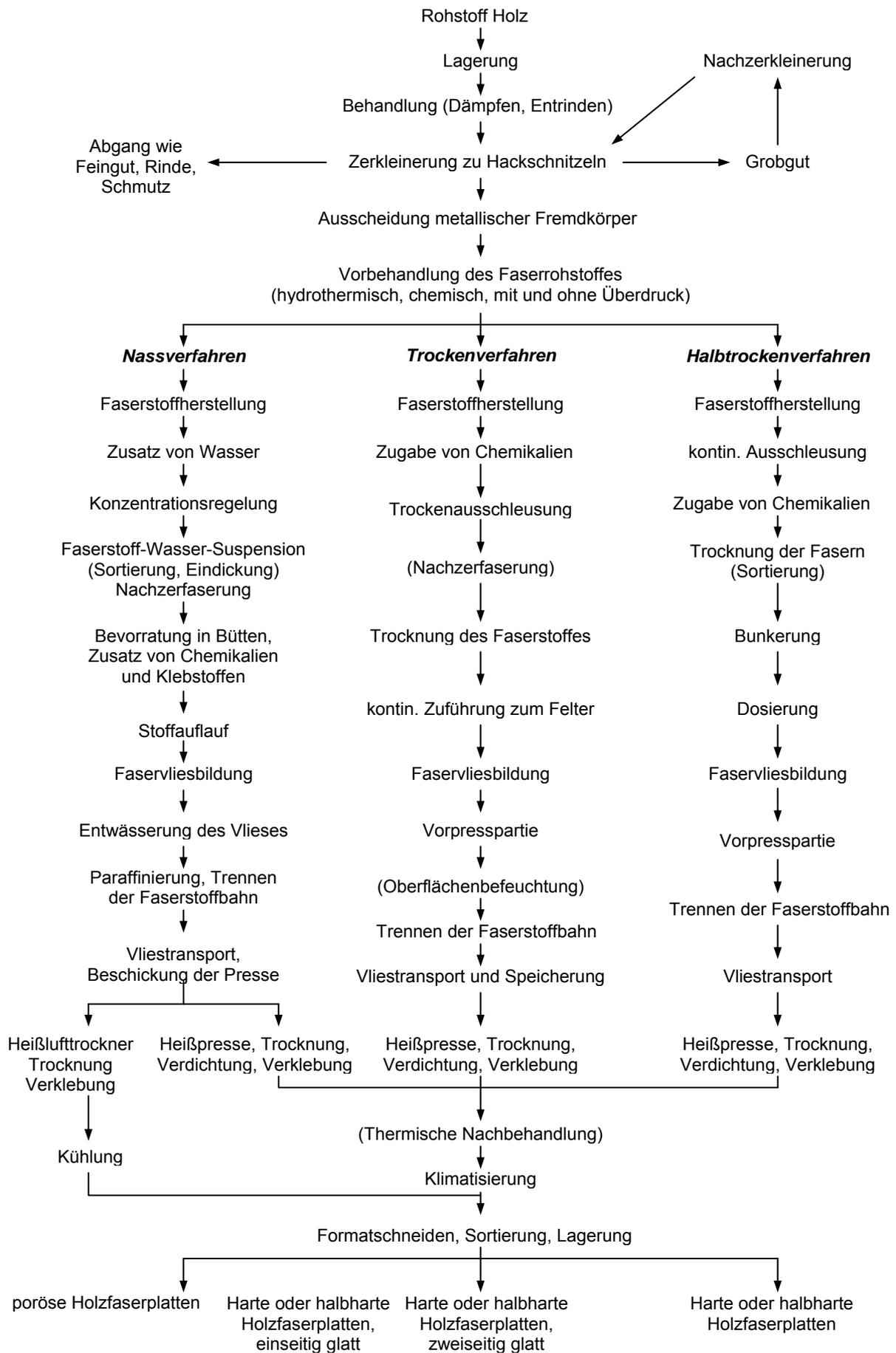


Abbildung 2-9: Schema der Herstellung von Holzfaserplatten (LAMPERT, 1966)

Die Unterschiede zwischen den drei Verfahren liegen in der Verpressung bzw. der Trocknung des Faservlieses. Die Hauptarbeitsstufen sind bis zur Vliesbildung bei allen Verfahrensvarianten gleich. Erst nach der Vliesbildung muss eine auf das Endprodukt ausgerichtete Behandlung durchgeführt werden. Ein wesentlicher Unterschied zwischen den oben genannten Verfahren liegt im Feuchtigkeitsgehalt der Fasern vor und während der Vliesbildung. Die grundsätzlichen Arbeitsstufen zur Herstellung von Faserplatten sind in Abbildung 2-9 dargestellt.

2.6.1 Aufschlussverfahren von Holz zur Faserstoffherstellung

Faserstoff ist die Bezeichnung für ein Material, das man erhält, wenn Holz oder andere lignocellulosehaltige Rohstoffe in die Grundelemente ihrer Zusammensetzung, d. h. in einzelne Fasern oder Faserbündel, aufgelöst werden. Die heute noch gebräuchlichen Methoden zur Herstellung von Faserstoff gehen auf die Verfahren von MASON und ASPLUND zurück.

Beim Masoniteverfahren geht das Holz vorzerkleinert in Holzstücke oder Hackschnitzel in das Verfahren ein. Laubholz eignet sich aufgrund der kürzeren Fasern gegenüber Nadelholz weniger gut. Die Hackschnitzel werden in Silos durch Wasserbenetzung auf eine mittlere Feuchtigkeit von 50 % – 60 % gebracht. Aus dem Silo gelangen die Hackschnitzel in die sogenannte Mason-Kanone. Die Mason-Kanone ist ein Explosionsgefäß mit einem Inhalt von ca. 300 Litern. Nach der Füllung wird die Kanone über Ventile luftdicht verschlossen und unter hohem Druck (bis 70 bar) gesetzt und auf Temperaturen bis 300 °C erhitzt. Durch ein plötzliches Öffnen des Bodenventils wird der Druck schlagartig herabgesetzt. Durch die explosionsartige Entspannung und den Aufschlag auf ein Auffangsieb lösen sich die Fasern und Faserbündel aus ihrem Verband. Übrig bleibt eine filzige, moosartige Masse, der Faserstoff. Charakteristisch für dieses Verfahren ist eine Deformierung von Einzelfasern und Zellelementen indem durch Aufplatzen und damit gleichzeitiges Aufstülpen der Fasern und Zellschichten der schlauchartige Charakter der Fasern verloren geht. Die Ausbeute bei dem Masonite-Verfahren liegt bei ca. 84 %. Im Wesentlichen setzen sich die Verluste aus den Reaktionsprodukten bei der Dampf-Druck-Behandlung (Essig-, Ameisensäure und Kohlenstoffdioxid) und dem wasserlöslichen Anteil der Hemicellulosen bei der Waschung des Stoffes zusammen.

Bei Asplund- oder Defibrator-Verfahren wird das Hackgut zunächst in 160 bis 180 °C heißem Wasser bei einem Druck von 8 – 11 bar aufgeschlossen, um die Mittellamelle zu erweichen (DEPPE & ERNST, 1996). Anders als beim Masonite-Verfahren werden bei der Defibratormethode bedingt durch die milderen Aufschlussbedingungen, keine Zellen zerstört. Danach werden die eingeweichten Holzstücke zwischen zwei Mahlscheiben eines Defibrators zerfasert. Im Defibrator herrscht ein konstanter Druck von 11 bar. Der Faserstoff, den man nach diesem Verfahren erhält, hat weniger chemische Veränderungen durchlaufen als es beim Masonite-Verfahren der Fall ist. Die Verluste sind geringer und die Ausbeute ist dadurch höher. Durch die geringeren Temperaturen erhält man einen helleren Faserstoff.

2.6.2 Nassverfahren

Beim Nassverfahren wird das Faservlies aus Nadelholzfaserstoff hergestellt. Der Feuchtegehalt des Faservlieses liegt zwischen 150 % und 300 % bezogen auf trockene Faser. Da die Vliesbildung mit Hilfe von Wasser erfolgt, kommt es zu diesem hohen Feuchtegehalt (LAMPERT, 1966). Mit diesem hohen Feuchtegehalt wird das Faservlies bei 180 °C – 205 °C mit einem Pressdruck von $49 \times 10^5 \text{ N/m}^2$ verpresst. Damit das Wasser beim Heißpressen besser entweichen kann, wird auf einer Seite der Faserplatte ein Sieb eingesetzt. Nach dem Nassverfahren hergestellte Faserplatten weisen aus diesem Grund immer die charakteristische Siebrückseite auf. Der hohe Wasserverbrauch und die damit verbundenen Abwasserreinigungskosten sind als erhebliche Nachteile des Nassverfahrens zu nennen.

2.6.3 Trockenverfahren

Beim Trockenverfahren erfolgt die Streuung des Faservlieses mittels Luft oder anderer mechanischer Mittel. Auf Grund der kurzen, schlanken Fasergeometrie wird vorwiegend Laubholzfaserstoff von Laubhölzern mit höherer Rohdichte eingesetzt. Laubholzfaserstoffe eignen sich besser für die pneumatische Förderung als die langen Nadelholzfaserstoffe. Bei der Verpressung besitzt das Faservlies einen Feuchtegehalt von 5 % - 10 %. Die Presstemperaturen liegen zwischen 180 °C und 260 °C. Es wird mit einem Pressdruck von 6×10^5 bis $25 \times 10^5 \text{ N/m}^2$ gearbeitet (LAMPERT, 1966).

Aufgrund heutiger Bestimmungen, wie beispielsweise der karzinogenen Einstufung von Eichen- und Buchenstaub, werden jedoch hauptsächlich Nadelholzfaser eingesetzt. Ausnahmen stellen geringe Beimischungen von maximal 20 % von Faserstoffen der Baumarten Buche, Eiche und Birke dar.

2.6.4 Halbtrockenverfahren

Beim Halbtrockenverfahren handelt es sich um eine Kombination aus Trocken- und Nasserverfahren. Dies zeigt sich darin, dass das Faservlies, wie beim Trockenverfahren, über Luft oder andere mechanische Mittel gestreut wird. Der Feuchtegehalt des Vlieses ist mit 12 % - 45 % jedoch höher als beim Trockenverfahren. Die Presstemperaturen und Pressdrücke liegen im gleichen Bereich wie beim Trockenverfahren. Die nach dem Halbtrockenverfahren hergestellten Faserplatten weisen auch die sog. „Siebrückseite“ auf, da auch hier ein Sieb zur besseren Wasserdampfabfuhr verwendet wird (LAMPERT, 1966).

3 Material und Methoden

In diesem Abschnitt sind sämtliche für diese Arbeit verwendeten Ausgangsrohstoffe, Bindemittel und Zuschlagstoffe beschrieben. Es folgt eine kurze Übersicht, über Geräte und Hilfsmittel die zur Herstellung von Span- und Faserplatten im Labor- und Pilotmaßstab Verwendung fanden. Anschließend werden die Verfahrensweisen der Herstellung und die Plattenzusammensetzungen der erzeugten Spanplatten und MDF beschrieben. Abschließend sind die zur Prüfung der hergestellten Holzwerkstoffe relevanten Prüfanweisungen und Normen aufgeführt.

3.1 Ausgangsmaterial

Als Ausgangsmaterial für die Herstellung der Span- und Faserplatten wurden ausschließlich rotfaule Stammstücke der Baumart Fichte (*Picea abies* (L.)) verwendet. Das Holz wurde vom NIEDERSÄCHSISCHEM FORSTAMT REINHAUSEN zur Verfügung gestellt. Dabei handelte es sich um die durch „Gesundschneiden“ auf der Waldfläche verbliebenen Erdstammstücke. Die verschiedenen Abschnitte wiesen sehr unterschiedliche Befallstärken auf.



Bild 3-1: Fichtenholzabschnitte mit weit fortgeschrittener Holzzersetzung durch *Heterobasidion annosum* (Foto: BOHN, 2004)

Bild 3-1 und Bild 3-2 zeigen unterschiedliche Befallsstadien von einigen Abschnitten. Das Ausgangsmaterial wurde zum WILHELM-KLAUDITZ-INSTITUT FÜR HOLZFORSCHUNG nach Braunschweig transportiert und dort mittels eines Spalters der Marke

„KRETZLER Spaltknecht SK/900/13“ grob vorzerkleinert und anschließend mit einem Trommelhacker der Marke „KLÖCKNER 120 x 400H2WT“ zu Hackschnitzeln verarbeitet. Danach wurden die Hackschnitzel entweder der Zerspannung oder der Zerfaserung zugeführt.



Bild 3-2: Fichtenabschnitte mit leichtem Befall durch Rotfäule (Foto: BOHN, 2004)

3.1.1 Spanmaterial

Für die Herstellung der Referenzplatten wurde industriell aufbereitetes Spanmaterial der PFLEIDERER INDUSTRIE GmbH verwendet. Die Späne wurden im Spanplattenwerk Gütersloh nach der Trocknung, Siebung und Sichtung von den Bandwaagen und unmittelbar vor der Beleimung entnommen. Die getrockneten Späne wurden in stabile Plastiksäcke gegeben und Luftdicht verpackt um ein Ansteigen der Spanfeuchte zu verhindern.

Tabelle 3-1: Durchschnittlicher Rohstoffmix des industriell aufbereiteten Spangutes

Rohstoffart	Massenanteil [%]
Waldindustrieholz	30,2
Sägenebenprodukte	21,6
Gebrauchtholz	45,2
Sonstige Sortimente	3,0

Das Material setzt sich aus den in Tabelle 3-1 aufgeführten Rohstoffsortimenten zusammen und ist prozessbedingt in Deck- und Mittelschichtfraktion unterteilt (Bild 3-3).



Bild 3-3: Deckschichtspäne (links) und Mittelschichtspäne (rechts) aus dem Spanplattenwerk Gütersloh (Foto: BOHN, 2004)

Für die Spanplattenherstellung im Technikum wurde Spangut aus rotfauler Fichte verwendet (Bild 3-4), das im WILHELM-KLAUDITZ-INSTITUT FÜR HOLZFORSCHUNG (WKI) Braunschweig mittels eines Messerringzerspanners der Marke „CONDUX HS 350“ mit einem Messervorstand von 0,45 mm zerspant wurde.

Das Spanmaterial wurde nach der Trocknung mit Hilfe eines Taumelsiebes der Marke „ALLGAIER TSM 1200/4“ in fünf Fraktionen getrennt. Dazu standen vier Siebe mit Maschenweiten von 5,0 mm, 3,15 mm, 1,25 mm und 0,60 mm zur Verfügung. Das Spanmaterial wies eine Feuchte von 2,5 % – 4 % (atro Span) auf und zeichnete sich durch einen sehr geringen Staubanteil aus.



Bild 3-4: Siebanalyse: Spanmaterial aus rotfauler Fichte; ungesiebt (o. li.), nach Siebanalyse in den Fraktionen: o. re. < 0,6 mm; Mitte li. < 1,25 mm; Mitte re. < 3,15 mm; u. li. < 5,0 mm; u. re. > 5,0 mm (Foto: BOHN, 2004)

3.1.2 Fasermaterial

Das für die MDF-Herstellung im Technikum verwendete Fasermaterial aus rotfaulem Fichtenholz (Bild 3-5 links) wurde im WKI Braunschweig mittels eines ANDRITZ-SPROUT-BAUER 12"-Laborrefiners aufgeschlossen. Die Aufschlussbedingungen sind in Tabelle 3-2 detailliert aufgeführt.

Tabelle 3-2: Aufschlussbedingungen der rotfaulen Fichtenfasern

Einspeisung	mittels MSD
Temperatur	150 °C
Dampfdruck	5,4 bar
Kochzeit	5 min
Drehzahl	3000 1/min
Trocknung	Rohrtrockner
Restfeuchte	8,0 %

Das Fasermaterial aus rotfauler Fichte wurde aus Gründen der Logistik um den Faktor vier verdichtet.



Bild 3-5: Faserstoff aus rotfaulem Fichtenholz, nativ und aufgelockert (li.); Faserstoff der Firma STEICO (re.), nativ und aufgelockert (Foto: BOHN, 2004)

Zur Herstellung der Referenzplatten wurde Fasermaterial der Firma STEICO verwendet. Der Faserstoff besteht zu 80 % aus Kiefernfasern und zu 20 % aus Buchenfasern und steht in einem verdichteten Zustand zur Verfügung. Dieses Material weist eine deutlich dunklere Farbe auf als das Fasermaterial aus rotfaulem Fichtenholz (Bild 3-5 rechts).

3.1.3 Bindemittel

Als Bindemittel zur Spanplattenherstellung wurde eine wässrige Lösung eines Harnstoff-Formaldehyd-Kondensationsproduktes der Marke „KAURIT[®] 350 flüssig“ der BASF AG Ludwigshafen mit einem Feststoffgehalt von ca. 68 % verwendet. Weiterhin kam das Melamin-Harnstoff-Formaldehyd-Harz (MUF-Harz) „KAURAMIN[®] 620 flüssig“ der BASF AG mit einem Feststoffgehalt von ca. 68 % zum Einsatz. Als Phenol-Formaldehyd-Harze zur Spanplattenherstellung wurden die Produkte „1842 HW“ für die Mittelschicht und „2506 HW“ für die Deckschicht mit Feststoffgehalten von 45 % der Fa. BAKELITE Iserlohn verwendet.

Als Naturnahes Bindemittel wurde ein Mischkondensat, bestehend aus dem oben genannten UF-Harz „K 350“ und Weizenquellwasser, einem Nebenprodukt bei der Stärkeherstellung, der Fa. CARGILL Barby mit einem Feststoffgehalt von 50 % verwendet. Diese beiden Bindemittelbestandteile wurden im Verhältnis 80 % / 20 % (UF-Harz / Weizenquellwasser), beides bezogen auf den Feststoffgehalt der jeweiligen Bindemittelkomponente, mechanisch vermischt und als Bindemittelflotte eingesetzt.

Zur Faserplattenherstellung kamen das UF-Harz der Marke „KAURIT[®] 404 flüssig“, und das MUF-Harz „KAURAMIN[®] 627 flüssig“ der BASF AG sowie das zuvor beschriebene Weizenquellwasser der Fa. CARGILL zum Einsatz. Auch bei diesen konventionellen Bindemitteln handelt es sich um eine wässrige Lösung eines Harnstoff-Formaldehyd-Kondensationsproduktes und um ein melaminverstärktes UF-Harz mit einem Feststoffanteil von jeweils ca. 68 %. Das Weizenquellwasser wurde wiederum als Bindemittelkomponente für ein Mischkondensat mit dem UF-Harz „K 404“ mit einem Massenanteil von 20 % bezogen auf den Feststoffgehalt genutzt. Zur Faserplattenherstellung wurde weiterhin das PF-Harz vom Typ 1808 HW der Fa. BAKELITE Iserlohn mit 29 % Feststoffgehalt eingesetzt.

3.1.4 Hilfs- und Zuschlagstoffe

Als Härtingsbeschleuniger für MUF- und UF-Harze wurde eine 33 %ige wässrige Ammoniumsulfatlösung ((NH₄)₂SO₄) verwendet. Für PF-Harze kam eine 50 %ige Kaliumcarbonatlösung (K₂CO₃) als Härtingsbeschleuniger zum Einsatz.

Als Hydrophobierungsmittel diente eine Emulsion auf Paraffinbasis der Marke „HYDROWAX 138[®]“ und HYDROWAX 730[®]“ der Firma SASOL Hamburg mit einem Feststoffgehalt von ca. 60 %.

3.2 Technische Geräte zur Spanplattenherstellung im Labormaßstab

3.2.1 Beleimungstrommeln

Für die Beleimung der Späne standen zwei unterschiedlich große Beleimungstrommeln zur Verfügung. Beide Trommeln werden jeweils von einem Elektromotor betrieben. Die Kraftübertragung vom Motor zur Trommel erfolgt über Keilriemen. In der Beleimungstrommel mit dem geringeren Volumen werden die DS-Späne und in der mit dem größeren Volumen die MS-Späne beleimt. Die Rotationsrichtung erfolgt jeweils im Uhrzeigersinn.

3.2.2 Beleimungspistole

Die eigentliche Beleimung erfolgte über eine aus mehreren Bestandteilen bestehende Beleimungspistole der Firma WALTHER PILOT Wuppertal. Das Bindemittel befand sich in einem auf der Pistole aufgeschraubten Becher. In der Beleimungspistole wird das Bindemittel durch Druckluft zur Beleimungsdüse bewegt. Beim Austritt aus der Düse wird es durch einen zweiten Druckluftstrahl verstäubt. Der Druck, mit dem das Bindemittel durch die Beleimungsdüse gepresst wird, ist an einem Manometer einstellbar. Die Qualität der Beleimung lässt sich über die Wahl der Beleimungsdüse beeinflussen. Für die dünnflüssigen UF-Harze wird eine Beleimungsdüse mit einem Öffnungsdurchmesser von 1,5 mm verwendet.

3.2.3 Laborheißpresse

Bei der Heißpresse der Firma SIMPELKAMP Krefeld handelt es sich um eine hydraulische Ein-Etagen Unterkolbenpresse. Die Pressplatten haben ein Format von 600 mm × 800 mm. Die Heizplatten im Obertisch und Untertisch sind elektrisch auf bis zu maximal 250 °C beheizbar. Der Presskolben hat einen Durchmesser von 300 mm und leistet einen hydraulischen Arbeitsdruck von max. 283 bar bei einer Gesamtpresskraft von 200 kN. Der spezifische Druck auf der gesamten Pressfläche beträgt somit max. 417 N/cm². Die Presse wird sowohl für die Herstellung von Spanplatten im Labor- und Pilotmaßstab, als auch für die Verpressung von MDF genutzt.

3.3 Technische Geräte zur Spanplattenherstellung im Pilotmaßstab

3.3.1 Mischerzuführband

Die gleichmäßige und kontinuierliche Beschickung des Beleimungsmischers wird über ein frequenzgesteuertes Zuführband der Fa. RAU MASCHINENBAU GmbH Kornwestheim sichergestellt. Das Band ist ca. 25 cm breit und 150 cm lang. Über der einen Seite des Bandes befindet sich ein Trichter, in dem das Spanmaterial eingefüllt wird. Am Austrag des Trichters auf das Band befindet sich ein höhenverstellbarer Schieber, mit dem der kontinuierliche Spanstrom in den Mischer, auf eine gleichbleibende Menge begrenzt wird. Eine weitere Mengenregulierung ist über die frequenzgesteuerte Bandgeschwindigkeitsregelung möglich.

3.3.2 Beleimungsmischer

Der stationäre Mischer der Fa. DRAIS Mannheim mit einem maximalen Durchsatz von ca. 500 kg/h besteht aus einem zu öffnenden Gehäuse und einer in dem Gehäuse gelagerten Mischerwalze. Das Gehäuse des Beleimmischers besteht aus einem doppelten mit Kühlwasser befüllbarem Stahlmantel. Der Mischer wird über einen frequenzgesteuerten Motor mit Keilriemenantrieb betrieben. Die gewünschte Mischergeschwindigkeit ist über das Schaltpult regelbar. Das Spanmaterial gelangt über einen Trichter in den Einfallschacht des Mixers (Einzugszone) und wird mittels der Welle durch den Mischer transportiert. Im Deckel des Mixers, auf Höhe

der Beleimungszone, befindet sich ein Loch, durch das die Zweistoffdüse der Beleimpumpe eingelassen wird. Damit wird garantiert, dass die Späne nach der Beleimung durch die sich drehende Mischerwelle gleichmäßig mit dem Bindemittel vermengt werden. Am Ende der Welle befindet sich eine Austrittsöffnung, durch den das Spanmaterial aus dem Mischer auf das Zuführbandsystem gelangt.

3.3.3 Leimpumpe

Zur Beleimung des Spanmaterials steht eine elektrisch betriebene rotierende NEMO[®] - Verdrängerpumpe der Firma NETZSCH, Selb zur Verfügung. Die Leimpumpe lässt den Einsatz unterschiedlich viskoser Bindemittel zu.

Die Hauptteile dieser Verdrängerpumpe sind ein rotierendes Teil, der „Rotor“ und ein feststehendes Teil, der „Stator“. Bei dem Rotor handelt es sich um eine Gewindeschraube mit extrem großer Steigung, großer Gangtiefe und kleinem Kerndurchmesser, mit rundem Querschnitt (1/2 – gängig) oder mit elliptischen Querschnitt. (2/3 – gängig). Der Stator hat zwei bzw. drei Gewindegänge und die doppelte bzw. 1,5 – fache Steigungslänge des Rotors. Dadurch bleiben zwischen dem Stator und dem Rotor Förderräume. Diese bewegen sich kontinuierlich von der Eintritts- zur Austrittsseite, wenn der Rotor im Stator umläuft. An der Eintrittsseite befindet sich ein mit Bindemittel gefüllter Trichter, an der Austrittsseite ein Schlauch mit einer Zweistoffdüse, durch die das Bindemittel im Mischer auf das Spanmaterial aufgetragen wird.

3.3.4 Zuführbandsystem

Das Zuführbandsystem besteht aus einem Transportband und Bunkerzuführband. Mit dem Transportband werden die beleimten Späne auf die Höhe des Bunkerzuführbandes befördert. Das Bunkerzuführband kann in beide Richtungen gefahren werden. Somit können die beleimten Deck- oder Mittelschichtspäne dem jeweiligen Bunker zugeführt werden.

3.3.5 Mittelschichtspanbunker mit Streueinrichtung

Der Mittelschichtbunker der Fa. SST FÖRDERSYSTEME GmbH Straubing fasst ca. 100 kg beleimte Mittelschichtspäne. Der Dosierbunker besteht aus einem 80 cm breiten, 170 cm langen, frequenzgesteuerten Dosierband und einem Kratzer, der einen gleichmäßig hohen Mittelschichtspankuchen auf dem Dosierband bildet. Das Dosierband befördert diesen Spankuchen in Richtung der Abwurfwalze, welche die Mittelschichtspäne gleichmäßig auf die darunter liegenden 2 Streuwalzen wirft. Die beiden gegenläufigen Streuwalzen teilen diesen Spanstrom auf, um eine gleichmäßigere Verteilung der Späne auf dem darunter befindlichen Formband zu gewährleisten.

3.3.6 Deckschichtspanbunker mit Streukopf

Die Deckschichtstreueinrichtung der Fa. BINOS GmbH Springe besteht ebenfalls aus einer Bunker- und einer Streueinheit. Der Deckschichtbunker ähnelt in der Funktionsweise dem Mittelschichtbunker (vgl. Kap. 3.3.5). Der Deckschichtstreukopf besteht aus 4 genuteten frequenzgesteuerten Streuwalzen, die den Spanstrom nach der Spangröße in 4 Materialströme separieren. Durch die Drehgeschwindigkeit der Walzen kann dieser Separierungseffekt gesteuert werden. Dadurch ist eine sehr feine und homogene Struktur der Plattenoberfläche zu erreichen, da die feinsten Spanfraktionen der Deckschichtspäne sich im äußeren Bereich der Platte befinden.

3.3.7 Formband

Das Formband der Fa. SST FÖRDERSYSTEME GmbH Straubing befindet sich unter dem Deck- und Mittelschichtstreukopf. Das Band ist 80 cm breit, 11 m lang und in beide Richtungen beweglich. Sowohl die Bandlaufrichtung als auch die Bandgeschwindigkeit ist über das Bedienerpult steuerbar. Auf das Formband können bis zu 6 Pressbleche mit Streukästen im Format 705 mm x 465 mm aufgelegt werden, in die der Spankuchen hineingestreut wird. Die Spanmenge der Deck- und Mittelschicht und somit auch die Rohdichte der zu fertigenden Spanplatte wird über die Bandgeschwindigkeit gesteuert, mit der die Streukästen unter den jeweiligen Streuköpfen hindurch gefahren werden.

3.4 Technische Geräte zur Faserplattenherstellung

3.4.1 Muldengurtförderer

Mit dem Muldengurtförderer wird das Fasermaterial von der Faseraufgabe zum Mischer transportiert. Das Band ist mit Mitnehmern aus Gummi versehen. Das Förderband hat mit den Maßen (Länge / Breite / Tiefe) 6000 mm x 400 mm x 170 mm ein Volumen von 0,408 m³. Angetrieben wird der Förderer von einem frequenzgesteuerten Getriebemotor. Um eine kontinuierliche, definierte Materialzuführung zum Mischer sicherzustellen, ist die Bandgeschwindigkeit am Steuerpult regelbar.

3.4.2 Mischer

Der stationäre Mischer der Fa. BINOS GmbH Springe ist eine Ausführung des BINOS-Trockenbeleimungssystems im Pilotmaßstab. In diesem seitlich offenen Mischer werden die Fasern in einem Warmluftstrom versetzt und mit einem Bindemittelnebel effizient und gleichmäßig beleimt. Dadurch sind im Vergleich zum herkömmlichen Blow-Line-Verfahren geringere Beleimungsgrade bei identischen mechanisch-technologischen Platteneigenschaften zu realisieren.

Die Mischereinheit besteht aus dem zu öffnenden, seitlich offenen Mischergehäuse und einer in dem Gehäuse gelagerten Stachelwalze. Das Gehäuse des Beleimmischers besteht aus einem doppelten mit Kühlwasser befüllbarem Stahlmantel. Durch die offene Seite werden die warme Luft und der Bindemittelnebel in das Mischerrinnere gegeben. Der Mischer wird über einen frequenzgesteuerten Motor mit Keilriemenantrieb betrieben. Die gewünschte Mischergeschwindigkeit ist über das Schalterpult regelbar. Das Fasermaterial gelangt über einen Trichter in den seitlich offenen Einfallschacht des Mischers (Einzugszone) und wird mittels des Luftstromes durch den Mischer transportiert. Damit wird garantiert, dass die Fasern nach der Beleimung durch die sich drehende Mischerwelle gleichmäßig mit dem Bindemittel vermengt werden. Am Ende der Welle befindet sich eine Austrittsöffnung, durch den das Fasermaterial aus dem Mischer mittels der Sogwirkung des Ventilators heraustransportiert und in die Rohrtrocknerleitung überführt wird.

3.4.3 Leimpumpe

Zur Beleimung des Fasermaterials steht ebenfalls eine NEMO[®] - Verdrängerpumpe der Firma NETZSCH Selb zur Verfügung (vgl. Kap.3.3.3).

3.4.4 Rohrtrockner

Der für Versuchszwecke verwendete Rohrtrockner ist mit einem gasbetriebenen Brenner kombiniert. Hinter der Brennkammer ist eine ca. 15 cm dicke Stichleitung angebracht, durch die das Fasermaterial aus dem Mischer in die Rohrtrocknerleitung gelangt. In der mit Blechen verkleideten Rohrtrocknerleitung wird das Fasermaterial getrocknet und mit Hilfe eines Ventilators zum Zyklon transportiert. An der Rohrtrocknerleitung sind am Trocknereintritt und am Trockneraustritt Temperaturfühler angebracht, um die Trocknungstemperaturen regeln und überwachen zu können.

3.4.5 Hochleistungszyklon

Der Zyklon besteht aus 3 mm starkem Blech und ist auf einem Profilstahlgerüst befestigt. Unter dem Zyklon befindet sich eine Zellradschleuse, durch die das gesammelte und getrocknete Fasermaterial auf das Speicher- und Zuführband aufgegeben wird. Das Luftsystem wird dabei geschlossen gehalten. Der Materialdurchsatz der 150 mm breiten und 30 m langen Rohrtrocknerleitung ist nach Herstellerangabe auf ca. 100 kg/h atro ausgelegt.

3.4.6 Speicher- und Zuführband

Auf dem Speicher- und Zuführband der Fa. BINOS GmbH Springe wird das aus dem Zyklon kommende Fasermaterial gespeichert und mit Hilfe von Mitnehmern zum Dosierbunker befördert. Vor den Dosierbunker ist ein Austragsrechen geschaltet, um eine gleichmäßige Übergabe des Fasermaterials an den Dosierbunker zu gewährleisten. Das Band ist 800 mm breit, läuft auf einer selbsttragenden Konstruktion und wird mit einer Antriebsstrommel, einer Spannrolle und sechs unterstützenden Wellen betrieben. Der Achsabstand der Antriebs- und

Spanntrommel beträgt 11.000 mm. Das Nutzvolumen des Speicher- und Förderbandes liegt bei ca. 3 m³.

3.4.7 Dosierbunker mit Rückstreifrechen

Der Dosierbunker der Fa. BINOS GmbH Springe besteht aus einem Profilstahlrahmen mit Blechwänden und einer Abdichtung zum Dosierband. Das vom Speicher- und Zuführband kommende Fasermaterial wird durch den Rückstreifrechen, bestehend aus fünf Walzen gleichmäßig im hinteren Ende des Bunkers verteilt. Das ist von besonderer Bedeutung, da die Art der Verteilung der Fasern im Bunker über dem Dosierband ausschlaggebend für die spätere Qualität des gestreuten Faservlieses ist. Der Bunker hat mit den Maßen 3.500 mm x 800 mm x 1.100 mm und der um 45° abgeschrägten Austragsfront ein Nutzvolumen von ca. 3 m³.

Das Dosierband befördert das Fasermaterial zur Austragsfront, wobei die Austragsmenge über die Dosierbandgeschwindigkeit am Steuerpult zu regeln ist. Fünf Profilwalzen, angebracht unter einem Winkel von 45°, mit je 235 mm Durchmesser, bilden die Austragsfront. Da die Profilwalzen frequenzgeregelt sind, lässt sich für jede Walze eine exakte Geschwindigkeit am Steuerpult einstellen. Durch die mit Messerscheiben bestückten Profilwalzen wird das Fasermaterial aufgelockert und gleichmäßig zum Faserstreukopf transportiert.

3.4.8 Faserstreukopf

Der Faserstreukopf besteht aus einem höhenverstellbaren, schräg angeordneten Walzenbett in einer Rahmenkonstruktion mit Seitenwänden aus Blech. Sechs Stachelwalzen und ein Rückstreifrechen, jeweils betrieben durch Aufsteckgetriebemotoren, bilden das Walzenbett. Aus den Fasern wird durch das Walzenbett ein gleichmäßiges Faservlies mit einer Breite von 800 mm auf dem Formband gestreut. Dabei sorgt der manuell durch Gewindespindeln höhenverstellbare Rückstreifrechen für eine gleichmäßige Höhe des Faservlieses.

Die Geschwindigkeit jeder einzelnen frequenzgesteuerten Stachelwalze ist am Steuerpult einstellbar. Der mit einer Leistung von 0,75 kW angegebene Rückstreifrechen ist ebenfalls frequenzgeregelt und lässt sich vom Steuerpult aus bedienen.

3.4.9 Formband

Auf dem 900 mm breiten Formband entsteht das durch den Streukopf gestreute Faservlies in einer Streubreite von 800 mm. Dabei ist die Höhe des Faservlieses abhängig von der eingestellten Geschwindigkeit des Formbandes und der Höhe des Rückstreifrechens. Die Fasern werden direkt auf das Formband gestreut. Nach dem Vorverdichten des Faservlieses werden die Platten mit Hilfe einer Luftdruckpistole aus dem Vlies geschnitten und diese anschließend auf Aluminiumpressbleche geschoben. Das Formband ist außen mit 20 mm starken, beschichteten Spanplatten begrenzt, die ein Abbrechen bzw. Ankleben des Vlieses verhindern.

Das Formband wird über einen 800 mm hohen Tisch, bestehend aus zwei Spanplatten sowie zwei Stahlplatten als Untergrund für die Vorpresse, gezogen und besitzt eine Antriebsrolle und eine Spannrolle. Der Abstand zwischen den Trommeln beträgt 12.000 mm. Der Aufstecktriebemotor für den Bandantrieb arbeitet mit 4,0 kW und wird vom Steuerpult aus betrieben.

3.5 Analytische Geräte

3.5.1 pH-Meter

Der pH-Wert des Faserstoffes und des Spanmaterials wird mit einem Microprocessor pH Meter „pH 535 MultiCal“ der Firma WTW, Weilheim bestimmt.

3.5.2 Feuchtemessgerät

Der Feuchtegehalt der Späne wird mit dem elektronischen Feuchtemessgerät „Electronic Moisture Analyzer MA 30“ der Firma SATORIUS, Göttingen bestimmt. Von jeder Probe werden fünf Messungen durchgeführt, aus denen ein Mittelwert errechnet wird. Der Feuchtegehalt wird bezogen auf trockene Holzmasse in Prozent angegeben.

3.5.3 Rohdichteprofilmessgerät DA-X

Das Labor-Dichtemessgerät DA-X der Firma GRECON, Alfeld arbeitet mit einem auf Röntgentechnik basierenden, berührungslosen Messverfahren. Zur Aufnahme der Dichteverteilung über den Dickenquerschnitt wird der Linearschlitten mit dem

Probenmagazin kontinuierlich durch das Meßsystem geführt. Je nach Dichteverteilung des Materials, durchdringt dabei mehr oder weniger Röntgenstrahlung die Proben. Diese wird vom Messwertaufnehmer erfasst, ausgewertet und zum Visualisierungsrechner weitergeleitet. Zur einfachen Bestückung der Probenmagazine können diese dem Linearschlitten entnommen werden. Für unterschiedliche Probenstärken von bis zu 150 mm sind verschiedene Probenmagazine vorhanden. Das Gerät misst in einer Schrittweite von 20 µm mit einer Vorschubgeschwindigkeit von 0,05 bis 5 mm/sek.

3.5.4 Kjeldahl - Apparatur

Zur Stickstoffbestimmung nach Kjeldahl stehen der Heizblock KJELDAHLTHERM KB/KBL, das Absaugsystem TURBOSOG TUP/TVK und die Destillationsapparatur VAPODEST 30 der Firma GERHARDT, Königswinter zur Verfügung. Weiterhin wird für die Titration die Titrationsapparatur TITRO LINE EASY der Firma SCHOTT AG, Mainz genutzt.

3.5.5 Rasterelektronenmikroskop (REM)

Die rasterelektronenmikroskopischen Aufnahmen werden mit einem REM des Typs „SEM 515“ der Firma PHILIPS angefertigt. Die Bildaufnahmen werden mit einer Kleinbildkamera der Firma KONTAX durchgeführt. Für die Goldbedampfung steht ein „Emscope SC 500“ der Firma LABORATORIES LTD zur Verfügung.

3.6 Analytische Untersuchungen

3.6.1 Ligninbestimmung

Die Analyse des Ligningehaltes von Holzproben beruht auf dem von HALSE (1926) beschriebenen Verfahren. Dazu werden die Holzproben zunächst bei 105°C für 24 Stunden gedarrt. Anschließend wird 1 g atro Holzmehl abgewogen und in einen 1000 ml fassenden Erlenmeyerkolben gegeben. Danach werden 50 ml rauchende Salzsäure (37 %ig) hinzugefügt und der Kolben 15 Minuten verschlossen ruhen gelassen. Danach werden 5 ml konzentrierte Schwefelsäure (95 % – 97 %ig) dazugegeben. Die Suspension wird über Nacht bei Raumtemperatur stehen gelassen.

Der Suspension werden am nächsten Tag 500 ml destilliertes Wasser hinzugefügt. Der Inhalt des Kolbens wird 10 Minuten lang gekocht. Anschließend wird die Suspension in einem Büchnertrichter abfiltriert und so lange mit heißem, destilliertem Wasser gespült bis ein pH-Wert von 7 erreicht ist. Der Rückstand, bestehend aus Lignin und Asche, wird 24 Stunden bei 105 °C im Trockenschrank gedarrt und danach gewogen.

Um lediglich den Ligninanteil zu erhalten, wird das Filtrat verascht und gewogen. Zieht man den Aschegewichtswert vom Lignin- / Aschegewichtswert ab, erhält man den Anteil an Lignin in Gramm. Dieser Wert kann anschließend auf die Probemenge in % umgerechnet werden. Es werden 3 Proben angesetzt, aus deren Ergebnissen ein Mittelwert gebildet wird.

3.6.2 Bestimmung des Pentosangehaltes nach DIN 54 361

Die Bestimmung des Pentosangehaltes beruht auf einer von VÖLKELE im Jahre 1853 beschriebenen und von TOLLENS zu einer quantitativen Bestimmung entwickelten Methode. Dabei wird aus Pentosanen bzw. Pentosen Furfurol unter dem Einfluss von Mineralsäuren in der Hitze gebildet, das dann quantitativ bestimmt wird (LELIS 1992; JAYME & BÜTTEL, 1968). Das im Folgenden beschriebene Verfahren entspricht der neuen ISO-Methode und ist in DIN 54361 (1976) beschrieben.

Die Versuchsdurchführung besteht aus zwei Teilen. Im ersten Teil, der Destillation, werden 2 g atro Holzmehl eingewogen und in die Destillationsanlage mit Pilzhaube gegeben. Anschließend gibt man 200 ml 3,2 N Bromwasserstoffsäure hinzu und bringt dieses Gemisch zum Kochen. Nachdem ca. 90 ml abdestilliert waren, wurden 90 ml destilliertes Wasser in den Tropftrichter gegeben und in den Rundkolben gefüllt. Nachdem weitere 90 ml abdestilliert worden waren, wurden erneut 60 ml destilliertes Wasser in den Rundkolben gegeben. Nach Destillation von 240 ml wurde der Vorgang abgebrochen. Das Destillat wurde in einen 250 ml fassenden Messkolben gegeben und bis zum Eichstrich mit destilliertem Wasser aufgefüllt. Von dieser Lösung wurden 5 ml entnommen und in einen 100 ml fassenden Messkolben gegeben, der anschließend auf 100 ml mit destilliertem Wasser aufgefüllt wurde. Dies entsprach einer Verdünnung von 1:20.

In zweiten Teil wird der Pentosengehalt dieser Lösung mit Hilfe eines Photometers ermittelt. Die Extinktion wurde bei einer Wellenlänge von 277,5 nm ermittelt. Zuvor wurde eine Kalibrierkurve erstellt, um aus der Extinktion direkt auf die Pentosankonzentration der Probe schließen zu können. Der prozentuale Anteil der pentosanhaltigen Hemicellulosen im Holz wird mit folgender Formel berechnet:

$$X = 0,03438 * \frac{c}{0,878 * m} * 100 \quad (1)$$

mit X = Pentosengehalt in Prozent l
 m = atro Einwaage des Holzmehles in g
 c = Furfurolkonzentration des Destillates in mg/l

3.6.3 Aschegehalt

Die gedarrten Holzproben mit einer Masse von 2 g – 6 g (atro) wurden bei Temperaturen von 550 °C – 600 °C im Muffelofen bis zur Massenkonstanz verascht. Nach der Veraschung wurden die Proben zur Abkühlung in einen Exsikkator gegeben und anschließend erneut gewogen. Der Aschegehalt wurde unter Verwendung folgender Formel berechnet:

$$A = \frac{m_2}{m_1} * 100 \quad (2)$$

mit A = Aschegehalt in g/100g
 m_1 = Einwaage in g
 m_2 = Rückwaage in g

3.6.4 Kaltwasserextraktion

5 g (atro) der zu extrahierenden Holzfasern wurden mit 150 ml destilliertem Wasser in einem Erlenmeyerkolben versetzt. Nachfolgend wurden die Proben bei ca. 120 rpm für 24 h bei Raumtemperatur geschüttelt. Anschließend wurde das Extrakt über gedarrte Glasfritten abfiltriert. Das Filtrat wurde zur Ermittlung des pH-Wertes und der Pufferkapazität genutzt. Die Holzfasern wurden bei 105 °C für 24 h gedarrt und gewogen. Der Anteil der im Kaltwasser löslichen Extraktstoffe wurde unter Verwendung folgender Formel berechnet:

$$E = \frac{(m_1 - m_2)}{m_1} * 100 \quad (3)$$

mit E = Extraktstoffgehalt in %
 m_1 = Einwaage in g
 m_2 = Masse des extrahierten Materials in g

Zur pH-Wertbestimmung wurde die pH-Elektrode für vier Minuten bei 20 °C in das Filtrat gehalten. Anschließend wurde der angezeigte Wert abgelesen.

Zur Bestimmung der Pufferkapazität wurden 20 ml des Filtrats mit 0,01 M NaOH-Lösung bis zu einem pH-Wert von 7 titriert. Aus der nötigen Menge an Lauge, die zur Erreichung des Neutralpunktes notwendig war ließ sich die Pufferkapazität in mmol NaOH/100 g atro Fasern berechnen. Bei einer Kaltwasserextraktion von 5 g Fasern in 150 ml Wasser entspricht 1 ml verbrauchte Lauge 1,5 mmol NaOH/100 g atro Fasern.

3.6.5 Heißwasserextraktion

Zur Heißwasserextraktion wurden 2 g atro Fasern in einem 250 ml fassenden Rundkolben gegeben und mit 100 ml destilliertem Wasser versetzt. Diese Suspension wird 2 Stunden unter Rückfluss gekocht. Nachfolgend wurden die Holzfasern in zuvor gedarrten Glasfritten abfiltriert, mit heißem Wasser gewaschen und für 24 h bei 105 °C gedarrt. Der Gehalt an Heißwasserextraktstoffen wurde aus der Gewichtsabnahme berechnet (vgl. Kap. 3.6.4).

Der pH-Wert und die Pufferkapazität der Heißwasserextraktstoffe wurden in Anlehnung an die bei der Kaltwasserextraktion verwendete Methode bestimmt (vgl. Kap. 3.6.4). Jedoch entsprach aufgrund der geringeren Einwaage hier 1 ml NaOH-Lösung einer Pufferkapazität von 2,5 mmol NaOH/100 g atro Fasern.

3.6.6 Ethanol-Cyclohexan-Extraktion

Die Ermittlung des Gehaltes von ethanol- und Cyclohexan-löslichen Extraktstoffen erfolgte unter Verwendung einer Soxhletapparatur. Dazu wurden 3 g atro Material und 200 ml Lösungsmittel in einen Rundkolben gegeben und für 6 Stunden extrahiert.

Das Lösungsmittel bestand aus einem Gemisch aus Ethanol / Cyclohexan, in einem Verhältnis von 1:2. Nach dem Extraktionsprozess wurden die im Lösungsmittel enthaltenen Extraktstoffe im Vakuumrotationsverdampfer eingeeengt und im Vakuumexsikkator für 24 h getrocknet. Das Extraktgewicht wurde auf die Einwaage bezogen und daraus der prozentuale Extraktstoffgehalt berechnet.

3.6.7 Ermittlung des Stickstoffgehaltes nach Kjeldahl (DIN EN 25 663)

Das Verfahren zur Stickstoffbestimmung wurde von JOHANN KJELDAHL 1883 zur Stickstoffbestimmung in Gerste und Hefe entwickelt. Diese Methode ist seit mehr als 20 Jahren ein international anerkannter Standard. Die Methode kann in drei Schritte eingeteilt werden:

- Aufschluss
- Wasserdampfdestillation
- Titration

Im ersten Schritt wird die Probe in einem Kochprozess aufgeschlossen. Dabei werden alle stickstoffhaltigen Verbindungen in Ammoniumverbindungen umgewandelt. Im zweiten Schritt werden die Ammoniumverbindungen mit Lauge und destilliertem Wasser destilliert. Durch die Lauge wird bei der Destillation Ammoniak freigesetzt. Im dritten Arbeitsschritt wird das Destillat mit Schwefelsäure auf einen bestimmten pH-Wert zurück titriert.

Aufschluss

Der Probenaufschluss erfolgte mit Hilfe von 98 %iger Schwefelsäure und „KJELTABS“ vom Typ CT. Diese dienen als Katalysator und setzen sich aus folgenden Komponenten zusammen:

- 5 g K_2SO_4
- 0,15 g $Cu SO_4 \times 5 H_2O$
- 0,15 g TO_2

Für den Aufschluss wurden jeweils 2 g atro Holzmehl, 2 KJELTABS und 25 ml Schwefelsäure (98 %) in die für den Aufschluss bestimmten Glasgefäße gegeben. Die so befüllten Gefäße wurden anschließend auf den 300 °C heißen Heizblock KJELDAHLTHERM KB/KBL der Fa. GERHARDT gestellt. Nach einer ca. 45 minütigen

Vorkochphase erfolgte der weitere Aufschluss bei einer Temperatur von 400 °C. Im Verlauf des Kochvorgangs nahmen die Proben eine grünliche Farbe an. Nach diesem Farbumschlag wurden die Proben noch weitere 90 Minuten gekocht, um einen vollständigen Aufschluss zu gewährleisten. Im Anschluss wurden die Proben vom Heizblock genommen und auf Umgebungstemperatur heruntergekühlt.

Destillation

Unter Verwendung der Destillationseinheit VAPODEST 30 der Fa. GERHARDT wurden die zuvor dem Aufschluss unterzogenen Holzproben automatisch destilliert. Das automatisierte Destillationsprogramm war so programmiert, dass die Probe vor dem Destillationsvorgang 9 sek. mit bidestilliertem Wasser und darauffolgend für 4 sek. mit 32 %iger Natronlauge versetzt wurde. Dadurch wurde das in der Probe befindliche Ammoniak freigesetzt. Anschließend wurde der 240 sek. dauernde Destillationsvorgang gestartet. Das Destillat wurde in einem mit 50 ml 4 %iger Borsäure gefüllten Becherglas aufgefangen. Um Verunreinigungen des Destillates zu erkennen, wurde die Borsäure mit einer TASHIRO-Indikator-Lösung versetzt.

Titration

Im dritten Schritt wurde das Destillat mit der Titrationsapparatur TITRO LINE EASY der Fa. SCHOTT mit 0,05 M Schwefelsäure auf einen pH-Wert von 5,2 automatisch zurück titriert. Die dabei benötigte Menge an Schwefelsäure diente zur Berechnung des Stickstoffgehaltes unter Verwendung folgender Formel:

$$N = \frac{a * 1,4008}{E} \quad (4)$$

mit $N = \text{Stickstoffgehalt in \%}$
 $a = \text{Verbrauch an Schwefelsäure in ml}$
 $E = \text{Einwaage in g}$

Die Konstante 1,4008 steht in der Formel für die Stickstoffmenge im mg, die 1 ml verbrauchte Schwefelsäure entspricht.

3.6.8 Siebanalyse nach DIN 66 165

Die Siebanalysen des verwendeten Spanmaterials wurden mit einer Siebmaschine vom Typ AS 200 der Firma RETSCH GMBH, Haan durchgeführt. Dabei wurde das

Spanmaterial in 10 Fraktionen getrennt. Die Maschenweiten betragen dabei 0,16 mm, 0,25 mm, 0,4 mm, 0,63 mm, 1,0 mm, 1,6 mm, 2,0 mm, 3,15 mm und 4,0 mm.

3.6.9 Bestimmung des Schüttgewichtes nach DIN EN 12 580

Das Schüttgewicht der verwendeten Span- und Fasermaterialien wurde in Anlehnung an die DIN EN 12580 ermittelt. Dazu wurden mit Hilfe eines 5 l fassenden Behälters mit jeder Probe 5 Wiederholungen durchgeführt. Es wurde das Gewicht des befüllten Zylinders von dessen Leergewicht subtrahiert. Aus diesen Werten wird anschließend ein Mittelwert gebildet. Das Schüttgewicht wird nach folgender Formel berechnet:

$$D_B = \frac{(m_2 - m_1)}{V_1} \quad (5)$$

mit D_B = Schüttgewicht des Materials in g/l
 m_1 = Leergewicht des Messbehälters in g
 m_2 = Gewicht des befüllten Messbehälters in g
 V_1 = Volumen des Behälters in l

3.7 Rasterelektronenmikroskopische Untersuchungen von rotfaulem Fichtenholz

Mit Hilfe der rasterelektronenmikroskopischen Aufnahmen sollen mögliche morphologische Veränderungen von rotfaulem Fichtenholz und der daraus hergestellten Fasern und Späne verdeutlicht werden. Vor den rasterelektronischen Untersuchungen werden die Holzstücke, Fasern und Späne auf runden Probetellern mit einem speziellen Klebeband befestigt. Vor der Betrachtung im REM werden die Proben mit Argon begast und im Vakuum mit Gold bedampft.

3.8 Spanplattenherstellung im Labormaßstab

Für die Herstellung der dreischichtigen Spanplatten wurden die im Kapitel 3.2 genannten Materialien und Geräte verwendet. Für die Anfertigung der dreischichtigen Spanplatten wurde Spanmaterial bestehend aus rotfauler Fichte und als Referenz industriell aufbereitete Späne verwendet. Das jeweilige Spanmaterial

wurde in einer Beleimungstrommel nach dem Umwälzverfahren mit Bindemittel besprüht. Dazu wurden die berechneten Spanmaterialmengen in die Beleimungstrommel gegeben. Anschließend wurde die Beleimungspistole von außen in die Trommel eingeführt. Die Leimflotte, die sich aus dem Bindemittel und verschiedenen Hilfs- und Zuschlagsstoffen zusammensetzte, befand sich in einem Vorratsbehälter an der Beleimungspistole. Die Leimzuführung wurde über Druckluft gesteuert.

Nach der Beleimung wurden die berechneten Spanmengen von Hand in einen Plattenrahmen zu einem dreischichtigen Spankuchen gestreut. Entsprechend dem dreischichtigen Aufbau wurden zuerst eine Deckschicht, danach die Mittelschicht und abschließend wieder eine Deckschicht gestreut. Vor der Entfernung des Streurahmens wurde der Spankuchen zunächst vorverdichtet. Nach dem Auflegen der entsprechenden Distanzleisten wurde der Spankuchen unter definierten Parametern verpresst. Nach einer Reifelagerung von ca. 24 Stunden wurden die dreischichtigen Spanplatten beidseitig geschliffen und besäumt.

3.8.1 Herstellungparameter von Laborspanplatten aus rotfaulem Spangut

Die dreischichtigen Spanplatten aus rotfaulem Fichtenholz der Versuchsreihe *RF 1* bis *RF 4* sind nach den in Tabelle 3-3 aufgeführten Parametern hergestellt worden. Als Bindemittel wurden Leime der BASF AG und der Fa. BAKELITE eingesetzt (vgl. Kap. 3.1.3). Als Hydrophobierungsmittel wurde das parafinhaltige Produkt HYDROWAX 138 der Firma SASOL verwendet. Als Härter kamen eine 33 %ige Ammoniumsulfatlösung und eine 50 %ige Kaliumcarbonatlösung zum Einsatz (vgl. Kap. 3.1.4).

Serien aus rotfaulem Fichtenholz wurden grundsätzlich mit dem Kürzel „*RF*“ versehen. Darauf folgende *einstellige Zahlen* kennzeichnen Spanlattenserien, hergestellt im Labormaßstab. *Zweistellige Zahlen* deuten auf maschinengestregte Spanlattenserien, hergestellt im Pilotmaßstab hin.

Tabelle 3-3: Herstellungsparameter für dreischichtige Spanplatten aus rotfaulem Fichten-spangut, gebunden mit UF-Harz (Versuchsreihen RF 1 bis RF 3) und PF-Harz (RF 4)

Herstellungsparameter/Variante	RF 1	RF 2	RF 3	RF4
Werkstoffdimension				
Theoretische Plattengröße (L x B) [mm]	500x300	500x300	705x465	705x465
Theoretische Plattendicke [mm]	19	19	19	19
Zielrohdichte [kg/m ³]	700	700	700	700
	650	650	650	650
	600	600	600	600
	550	550	550	550
	500	500	500	500
				450
Spanmaterial		Rotfaule Fichte		
Ausgangsfeuchte DS / MS[%]	3,4 / 3,0	3,1 / 2,8	3,4 / 3,1	2,4 / 2,5
Beleimte Feuchte DS / MS[%]	10,3 / 8,8	10,5 / 9,0	10,5 / 8,8	11,7 / 10,2
Verhältnis DS / MS [%]	40 / 60	40 / 60	40 / 60	40 / 60
Bindemittel		Kaurit K 350 flüssig		2506 HW / 1842 HW
Feststoffgehalt [%]	68	68	68	45
Beleimungsgrad DS auf atro Span [%]	10	10	11	10
Beleimungsgrad MS auf atro Span [%]	8,5	8,5	7	8,5
Zuschlagstoffe				
HydroWax 138 auf atro Span DS [%]	0	1	0,5	0,5
HydroWax 138 auf atro Span MS [%]	0	1	0,5	0,5
(NH ₄) ₂ SO ₄ auf FS Bindemittel DS [%]	0	0,5	0,5	0
(NH ₄) ₂ SO ₄ auf FS Bindemittel MS [%]	0	1	2	0
K ₂ CO ₃ auf FS Bindemittel DS [%]	0	0	0	2
K ₂ CO ₃ auf FS Bindemittel MS [%]	0	0	0	6
Heißpressen				
Presstemperatur [°C]	200	200	200	200
Presszeitfaktor [Sek./mm Plattendicke]	15	15	9	12
	12	12		
Pressdruck [N/cm ²]	5,7	5,7	5,7	5,7
Gesamtzahl der Platten	30 Stück	30 Stück	18 Stück	15 Stück

3.8.2 *Herstellungparameter für Spanplatten aus Industriespänen*

Die Herstellungparameter der Referenzplatten aus industriell aufgearbeiteten Spänen der Firma PFLEIDERER INDUSTRIE GmbH Gütersloh sind in Tabelle 3-4 dargestellt.

Tabelle 3-4: Herstellungparameter der Referenzplatten der Serien IN 1 und IN 2

Herstellungparameter/Variante	IN 1	IN 2
Werkstoffdimension		
Theoretische Plattengröße (L x B) [mm]	500x300	500x300
Theoretische Plattendicke [mm]	19	19
	700	700
	650	650
Zielrohddichte [kg/m ³]	600	600
	550	550
	500	500
Spanmaterial Industriespanmix		
Ausgangsfeuchte DS / MS[%]	2,5 / 2,8	2,7 / 2,7
Beleimte Feuchte DS / MS[%]	10,5 / 8,9	11,1 / 8,6
Verhältnis DS / MS [%]	40 / 60	40 / 60
Bindemittel Kaurit K 350 flüssig		
Feststoffgehalt [%]	68	68
Beleimungsgrad DS auf atro Span [%]	10	10
Beleimungsgrad MS auf atro Span [%]	8,5	8,5
Zuschlagstoffe		
HydroWax 138 auf atro Span DS [%]	0	1
HydroWax 138 auf atro Span MS [%]	0	1
(NH ₄) ₂ SO ₄ auf FS Bindemittel DS [%]	0	0,5
(NH ₄) ₂ SO ₄ auf FS Bindemittel MS [%]	0	1
Heißpressen		
Presstemperatur [°C]	200	200
Presszeitfaktor [Sek./mm Plattendicke]	15	15
	12	12
Pressdruck [N/cm ²]	5,7	5,7
Gesamtzahl der Platten	30 Stück	30 Stück

Für die verschiedenen Serien unter Verwendung von Industriespänen wurden exakt die gleichen Bindemittelzusammensetzungen gewählt, wie für die Spanplatten aus rotfauler Fichte. Referenzspanplattenserien aus einem Industriespanmix sind mit dem Kürzel „/N“ versehen. Die darauf folgende Nummerierung ist identisch zur Nummerierung der Serien aus rotfaulem Fichtenholz, d. h.:

- einstellige Zahl entspricht einer Laborspanplatte
- zweistellige Zahl entspricht einer Pilotspanplatte

3.9 Herstellung von maschinengestreuten Spanplatten im Pilotmaßstab

Zur Herstellung von dreischichtigen, maschinengestreuten Spanplatten im Pilotmaßstab wurden die im Kapitel 3.3 beschriebenen Anlagen und Materialien genutzt. Die Beleimung der Deck- und Mittelschichtspäne erfolgt nacheinander im gleichen Trogmischer (vgl. Kap. 3.3.2). Dazu wird das jeweilige Spanmaterial in den Trichter des Mischerzuführbandes gegeben. Nach Ermittlung der Spanmenge, die kontinuierlich pro Zeiteinheit durch das Mischerzuführband (vgl. Kap. 3.3.1) in den Mischer gefördert wird, muss die Fördergeschwindigkeit der Leimpumpe (vgl. Kap. 3.3.3) auf den Spandurchsatz abgestimmt werden. Dies geschieht durch einen Regler, der den Frequenzumformer der Leimpumpe ansteuert. Die Berechnung der Leimmenge ist im Kapitel 12.2.1 beschrieben. Nach der Abstimmung von Leim- und Spanmenge aufeinander wird der Beleimungsprozess durch Einschalten von Mischer, Mischerzuführband, Leimpumpe und Zuführbandsystem gestartet. Das Zuführbandsystem (vgl. Kap. 3.3.4) muss so geschaltet sein, dass das beleimte Deck- oder Mittelschichtspanmaterial in den richtigen Spanbunker befördert wird. Von den beleimten Spänen sind mehrere Feuchtebestimmungen mit dem Feuchtemessgerät MA 30 (Kap. 3.5.2) der Firma SATORIUS durchzuführen, um die Beleimung zu überprüfen.

Nachdem sowohl die Deckschichtspäne als auch die Mittelschichtspäne beleimt und in die Spanbunker befördert wurden, kann mit dem Streuprozess begonnen werden. Dazu muss vorerst durch systematische Versuche die Formbandgeschwindigkeit ermittelt werden, bei der die berechnete Spanmenge in

den Streukasten fällt (vgl. Kap. 12.2.2). Bei einem Streuvorgang können gleichzeitig bis zu 6 Pressbleche mit darauf befindlichen Streukäsen auf dem Formband (vgl. Kap. 3.3.7) positioniert werden. Um die untere Deckschicht streuen zu können, müssen vorerst der Rückstreifrechen und das Dosierband des Deckschichtbunkers, die Abwurfwalze und die 4 Streuwalzen des Deckschichtstreu Kopfes (vgl. Kap. 3.3.6) eingeschaltet werden. Sobald ein auf ganzer Streubreite gleichmäßiger Spanstrom auf das Formband fällt, wird das Formband gestartet und die Streukästen unter dem Streukopf hindurchgeführt. Dazu wird die Formbandgeschwindigkeit so gewählt, dass die berechnete Spanmenge gleichmäßig in die Streukästen gestreut wird. Nachdem alle Streukästen mit der ersten Deckschicht befüllt wurden, kann mit dem Streuvorgang der Mittelschicht begonnen werden.

Beim Abstreuen der Mittelschicht wird in ähnlicher Weise wie bei der Deckschicht vorgegangen. Jedoch wird die Mittelschicht in zwei Etappen in die Streukästen gestreut um die Symmetrie der Mittelschicht zu gewährleisten. Als erster Schritt werden der Rückstreifrechen, das Dosierband, die Abwurfwalze und die beiden Streuwalzen des Mittelschichtbunkers (vgl. Kap. 3.3.5) eingeschaltet. Nachdem wieder ein gleichmäßiger Spanstrom aus dem Mittelschichtstreu Kopf austritt, wird das Formband mit entsprechender Geschwindigkeit gestartet. Nachdem alle Streukästen mit der ersten Hälfte der Mittelschicht befüllt sind wird die Drehrichtung des Formbandes in die entgegengesetzte Richtung geschaltet, so dass die Streukästen mit der zweiten Hälfte der Mittelschicht befüllt werden. Nach Beendigung dieses Streuvorganges wird die obere Deckschicht in analoger Vorgehensweise zur unteren Deckschicht aufgebracht. Jedoch muss der Streuvorgang in entgegengesetzter Formbandrichtung zur ersten Deckschicht erfolgen, um einen symmetrischen Aufbau der Platte sicherzustellen. Nach Abschluss der Streuarbeiten werden die Streukästen von vorbei gefallenem Spänen befreit, der Spankuchen wird kalt vorverpresst und der Streukasten wird dabei entfernt. Auf das Pressblech werden die entsprechenden Distanzleisten aufgelegt, der Spankuchen wird mit einem Presspapier und einem zweiten Pressblech abgedeckt. Danach wird der Spankuchen in die Heißpresse geschoben und unter definierten Pressparametern zu einer dreischichtigen Spanplatte verpresst. Nach der Verpressung wurden die Platten von den heißen Pressblechen getrennt und zur Akklimatisierung und Nachreifung für ca. 24 h im Stapel gelagert und anschließend besäumt.

3.9.1 *Herstellungsparemeter maschinengestreuter Spanplatten aus rotfaulem Spangut*

Die Tabelle 3-5 enthält die wesentlichen Herstellungsparemeter der dreischichtigen, maschinengestreuten Spanplatten. Als Bindemittel kamen sowohl UF-Harze als auch MUF-Harze der BASF AG und ein Weizenquellwasser (Weizenprotein) der Fa. CARGILL zum Einsatz (vgl. Kap. 3.1.3). Als Hilfs- und Zuschlagsstoffe wurden Ammoniumsulfat und HydroWax 138 verwendet (vgl. Kap. 3.1.4).

Tabelle 3-5: Herstellungsparemeter von maschinengestreuten Spanplatten aus rotfauler Fichte

Herstellungsparemeter/Variante	RF 11	RF 12	RF 13
Werkstoffdimension			
Theoretische Plattengröße (L x B) [mm]	705x465	705x465	705x465
Theoretische Plattendicke [mm]	19	19	19
Zielrohddichte [kg/m ³]	700	700	700
	600	600	600
	500	500	500
Spanmaterial		Rotfaule Fichte	
Ausgangsfeuchte DS / MS[%]	3,0 / 3,0	3,0 / 3,0	3,0 / 3,0
Beleimte Feuchte DS / MS[%]	10,5 / 8,7	10,2 / 9,1	11,2 / 9,9
Verhältnis DS / MS [%]	40 / 60	40 / 60	40 / 60
Bindemittel	Kaurit K 350 flüssig	Kauramin 620 flüssig	K 350 / WQW (80 % / 20 %)
Feststoffgehalt [%]	68	68	64
Beleimungsgrad DS auf atro Span [%]	11	11	11
Beleimungsgrad MS auf atro Span [%]	7	7	7
Zuschlagstoffe			
HydroWax 138 auf atro Span DS [%]	0,5	0,5	0,5
HydroWax 138 auf atro Span MS [%]	0,5	0,5	0,5
(NH ₄) ₂ SO ₄ auf FS Bindemittel DS [%]	0,5	0,5	0,5
(NH ₄) ₂ SO ₄ auf FS Bindemittel MS [%]	2	2	2
Heißpressen			
Presstemperatur [°C]	200	200	200
Presszeitfaktor [Sek./mm Plattendicke]	12	12	18
Pressdruck [N/cm ²]	5,7	5,7	5,7
Gesamtzahl der Platten	18 Stück	18 Stück	18 Stück

3.9.2 *Herstellungparameter von Pilotspanplatten aus industriell aufbereitetem Spanmaterial*

Als Referenzen zu den maschinengestreuten Platten aus rotfauler Fichte wurden wiederum Platten, bestehend aus einem Industriespanmix, unter identischen Herstellungsparametern angefertigt. Die einzelnen wesentlichen Parameter sind in Tabelle 3-6 aufgelistet.

Tabelle 3-6: Herstellungsparameter von maschinengestreuten Referenzspanplatten

Herstellungsparameter/Variante	IN 11	IN 12	IN 13
Werkstoffdimension			
Theoretische Plattengröße (L x B) [mm]	705x465	705x465	705x465
Theoretische Plattendicke [mm]	19	19	19
Zielrohddichte [kg/m ³]	700	700	700
	600	600	600
	500	500	500
Spanmaterial		Industriespanmix	
Ausgangsfeuchte DS / MS[%]	2,8 / 2,8	2,8 / 2,8	2,8 / 2,8
Beleimte Feuchte DS / MS[%]	10,2 / 8,8	10,5 / 8,5	10,2 / 8,7
Verhältnis DS / MS [%]	40 / 60	40 / 60	40 / 60
Bindemittel	Kaurit K 350 flüssig	Kauramin 620 flüssig	K 350 / WQW (80 % / 20 %)
Feststoffgehalt [%]	68	68	64
Beleimungsgrad DS auf atro Span [%]	11	11	11
Beleimungsgrad MS auf atro Span [%]	7	7	7
Zuschlagstoffe			
HydroWax 138 auf atro Span DS [%]	0,5	0,5	0,5
HydroWax 138 auf atro Span MS [%]	0,5	0,5	0,5
(NH ₄) ₂ SO ₄ auf FS Bindemittel DS [%]	0,5	0,5	0,5
(NH ₄) ₂ SO ₄ auf FS Bindemittel MS [%]	2	2	2
Heißpressen			
Presstemperatur [°C]	200	200	200
Presszeitfaktor [Sek./mm Plattendicke]	12	12	18
Pressdruck [N/cm ²]	5,7	5,7	5,7
Gesamtzahl der Platten	18 Stück	18 Stück	18 Stück

3.10 MDF-Herstellung im Labor- und Pilotmaßstab

Es wurden zunächst mitteldichte Faserplatten aus STEICO–Faserstoff hergestellt. Die erzielten Ergebnisse dienen als Vergleichswerte für die unter den gleichen Parametern hergestellten Platten aus rotfaulen Fichtenfasern.

Für die Herstellung von mitteldichten Faserplatten wurden die unterschiedlichen Faserstoffe zunächst am Muldengurttörderer (Kap. 3.4.1) aufgegeben und zum Mischer (Kap. 3.4.2) transportiert. Im Mischer wird das Fasermaterial aufgelockert und anschließend die Faserausgangsfeuchte (Kap. 12.3.2) mit dem Feuchtemessgerät MA 30 der Firma SATORIUS ermittelt. Mit Hilfe der mittleren Faserausgangsfeuchte und der Menge des verwendeten Fasermaterials, lutro und atro (Kap. 12.3.3), ließen sich nun die benötigte Bindemittelmenge (vgl. Kap. 12.3.4) in lutro und atro, die theoretische beleimte Feuchte (vgl. Kap. 12.3.6) sowie die benötigte Zeit zum Beleimen des gesamten Fasermaterials (vgl. Kap. 12.3.5) berechnen. Die Berechnung der benötigten Zeit zum Beleimen des gesamten Fasermaterials beruht auf einem Faserdurchsatz von 60 kg lutro in 45 Minuten. Das Fasermaterial wurde nach dem Auflockern im Mischer durch den Rohrtrockner (Kap. 3.4.4), auf das Speicherband (Kap. 3.4.6), über den Faserbunker (Kap. 3.4.7), anschließend den Streukopf (Kap. 3.4.8) und das Formband (Kap. 3.4.9) wieder auf den Muldengurttörderer transportiert. Dort wurde das Fasermaterial locker und gleichmäßig bis zur gewünschten Streuhöhenmarke verteilt. Eine gleichmäßige Verteilung des Fasermaterials ist Voraussetzung für eine anschließende gleichmäßige Beleimung.

Als nächster Schritt folgte, gemäß der vorgegebenen jeweiligen Rezeptur, die Abstimmung von Faser- und Leimdurchsatz pro Zeiteinheit aufeinander. Dazu wurde die benötigte Beleimungszeit errechnet. Aus der Rechnung ergibt sich anschließend die benötigte Leimmenge pro Minute (kg Leim lutro/min) (Kap. 12.3.5). Zum Auslitern wird der Trichter der Leimpumpe (Kap. 3.4.3) mit dem Bindemittel befüllt und anschließend mit Hilfe einer Stoppuhr der Leimdurchsatz in einer Minute ermittelt. Die Pumpengeschwindigkeit kann dazu über einen Frequenzregler am Steuerkasten eingestellt werden. Die Pumpengeschwindigkeit wurde so oft nachgeregelt, bis der errechnete Leimdurchsatz erreicht wurde. Nach dem Auslitern der Pumpe wurde diese mit den Zweistoffdüsen an der seitlichen Mischeröffnung verbunden. Sobald

das Fasermaterial in den Einfallschacht des Mischers fällt wurde die Leimpumpe mit der zuvor ermittelten Frequenz angeschaltet. Der Brenner wurde so eingestellt, dass eine praktische Faserfeuchte von ca. 10 % - 12 % erzielt wurde. Zur Überprüfung der Faserfeuchte wurden stichprobenartig geringe Fasermengen vom Speicherband entnommen und mit dem Feuchtemessgerät die tatsächliche Faserfeuchte ermittelt. Das beleimte Fasermaterial gelang nun über das Speicherband zur Lagerung in den Faserbunker. Nach kompletter Beleimung und Überführung des Faserstoffes in den Faserbunker, wurden die Fasern über den Faserstreukopf auf das Formband befördert.

Zur Laborplattenherstellung wurde die zuvor ermittelte Fasermenge gleichmäßig in einen Streukasten verteilt, der sich auf einem Aluminiumpressblech befand. Vor der Entfernung des Streukastens wurde das gestreute Faservlies vorverdichtet. Auf die Seitenränder der Aluminiumpressbleche wurden anschließend die gewünschten Distanzleisten gelegt. Weiterhin wurde das Faservlies mit einem weiteren Pressblech abgedeckt. Das Faservlies mit den Pressblechen wurde anschließend in die Laborheißpresse geschoben und unter definierten Parametern verpresst. Zur Plattenherstellung im Pilotmaßstab wurde im Unterschied zur zuvor beschriebenen Vorgehensweise, das durch den Streukopf auf dem Formband gebildete Vlies nicht zerstört, sondern mit einer hydraulischen Vorpresse vorverdichtet und mit Hilfe von Pressluft geschnitten. Die so erzeugten Vliesstücke wurden auf Pressbleche überführt und anschließend nach zuvor beschriebener Verfahrensweise verpresst.

Nach der Verpressung wurden die mitteldichten Faserplatten von den heißen Pressblechen getrennt und zur Akklimatisierung und Nachreifung für ca. 24 h im Stapel gelagert und besäumt.

3.10.1 Herstellungsparameter der Faserplatten aus rotfaulen Fasern

Die Tabelle 3-7 beinhaltet die Herstellungsparameter der Harnstoff – Formaldehyd – Harz gebundenen mitteldichten Faserplatten aus rotfaulem Fichtenholz mit einer Plattendicke von 10 mm und 16 mm. Als Zielrohichten sind 800 kg/m³, 750 kg/m³, 700 kg/m³, 650 kg/m³, 600 kg/m³, 550 kg/m³ und 500 kg/m³ vorgesehen. Die Leimflotte enthält das UF-Harz KAURIT[®] 404 der BASF AG und das

Hydrophobierungsmittel HYDROWAX 730 von SASOL (vgl. Kap. 3.1.4). Die Platten werden in einem Format von 60 cm x 45 cm gestreut.

Auch bei den MDF-Platten steht das Kürzel „RF“ für Platten aus rotfaulem Fichtenholz. Diese setzen sich durch die dreistellige Zahl nach dem Kürzel von den Spanplattenserien ab.

Tabelle 3-7: Herstellungsparameter der MDF-Platten aus rotfaulen Fichtenfasern der Versuchsreihe RF 101 bis RF 103

Herstellungsparameter/Variante	RF 101	RF 102	RF 103
Werkstoffdimension			
Theoretische Plattengröße (L x B) [mm]	600x450	600x450	600x450
Theoretische Plattendicke [mm]	10	10	16
Zielrohddichte [kg/m ³]	800	800	800
	750	750	750
	700	700	700
	650	650	650
	600	600	600
	550	550	550
	500	500	500
Fasermaterial		Rotfaule Fichte	
Faserausgangsfeuchte [%]	12,0	12,0	12,0
Beleimte und getrocknete Feuchte [%]	9,2 - 10,6	9,0 - 11,1	9,5 - 10,8
Bindemittel		Kaurit K 404 flüssig	
Feststoffgehalt [%]	68	68	68
Beleimungsgrad auf atro Span [%]	12	12	10
Zuschlagstoffe			
HydroWax 730 auf atro Span [%]	2	1	2
Heißpressen			
Presstemperatur [°C]	200	200	200
Presszeitfaktor [Sek./mm Plattendicke]	12	12	12
Pressdruck [N/cm ²]	5,7	5,7	5,7
Gesamtzahl der Platten	21 Stück	21 Stück	21 Stück

Die Tabelle 3-8 enthält die wesentlichen Herstellungsparameter der MDF aus rotfaulen Fichtenfasern, die mit anderen konventionellen Leimsystemen und Mischkondensaten aus naturnahen und konventionellen Bindemitteln verklebt wurden. Hier wurde weiterhin eine Optimierung des Beleimungsgrades und der

Presszeitfaktoren durchgeführt. Als Zielrohddichten wurden für diese Rohdichten 800 kg/m³, 700 kg/m³, 600 kg/m³ und 500 kg/m³ gewählt.

Tabelle 3-8: Herstellungsparameter von MDF aus rotfauler Fichte der Serien RF 104 bis 107, unter Verwendung von verschiedenen Bindemitteln

Herstellungsparameter/Variante	RF 104	RF 105	RF 106	RF 107
Werkstoffdimension				
Theoretische Plattengröße (L x B) [mm]	600x450	600x450	600x450	600x450
Theoretische Plattendicke [mm]	16	16	16	10
Zielrohddichte [kg/m ³]	800	800	800	800
	700	700	700	700
	600	600	600	600
	500	500	500	500
Fasermaterial		Rotfaule Fichte		
Faserausgangsfeuchte [%]	12,0	12,0	12,0	12,0
Beleimte und getrocknete Feuchte [%]	9,4 – 10,6	9,3 – 11,0	9,3 – 10,8	10,0 – 11,9
Bindemittel	Kaurit K 404 flüssig	Kauramin 627 flüssig	1808 HW	K 404 / WQW
	Feststoffgehalt [%]	68	68	29
Beleimungsgrad auf atro Span [%]	10	10	10	10
	12	12	12	12
	14			
Zuschlagstoffe				
HydroWax 730 auf atro Span [%]	1	1	1	1
Heißpressen				
Presstemperatur [°C]	200	200	200	200
Presszeitfaktor [Sek./mm Plattendicke]	12			
	18	18	18	18
	24			
Pressdruck [N/cm ²]	5,7	5,7	5,7	5,7
Gesamtzahl der Platten	108 Stück	24 Stück	24 Stück	24 Stück

3.10.2 Herstellungsparameter der Faserplatten aus STEICO – Fasern

In der Tabelle 3-9 sind die Herstellungsparameter der 10 mm und 16 mm dicken Harnstoff – Formaldehyd – Harz gebundenen mitteldichten Faserplatten mit Zielrohddichten von 800 kg/m³, 750 kg/m³, 700 kg/m³, 650 kg/m³, 600 kg/m³, 550

kg/m³ und 500 kg/m³ aufgeführt. Diese Referenzplatten enthalten die identische Leimflottenzusammensetzung wie die Platten aus rotfauler Fichte (vgl. Kap. 3.10.1).

Die Faserplatten aus industriell aufbereitetem Faserstoff der Fa. STEICO wurden analog zu den Referenzspanplatten mit dem Kürzel „IN“ versehen. Bei der weiteren Nummerierung grenzen sich die MDF auch hier durch die dreistellige Zahl von den Referenzspanplatten ab.

Tabelle 3-9: Herstellungsparameter von MDF-Platten aus STEICO – Fasern

Herstellungsparameter/Variante	IN 101	IN 102	IN 103
Werkstoffdimension			
Theoretische Plattengröße (L x B) [mm]	600x450	600x450	600x450
Theoretische Plattendicke [mm]	10	10	16
	800	800	800
	750	750	750
	700	700	700
Zielrohddichte [kg/m ³]	650	650	650
	600	600	600
	550	550	550
	500	500	500
Fasermaterial <i>Kiefernholz-Industriefaserstoff der Fa. STEICO</i>			
Faserausgangsfeuchte [%]	12,5	12,5	12,5
Beleimte und getrocknete Feuchte [%]	8,8 – 10,3	9,0 – 10,8	9,2 – 11,0
Bindemittel <i>Kaurit K 404 flüssig</i>			
Feststoffgehalt [%]	68	68	68
Beleimungsgrad auf atro Span [%]	12	12	12
Zuschlagstoffe			
HydroWax 138 auf atro Span [%]	2	1	2
Heißpressen			
Presstemperatur [°C]	200	200	200
Presszeitfaktor [Sek./mm Plattendicke]	12	12	12
Pressdruck [N/cm ²]	5,7	5,7	5,7
Gesamtzahl der Platten	21 Stück	21 Stück	21 Stück

3.11 Bestimmung der Materialeigenschaften von Holzwerkstoffen

3.11.1 Probeentnahmen, Zuschnitt und Überwachung

Aufgrund einer möglichen Streuung innerhalb und zwischen Holzwerkstoffplatten ist die Entnahme von einer bestimmten Anzahl von Prüfkörpern aus mehreren Platten notwendig, um zuverlässige Prüfergebnisse zu erhalten. Die Probeentnahme und deren Zuschnitt ist durch die DIN EN 326-1 (1993) vorgegeben. Die Tabelle 3-10 enthält Beispiele für die jeweilige Mindestanzahl von Prüfkörpern für die entsprechenden Normen.

Tabelle 3-10: Mindestanzahl von Prüfkörpern, die aus jeder Platte für verschiedene Prüfverfahren notwendig sind

Platten-Eigenschaft	EN-Norm	Probenzahl
Feuchtegehalt	EN 322	4
Maßänderung	EN 318	
Rohdichte	EN 323	6
Biegefestigkeit und Biege-Elastizitätsmodul	EN 310	
Querzugfestigkeit	EN 319	8
Dickenquellung nach Wasserlagerung	EN 317	
Abhebefestigkeit	EN 311	

Die Prüfkörper sind in den entsprechenden Maßen anzufertigen, die in der entsprechenden Norm festgelegt sind. Die Prüfkörper sind der Platte möglichst zufällig zu entnehmen, wobei jedoch mindestens ein Prüfkörper aus jeder Gruppe von der fertig bearbeiteten Plattenkante stammen muss. Ein Beispiel für ein Zuschnittmuster ist in Abbildung 3-1 dargestellt.

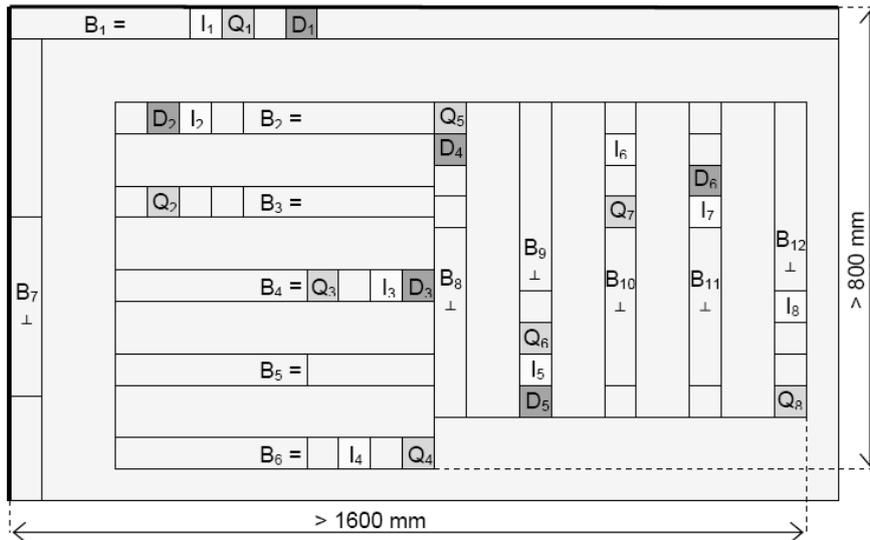


Abbildung 3-1: Schematischer Schnittplan für die Probenentnahme bei Holzwerkstoffen nach DIN EN 326-1(1993)

3.11.2 Bestimmung der Rohdichte

Unter der Rohdichte eines Holzwerkstoffes versteht man das Verhältnis von seiner Masse zu seinem Volumen. Nach DIN EN 323 (1993) wird für die Rohdichtebestimmung ein quadratischer Prüfkörper mit einer Seitenlänge von 50 mm verwendet. Die Probeentnahme und der Zuschnitt wird durch die EN 326-1 geregelt. Die Vorgaben zur Bestimmung der Plattenmaße sind in DIN EN 324-1 (1993) definiert. Die Berechnung der Rohdichte ρ (in kg/m³) der Prüfkörper erfolgt nach folgender Formel:

$$\rho = \frac{m}{b_1 \cdot b_2 \cdot t} \cdot 10^6 \quad (6)$$

mit m = Masse des Prüfkörpers in g
 b_1 = Breite der einen Seite in mm
 b_2 = Breite der zweiten Seite in mm
 t = Dicke am Schnittpunkt der Diagonalen auf 0,05 mm gemessen

Die Rohdichte des Holzwerkstoffes ist das arithmetische Mittel der Rohdichten aller Prüfkörper, die aus einer Platte entnommen werden.

3.11.3 Bestimmung des Rohdichteprofils mit dem Labor-Dichteprofilmessgerät DA-X

Zur Bestimmung des Rohdichteprofils werden die nach DIN EN 326-1 (1993) zur Ermittlung der Rohdichte nach DIN EN 323 (1993) entnommenen Probenkörper verwendet. Bevor die Proben in das Probenmagazin eingespannt werden, sind die Probenabmessungen und das Probengewicht mit Hilfe des Messschiebers und der Waage, die an das Rohdichteprofilmessgerät verbunden sind, aufgenommen. Danach wird das Probenmagazin in das Gerät eingelegt und die Messung gestartet. Nach Beendigung der Messung wird durch die Software das Rohdichteprofil ermittelt und visuell umgesetzt.

3.11.4 Bestimmung der Dickenquellung nach Wasserlagerung

Die Dickenquellung von Spanplatten wird durch die Messung der Dickenzunahme eines Prüfkörpers nach vollständiger Wasserlagerung bestimmt. Das Verfahren ist durch die Norm DIN EN 317 (1993) geregelt. Probeentnahme und der Zuschnitt der Prüfkörper wird wiederum durch die DIN EN 326-1 (1993) vorgegeben. Zur Versuchsdurchführung werden die Prüfkörper vertikal in sauberem, ruhendem Wasser, bei neutralen pH-Wert und 20 ± 1 °C für 24 Stunden gelagert. Nach Ablauf der Wasserlagerungszeit wird der Prüfkörper aus dem Wasser entnommen und die Dicke gemessen. Die Dickenquellung G_t in Prozent der Ausgangsdicke wird nach folgender Formel berechnet:

$$G_t = \frac{t_2 - t_1}{t_1} \cdot 100 \quad (7)$$

mit t_1 = Dicke des Prüfkörpers vor der Wasserlagerung in mm
 t_2 = Dicke des Prüfkörpers nach der Wasserlagerung in mm

Die Dickenquellung einer Platte ist das arithmetische Mittel der Ergebnisse aller Prüfkörper, die aus einer Platte entnommen werden. Die Ergebnisse werden in Prozent auf eine Dezimalstelle angegeben.

3.11.5 Bestimmung der Querkzugfestigkeit

Indem ein Spanplattenprüfkörper mit einer gleichmäßig verteilten Zugkraft bis zum Bruch belastet wird, wird die Zugfestigkeit senkrecht zur Plattenebene (Querkzugfestigkeit) bestimmt (DIN EN 319; 1993). Die Querkzugfestigkeit einer Platte ermittelt sich aus dem arithmetischen Mittel der Ergebnisse aller aus dieser Platte entnommenen Prüfkörper.

$$f_t = \frac{F_{\max}}{a \cdot b} \quad (8)$$

mit F_{\max} = Bruchkraft in Newton
 a, b = Länge und Breite des Prüfkörpers in mm

3.11.6 Bestimmung der Abhebefestigkeit

Zur Ermittlung der Abhebefestigkeit wird auf die Spanplattenoberfläche ein runder Stempel aus Metall aufgeklebt und die Last bis zum Ausreißen des Stempels aus der Oberfläche gemessen. Das Verfahren ist durch die Norm DIN EN 311 (1993) geregelt. Die Decklagenabhebefestigkeit wird als Quotient aus Bruchlast und Verleimfläche errechnet:

$$f_a = \frac{F_{\max}}{\pi \cdot r^2} \quad (9)$$

mit F_{\max} = Bruchkraft in Newton
 r = Radius des Prüfstempels in mm

Die Abhebefestigkeit einer Platte ermittelt sich aus dem arithmetischen Mittel der Ergebnisse aller aus dieser Platte entnommenen Prüfkörper.

3.11.7 Bestimmung des Feuchtegehaltes

Die Bestimmung der Feuchte von Holzwerkstoffen basiert auf dem Prinzip des Massenverlustes der Prüfkörper zwischen seinem Zustand zum Zeitpunkt der Probenentnahme und seinem Zustand nach Trocknung auf Massenkonstanz bei 103 °C (DIN EN 322; 1993). Der Feuchtegehalt (H) in % der Trockenmasse wird nach folgender Formel berechnet:

$$H = \frac{m_H - m_0}{m_0} \quad (10)$$

mit m_H = Masse des Prüfkörpers vor der Trocknung in Gramm
 m_0 = Masse des Prüfkörpers nach der Trocknung in Gramm

3.11.8 Bestimmung von Biegefestigkeit und Biege-Elastizitätsmodul

Die Bestimmung der Biegefestigkeit und des Biege-Elastizitätsmoduls erfolgt durch Aufbringen einer Last in der Mitte eines an zwei Punkten aufliegenden Prüfkörpers (DIN EN 310; 1993). Der Elastizitätsmodul wird unter Berücksichtigung des linearen Bereiches des Kraft-Durchbiegungs-Diagramms berechnet. Die Biegefestigkeit (f_m) eines jeden Prüfkörpers wird durch Bestimmung des Verhältnisses von Biegemoment bei Bruchlast zum Widerstandsmoment seines vollen Querschnittes bestimmt.

$$f_m = \frac{3 \cdot F_{\max} \cdot l_1}{2 \cdot b \cdot t^2} \quad (11)$$

mit F_{\max} = Bruchkraft in Newton
 l_1 = Abstand zwischen den Mitten der Auflager in mm
 t, b = Dicke und Breite des Prüfkörpers in mm

Der Elastizitätsmodul (E_m) jedes Prüfkörpers ist nach folgender Formel zu berechnen:

$$E_m = \frac{l_1^3 \cdot (F_2 - F_1)}{4 \cdot b \cdot t^3 \cdot (a_2 - a_1)} \quad (12)$$

mit l_1 = Abstand zwischen den Mitten der Auflager in mm
 b = Breite des Prüfkörpers in mm
 t = Dicke des Prüfkörpers in mm
 $F_2 - F_1$ = Kraftzunahme im geradlinigen Bereich des Kraft-Durchbiegungs-Diagrammes, in Newton
 $a_2 - a_1$ = Durchbiegungszunahme in Prüfkörpermitte in mm

3.11.9 Bestimmung der Formaldehydabgabe nach der Perforator-Methode

Die Perforator-Methode ist eine Prüfnorm zur Bestimmung des ungebundenen Formaldehyds (HCHO) in unbeschichteten und unlackierten Holzwerkstoffen (DIN EN 120; 1992). In der Extraktionsapparatur, dem sog. Perforator, wird der nach dem Verpressen noch freie Formaldehyd mit Hilfe von siedendem Toluol aus den Werkstoffen extrahiert und an destilliertes Wasser abgegeben. Der Formaldehydgehalt der wässrigen Lösung wird dann anschließend photometrisch nach der Acetyl-Aceton-Methode bestimmt.

Für die Extraktion im Perforator werden etwa 100 g der 25 mm x 25 mm großen Prüfkörper auf 0,1 g genau gewogen und in den Rundkolben des Perforators gegeben. Zu den Prüfkörpern werden 600 ml Toluol in den Rundkolben gegeben. Dieser wird anschließend an den Perforator angeschlossen. Weiterhin werden 1000 ml destilliertes Wasser in den Perforatoraufsatz gegossen, wobei zwischen der Wasseroberfläche und dem Siphon etwa 20 bis 30 mm Freiraum verbleiben müssen. Anschließend werden der Kondensator und die Gasabsorptionsvorrichtung sowie der mit ca. 100 ml destilliertem Wasser gefüllte Vorlagekolben der Gasabsorptionsvorrichtung angeschlossen. Zum Start der Extraktion werden die Kühlung und die Heizung eingeschaltet. Während des gesamten Extraktionsvorganges muss ein gleichmäßiger Toluolrücklauf vorhanden sein. Der Perforationsvorgang beginnt, wenn erstmals Toluolblasen durch den Filtereinsatz strömen. Nach Ablauf der zweistündigen Extraktionszeit wird die Heizung ausgeschaltet und die Gasabsorptionsvorrichtung entfernt. Nachdem das Wasser in der Perforatorapparatur auf Umgebungstemperatur abgekühlt ist, wird dieses über den Ablasshahn in einen 2000 ml fassenden Messkolben überführt. Der Perforator wird zweimal mit je 200 ml destilliertem Wasser gespült. Weiterhin wird das im Vorlagekolben der Gasabsorptionsvorrichtung befindliche Wasser in den Messkolben gegeben. Der Messkolben wird anschließend mit destilliertem Wasser auf 2000 ml aufgefüllt

Der Formaldehydgehalt des Wasserextraktes wird nach der Acetyl-Aceton-Methode photometrisch bestimmt. Die Bestimmung basiert auf dem Prinzip der „*Hantzschen Reaktion*“. Dabei reagiert Formaldehyd in wässriger Lösung mit Ammoniumionen und Acetylaceton zu Diacetyldihydrolutidin. Bei 412 nm hat Diacetyldihydrolutidin ein Absorptionsmaximum.

Dazu werden 10 ml der wässrigen Extraktionslösung aus dem Messkolben entnommen und in eine 50 ml fassende Flasche gegeben. Daraufhin werden weiterhin 10 ml einer 0,04 M Acetyl-Aceton-Lösung und 10 ml einer 20 %igen Ammoniumacetat-Lösung in die Flasche gefüllt. Die Flasche wird verschlossen, geschüttelt und anschließend für 15 Minuten in einem mit 40 °C warmen Wasser gefüllten Wasserschüttelbad gelagert. Mit destilliertem Wasser wird analog ein Blindversuch durchgeführt. Damit die Lösung auf Zimmertemperatur abkühlen kann muss sie ca. 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. Der Perforatorwert (P) in mg HCHO/100 g atro Holzwerkstoff für einen Feuchtegehalt der Probe von 6,5 % wird unter Verwendung folgender Formel ermittelt:

$$P = \frac{(A_S - A_B) * f * (100 + H) * V}{m_H} \quad (13)$$

mit

- A_S = gemessene Extinktion der Probe bei 412 nm
- A_B = gemessene Extinktion des Blindwertes bei 412 nm
- f = Steigungsfaktor der Kalibrierfunktion in Milligramm pro Milliliter
- H = Feuchtegehalt der Probe in Prozent
- V = Volumen des Messkolbens (2000 ml)
- A_S = gemessene Extinktion der Probe bei 412 nm
- m_H = Masse des Prüfkörpers in Gramm

Um eine Vergleichbarkeit der Perforatorwerte von Proben mit einem Feuchtegehalt zwischen 3 % und 10 % zu gewährleisten, ist der Perforatorwert mit dem Faktor F zu multiplizieren.

$$F = -0,133 \cdot H + 1,86 \quad (14)$$

mit H = Feuchtegehalt der Probe in Prozent

3.11.10 Anforderungen an Spanplatten

Die DIN EN 312 (2003) klassifiziert Spanplatten nach ihrem speziellen Anwendungsbereich in 7 Typen. Dabei unterscheiden diese sich wie folgt:

- P 1 Platten für allgemeine Zwecke zur Verwendung im Trockenbereich
- P 2 Platten für Inneneinrichtungen (einschließlich Möbel) zur Verwendung im Trockenbereich
- P 3 Platten für tragende Zwecke zur Verwendung im Feuchtbereich
- P 4 Platten für tragende Zwecke zur Verwendung im Trockenbereich
- P 5 Platten für tragende Zwecke zur Verwendung im Feuchtbereich
- P 6 Hoch belastbare Platten für tragende Zwecke zur Verwendung im Trockenbereich
- P 7 Hoch belastbare Platten für tragende Zwecke zur Verwendung im Feuchtbereich

Die im Rahmen der Dissertation hergestellten dreischichtigen Spanplatten sollen die in der DIN EN 312 für „*Platten für Inneneinrichtungen (einschließlich Möbel) zur Verwendung im Trockenbereich (Typ P2)*“ geforderten Mindestwerte und die Anforderung der Dickenquellung nach 24 Stunden Wasserlagerung für „*Platten für tragende Zwecke zur Verwendung im Trockenbereich (Typ P4)*“ erfüllen. Dazu sind folgende mechanisch-technologische Eigenschaften der Spanplatten zu überprüfen:

- Ermittlung der Spanplattendicke
- Bestimmung der Plattenfeuchte
- Bestimmung der Rohdichte
- Bestimmung der Querkzug- und Abhebefestigkeit
- Ermittlung der Dickenquellung nach 2 und 24 Stunden
- Bestimmung der Biegefestigkeit und des Biege-Elastizitätsmoduls
- Bestimmung des freien Formaldehyds nach der Perforator-Methode

Tabelle 3-11: Anforderungen an Spanplatten mit einer Dicke von 13 bis 20 mm nach DIN EN 312 (2003)

Plattentyp	Biegefestigkeit (N/mm ²)	Biege-E-Modul (N/mm ²)	Querzugfestigkeit (N/mm ²)	Abhebefestigkeit (N/mm ²)	Dickenquellung 24 h (%)
P 1	11,5	-	0,24	-	-
P 2	13	1600	0,35	0,80	-
P 3	14	1950	0,45	-	14
P 4	15	2300	0,35	-	15
P 5	16	2400	0,45	-	10
P 6	18	3000	0,50	-	14
P 7	20	3100	0,70	-	8

Alle klassifizierten Spanplatten müssen die allgemeinen Anforderungen nach der DIN EN 312 für den Typ P1 erfüllen. Diese Norm schreibt beispielsweise eine Rohdichte-Grenzabweichung, bezogen auf die mittlere Rohdichte innerhalb einer Platte, von $\pm 10\%$ vor. Platten der Emissionsklasse E1 dürfen weiterhin einen Perforatorwert von 8 mg HCHO/100 g Holzwerkstoff nicht überschreiten. Die Tabelle 3-11 gibt die weiteren Mindestanforderungen für die einzelnen Plattentypen an.

3.11.11 Anforderungen an Faserplatten nach dem Trockenverfahren

Bei den mitteldichten Faserplatten wurden folgende Eigenschaften überprüft:

- Ermittlung der Faserplattendicke
- Bestimmung der Rohdichte
- Bestimmung der Querzugfestigkeit
- Ermittlung der Dickenquellung nach 24 Stunden
- Ermittlung der Biegefestigkeit und des Biege-Elastizitätsmoduls

In Tabelle 3-12 sind die Anforderungen an Platten für allgemeine Zwecke zur Verwendung im Trockenbereich, insbesondere im Innenausbau einschließlich Möbeln, aufgeführt.

Tabelle 3-12: Anforderungen an Platten für allgemeine Zwecke zur Verwendung im Trockenbereich, Typ MDF (DIN EN 622-5; 2006)

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

3.12 Versuch zur Erhöhung der Wertschöpfung von rotfaulem Holz

Im SÄGE- UND HOBELWERK OBERWESER GMBH, Reinhardshagen wurde ein Industrieversuch zur Steigerung der Wertschöpfung von rotfaulen Fichtenstammabschnitten durchgeführt. Dabei sollte geklärt werden, inwieweit es ökonomisch sinnvoll ist, das unbefallende Splintholz vom rotfaulen Kernholz zu trennen. Dazu wurden ca. 32 m³ rotfaule Fichtenstammabschnitte vom LANDESBETRIEB HESSEN FORST erworben und im SÄGE- UND HOBELWERK OBERWESER GMBH eingeschnitten. Nach einer automatischen Vermessung bei Eintritt in die Sägehalle wurden die Abschnitte mit Hilfe eines Vollgatters zu Brettern unterschiedlicher Stärke gesägt. Nach dem Einschnitt wurden die noch beil- und nagelfesten Bretter besäumt, abgestapelt und getrocknet. Der von *H. annosum* befallene Rest wurde zu Hackschnitzeln zerkleinert. Ein Teil der rotfaulen Hackschnitzel wurde in Big Bag's verpackt und für eine Weiterverarbeitung zu Fasern und Spänen zum WKI nach Braunschweig transportiert.

4 Ergebnisse und Diskussion

Der Ergebnisteil gliedert sich grundlegend in 5 Abschnitte. Im ersten Teil sind sämtliche Ergebnisse der durchgeführten analytischen Untersuchungen von rotfaulem Fichtenholz und von jeweiligen Referenzmaterialien aufgeführt und beschrieben. Der zweite Abschnitt beinhaltet die Ergebnisse der mechanisch-technologischen Ausprüfung der hergestellten dreischichtigen Spanplatten im Labormaßstab. Anschließend folgt der dritte Teil, mit den Ergebnissen der dreischichtigen, maschinell gestreuten Pilotspanplatten, gefolgt von einem Abschnitt, der die Beschreibung der Eigenschaften der MDF enthält. Abschließend sind noch einige rasterelektronenmikroskopische Untersuchungen und eine kurze Auswertung des Industrierversuches im SÄGE- UND HOBELWERK OBERWESER mit einbezogen.

4.1 Analytische Untersuchungen

Aus ROFFAEL & SCHÄFER (2002) und ROFFAEL ET AL. (2004) ist bekannt, dass chemische Veränderungen der Hauptbestandteile des Holzes, direkte Auswirkungen auf dessen physikalische, chemische und technologische Eigenschaften haben. Somit sind auch die daraus hergestellten Produkte direkt davon betroffen.

4.1.1 Ligninbestimmung

In der Abbildung 4-1 sind die Ergebnisse der Ligninbestimmungen der gesunden und von *Heterobasidion annosum* befallenen Fichtenholzproben und der Fasern der Fa. STEICO aufgeführt, die als Rohstoffe für die Holzwerkstoffherstellung dienen.

Dass es sich um Nadelholz handelt, zeigen die hohen Ligningehalte aller Proben. Die gemessenen Werte liegen in den von LOHMANN (1999) ermittelten Bereichen und erreichen, mit im Durchschnitt ca. 26,4 % fast den Maximalwert von 30 %. Diese Angaben decken sich mit den von HÄGGLUND (1951), TRENDELENBURG & MAYER-WELGELIN (1955), GRAMMEL (1989), LANGENDORF ET AL. (1990) und SCHÜTT ET AL. (1992) ermittelten Ligningehalte für die Fichte, die Werte zwischen 28 % und 30 % angeben. Auch NIKITIN (1961) und TOCAN ET AL. (1963) ermittelten für Fichten aus Skandinavien, Russland und Rumänien Ligningehalte zwischen 28,1 % und 29 %.

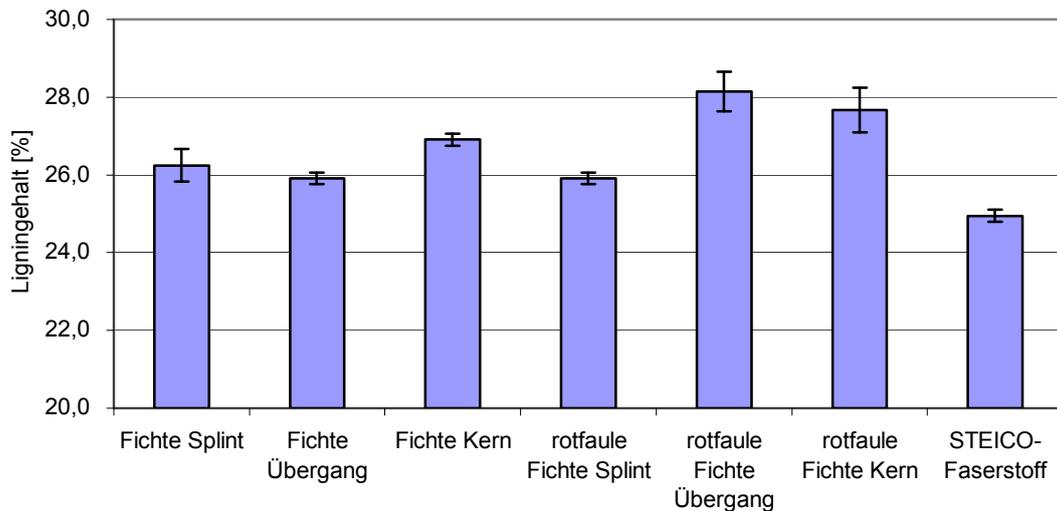


Abbildung 4-1: Ligningehalte von Fichtenholzproben und STEICO-Faserstoff

Wie aus der Abbildung 4-1 ersichtlich ist, unterscheiden sich die Ligningehalte von gesundem und mit *Heterobasidion annosum* befallenem Fichtenholz nicht signifikant. Eine mögliche Erklärung, warum der Abbau des Holzes durch den Weißfäulepilz *Heterobasidion annosum* durch die analytische Untersuchung nicht zum Ausdruck kommt, liegt in der Tatsache das der Ligninanteil auf die Einwaage bezogen wird. Die Ergebnisse geben lediglich eine Aussage über die relativen Ligninanteile von gesundem und befallenem Fichtenholz, der sich hier nicht wesentlich unterscheidet. Aussagen über den absoluten Ligningehalt der Holzproben und den prozentualen Ligninabbau können aufgrund dieser Ergebnisse nicht getroffen werden.

Der etwas geringere Ligningehalt von 24,9 % des STEICO-Faserstoffs ist mit den TMP-Aufschlussbedingungen bei der Faserherstellung zu erklären. Bei der Herstellung von Holzfasern nach dem Defibrator – Verfahren wird durch die hohen Temperaturen von 160 °C die Glasumwandlungstemperatur des Lignins überschritten. Dabei geht das Mittellamellenlignin in einen plastischen Zustand über, so dass durch Abscheren der die Fasern verbindenden Mittellamelle ein Herauslösen der Fasern im Refiner erfolgen kann und das Lignin derivatisiert wird (KHARAZIPOUR, 1996; SCHÖPPER 2006). Aufgrund dessen kann davon ausgegangen werden, dass der ursprünglich im nativen Holz der STEICO-Fasern enthaltende Ligninanteil etwas höher war.

4.1.2 Hemicellulosegehalt (Pentosangehalt)

Der Pentosangehalt der Holzproben von gesundem Fichtenholz beträgt durchschnittlich 10,8 %. Dabei variiert der Gehalt von 9,3 % im Kernbereich bis 11,6 % im Splintholz. Das durch *Heterobasidion annosum* degradierte Fichtenholz weist mit durchschnittlich 10,9 % einen annähernd gleichen Pentosangehalt auf. Hier schwanken die Werte in den einzelnen Zonen zwischen 10,3 % im Übergangsbereich, 11,1 % im Splint und 11,2 % im Kernholz.

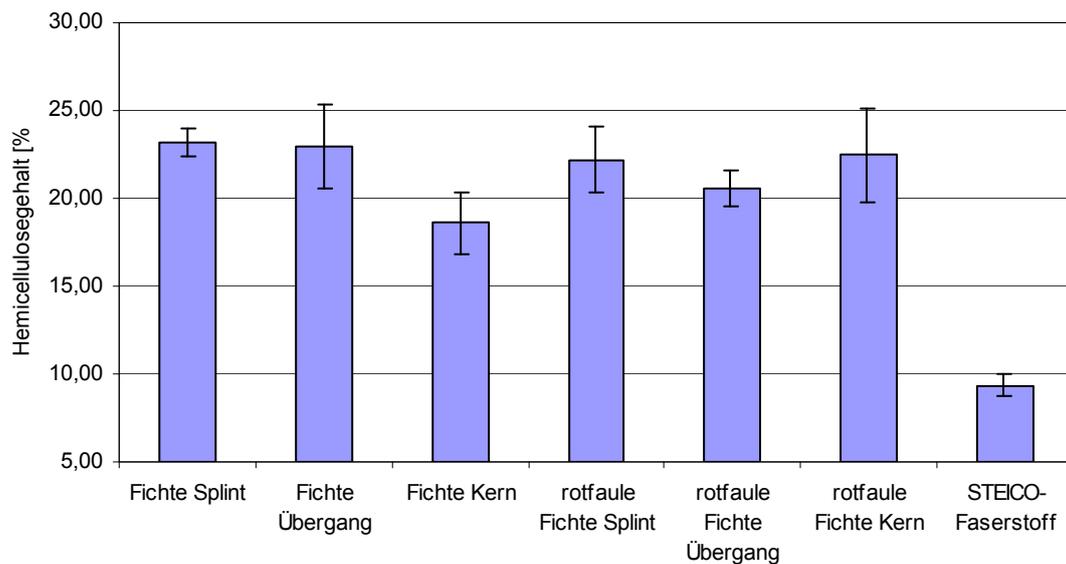


Abbildung 4-2: Hemicellulosegehalte von Fichtenholzproben und STEICO-Fasern

Der Anteil von Pentosen an den Hemicellulosen beträgt nach KNIGGE (1966) und FENGEL & WEGENER (1989) etwa 50 %. Somit errechnen sich die in Abbildung 4-2 dargestellten Hemicellulosegehalte für die untersuchten Proben. HÄGGLUND (1951), NIKITIN (1962) und GRUBER (2001) ermittelten für gesundes Fichtenholz aus unterschiedlichen europäischen Wuchsgebieten einen durchschnittlichen Pentosananteil von 9 % bis 11,5 %. Somit würde der Hemicellulosegehalt etwa 18 % bis 23 % ausmachen. Diese Werte werden mit einem von LANGENDORF ET AL. (1990) angegebenen Gehalt von 19 % bestätigt. Die in Abbildung 4-2 aufgeführten Werte schwanken zwischen 18,5 % und 23 %, erreichen jedoch den von GRAMMEL (1989) angegebenen Hemicelluloseanteil von 24,3 % nicht. Der nach dem Defibrator-Verfahren hergestellte Kiefernfasernstoff der Fa. STEICO weist mit einem Hemicellulosegehalt von 9,34 % den geringsten Wert auf. Aus FENGEL (1966) und

ROFFAEL ET AL. (1994) ist bekannt, dass während des Holzaufschlussprozesses (TMP) erhebliche Anteile an niedermolekularen Kohlenhydraten, die im Wesentlichen aus den Hemicellulosen stammen, in Lösung gehen. Dies erklärt den mit Abstand geringsten Hemicellulosegehalt des Kiefernfasersstoffes der Fa. STEICO.

4.1.3 Aschegehalt

Für die Proben des gesunden Fichtenholzes wurde ein durchschnittlicher Aschegehalt von 0,8 % ermittelt. Auffällig ist, dass der Ascheanteil vom Splintbereich zum Kern deutlich abnimmt. Beim rotfaulen Fichtenholz liegt der durchschnittliche Aschegehalt bei 1,0 %. Hier nimmt jedoch der Anteil an Asche vom Splintholz zum Kern nicht ab, sondern zu. Die Abbildung 4-3 enthält die ermittelten Werte des Aschegehaltes der einzelnen Proben.

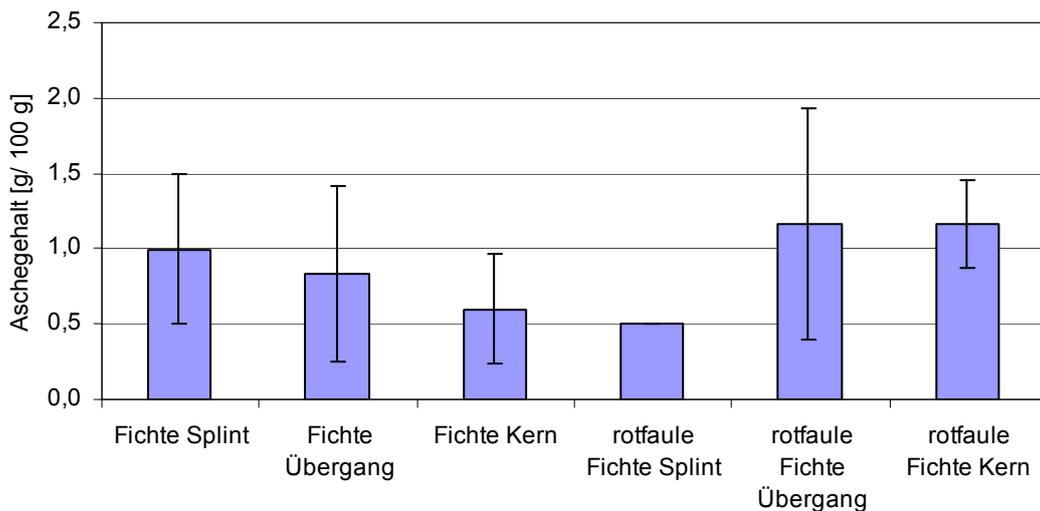


Abbildung 4-3: Aschegehalt von Fichtenholzproben

Diese Ergebnisse decken sich mit den Angaben von MOMBÄCHER (1988) und TRENDELENBURG & MAYER-WEGELIN (1955), die für Hölzer der gemäßigten Zonen durchschnittliche Aschegehalte von 0,2 % bis 0,8 % angeben. HÄGGLUND (1928) bestätigt außerdem die Beobachtung, dass der Aschegehalt vom Splint zum Kern hin abnimmt. Jedoch ändert sich der Aschegehalt je nach Standort, biotischen und abiotischen Bedingungen sowie Jahreszeit unter Umständen erheblich (SURMINSKI, 2007).

SCHINDEL (1998) ermittelte bei Elementanalysen von veraschtem Fichtensplintholz Unterschiede im Kadmium-, Calcium- und Magnesiumgehalt zwischen gesunden und durch *Heterobasidion annosum* befallenden Fichten. Dabei waren die Elementanteile im Splint befallender Fichten wesentlich höher als im Splintholz gesunder Fichten. Erklärt wird dieses Phänomen mit einer Umverteilung der Elemente in den Tracheiden des Holzes durch den Pilzbefall.

4.1.4 Extraktion von gesundem und mit *H. annosum* befallendem Fichtenholz

Die Acidität des Holzes gehört neben dem Extraktstoffgehalt zu den wichtigsten chemischen Holzeigenschaften. Der pH-Wert und die Pufferkapazität der Kalt- und Heißwasserextrakte sind dafür die aussagekräftigsten Kennzahlen (ROFFAEL, 1989 a; b). Laut SANDERMANN & ROTHKAMM (1959) hat der pH-Wert von nativem Holz einen erheblichen Einfluss auf die Holzeigenschaften, wie Farbe, Resistenz gegenüber holzerstörenden Pilzen, Verleimungseigenschaften gegenüber synthetischen Kunstharzen oder Wirkung von Holzschutzmitteln. Grund hierfür ist, dass die Bindung von Holzfasern bzw. -spänen mit Harnstoff-Formaldehydharzen den allgemeinen Grundsätzen der Säure-Base-Katalyse unterliegen (ROFFAEL ET AL. 1994). Auch ist die Acidität des Holzes von Baumart, Baumalter, Standort oder Erntezeitpunkt abhängig (GUEVARA-M. & JOHNS, 1981; ROFFAEL ET AL. 1992 a; b). Innerhalb einer Baumart wird die Holzacidität auch von weiteren Faktoren wie Holzfeuchte, Holzlagerung und thermischer Behandlung des Holzes beeinflusst (SCHÄFER & ROFFAEL, 1996; 1997 a; b; ANNERGREN ET AL. 1965; ASSARSSON, 1969; EGNER 1951; PACKMANN 1960; POBLETE, 1983; SANDERMANN & ROTHKAMM, 1959). Weiterhin kommt es, hervorgerufen durch den Holzabbau durch *H. annosum*, zu erheblichen chemischen Veränderungen des Holzes. Die prozentualen Anteile der Holzbestandteile wurden durch den Pilzbefall zum Teil erheblich verschoben (vgl. Kap. 4.1.1 bis 4.1.3). Aufgrund dessen ist zu erwarten, dass der Holzabbau auch zu signifikanten Änderungen der prozentualen Extraktstoffgehalte, der pH-Werte von den jeweiligen Lösungen und deren Pufferkapazitäten, führt.

4.1.4.1 Extraktstoffgehalt nach Kaltwasserextraktion

Der Extraktstoffgehalt nach Kaltwasserextraktion von gesundem Fichtenholz beträgt im Übergangsbereich zwischen Splint und Kern und im Kernholz nur etwa die Hälfte

vom Extraktstoffgehalt der vergleichbaren Proben aus rotfaulem Fichtenholz. Der mit 2,4 % geringste Extraktstoffanteil wurde im Splintholz rotfauler Fichten ermittelt. Im Vergleich dazu enthält gesundes Fichtensplintholz 3,8 %. Die Abbildung 4-4 enthält die Mittelwerte der Extraktstoffgehalte nach Kaltwasserextraktion der verschiedenen Fichtenholzproben.

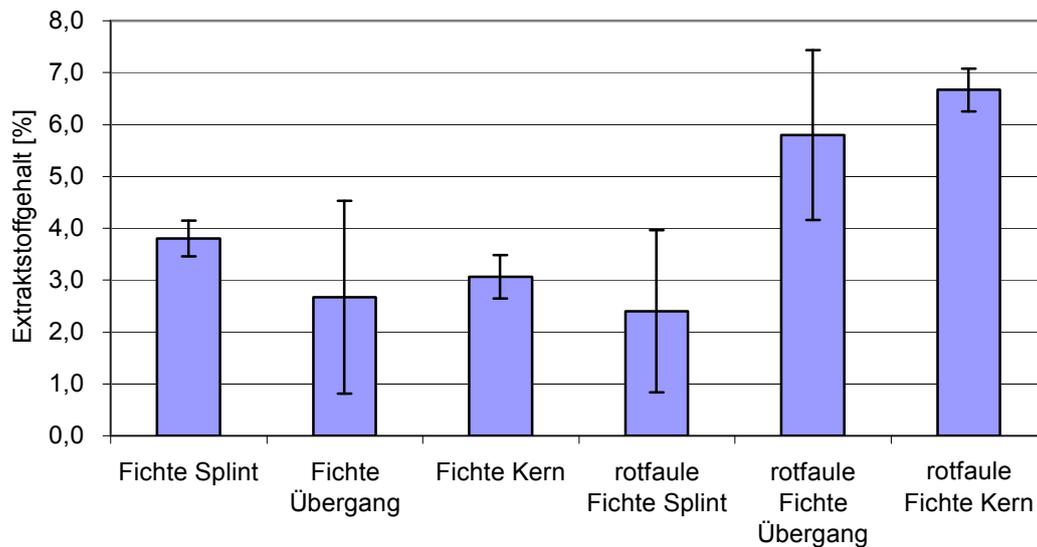


Abbildung 4-4: Extraktstoffgehalte nach Kaltwasserextraktion von Fichtenholz

PRASETYA ET AL. (1992) ermittelten im Borkebereich unbehandelter Fichtenrinde vergleichbare Extraktstoffanteile an Kaltwasserextraktion. SANDERMANN ET AL. (1967) bestätigen den Verlauf des Kaltwasserextraktstoffgehaltes bei gesundem Fichtenholz. Auch hier wurden die geringsten Gehalte im Übergangsbereich zwischen Splint und Kern ermittelt. Weiterhin war der Extraktstoffanteil im Splint höher als im Kernholz. Weiterhin ermittelte LUDWIG (2007) vergleichbare Ergebnisse bei der Extraktstoffbestimmung von Fichtenholz.

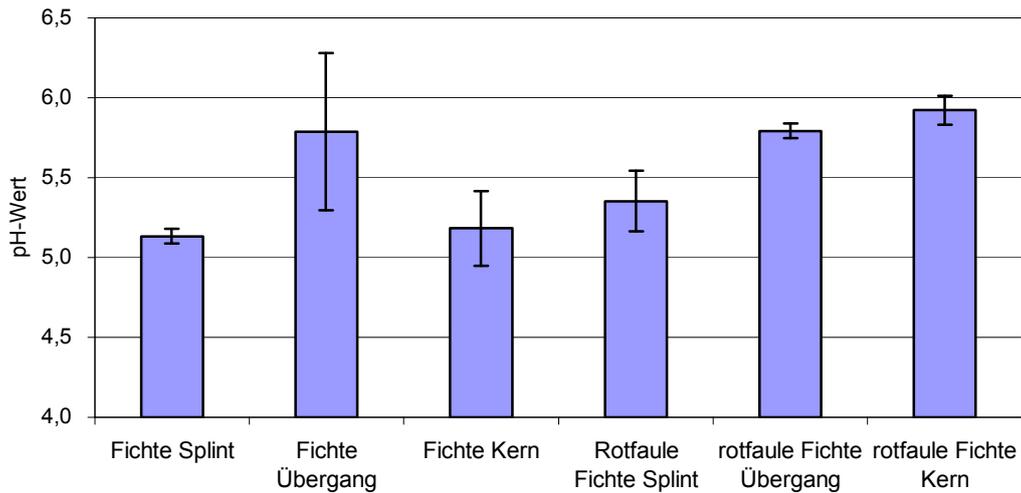


Abbildung 4-5: pH-Wertbestimmung bei Kaltwasserextraktion

Die Abbildung 4-5 veranschaulicht die ermittelten pH-Werte der Kaltwasserauszüge von gesunden und rotfaulen Fichtenholzproben. Die Mittelwerte aller ermittelten pH-Werte von gesundem und befallendem Fichtenholz der drei Zonen schwankt lediglich im mäßig sauren Bereich von pH 5,1 bis pH 5,9. Für gesundes Fichtensplintholz wurde mit pH 5,1 der geringste Wert ermittelt. Bei rotfaulem Fichtenholz liegen die pH-Werte im Durchschnitt über den Werten der vergleichbaren gesunden Fichtenholzproben.

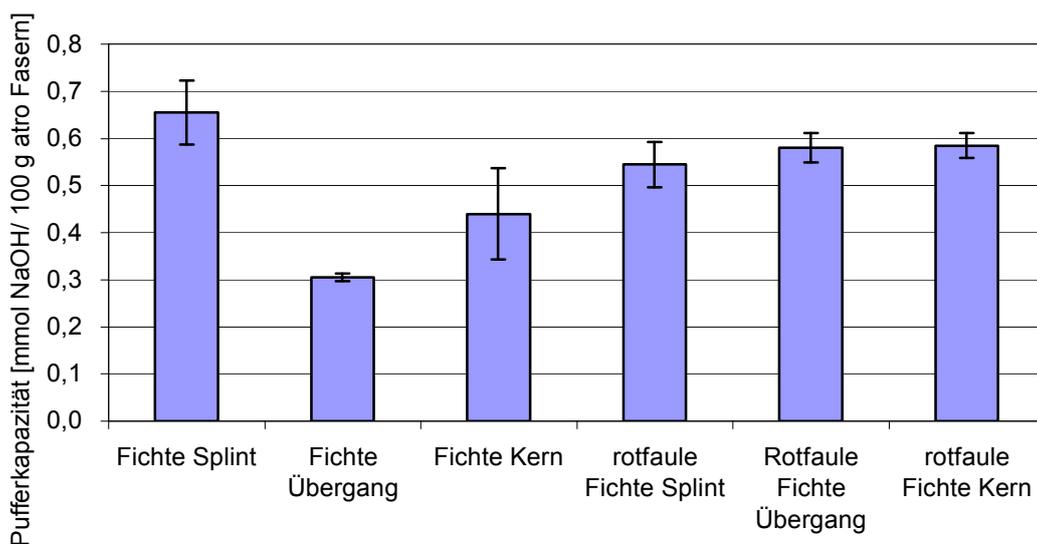


Abbildung 4-6: Pufferkapazität bei Kaltwasserextraktion

Die Abbildung 4-6 enthält die Messwerte der Pufferkapazität von Kaltwasserextrakten von Fichtenholzproben. Mit 0,31 mmol NaOH/100 g atro Faser war die Pufferkapazität der Kaltwasserextrakte aus dem Übergangsbereich zwischen Splint und Kernholz gesunder Fichten mit Abstand am geringsten. Für das Splintholz gesunder Fichten wurde mit 0,66 mmol NaOH/100 g atro Faser die höchste Pufferkapazität ermittelt. Ferner ist auffällig, dass die Schwankungen der Pufferkapazität zwischen den einzelnen Zonen des rotfaulen Fichtenholzes erheblich geringer ausfallen, als bei vergleichbarem gesundem Holz.

Die Pufferkapazität unterliegt jedoch auch erheblichen natürlichen Schwankungen (PRASETYA, 1989). So haben beispielsweise sowohl das Alter von Bäumen als auch der Erntezeitpunkt einen Einfluss auf die Pufferkapazität des Bastsaftes von Nadelbäumen. Weiterhin konnten ROFFAEL ET AL. (1994) und SCHNEIDER (1999) zeigen, dass auch die Prozessbedingungen beim thermo-mechanischen Holzaufschluss Auswirkungen auf die Pufferkapazität von Holzfaserstoff haben.

4.1.4.2 Extraktstoffgehalt nach Heißwasserextraktion

Die Abbildung 4-7 zeigt die Heißwasserextraktstoffgehalte von gesunden und rotfaulen Fichtenholzproben. Daraus ist ein stetiger Anstieg der Extrakte bei rotfaulem Fichtenholz vom Splint zum Kernholz ersichtlich. Weiterhin verdeutlicht die Grafik, dass der Anteil an Heißwasserextrakten im rotfaulen Fichtenholz höher ist, als bei vergleichbaren gesunden Holzproben.

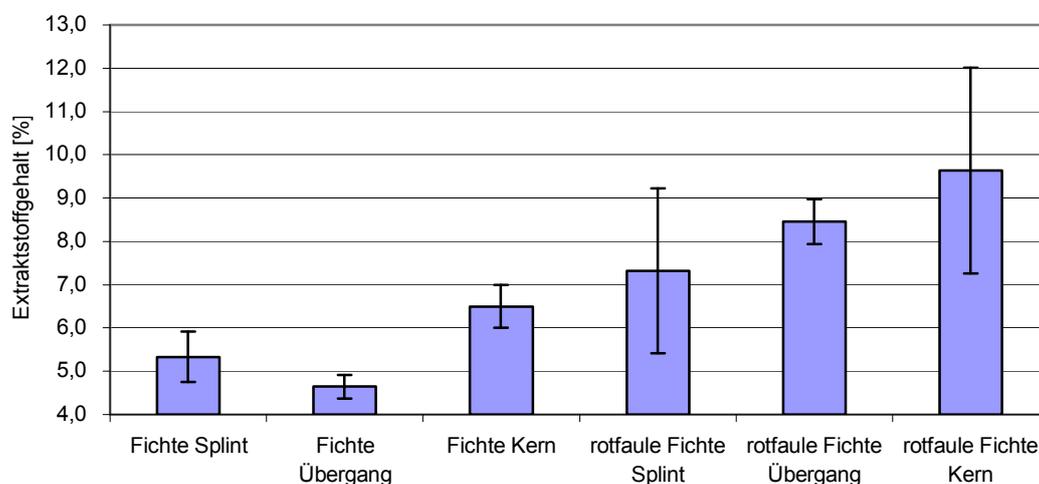


Abbildung 4-7: Extraktstoffgehalt von Fichtenhölzern durch Heißwasserextraktion

Der höchste Anteil mit 9,6 % wurde im Kernholz rotfauler Fichten ermittelt. Mit 4,6 % Extraktstoffgehalt war der Anteil in den Heißwasserauszügen von Holzproben aus dem Übergangsbereich von Splint zum Kern gesunder Fichten am geringsten.

SANDERMANN ET AL. (1967) ermittelten für gesundes Fichtensplintholz einen Heißwasserextraktstoffgehalt von 5,6 %, der sich mit dem hier ermittelten Anteil an Heißwasserextrakten von 5,3 % annähernd deckt. Jedoch beschreiben SANDERMANN ET AL. (1967) für den Gehalt von Heißwasserextrakten auch einen Gradienten vom Splint zum Kern, der hier nicht eindeutig nachgewiesen werden konnte.

Die pH-Werte der Heißwasserextrakte der untersuchten Fichtenholzproben weisen mit Werten von 4,8 bis 5,2 kaum Unterschiede auf und liegen damit im schwach sauren Bereich. Die einzelnen pH-Werte der Heißwasserextrakte sind in Abbildung 4-8 aufgeführt.

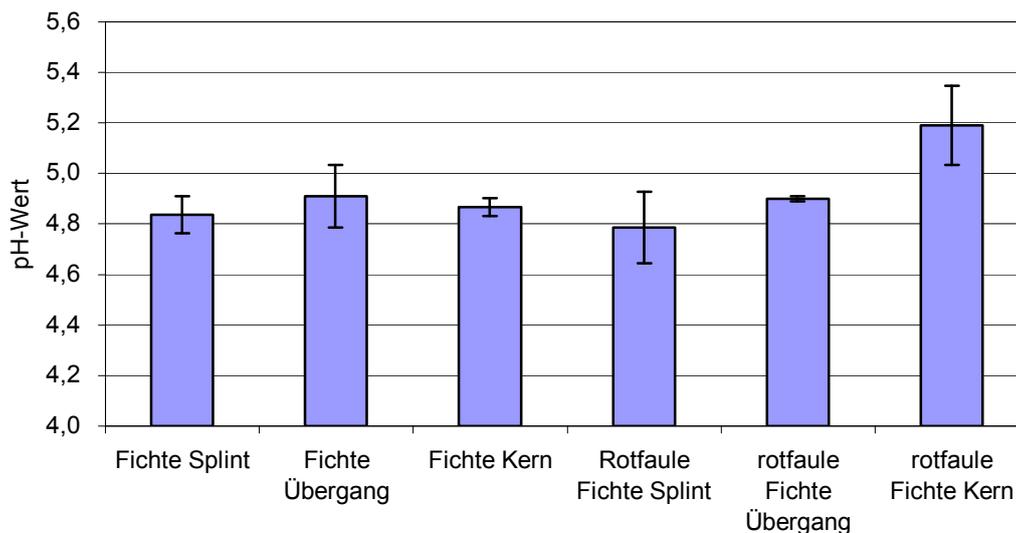


Abbildung 4-8: pH-Werte von Heißwasserextrakten von Fichtenholzproben

ROFFAEL ET AL. (2000) ermittelten bei Heißwasserextraktionen von Kern- und Splintholz der Esskastanie (*Castanea sativa*) ebenfalls sehr geringe Schwankungen zwischen den pH-Werten der einzelnen Zonen. Die absoluten Werte lagen mit pH 3,8 für das Splintholz und pH 3,2 für das Kernholz in einem deutlich saureren Bereich.

Typisch verkernende Holzarten wie die Europäische und die Japanische Lärche (*Larix decidua* u. *L. kaempferi*) können im Unterschied dazu erhebliche

Aciditätsschwankungen zwischen Kern und Splint aufweisen. Weiterhin hat das Baumalter auch einen Einfluss auf die Acidität des Holzes verkernender Holzarten (DIX & ROFFAEL, 1994). Diese Aciditätsunterschiede zwischen Kern- und Splintholz bei typischen Kernholzarten haben einen erheblichen Einfluss auf die Beileimbarkeit der daraus gewonnenen Späne (HAMEED & ROFFAEL, 1999 a).

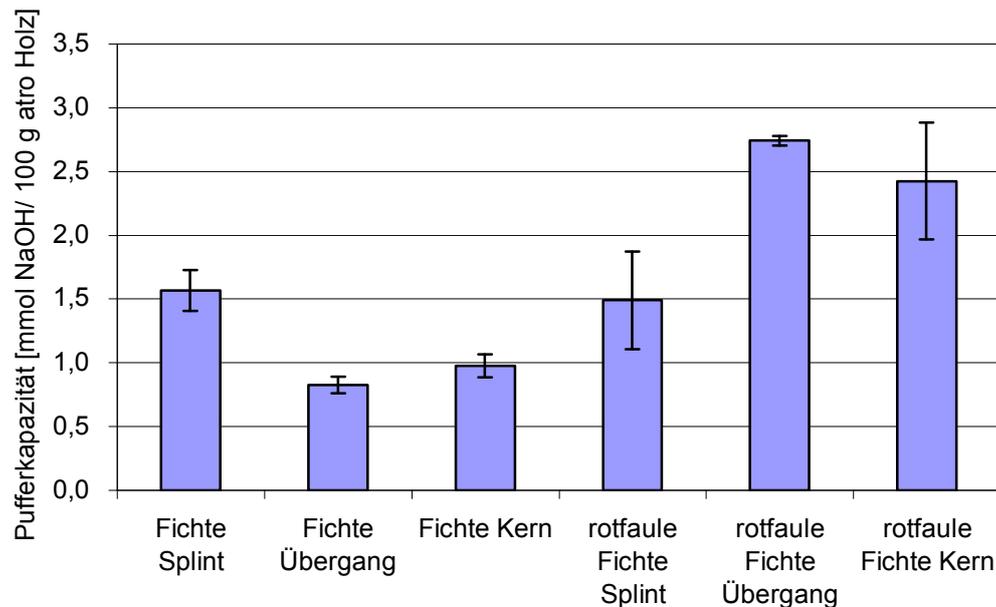


Abbildung 4-9: Pufferkapazität von Auszügen der Heißwasserextraktion von Fichtenholzproben

Die Abbildung 4-9 verdeutlicht die Unterschiede der Pufferkapazitäten von heißwässrigen Extrakten von gesundem und befallendem Fichtenholz. Es konnte gezeigt werden, dass das rotfaule Holz aus dem Kern- und Übergangsbereich deutlich besser puffert, als die vergleichbaren Proben gesunden Fichtenholzes. Mit 0,83 mmol NaOH/ 100g atro Holz puffert gesundes Holz aus dem Übergangsbereich am schlechtesten. Im Gegensatz dazu weist die vergleichbare Probe aus rotfaulem Fichtenholz mit 2,74 mmol NaOH/ 100g atro Holz die höchste Pufferkapazität auf. Erwartungsgemäß gibt es zwischen den beiden Splintholzproben diesbezüglich keine signifikanten Unterschiede. Weiterhin war damit die durchschnittliche Pufferkapazität des rotfaulen Fichtenholzes mit 2,22 mmol NaOH/ 100g atro Holz etwa doppelt so hoch wie die der gesunden Fichtenholzproben mit 1,13 mmol NaOH/ 100g atro Holz.

4.1.4.3 Extraktstoffbestimmung mit Ethanol-Cyclohexan

Die Abbildung 4-10 zeigt die Extraktstoffgehalte von gesunden und rotfaulen Fichtenholzproben, die nach der Ethanol-Cyclohexan-Extraktion ermittelt wurden. Auch hier wurde erkannt, dass rotfaules Fichtenholz mit 3,8 % einen höheren durchschnittlichen Extraktstoffgehalt aufweist als gesundes Fichtenholz mit 2,3 %. Mit 6,3 % wurde im Übergangsbereich des rotfaulen Fichtenholzes der höchste Wert gemessen. Der Vergleichswert der gesunden Fichtenholzprobe liegt bei lediglich 2,9 %.

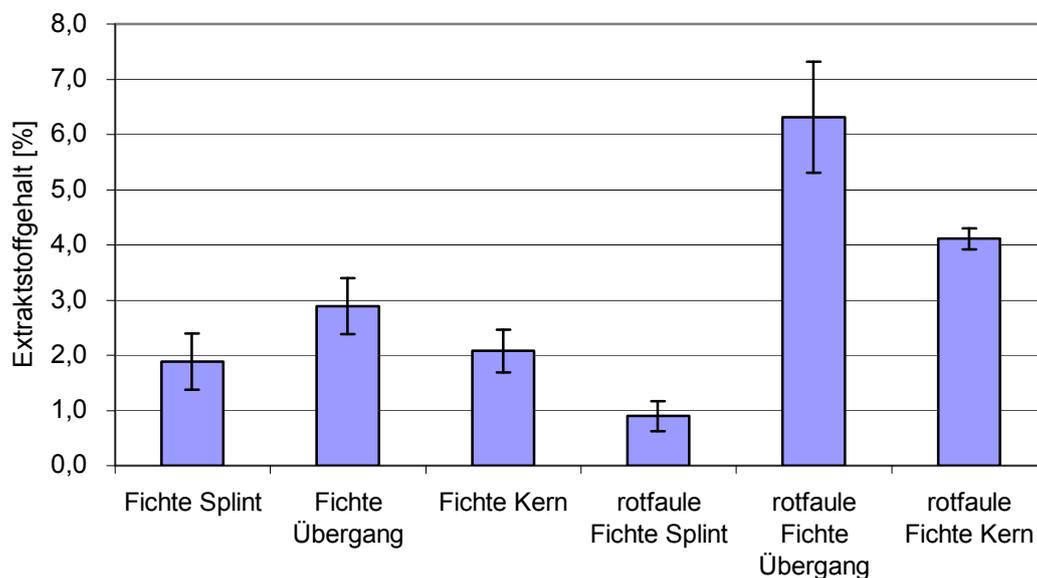


Abbildung 4-10: Extraktstoffbestimmung nach der Ethanol-Cyclohexan-Methode

PRZYBYLSKI (2007) beschreibt für Fichten aus 2 polnischen Wuchsregionen unterschiedlichen Alters, Schwankungen im Extraktstoffgehalt von 2,52 % bis 4,17 %. Dabei war die Änderung des Extraktstoffgehaltes bei unterschiedlichem Alter der Hölzer aus beiden Wuchsbezirken genau gegenläufig. Auch HAMEED & ROFFAEL (1999 b) ermittelten bei Kiefernholzproben (*Pinus sylvestris*) mit der Ethanol-Cyclohexan-Methode ein Ansteigen des Extraktstoffgehaltes vom Splint zum Kern. Weiterhin konnten sie ein Abnehmen des Extraktstoffanteiles nach thermischer Behandlung der Holzproben nachweisen.

4.1.5 Stickstoffbestimmung nach der Kjeldahl-Methode (DIN EN 25 663)

Gesundes Fichtenholz weist mit durchschnittlich 0,5 % einen etwas höheren Stickstoffgehalt als rotfaules Fichtenholz mit 0,4 % auf. Mit 0,8 % wurde der höchste Wert im Splint von gesunden Fichten ermittelt. Dies deckt sich mit der Angabe von KNIGGE (1966), der im Fichtenholz einen maximalen Stickstoffanteil von 0,9 % feststellte. Im Gegensatz dazu geben WAGENFÜHR (1989) und HÄGGLUND (1928) für Fichtenholz lediglich Stickstoffgehalte von 0,2 % und 0,1 % an. MARUTZKY & ROFFAEL (1977) ermittelten mit einer Modifikation der Kjeldahl-Methode für Fichtenholz lediglich einen Stickstoffanteil von 0,07 %. Weiterhin wurden Schwankungen des Stickstoffgehaltes im Zusammenhang mit der Fruktifikation und der Jahreszeit beschrieben (HARTIG, 1888). Die Abbildung 4-11 zeigt die Mittelwerte der Stickstoffgehalte der Holzproben aus gesunden und rotfaulen Fichten.

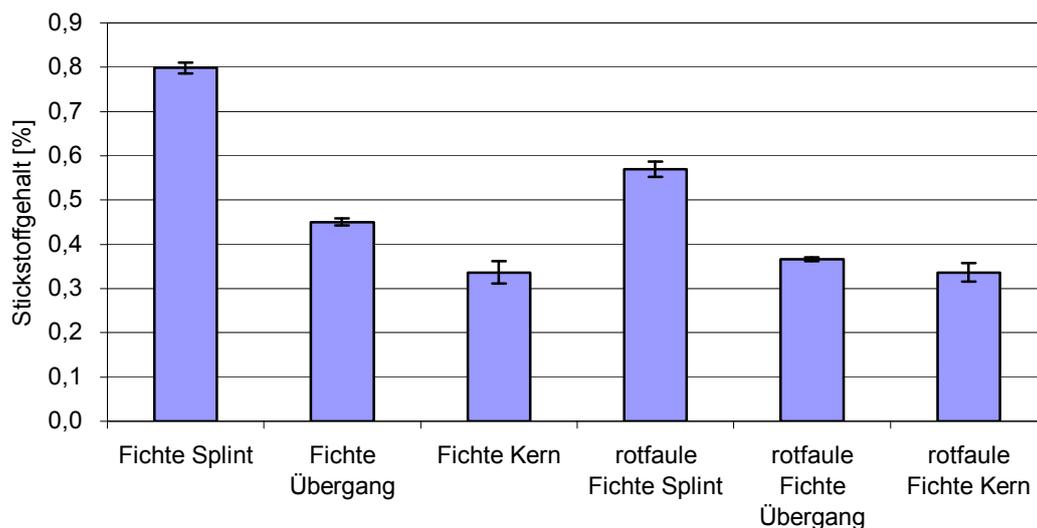


Abbildung 4-11: Stickstoffgehalt von Fichtenholzproben nach Kjeldahl

Aufgrund des geringeren Stickstoffgehaltes von rotfaulem Fichtenholz kann angenommen werden, dass *Heterobasidion annosum* die im Holz enthaltenen Stickstoffverbindungen als Nahrungsgrundlage nutzt.

4.1.6 Energieverbrauch

Die für den Aufschluss notwendigen Energiemengen stehen lediglich vom rotfaulen Fichtenholz zur Verfügung. Vom Aufschluss von gesundem Fichtenholz wurden vom

WKI Braunschweig keine Leistungsaufnahmen zur Verfügung gestellt. Somit ist kein Vergleich möglich. Für die Zerspaltung wurden 126 kWh/t atro Holz benötigt. Für die Zerkleinerung der Hackschnitzel von rotfaulem Fichtenholz im Refiner wurden 330 kWh/t atro Holz verbraucht. Dabei handelt es sich um die reine Zerkleinerungsleistung. Der Wert enthält keinen Energieverbrauch für die Dampferzeugung oder die Trocknung des Fasermaterials.

4.1.7 Siebanalysen

4.1.7.1 Siebanalyse der rotfaulen Fichtenholzspäne

Das verwendete Spanmaterial wurde Siebanalysen unterzogen. Die Ergebnisse der Analyse sind in Abbildung 4-12 dargestellt. Das Material wurde durch die unterschiedlichen Maschenweiten ihrer Dicke nach fraktioniert.

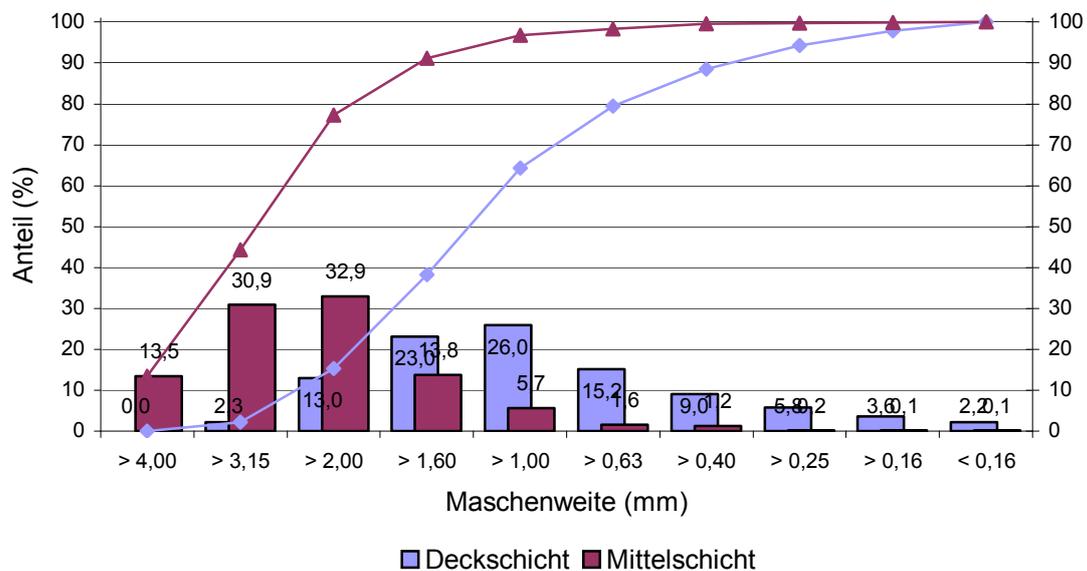


Abbildung 4-12: Zusammensetzung von Deckschicht und Mittelschicht des rotfaulen Spanmaterials

Vergleicht man diese Ergebnisse mit Literaturangaben (HELLER, 1995), so stellt man fest, dass die gemessenen Spandicken stärker dimensioniert sind. DEPPE & ERNST (2000) berichten von einer Abweichung der gewünschten Spandicke und einem erheblichen Verlust an Flachspänen bei einem übermäßigen Einsatz von

Hackschnitzeln. Bei der Zerspanung könnten die Hackschnitzel quer zum Faserverlauf gegen die Schneidmesser des Messerringzerspaners gedrückt werden, was aufgrund eines Brechens der Hackschnitzel entlang der Faserrichtung zu inhomogenen Spandicken führen würde. Nach HELLER (1995) könnten die größeren Spandicken aus einer stärkeren mittleren Abnutzung der Schneidmesser resultieren. Diese entsteht aus einer unverteilter Zuführung der Hackschnitzel über die Messerbreite eines Messerringzerspaners.

Die 5 Fraktionen des rotfaulen Spangutes wurden zur Herstellung von dreischichtigen Spanplatten in Deck- und Mittelschichtspäne getrennt. Die Zusammensetzung der Siebfractionen ist in Abbildung 4-12 dargestellt. Im Vergleich zu den Referenzspänen ist zu beobachten, dass das Spangut der Deckschicht erheblich gröber ist. Weiterhin ist der Staubanteil wesentlich geringer.

4.1.7.2 Siebanalyse der Industriespäne

Die Ergebnisse der Siebanalyse der Referenzspäne sind in Abbildung 4-13 dargestellt. In der Deckschicht sind die Späne mit einer Dicke von > 0,63 mm bis < 1,0 mm anteilmäßig mit 33,8 % am meisten vertreten. In den Bereich der Staubfraktion fielen 9,8 % des untersuchten Materials.

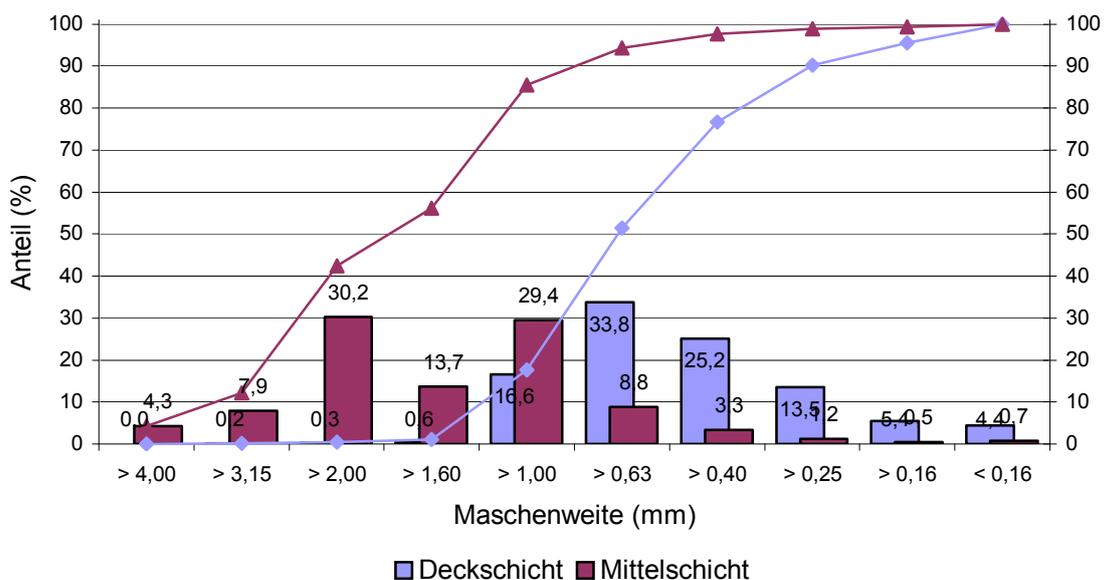


Abbildung 4-13: Siebanalyse von industriell aufbereiteten Deckschicht- und Mittelschichtspänen

Die Späne der Mittelschicht konnten zu ca. 30 % einer Dicke von > 2,0 mm bis < 3,15 mm zugeordnet werden. Im Bereich von über 3,15 mm lagen allerdings auch noch 12,2 % der untersuchten Mittelschichtspäne.

4.1.8 Schüttdichte nach DIN EN 12 580

Die Tabelle 4-1 enthält die ermittelten Schüttdichten der verwendeten luftgetrockneten Span- und Fasermaterialien. Wie erwartet, weist das Spangut aus rotfaulem Fichtenholz ein geringeres Schüttdichtgewicht als das Referenzmaterial auf. Zu dem erheblichen Gewichtsunterschied zwischen den Deckschichtspänen kommt es durch den höheren Feinanteil der industriell aufgearbeiteten Deckschichtspäne (vgl. Kapitel 4.1.7).

Bei den untersuchten Faserstoffen zeichnet sich ein ähnliches Bild ab, wie beim Spangut. Das rotfaule Fasermaterial ist mit $20,3 \text{ kg/m}^3$ um ca. 11 % leichter, als die Kiefernholzfasern der Fa. STEICO.

Tabelle 4-1: Schüttdichten der verwendeten Span- und Fasermaterialien

Material	Schüttdichtgewicht [kg/m ³ lutro]
Rotfaule Fichtenspäne DS	103,2
Rotfaule Fichtenspäne MS	99,6
Industriespanmix DS	188,8
Industriespanmix MS	127,2
Rotfaule Fichtenfasern	20,3
Kiefernholzfasern (Fa. STEICO)	22,8

4.1.9 Bestimmung der pH-Werte

In der Tabelle 4-2 sind die Ergebnisse der pH-Wertmessungen der rotfaulen Späne und Fasern und des verwendeten Referenzmaterials (Industriefasern und –späne) aufgeführt. Alle ermittelten Werte liegen im schwach sauren Bereich zwischen pH 4,0 und pH 5,0. Das rotfaule Material ist geringfügig saurer als das Referenzmaterial. Dies kommt der Aushärtung des verwendeten UF-Harzes zu Gute, da UF-Harze im sauren Milieu schneller polymerisieren (HABENICHT, 1997).

Tabelle 4-2: Ermittelte pH-Werte der verwendeten Rohstoffe

Material	pH-Wert
Rotfaule Fichtenfasern	4,0
Rotfaule Fichtenspäne	4,8
Kiefernholzfasern	4,1
Industriespanmix	5,0

4.2 Mechanisch-technologische Eigenschaften von Laborspanplatten

Es wurden von jeder Zielrohddichte einer Versuchsreihe drei dreischichtige Spanplatten angefertigt (vgl. Kap. 3.8.1). In den folgenden Tabellen 4-3 bis 4-7 sind die Mittelwerte aller Platten einer Zielrohddichte der entsprechenden Versuchsreihe aufgeführt.

4.2.1 Dreischichtige Spanplatten aus rotfaulem Fichtenholz

Die Tabelle 4-3 enthält die Mittelwerte der mechanisch-technologischen Eigenschaften jeder Zielrohddichte der Versuchsreihe aus rotfaulem Fichtenholz, gebunden mit UF-Harz (RF 1).

In dieser Versuchsreihe wurden dreischichtige, 19 mm dicke Spanplatten aus rotfaulen Fichtenspänen mit den Zielrohddichten 700 kg/m³, 650 kg/m³, 600 kg/m³,

550 kg/m³ und 500 kg/m³ hergestellt. Die Deckschicht hat einen Massenanteil von 40 %. Die Leimflotte besteht ausschließlich aus UF-Harz und Wasser (vgl. Kap.3.8.1). Die Presszeitfaktoren der Versuchsreihe betragen 12 s/mm und 15 s/mm.

Tabelle 4-3 Eigenschaften von dreischichtigen, 19 mm dicken Spanplatten aus rotfaulem Fichtenspangut (Serie RF 1) in Abhängigkeit von der Presszeit

Seriennummer Presszeitfaktor	Rohdichte [kg/m ³]	Querzugfestig- keit [N/mm ²]	Abhebefestig- keit [N/mm ²]	Quellung 2 h [%]	Quellung 24 h [%]
<i>RF 1</i> 12 s/mm	700	0,73	1,39	21,66	24,74
	650	0,66	1,28	20,86	24,98
	600	0,51	1,19	21,79	25,12
	550	0,45	0,98	18,76	21,37
	500	0,41	0,83	16,75	20,58
<i>RF 1</i> 15 s/mm	700	0,74	1,56	20,96	25,21
	650	0,63	1,37	23,31	26,89
	600	0,55	1,33	21,40	24,74
	550	0,50	1,20	19,45	22,09
	500	0,46	0,87	17,83	19,90

Die UF-Harz gebundenen Spanplatten aus rotfaulem Fichtenholz weisen je nach Rohdichte Querzugfestigkeiten von 0,74 N/mm² bis 0,46 N/mm² auf. Damit erfüllen alle Platten den von der DIN EN 312-P2 geforderten Mindestwert von 0,35 N/mm². Auch die Abhebefestigungen liegen alle über dem Mindestwert von 0,80 N/mm² (DIN EN 312, 2003). Lediglich die Quellwerte überschreiten den von der DIN EN 312-P4 geforderten Höchstwert von 15 %.

In Tabelle 4-4 sind die Mittelwerte der mechanisch-technologischen Eigenschaften der Versuchsreihe aus rotfaulem Fichtenspangut, gebunden mit UF-Harz, Härter und Hydrophobierungsmittel (*RF 2*) dargestellt (vgl. Tabelle 3-3). Auch in dieser Reihe wurden Spanplatten aus rotfaulen Fichtenspänen mit den Zielrohddichten 700 kg/m³, 650 kg/m³, 600 kg/m³, 550 kg/m³ und 500 kg/m³ und einer Stärke von 19 mm erzeugt. Jedoch wurde der Leimflotte dieser Platten noch zusätzlich ein Härtingsbeschleuniger zur Herabsetzung des pH-Wertes und ein

Hydrophobierungsmittel zur Minderung der Dickenquellung (vgl. Kapitel 3.1.4) zugesetzt. Die Zusammensetzungen der Leimflotten und Beleimungsparameter sind in Kapitel 3.8.1 beschrieben. Die Presszeitfaktoren der Versuchsreihe *RF 2* betragen 15 s/mm und 12 s/mm.

Tabelle 4-4: Eigenschaften der dreischichtigen, 19 mm dicken Spanplatten aus rotfaulem Fichtenspangut (Serie RF 2) in Abhängigkeit von der Presszeit

Seriennummer Presszeitfaktor	Rohdichte [kg/m ³]	Querzugfestig- keit [N/mm ²]	Abhebefestig- keit [N/mm ²]	Quellung 2 h [%]	Quellung 24 h [%]
<i>RF 2</i> 12 s/mm	700	0,88	1,64	2,68	12,40
	650	0,80	1,58	2,96	12,30
	600	0,67	1,30	3,90	14,38
	550	0,61	1,05	3,85	13,89
	500	0,54	0,95	4,66	13,88
<i>RF 2</i> 15 s/mm	700	0,85	1,60	2,99	12,91
	650	0,78	1,55	3,07	12,77
	600	0,63	1,22	4,04	14,02
	550	0,49	0,99	4,64	14,23
	500	0,44	0,87	4,93	14,53

Aus den Ergebnissen von Tabelle 4-3 und Tabelle 4-4 ist ersichtlich, dass die Verarbeitung von rotfaulem Fichtenholz zu dreischichtigen Spanplatten im Labormaßstab, in Anlehnung an industriell verwendete Rezepturen, mit Rohdichten von 700 kg/m³ bis 500 kg/m³ unproblematisch realisierbar ist. Das rotfaule Spanmaterial zeichnet sich durch eine gute Verarbeitbarkeit und Beleimbarkeit aus. Die aus dem rotfaulen Spangut hergestellten Spanplatten weisen eine auffällig helle Farbe auf.

Die ermittelten Rohdichten der hergestellten dreischichtigen Spanplatten aus rotfaulem Fichtenholz unterscheiden sich nicht signifikant von den angepeilten Zielroh-dichten, so dass die Ergebnisse der mechanisch – technologischen Eigenschaften miteinander vergleichbar sind. Durch die Zugabe einer hydrophobierenden Emulsion verbesserten sich die Quellwerte nach 24 Stunden

Wasserlagerung insoweit, dass die Platten den durch die EN 312-P4 gegebenen Höchstwert von 15 % unterschreiten.

Tabelle 4-5: Mechanisch-technologische Eigenschaften von Laborspanplatten der Versuchsreihen RF 3 und RF 4 in Abhängigkeit vom Bindemitteltyp

Seriennummer	Rohdichte [kg/m ³]	Querzugfestigkeit [N/mm ²]	Abhebefestigkeit [N/mm ²]	Quellung 2 h [%]	Quellung 24 h [%]	Biegefestigkeit [N/mm ²]	Biege-E-Modul [kN/mm ²]
<i>RF 3 UF-Harz</i>	714	0,74	1,51	1,82	10,36	21,34	3,84
	665	0,70	1,33	2,11	11,76	18,71	3,41
	625	0,63	1,18	3,06	12,28	15,96	2,84
	562	0,53	1,11	2,86	12,10	13,91	2,49
	518	0,45	0,84	3,08	13,90	10,74	2,12
	467	0,26	0,63	3,99	15,58	6,96	1,46
<i>RF 4 PF-Harz</i>	717	0,91	1,78	1,09	6,29	26,50	4,73
	661	0,75	1,62	0,87	6,59	23,09	4,49
	609	0,62	1,40	2,71	8,78	18,52	3,13
	552	0,56	1,21	2,32	8,99	13,69	2,66
	505	0,49	0,94	2,58	10,41	9,02	1,80

Die Tabelle 4-5 gibt einen Überblick über die mechanisch-technologischen Eigenschaften von Laborspanplatten der Serien *RF 3* und *RF 4*. Die Plattenparameter sind in Tabelle 3-3 ausführlich beschrieben (vgl. Kap. 3.8.1). Die Serie *RF 3* unterscheidet sich von den Serien *RF 1* und *RF 2* durch ein größeres Plattenformat, eine optimierte Bindemittelrezeptur und einen auf 9 Sek./mm abgesenkten Presszeitfaktor. Weiterhin wurde die Zielrohndichte auf bis zu 450 kg/m³ abgesenkt (vgl. Tabelle 3-3). Im Gegensatz dazu wurde bei der Serie *RF 4* ein Phenol-Formaldehyd-Harz als Bindemittel verwendet (vgl. Kap. 3.8.1).

Aus Tabelle 4-5 ist ersichtlich, dass alle UF-Harz gebundenen Spanplatten der Serie *RF 3* bis zu einer Rohdichte von 500 kg/m³ alle geprüften Eigenschaften erfüllen. Bei einer weiteren Verringerung der Rohdichte auf ca. 460 kg/m³ ist ein überproportionaler Einbruch bei sämtlichen Festigkeitseigenschaften zu verzeichnen.

Im Vergleich zur UF-Harz gebundenen Serie *RF 3*, weisen die Phenol-Formaldehyd-Harz gebundenen Spanplatten der Serie *RF 4* bei vergleichbarer Rohdichte deutlich höhere Festigkeitseigenschaften und geringere Dickenquellungen nach 2 h und 24 h auf (vgl. Tabelle 4-5).

4.2.2 Dreischichtige Spanplatten aus Industriespänen

Die Versuchsreihen aus Industriespänen, deren mechanisch- technologische Eigenschaften in den Tabellen 4-6 und 4-7 aufgeführt sind, wurden hergestellt, um die Ergebnisse der Spanplatten aus rotfaulem Fichtenholz mit Platten aus konventionellem Material vergleichen zu können. Dazu wurden die Referenzplatten unter identischen Herstellungsparametern erzeugt, wie die Spanplatten aus rotfaulem Spangut.

Tabelle 4-6: Eigenschaften der dreischichtigen, 19 mm dicken Spanplatten aus Referenzspangut (*IN 1*) in Abhängigkeit von der Presszeit

Seriennummer Presszeitfaktor	Rohdichte [kg/m ³]	Querzugfestig- keit [N/mm ²]	Abhebefestig- keit [N/mm ²]	Quellung 2 h [%]	Quellung 24 h [%]
<i>IN 1</i> 12 s/mm	700	0,74	1,41	17,93	25,21
	650	0,62	1,35	17,22	21,66
	600	0,44	1,18	16,67	22,56
	550	0,41	0,89	17,04	20,09
	500	0,36	0,78	15,91	19,04
<i>IN 1</i> 15 s/mm	700	0,70	1,50	17,87	24,94
	650	0,56	1,30	17,33	22,01
	600	0,45	1,14	17,20	22,02
	550	0,43	0,96	16,86	20,06
	500	0,38	0,72	15,14	17,99

Die Tabelle 4-6 enthält die Mittelwerte der mechanisch-technologischen Eigenschaften jeder Zielrohddichte der Versuchsreihe aus einem industriell aufbereitetem Spanmix, gebunden mit UF-Harz (*IN 1*). In dieser Versuchsreihe wurden dreischichtige, 19 mm dicke Spanplatten aus industriell aufbereitetem

Spanmaterial mit den Zielrohdichten 700 kg/m³, 650 kg/m³, 600 kg/m³, 550 kg/m³ und 500 kg/m³ hergestellt. Die Leimflotte besteht ausschließlich aus UF-Harz und Wasser und ist mit der Leimrezeptur der Versuchsreihe *RF 1* völlig identisch. Die Presszeitfaktoren betragen - wie auch bei der Versuchsreihe *RF 1* - 12 s/mm und 15 s/mm.

Die UF-Harz gebundenen Spanplatten aus dem Industriespanmix (*IN 1*) der PFLEIDERER INDUSTRIE GMBH – Werk Gütersloh – weisen je nach Rohdichte Querkzugfestigkeiten von 0,70 N/mm² bis 0,38 N/mm² auf. Damit erfüllen die Platten im Mittel den von der DIN EN 312-P2 geforderten Mindestwert von 0,35 N/mm². Lediglich die Abhebefestigkeit der Referenzplatten mit einer Rohdichte von 500 kg/m³ liegt knapp unter dem Mindestwert von 0,80 N/mm². Die Quellwerte überschreiten den von der DIN EN 312-P4 geforderten Höchstwert von 15 %.

Tabelle 4-7: Eigenschaften der dreischichtigen, 19 mm dicken Spanplatten aus Referenzspangut der Versuchsreihe IN 02 in Abhängigkeit von der Presszeit

Seriennummer Presszeitfaktor	Rohdichte [kg/m ³]	Querkzugfestig- keit [N/mm ²]	Abhebefestig- keit [N/mm ²]	Quellung 2 h [%]	Quellung 24 h [%]
<i>IN 2</i> 12 s/mm	700	0,75	1,66	3,94	15,66
	650	0,72	1,39	4,09	15,20
	600	0,65	1,30	4,15	13,90
	550	0,51	0,89	4,91	14,80
	500	0,40	0,82	5,06	12,91
<i>IN 2</i> 15 s/mm	700	0,79	1,30	3,91	14,28
	650	0,69	1,18	4,30	14,02
	600	0,64	1,09	4,41	15,07
	550	0,46	0,83	5,14	15,00
	500	0,36	0,76	5,09	13,81

In der Tabelle 4-7 sind die Mittelwerte der mechanisch-technologischen Eigenschaften jeder Zielrohdichte der Versuchsreihe aus industriell aufbereiteten Spänen, gebunden mit UF-Harz, Härter und Hydrophobierungsmittel (*IN 2*)

dargestellt. Auch in dieser Reihe wurden Spanplatten mit den Rohdichten 700 kg/m³, 650 kg/m³, 600 kg/m³, 550 kg/m³ und 500 kg/m³ und einer Stärke von 19 mm erzeugt. Jedoch wurde der Leimflotte dieser Platten noch wiederum zusätzlich ein Härtingsbeschleuniger und Hydrophobierungsmittel zugesetzt. Die Bindemittelzusammensetzungen der Reihen *RF 2* und *IN 2* sind identisch. Zur besseren Vergleichbarkeit betragen die Presszeitfaktoren auch hier 12 s/mm und 15 s/mm.

Durch die Zugabe des Härtingsbeschleunigers ist auch bei dieser Serie ein Anstieg der Festigkeitswerte im Vergleich zur Versuchsreihe aus Referenzspäne ohne Härter (*IN 1*) bei kürzerer Presszeit zu verzeichnen. Durch die Zugabe des Hydrophobierungsmittels verbesserten sich die Quellwerte nach 24 Stunden Wasserlagerung insoweit, dass die Platten den durch die DIN EN 312-P4 gegebenen Höchstwert von 15 % erreichen.

4.2.3 Querzug-, Abhebe- und Biegefestigkeit

Die Querzugfestigkeit einer Span- oder Faserplatte ist kennzeichnend für ihre Widerstandsfähigkeit gegenüber einer Zugbelastung senkrecht zur Plattenebene. Sie gibt nicht nur Aufschluss darüber, ob eine ausreichende Beleimung der Mittelschichtspäne stattgefunden hat, sondern auch, ob das verwendete Spanmaterial dazu geeignet ist, die geforderten Festigkeitswerte zu erzielen (DEPPE & ERNST, 2000).

Sämtliche Mittelwerte von Querzug- und Abhebefestigkeit der Laborspanplatten aus rotfauler Fichte liegen über den entsprechenden Werten der Referenzplatten. Alle hergestellten Platten erfüllen die von der DIN EN 312-P2 geforderte Mindestquerzugfestigkeit von 0,35 N/mm². DUNKY & NIEMZ (2002) bezeichnen die Rohdichte als „dominierende Einflussgröße“, mit deren Zunahme alle Festigkeitseigenschaften steigen. Nach HELLER (1995) und DUNKY & NIEMZ (2002) führt eine Veränderung der Rohdichte einer Spanplatte auch zu einer Veränderung der Querzugfestigkeit. Auch SCHNEIDER ET AL. (1982) beschreiben, dass sich die mechanisch-technologischen Eigenschaften von Holzwerkstoffen durch Variation von Rohdichte, Rohdichteprofil und Beleimgrad erheblich beeinflussen lassen. Ebenso hat die Ausrichtung (KLAUDITZ, 1955 a; KLAUDITZ ET AL. 1960), die Form und

Dimensionen der Späne einen erheblichen Einfluss auf die jeweiligen Spanplatteneigenschaften (KLAUDITZ, 1962). Wie aus Abbildung 4-14 und Abbildung 4-15 zu entnehmen ist, nimmt die Querkzugfestigkeit mit steigender Rohdichte etwa linear zu.

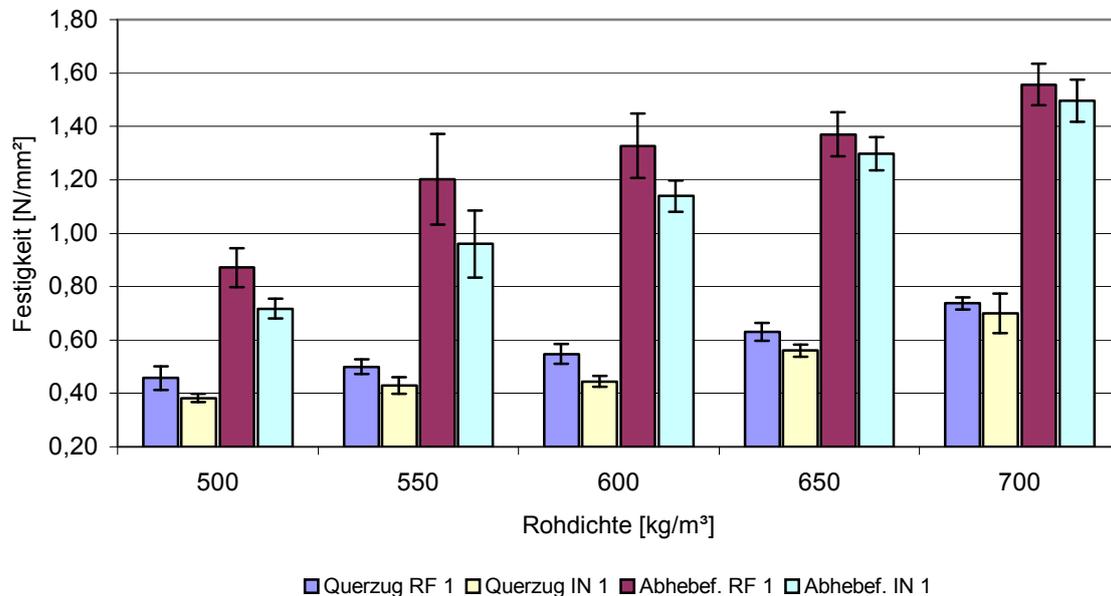


Abbildung 4-14: Querkzug- und Abhebefestigkeiten der Versuchsreihe aus rotfaulem Material, gebunden mit UF-Harz (RF 1) und der Versuchsreihe aus Referenzspäne, gebunden mit UF-Harz (IN 1); Presszeitfaktor: 15 s/mm

Für die Verarbeitung von Spanplatten hat die Festigkeit der Decklagen eine ebenso große Bedeutung wie die Querkzugfestigkeit (DEPPE & ERNST, 2000). Beim Beschichten mit dünnen Melaminfilmen zeigt die Beschichtung in allen Fällen ein anderes Ausdehnungs- und Schrumpfungsverhalten über die Fläche betrachtet, als die Spanplatte. Die DIN EN 312-P2 schreibt für die Abhebefestigkeit von Spanplatten einen Mindestwert von 0,80 N/mm² vor. Dieser Mindestwert wird von allen Platten der Versuchsreihe aus rotfaulem Material, gebunden mit UF-Harz (RF 1) überschritten. Bei den Referenzplatten unterschreiten lediglich die Platten mit der Zielrohndichte von 500 kg/m³ den durch die EN-Norm geforderten Mindestwert.

Die Abbildung 4-15 enthält die Festigkeitswerte der Versuchsreihe aus rotfaulem Material, gebunden mit UF-Harz, Härter und Hydrophobierungsmittel (RF 2) und der Versuchsreihe aus Referenzspanmaterial, gebunden mit UF-Harz, Härter und Hydrophobierungsmittel (IN 2). Durch eine Zugabe des Härtungsbeschleunigers (vgl. Kap. 3.8.1) erhöhen sich sämtliche ermittelte Festigkeitswerte. Auch bei dieser

Reihe liegen sämtliche Querkzugfestigkeiten der Spanplatten aus rotfaulem Holz im Mittel über denen der Referenzplatten. Alle Spanplatten erfüllen im Mittel die durch die DIN EN 312-P2 geforderten Mindestwerte für die Querkzug- und Abhebefestigkeit.

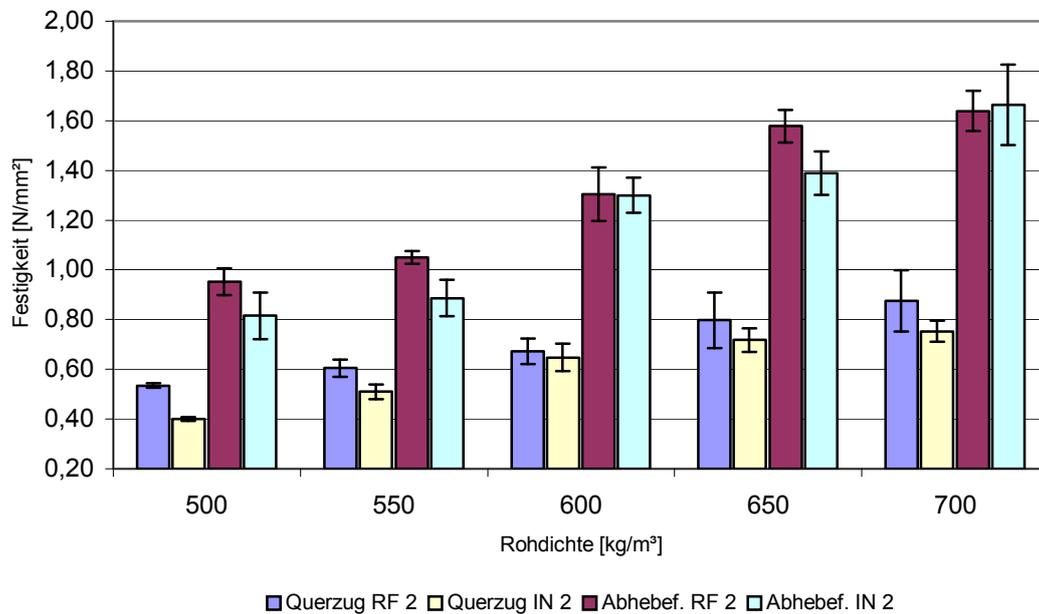


Abbildung 4-15: Querkzug- und Abhebefestigkeiten der Versuchsreihe aus rotfaulem Material (RF 2) und der Versuchsreihe aus einem Industriespanmix (IN 2); Presszeitfaktor: 15 s/mm

Für die höheren Festigkeitswerte bei den Spanplatten aus rotfaulem Fichtenholz gibt es mehrere Erklärungsansätze. Durch das geringere Schüttgewicht der rotfaulen Fichtenspäne (s. Kap. 4.1.8) ist das Volumen des unverdichteten Spankuchens erheblich größer als der Spankuchen der Referenzplatten. Somit wird das rotfaule Spanmaterial dichter aneinander gepresst und es kommt zu einer höheren Lagerungsdichte in der Platte. Dadurch werden die Adhäsion- und Kohäsionskräfte wirksamer (KHARAZIPOUR, 1996). Der gleiche Effekt tritt bei einer Erhöhung der Rohdichte auf, die zwangsläufig zu höheren Festigkeitseigenschaften führt (DUNKY & NIEMZ, 2002; DEPPE & ERNST, 2000). DUNKY & NIEMZ (2002) beschreiben weiterhin, dass die Biegefestigkeiten von Spanplatten mit identischer Rohdichte zunehmen, wenn die Rohdichte des zu deren Herstellung verwendeten Holzes sinkt. Der teilweise Abbau der Holzstruktur durch den Rotfäulepilz hat einen ähnlichen Effekt. Die grundlegende Holzmatrix bleibt erhalten, jedoch wird durch die Derivatisierung der Ligninmoleküle das Holz erheblich leichter (LUDWIG, 2007).

Ebenso wäre es möglich, dass sich die Festigkeitswerte durch die von *Heterobasidion annosum* erzeugten Ligninbruchstücke und daraus an der Spanoberfläche entstandene freie Phenoxylradikale erhöhen (KHARAZIPOUR, 1996). Diese beiden Voraussetzungen müssen gegeben sein, um eine bindemittelfreie Verklebung von Holzpartikeln zu erzeugen. Jedoch ist fraglich, ob durch das verwendete UF-Harz diese biochemischen Vorgänge überhaupt zur Wirkung kommen.

Unter anderem hat auch die Spanqualität einen entscheidenden Einfluss auf die Eigenschaften der daraus erzeugten Spanplatte (DUNKY & NIEMZ, 2002). So sollten zur Verbesserung der Biegefestigkeit ein höherer Anteil an Späne mit hohem Schlankheitsgrad eingesetzt werden. Zur Verbesserung der Querkzugfestigkeit ist ein höherer Anteil an kubischen Spänen hilfreich, während man mit einem höheren Anteil an sehr dünnen Spänen die Oberflächenqualität positiv beeinflusst. Der Staub- und Feingutanteil wird auch als „Leimfresser“ bezeichnet (HELLER, 1995). Diese Spanfraktionen tragen kaum zur Festigkeit der Spanplatte bei. Diese Fraktionen dienen lediglich zur Verbesserung der Homogenität und der Verbesserung der Direktbeschichtungsfähigkeit der Plattenoberfläche. Aufgrund des geringeren Staub- und Feingutanteils im Deckschichtmaterial der Spanplatten aus rotfauler Fichte im Vergleich zu den Referenzspänen (vgl. Kap. 4.1.7) hat das Spangut eine geringere Oberfläche. Bei der Beleimung muss somit eine geringere Spanoberfläche mit Bindemittel benetzt werden. Somit gelangt bei den rotfaulen Spänen mehr Leim auf eine vergleichbare Flächeneinheit. Dies ist mit einer Erhöhung des prozentualen Bindemittelanteils vergleichbar. Dadurch ist auch ein Anstieg der Querkzugfestigkeiten und der Abhebefestigkeiten zu erwarten (DUNKY & NIEMZ, 2002).

Der pH-Wert des rotfaulen Spangutes ist mit pH 4,0 etwas geringer als der pH-Wert der Referenzspäne (vgl. Kap. 4.1.9). Da das verwendete UF-Harz im sauren Milieu schneller aushärtet (HABENICHT, 1997), sind auch aufgrund der höheren Härtungsgeschwindigkeit höhere Festigkeitseigenschaften der Spanplatten aus rotfaulem Fichtenholz möglich.

In Abbildung 4-16 ist die lineare Abhängigkeit der Querkzugfestigkeit von der Rohdichte der Spanplatten aus rotfaulem Fichtenholz der Versuchsreihe aus rotfaulem Spangut, gebunden mit UF-Harz (*RF 1*) und der Versuchsreihe aus rotfaulem Spanmaterial, gebunden mit UF-Harz, Härter und Hydrophobierungsmittel

(RF 2) dargestellt. Mit einem Bestimmtheitsmaß von $R^2_{RF 1} = 0,91$ bzw. $R^2_{RF 2} = 0,81$ besteht eine sehr enge lineare Abhängigkeit. HELLER (1995) bestätigt die Abhängigkeit der Querkzugfestigkeit von der Rohdichte. Im Mittel steigt die Querkzugfestigkeit bei der Versuchsreihe aus rotfaulem Spangut, gebunden mit UF-Harz (RF 1), um $0,15 \text{ N/mm}^2$ bei einer Zunahme der Rohdichte um 100 kg/m^3 . Bei der Versuchsreihe aus rotfaulem Spanmaterial, gebunden mit UF-Harz, Härter und Hydrophobierungsmittel (RF 2) sind es durchschnittlich $0,17 \text{ N/mm}^2$ pro 100 kg/m^3 Rohdichteänderung.

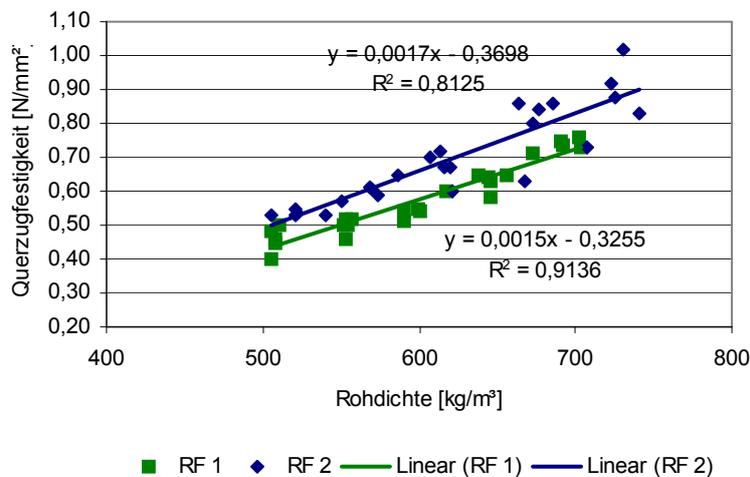


Abbildung 4-16: Abhängigkeit der Querkzugfestigkeit von der Rohdichte der Versuchsreihen aus rotfaulem Spangut RF 1 und RF 2

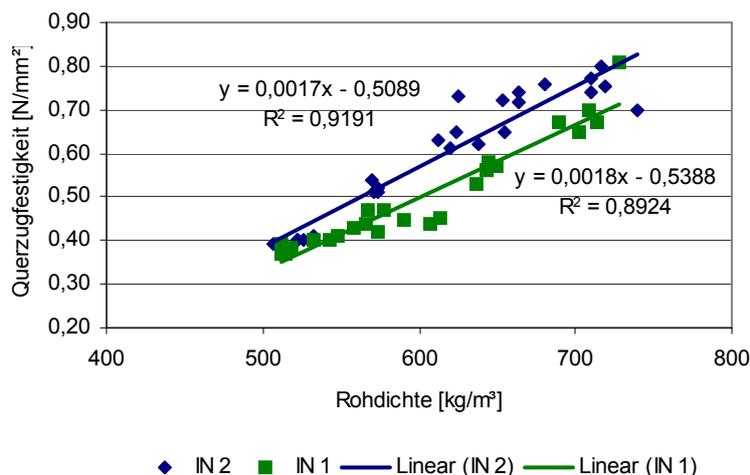


Abbildung 4-17: Abhängigkeit der Querkzugfestigkeit von der Rohdichte der Versuchsreihen aus Referenzspangut IN 1 und IN 2

Bei den Referenzspanplatten bietet sich ein ähnliches Bild (Abbildung 4-17). Mit Bestimmtheitsmaßen von $R^2_{IN\ 1} = 0,89$ und $R^2_{IN\ 2} = 0,92$ besteht auch bei diesen Versuchsreihen eine sehr enge lineare Abhängigkeit von Plattenrohddichte und Querkzugfestigkeit. Die Änderungen der Querkzugfestigkeit bei Rohddichtezunahme, mit $0,18\text{ N/mm}^2$ pro 100 kg/m^3 bzw. $0,17\text{ N/mm}^2$ pro 100 kg/m^3 , bewegen sich im gleichen Bereich wie bei den Spanplatten aus rotfaulem Fichtenholz. HELLER (1995) gibt für eine Rohddichteänderung von 100 kg/m^3 eine Querkzugfestigkeitsänderung von ca. $0,2\text{ N/mm}^2$ an. Dieser Wert deckt sich mit den hier ermittelten Ergebnissen.

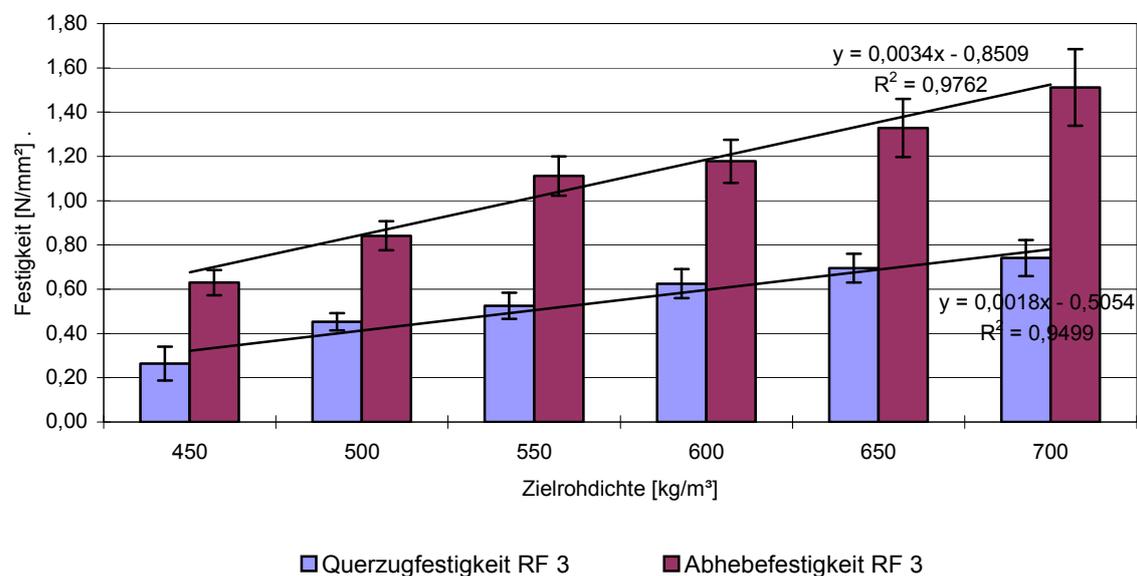


Abbildung 4-18: Querkzug- und Abhebefestigkeit in Abhängigkeit von der Rohddichte von UF-Harz gebundenen Spanplatten der Versuchsreihe RF 3

Die Abbildung 4-18 beinhaltet die mittleren Querkzug- und Abhebefestigkeitswerte der dreischichtigen Spanplatten der Serie *RF 3*. Im Unterschied zur Serie *RF 2* wurden hier Laborspanplatten in einem größeren Format (70,5 cm x 46,5 cm) unter Verwendung einer industriell optimierten Bindemittelrezeptur hergestellt (vgl. Kap. 3.8.1). Weiterhin wurden der Presszeitfaktor auf 9 s/mm und die Zielrohddichte in Schritten von 50 kg/m^3 auf bis zu 450 kg/m^3 verringert (vgl. Kap. 3.8.1).

Die Grafik verdeutlicht und bestätigt wiederum die enge Abhängigkeit von Festigkeitseigenschaften und Rohddichte, die bereits bei den Serien *RF 1* und *RF 2* beobachtet wurde. Bei der Serie *RF 3* erhöht sich die Querkzugfestigkeit ähnlich der Serie *RF 2* linear um $0,18\text{ N/mm}^2$ bei einem Rohddichteanstieg von 100 kg/m^3 mit

einem Bestimmtheitsmaß von 0,9499. Auch bei den Abhebefestigkeiten ist ein sehr enger, linearer Zusammenhang gegeben. Bei einem Bestimmtheitsmaß von 0,9762 steigt die Abhebefestigkeit durchschnittlich um 0,34 N/mm² bei einem Rohdichteanstieg von 100 kg/m³.

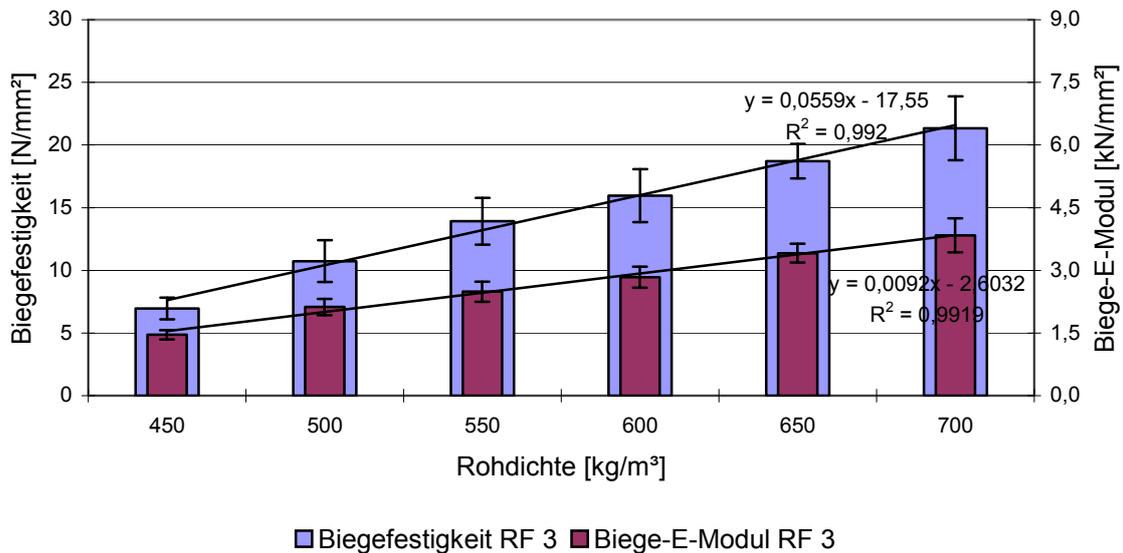


Abbildung 4-19: Biegefestigkeit und E-Modul in Abhängigkeit von der Rohdichte von UF-Harz gebundenen Spanplatten der Serie RF 3

Die Abbildung 4-19 zeigt, dass es auch zwischen Biegefestigkeit, Biege-E-Modul und der Rohdichte von Laborspanplatten aus rotfaulem Fichtenholz einen sehr engen Zusammenhang gibt. Das Bestimmtheitsmaß dieser Beziehungen ist mit Werten größer 0,99 sehr hoch. An einer Rohdichte von 550 kg/m³ übersteigen die Festigkeitswerte die von der DIN EN 312-P2 geforderten von 13 N/mm² bzw. 1,6 kN/mm².

Phenol-Formaldehyd-Harze werden hauptsächlich eingesetzt, wenn wasser- und witterungsbeständige Verleimungen erforderlich sind. PF-Harz gebundene Holzwerkstoffe zeichnen sich durch eine geringe Formaldehydabgabe und eine geringe Dickenquellung aus. Im Gegensatz zu Harnstoff-Formaldehyd-Harzen härten Phenol-Formaldehyd-Harze im alkalischen pH-Bereich aus.

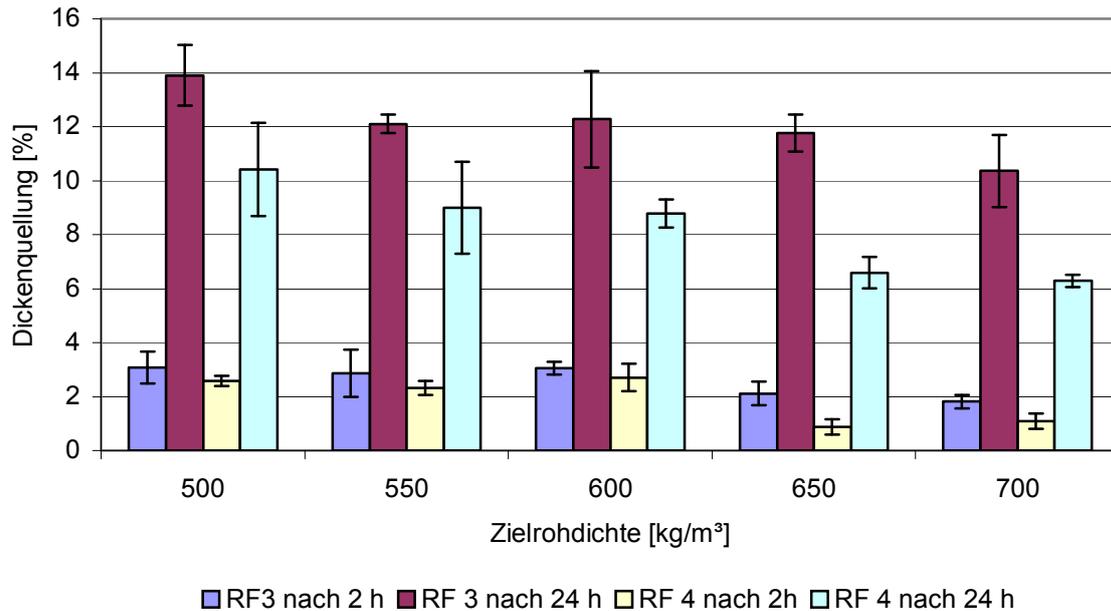


Abbildung 4-20: Vergleich der Quelleigenschaften nach Wasserlagerung von UF-Harz gebundenen Laborspanplatten der Serie RF 3 und PF-Harz gebundenen Platten auf rotfaulem Fichtenholz (RF 4)

Die Abbildung 4-20 verdeutlicht die Auswirkung eines Bindemittelwechsels von Harnstoff-Formaldehyd-Harz auf ein Phenol-Formaldehyd-Harz auf die Dickenquellung von Holzspanplatten. Durch diese Änderung der Bindemittelrezeptur ist über alle Zielrohddichten hinweg eine deutliche Verringerung der Dickenquellung nach 2 h und 24 h Wasserlagerung um ca. 3 % zu beobachten. DUNKY & NIEMZ (2002) bestätigen die Beobachtung, dass PF-Harz gebundene Spanplatten in der Regel eine deutlich geringere Dickenquellung nach 24 h Wasserlagerung zeigen, als Platten, die mit unverstärkten UF-Harzen verklebt wurden.

4.2.4 Dickenquellung

Die Dickenquellungen der hergestellten dreischichtigen Spanplatten nach 2 und 24 Stunden Wasserlagerung sind in Abbildung 4-21 und Abbildung 4-22 dargestellt. Erwartungsgemäß liegen die Quellwerte nach 2 h unterhalb derer nach 24 h, da sich diese Spanplatten länger im Wasser befanden und somit mehr Wasser aufnehmen konnten. Für die Europäische Norm 312-P4 ist die Dickenquellung nach 24 h relevant. Diese sollte den Grenzwert von 15 % nicht überschreiten. Wie aus Abbildung 4-21 ersichtlich ist, konnten die Spanplatten der Versuchsreihe aus

rotfaulem Fichtenholz, gebunden mit UF-Harz (*RF 1*) diesen Wert nicht unterbieten. Auch die Quellwerte der Referenzplatten zu dieser Versuchsreihe aus Referenzspangut, gebunden mit UF-Harz (*IN 1*) liegen im Mittel alle über dem geforderten Grenzwert. Jedoch ist hier zu beachten, dass die Spanplatten dieser Versuchsserien kein Hydrophobierungsmittel enthalten.

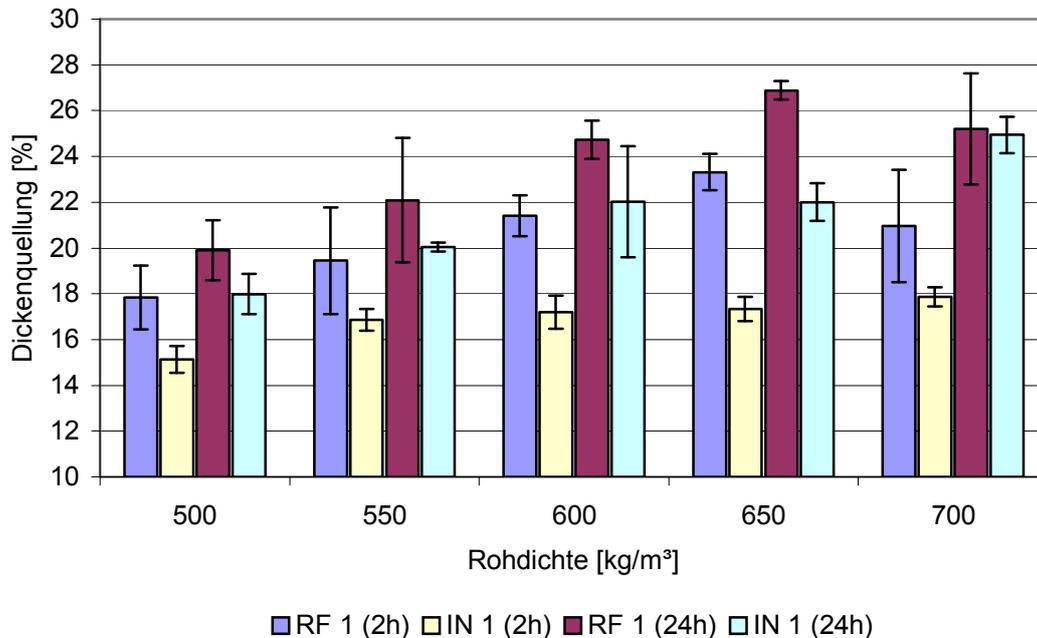


Abbildung 4-21: Quellwerte von UF-Harz gebundenen (jeweils ohne Hydrophobierungsmittel) Versuchsreihen aus rotfaulem Fichtenspangut (*RF 1*) und aus Referenzspangut (*IN 1*)

Mit steigender Rohdichte nehmen die Quellwerte der Versuchsreihe aus rotfaulem Fichtenholz, gebunden mit UF-Harz (*RF 1*) annähernd linear zu (Abbildung 4-21). KLAUDITZ (1955 b) und HALLIGAN (1970) liefern eine Erklärung für diese Beobachtung: Die Dickenquellung bei Wasserlagerung besteht demnach aus zwei Komponenten. Diese sind zum einen die Dickenquellung des Holzes selbst bzw. die der Zellwand und zum anderen die Dickenquellung, die infolge der Rückstellkräfte der komprimierten Holzpartikel (Deformationsquellung) auftritt. Da bei steigender Rohdichte mehr Spangut auf die gewünschte Plattendicke verdichtet wird, treten somit auch stärkere Rückstellkräfte und eine höhere Dickenquellung des Holzes oder der Zellwände selbst, auf. Weiterhin kommt es zu einem Eindringen von Wasser in die Klebefuge (HABENICHT, 1997). Darüber hinaus sind die Polymerstrukturen des UF-Harzes hydrolysisierbar (ROFFAEL, 1982). STEGMANN & KRATZ (1967) untersuchten die Dickenquellung von Harnstoff-Formaldehyd-Harz gebundenen Spanplatten mit

Rohdichten von 450 kg/m^3 bis 750 kg/m^3 und Beleimgraden von 7,4 % bis 13,8 %. Sie stellten fest, dass die Rohdichte weit aus stärker die Dickenquellung beeinflusst als der Bindemittelanteil der Platte. Mit zunehmender Rohdichte vergrößerte sich die Dickenquellung stark. Dies bestätigt die in Abbildung 4-21 aufgeführten Ergebnisse. Ohne die Zugabe eines Hydrophobierungsmittels ist der durch die DIN EN 312-4 vorgegebene Grenzwert bei der Herstellung von Spanplatten aus rotfauler Fichte nicht realisierbar.

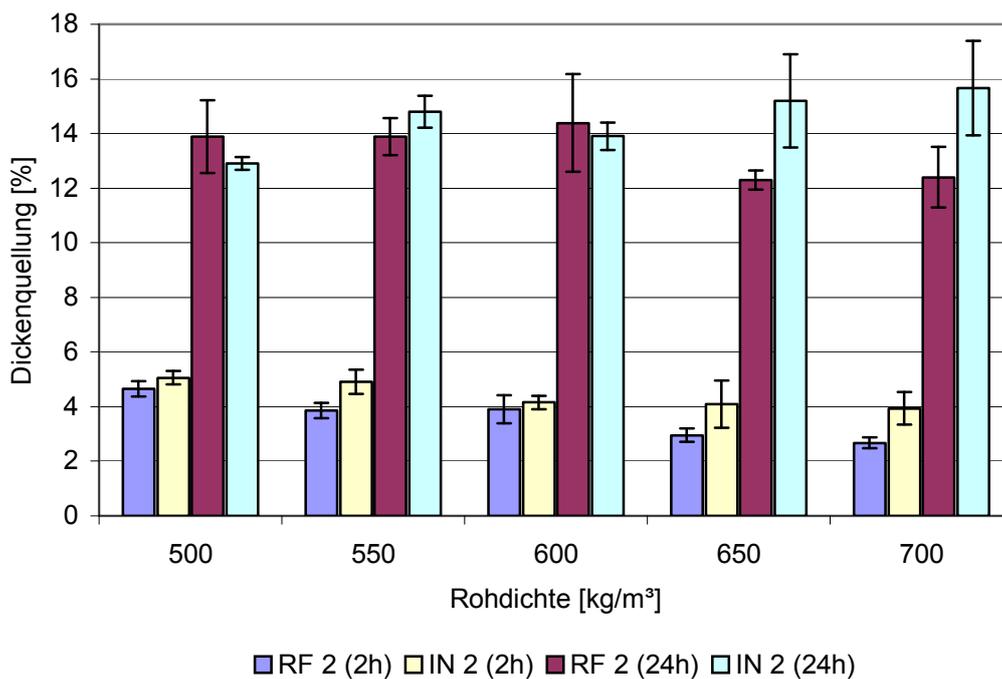


Abbildung 4-22: Quellwerte von UF-Harz gebundenen (jeweils mit Hydrophobierungsmittel) von Versuchsreihen aus rotfaulem Fichtenspangut (RF 2) und aus Referenzspangut (IN 2)

Der Leimflotte der Versuchsreihe aus rotfaulem Fichtenspangut, gebunden mit UF-Harz (RF 2) wurde eine Paraffinemulsion zugegeben (1 % bezogen auf atro Span) (vgl. Kapitel 3.8.1). Die Quellwerte dieser Reihe und der dazugehörigen Referenzen sind in Abbildung 4-22 dargestellt. In diesem Diagramm ist die Auswirkung der Hydrophobierungsmittelzugabe im Vergleich zu den Platten ohne Hydrophobierungsmittel (Abbildung 4-21) deutlich erkennbar. Die Quellwerte nach 2 Stunden Wasserlagerung der Spanplatten aus rotfaulem Fichtenholz liegen im Mittel alle unter den Mittelwerten der entsprechenden Referenzplatten. Die Mittelwerte der Quellwerte nach 24 Stunden Wasserlagerung ergeben kein so einheitliches Bild. Lediglich die Referenzplatten mit den Rohdichten 650 kg/m^3 und 700 kg/m^3 überschreiten den Grenzwert von 15 % geringfügig. Die Spanplatten aus rotfauler

Fichte unterbieten alle nach DIN EN 312-P4 geforderten Höchstwert von 15 %. Auch der Effekt des Anstiegs der Quellwerte bei steigender Rohdichte geht durch die Zugabe des Hydrophobierungsmittels verloren. SCHNEIDER ET AL. (1982) beschreiben eine vergleichbare Beobachtung. Bei gleichen Plattenzusammensetzungen konnten keine deutlichen Einflüsse der Rohdichte auf die Dickenquellung nach zweistündiger Wasserlagerung gemessen werden. Es ist davon auszugehen, dass nach dieser relativ kurzzeitigen Wasserlagerung das Hydrophobierungsmittel die Dickenquellung im Wesentlichen bestimmt. Im Gegensatz dazu, ist bei diesen Untersuchungen nach 24 Stunden Wasserlagerung eine erhebliche Dickenquellung bei zunehmender Rohdichte zu beobachten. Dies widerspricht den in Abbildung 4-22 dargestellten Werten. Ein Erklärungsansatz hierfür ist in der Änderung der Probenabmessungen durch die Einführung der DIN EN 317 (1993) zu suchen. Dabei wurden die Prüfkörper für die Dickenquellung von 25 mm x 25 mm, auf 50 mm x 50 mm vergrößert. Dadurch hat das Wasser einen deutlich weiteren Weg bis zum Mittelpunkt des Probenstückes zu überwinden. Jedoch kann die Zugabe einer Paraffinemulsion als wirksames Mittel angesehen werden, um die Dickenquellungseigenschaften von Spanplatten aus rotfauler Fichte deutlich zu reduzieren und unter den durch die DIN EN 312-P4 geforderten Höchstwert herabzusetzen.

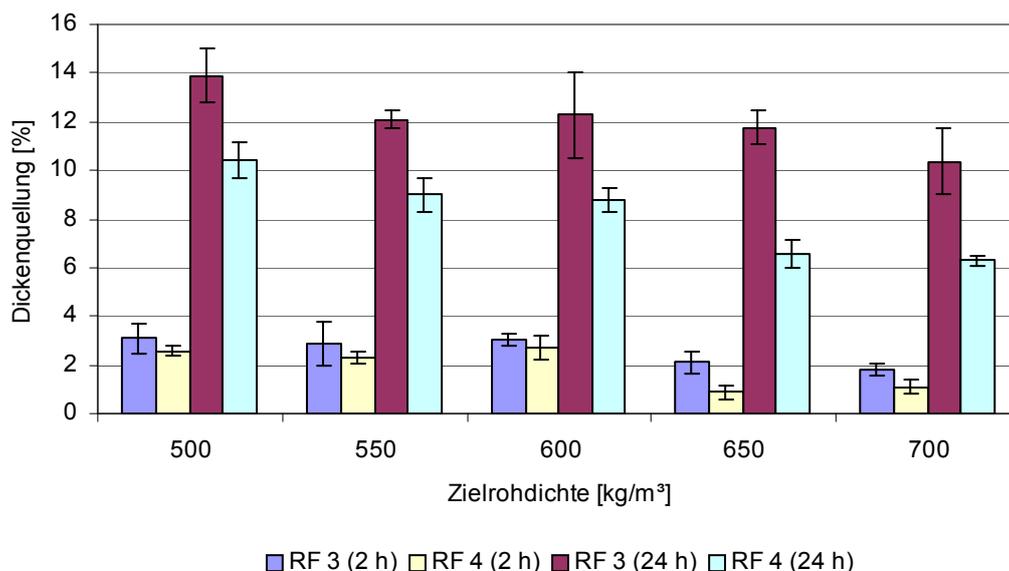


Abbildung 4-23: Quellwerte der Versuchsserien aus rotfaulen Fichtenspänen, gebunden mit UF-Harz (RF 3) und gebunden mit PF-Harz (RF 4)

Die Abbildung 4-23 verdeutlicht den Einfluss des Bindemitteltyps auf die hygrischen Eigenschaften von Spanplatten aus rotfaulen Fichtenspänen. Bestätigt wird, dass PF-Harz gebundene Holzwerkstoffe geringere Dickenquellungen nach Wasserlagerung zeigen als Werkstoffe, die mit UF-Harz verklebt wurden (DUNKY & NIEMZ, 2002).

Auch die in Abbildung 4-23 dargestellten Dickenquellwerte von UF-Harz gebundenen Spanplatten der Serie *RF 3* zeigen bei steigender Rohdichte den gleichen Trend, wie die Quellwerte der Serie *RF 2* (Abbildung 4-22). Auch hier wurde der Leimflotte eine Paraffinemulsion zur Hydrophobierung hinzugefügt (vgl. Kap. 3.8.1). Bei PF-Harz gebundenen Spanplatten tritt der Trend der Abnahme der Dickenquellung bei Zunahme der Rohdichte noch deutlicher hervor.

4.3 Mechanisch-technologische Eigenschaften der Pilotspanplatten

4.3.1 UF-Harz gebundene Spanplatten aus rotfauler Fichte und Industriespan

Die dreischichtigen, auf einer Pilotanlage (vgl. Kap. 3.3) gestreuten, UF-Harz gebundenen Spanplatten aus rotfaulem Fichtenholz und aus einem Industriespanmix sind nach den in Tabelle 3-5 und in Tabelle 3-6 aufgeführten Parametern hergestellt worden. Die Tabelle 4-8 enthält die Mittelwerte der mechanisch-technologischen Eigenschaften der maschinengestreuten Spanplatten jeder Zielrohddichte der Versuchsreihe aus rotfaulem Fichtenholz und aus Referenzmaterial.

Tabelle 4-8: Eigenschaften von dreischichtigen, maschinengestreuten, UF-Harz gebundenen Spanplatten aus rotfauler Fichte (RF 11) und Industriespan (IN 11)

Serien-Nr.	Rohdichte [kg/m ³]	Querzugfestigkeit [N/mm ²]	Abhebefestigkeit [N/mm ²]	Biegefestigkeit [N/mm ²]	Biege-E-Modul [kN/mm ²]	Quellung 2 h [%]	Quellung 24 h [%]	mg HCHO / 100 g HWS
<i>RF 11</i>	700	0,78	1,63	21,28	3,47	3,12	6,09	5,82
	600	0,62	1,13	15,26	2,64	2,87	6,59	5,63
	500	0,37	0,81	10,51	2,02	4,75	13,37	5,08
<i>IN 11</i>	700	0,85	1,67	21,38	3,63	1,30	4,69	5,42
	600	0,60	1,22	13,26	2,40	1,40	6,38	5,30
	500	0,23	0,74	7,51	1,56	2,07	11,51	6,00

Die UF-Harz gebundenen, maschinengestreuten Spanplatten aus rotfaulem Fichtenholz weisen je nach Rohdichte Querkzugfestigkeiten von 0,73 N/mm² bis 0,37 N/mm² auf. Damit erfüllen alle Platten bis zu einer Rohdichte von 500 kg/m³ den von der DIN EN 312-P2 geforderten Mindestwert von 0,35 N/mm². Auch die Abhebefestigkeiten liegen bis zu einer Rohdichte von 500 kg/m³ über dem Mindestwert von 0,80 N/mm². Die Quellwerte nach 24 h Wasserlagerung liegen alle deutlich unter dem von der DIN EN 312-P4 geforderten Höchstwert von 15 %. Die Werte der geprüften Eigenschaften der dazu gehörigen Spanplatten aus einem Industriespanmix befinden sich auf ähnlichem Niveau oder weichen nicht signifikant davon ab. Auffällig ist jedoch, dass die Quellwerte nach 2 h und 24 h der Referenzplatten um bis zu 2 % geringer sind, als die vergleichbaren Zahlen der Platten aus rotfaulem Fichtenholz. Bei einer Rohdichte von 500 kg/m³ liegen die mechanisch-technologischen Eigenschaften der UF-Harz gebundenen Pilotspanplatten aus rotfaulem Fichtenholz wieder deutlich über den entsprechenden Referenzwerten (vgl. Tabelle 4-8).

Durch das Upscaling vom Labor- auf den Pilotmaßstab haben sich die Verfahrensprozesse im Bereich der Spanbeimung und der Formgebung deutlich geändert und der industriellen Spanplattenfertigung angenähert. Dadurch können die Festigkeitseigenschaften der im Pilotmaßstab hergestellten Spanplatten erheblich von denen abweichen, die unter Laborbedingungen entstanden sind.

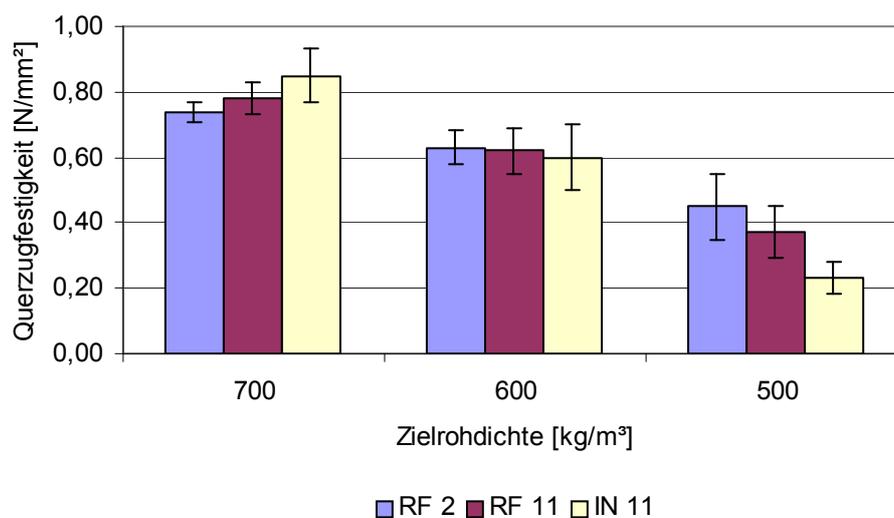


Abbildung 4-24: Vergleich der Querkzugfestigkeit von dreischichtigen Laborspanplatten der Versuchsreihe RF 2 und maschinell gestreuten Pilotspanplatten der Versuchsreihen RF 11 und IN 11

Die Abbildung 4-24 verdeutlicht die Unterschiede in den Querkzugfestigkeiten der Laborserie *RF 02* und Pilotserie *RF 11* mit der dazu gehörigen Referenz *IN 11*. Die Grafik zeigt, dass die Querkzugfestigkeiten der zuvor unter Laborbedingungen erzeugten Spanplatten nur geringfügig von den Eigenschaften der maschinell gestreuten Platten abweichen. Lediglich bei den maschinell gestreuten Platten aus rotfaulem Fichtenholz und aus Referenzspänen mit einer Zielrohddichte von 500 kg/m^3 ist ein deutlicher Abfall der Querkzugfestigkeit zu beobachten. Dieser Trend war im Labormaßstab nicht ersichtlich. Eine mögliche Erklärung für diesen Effekt wäre die Beleimung auf der Pilotanlage im Trogmischer. Dabei kommt es wie in der industriellen Spanplattenfertigung zu einer weiteren Nachzerkleinerung der Mittelschichtspäne (HELLER, 1995). Dieser Nachzerkleinerungseffekt tritt bei der Beleimung unter Laborbedingungen in der Beleimungstrommel nicht auf.

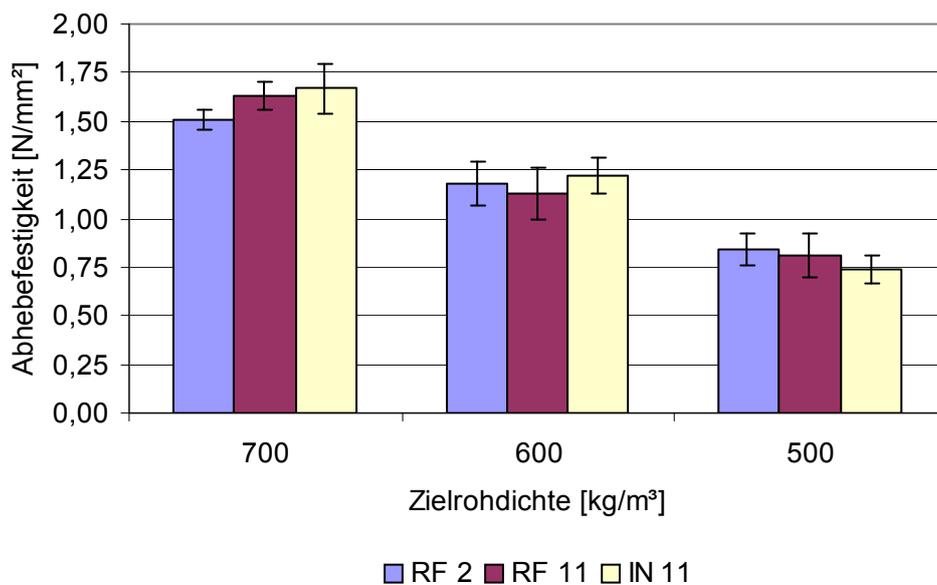


Abbildung 4-25: Vergleich der Abhebefestigkeit von dreischichtigen Laborspanplatten der Versuchsreihe *RF 2* und maschinell gestreuten Platten der Versuchsreihen *RF 11* und *IN 11*

Bei der Abhebefestigkeit (Abbildung 4-25) ist der Trend des Festigkeitsabfalls bei Maschinenstreuung bei einer Zielrohddichte von 500 kg/m^3 nicht so stark ausgeprägt wie bei den Querkzugfestigkeitswerten. Dies spricht für die zuvor aufgestellte These, dass die Trogmischerbeleimung und die dadurch hervorgerufene Nachzerkleinerung dafür mit verantwortlich sind.

Die Abbildung 4-26 zeigt die ermittelten Werte der Dickenquellung nach 24 Stunden Wasserlagerung von Laborspanplatten aus rotfaulem Fichtenholz (RF 2) und maschinengestauten Spanplatten aus rotfaulem Fichtenholz (RF 11) und den dazu gehörigen Pilotspanplatten aus Industriespänen (IN 11). Hier ist auffällig, dass die Ergebnisse der maschinengestauten Spanplatten deutlich niedriger sind, als die Werte der Serie, die unter Laborbedingungen gefertigt wurde.

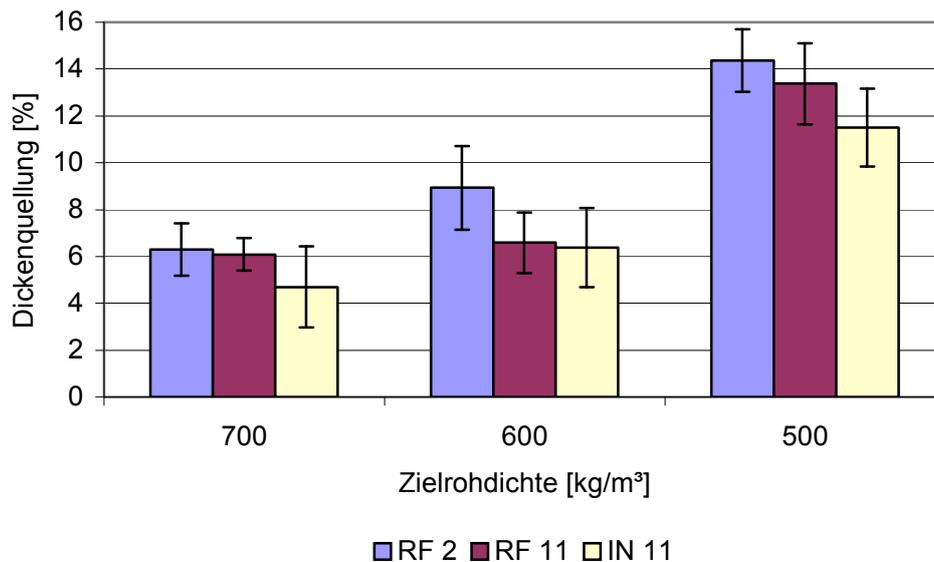


Abbildung 4-26: Vergleich der Dickenquellung nach 24 Stunden Wasserlagerung von dreischichtigen Laborspanplatten der Versuchsreihen RF 2 maschinell gestauten Platten der Versuchsreihen RF 11 und IN 11

Es konnte gezeigt werden, dass man rotfaules Fichtenholz ohne Einschränkungen auch im relativ industrienahen Pilotmaßstab als Rohstoff für die Herstellung von dreischichtigen Spanplatten einsetzen kann. Jedoch sind die signifikanten Unterschiede der mechanisch-technologischen Eigenschaften die im Labormaßstab zwischen den Spanplatten aus rotfaulem Fichtenholz und aus Referenzspänen im Pilotmaßstab nicht mehr so deutlich aufgetreten. Dadurch wird die zuvor durch den Einsatz von rotfaulem Fichtenholz forcierte Rohdichtereduktion bei gleich bleibenden Festigkeitseigenschaften im Vergleich zu Platten aus gesundem Holz relativ gering ausfallen. Wahrscheinlich wird dieser Effekt durch andere Einflussgrößen (z. B. die Beileimung, Nachzerkleinerung) überlagert, die durch das Upscaling in den Pilotmaßstab aufgetreten sind.

4.3.2 MUF-Harz gebundene Spanplatten aus rotfauler Fichte und Industriespangut

Um die Verträglichkeit des rotfaulen Fichtenholzes gegenüber anderen konventionellen Leimsystemen zu testen, wurden weiterhin dreischichtige, maschinell gestreute, Melamin-Harnstoff-Formaldehyd-Harz gebundene Spanplatten hergestellt (vgl. Kap. 3.9).

Tabelle 4-9: Eigenschaften von dreischichtigen, maschinengestreuten, MUF-Harz gebundenen Spanplatten aus rotfaulem Fichtenspangut (RF 12) und aus Referenzmaterial (IN 12)

Serien-Nr.	Rohdichte [kg/m ³]	Querzugfestigkeit [N/mm ²]	Abhebefestigkeit [N/mm ²]	Biegefestigkeit [N/mm ²]	Biege-E-Modul [kN/mm ²]	Quellung 2 h [%]	Quellung 24 h [%]	mg HCHO / 100 g HWS
RF 12	700	1,01	1,64	25,91	3,85	1,93	4,87	10,10
	600	0,87	1,16	20,51	3,16	2,48	5,80	9,95
	500	0,43	0,86	13,41	2,32	3,23	6,21	9,37
IN 12	700	1,06	1,81	23,74	3,66	0,87	2,84	8,16
	600	0,84	1,14	18,90	3,08	0,98	3,22	10,47
	500	0,40	0,93	13,28	2,37	2,24	5,86	9,02

Die Tabelle 4-9 enthält die Mittelwerte der mechanisch-technologischen Eigenschaften der dreischichtigen, maschinell gestreuten Spanplatten jeder Zielrohddichte der Versuchsreihe aus rotfaulem Fichtenholz (RF 12) und aus Referenzmaterial (IN 12).

Die Abbildung 4-27 zeigt einen Vergleich der Quelleigenschaften von dreischichtigen maschinell gestreuten Spanplatten auf rotfaulen Fichtenspänen (RF) und industriell aufbereitetem Spangut (IN). Die MUF-Harz gebundenen Serien RF 12 und IN 12 weisen im Vergleich zu dem UF-Harz gebundenen Serien RF 11 und IN 11 in allen Rohdichtebereichen geringere Quellwerte nach 24 h Wasserlagerung auf. Dieser Effekt tritt hier bei geringer Rohdichte sehr deutlich auf.

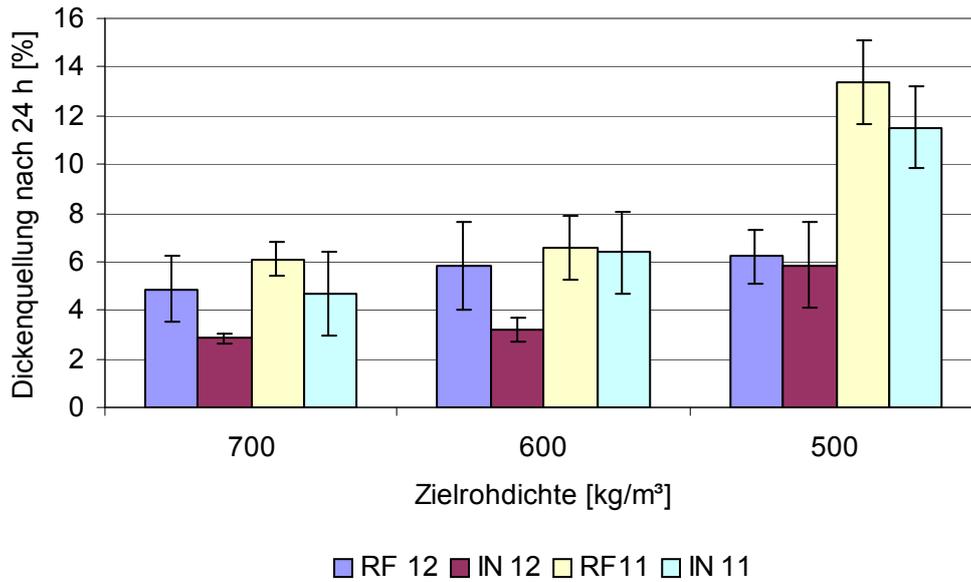


Abbildung 4-27: Vergleich der Dickenquellung nach 24 h Wasserlagerung von MUF-Harz gebundenen Spanplatten der Serien RF 12; IN 12 und UF-Harz gebundenen Platten der Serie RF 11; IN 11

Abbildung 4-28 verdeutlicht die Auswirkung des Bindemittels auf die Festigkeitseigenschaften von Holzwerkstoffen. Im hohen und mittleren Rohdichtebereich sind hier signifikante Unterschiede der Festigkeiten zwischen den Bindemitteltypen zu erkennen. Im Bereich von 500 kg/m³ fallen diese Unterschiede nicht so gravierend aus.

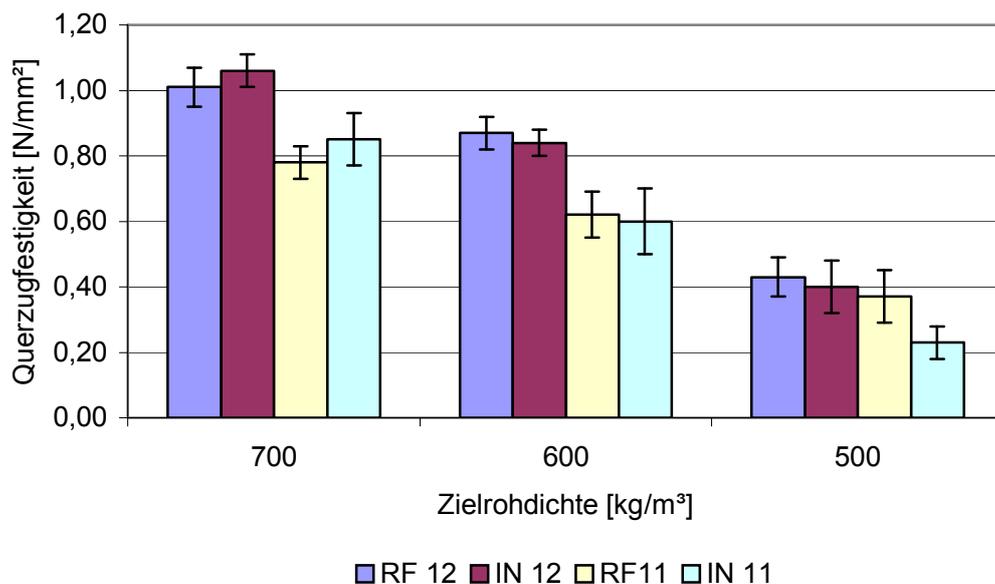


Abbildung 4-28: Vergleich der Querzugfestigkeitswerte von MUF-Harz gebundenen Spanplatten der Serien RF 12; IN 12 und von UF-Harz gebundenen Platten der Serien RF 11; IN 11

Im Vergleich zu den UF-Harz gebundenen Spanplatten aus rotfaulem Fichtenholz, zeigen die MUF-Harz verleimten Werkstoffe deutlich höhere Festigkeitseigenschaften und geringere Quellwerte nach 24 Stunden Wasserlagerung (vgl. Abbildung 4-27). Gegenüber UF-Harzen sind MUF-Harze wesentlich beständiger bei der Hydrolyse und der Einwirkung von Wasser. Außerdem zeigen mit diesen Mischkondensaten verleimte Holzwerkstoffe deutlich höhere Festigkeitseigenschaften (DEPPE & ERNST, 2000).

4.3.3 UF-Harz/Weizenquellwasser-Mischkondensat gebundene Pilotspanplatten aus rotfauler Fichte

2004 wurde Formaldehyd aufgrund einiger durchgeführter Untersuchungen in den USA von der INTERNATIONAL AGENCY FOR RESEARCH ON CANCER (IARC) als karzinogen eingestuft (IARC, 2004). Auch gibt es von Seiten der Holzwerkstoff- und Möbelindustrie Bestrebungen, die Emissionen von freiem Formaldehyd zu halbieren (FRITHIOF, 2008; SAUERWEIN, 2008; GÖRDER, 2008). Hier ist die Firma IKEA OF SWEDEN AB mit der IOS-MAT-0003 auf Seiten der Möbelindustrie führend. Die Formaldehyd bindenden Eigenschaften von Weizenquellwasser wurden unter anderem durch SCHÖPPER (2006) nachgewiesen. In diesem Zusammenhang soll hier auch die Verträglichkeit des rotfaulen Fichtenholzes mit naturnahen Bindemitteln oder Mischkondensaten aus naturnahen und konventionellen Bindemitteln untersucht werden.

Dazu wurden dreischichtige, maschinell gestreute, Spanplatten aus rotfaulem Fichtenholz und aus Referenzspänen hergestellt. Gebunden wurden diese Platten mit einem Mischkondensat bestehend aus 80 % (Festharz) UF-Harz und 20 % (Festharz) Weizenquellwasser. Die Presszeit wurde im Gegensatz zu den zuvor aufgeführten Beispielen auf 18 s/mm verlängert, um eine vollständige Aushärtung des Mischkondensates sicherzustellen. Die weiteren Herstellungsparameter sind in Kap. 3.9.1 aufgeführt.

Die Tabelle 4-10 enthält die mechanisch – technologischen Eigenschaften der Plattenserien aus rotfaulem Fichtenholz und aus Referenzspänen, gebunden mit einem Mischkondensat aus UF-Harz und Weizenquellwasser.

Tabelle 4-10: Eigenschaften von dreischichtigen, maschinengestreuerten, UF-Harz/Weizenquellwasser gebundenen Spanplatten aus rotfaulen Fichtenholz (RF 13) und aus Industriespangut (IN 13)

Serien-Nr.	Rohdichte [kg/m ³]	Querzugfestigkeit [N/mm ²]	Abhebefestigkeit [N/mm ²]	Biegefestigkeit [N/mm ²]	Biege-E-Modul [kN/mm ²]	Quellung 2 h [%]	Quellung 24 h [%]	mg HCHO / 100 g HWS
RF 13	700	0,58	1,21	21,13	3,84	3,79	12,72	2,12
	600	0,29	0,87	17,69	3,28	4,82	13,85	2,17
	500	0,19	0,61	12,26	2,59	7,76	16,05	2,19
IN 13	700	0,63	1,10	20,19	3,49	1,63	8,35	2,11
	600	0,34	0,83	14,60	3,02	2,40	10,74	2,02
	500	0,20	0,63	11,89	2,32	6,15	16,64	2,27

Die geprüften Eigenschaften der oben aufgeführten Plattenserien liegen lediglich bei der Zielrohddichte von 700 kg/m³ in der EN-Norm. Bemerkenswert ist jedoch die Reduktion der Formaldehydemission auf Werte um die 2 mg HCHO / 100 g Spanplatte durch die Zugabe des Weizenquellwassers.

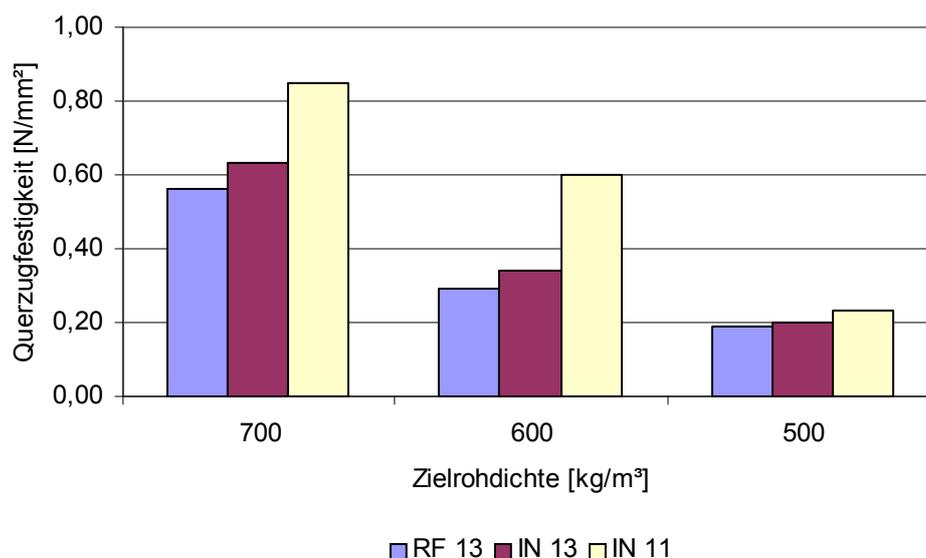


Abbildung 4-29: Vergleich von Querzugfestigkeiten in Abhängigkeit von der Rohddichte von UF-Harz/Weizenprotein gebundenen Spanplatten, aus rotfaulem Fichtenholz (RF 13), aus Industriespänen (IN 13) und einer mit reinem UF-Harz gebundenen Referenz (IN 11)

Die Abbildung 4-29 zeigt die Querkzugfestigkeitswerte der maschinengestauten Spanplatten, die mit einem Mischkondensat aus UF-Harz und Weizenquellwasser gebunden wurden. Diese Platten erfüllen lediglich bei einer industriell üblichen Rohdichte von ca. 700 kg/m³ die DIN EN 312-P2. Die Grafik macht den Festigkeitsabfall durch die Weizenquellwasserzugabe deutlich.

Durch die Substitution von 20 % UF-Harz durch Weizenquellwasser sind die Formaldehydemissionen nach der Perforatormethode von ca. 6 mg auf etwa 2 mg HCHO / 100 g Holzwerkstoff gesunken (Abbildung 4-30). Die DIN EN 312 (2003) gibt für Spanplatten der Emissionsklasse E1 lediglich einen maximalen Emissionswert von 8 mg Formaldehyd pro 100 g Spanplatte vor. Die Platten der Serien *RF 13* und *IN 13* würden damit sogar die erheblich strengeren Grenzwerte der IOS-MAT-0003 (FRITHIOF, 2008) und des Industrie-Standards EPF-S von 4 mg HCHO/100g Spanplatte deutlich unterschreiten (SAUERWEIN, 2008; GÖRDER, 2008). Jedoch haben sich dadurch auch die Festigkeitseigenschaften und die Quellwerte nach 24 Stunden Wasserlagerung verschlechtert. Die angestrebte Verringerung der industriell üblichen Rohdichte von 700 kg/m³ durch den Einsatz von rotfaulem Fichtenholz, scheint bei einem anteiligen Einsatz eines naturnahen Bindemittels zu diesem Zeitpunkt nicht realisierbar.

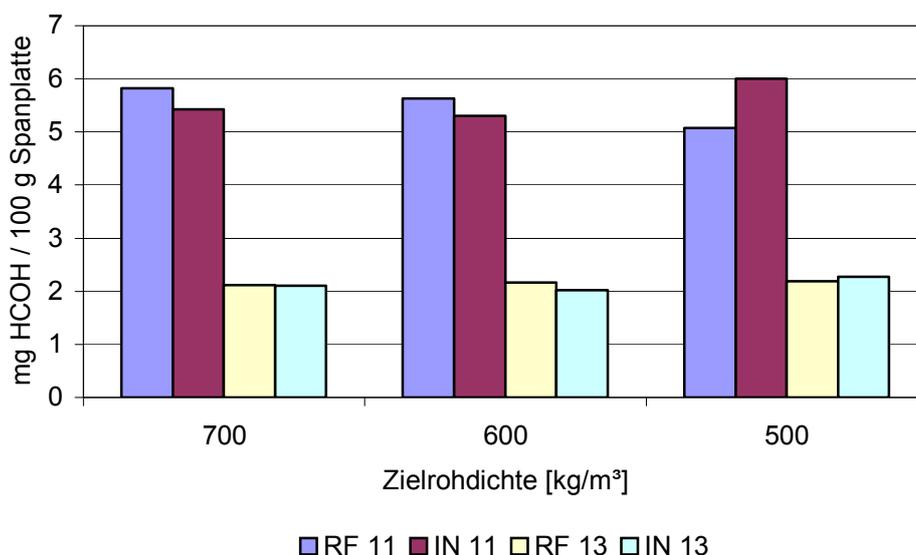


Abbildung 4-30: Formaldehydemissionen nach der Perforatormethode in Abhängigkeit von der Rohdichte von UF-Harz gebundenen Spanplatten aus rotfaulem Fichtenholz (RF 11), aus Industriespänen (IN 11) und von UF-Harz/Weizenquellwasser-Mischkondensat gebundenen Platten aus rotfaulem Fichtenholz (RF 13) und aus Industriespänen (IN 13)

4.4 Mechanisch-technologische Eigenschaften von MDF-Platten

Von jeder Zielrohddichte einer Versuchsreihe wurden jeweils vier mitteldichte Faserplatten angefertigt (vgl. Kap. 3.10.1). In den Tabellen 4-11 bis 4-18 sind die Mittelwerte aller Platten einer Zielrohddichte der entsprechenden Versuchsreihe dargestellt.

4.4.1 Mitteldichte Faserplatten aus rotfaulem Fichtenholz

Die Tabelle 4-11 enthält die Mittelwerte der mechanisch-technologischen Eigenschaften jeder Zielrohddichte der Versuchsreihe aus rotfaulen Fichtenfasern, gebunden mit UF-Harz und Hydrophobierungsmittel (*RF 101*). In dieser Versuchsreihe wurden 10 mm dicke mitteldichte Faserplatten aus rotfaulen Fichtenfasern mit den Zielrohddichten 800 kg/m³, 750 kg/m³, 700 kg/m³, 650 kg/m³, 600 kg/m³, 550 kg/m³ und 500 kg/m³ hergestellt. Die Leimflotte bestand ausschließlich aus UF-Harz und einer paraffinhaltigem Emulsion (vgl. Kap. 3.10.1). Die Presszeit der Versuchsreihe betrug 24 s/mm.

Tabelle 4-11: Mechanisch-technologische Eigenschaften von UF-Harz gebundenen, 10 mm dicken mitteldichten Faserplatten aus rotfaulen Fichtenfasern

Seriennummer	Rohddichte [kg/m ³]	Querzugfestigkeit [N/mm ²]	Quellung 24 h [%]
<i>RF 101</i>	800	1,52	8,80
	750	1,17	9,02
	700	1,01	10,09
	650	0,93	10,59
	600	0,75	11,62
	550	0,58	11,70
	500	0,57	11,44

UF-Harz gebundene MDF aus rotfaulem Fichtenholz weisen in Abhängigkeit von der Rohddichte Querzugfestigkeiten von 1,52 N/mm² bis 0,57 N/mm² auf (vgl. Tabelle 4-11). Bis zu einer Rohddichte von 600 kg/m³ übertreffen diese Faserplatten den durch die DIN EN 622-5 (2006) geforderten Mindestwert von 0,60 N/mm². Lediglich

Platten mit einer Rohdichte ab 550 kg/m^3 unterschreiten mit $0,58 \text{ N/mm}^2$ und $0,57 \text{ N/mm}^2$ diesen Grenzwert im Mittel geringfügig. Die Quellwerte nach 24 h Wasserlagerung liegen in Abhängigkeit von der Rohdichte mit 11,7 % bis 8,8 % deutlich unter dem Grenzwert der DIN EN 622-5 (2006) von 15 %.

Die Erzeugung von mitteldichten Faserplatten unter Verwendung von konventionell gebräuchlichen Kunstharzen aus rotfaulem Fichtenholz nach herkömmlichen Herstellungsmethoden ist demnach problemlos möglich. Auch eine Absenkung der Rohdichte von 800 kg/m^3 auf bis zu 500 kg/m^3 erscheint realisierbar. Das rotfaule Fasermaterial zeichnet sich durch eine gute Verarbeitbarkeit und Beileimbarkeit aus. Die aus dem rotfaulen Faserstoff hergestellten mitteldichten Faserplatten weisen eine auffällig helle Farbe auf. Die ermittelten Rohdichten der hergestellten mitteldichten Faserplatten aus rotfaulem Fichtenholz weichen nicht signifikant von der angepeilten Zielrohddichte ab, so dass die Ergebnisse der mechanisch – technologischen Eigenschaften miteinander vergleichbar sind.

4.4.2 Mitteldichte Faserplatten aus Referenzfasern der Fa. STEICO

Die Tabelle 4-12 enthält die Mittelwerte der mechanisch-technologischen Eigenschaften jeder Zielrohddichte der Versuchsreihe aus Referenzfasern, gebunden mit UF-Harz und Hydrophobierungsmittel (*IN 101*). In dieser Versuchsreihe wurden 10 mm dicke mitteldichte Faserplatten aus Referenzfasern der Fa. STEICO mit den Zielrohddichten 800 kg/m^3 , 750 kg/m^3 , 700 kg/m^3 , 650 kg/m^3 , 600 kg/m^3 , 550 kg/m^3 und 500 kg/m^3 hergestellt. Die Leimflotte bestand ausschließlich aus UF-Harz und paraffinhaltigem Hydrophobierungsmittel und ist der Leimflotte der Versuchsreihe *RF 101* absolut identisch (vgl. Kapitel 3.10). Der Presszeitfaktor dieser Versuchsreihe betrug 24 s/mm.

Bei UF-Harz gebundenen MDF aus industriell aufbereiteten Kiefernfasern der Serie *IN 101* (Tabelle 4-12) wurden in Abhängigkeit von der Rohdichte Querzugfestigkeiten von $1,09 \text{ N/mm}^2$ bis $0,62 \text{ N/mm}^2$ ermittelt. Damit überschreiten alle Platten den durch die DIN EN 622-5 (2006) geforderten Mindestwert von $0,60 \text{ N/mm}^2$. Auch die aufgenommenen Dickenquellwerte nach 24 h Wasserlagerung unterschreiten den Höchstwert von 15 %.

Tabelle 4-12: Mechanisch-technologische Eigenschaften von UF-Harz gebundenen, 10 mm dicken mitteldichten Faserplatten aus Kiefernfasern

Seriennummer	Rohdichte [kg/m ³]	Querzugfestigkeit [N/mm ²]	Quellung 24 h [%]
IN 101	800	1,09	9,47
	750	0,99	9,75
	700	0,90	10,57
	650	0,82	10,39
	600	0,80	11,88
	550	0,70	12,23
	500	0,62	11,78

4.4.3 Querzugfestigkeit

In der Abbildung 4-31 sind die Querzugfestigkeiten der MDF-Platten der Versuchsreihe aus rotfaulen Fichtenfasern, gebunden mit UF-Harz und Hydrophobierungsmittel (RF 101) und der Versuchsreihe aus Referenzfasern, gebunden mit UF-Harz und Hydrophobierungsmittel (IN 101) graphisch dargestellt.

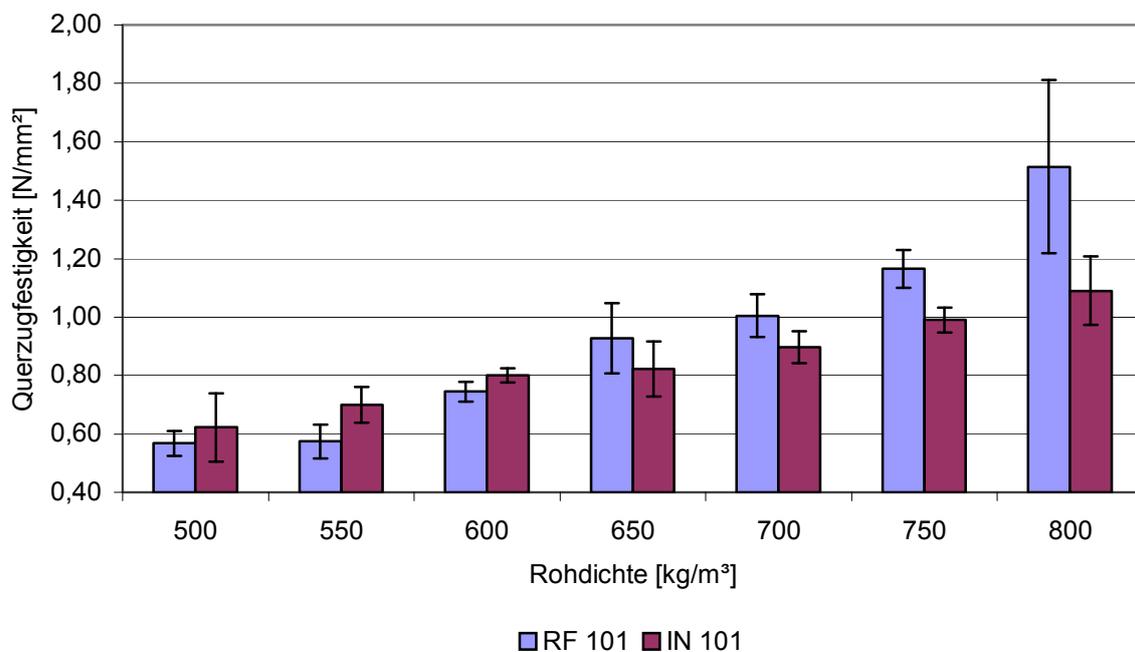


Abbildung 4-31: Querzugfestigkeiten in Abhängigkeit von der Rohdichte von UF-Harz gebundenen MDF aus rotfaulen Fichtenfasern (RF 101) und aus Kiefernfasern (IN 101)

Aus der Abbildung 4-31 ist ersichtlich, dass die Querkzugfestigkeiten bei sinkender Rohdichte erwartungsgemäß stark abnehmen. Wie bei den in Kap. 4.2.1 beschriebenen Spanplatten ist auch bei MDF bei sinkender Rohdichte ein annähernd linearer Abfall der Querkzugfestigkeiten zu verzeichnen. Diese Beobachtung wird analog zu den Ergebnissen bei Spanplatten (vgl. Kap. 4.2.3) wiederum durch SCHNEIDER ET AL. (1982) und DUNKY & NIEMZ (2002) untermauert.

Rotfaule Fichtenfasern wiesen mit $20,3 \text{ kg/m}^3$ ein geringeres Schüttgewicht auf als die industriell aufbereiteten Kiefernfasern ($22,8 \text{ kg/m}^3$) der Fa. STEICO (vgl. Kap. 4.1.8). Somit kann man auch bei MDF wieder davon ausgehen (vgl. Kap. 4.2.3), dass durch die höhere Lagerungsdichte der Fasern in der Platte die adhäsiven und kohäsiven Kräfte wirksamer werden (KHARAZIPOUR, 1996).

Lediglich die Platten der Versuchsreihe aus rotfaulen Fichtenfasern, gebunden mit UF-Harz und Hydrophobierungsmittel (RF 101) mit einer Rohdichte von 550 kg/m^3 und 500 kg/m^3 verfehlen den vom DEUTSCHEN INSTITUT FÜR NORMUNG e.V. geforderten Mindestwert von $0,60 \text{ N/mm}^2$ nur knapp (DIN EN 622-5; 2006). Bis zu einer Rohdichte von 650 kg/m^3 liegen die Querkzugfestigkeiten der Platten aus rotfaulem Fasermaterial über den Referenzplatten. Ab einer Zielrohndichte von 600 kg/m^3 wendet sich dieses Bild.

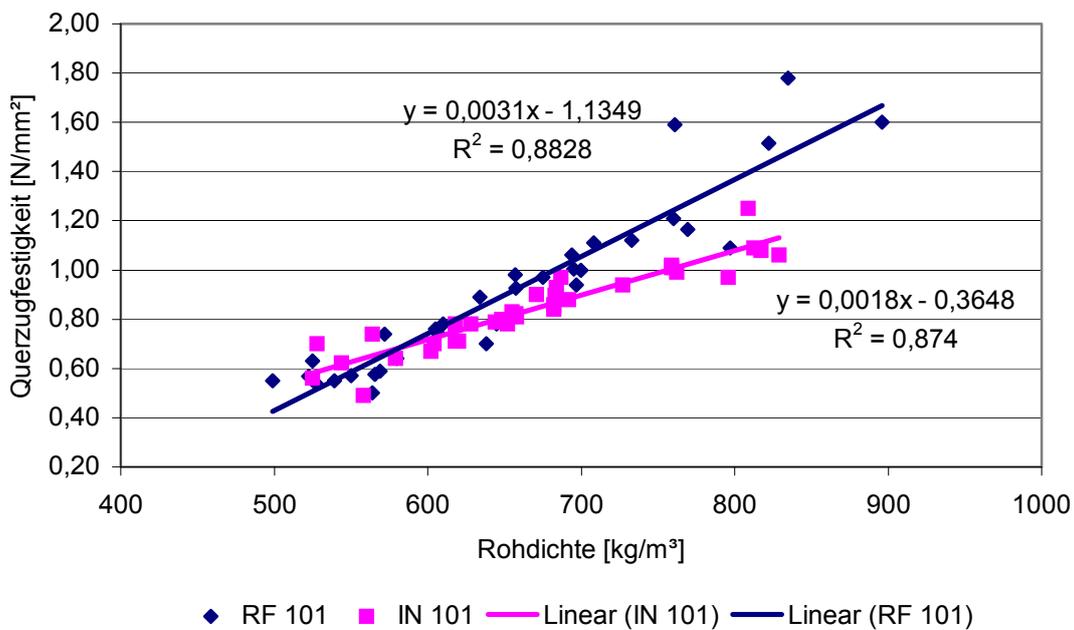


Abbildung 4-32: Abhängigkeit von Querkzugfestigkeit und Rohdichte von UF-Harz gebundenen MDF aus rotfaulen Fichtenfasern (RF 101) Kiefernfasern, (IN 101)

Die Abbildung 4-32 zeigt die lineare Abhängigkeit von Querkzugfestigkeit und Rohdichte der mitteldichten Faserplatten aus rotfaulem Fichtenfaserstoff und industriell aufbereitetem Fasermaterial der Firma STEICO. Die Bestimmtheitsmaße von $R^2_{RF\ 101} = 0,88$ und $R^2_{IN\ 101} = 0,87$ bestätigen die Vermutung, dass zwischen Querkzugfestigkeit und Rohdichte eine enge lineare Abhängigkeit besteht. Die mittlere Zunahme der Querkzugfestigkeit beträgt bei den Platten aus Rotholz $0,31\text{ N/mm}^2$ bei einer Zunahme der Rohdichte um 100 kg/m^3 . Bei den MDF-Platten aus STEICO-Fasern beträgt die Änderung der Querkzugfestigkeit $0,18\text{ N/mm}^2$ bei einer Rohdichteänderung von 100 kg/m^3 . Dieser Wert deckt sich mit den bei Spanplatten ermittelten Festigkeitsänderungen (vgl. Kap. 4.2.3). Aufgrund der Regressionsanalyse würde die Querkzugfestigkeit der Referenzplatten rechnerisch erst bei einer Rohdichte von ca. 580 kg/m^3 über der Querkzugfestigkeit der MDF aus rotfaulem Fichtenholz liegen.

4.4.4 Quellung

Die Abbildung 4-33 enthält die mittleren Quellwerte von MDF der Versuchsreihe aus rotfaulen Fichtenfasern, gebunden mit UF-Harz (RF 101) und der Versuchsreihe aus Referenzfasern, gebunden mit UF-Harz (IN 101).

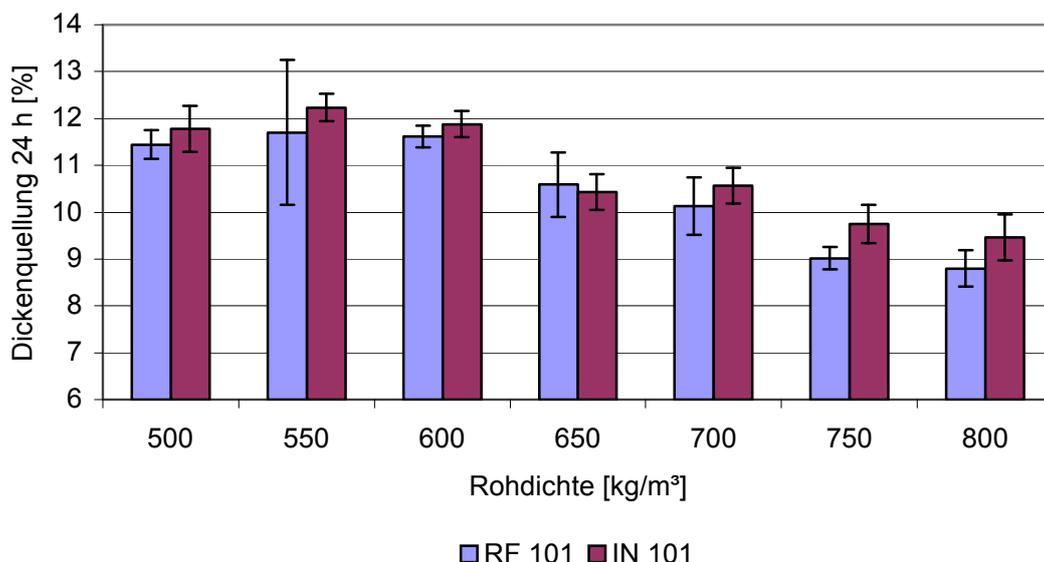


Abbildung 4-33: Quellwerte nach 24h von MDF der Versuchsreihe aus rotfaulen Fichtenfasern, gebunden mit UF-Harz (RF 101) und der Versuchsreihe aus Referenzfasern, gebunden mit UF-Harz (IN 101)

Mit sinkender Rohdichte nehmen die Quellwerte nach 24 Stunden Wasserlagerung zu. Dieser Trend ist sowohl bei den Platten aus rotfaulem Fichtenholz, als auch bei den Platten aus Referenzfasern zu beobachten. Jedoch liegen alle Ergebnisse unter dem durch die DIN EN 622-5 (2006) geforderten Höchstwert von 15 %. Im Mittel liegen alle Quellwerte der Platten aus rotfaulem Fasermaterial unter denen der Referenzplatten. Lediglich der Quellwert der Platten aus Referenzfasern mit der Zielrohddichte von 650 kg/m^3 liegt geringfügig unter dem Quellwert der Platten aus rotfaulen Fichtenfasern. Bei diesem Wert muss es sich allerdings um einen Ausreißer handeln, da dieser völlig aus dem zu beobachtenden linearen Trend des Anstieges der Quellwerte fällt.

Die hydrophobierende Wirksamkeit von paraffinhaltigen Emulsionen auf die Quellungseigenschaften von MDF wurde u. a. von DIX ET AL. (2003), ROFFAEL ET AL. (2005 a & b) untersucht. Hier wurde gezeigt, dass durch die Zugabe von 2 % einer Paraffinemulsion (Feststoff/atro Faser) zur Leimflotte (vgl. Kap. 3.10.1) sich die Quellwerte nach 24 h Wasserlagerung von MDF aus rotfaulem Fichtenholz in einem Bereich von etwa 9 % bis 12 % bewegen. Aufgrund dieser relativ geringen Werte erscheint eine Verringerung der Zugabe von Hydrophobierungsmittel denkbar. DEPPE & ERNST (1996) geben für die industrielle MDF Herstellung durchschnittliche Hydrophobierungsmittelzugaben von 0,3 % bis 1 % (Feststoff/atro Faser) an.

4.4.5 MDF aus rotfaulem Fichtenholz unter Variation des Beleimgrades

Neben Rohstoff, Rohdichte und Rohdichteprofil haben auch der Beleimgrad und die Presszeit erhebliche Auswirkungen auf die mechanisch-technologischen Eigenschaften von Holzwerkstoffen (SCHNEIDER ET AL., 1982, HELLER, 1995; DEPPE & ERNST, 1996; 2002; DUNKY & NIEMZ, 2002). Aufgrund der größeren Oberfläche der Holzfasern ist der Beleimungsaufwand im Vergleich zu Spanwerkstoffen in der Regel höher (DEPPE & ERNST, 1996).

Harnstoff–Formaldehyd–Harz gebundene mitteldichte Faserplatten aus rotfaulem Fichtenholz wurden in Plattenstärken von 10 mm und 16 mm hergestellt. Als Zielrohddichten waren 800 kg/m^3 , 700 kg/m^3 , 600 kg/m^3 und 500 kg/m^3 vorgesehen. Die Leimflotte enthielt das industriell gebräuchliche UF-Harz KAURIT[®] 404 der Firma BASF und die Paraffinemulsion HYDROWAX 730 der Firma SASOL (vgl.

Kap. 3.10.1). Für eine Rezeptoptimierung wurden darüber hinaus der Beileimgrad von 14 % auf bis zu 10 % (Festharz/atro Faser) verringert. Gleichzeitig wurden die Presszeitfaktoren von 24 s/mm auf bis zu 12 s/mm abgesenkt.

In Tabelle 4-13 sind die Ergebnisse der mechanisch-technologischen Eigenschaften von UF-Harz gebundenen MDF aus rotfaulen Fichtenfasern, mit 14 % (Festharz/atro Faser) UF-Harz und 1 % (Feststoff/atro Span) Hydrophobierungsmittel enthalten. Hier wurden 16 mm dicke MDF aus rotfaulen Fichtenfasern mit den Zielrohddichten 800 kg/m³, 700 kg/m³, 600 kg/m³ und 500 kg/m³ hergestellt.

Tabelle 4-13: Mechanisch-technologische Eigenschaften von UF-Harz gebundenen, 16 mm dicken MDF aus rotfaulen Fichtenfasern mit 14 % UF-Harz (Festharz/atro Faser) in Abhängigkeit von der Presszeit

Seriennr./ Presszeitfaktor	Rohddichte [kg/m ³]	Querzug- festigkeit [N/mm ²]	Biege- festigkeit [N/mm ²]	Biege-E- Modul [kN/mm ²]	Quellung 24h [%]
<i>RF 104 24 s/mm</i>	800	1,33	42,02	3,82	4,10
	700	0,73	31,62	2,75	5,82
	600	0,66	24,38	2,09	4,92
	500	0,51	16,73	1,35	6,16
<i>RF 104 18 s/mm</i>	800	1,25	44,48	4,09	4,33
	700	0,73	30,81	2,75	6,04
	600	0,69	24,32	2,12	5,14
	500	0,46	18,06	1,39	5,86
<i>RF 104 12 s/mm</i>	800	1,25	42,91	3,74	4,20
	700	0,67	32,49	2,72	5,76
	600	0,67	25,59	2,08	5,10
	500	0,35	16,31	1,28	6,11

Bei relativ hohen Rohddichten von 800 kg/m³ und 700 kg/m³ erfüllen sämtliche in Tabelle 4-13 aufgeführten Platten alle Anforderungen, die nach DIN EN 622-5 (2006) an MDF gestellt werden. Bei Platten mit einer Rohddichte von 600 kg/m³ unterschreitet lediglich der E-Modul mit Werten um 2,1 kN/mm² den Grenzwert von

2,2 kN/mm² leicht. Im Gegensatz dazu erfüllen MDF mit einer Rohdichte von 500 kg/m³ nur noch die Anforderung an die Dickenquellung nach 24 h Wasserlagerung.

Die Tabelle 4-14 enthält die Ergebnisse der mechanisch-technologischen Ausprüfung der UF-Harz gebundenen MDF aus rotfaulen Fichtenfasern, mit einem Beileimgrad von 12 % (Festharz/atro Faser). Auch hier wurde der Leimflotte 1 % (Feststoff/atro Faser) Hydrophobierungsmittel zugegeben. In dieser Versuchsreihe wurden wiederum 16 mm dicke MDF aus rotfaulen Fichtenfasern mit den Zielrohddichten 800 kg/m³, 700 kg/m³, 600 kg/m³ und 500 kg/m³ hergestellt.

Tabelle 4-14: Mechanisch-technologische Eigenschaften von UF-Harz gebundenen, 16 mm dicken MDF aus rotfaulen Fichtenfasern mit 12 % UF-Harz (Festharz/atro Faser) in Abhängigkeit von der Presszeit

Seriennr./ Presszeitfaktor	Rohdichte [kg/m ³]	Querzug- festigkeit [N/mm ²]	Biege- festigkeit [N/mm ²]	Biege-E- Modul [kN/mm ²]	Quellung 24h [%]
<i>RF 104 24 s/mm</i>	800	1,08	43,13	4,03	5,24
	700	0,75	31,62	2,89	5,94
	600	0,61	25,10	2,19	6,64
	500	0,39	14,37	1,12	8,47
<i>RF 104 18 s/mm</i>	800	1,04	42,28	3,82	5,50
	700	0,68	31,44	2,78	5,76
	600	0,59	22,47	2,03	6,96
	500	0,39	13,10	1,11	9,28
<i>RF 104 12 s/mm</i>	800	1,03	42,56	3,85	5,36
	700	0,70	33,97	2,97	6,29
	600	0,60	22,16	2,13	6,80
	500	0,35	12,68	1,06	9,60

Auch MDF mit einem auf 12 % (Festharz/atro Faser) verringerten Beileimgrad erfüllen bei Rohddichten von 800 kg/m³ und 700 kg/m³ sämtliche Anforderungen nach DIN EN 622-5 (2006). Bei einer Rohdichte von 600 kg/m³ wird wiederum der Grenzwert vom E-Modul leicht überschritten. Platten mit einem Beileimgrad von 12 % und einer

Rohdichte von 500 kg/m^3 erfüllen wiederum nur die Anforderungen der Dickenquellung nach 24 h Wasserlagerung.

Tabelle 4-15: Mechanisch-technologische Eigenschaften von UF-Harz (10 % Feststoff/atro Faser) gebundenen, 16 mm dicken MDF aus rotfaulen Fichtenfasern in Abhängigkeit von der Presszeit

Seriennr./ Presszeitfaktor	Rohdichte [kg/m^3]	Querzug- festigkeit [N/mm^2]	Biege- festigkeit [N/mm^2]	Biege-E- Modul [kN/mm^2]	Quellung 24 h [%]
<i>RF 104</i> <i>24 s/mm</i>	800	0,79	48,51	4,89	4,20
	700	0,77	37,75	3,66	5,53
	600	0,61	25,10	2,22	6,64
	500	0,39	14,02	1,42	9,03
<i>RF 104</i> <i>18 s/mm</i>	800	0,98	52,31	4,97	4,15
	700	0,73	38,32	3,74	5,09
	600	0,59	21,53	2,23	8,46
	500	0,39	13,41	1,40	9,13
<i>RF 104</i> <i>12 s/mm</i>	800	0,86	50,38	4,97	4,35
	700	0,74	37,70	3,58	5,24
	600	0,60	21,93	2,32	8,54
	500	0,35	14,55	1,49	9,06

Die Tabelle 4-15 enthält die Mittelwerte der mechanisch-technologischen Eigenschaften von UF-Harz (10 % Festharz/atro Faser) gebunden MDF aus rotfaulen Fichtenfasern. Der Leimflotte wurde 1 % (Feststoff/atro Faser) einer Paraffinemulsion hinzugefügt (vgl. Kap. 3.10.1). In dieser Versuchsreihe (*RF 104*) wurden 16 mm dicke MDF aus rotfaulen Fichtenfasern mit den Rohdichten von 800 kg/m^3 bis 500 kg/m^3 hergestellt. Die Presszeitfaktoren betragen 24 s/mm, 18 s/mm und 12 s/mm. Es ist ersichtlich, dass MDF mit Rohdichten bereits bei einem Beleimgrad von 10 % beachtliche Festigkeitseigenschaften aufweisen. Im Gegensatz zu MDF mit Beleimgraden von 14 % und 12 % (Festharz/atro Faser), befinden sich die geprüften Festigkeitseigenschaften von MDF mit einem Beleimgrad von 10 % (Festharz/atro

Faser) bis zu einer Rohdichte von 600 kg/m^3 in der Norm. Jedoch nähern sich die Festigkeitswerte ab 600 kg/m^3 dem Grenzwert stark an. Die Quellwerte nach 24 h Wasserlagerung bewegen sich je nach Rohdichte im Bereich von 4,2 % bis 9,1 %. Die Anforderung von 12 % Dickenzunahme nach 24 h Wasserlagerung wird von allen MDF im Mittel erfüllt. Die Quellwerte sind zum Teil derartig gering, dass eine weitere Reduzierung des Hydrophobierungsmittelanteils möglich zu sein scheint.

Aus den Ergebnissen der Tabellen 4-13 bis 4-15 ist ersichtlich, dass die Verarbeitung von rotfaulem Fichtenholz Harnstoff-Formaldehyd-Harz gebundenen MDF im industrienahen Pilotmaßstab möglich ist. Auch eine Absenkung der Rohdichte von 800 kg/m^3 auf bis zu 500 kg/m^3 bei höheren Plattendicken und geringeren Beileimungsgraden ist realisierbar. Wie auch das rotfaule Spanmaterial zeichnet sich auch der rotfaule Fichtenfaserstoff durch eine gute Verarbeitbarkeit und Beileimbarkeit aus. Die aus dem rotfaulen Faserstoff hergestellten mitteldichten Faserplatten weisen eine auffällig helle Farbe auf.

4.4.6 Presszeitfaktoren

In der Abbildung 4-34 sind die Biegefestigkeiten in Abhängigkeit von Presszeit und Rohdichte der MDF der Versuchsreihe aus rotfaulen Fichtenfasern, gebunden mit 12 % UF-Harz graphisch dargestellt.

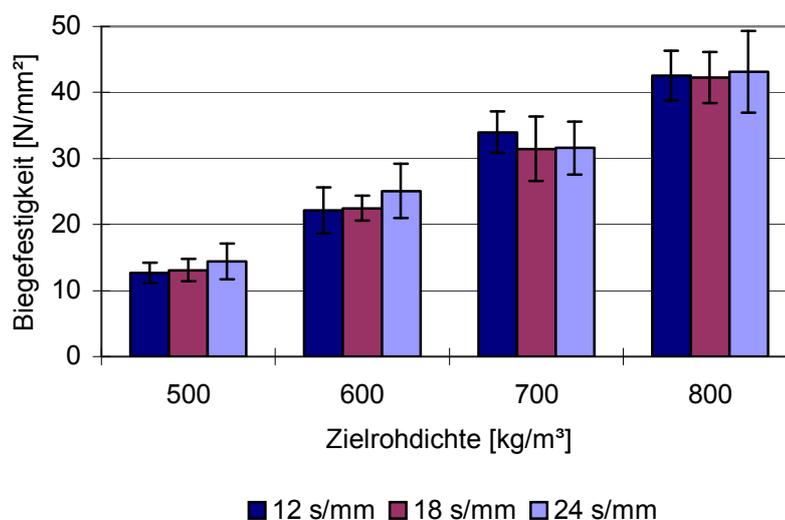


Abbildung 4-34: Biegefestigkeitseigenschaften unter Variation von Presszeit und Rohdichte von MDF aus rotfauler (RF 104) Fichte mit einem BG von 12%

Aus der Grafik ist ersichtlich, dass sich die Biegefestigkeit von UF-Harz gebundenen MDF der Serie *RF 104* bei sinkender Presszeit nicht signifikant ändern. Das gleiche Bild zeigt sich auch in der Abbildung 4-35. Hier sind die mittleren Querkzugfestigkeiten der gleichen Versuchsreihe (*RF 104*) in Abhängigkeit von Presszeit und Rohdichte dargestellt. Daraus lässt sich ableiten, dass eine Halbierung der Presszeit in diesem relativ hohen Bereich keine signifikanten Auswirkungen auf die Festigkeitseigenschaften der MDF aus rotfaulen Fichtenfasern hat. D. h., dass unter den gewählten Versuchsbedingungen (vgl. Kap. 3.10.1) ein Presszeitfaktor von 12 s/mm völlig ausreicht, um UF-Harz zu vernetzen. Die Möglichkeit einer weiteren Optimierung der Presszeit erscheint möglich.

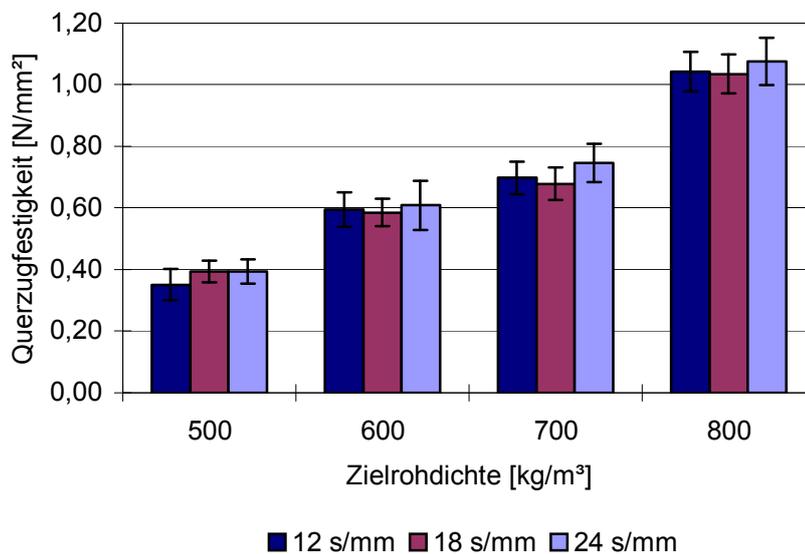


Abbildung 4-35: Querkzugfestigkeit in Abhängigkeit von Presszeit und Rohdichte von MDF (*RF 104*) aus rotfauler Fichte mit einem BG von 12%

Die folgende Abbildung 4-36 enthält die Mittelwerte der Dickenquellung nach 24 h Wasserlagerung in Abhängigkeit von Presszeitfaktor und Rohdichte. Hier ist lediglich bei sehr geringen Rohdichten ein signifikanter Anstieg der Dickenquellung bei Verkürzung der Presszeit zu verzeichnen. Bei Rohdichten größer gleich 600 kg/m³ ist dieser Trend nicht zu beobachten. Jedoch liegen die Maximalwerte bei einer Rohdichte von 500 kg/m³ und einem Presszeitfaktor von 12 s/mm nicht über 10 %. Damit wird der Normwert 12 % für 16 mm dicke MDF (DIN EN 622-5; 2006) deutlich unterschritten.

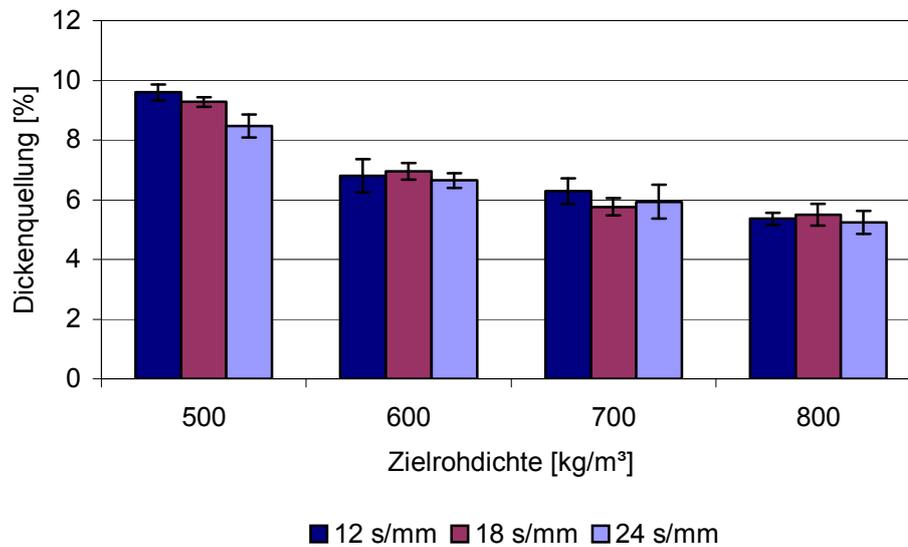


Abbildung 4-36: Dickenquellung nach 24 h Wasserlagerung in Abhängigkeit von Presszeitfaktor und Rohddichte von MDF (RF 104) aus rotfauler Fichte mit einem Beleimgrad von 10 %

Im Vergleich zur Versuchsserie RF 101 wurde bei der Serie RF 104 die Hydrophobierungsmittelzugabe bereits von 2 % (Feststoff/atro Faser) auf 1 % (Feststoff/atro Faser) reduziert (vgl. 3.10.1). Damit bewegt sich die Zugabe noch am oberen Bereich der von DEPPE & ERNST (1996) als industriell üblich ausgewiesenen Menge. Jedoch haben auch die Art der Hydrophobierungsmittelzugabe und Beleimung erhebliche Auswirkungen auf die Wirksamkeit der Paraffinemulsion (ROFFAEL ET AL. 2005 a & b). Auf Grundlage der Ergebnisse erscheint unter den gegebenen Versuchsbedingungen eine weitere Reduktion des Hydrophobierungsmittelanteils möglich.

4.4.7 Beleimgrad

Ein höherer Bindemittelanteil in der Faserplatte lässt unter identischen Rahmenbedingungen regulär bessere mechanisch-technologische Eigenschaften erwarten (DEPPE & ERNST, 1996; DUNKY & NIEMZ, 2002). Die Abbildung 4-37 zeigt die Abhängigkeit der Querkzugfestigkeit von Beleimgrad und Rohddichte bei UF-Harz gebundenen MDF der Versuchsserie RF 104. Bei einer Plattenrohddichte von 800 kg/m³ ist ein rapider Abfall der Querkzugfestigkeit von 1,3 N/mm² auf ca. 0,8 N/mm² bei Reduktion des Beleimgrades von 14 auf 10 % zu verzeichnen. Dieser Trend ist

im Rohdichtebereich von 600 kg/m^3 bis 700 kg/m^3 nicht zu beobachten. Lediglich bei der Zielrohddichte von 500 kg/m^3 zeigen sich signifikante Unterschiede zwischen Beleimungsfaktoren von 14 % und 12 %.

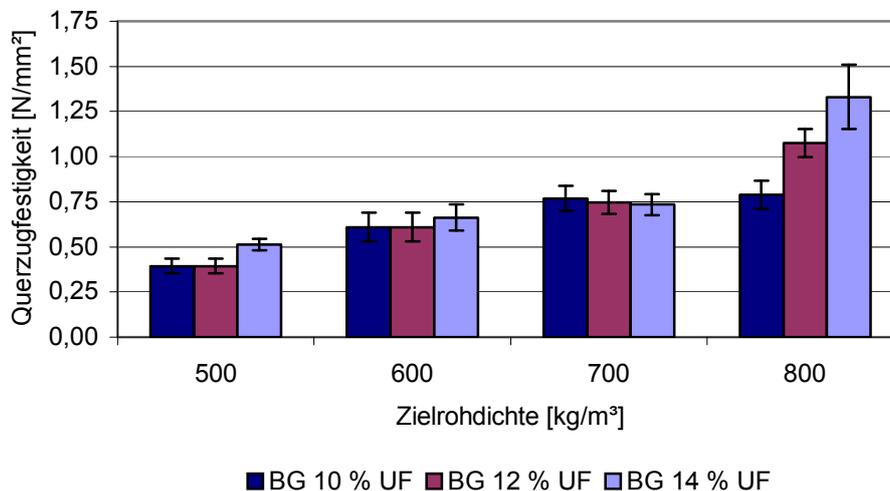


Abbildung 4-37: Abhängigkeit der Querzugfestigkeit Beleimgrad (BG) und Rohddichte bei 16 mm dicken MDF aus rotfauler Fichte (Presszeitfaktor: 24 s/mm)

Eine mögliche Erklärung für die geringen Unterschiede der Querzugfestigkeit in Abhängigkeit vom Beleimgrad bei geringen Rohdichten wäre die geringere Anzahl von Kontaktstellen zwischen den Fasern bei geringerer Rohddichte. Dies hätte wiederum eine geringe Anzahl von Verklebungspunkten zur Folge, woraus die unwesentlich höhere oder gleiche Festigkeit bei höheren Beleimgraden resultieren könnte. Dadurch könnte der Effekt der höheren Festigkeitseigenschaften bei höheren Beleimungsgraden im geringen Rohdichtebereich aufgehoben werden. Daraus lässt sich schließen, dass eine Erhöhung des Bindemittelanteils bei MDF mit geringer Rohddichte ohne Wirkung sein könnte.

4.4.8 MUF-Harz gebundene MDF aus rotfaulem Fichtenholz

Mitteldichte Faserplatten aus rotfaulem Fichtenholz wurden in einer Plattendicke von 16 mm hergestellt. Die Leimflotte enthielt den mit Melamin verstärkten Leim „KAURAMIN® 627“ der Firma BASF und das Hydrophobierungsmittel auf Paraffinbasis „HYDROWAX 730“ der Firma SASOL (vgl. Kap. 3.10.1).

Die Tabelle 4-16 enthält die Mittelwerte der mechanisch-technologischen Eigenschaften jeder Zielrohddichte der Versuchsreihe aus rotfaulen Fichtenfasern, gebunden mit 10 %; 12 % (Festharz/atro Faser) MUF-Harz und 1 % (Feststoff/atro Faser) Paraffinemulsion (*RF 105*)(vgl. Kap. 3.10.1).

Tabelle 4-16: Mechanisch-technologische Eigenschaften von MDF aus rotfaulen Fichtenfasern mit 10 % & 12 % MUF-Harz (Festharz/atro Faser); PZF 18 s/mm

Seriennr./ Beleimgrad	Rohddichte [kg/m ³]	Querzug- festigkeit [N/mm ²]	Biege- festigkeit [N/mm ²]	Biege-E- Modul [kN/mm ²]	Quellung 24 h [%]	mg HCHO / 100 g Faserplatte
<i>RF 105</i> <i>BG 10 %</i>	800	1,30	43,01	4,12	6,19	8,94
	700	0,99	38,18	3,32	8,01	9,44
	600	0,62	25,54	2,08	10,01	8,79
	500	0,41	18,77	1,47	10,15	9,45
<i>RF 105</i> <i>BG 12 %</i>	800	1,36	44,95	4,21	6,29	10,15
	700	0,86	42,18	3,84	8,94	10,55
	600	0,59	24,38	2,04	10,11	9,79
	500	0,43	19,94	1,71	12,38	10,16

Die ermittelten Rohdichten der MDF der Reihe *RF 105* weichen nicht signifikant von den angestrebten Zielrohddichten ab, so dass auch hier die Ergebnisse der mechanisch–technologischen Eigenschaften ohne Fehlerkorrektur miteinander vergleichbar sind.

MUF-Harz gebundene MDF weisen erwartungsgemäß höhere Festigkeitseigenschaften auf als vergleichbare Platten, die mit UF-Harz verklebt wurden. So erzielen die MDF der Versuchsreihe *RF 105* bei einer Rohddichte von 800 kg/m³ in Abhängigkeit vom Beleimgrad eine Querzugfestigkeit von bis zu 1,36 N/mm² und eine Biegefestigkeit von nahezu 45 N/mm². Damit liegen diese Werte deutlich über den ermittelten Eigenschaften von vergleichbaren UF-Harz gebundenen MDF der Serie *RF 104* (vgl. Tabelle 4-14 und Tabelle 4-15). Bis zu einer Rohddichte von 600 kg/m³ liegen alle ermittelten Festigkeitswerte über den durch die DIN EN 622-5 (2006) geforderten Mindestwerten. Die Anforderung von 12 % Dickenzunahme nach

24 h Wasserlagerung wird von allen MDF erfüllt. Auffällig sind die extrem hohen Biegefestigkeitswerte der MUF-Harz verleimten MDF mit Rohdichten von 800 kg/m^3 und 700 kg/m^3 . Sämtliche nach der Perforatormethode (DIN EN 120; 1992) ermittelten Formaldehydemissionen, liegen oberhalb des maximalen Perforatorwertes von $8 \text{ mg HCHO} / 100 \text{ g MDF}$ (DIN EN 662-1; 2003). Dies ist darauf zurückzuführen, dass auf die Zugabe von Härtingsbeschleunigern oder Formaldehydfängern verzichtet wurde.

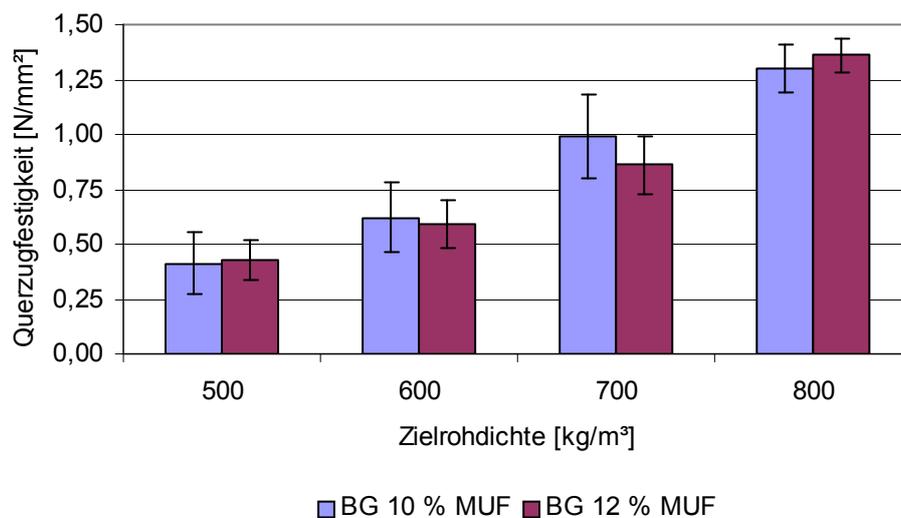


Abbildung 4-38: Vergleich von MUF-Harz gebundenen MDF aus rotfaulen Fichtenfasern mit Beleimgraden von 10 % und 12 % (Feststoff/atro Faser) in Abhängigkeit von der Rohddichte

Die Abbildung 4-38 zeigt die Abhängigkeit der Querzugfestigkeitswerte von MUF-Harz gebundenen MDF mit Beleimgraden von 10 % und 12 % von der Rohddichte. Wie aus der Grafik ersichtlich ist, kann kein einheitlicher Verlauf der ermittelten Werte zwischen den Beleimgraden nachgewiesen werden. Signifikante Unterschiede sind anhand der vorliegenden Ergebnisse nicht erkennbar. Die nahe liegende Vermutung, dass die Festigkeitseigenschaften der Platten mit einem Beleimungsgrad von 12 % höher sein müssten, wird nicht bestätigt. Die ermittelten mechanisch-technologischen Eigenschaften zeigen jedoch, dass MUF-Harze zur Verleimung von rotfaulen Fichtenfasern zu hochwertigen MDF geeignet sind. Jedoch führt eine Absenkung der Rohddichte auf 500 kg/m^3 zu mechanisch-technologischen Platteneigenschaften, die die Vorgaben nach DIN EN 622-5 (2006) unterschreiten.

4.4.9 PF-Harz gebundene MDF aus rotfaulem Fichtenholz

Folgend wurden MDF aus rotfaulen Fichtenholzfasern mit einer Plattendicke von 16 mm hergestellt. Als Rohdichten waren auch hier 800 kg/m³, 700 kg/m³, 600 kg/m³ und 500 kg/m³ vorgesehen. Die Leimflotte bestand aus dem Phenol-Formaldehyd-Harz vom Typ „1808 HW“ der Fa. BAKELITE und dem Hydrophobierungsmittel „HYDROWAX 730“ der Firma SASOL (vgl. Kap. 3.10.1).

Tabelle 4-17: Eigenschaften von 16 mm dicken MDF aus rotfaulen Fichtenfasern gebunden mit 10 % und 12 % PF-Harz (atro auf atro Faser); Presszeit 18 s/mm

Seriennr./ Beleimgrad	Rohdichte [kg/m ³]	Querzug- festigkeit [N/mm ²]	Biege- festigkeit [N/mm ²]	Biege-E- Modul [kN/mm ²]	Quellung 24 h [%]
<i>RF 106</i> <i>BG 10 %</i>	800	1,22	54,79	4,38	9,79
	700	0,82	40,37	3,70	10,05
	600	0,66	32,10	2,92	11,71
	500	0,46	19,87	2,06	11,95
<i>RF 106</i> <i>BG 12 %</i>	800	1,27	61,71	4,75	9,94
	700	0,93	42,85	3,65	9,31
	600	0,71	36,40	3,22	11,67
	500	0,59	24,35	2,17	11,45

Die Tabelle 4-17 enthält die ermittelten Werte mechanisch-technologischer Ausprüfung der PF-Harz gebundenen MDF aus rotfaulen Fichtenfasern mit Beleimgraden von 10 % und 12 % (atro auf atro Faser).

Auch bei den PF-Harz gebundenen MDF wurden extrem hohe Biegefestigkeitswerte von bis zu 61 N/mm² gemessen. Bei einem Beleimgrad von 12 % erfüllen die Platten aller Rohdichten dieser Prüfserie die durch die DIN EN 622-5 (2006) geforderten Mindestwerte. Bei einem Beleimgrad von 10 % ist lediglich die Quersugfestigkeit von Platten mit einer Rohdichte von 500 kg/m³ außerhalb der Norm von 0,55 N/mm.

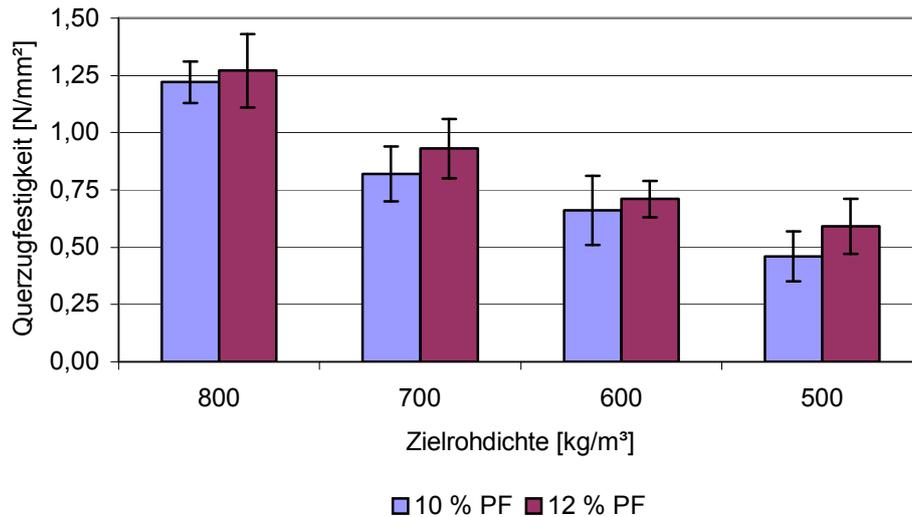


Abbildung 4-39: Abhängigkeit der Querzugfestigkeit von PF-Harz gebundenen MDF aus rotfaulen Fichtenfasern mit Beileimungsgraden von 10 % und 12 % (atro Faser)

Die Abbildung 4-39 verdeutlicht den Effekt einer Erhöhung der Faserbeileimung um 2 %. Im Gegensatz zu MUF-Harz gebundenen Platten ist bei PF-Harz verleimten MDF aus rotfaulem Fichtenholz ein erkennbarer Anstieg der Querzugfestigkeitswerte zu beobachten. Jedoch unterscheiden sich die ermittelten Querzugfestigkeiten der MDF mit verschiedenen Beileimungen nicht signifikant voneinander. Auch bei PF-Harz gebundenen MDF ist der lineare Abfall der Festigkeitswerte bei sinkender Rohddichte zu erkennen.

Die Ergebnisse der Versuchsserie *RF 105* bestätigen, dass sich auch aus einer Kombination von Phenol-Formaldehyd-Harz und rotfauler Fichtenfaser hochwertige mitteldichte Faserplatten mit hervorragenden mechanisch-technologischen Eigenschaften herstellen lassen. Hier erreichen selbst Platten mit einer sehr geringen Rohddichte von 500 kg/m³ noch sämtliche Normwerte.

4.4.10 MDF aus rotfaulem Fichtenholz verleimt mit einem Mischkondensat aus UF-Harz und Weizenquellwasser

Aufgrund der aktuellen Formaldehyddiskussion (IOS MAT-0003; 2008) sollten auch im Bereich der Faserwerkstoffe aus rotfaulem Fichtenholz die Formaldehyd bindenden Eigenschaften von Weizenprotein getestet werden. Dazu wurden MDF mit einem Mischkondensat bestehend aus 80 % UF-Harz und 20 % Weizenprotein

verleimt. Auch hier wurden die Fasern mit 10 % und 12 % Mischkondensat (Feststoff / atro Faser) beleimt (vgl. Kap. 3.10.1). Die Tabelle 4-18 enthält die ermittelten mittleren mechanisch-technologischen Eigenschaften der 10 mm dicken, MDF aus rotfaulem Fichtenholz mit einem Beleimgrad von 10 % und 12 % (atro auf atro Faser) des Mischkondensates. Als Hydrophobierungsmittel wurde 1 % HYDROWAX 730 zugegeben.

Tabelle 4-18: Ergebnisse der Ausprüfung von 10 mm dicken MDF aus rotfaulen Fichtenfasern, gebunden mit 10 % und 12 % Mischkondensat (atro auf atro Faser); Presszeit 18 s/mm

Seriennr./ Beleimgrad	Rohdichte [kg/m ³]	Querzug- festigkeit [N/mm ²]	Biege- festigkeit [N/mm ²]	Biege-E- Modul [kN/mm ²]	Quellung 24 h [%]	mg HCHO / 100 g Faserplatte
<i>RF 106 BG 10 %</i>	800	0,84	42,18	3,84	13,11	5,01
	700	0,67	33,51	2,82	14,61	5,31
	600	0,49	18,77	1,47	16,22	5,18
	500	0,34	11,65	1,05	17,83	5,25
<i>RF 106 BG 12 %</i>	800	1,09	45,64	4,00	16,15	5,38
	700	0,86	35,88	3,39	15,77	5,35
	600	0,58	26,38	2,52	16,29	5,26
	500	0,23	14,91	1,38	15,85	5,45

Die Abbildung 4-40 veranschaulicht die Auswirkung der Substitution von 20 % UF-Harz durch Weizenquellwasser auf die Querzugfestigkeitswerte der MDF aus rotfaulen Fichtenfasern.

Durch eine Substitution von 20 % UF-Harz durch Weizenquellwasser sinkt bei diesem Beispiel bei einem Beleimgrad von 10 % und bei einer Rohdichte von 800 kg/m³ die Querzugfestigkeit von 1,30 N/mm² auf 0,84 N/mm² (Abbildung 4-40). Dieser Wert liegt aber immer noch oberhalb des durch die DIN EN 662-5 (2006) gegebenen Mindestwertes von 0,60 N/mm². Positiv zu bewerten ist das Absinken der Formaldehydemission nach DIN EN 120 (1992) durch die Verwendung des Mischkondensates auf Werte um 5 mg HCHO / 100 g MDF. Alle aufgenommenen Festigkeitseigenschaften der UF/Weizenprotein verleimten MDF mit Rohdichten von

800 kg/m³ und 700 kg/m³ liegen oberhalb der geforderten Mindestwerte. Die Quellwerte nach 24 Stunden Wasserlagerung, der zuvor genannten MDF liegen um den durch die DIN EN 662-5 (2006) geforderten Höchstwert von 15 %. Dieser Umstand ist durch eine geringfügige Erhöhung der Paraffinzugabe abzuändern. Die ermittelten mechanisch-technologischen Eigenschaften der mit Mischkondensat verleimten MDF bestätigen, dass auch rotfaules Fichtenholz in Verbindung mit Weizenquellwasser zur Faserplattenherstellung geeignet ist.

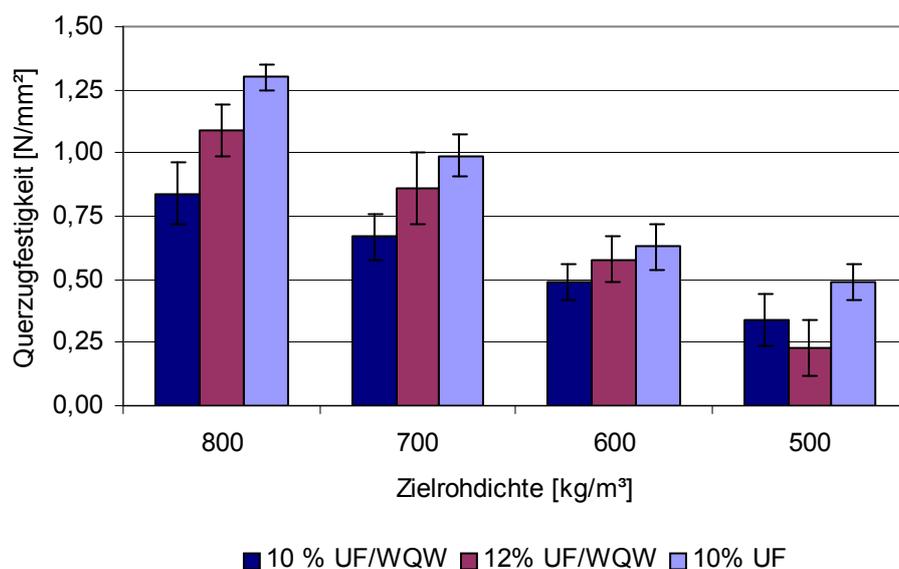


Abbildung 4-40: Vergleich der Querzugfestigkeitswerte von MDF aus rotfaulem Fichtenholz verleimt mit einem Mischkondensat aus UF-Harz und Weizenquellwasser und MDF aus rotfaulen Fichtenfasern verleimt mit UF-Harz als Referenz

SCHÖPPER (2006) untersuchte die Auswirkungen einer partiellen Substitution von UF-Harzen durch Weizenprotein auf die mechanisch-technologischen Eigenschaften von MDF. Für Faserwerkstoffe mit einer Rohddichte von ca. 800 kg/m³, gebunden mit einem Mischkondensat bestehend aus 75 % UF-Harz und 25 % Weizenprotein werden vergleichbare mechanisch-technologische Eigenschaften beschrieben. Die nach der Perforatormethode gemessenen Formaldehydabgaben gibt SCHÖPPER (2006) mit Werten von 5,0 bis 5,5 mg HCHO /100 g MDF an. Dies deckt sich mit den hier ermittelten Emissionswerten von MDF aus rotfaulem Fichtenholz, gebunden mit einem Mischkondensat aus UF-Harz und Weizenquellwasser (vgl. Tabelle 4-18).

4.5 Rasterelektronenmikroskopische Untersuchung von rotfaulem Fichtenholz

Durch die rasterelektronenmikroskopischen Aufnahmen von rotfaulem Fichtenholz konnte die Oberfläche des Holzes näher betrachtet und Veränderungen der Holzstruktur, hervorgerufen durch *Heterobasidion annosum* sichtbar gemacht werden. Das Bild 4-1 (links) zeigt einen Hoftüpfel im Fichtenholz durch den eine Pilzhyphe von *Heterobasidion annosum* gewachsen ist. Holzzersetzende Pilze wie *H. annosum* breiten sich relativ zügig über die Hoftüpfel in axialer Richtung aus (SCHWARZE ET AL. 1999). Im Gegensatz dazu ist das Wachstum in tangentialer Richtung durch Abwehrmaßnahmen des Baumes wesentlich erschwert.

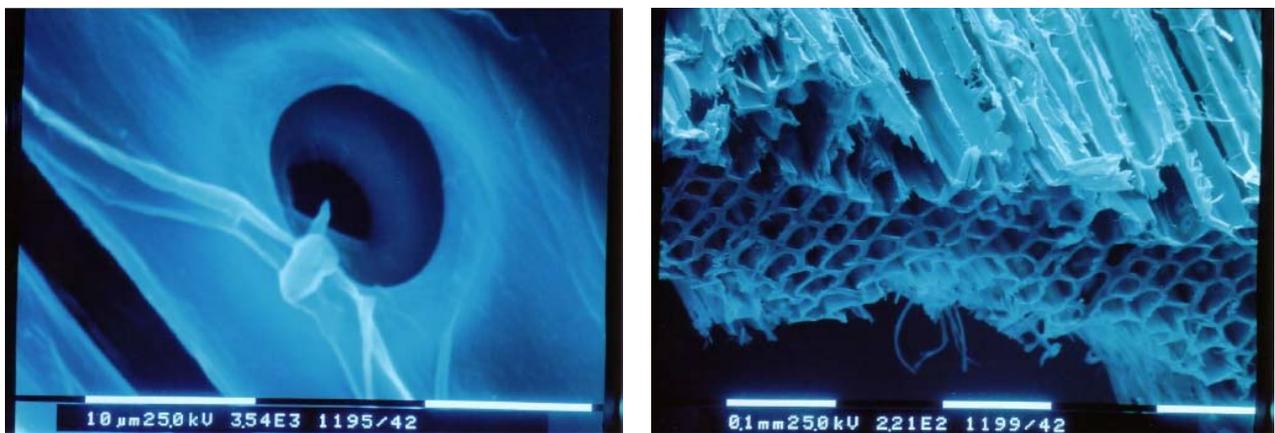


Bild 4-1: Pilzhyphe von *Heterobasidion annosum*, die durch einen Tüpfel gewachsen ist (li.). 3540-fache Vergrößerung; Rotfaules Fichtenholz, longitudinal (re.). 221-fache Vergrößerung

Eine Abbildung eines Stückes rotfaulen Fichtenholzes in longitudinaler Richtung ist in Bild 4-1 (re.) zu sehen. An mehreren Stellen ist ein leichter Abbau der Holzstruktur durch *H. annosum* zwischen den einzelnen Tracheiden auszumachen. Hier hat der Pilz begonnen Hemicellulose abzubauen und Lignin zu derivatisieren.

Die rasterelektronenmikroskopischen Aufnahmen des Fasermaterials aus rotfaulem Fichtenholz geben unter anderem Aufschluss über die Beschaffenheit der Faseroberfläche. Die Oberflächenbeschaffenheit hat einen großen Einfluss auf die Benetzbarkeit mit Bindemitteln. Aufgrund der thermischen Behandlung bei der Zerkleinerung, bei der die Temperaturen oberhalb der Glasübergangstemperatur des Lignins von 123 °C liegen, ist das in der Mittellamelle enthaltene Lignin plastifiziert worden, so dass die Fasern mit relativ geringem Energieaufwand von einander

getrennt werden konnten. Das nach dem Abkühlen erstarrte ehemalige Mittellamellenlignin liegt als Kruste auf der Faseroberfläche vor (KHARAZIPOUR, 1996; BERGMANN, 1998; EURING, 2008).

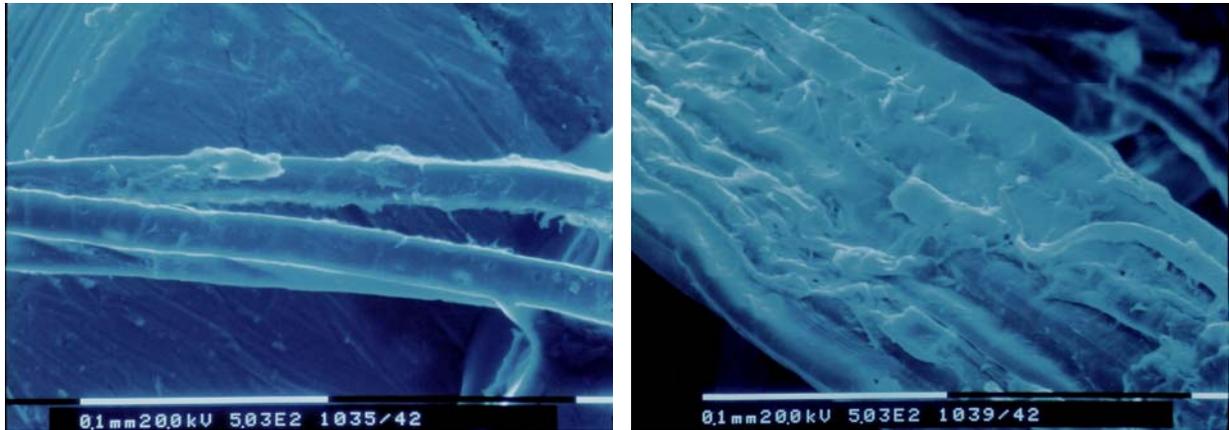


Bild 4-2: Holzfasern (li.) und Holzfaserbündel (re.) aus rotfaulem Fichtenholz, 503-fache Vergrößerung

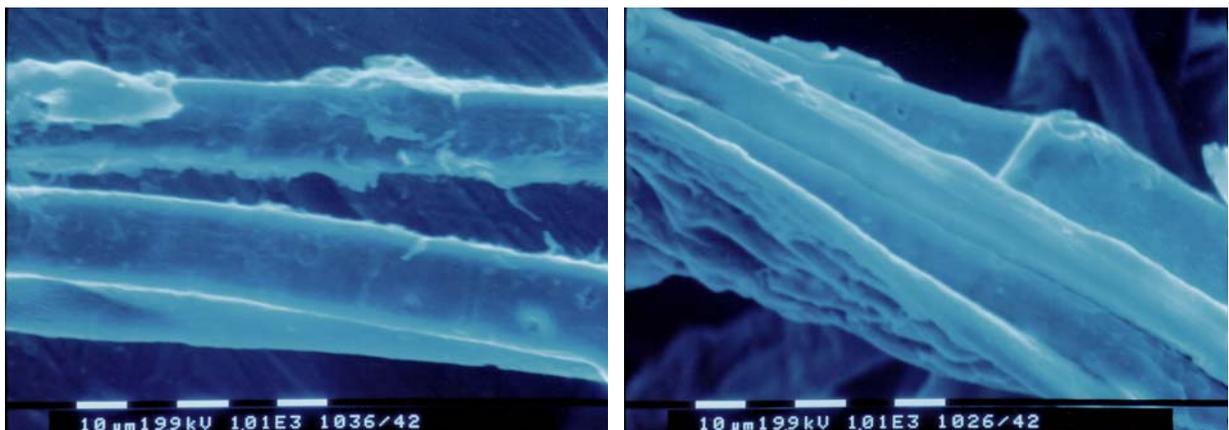


Bild 4-3: einzelne Holzfaser (li.) und Faserbündel (re.) aus rotfaulem Fichtenholz, 1010-fache Vergrößerung

Bild 4-2 und Bild 4-3 zeigen die rasterelektronenmikroskopischen Aufnahmen von Fasern und Faserbündeln aus rotfaulem Fichtenholz. Bei der Betrachtung fällt auf, dass eine raue Faseroberfläche mit der typischen Ligninkruste zu sehen ist. Weiterhin sind Tüpfel auf der Faseroberfläche (Bild 4-3 re.) deutlich erkennbar. Degradationserscheinungen durch den Holzabbau an Fasern von *Heterobasidion annosum* sind in den Bildern nicht zu beobachten.

Bild 4-4 Bild 4-5 zeigen rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen von Spanoberflächen rotfauler Fichtenspäne. Auch die Oberflächenbeschaffenheit der Spanoberfläche hat einen Einfluss auf die Entstehung einer qualitativ hochwertigen

Holz-zu-Holz-Bindung (ROFFAEL, 2004; WINKELMANN, 1997). Beim Betrachten von Bild 4-4 fällt auf, dass die Spanoberfläche stark zerklüftet ist. Dadurch erhöht sich die Fläche des Spans und entsprechend geringer ist die Leimmenge auf der Spanoberfläche.



Bild 4-4: Spangut aus rotfauler Fichte, 503-fache Vergrößerung

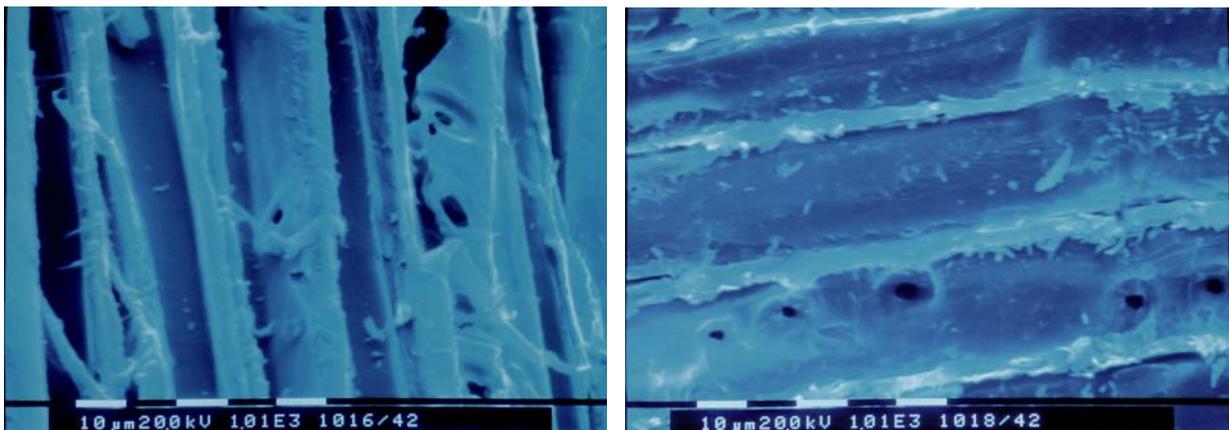


Bild 4-5: Spangut aus rotfaulem Fichtenholz, 1010-fache Vergrößerung

Bei der Betrachtung der Bilder sind charakteristische Merkmale der Zellstruktur des Holzes, wie z. B. Holzstrahlen (Bild 4-4 li.) und Tüpfel (Bild 4-5) sehr gut erkennbar. Bei einer 1010-fachen Vergrößerung sind auch hier Anzeichen für einen strukturellen Holzabbau durch *Heterobasidion annosum* zwischen den einzelnen Tracheiden erkennbar (vgl. Bild 4-1 re.). Auch konnte ein erheblicher Abbau chemischer Bestandteile des rotfaulen Fichtenholzes nachgewiesen werden (siehe Kap. 4.1.1 und Kap. 4.1.2).

4.6 Betriebsversuch zur Erhöhung der Wertschöpfung von rotfaulem Holz

Hauptziel des Industrieversuches bei der SÄGE- UND HOBELWERK OBERWESER GMBH war es, die Wertschöpfung von stark rotfaulen Fichtenabschnitten zu erhöhen. Dazu wurde das unbefallene, feste Holz (Splintholz) vom rotfaulen Kern getrennt. Das aus dem gesunden Holz hergestellte Schnittgut könnte somit zu aktuellen Schnittholzpreisen veräußert werden. Das aus dem rotfaulen Kern gewonnene Hackgut kann der Holzwerkstoffindustrie durch vorhandene Logistikketten zur Herstellung von MDF und Spanplatten zugeführt werden. Durch die Trennung von gesundem und von Rotfäule befallenen Stammbereichen, würde sich der prozentuale Anteil von rotfaulem Material erheblich erhöhen. Dadurch ist davon auszugehen, dass sich die positiven Effekte auf die Eigenschaften von Holzwerkstoffen, die durch rotfaules Holz ausgelöst werden, sich erhöhen.

Tabelle 4-19: Kostenvergleich der Aufarbeitung von 1 m³ rotfaulem Fichtenholz mit und ohne Schnittholzgewinnung

		Einschnitt	Hacken
Kosten	€/m ³ Schnittholz	€/m ³ Rohholz	€/m ³ Rohholz
Holz		19,5	19,5
Logistik		7	7
Einschnitt		45	
Trocknung	45	6,75	
Gesamtkosten		78,25	26,5
		Produkte aus 1 m ³ Rohholz	Produkte aus 1 m ³ Rohholz
Schnittholz m ³		0,15	0
Sägemehl m ³		0,08	0
HKS Srm	2,9	2,233	2,9
		€/m ³ SH	€/m ³ RH
Erlöse	€/m ³ SH	€/m ³ RH	€/m ³ RH
Schnittholz	280	42	0
Saldo		-36,25	-26,5
		€/Srm	€/Srm
Min. Preis Hackschnitzel		16,27	
Max. Kosten Hacken			7,13

Die rotfaulen Fichtenabschnitte wurden in einem Vollgatter vollständig zu Brettern aufgesägt. Dabei entstand ein Anteil an Sägemehl von etwa 8 %. Es wurden 32,4 m³ rotfaules Fichtenholz eingeschnitten. Somit betrug der Sägemehlanteil rechnerisch 2,6 m³. Aus dem Rohholz konnten durch den Einschnitt 4,9 m³ Schnittware erzeugt werden. Dies entspricht einer Ausbeute von 15,1 %, bezogen auf die Rohholzmenge. Die Hackschnitzelausbeute konnte mit 72,5 Srm beziffert werden. Daraus ergibt sich eine Ausbeute von 2,9 Srm Hackschnitzel pro m³ rotfaules Fichtenholz.

Die Tabelle 4-19 zeigt einen groben Kostenvergleich zwischen der Aufarbeitung von einem Kubikmeter rotfaulem Fichtenstammholz bei dem im ersten Schritt die Auftrennung von gesundem und rotfaulem Holz betrachtet wurde. Dem gegenüber stehen die maximalen Kosten für den Hackprozess, der aufgrund der ersten Betrachtung ermittelt wurde. Angegebene Kosten und Erlöse, sind Marktpreise die zur Zeit der Versuchsdurchführung im Jahr 2005 aktuell waren.

Auf Basis dieser Betrachtung erscheint es für die Holzwerkstoffindustrie lukrativ, die kompletten Abschnitte zu hacken, wenn die Aufarbeitungskosten geringer als 7,13 €/Srm sind. Sobald der Marktpreis für Hackschnitzel, ohne Berücksichtigung von weiteren Logistikkosten, 16,27 €/Srm übersteigt, erscheint es aus Sicht der Holzwerkstoffindustrie empfehlenswert, das gesunde Holz vom rotfaulen Kern zu trennen.

5 Zusammenfassung

Die Gemeine Fichte (*Picea abies* (L.) Karst.) gilt als „Brotbaum“ der deutschen Forstwirtschaft. Ca. 32 % der deutschen Waldfläche sind mit Fichten bestockt. Davon sind bis zu 25 % vom Erreger der Rotfäule (*Heterobasidion annosum* (Fr.) Bref.) befallen. Dieser Pilz gehört zu den Basidiomyceten, kann bei der Gemeinen Fichte Kern und Wundfäulen verursachen und zählt zu den bedeutendsten parasitären Schaderregern der Fichte. Diese durch *H. annosum* verursachten Holzfäulen entsprechen einem jährlichen wirtschaftlichen Schaden von etwa 80 bis 100 Mio. Euro für die deutschen Waldbesitzer. Ein idealer Befallsweg steht den Pilzsporen über frische Schnittflächen von Fichtenstubben zur Verfügung. Das Pilzmycel wächst in die Wurzeln ein und kann über Wurzelkontakte in benachbarte Bäume gelangen. Weiterhin ist ein Befall über Rindenverletzungen, verursacht durch Rücke-, Fäll- oder Schälsschäden möglich. Bei der Fichte steigt die Kernfäule im Stamm in mehrere Meter Höhe auf, ohne den Baum zum Absterben zu bringen. Bei der Holzernte werden diese befallenen, unteren Stammabschnitte „gesundgeschnitten“. D. h., dass der Fichtenstamm so lange eingekürzt wird, bis am verbleibenden Stammabschnitt kein befallenes Holz mehr erkennbar ist. Diese rotfaulen Fichtenabschnitte verbleiben zum überwiegenden Teil im Wald und wurden keiner wertschöpfenden Nutzung zugeführt. Durch eine erhebliche Verschärfung der Versorgungslage am Industrieholzmarkt änderte sich diese Situation im Jahr 2005/06 schlagartig. Auch trat im selben Zeitraum das neu errichtete Sulfat-Zellstoffwerk in Arneburg als großer Industrieholzverbraucher auf den Holzmarkt, welches diese rotfaulen Sortimente ohne größere technische Schwierigkeiten verarbeiten kann.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde untersucht, in wie weit sich dieses von *Heterobasidion annosum* befallene Fichtenholz als Rohstoff für die Herstellung von Span- und Faserplatten eignet. Das rotfaule Fichtenholz wies durch den pilzlichen Abbau der Zellstruktur im Vergleich zu unbefallenem Holz eine deutlich veränderte Zusammensetzung auf. Die relativen Anteile der drei Hauptkomponenten des Holzes (Lignin, Cellulose, Hemicellulose) hatten sich durch die Pilzinfektion deutlich verschoben. Weiterhin lagen relativer Asche- und Extraktstoffgehalt von befallenem Fichtenholz deutlich höher. Es konnte gezeigt werden, dass sich rotfaules Fichtenholz mit Hilfe vorhandener Zerspanungsaggregate zu hochwertigen Spänen verarbeiten lässt. Auch konnte aus rotfaulen Fichtenhackschnitzeln unter

industrienahen Bedingungen mit einem Labor-Refiner ein qualitativ hochwertiger Faserstoff erzeugt werden. Im Vergleich zu industriell aufbereiteten Spänen und Fasern, wiesen beide Ausgangsmaterialien zur Herstellung von Spanplatten und mitteldichten Faserplatten (MDF) deutlich geringere Schüttgewichte auf. Sowohl Späne als auch Fasern aus rotfaulem Fichtenholz zeigten keine nachteiligen Eigenschaften bei der weiteren Verarbeitung zu Holzwerkstoffen. Zur Herstellung von dreischichtigen Spanpanplatten und mitteldichten Faserplatten im Labor- und Pilotmaßstab wurden die 3 industriell gebräuchlichsten Leimsysteme verwendet. Dabei handelte es sich um Harnstoff-Formaldehyd-Harz (UF-Harz), Phenol-Formaldehyd-Harz (PF-Harz) und Melamin-Harnstoff-Formaldehyd-Harz (MUF-Harz). Bei den genannten Harzsystemen konnten im Vergleich zu unbefallenden Holzpartikeln keine Nachteile oder Unverträglichkeiten bei der Verklebung mit rotfaulen Fichtenholzpartikeln beobachtet werden. Weiterhin wurden Versuche durchgeführt, bei denen das UF-Harz zu 20 % durch ein proteinhaltiges, naturnahes Bindemittel in Form von Weizenprotein substituiert wurde. Diese partielle Substitution von synthetischen Harzen durch ein naturnahes Bindemittel führte zu einer leichten Verschlechterung der mechanisch-technologischen Eigenschaften dieser Plattenwerkstoffe. Jedoch wurde durch diese Maßnahme die Menge an freiem Formaldehyd in der Platte um mehr als 60 % gesenkt.

Die ersten Versuchsserien bestanden aus manuell gestreuten, dreischichtigen Spanplatten aus rotfaulen Fichtenspänen und industriell hergestelltem Referenzspangut. Als Bindemittel wurden UF-Harze, MUF-Harze und PF-Harze verwendet. Variiert wurden die Rohdichten, die Beileimgrade, die Leimflottenrezepturen und die Presszeitfaktoren. Parallel dazu wurden MDF aus rotfaulen Fichtenfasern und industriell aufbereitetem Faserstoff hergestellt. Auch diese Plattenwerkstoffe entstanden unter Variation von Harzsystem, Rohdichte, Beileimgrad und Presszeitfaktor. Bei der Ausprüfung dieser Laborserien wurde folgendes festgestellt:

- Die hergestellten dreischichtigen, 19 mm dicken Laborspanplatten aus rotfaulem Fichtenholz wiesen je nach Rohdichte Querkzugfestigkeiten von 0,54 N/mm² – 1,00 N/mm² auf und erfüllten somit den durch die DIN EN 312-P2 geforderten Mindestwert von 0,35 N/mm².

- Die Abhebefestigkeitswerte lagen im Mittel mit $0,80 \text{ N/mm}^2$ – $1,62 \text{ N/mm}^2$ über dem durch die DIN EN 312-P2 geforderten Mindestwert von $0,80 \text{ N/mm}^2$.
- Die Querkzugfestigkeiten und Abhebefestigkeiten lagen zudem auch über den Werten der entsprechenden Vergleichsplatten aus industriell aufbereitetem Spanmaterial. Aufgrund dessen erscheint eine Reduktion des Bindemittelanteils möglich.
- Bei einer Absenkung der Rohdichte auf bis zu 500 kg/m^3 war erwartungsgemäß ein Abfallen der Festigkeitswerte zu verzeichnen. Jedoch erfüllten auch die Platten mit dieser geringen Rohdichte die durch die DIN EN 312-P2 geforderten Grenzwerte.
- Die Querkzugfestigkeit der hergestellten Spanplatten fiel bei einer Verringerung der Rohdichte um 100 kg/m^3 im Mittel um ca. $0,17 \text{ N/mm}^2$.
- Bei UF-Harz gebundenen Spanplatten wurden Korrelationen von Festigkeitseigenschaften und Rohdichte ermittelt, die als sehr eng einzustufen sind. Mit einem Bestimmtheitsmaß von jeweils $0,992$ war die Abhängigkeit der Biegefestigkeit und des Biege-Elastizitäts-Moduls von der Rohdichte besonders auffällig.
- Die hergestellten MDF aus rotfaulem Fichtenholz wiesen Querkzugfestigkeiten von $0,57 \text{ N/mm}^2$ - $1,52 \text{ N/mm}^2$ auf. Bis zu einer Zielrohichte von 600 kg/m^3 wurden die durch die DIN EN 622-5 geforderte Querkzugfestigkeit von $0,60 \text{ N/mm}^2$ erfüllt.
- Die Querkzugfestigkeit der hergestellten MDF-Platten aus rotfaulem Fichtenfaserstoff fiel bei einer Verringerung der Rohdichte um 100 kg/m^3 um durchschnittlich $0,31 \text{ N/mm}^2$.
- Durch Zugabe eines paraffinhaltigen Hydrophobierungsmittels waren sowohl bei Spanplatten als auch bei MDF, Quellwerte nach 24 Stunden Wasserlagerung zu erreichen, die unter dem durch die DIN EN 312-P4 bzw. DIN EN 622-5 geforderten Höchstwert von 15% lagen.
- Bei Laborspanplatten und MDF konnten durch Zugabe einer härtungsbeschleunigenden 33% igen Ammoniumsulfatlösung zur Leimflotte, höhere Querkzugfestigkeiten bei geringeren Presszeitfaktoren erzielt werden.
- Eine Verringerung des Beileimgrades von 14% (Feststoff/atro Faser) auf bis zu 10% (Feststoff/atro Faser) zeigte bei 16 mm dicken MDF nicht den erwarteten eindeutigen Trend. So konnten im geringen bis mittleren Rohdichtebereich durch die Absenkung des Beileimgrades um 4% lediglich ein äußerst geringes Absinken

der Querkzugfestigkeit beobachtet werden. Im Gegensatz dazu waren bei einer Zielrohddichte von 800 kg/m^3 durch diese Maßnahme Unterschiede in den ermittelten Querkzugfestigkeitswerten von bis zu $0,54 \text{ N/mm}^2$ festzustellen.

- Eine Verkürzung der Presszeitfaktoren von 24 s/mm auf bis zu 12 s/mm zeigte bei 16 mm starken MDF aus rotfaulem Fichtenholz keine gravierenden Auswirkungen auf die Festigkeitseigenschaften dieser Platten.

Nach einer Rezeptoptimierung im Labormaßstab wurden diese Erfahrungen für ein Upscaling in den Pilotmaßstab genutzt. Dazu wurden weitere Versuchsserien von dreischichtigen Spanplatten auf der Pilotspanplattenanlage des BÜSGEN-INSTITUTES der UNIVERSITÄT GÖTTINGEN hergestellt. Durch die Nutzung dieser Pilotanlage konnten relativ industriennahe Bedingungen geschaffen werden. So besteht bei dieser Anlage die Möglichkeit, eine Miniatur eines industriell üblichen Trogmischers für die Beleimung der Späne zu verwenden. Auch sind die Streuköpfe für die Deck- und Mittelschicht industriell gebräuchlicher Streumaschinen nachempfunden. Hierzu wurden folgende Beobachtungen getätigt:

- Maschinell gestreute, UF-Harz gebundene Spanplatten aus rotfaulem Fichtenholz erzielten in Abhängigkeit von der Rohddichte, Querkzugfestigkeiten von $0,78 \text{ N/mm}^2$ – $0,37 \text{ N/mm}^2$. Die Abhebefestigkeiten bewegten sich im Bereich von $1,63 \text{ N/mm}^2$ – $0,81 \text{ N/mm}^2$. Die Werte der dazu gehörigen Referenzspanplatten aus industriell aufbereiteten Spänen bewegten sich auf ähnlichem Level.
- Maschinell gestreute, MUF-Harz gebundene Spanplatten aus rotfaulem Fichtenholz und aus Industriespänen erzielten erwartungsgemäß höherwertige mechanisch-technologische Eigenschaften als vergleichbare UF-Harz gebundene Spanplatten. In Abhängigkeit von der Rohddichte traten diese Effekte unterschiedlich sehr deutlich zu Tage.
- In einer weiteren Versuchsserie wurden maschinell gestreute Spanplatten mit variierenden Rohdichten hergestellt, bei denen 20% (Feststoff) des UF-Harzes durch ein naturnahes Bindemittel substituiert wurde. Durch die Zugabe von Weizenprotein konnten die nach der Perforatormethode ermittelten Emissionen von freiem Formaldehyd von durchschnittlich $5,51 \text{ mg HCHO/100g Spanplatte}$ auf $2,16 \text{ mg HCHO/100g}$ gesenkt werden. Damit verbunden war jedoch ein Absinken der mechanisch-technologischen Eigenschaften dieser Platten. Beispielsweise fielen die Querkzugfestigkeitswerte je nach Zielrohddichte auf $0,58 \text{ N/mm}^2$ – $0,19$

N/mm². Gleichzeitig war ein Anstieg der Dickenquellung nach 24 h Wasserlagerung zu beobachten.

Ferner wurde versucht, die Wertschöpfung von rotfaulem Fichtenholz weiter zu erhöhen. Dazu wurde im SÄGE- UND HOBELWERK OBERWESER der noch beil- und nagelfeste Splintbereich vom rotfaulen Kern getrennt. Aus dem Splintholz wurden Bretter und Kanthölzer erzeugt, der restliche Rohstoff wurde zu Hackschnitzeln für die Herstellung von Span- und Faserplatten aufbereitet. Unter den zum Versuchszeitpunkt herrschenden Rahmenbedingungen hatte sich gezeigt, dass es betriebswirtschaftlich sinnvoll ist, ab einem Kostenniveau von 16,27 € pro Srm die noch beil- und nagelfesten Holzbereiche vom rotfaulen Splint zu trennen. Jedoch gestaltete sich dieser Trennungsvorgang während des Industrierversuches durch die Inhomogenität der Fäuleausbreitung im Stammabschnitt relativ kompliziert. Aus diesen Gründen erschien das Hacken von kompletten rotfaulen Fichtenabschnitten sinnvoller.

6 Ausblick

Aus Sicht der Holzwerkstoffindustrie konnte mit diesem Projekt gezeigt werden, dass durch *Heterobasidion annosum in vivo* degradiertes Fichtenholz ohne Einbussen in der Holzwerkstoffqualität als Rohstoff für Spanplatten und MDF verwendet werden kann. Darüber hinaus hat dieses durch den Pilz biotechnologisch veränderte Holz positive Effekte auf die mechanisch-technologischen und hygrischen Eigenschaften der daraus hergestellten Plattenwerkstoffe. Auch war im Vergleich zu Holzwerkstoffen aus gesunden Hölzern, eine leichte Absenkung der Rohdichte, bei gleich bleibenden Eigenschaften möglich. Aus Gesichtspunkten der Qualitätsverbesserung, Materialeinsparung und Ressourcenschonung wäre die Nutzung dieses Rohstoffes als Vorteil anzusehen.

Abschließend müsste eine Übertragung der in diesem Forschungsvorhaben durchgeführten Versuche in dem Industriemaßstab erfolgen, um eventuelle Probleme bei der Verwendung von großen Anteilen von stark rotfaulem Fichtenholz in der industriellen Fertigung zu untersuchen. So könnten Probleme durch das erheblich größere Plattenformat, einer stärkeren Dampfentwicklung bei der Heißverpressung mittels kontinuierlichen Pressen und nicht optimierten Pressprogrammen in der industriellen Produktion auftreten.

Bei der notwendigen getrennten Sortierung von befallenem und gesundem Fichtenholz im Bestand entsteht ein gewisser Mehraufwand, der mit entsprechenden Kosten verbunden ist. Dieser Mehraufwand setzt sich u. a. aus getrennter manueller oder maschineller Aufarbeitung, Rückung, Polterung an der Waldstraße und Vermessung zusammen. Hier wäre es notwendig neue Logistikkonzepte zu entwickeln um diese Kosten zu minimieren.

Durch die Möglichkeit, rotfaules Fichtenholz im großen Umfang als Rohstoff für die Holzwerkstoffindustrie einzusetzen, entstünde für dieses Holzsortiment ein völlig neuer Absatzmarkt. Sofern diese Hölzer nicht bereits durch die Zellstoffindustrie genutzt werden, könnte dadurch der deutschen Forstwirtschaft eine neue Einkommensalternative geboten werden. Weiterhin stünde der Holzwerkstoffindustrie im Wettbewerb um ein begrenztes Holzangebot mit der energetischen Nutzung eine zusätzliche Rohstoffquelle zur Verfügung.

7 Literaturverzeichnis

- Akhtar, M., Scott, G.M., Swaney, R. E., Kirk, T.K. 1998.** Overview of Biomechanical and Biochemical Pulping Research. IN: Eriksson, K. E. and Cavaco-Paulo, A. (Hrsg.) Enzyme Applications in fiber Processing. ACS Symposium Series 687, Washington, Pp. 15 – 26.
- Annergren, G., Bentsson, B., Diller, B., Haglund, A., Jägerud, G. 1965.** Outside chip storage experiments. Svensk Papperstidn. 68: 309 – 326.
- Annesi, T. Curcio, G., Damico, L., Motta, E. 2005.** Biological control of *Heterobasidion annosum* on *Pinus pinea* by *Phlebiopsis gigantea*. Forest Pathology, 35, 127-134.
- Asiegbu, F. O., Johansson, M., Woodward, S., Hüttermann, A. 1998.** Biochemistry of the Host-Parasite Interaction. In: *Heterobasidion annosum: Biology, Ecology, Impact and Control* (Hrsg.) Woodward, S., Stenlid, J., Karjalainen, R., Hüttermann, A.. CAB International, UK.
- Assarsson, A. 1969.** Resin changes during wood storage. Svensk Papperstidn. 72: 304 – 311.
- Behrendt, C. J., Blanchette, R. A. 1997.** Biological processing of pine logs for pulp and paper production with *Phlebiopsis gigantea*. App. Environ. Microbiol. ; 63 (3) pp 1995 – 2000.
- Behrendt, C. J., Blanchette, R. A., Akhtar, A., Enebak, S. A., Scott, G. M., Iverson, S., Farrell, R. L. 2000.** Biomechanical pulping with *Phlebiopsis gigantea* reduced energy consumption and increased paper strength. Tappi; Journal 63 : 65 Vol. 83 (9).
- Bergmann, K. 1998.** Enzymatische Aktivierung der Holzeigenen Bindekräfte zur Herstellung einer bindemittelfreien mitteldichten Faserplatte. Dissertation. Universität Göttingen.
- Berry, F. H., Bretz, T. W. 1964.** Urea and other chemicals effective against colonisation of shortleaf pine stumps *Fomes annosus* in Missouri. Plant Disease. 48. 886-887.
- Blazej, A. 1979.** Chemie des Holzes. VEB Fachbuchverlag Leipzig.
- BMELV (Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (Hrsg.)) 2007.** Bundeswaldinventur². <http://www.bundeswaldinventur.de/>
- Bugala, W. 2007.** Taxonomy. In: Biology and Ecology of Norway Spruce. (Hrsg.) Tjoelker, M. G., Boratynski, A., Bugala, W. Springer Verlag, Hamburg. 3. 15-22.
- Burschel, P., Huss, J. 1997.** Grundriß des Waldbaus. Parey Buchverlag Berlin.
- Butin, H. 1989.** Krankheiten der Wald- und Parkbäume. Thieme-Verlag Stuttgart, New-York.
- Call, H. P., Raven, A. v., Leyer, H. 1990.** Einsatz von lignolyschen Enzymen bei der Zellstoff- und Papierherstellung. (Biopulping. Biobleaching) Das Papier (1990). Heft Nr. 10 A, V33 – V41.
- Call, H. P., Strittmatter, G. 1992.** Einsatz von lignolyschen Enzymen in der Papierindustrie. Das Papier (1992). Heft nr. 10 A, V32 – V37.

- Cwielong, P. P. 1986.** Mechanismen der Resistenz und der Pathogenität von fungizid wirksamen Naturstoffen gegenüber dem Erreger der Rotfäule *Herterobasidion annosum* (Fr.) Bref.. Dissertation. Georg-August-Universität Göttingen.
- Deppe, H. J., Ernst, K. 1996.** MDF – Mitteldichte Faserplatten. DRW-Verlag. Leinenfeld-Echterdingen.
- Deppe, H. J., Ernst, K. 2000.** Taschenbuch der Spanplattentechnik. 4. Auflage. DRW-Verlag. Leinenfeld-Echterdingen.
- DIN 54361. 1976.** Bestimmung des Pentosangehaltes: Furfurol-Verfahren. DIN 54 361. Fachnormenausschuß Materialprüfung und Fachnormenausschuß Papier und Pappe im DIN.
- DIN EN 120. 1992.** Holzwerkstoffe – Bestimmung des Formaldehydgehaltes – Extraktionsverfahren genannt Perforatormethode. Beuth-Verlag GmbH. Berlin.
- DIN EN 309. 2005.** Spanplatten – Definition und Klassifizierung. Beuth-Verlag GmbH. Berlin.
- DIN EN 310. 1993.** Holzwerkstoffe – Bestimmung des Biege-Elastizitätsmoduls und der Biegefestigkeit – Prüfverfahren. Beuth-Verlag GmbH. Berlin.
- DIN EN 311. 1993.** Holzwerkstoffe – Abhebefestigkeit von Oberflächen – Prüfverfahren. Beuth-Verlag GmbH. Berlin.
- DIN EN 312. 2003.** Spanplatten – Anforderungen. Beuth-Verlag GmbH. Berlin.
- DIN EN 317. 1993.** Spanplatten und Faserplatten – Bestimmung der Dickenquellung nach Wasserlagerung – Prüfverfahren. Beuth-Verlag GmbH. Berlin.
- DIN EN 319. 1993.** Spanplatten und Faserplatten – Bestimmung der Zugfestigkeit senkrecht zur Plattenebene – Prüfverfahren. Beuth-Verlag GmbH. Berlin.
- DIN EN 322. 1993.** Holzwerkstoffe – Bestimmung des Feuchtegehaltes. Beuth-Verlag GmbH. Berlin.
- DIN EN 323. 1993.** Holzwerkstoffe – Bestimmung der Rohdichte. Beuth-Verlag GmbH. Berlin.
- DIN EN 324-1. 1993.** Holzwerkstoffe – Bestimmung der Plattenmaße: Teil 1: Bestimmung der Dicke, Breite und Länge. Beuth-Verlag GmbH. Berlin.
- DIN-EN 326-1. 1993.** Holzwerkstoffe – Probenahme, Zuschnitt und Überwachung – Teil 1: Probenahme und Zuschnitt der Prüfkörper sowie Angabe der Prüfergebnisse. Beuth-Verlag GmbH. Berlin.
- DIN EN 622-1, 2003.** Faserplatten – Anforderungen – Teil 1: Allgemeine Anforderungen. Beuth-Verlag GmbH. Berlin.
- DIN EN 622-5. 2006.** Faserplatten – Anforderungen- Teil 5: Anforderungen an Platten nach dem Trockenverfahren (MDF). Beuth-Verlag GmbH. Berlin.
- Dimitri, L. 1980.** Untersuchungen über die Widerstandsfähigkeit der Fichte (*Picea abies* Karst.) gegenüber dem Wurzelschwamm *Fomes annosus* (Fr.) Cooke. Schriften aus der Forstlichen Fakultät der Universität Göttingen und Niedersächsischen Forstlichen Versuchsanstalt. Band 66. J. D. Sauerländer's Verlag. Frankfurt am Main.

- Dimitri, L., Tomiczek, C. 1998.** Impact, Control and Management of *Heterobasidion annosum* Root and Butt Rot in Germany and Austria. In Woodward, S., Stenlid, J., Karjalainen, R., Hüttermann, A.: *Heterobasidion annosum: Biology, Ecology, Impact and Control* (eds.) CAB International, UK.
- Dix, B., Roffael, E. 1994.** pH-Wert, Pufferkapazität und Gehalt an flüchtigen Säuren der Extrakte des Kern- und Splintholzes der Lärche. *Holz als Roh- und Werkstoff*. 52: 324.
- Dix, B., Roffael, E., Schneider, T. 2003.** Paraffine unterschiedlicher Kettenlänge als Hydrophobierungsmittel in mitteldichten Faserplatten. *Holz als Roh- und Werkstoff*, 61: 469 – 470.
- Driver, C. H. 1963.** Effect of certain chemical treatments on colonisation of slash pine stumps by *Fomes annosus*. *Plant Disease*. 47. 569-571.
- Dunky, M., Niemz, P. 2002.** *Holzwerkstoffe und Leime: Technologie und Einflussfaktoren*. Springer-Verlag. Berlin.
- Egner, K. 1951.** Zur Trocknung von Hölzern bei Temperaturen über 100 °C. *Holz als Roh- und Werkstoff*. 9 (3):84 – 97.
- Ek, M., Erikson, K. E. 1980.** Utilisation of the white rot fungus *Sporotrichum pulverulentum* for water purification and protein production on mixed lignocellulosic wastewater's. *Biotchnology and Bioengineering* 22, 2273 – 2284.
- Elias, H.G. 1981.** *Makromoleküle*, 4. umgearbeitete und wesentlich erweiterte Auflage, Hüthig & Wepf Verlag, Basel, Heidelberg, New York.
- Erikson, K., Blanchette, R. A., Ander, P. 1990.** *Microbial and enzymatic degradation of wood and wood components*. Springer Verlag Berlin.
- Esser, F. 2000.** *Der Forstwirt*. 3. Auflage. Verlag Eugen Ulmer Stuttgart.
- Euring, M., Kharazipour, A. 2007.** Application of mediators in enzymatical activation of fiberself cohesions for the production of enzyme-bonded, binder-free derived timber products". Vortrag zur 9th International Conference on Wood & Biofiber Plastics, 21-23.05.07, Madison, Wisconsin, USA.
- Euring, M. 2008.** Einsatz von Mediatoren bei der enzymatischen Aktivierung fasereigener Bindekräfte zur Herstellung von enzymgebundenen, bindemittelfreien Holzwerkstoffen. Dissertation. Universität Göttingen.
- Felby, C., Hassingboe, J., Lund, M. 2002.** Pilot-scale production of fibreboard made by laccase oxidized wood fibres: board properties and evidence for cross-linking of lignin. *Enzyme and Microbial Technology* 31 (2002) 736-741. Elsevier.
- 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., Wegener, G. 1989.** *Wood: Chemistry, ultrastructure, reactions*. Walter de Gruyter. Berlin, New York.
- Freudenberg, K. 1968.** The Constitution and Biosynthesis of Lignin. In: *Constitution and Biosynthesis of Lignin*, Ed. Freudenberg, K., Neish, A.C., Springer-Verlag, Berlin, S. 47 – 122.

- Frithiof, B., 2008.** Specification. Formaldehyde requirements of wood-based materials and products. (IOS-MAT-0003). IKEA of Swesen AB.
- Fuchs, G. 2007.** Abbau organischer Verbindungen. In: Allgemeine Mikrobiologie. Fuchs, G., Eitinger, T., Schlegel, H.G. (Hrsg.). 7. Auflage. Georg Thieme Verlag. 10: 285 – 320.
- Glenn, J. K., Morgan, M. A., Mayfield, M. B., Kuwahara, M., Gold M. H. 1983.** An extracellular H₂O₂-requiring enzyme preparation involved in lignin biodegradation by the white rot basidiomycete *Phanerochaete chrysosporium*. Biochem. Biophys. Res. Commun. 114:1077-1082.
- Glenn, J. K., Gold H. M. 1985.** Purification and charakterization of an extracellular Mn(II)-dependent peroxidase from *Phanerochaete chrysosporium*. Arch. Biochem. Biophys. 242:329-341.
- Görder, N.-C. 2008.** E1/2: Ist weniger mehr? Material+technik möbel 07-2008. m+t Ritthammer Publishing GmbH. Nürnberg. S. 58.
- Grammel, R. 1989.** Forstbenutzung: Technologie und Verwertung des Holzes. Parey-Verlag. Hamburg. Berlin.
- Gruber, E. 2001.** Lehrinheit 9: Aufschluss von Pflanzenmaterialien. Internetdownload vom 26.05.2004: www.cellulose-papier.chemie.tu-darmstadt.de/Deutsch/Vorlesungen_und_Veranstaltungen/Vorlesungen/Nachwachsende_Rohstoffe/PDF/Folien/09PPAufschluss%20von%20Pflanzenmaterialien.pdf
- Guevara-M., R., Johns, E.E. 1981.** Geographical and within – tree variation in heartwood pH of *Pinus oocarpa* Schiede from Honduras. Wood Science 13 (4): 220 – 224.
- Habenicht, G. 1997.** Kleben. Grundlagen, Technologie, Anwendungen. Springer-Verlag. Berlin.
- Hägglund, E. 1928.** Holzchemie. Akademische Verlagsgesellschaft mbH Leipzig: 162, 164.
- Hägglund, E. 1951.** Chemistry of wood. New York.
- Halse, O. M. 1926.** Bestimmung von Zellstoff und Holzstoff im Papier. Papier-Journalen 14, Nr. 10, S. 121 – 123.
- Halligan, A. F. 1970.** A review of thickness swelling in particleboard. Wood Science and technology. Vol. 4. S. 301 – 312.
- Hameed, M., Roffael, E. 1999 a.** Über die Benetzbarkeit von Splint- und Kernholz der Kiefer, Douglasie und Lärche. Holz als Roh- und Werkstoff, 57: 287 – 293.
- Hameed, M., Roffael, E. 1999 b.** Veränderung des Gehaltes an Ethanol-Cyclohexan-Extrakten von Kiefersplint- und –kernholzspänen infolge thermischer Behandlung. Holz als Roh- und Werkstoff, 57: 294.
- Hartig, R. 1877.** Die Rotfäule der Fichte. Monatschrift für das Forst- und Jagdwesen. E. Schweizerbart'sche Verlagshandlung Stuttgart. 97-113.
- Hartig, R. 1888.** Über die Bedeutung der Reservestoffe für den Baum. Botanische Zeitung, 46: 837 – 842.
- Hartmann, G., Nienhaus, F., Butin, H. 1995.** Farbatlas Waldschäden. Verlag Eugen Ulmer Stuttgart.

- Heller, W. 1995.** Die Spanplatten – Fibel – vom Baum zur Platte. CW Niemeyer-Druck. Hameln.
- Heydeck, P. 2003.** Angewandte forstliche Phytopathologie. Internetdownload vom 12.03.2004: [www.fh-Eberswalde.de/Waldschutz/Phytopathologie/Wurzelerkrankungen. Html](http://www.fh-Eberswalde.de/Waldschutz/Phytopathologie/Wurzelerkrankungen.Html)
- Higuchi, T. 1990.** Lignin biochemistry: Biosynthesis and Biodegradation. In: Wood Sci. Technol. 24. Springer Verlag. S. 23 – 63.
- Higuchi, T. 1997.** Biochemistry and molecular biology of Wood. Springer, Berlin, Heidelberg, New York.
- Hüttermann, A., Vogler, C. 1973.** Cellobiose phosphorylase in *Fomes annosus*. Nature New biology 245, No. 141, 64.
- Hüttermann, A., Kharazipour, A., Mayer, F. 1990 a.** Verfahren zur Gewinnung von phenoloxidierenden Enzymen aus Kulturen von Weißfäulepilzen. Patent P 40 33246.2.
- Hüttermann, A., Kharazipour, A., Haars, A., Nonninger, K. 1990 b.** ersetzt ein biologisches Bindemittel herkömmliche Kunstharzleime? Holz und Kunststoff, 11. 1215–1219.
- Hüttermann, A., Mai, C., Kharazipour, A. 2001.** Modification of Lignin for the production of new compounded materials. Applied Microbiology and Biotechnology, 81, 1159-1165.
- Hüttermann, A., Kharazipour, A. 1993.** Biochemie der Synthese und des Abbaus der pflanzlichen Zellwand. In: Hüttermann, A., Kharazipour, A. (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.
- Iakovlev, A., Stenlid, J.2000.** Mycological Ecology, 39 (3): 236-245.
- International Agency for Research on Cancer (IARC). 2004.** IARC classifies Formaldehyde as carcinogenic to humans. Press release nr. 153, 15.06.2004.
- Jayme, J., Büttel, H. 1968.** Vergleich verschiedener Verfahren zur Pentosanbestimmung einschließlich einer neuen ISO-Methode. Das Papier, 22.Jg., Nr. %, S. 249 – 253.
- Johansson, M., Denekamp, M., Asiegbu, F.O. 1999.** Mycological research, 103: 365-371 Part 3.
- Kerem, Z., Hadar, Y. 1998.** Lignin-degrading fungi: Mechanisms and utilization. In: A. Altmann (ed.): Agricultural biotechnology. Marcel Dekker Inc. New York, 351 – 365.
- Kato, F. 1969.** Stammfäuleschäden der Fichte. FA. 40. Jg., S. 81 – 92.
- Kersten, P. J., Tien, M., Kalyaraman B. 1985.** The ligninase of *Phanerochaete chrysosporium* generates cation radicals from methoxybenzenes. J. Biol. Chem. 260:2609-2612.
- Kharazipour, A., Haars, A., Shekholeslami, M., Hüttermann, A. 1991.** Enzymatische Behandlung von Holzfasern als Weg zu vollständigen bindemittelfreien Holzwerkstoffen. In: A. Hüttermann und A. Kharazipour (eds.).

- Die pflanzliche Zellwand als Vorbild für Holzwerkstoffe. Sauerländer Verlag, Frankfurt, 83-98.
- Kharazipour, A., Hüttermann, A. 1992.** Kleber aus Lignin – Die Chemie wird durch Naturprodukte ersetzt. *Energie*, 44, 36-42.
- Kharazipour, A. 1996.** Enzyme von Weißfäulepilzen als Grundlage für die Herstellung von Bindemitteln für Holzwerkstoffe. Schriften aus der Forstlichen Fakultät der Universität Göttingen und der Niedersächsischen Forstlichen Versuchsanstalt, Band 118, 161 Seiten, Sauerländer's Verlag, Frankfurt/M.
- Kharazipour, A., Hüttermann, A., Lüdemann, H.D. 1997.** Enzymatic activation of wood fibres as a mean for the production of wood composites. *Journal of Adhesion Science and Technology* 11 (39), pp. 419-427.
- Kharazipour, A., Hüttermann, A. 1998.** Biotechnological production of wood composites. In: Bruce, A., Palfreyman, J. W. 1999. *Forest Products Biotechnology*. Taylor & Francis, London, UK, 141-150.
- Kharazipour, A., Bergmann, K., Hüttermann, A., Nonninger, K. 1998.** Properties of fibre boards obtained by activation of the middle lamella lignin of wood fibres with peroxidase and H₂O₂ before conventional pressing. *Journal of Adhesion Science and Technology* 12 (10), pp. 1045-1053.
- Kharazipour, A. 2002.** Herstellung bindemittelfreier MDF – Platten mittels enzymatischer Aktivierung. CARMEN Symposium: Im Kreislauf der Natur – Naturstoffe für die moderne Gesellschaft. Juli 2002. Würzburg.
- Kharazipour, A. 2005.** Pflanzensubstrat, Verfahren zu seiner Herstellung und dessen Verwendung. EP: 1 654 924 A2.
- Kharazipour, A. 2006 a.** Plant substrate, method of making same, and use thereof. US: 2006/0107590 A1.
- Kharazipour, A. 2006 b.** Pflanzensubstrat, Verfahren zu seiner Herstellung und dessen Verwendung. DE:10 2 006 001 421.A1.
- Kharazipour, A. 2006 c.** Herstellung von Pflanzcontainern aus organischem Fasermaterial mit technischem Lignin DE: 102006 033 824.3.
- Klauditz, W. 1955 a.** Aufbau und Festigkeitsausbildung von Holzspanwerkstoffen. Bericht 2/1955 der Deutschen Gesellschaft für Holzforschung (DGfH).
- Klauditz, W. 1955 b.** Entwicklung, Stand und holzwirtschaftliche Bedeutung der Holzspanplatten. *Holz als Roh- Werkstoff* 16. 459–466.
- Klauditz, W., Ulbricht, H.J., Kratz, W., Buro, A. 1960.** Herstellung und Eigenschaften von Holzspanwerkstoffen mit gerichteter Festigkeit. *Holz als Roh- Werkstoff*, 18: 377 – 385.
- Klauditz, W. 1962.** Zur Entwicklung und zum Stand der Holzspanplattenherstellung 1955 – 1961. *Holz als Roh- Werkstoff*, 20:1 – 12.
- Knigge, W. 1966.** Grundriss der Forstbenutzung: Entstehung, Eigenschaften, Verwertung und Verwendung des Holzes und anderer Forstprodukte. Parey – Verlag Hamburg.
- Koshijima, T., Watanabe, T. und Yaku F. 1989:** Structure and properties of the lignin-carbohydrate complex polymer as an amphipathic substance. In: W.G.

- Glasser und S. Sarkanen (eds.): Lignin: Properties and material. ACS Symposium Series 397:11-28.
- Lampert, H. 1966.** Faserplatten. VEB Fachbuchverlag Leipzig. 453 S.
- Langendorf, G., Schuster, E., Wagenführ, R. 1990.** Rohholz. Holztechnik VEB Fachbuchverlag Leipzig.
- Lelis, R. C. C. 1992.** Zum Verhalten von Splint- und Kernholz der Kiefer bei der Verleimung mit Harnstoffformaldehydharzen (UF-Harzen) und Diisocyanat-Klebstoffen (PMDI). Magisterarbeit der Georg-August-Universität Göttingen.
- Lohmann, U. 1999.** Holzhandbuch. DRW-Verlag. Leinfelden-Echterdingen.
- Ludwig, K. 2007.** Untersuchung von biotechnologisch durch den Pilz *Heterobasidion annosum* *in vivo* degradiertem Fichtenholz als Pflanzensubstrat und Torfersatz. Dissertation. Universität Göttingen.
- Lund, M., Felby, C. 2001.** Wet strength improvement of unbleached kraft pulp through laccase catalyzed oxidation. Enzyme and Microbial Technology 28 (2001). 760-765. Elsevier.
- Luthardt, W. 1969.** Holzbewohnende Pilze. Wittenberg. 1969.
- Mai, C., Kües, U., Militz, H. 2004.** Biotechnology in the wood industry. Applied Microbiology and Biotechnology, 63, 477-494.
- Majjala, P., Raudaskoski, M., Viikari, L. 1995.** Microbiology-UK, 141: 743-750 Part 3.
- Majjala, P., Harrington, T. C., Raudaskoski, M. 2003.** Mycologia 95 (2): 209-221.
- Maloney, T. M. 1993.** Modern particleboard and dry-process fiberboard manufacturing. Miller Freeman, San Francisco, CA.
- Marutzky, R., Roffael, E. 1977.** Über den Stickstoffgehalt in Holz, Rinde und Biomasse. Holz-Zentralblatt, 28 : 424.
- Marutzky, R. 1999.** Braucht man für Span- und Faserplatten noch den Wald? Holz-Zentralblatt 125, Nr. 142, S. 34.
- Marutzky, R. 2004.** Biomassen auf Basis von Holz als Brennstoffe in Österreich, der Schweiz, und Deutschland. Nutzungssituation – Theoretische und reale Produktion – Qualitäten – Wettbewerbssituation – Preistendenzen. Download 2004. auf der Homepage des WKI.
- Mantau, U., Wierling, R., Weimar, H. 2003.** Holzwerkstoffindustrie in Deutschland. In: Holz-Zentralblatt 15 S. 231 – 234. DRW-Verlag. Leinfelden – Echterdingen.
- Mantau, U., Bilitewski, B. 2005.** Stoffstrom-Modell-Holz. Verband Deutscher Papierfabriken e. V. , Hamburg,
- Messner, K., Schiefermeier, M., Heimel, M., Srebotnik, E. 1993 a.** Bio-Sulfite pulping: Current state of Research. FEMS Symposium "Lignin Biodegradation, and Transformation" Lissabon. 18 – 21 April proceedings, pp. 197 – 200.
- Messner, K., Fischer, K., Srebotnik, E. 1993 b.** Holzabbau und Biopulping – Biotechnologischer Verfahren für die Zellstoffindustrie. Zellcheming. Hamburg, 28.06. – 01.07.1993.
- Messner, K., Srebotnik, E. 1994.** Biopulping- an overview of developments in an environmentally safe paper-making technology. FEMS Microbiol. Rev. 13:351.

- Metzler, B. 2001.** Perspektiven der Stockfäulebekämpfung bei Fichte. FVA-Einblick 2/2001. http://www.waldwissen.net/themen/waldschutz/pilze_nematoden/fva_stockfaeulebekaempfung
- Metzler, B., Thumm, H., Scham, J. 2005.** Gegen die Rotfäule kann man etwas tun. Badische Bauernzeitung 1/2005. http://www.waldwissen.net/themen/waldschutz/pilze_nematoden/fva_rotfaeule_DE
- Mombächer, R. 1988.** Holz Lexikon. Band 1. 3. Auflage. DRW-Verlag.
- Müller, C. 2005.** Mechanisch-enzymatischer Aufschluss von Kartoffelpülpe als Bindemittel zur Herstellung von Holzwerkstoffen. Dissertation. Universität Göttingen.
- Nikitin, N. I. 1962.** The chemistry of cellulose and wood. (Translated from russian). Moskva – Leningrad.
- Okamura, K. 1991.** Structure of cellulose. In: Wood and Cellulosic Chemistry. (Hrsg.) Hon, D. N. S., Shiraishi, N. Marcel Decker Verlag. New York, Basel. 89–112.
- Packmann, D.F. 1960.** The acidity of wood. *Holzforschung*. 14 (6): 178 – 183.
- Pizzi, A. 2000.** Tannery row – the story of some natural and synthetic wood adhesives. *Wood Science and Technology*, 34, 277-316.
- Pizzi, A. 2006.** Recent developments in eco-efficient bio-based adhesives for wood bonding: opportunities and issues. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 20, 829-846.
- Poblete, H. 1983.** Veränderung von Holzspänen während der Trocknung und des Pressens zu Holzspanplatten. Dissertation. Universität Göttingen.
- Popoff, T., Theander, O., Johannson, M. 1975.** Changes in sapwood of roots of Norway spruce, attacked by *Fomes annosum*. Part II. Organic constituents and their biological effects. *Physiol. Plantarum* 34, 347-356.
- Prasetya, B., Böhner, G., Roffael, E. 1992.** Untersuchungen über die Veränderungen der Fichtenrinde durch thermische Behandlung. *Holz als Roh und Werkstoff*. 50: 353 – 362.
- Prasetya, B. 1989.** Untersuchungen über die Acidität einiger Nadelbaumarten. Magisterarbeit für das Aufbaustudium der Forstwissenschaften in den Tropen und Subtropen an der forstlichen Fakultät der Georg-August-Universität Göttingen.
- Pratt, J. E., Johannson, M., Hüttermann, A. 1998.** Chemical control of *Heterobasidion annosum*. In: Woodward, S., Stenlid, J., Karjalainen, R., Hüttermann, A. 1998. *Heterobasidion annosum*: Biology, Ecology, Impact and Control. CAB International, UK. 259-282.
- Przybylski, T. 2007.** Morphology. In: *Biology and Ecology of Norway Spruce*. (Hrsg.). Tjoelker, M. G., Boratynski, A., Bugala, W. Springer Verlag, Hamburg. 2. 9-14.
- Raven, P.H., Evert, R.F., Curtis, H. 2000.** Biologie der Pflanzen. 3. Auflage. De Gruyter, Berlin.
- Reinhammar, B. 1984,** Laccase. In: R. Lontie (ed.): Copper protein and copper enzymes. CRC Press, Boca Raton, Vol. 3:1-31.

- Rishbeth, J. 1950.** Observation on the biology of *Fomes annosus* with particular reference to East Anglian pine plantations. I. The outbreaks of disease and ecological status of the fungus. *Annals of Botany*. 14. 365-383.
- Rishbeth, J. 1959.** Stump protection against *Fomes annosus*. II. Treatment with substances other than creosote. *Annals of Applied Biology*. 47. 529-541.
- Roffael, E. 1982.** Die Formaldehydabgabe von Spanplatten und anderer Werkstoffe. DRW-Verlag Stuttgart.
- Roffael, E. 1989 a.** Zur Bildung von flüchtigen organischen Säuren aus Holzspänen und Holzspanplatten. *Holz-Zentralblatt*, 115: 112, 114 – 115.
- Roffael, E. 1989 b.** Abgabe von flüchtigen organischen Säuren aus Holzspänen und Holzspanplatten. *Holz als Roh- und Werkstoff*, 47: 447 – 452.
- Roffael, E., Miertzsch, H., Schwarz, T. 1992 a.** Pufferkapazität und pH-wert des Splintholzsaftes der Kiefer. *Holz als Roh- und Werkstoff*. 50: 171.
- Roffael, E., Miertzsch, H., Schwarz, T. 1992 b.** Pufferkapazität und pH-wert des Splintholzsaftes der Fichte. *Holz als Roh- und Werkstoff*. 50: 260.
- Roffael, E., Dix, B., Bär, G., Bayer, R. 1994.** Über die Eignung von thermo-mechanischem und chemo-thermo-mechanischem Holzstoff (TMP und CTMP) aus Buchen- und Kiefernholz für die Herstellung von mitteldichten Faserplatten (MDF. Teil 1: Aufschluss des Holzes und Eigenschaften der Faserstoffe. *Holz als Roh- und Werkstoff*, 52: 239 – 246.
- Roffael, E., Poblete, H. Torres, M. 2000.** Über die Acidität von Kern- und Splintholz der Kastanie (*Castanea sativa*) aus Chile. *Holz als Roh- und Werkstoff*. 58: 120 – 122.
- Roffael, E., Schäfer, M. 2002.** Bedeutung der Extraktstoffe des Holzes in biologischer, chemischer und technologischer Hinsicht. Vorlesungsskript. Inst. F. Holzbiologie und Holztechnologie der Georg-August-Universität Göttingen.
- Roffael, E., Schneider, T., König, B., Behn, C. 2004.** Holzchemie & Holztechnologie. Vorlesungsskript. Inst. F. Holzbiologie und Holztechnologie der Georg-August-Universität Göttingen.
- Roffael, E. 2004.** Grundlagen der Herstellung und Verwendung von Holzwerkstoffen. Teil 1: chemische Aspekte. Vorlesungsskript. Inst. F. Holzbiologie und Holztechnologie der Georg-August-Universität Göttingen.
- Roffael, E., Schneider, T., Dix, B. 2005 a.** Zur Hydrophobierung von mitteldichten Faserplatten (MDF) mit Paraffinen Teil 2: Einfluss des Beileimungsverfahrens (Blender-, Blowline-Verfahren) und der Art der Zugabe von Paraffindispersionen auf die Hydrophobierung von MDF. *Holz als Roh- und Werkstoff*, 63: 272 – 277.
- Roffael, E., Schneider, T., Dix, B., Bär, G. 2005 b.** Zur Hydrophobierung von mitteldichten Faserplatten (MDF) mit Paraffinen Teil 3: Methoden zur Erfassung der Hydrophobierung von Faserstoffen durch Paraffine. *Holz als Roh- und Werkstoff*, 63: 278 – 284.
- Rüter, S., Kreißig, J. 2007.** Grundsätze für Holz und Holzwerkstoffe im Netzwerk Lebenszyklusdaten. Projektbericht. Forschungszentrum Karlsruhe (Hrsg.).
- Salmen, L., Olson A.-M. 1998:** Interaction between hemicelluloses, lignin and cellulose: Structure-property relationships. *Journal of Pulp and Paper Science* 24 (3):99-103.

- Sandermann, W., Rothkamm, M. 1959.** Über die Bestimmung der pH-Werte von Handelshölzern und deren Bedeutung für die Praxis. Holz als Roh- und Werkstoff, 17: 433 – 440.
- Sandermann, W., Hausen, B., Simatupang, M. 1967.** Orientierende Versuche zur Differenzierung von Splint und Kern sowie zum Sichtbarmachen der Übergangszone von Fichte und anderen Nadelhölzern. Papier, 21: 349 – 354.
- Sauerwein, P. 2008.** EPF-S-eine echte Alternative. In: 2009 wird ein schwieriges Jahr. Holz-Zentralblatt Nr. 51/52. S. 1448. DRW-Verlag. Leinfelden – Echterdingen.
- Sermanini, G., G. et al. 1994.** Characteristics of paper handsheets after combined biological pretreatments and conventional pulping of wheat straw. Tappi J. 77:151.
- Schäfer, M., Roffael, E. 1996.** Einfluss der Lagerung von Industrieholz der Kiefer und der Fichte auf seine Eignung für die Herstellung von Spanplatten und mitteldichten Faserplatten (MDF). Teil 3: Untersuchungen zur Veränderung von verleimungsrelevanten Eigenschaften der Späne und Fasern aus Hackschnitzeln des Wintereinschlags. Holz als Roh- und Werkstoff. 54: 341 – 348.
- Schäfer, M., Roffael, E. 1997 a.** Einfluss der Lagerung von Industrieholz der Kiefer und der Fichte auf seine Eignung für die Herstellung von Spanplatten und mitteldichten faserplatten (MDF). Teil 4: Physikalisch-technologische und chemische Eigenschaften der aus Hackschnitzeln von Kiefer und Fichte des Wintereinschlags hergestellten Spanplatten und mitteldichten Faserplatten (MDF). Holz als Roh- und Werkstoff. 55: 139 – 167.
- Schäfer, M., Roffael, E. 1997 b.** Einfluss der Lagerung von Industrieholz der Kiefer und der Fichte auf seine Eignung für die Herstellung von Spanplatten und mitteldichten faserplatten (MDF). Teil 5: Chemische Eigenschaften der Späne und Fasern aus Hackschnitzeln des Frühjahreinschlags sowie physikalisch-technologische Eigenschaften der daraus hergestellten Spanplatten und MDF. Holz als Roh- und Werkstoff. 55: 261 – 267.
- Schindel, K. 1998.** Die Röntgenmikronanalyse von Lignin als Untersuchungsmethode für Holz und Holzwerkstoffe. Dissertation Fakultät für Forstwissenschaften, Göttingen.
- Schmidt-Vogt, H. 1977.** Die Fichte. Band 2, Parey-Verlag Berlin Hamburg.
- Schneider, A., Roffael, E., May, H.-A. 1982.** Untersuchungen über den Einfluss von Rohdichte, Bindemittelaufwand und Spänebeschaffenheit auf das Sorptionsverhalten und die Dickenquellung von Spanplatten. Holz als Roh- und Werkstoff, 40: 339 – 344.
- Schneider, T. 1999.** Untersuchungen über den Einfluss von Aufschlussbedingungen des Holzes und der Faser Trocknung auf die Eigenschaften von mitteldichten Faserplatten (MDF). Dissertation. Universität Göttingen.
- Schober, R. 1987.** Ertragstabeln wichtiger Baumarten. Sauerländer's Verlag, Frankfurt am Main.
- Schöpfer, C. 2006.** Entwicklung eines naturnahen Bindemittels aus nachwachsenden Rohstoffen auf Proteinbasis zur Herstellung von mitteldichten Faserplatten. Dissertation. Universität Göttingen.

- Schütt, P., Schuck, H. J., Stimm, B. 1992.** Lexikon der Baum- und Straucharten. Ecomed Verlagsgesellschaft mbH. Landsberg/Lech.
- Schwarze, F.W.M.R., Engels, J., Mattheck, C. 1999.** Holzersetzende Pilze in Bäumen: Strategien der Holzersetzung. Rombach verlag. Freiburg im Breisgau, Reihe Ökologie Band 5.
- Sörgel, C., Mantau, U. 2006.** Standorte der Holzwirtschaft – Holzwerkstoffindustrie-Abschlussbericht. Universität Hamburg, Zentrum Holzwirtschaft. Arbeitsbereich Ökonomie der Holz- und Forstwirtschaft. Hamburg 2006.
- Stegmann, G., Kratz, W. 1967.** Kennzeichnung der Verleimungsgüte von Spanplatten mit verschiedenen Bindemittelgehalten und Rohdichten durch Quellungsdruck-Messungen. 1. Ein Beitrag zur Charakterisierung der Quellungsstressungen mit Hilfe einer neuen Messmethodik. Adhäsion 11: 11-18
- Surminski, J. 2007.** Wood properties and uses. In: Biology and Ecology of Norway Spruce. (Hrsg.). Tjoelker, M. G., Boratynski, A., Bugala, W. Springer Verlag, Berlin. 15. 333-342.
- Tien, M., Kirk T. K. 1983.** Lignin degrading enzyme from the hymenomycete *Phanerochaete chrysosporium*. Nature 326:520-523.
- Tocan, M., Petrea, G., Iliescu, G. 1963.** Celuloza si Hirtie. 12(7): 214 – 222; ibidem, (9): 281 – 287.
- Trendelenburg, R., Mayer-Wegelin, H. 1955:** Das Holz als Rohstoff. 2. Auflage. Carl Hanser Verlag München.
- Unbehaun, H., Kühne, G., Schindel, K., Hüttermann, A. 1999 a.** Hackschnitzelfermentation für die Holzwerkstoffherstellung – Pilzscreening von 31 Basidiomyceten, Holzforsch. Holzverwert. 51, 24-25.
- Unbehaun, H., Wolff, M., Kühne, G., Schindel, K., Hüttermann, A., Cohen, R., Chet, I. 1999 b.** Mechanismen der mykologischen Transformation von Holz für die Holzwerkstoffherstellung, Holz Roh- Werkstoff 57, 92.
- Vasiliauskas, R., Lygis, V., Thor, M., Stenlid, J. 2004.** Impact of biological (Rotstop) and chemical (urea) treatments on fungal community structure in freshly cut *Picea abies* stumps. Biological Control. 31. 405-413.
- Vasiliauskas, R., Larsson, E., Larsson, K. H., Stenlid, J. 2005.** Persistence and long term impact of Rotstop biological control agent on mycodiversity in *Picea abies* stumps. Biological Control. 32. 295-304.
- VHI (Verband der Deutschen Holzwerkstoffindustrie e. V.) 2008.** Branchendaten. <http://www.vhi.de/VHI-Branchendaten2.cfm>
- Wagenführ, A. 1989.** Anatomie des Holzes. VEB Fachbuchverlag Leipzig. 4. Auflage: 26.
- Widstein, P. 2002.** Oxidative Activation of Wood Fibres for the Manufacture of Medium – Density Fibreboard (MDF). Helsinki University of Technology, Laboratory of Paper Technology. Reports, Series A 15. Helsinki.
- Winkelmann, A. 1997.** Herstellung von emissionsarmen Holzwerkstoffen auf der Basis von nachwachsenden Rohstoffen. Dissertation. Universität Göttingen.
- Woodward, S., Stenlid, J., Karjalainen, R., Hüttermann, A. 1998.** Heterobasidion annosum: Biology, Ecology, Impact and Control. CAB International, UK.

- Zeppenfeld, G. 1991.** Klebstoffe in der Holz- und Möbelindustrie. Fachbuchverlag Leipzig. 298 S.
- ZMP (Zentrale Markt- und Preisberichtsstelle) 2008.** Forst und Holz. Marktbilanz 2007.
- Zycha, H., & Mitarb.. 1976.** Der Wurzelschwamm (*Fomes annosus*) und die Rotfäule der Fichte (*Picea abies*). Forstwiss. Centralblatt. 36.

8 Abkürzungsverzeichnis

%	Prozent
°C	Grad Celsius
atro	absolut trocken
BG	Beleimgrad (Feststoff auf atro Faser/Span)
bidest.	zweifach destilliert
ca.	circa
CARB	California Air Resources Board
cm	Zentimeter
dest.	destilliert
d. h.	das heißt
DIN	Deutsches Institut für Normung e.V.
DS	Deckschicht
EN	Europäisches Komitee für Normung
EPF	European Panel Federation
EPF-S	European Panel Federation-Standard
Fm	Festmeter
FS	Feststoff
g	Gramm
g/cm ³	Gramm pro Kubikzentimeter
GmbH	Gesellschaft mit beschränkter Haftung
h	Stunde
ha	Hektar
HCHO	Formaldehyd
IN	Versuchsserien aus industriell aufbereitetem Rohstoff
ISO	International Organization for Standardization
kg	Kilogramm
Kg/m ³	Kilogramm pro Kubikmeter
kJ	Kilojoule
Kv	Kilovolt
KWh/t	Kilowattstunden pro Tonne
L	Liter
l	Länge
Lutro	Lufttrocken
m	Meter

m ³	Kubikmeter
M	Molarität
MDF	Mitteldichte Faserplatte
Mio.	Million
mm	Millimeter
mol	Mol
MS	Mittelschicht
MUF	MUF-Harz (Melamin-Harnstoff-Formaldehyd-Harz)
N	Normalität
NHN	Kompetenznetz für nachhaltige Holznutzung
Nm	Nanometer
Nr.	Nummer
N/mm ²	Newton pro Quadratmillimeter
PF	PF-Harz (Phenol-Formaldehyd-Harz)
pH	Negativ dekadischer Logarithmus der Protonenkonzentration
PZF	Presszeitfaktor
REM	Rasterelektronenmikroskop
RF	Versuchsreihen aus rotfauler Fichte
s	Sekunde
s/mm	Sekunde pro Millimeter
sog.	sogenannt
Srm	Schüttraummeter
TMP	Thermomechanischer Holzaufschluss
u. a.	unter anderem
UF	UF-Harz (Harnstoff-Formaldehyd-Harz)
V	Volt
Vfm	Vorratsfestmeter
Vfm/a	Vorratsfestmeter pro Jahr
vgl.	vergleiche
WKI	WILHELM KLAUDITZ INSTITUT FÜR HOLZFORSCHUNG
WQW	Weizenquellwasser oder Weizenprotein

9 Tabellenverzeichnis

<i>Tabelle 2-1: Taxonomie der Gemeinen Fichte (BUGALA, 2007)</i>	<i>8</i>
<i>Tabelle 2-2: Taxonomie von Heterobasidion annosum (Fr.) Bref. (ZYCHA ET AL., 1976)</i>	<i>12</i>
<i>Tabelle 3-1: Durchschnittlicher Rohstoffmix des industriell aufbereiteten Spangutes</i>	<i>41</i>
<i>Tabelle 3-2: Aufschlussbedingungen der rotfaulen Fichtenfasern</i>	<i>44</i>
<i>Tabelle 3-3: Herstellungsparameter für dreischichtige Spanplatten aus rotfaulem Fichten-spangut, gebunden mit UF-Harz (Versuchsreihen RF 1 bis RF 3) und PF-Harz (RF 4)</i>	<i>62</i>
<i>Tabelle 3-4: Herstellungsparameter der Referenzplatten der Serien IN 1 und IN 2 ..</i>	<i>63</i>
<i>Tabelle 3-5: Herstellungsparameter von maschinengestreuten Spanplatten aus rotfauler Fichte</i>	<i>66</i>
<i>Tabelle 3-6: Herstellungsparameter von maschinengestreuten Referenzspanplatten</i>	<i>67</i>
<i>Tabelle 3-7: Herstellungsparameter der MDF-Platten aus rotfaulen Fichtenfasern der Versuchsreihe RF 101 bis RF 103</i>	<i>70</i>
<i>Tabelle 3-8: Herstellungsparameter von MDF aus rotfauler Fichte der Serien RF 104 bis 107, unter Verwendung von verschiedenen Bindemitteln</i>	<i>71</i>
<i>Tabelle 3-9: Herstellungsparameter von MDF-Platten aus STEICO – Fasern</i>	<i>72</i>
<i>Tabelle 3-10: Mindestanzahl von Prüfkörpern, die aus jeder Platte für verschiedene Prüfverfahren notwendig sind</i>	<i>73</i>
<i>Tabelle 3-11: Anforderungen an Spanplatten mit einer Dicke von 13 bis 20 mm nach DIN EN 312 (2003)</i>	<i>81</i>
<i>Tabelle 3-12: Anforderungen an Platten für allgemeine Zwecke zur Verwendung im Trockenbereich, Typ MDF (DIN EN 622-5; 2006)</i>	<i>82</i>
<i>Tabelle 4-1: Schüttgewichte der verwendeten Span- und Fasermaterialien</i>	<i>97</i>
<i>Tabelle 4-2: Ermittelte pH-Werte der verwendeten Rohstoffe</i>	<i>98</i>
<i>Tabelle 4-3 Eigenschaften von dreischichtigen, 19 mm dicken Spanplatten aus rotfaulem Fichtenspangut (Serie RF 1) in Abhängigkeit von der Presszeit</i>	<i>99</i>
<i>Tabelle 4-4: Eigenschaften der dreischichtigen, 19 mm dicken Spanplatten aus rotfaulem Fichtenspangut (Serie RF 2) in Abhängigkeit von der Presszeit</i>	<i>100</i>
<i>Tabelle 4-5: Mechanisch-technologische Eigenschaften von Laborspanplatten der Versuchsreihen RF 3 und RF 4 in Abhängigkeit vom Bindemitteltyp</i>	<i>101</i>
<i>Tabelle 4-6: Eigenschaften der dreischichtigen, 19 mm dicken Spanplatten aus Referenzspangut (IN 1) in Abhängigkeit von der Presszeit</i>	<i>102</i>
<i>Tabelle 4-7: Eigenschaften der dreischichtigen, 19 mm dicken Spanplatten aus Referenzspangut der Versuchsreihe IN 02 in Abhängigkeit von der Presszeit</i>	<i>103</i>
<i>Tabelle 4-8: Eigenschaften von dreischichtigen, maschinengestreuten, UF-Harz gebundenen Spanplatten aus rotfauler Fichte (RF 11) und Industriespan (IN 11)</i>	<i>115</i>
<i>Tabelle 4-9: Eigenschaften von dreischichtigen, maschinengestreuten, MUF-Harz gebundenen Spanplatten aus rotfaulem Fichtenspangut (RF 12) und aus Referenzmaterial (IN 12)</i>	<i>119</i>
<i>Tabelle 4-10: Eigenschaften von dreischichtigen, maschinengestreuten, UF-Harz/Weizenquellwasser gebundenen Spanplatten aus rotfaulen Fichtenholz (RF 13) und aus Industriespangut (IN 13)</i>	<i>122</i>
<i>Tabelle 4-11: Mechanisch-technologische Eigenschaften von UF-Harz gebundenen, 10 mm dicken mitteldichten Faserplatten aus rotfaulen Fichtenfasern ...</i>	<i>124</i>

<i>Tabelle 4-12: Mechanisch-technologische Eigenschaften von UF-Harz gebundenen, 10 mm dicken mitteldichten Faserplatten aus Kiefernfasern</i>	<i>126</i>
<i>Tabelle 4-13: Mechanisch-technologische Eigenschaften von UF-Harz gebundenen, 16 mm dicken MDF aus rotfaulen Fichtenfasern mit 14 % UF-Harz (Festharz/atro Faser) in Abhängigkeit von der Presszeit.....</i>	<i>130</i>
<i>Tabelle 4-14: Mechanisch-technologische Eigenschaften von UF-Harz gebundenen, 16 mm dicken MDF aus rotfaulen Fichtenfasern mit 12 % UF-Harz (Festharz/atro Faser) in Abhängigkeit von der Presszeit.....</i>	<i>131</i>
<i>Tabelle 4-15: Mechanisch-technologische Eigenschaften von UF-Harz (10 % Feststoff/atro Faser) gebundenen, 16 mm dicken MDF aus rotfaulen Fichtenfasern in Abhängigkeit von der Presszeit.....</i>	<i>132</i>
<i>Tabelle 4-16: Mechanisch-technologische Eigenschaften von MDF aus rotfaulen Fichtenfasern mit 10 % & 12 % MUF-Harz (Festharz/atro Faser); PZF 18 s/mm.....</i>	<i>137</i>
<i>Tabelle 4-17: Eigenschaften von 16 mm dicken MDF aus rotfaulen Fichtenfasern gebunden mit 10 % und 12 % PF-Harz (atro auf atro Faser); Presszeit 18 s/mm.....</i>	<i>139</i>
<i>Tabelle 4-18: Ergebnisse der Ausprüfung von 10 mm dicken MDF aus rotfaulen Fichtenfasern, gebunden mit 10 % und 12 % Mischkondensat (atro auf atro Faser); Presszeit 18 s/mm.....</i>	<i>141</i>
<i>Tabelle 4-19: Kostenvergleich der Aufarbeitung von 1 m³ rotfaulem Fichtenholz mit und ohne Schnittholzgewinnung.....</i>	<i>146</i>

10 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 - 1: Holzeinschlag in Deutschland von 1997 bis 2007 nach Waldbesitzarten (ZMP, 2008).....	1
Abbildung 1-2: Holzwerkstoffproduktion in Deutschland 2007 in Mio. m ³ (VHI, 2008).	3
Abbildung 1-3: Rohstoffzusammensetzung in der deutschen Holzwerkstoffindustrie (SÖRGEL & MANTAU, 2006).....	4
Abbildung 1-4: Kapazitätsentwicklung und Planungen der deutschen Holzwerkstoffbranche (SÖRGEL & MANTAU, 2006)	5
Abbildung 1-5: Schätzung der Verwendung von Spanplatten nach Bereichen (Rüter & Kreißig, 2007).....	6
Abbildung 2-1: Natürliches Verbreitungsgebiet von <i>Picea abies</i> (L.) in Europa (SCHMIDT-VOIGT, 1977)	10
Abbildung 2-2: <i>Heterobasidion annosum</i> (Wurzelschwamm), Infektions- und Ausbreitungs-Möglichkeiten im Bestand (nach HEYDECK, 2003)	12
Abbildung 2-3: Blockdiagramm des Holzes von Nadelhölzern (nach RAVEN ET AL., 1988)	18
Abbildung 2-4: Struktur der Cellulose (ELIAS, 1981)	21
Abbildung 2-5: Hemicellulosemolekül (ZEPPENFELD, 1991).....	22
Abbildung 2-6: Strukturmodell eines Nadelholzligninmakromoleküls (FREUDENBERG, 1968)	23
Abbildung 2-7: Die Ultrastruktur der verholzten Zellwand (verändert nach RAVEN ET AL., 1988, FENGEL & WEGENER, 1989).....	24
Abbildung 2-8: Fertigungsablauf für Spanplatten nach dem kontinuierlichen Flachpressverfahren.....	30
Abbildung 2-9: Schema der Herstellung von Holzfasерplatten (LAMPERT, 1966)	36
Abbildung 3-1: Schematischer Schnittplan für die Probenentnahme bei Holzwerkstoffen nach DIN EN 326-1(1993).....	74
Abbildung 4-1: Ligningehalte von Fichtenholzproben und STEICO-Faserstoff.....	84
Abbildung 4-2: Hemicellulosegehalte von Fichtenholzproben und STEICO-Fasern..	85
Abbildung 4-3: Aschegehalt von Fichtenholzproben	86
Abbildung 4-4: Extraktstoffgehalte nach Kaltwasserextraktion von Fichtenholz	88
Abbildung 4-5: pH-Wertbestimmung bei Kaltwasserextraktion.....	89
Abbildung 4-6: Pufferkapazität bei Kaltwasserextraktion.....	89
Abbildung 4-7: Extraktstoffgehalt von Fichtenhölzern durch Heißwasserextraktion ..	90
Abbildung 4-8: pH-Werte von Heißwasserextrakten von Fichtenholzproben.....	91
Abbildung 4-9: Pufferkapazität von Auszügen der Heißwasserextraktion von Fichtenholzproben	92
Abbildung 4-10: Extraktstoffbestimmung nach der Ethanol-Cyclohexan-Methode	93
Abbildung 4-11: Stickstoffgehalt von Fichtenholzproben nach Kjeldahl	94
Abbildung 4-12: Zusammensetzung von Deckschicht und Mittelschicht des rotfaulen Spanmaterials.....	95
Abbildung 4-13: Siebanalyse von industriell aufbereiteten Deckschicht- und Mittelschichtspänen	96
Abbildung 4-14: Querzug- und Abhebefestigkeiten der Versuchsreihe aus rotfaulem Material, gebunden mit UF-Harz (RF 1) und der Versuchsreihe aus Referenzspäne, gebunden mit UF-Harz (IN 1); Presszeitfaktor: 15 s/mm	105
Abbildung 4-15: Querzug- und Abhebefestigkeiten der Versuchsreihe aus rotfaulem Material (RF 2) und der Versuchsreihe aus einem Industriespanmix (IN 2); Presszeitfaktor: 15 s/mm	106

Abbildung 4-16: Abhängigkeit der Querkzugfestigkeit von der Rohdichte der Versuchsreihen aus rotfaulem Spangut RF 1 und RF 2	108
Abbildung 4-17: Abhängigkeit der Querkzugfestigkeit von der Rohdichte der Versuchsreihen aus Referenzspangut IN 1 und IN 2.....	108
Abbildung 4-18: Querkzug- und Abhebefestigkeit in Abhängigkeit von der Rohdichte von UF-Harz gebundenen Spanplatten der Versuchsreihe RF 3.....	109
Abbildung 4-19: Biegefestigkeit und E-Modul in Abhängigkeit von der Rohdichte von UF-Harz gebundenen Spanplatten der Serie RF 3.....	110
Abbildung 4-20: Vergleich der Quelleigenschaften nach Wasserlagerung von UF-Harz gebundenen Laborspanplatten der Serie RF 3 und PF-Harz gebundenen Platten auf rotfaulem Fichtenholz (RF 4).....	111
Abbildung 4-21: Quellwerte von UF-Harz gebundenen (jeweils ohne Hydrophobierungsmittel) Versuchsreihen aus rotfaulem Fichtenspangut (RF 1) und aus Referenzspangut (IN 1)	112
Abbildung 4-22: Quellwerte von UF-Harz gebundenen (jeweils mit Hydrophobierungsmittel) von Versuchsreihen aus rotfaulem Fichtenspangut (RF 2) und aus Referenzspangut (IN 2).....	113
Abbildung 4-23: Quellwerte der Versuchsserien aus rotfaulen Fichtenspänen, gebunden mit UF-Harz (RF 3) und gebunden mit PF-Harz (RF 4).....	114
Abbildung 4-24: Vergleich der Querkzugfestigkeit von dreischichtigen Laborspanplatten der Versuchsreihe RF 2 und maschinell gestreuten Pilotspanplatten der Versuchsreihen RF 11 und IN 11.....	116
Abbildung 4-25: Vergleich der Abhebefestigkeit von dreischichtigen Laborspanplatten der Versuchsreihe RF 2 und maschinell gestreuten Platten der Versuchsreihen RF 11 und IN 11	117
Abbildung 4-26: Vergleich der Dickenquellung nach 24 Stunden Wasserlagerung von dreischichtigen Laborspanplatten der Versuchsreihen RF 2 maschinell gestreuten Platten der Versuchsreihen RF 11 und IN 11	118
Abbildung 4-27: Vergleich der Dickenquellung nach 24 h Wasserlagerung von MUF-Harz gebundenen Spanplatten der Serien RF 12; IN 12 und UF-Harz gebundenen Platten der Serie RF 11; IN 11.....	120
Abbildung 4-28: Vergleich der Querkzugfestigkeitswerte von MUF-Harz gebundenen Spanplatten der Serien RF 12; IN 12 und von UF-Harz gebundenen Platten der Serien RF 11; IN 11.....	120
Abbildung 4-29: Vergleich von Querkzugfestigkeiten in Abhängigkeit von der Rohdichte von UF-Harz/Weizenprotein gebundenen Spanplatten, aus rotfaulem Fichtenholz (RF 13), aus Industriespänen (IN 13) und einer mit reinem UF-Harz gebundenen Referenz (IN 11).....	122
Abbildung 4-30: Formaldehydemissionen nach der Perforatormethode in Abhängigkeit von der Rohdichte von UF-Harz gebundenen Spanplatten aus rotfaulem Fichtenholz (RF 11), aus Industriespänen (IN 11) und von UF-Harz/Weizenquellwasser-Mischkondensat gebundenen Platten aus rotfaulem Fichtenholz (RF 13) und aus Industriespänen (IN 13).....	123
Abbildung 4-31: Querkzugfestigkeiten in Abhängigkeit von der Rohdichte von UF-Harz gebundenen MDF aus rotfaulen Fichtenfasern (RF 101) und aus Kiefernfasern (IN 101)	126
Abbildung 4-32: Abhängigkeit von Querkzugfestigkeit und Rohdichte von UF-Harz gebundenen MDF aus rotfaulen Fichtenfasern (RF 101) Kiefernfasern, (IN 101)	127

Abbildung 4-33: Quellwerte nach 24h von MDF der Versuchsreihe aus rotfaulen Fichtenfasern, gebunden mit UF-Harz (RF 101) und der Versuchsreihe aus Referenzfasern, gebunden mit UF-Harz (IN 101)..... 128

Abbildung 4-34: Biegefestigkeitseigenschaften unter Variation von Presszeit und Rohdichte von MDF aus rotfauler (RF 104) Fichte mit einem BG von 12% 133

Abbildung 4-35: Querkzugfestigkeit in Abhängigkeit von Presszeit und Rohdichte von MDF (RF 104) aus rotfauler Fichte mit einem BG von 12% 134

Abbildung 4-36: Dickenquellung nach 24 h Wasserlagerung in Abhängigkeit von Presszeitfaktor und Rohdichte von MDF (RF 104) aus rotfauler Fichte mit einem Beleimgrad von 10 %..... 135

Abbildung 4-37: Abhängigkeit der Querkzugfestigkeit Beleimgrad (BG) und Rohdichte bei 16 mm dicken MDF aus rotfauler Fichte (Presszeitfaktor: 24 s/mm) 136

Abbildung 4-38: Vergleich von MUF-Harz gebundenen MDF aus rotfaulen Fichtenfasern mit Beleimgraden von 10 % und 12 % (Feststoff/atro Faser) in Abhängigkeit von der Rohdichte..... 138

Abbildung 4-39: Abhängigkeit der Querkzugfestigkeit von PF-Harz gebundenen MDF aus rotfaulen Fichtenfasern mit Beleimungsgraden von 10 % und 12 % (atro Faser)..... 140

Abbildung 4-40: Vergleich der Querkzugfestigkeitswerte von MDF aus rotfaulem Fichtenholz verleimt mit einem Mischkondensat aus UF-Harz und Weizenquellwasser und MDF aus rotfaulen Fichtenfasern verleimt mit UF-Harz als Referenz..... 142

11 Bildverzeichnis

<i>Bild 2-1: Fruchtkörper von Heterobasidion annosum (HARTMANN ET AL., 1995).....</i>	<i>13</i>
<i>Bild 2-2: Typische Verfärbungen bei rotfaulen Fichtenstämmen (Foto: BOHN, 2004)</i>	<i>15</i>
<i>Bild 3-1: Fichtenholzabschnitte mit weit fortgeschrittener Holzzersetzung durch Heterobasidion annosum (Foto: BOHN, 2004).....</i>	<i>40</i>
<i>Bild 3-2: Fichtenabschnitte mit leichtem Befall durch Rotfäule (Foto: BOHN, 2004)...</i>	<i>41</i>
<i>Bild 3-3: Deckschichtspäne (links) und Mittelschichtspäne (rechts) aus dem Spanplattenwerk Gütersloh (Foto: BOHN, 2004)</i>	<i>42</i>
<i>Bild 3-4: Siebanalyse: Spanmaterial aus rotfauler Fichte; ungesiebt (o. li.), nach Siebanalyse in den Fraktionen: o. re. < 0,6 mm; Mitte li. < 1,25 mm; Mitte re. < 3,15 mm; u. li. < 5,0 mm; u. re. > 5,0 mm (Foto: BOHN, 2004).....</i>	<i>43</i>
<i>Bild 3-5: Faserstoff aus rotfaulem Fichtenholz, nativ und aufgelockert (li.); Faserstoff der Firma STEICO (re.), nativ und aufgelockert (Foto: BOHN, 2004)</i>	<i>44</i>
<i>Bild 4-1: Pilzhyphe von Heterobasidion annosum, die durch einen Tüpfel gewachsen ist (li.). 3540-fache Vergrößerung; Rotfaules Fichtenholz, longitudinal (re.). 221-fache Vergrößerung</i>	<i>143</i>
<i>Bild 4-2: Holzfasern (li.) und Holzfaserbündel (re.) aus rotfaulem Fichtenholz, 503-fache Vergrößerung.....</i>	<i>144</i>
<i>Bild 4-3: einzelne Holzfaser (li.) und Faserbündel (re.) aus rotfaulem Fichtenholz, 1010-fache Vergrößerung</i>	<i>144</i>
<i>Bild 4-4: Spangut aus rotfauler Fichte, 503-fache Vergrößerung</i>	<i>145</i>
<i>Bild 4-5: Spangut aus rotfaulem Fichtenholz, 1010-fache Vergrößerung.....</i>	<i>145</i>

12 Anhang

12.1 Parameter für die Herstellung von Laborspanplatten

12.1.1 Theoretische Plattenmaße

Das Volumen der dreischichtigen Spanplatten berechnet sich aus folgenden Angaben:

- Länge (mm)
- Breite (mm)
- Stärke (mm)

$$\text{Volumen (cm}^3\text{)} = \frac{\text{Länge (mm)} \times \text{Breite (mm)} \times \text{Stärke (mm)}}{1000}$$

12.1.2 Unbeleimte Feuchte

Zur Bestimmung der unbeleimten Spanfeuchte werden mindestens fünf Proben der unbeleimten Späne entnommen und mit Hilfe des Feuchtemessgerätes die Spanfeuchte bestimmt. Aus den Ergebnissen ermittelt man anschließend den Mittelwert.

$$\text{Durchschnittliche unbeleimte Spanfeuchte (\%)} = \frac{\text{Probe}_1 (\%) + \dots + \text{Probe}_n (\%)}{\text{Anzahl der Proben}_{(n+1)}}$$

12.1.3 Berechnung der Bindemittelzusammensetzung

Zur Berechnung der Bindemittelzusammensetzung wird das Trockengewicht der Späne und die prozentualen Mengen des Bindemittels und der Zuschlagstoffe benötigt.

$$\text{Leim atro (g)} = \frac{\text{Spanmenge atro (g)} \times \text{Beleimung auf atro Span (\%)}}{100(\%)}$$

$$\text{Hydro atro (g)} = \frac{\text{Spanmenge atro (g)} \times \text{Hydro.menge auf atro Span (\%)}}{100(\%)}$$

$$\text{Härter atro (g)} = \frac{\text{Leimmenge atro (kg)} \times \text{Härterzugabe auf atro Leim (\%)}}{100(\%)}$$

Da der Leim, das Hydrophobierungsmittel und der Härter aus Wasser und Feststoffen bestehen, muss weiterhin der entsprechende lutro Wert (g) errechnet werden.

$$\text{Leim lutro (g)} = \frac{\text{Leim atro (g)} \times 100(\%)}{\text{Feststoffgehalt des Leims (\%)}}$$

$$\text{Hydro lutro (g)} = \frac{\text{Hydro atro (g)} \times 100(\%)}{\text{Feststoffgehalt des Hydro (\%)}}$$

$$\text{Härter lutro (g)} = \frac{\text{Härter atro (g)} \times 100(\%)}{\text{Feststoffgehalt des Härters (\%)}}$$

Da das Spangut nach der Beleimung eine bestimmte Feuchte aufweisen muss, wird anschließend die nötige Wassermenge berechnet, um die Späne auf die entsprechende Feuchte zu bringen. Dazu wird zuerst der Feststoffanteil von Späne, Leim und Zuschlagstoffen berechnet.

$$\text{Feststoffanteil(g)} = \text{Span atro(g)} + \text{Leim atro(g)} + \text{Hydro atro(g)} + \text{Härter atro(g)}$$

Aus dem Feststoffanteil (g) lässt sich der notwendige Wasseranteil (g) berechnen, da die notwendige prozentuale Feuchte gegeben ist.

$$\text{Wasseranteil soll(g)} = \frac{\text{Feststoffanteil(g)} \times \text{Feuchte(\%)}}{100\%}$$

Da bekannt ist wie viel Wasser in der Späne, im Leim, im Hydrophobierungsmittel und im Härter enthalten ist, lässt sich die Wassermenge berechnen, die der Leimflotte zugegeben werden muss, um die gewünschte beleimte Spanfeuchte zu erhalten.

$$\text{Wasserzugabe(g)} = \text{Wasseranteil soll(g)} + \sum \text{Werte lutro} - \sum \text{Werte atro}$$

12.1.4 Beleimte Feuchte

Zur Bestimmung der beleimten Faserfeuchte werden mindestens fünf Proben des beleimten Spanmaterials entnommen und mit Hilfe des Feuchtemessgerätes die Spanfeuchte bestimmt. Aus den Ergebnissen ermittelt man anschließend den Mittelwert.

$$\text{Durchschnittliche beleimte Spanfeuchte (\%)} = \frac{\text{Probe}_1 (\%) + \dots + \text{Probe}_n (\%)}{\text{Anzahl der Proben}_{(n+1)}}$$

12.1.5 Spaneinwaage und Ausgleichsfeuchte

Spaneinwaage atro (g):

$$\text{Spaneinwaage atro (g)} = \text{theoretisches Plattenvolumen (cm}^3\text{)} \times \text{Rohdichte (g/cm}^3\text{)}$$

Bei der Herstellung von dreischichtigen Spanplatten muss die Spaneinwaage atro (g) in Deckschicht (DS) und Mittelschicht (MS) aufgeteilt werden.

$$\text{Spaneinwaage DS atro(g)} = \frac{\text{Spaneinwaage atro (g)} \times \text{Anteil DS(\%)}}{100(\%)}$$

$$\text{Spaneinwaage MS atro(g)} = \frac{\text{Spaneinwaage atro (g)} \times \text{Anteil MS(\%)}}{100(\%)}$$

Spaneinwaage (2) unter Berücksichtigung der Ausgleichsfeuchte (g):

$$\text{Spaneinwaage 2(g)} = \text{Spaneinwaage atro (g)} - \frac{\text{Spaneinwaage atro (g)} \times \text{Ausgleichsfeuchte (\%)}}{100(\%)}$$

Spaneinwaage lutro (g):

$$\text{Spaneinwaage lutro (g)} = \text{Spaneinwaage 2 (g)} + \frac{\text{Spaneinwaage 2 (g)} \times \text{Spanfeuchte (\%)}}{100(\%)}$$

Die Berechnungen der Spaneinwaage 2 (g) und der Spaneinwaage lutro (g) erfolgt jeweils getrennt nach Deck- und Mittelschicht.

12.2 Berechnungen für die Herstellung von Spanplatten im Pilotmaßstab

Abweichend von den Berechnungen zur Laborspanplattenherstellung dienen die folgenden Berechnungen als Grundlage zur Produktion von dreischichtigen spanplatten im Pilotmaßstab.

12.2.1 Beleimungszeit / Pumpgeschwindigkeit

Für die Berechnung der Beleimungszeit und der Pumpgeschwindigkeit wird ein vorgegebener Spandurchsatz benötigt. In 60 Minuten beträgt der Durchsatz an Deckschichtspänen 315 kg lutro.

$$\text{Benötigte Zeit}_{DS} (\text{min}) = \frac{60 (\text{min}) \times DS - \text{Spanmenge lutro (kg)}}{315 (\text{kg}) \text{ lutro}}$$

Bei Mittelschichtspänen beträgt der Durchsatz 385 kg (lutro) in 60 Minuten.

$$\text{Benötigte Zeit}_{MS} (\text{min}) = \frac{60 (\text{min}) \times MS - \text{Spanmenge lutro (kg)}}{385 (\text{kg}) \text{ lutro}}$$

Daraus lassen sich die Pumpgeschwindigkeiten errechnen:

$$\text{Pumpgeschwindigkeit Leim} \left(\frac{\text{kg}}{\text{min}} \right) = \frac{\text{Leim lutro (kg)} \times 1 (\text{min})}{\text{Benötigte Zeit (min)}}$$

12.2.2 Formbandgeschwindigkeit / Spankuchengewicht

Für die Einhaltung einer bestimmten Zielrohddichte sind die Spanmengen zu ermitteln, die bei einer bestimmten Bandgeschwindigkeit auf das Formband fallen. Zur Ermittlung des maschinell gestreuten Spankuchengewichtes bei variabler Bandgeschwindigkeit wurden empirische Versuche durchgeführt.

Bandgeschwindigkeit [%]	Streumenge DS [g]	Streumenge MS [g]
100	540	-
90	590	-
80	666	-
70	750	-
60	800	1021
55	-	1123
50	-	1263
45	-	1417
40	-	1605
35	-	1811
30	-	2035

Aus diesen ermittelten Werten wurden die Regressionsgeraden ermittelt.

$$\text{Bandgeschwindigkeit DS (\%)} = \frac{-10 \times (\text{Einwaage DS (g)} - 465,2)}{68} + 110$$

$$\text{Bandgeschwindigkeit MS (\%)} = \frac{-5 \times (\text{Einwaage MS (g)} - 787,9)}{169,98} + 65$$

Die Spaneinwaagen wurden nach den Berechnungen in Kap. 12.1.5 ermittelt. Unter Verwendung der dieser Formeln kann die Bandgeschwindigkeit ermittelt werden, die zur Erzielung einer bestimmten Rohdichte am Formband anliegen muss.

12.3 Berechnungen für die Herstellung von mitteldichten

Faserplatten

12.3.1 Theoretische Plattenmaße

Das Volumen der mitteldichten Faserplatten berechnet sich aus folgenden Angaben:

- Länge (mm)
- Breite (mm)
- Stärke (mm)

$$Voumen (cm^3) = \frac{L\ddot{a}nge (mm) \times Breite (mm) \times St\ddot{a}rke (mm)}{1000}$$

12.3.2 Unbeleimte Feuchte

Zur Bestimmung der unbeleimten Faserfeuchte werden mindestens f\xfcnf Proben der unbeleimten Fasern entnommen und mit Hilfe des Feuchtemessger\ddot{a}tes die Faserfeuchte bestimmt. Aus den Ergebnissen ermittelt man anschlie\xdfend den Mittelwert.

$$Durchschnittliche\ unbeleimte\ Faserfeuchte\ (\%) = \frac{Probe_1\ (\%) + \dots + Probe_n\ (\%)}{Anzahl\ der\ Proben_{(n+1)}}$$

12.3.3 Fasermenge lutro / atro

Die Berechnung der absolut trockenen Fasermenge aus der lufttrockenen Fasermenge ist zur Bestimmung der ben\ototigten Leimmenge notwendig. Sie berechnet sich aus folgenden Angaben:

- Fasermenge lutro (kg)
- Durchschnittliche, unbeleimte Faserfeuchte (%)

$$Fasermenge\ atro\ (kg) = \frac{Fasermenge\ lutro\ (kg) \times durchschnittliche\ unbeleimte\ Faserfeuchte\ (\%)}{100(\%)}$$

Das in der Fasermenge lutro (kg) enthaltene Wasser (kg) ist:

$$Enthaltenes\ Wasser\ (kg) = Fasermenge\ lutro\ (kg) - Fasermenge\ atro_{(kg)}$$

12.3.4 Ben\ototigte Leimmenge atro / lutro

Die f\xfc die eingewogene Fasermenge atro (kg) ben\ototigte Leimmenge (kg) berechnet sich nach folgender Formel:

$$Leim\ atro\ (kg) = \frac{Fasermenge\ atro\ (kg) \times Beleimung\ auf\ atro\ Faser\ (\%)}{100(\%)}$$

Da der Leim aus Wasser und Feststoffen besteht, muss weiterhin der Leim lutro Wert (kg) errechnet werden.

$$\text{Leim lutro (kg)} = \frac{\text{Leim atro (kg)} \times 100(\%)}{\text{Feststoffgehalt des Leims (\%)}}$$

Das im Leim enthaltene Wasser (kg) berechnet sich aus:

$$\text{Im Leim enthaltenes Wasser (kg)} = \text{Leim lutro (kg)} - \text{Leim atro (kg)}$$

12.3.5 Beleimungszeit / Pumpgeschwindigkeit

Für die Berechnung der Beleimungszeit und der Pumpgeschwindigkeit wird ein vorgegebener Faserdurchsatz benötigt. In 45 Minuten beträgt der Faserdurchsatz 60 kg lutro.

$$\text{Benötigte Zeit (min)} = \frac{45 \text{ (min)} \times \text{Fasermenge lutro (kg)}}{60 \text{ (kg) lutro}}$$

Daraus lässt sich die Pumpgeschwindigkeit errechnen:

$$\text{Pumpgeschwindigkeit Leim} \left(\frac{\text{kg}}{\text{min}} \right) = \frac{\text{Leim lutro (kg)} \times 1 \text{ (min)}}{\text{Benötigte Zeit (min)}}$$

12.3.6 Theoretische Feuchte

Die theoretische Feuchte des beleimten Fasermaterials berechnet sich wie folgt:

$$\text{Theor. Feuchte (\%)} = \frac{100(\%) \times \left(\sum H_2O \text{ im Leim (kg)} + H_2O \text{ in Fasern (kg)} \right)}{\sum \text{Fasermenge lutro (kg)} + \text{Leimmenge lutro (kg)}}$$

12.3.7 Fasereinwaage und Ausgleichsfeuchte

Fasereinwaage atro (g):

$$\text{Fasereinwaage atro (g)} = \text{theoretisches Plattenvolumen (cm}^3\text{)} \times \text{Rohdichte (g/cm}^3\text{)}$$

Fasereinwaage lutro (g):

$$Fasereinwaage\ lutro\ (g) = Fasereinwaage\ atro\ (g) + \frac{Fasereinwaage\ atro\ (g) \times Faserfeuchte\ (\%)}{100(\%)}$$

Fasereinwaage unter Berücksichtigung der Ausgleichsfeuchte (g):

$$Fasereinwaage\ 3(g) = Fasereinwaage\ lutro\ (g) - \frac{Fasereinwaage\ lutro\ (g) \times Ausgleichsfeuchte\ (\%)}{100(\%)}$$

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Dissertation selbständig verfasst habe und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe. Die Dissertation wurde in keinem anderen Prüfungsverfahren vorgelegt.

(Christian Bohn)

Curriculum vitae

Persönliche Daten

Name: Bohn
Vornahme: Christian
Geburtsdaten: 21.02.1977 in Stendal/Altmark
Familienstand: ledig
Staatsangehörigkeit: deutsch

Schulische Ausbildung/Studium

1984 - 1990 Werner-Selenbinder-Oberschule Bismark/Altmark
1990 - 1995 Johann-Friedrich-Danneil-Gymnasium Kalbe/Milde
Abschluss: Abitur
1999 - 2004 Hochschulstudium an der Fakultät für Forstwissenschaften und Waldökologie der Georg-August-Universität Göttingen
Abschlüsse: Bachelor of Science
Master of Science & Diplom-Forstwirt
2004 - 2009 Promotion an der Fakultät für Forstwissenschaften und Waldökologie der Georg-August-Universität Göttingen

Wehrdienst

1995 - 1999 Soldat auf Zeit Panzerbrigade 18 Holstein/Neumünster
Multinationale Division SO Mostar/Bosnien

Berufliche Erfahrungen

09/2000 – 01/2001 Praktikum: Forstgut Breuberg; Neustadt/Odenwald
08/2003 – 11/2003 Praktikum: Schüttler Forst-Consult; Göttingen
02/2004 – 04/2004 Praktikum: Gutsverwaltung Hohenstein; Friedland/MV
10/2004 – 09/2007 Wissenschaftlicher Mitarbeiter; Universität Göttingen
Seit 10/2007 Projektmanager; Pfeleiderer Industrie GmbH; Neumarkt/OPf.
