

**Einfluss der Faserstoff-Aufschlussbedingungen und
des Bindemittels auf die Eigenschaften von
mitteldichten Faserplatten (MDF) für eine Verwendung im
Feucht- und Außenbereich**

Dissertation

Zur Erlangung der Würde des Doktors der Naturwissenschaften
des Department Biologie,
der Fakultät für Mathematik, Informatik und Naturwissenschaften,
der Universität Hamburg

vorgelegt von
Detlef Krug
aus Dresden

Dresden, 28. Mai 2010

Genehmigt vom Department Biologie
der Fakultät für Mathematik, Informatik und Naturwissenschaften
an der Universität Hamburg
auf Antrag von Herr Professor Dr. A. FRÜHWALD
Weiterer Gutachter der Dissertation:
Professor Dr. E. ROFFAEL
Tag der Disputation: 06. Juli 2010

Hamburg, den 22. Juni 2010



Axel Temming

Professor Dr. Axel Temming
Leiter des Departments Biologie

1. Dissertationsgutachter: Prof. Dr. Arno Frühwald
Universität Hamburg
Zentrum Holzwirtschaft, HTB
Leuschnerstrasse 91, 21031 Hamburg

2. Dissertationsgutachter: Prof. Dr. Edmone Roffael
Universität Göttingen
Institut für Holzbiologie & Holztechnologie
Büsgenweg 5, 27077 Göttingen

1. Disputationsgutachter: Prof. Dr. Jörg Ressel
Universität Hamburg
Zentrum Holzwirtschaft, HTB
Leuschnerstrasse 91, 21031 Hamburg

2. Disputationsgutachter: Prof. Dr. Marius Barbu
Universität Hamburg
Zentrum Holzwirtschaft, HTB
Leuschnerstrasse 91, 21031 Hamburg

Die Disputation erfolgte am 06. Juli 2010 in Hamburg.

Vorwort

Courage ist gut, aber Ausdauer ist besser.
Ausdauer, das ist die Hauptsache.

(Theodor Fontane, 1819 – 1898)

Mein Dank gebührt all denen, die mich zu dieser Arbeit ermutigt und zum Gelingen ausdrücklich beigetragen haben.

Zuerst natürlich meiner Familie. Sowohl meine Frau Ina als auch meine Kinder Emilia, Matteo und Isabel prägten bewusst wie unbewusst entscheidend meine Motivation und trugen durch ihre Unterstützung und positive Einstellung zum Entstehen der folgenden Seiten maßgeblich bei.

Ganz herzlich bedanken möchte ich mich bei Beate Stephani. Vielen Dank für deine aufbauende und fröhliche Art, deinen nicht enden wollenden Ansporn, deine große Hilfsbereitschaft.

Ein besonderer Dank an meinem langjährigen Mentor Eberhard Kehr, ohne den ich sicherlich nicht „auf die Faserplatte gekommen“ wäre und der mich in hohem Maße Beharrlichkeit, Gründlichkeit und Zielstrebigkeit gelehrt hat.

Meinem Freund Steffen Tobisch danke ich für sein großes Vertrauen und die Bereitschaft zum Zuhören. Unsere Diskussionen gaben fortgesetzt Anstöße, deine Ermutigungen waren ein immer wäherender Ansporn, deine Erfolge stetes Ziel.

Ein großes Dankschön an Herrn Prof. Dr. Arno Frühwald als meinem engagierten Dissertationsbetreuer und –gutachter. Die verhältnismäßig wenigen Stunden gemeinsamer Diskussionen waren durch die beeindruckende Auffassungsgabe des Herrn Frühwald überaus intensiv, lehrreich und persönlich, gaben Denkanstöße, eröffneten neue Sichtweisen und ermutigten.

Bei Herrn Prof. Dr. Edmone Roffael bedanke ich mich für seine fachlichen Hinweise als Gutachter zur Dissertation. Ganz herzlich bedanke ich mich aber auch für eine mehr als 15-jährige Zusammenarbeit im Rahmen zahlreicher gemeinsamer Forschungsprojekte, in denen wir uns wiederholt und nicht nur fallweise sehr intensiv fachlich wie privat austauschten.

Allen Kollegen des Institutes für Holztechnologie Dresden und ganz speziell meinen Mitstreitern im Ressort Werkstoffe danke ich für die immerwährende Unterstützung und Hilfsbereitschaft.

Meinen Eltern.

Detlef Krug
Mai 2010

INHALTSVERZEICHNIS

1	<u>EINLEITUNG UND ZIELSETZUNG</u>	1
1.1	AUSGANGSSITUATION UND PROBLEMSTELLUNG	1
1.2	ZIELSTELLUNG DER ARBEIT	6
2	<u>STAND DER WISSENSCHAFT UND TECHNIK</u>	8
2.1	GRUNDLAGEN	8
2.1.1	Anatomischer Aufbau des Holzes	8
2.1.2	Chemische Zusammensetzung des Holzes	10
2.1.3	Hygroskopisches Verhalten von Holz und Holzwerkstoffen	12
2.1.4	Verhalten von Holz bei thermischer Behandlung	13
2.1.5	Thermische Vergütung von Holz und Holzwerkstoffen	15
2.2	MDF-HERSTELLUNG	17
2.2.1	Definitionen	17
2.2.2	Entwicklung	18
2.2.3	Rohstoffe	20
2.2.4	Bindemittel und Additive	26
2.2.4.1	Allgemeines	26
2.2.4.2	Entwicklungen bei Formaldehyd	27
2.2.4.4	Klebstoffe für MDF	31
2.2.4.5	Zusatzstoffe für MDF	34
2.2.5	Aufschlussverfahren zur Faserstoffherzeugung	35
2.2.6	Technologie der MDF-Herstellung	44
2.3	FEUCHTE-, HYDROLYSE- UND WITTERUNGSBESTÄNDIGKEIT VON MDF	55
2.3.1	Feuchtebeständigkeit von MDF	55
2.3.2	Hydrolysebeständigkeit von MDF	57
2.3.3	Witterungsbeständigkeit von MDF	60
2.4	EINSATZGEBIETE VON MDF, NORMATIVE VORGABEN UND MDF-TYPEN	62
2.4.1	Einsatzgebiete	62
2.4.2	Normative Vorgaben und MDF-Typen	64
2.5	WIRTSCHAFTLICHE SITUATION UND PRODUKTIONSVOLUMEN	70
2.6	BISHERIGE FORSCHUNGSARBEITEN ZU AUFSCHLUSSINTENSIVIERUNG UND LEIMFREIEN FASERPLATTEN	73
2.7	PATENTE ZUM FASERSTOFFAUFSCHLUSS BEI DER MDF-HERSTELLUNG	78
3	<u>ARBEITSHYPOTHESEN UND LÖSUNGSWEG</u>	81
4	<u>EIGENE UNTERSUCHUNGEN - MATERIAL UND METHODE</u>	85
4.1	FASERSTOFF	85
4.2	BINDEMittel UND ZUSATZSTOFFE	87
4.3	INDUSTRIE-MDF	88
4.4	FASERSTOFF-CHARAKTERISIERUNG	89
4.4.1	Morphologische und anatomische Eigenschaften	89
4.4.2	Chemische Eigenschaften und wesentliche Holzbestandteile	92
4.4.3	Eigenschaften nass gebildeter Prüfblätter	94
4.4.4	Energiebedarf und Ausbeute bei Faserstoffherstellung	95

4.5	LABOR-MDF	96
4.5.1	Technologie der labortechnischen Plattenherstellung	96
4.5.2	Prüfung der Platteneigenschaften	97
4.5.3	Prüfung der Feuchtebeständigkeit der Verklebung	98
4.5.4	Prüfung der Witterungsbeständigkeit	98
4.6	INDUSTRIE-MDF	100
4.6.1	Technologie der industriellen Plattenherstellung	100
4.6.2	Prüfung der Platteneigenschaften	101
4.6.3	Prüfung der Feuchtebeständigkeit der Verklebung	101
4.6.4	Prüfung der Witterungsbeständigkeit	101
5	<u>EIGENE UNTERSUCHUNGEN - ERGEBNISSE</u>	102
5.1	CHARAKTERISIERUNG DER FASERSTOFFE	102
5.1.1	Morphologische und anatomische Eigenschaften	102
5.1.2	Chemische Eigenschaften und wesentliche Holzbestandteile	108
5.1.3	Eigenschaften nass gebildeter Prüfblätter	110
5.1.4	Energiebedarf und Ausbeute bei Faserstoffherstellung	113
5.2	CHARAKTERISIERUNG DER INDUSTRIE-MDF	121
5.2.1	Platteneigenschaften sowie Feuchtebeständigkeit	121
5.2.2	Witterungsbeständigkeit	123
5.3	CHARAKTERISIERUNG DER LABOR-MDF	127
5.3.1	Platteneigenschaften von bindemittelfreien MDF	127
5.3.2	Platteneigenschaften von bindemittelfreien HDF	131
5.3.3	Platteneigenschaften und Feuchtebeständigkeit von MDF	135
5.3.3.1	MDF mit UF-Harzbindung	135
5.3.3.2	MDF mit MUF-, PF-, MUPF-Harz- sowie PMDI-Bindung, konstanter Bindemittelanteil	140
5.3.3.3	MDF mit MUF-, PF-, MUPF-Harz- sowie PMDI-Bindung, variiertes Bindemittelanteil	151
5.3.4	Witterungsbeständigkeit von MDF mit Bindemittelzusatz	158
5.3.4.1	Auswertung im Vergleich zu Industrie-MDF	159
5.3.4.3	Korrelation zwischen Feuchtebeständigkeit der Verklebung und Witterungsbeständigkeit	174
5.3.4.5	Korrelation zwischen Freibewitterung und Kurzzeitbewitterung	183
6	<u>DISKUSSION</u>	187
7	<u>ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK</u>	196
8	<u>QUELLENVERZEICHNIS</u>	201
8.1	LITERATUR	201
8.2	NORMEN	218
8.3	PATENTE (CHRONOLOGISCH)	220
9	<u>ANHANG</u>	221

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1 Anwendungsbeispiele von MDF für nichttragende Zwecke im Außenbereich /Quelle: MDF-Magazin 1997, 1998, 1999/.....	2
Abbildung 2 Abhängigkeit des Energieverbrauchs beim Defibrieren von Nadel- und Laubholz von der Zerfaserungstemperatur /Asplund 1939/.....	4
Abbildung 3 Abhängigkeit des Gewichtsverlustes von Kiefernholzhackschnitzeln von der Erhitzungszeit und dem Dampfdruck bei der Zerfaserung /Asplund 1949/.....	4
Abbildung 4 Mikroskopischer Aufbau des Holzes (links Nadelholz, rechts Laubholz) /Stähli 1992/.....	9
Abbildung 5 Zellwandmodell einer Nadelholztracheide, schematisch nach Liese /Wagenführ 1999/.....	10
Abbildung 6 mittlere Verteilung der wichtigsten Holzbestandteile über den Zellwand-Querschnitt einer Nadelholztracheide /Sundholm 1999/.....	11
Abbildung 7 Teilansicht der MDF-Anlage im VEB Faserplattenwerk Ribnitz-Damgarten im Jahr 1973 – links hinten im Bild vier Düsenrohrtrockner mit nachgeschalteten Rotationsfiltern, rechts oben Produktionshauptgebäude mit Abscheidern für 4-Linienbetrieb (Deckschicht, Zwischenschicht, 2x Mittelschicht), ganz rechts Abscheider für Faservliesbildung, Foto IHD.....	18
Abbildung 8 Versuchsdefibrator (links) und Vliesbildungsanlage zur kontinuierlichen Faservliesbildung (rechts) im IHD /Kehr 2006/.....	19
Abbildung 9 Mittlere Faserlänge (mm) im untersuchten Kiefern- und Buchenholz vom Kambium (Nr.1) zur Markröhre (Nr. 18 (Buche) bzw. Nr. 19 (Kiefer)). Die Einzelwerte sind jeweils Mittelwerte aus jeweils 30 Einzelmessungen /Roffael et al. 2003/.....	24
Abbildung 10 Klebstoffbedarf für Holzwerkstoffe in Europa im Jahre 2005 /Thole 2006/.....	31
Abbildung 11 Theoretischer Wirkmechanismus einer Verklebung von Holz mit PMDI und PF-Harz /Deppe, Ernst 1996/.....	33
Abbildung 12 links: Schematische Darstellung des Holzaufschlussprozesses nach dem Masonite-Verfahren, rechts: Schnitt durch das Zerfaserungsaggregat (Explosionsgefäß = Kanone) /Mason 1927; Voith 1943/.....	37
Abbildung 13 Schematische Darstellung des Holzaufschlussprozesses nach dem Defibratorverfahren /MDF Industry Update 2001/.....	38
Abbildung 14 Schematische Darstellung einer typischen MDF-Anlage /MDF Industry Update 2001/.....	44
Abbildung 15 Drainagerohr der Stopfschnecke (links), Verlängerung der Drainagestrecke (rechts) /Roll 2008/.....	45
Abbildung 16 Schemazeichnungen unterschiedlicher Beleimungsverfahren für die MDF-Herstellung /Buchholzer 1999/.....	46
Abbildung 17 Trockenbeleimung (EVOjet™), schematische Darstellung und „Resinator“ in der MDF-Produktion /Greten 2005; Metso Panelboard 2007/.....	47
Abbildung 18 „Dry Blowline“ sowie schematische Darstellung des Trockenverfahrens beim Holzfaserdämmplattenhersteller Gutex /Siempelkamp 2008/.....	48
Abbildung 19 Stromrohrtrockner Büttner (links), Zweistufen-Stromtrockner (rechts) Masisa, Concordia (Argentinien) /N.N. 1996; Tobisch 2007/.....	49
Abbildung 20 Faserstoffstreuung mittels Felter-System, Masisa, Concordia (Argentinien) /Tobisch 2007/.....	50
Abbildung 21 kontinuierliche Vorpresse /Dieffenbacher 2005/.....	51
Abbildung 22 links: weltweit erst kontinuierliche Holzwerkstoffpresse 1974 (für Spanplatten) bei Kunz Gschwend (Küsters/Metso) /Bluthardt, Mohr 2000/, rechts: kontinuierliche Dünn-MDF-Anlage (Dieffenbacher) /N. N. 2006d/.....	53
Abbildung 23 Kalanderpresse für Dünn-MDF, Masisa, Mapal (Chile) links: Gesamtansicht, rechts: Einlaufbereich /Tobisch 2007/.....	54
Abbildung 24 Produktion von Particleboard, MDF, Plywood, Hard-/Softboard und OSB in Europa (einschließlich Deutschland, ausschließlich Türkei und Russland) für den Zeitraum von 1999 bis 2008 /EPF Annual Reports 2002 – 2009/.....	71
Abbildung 25 MDF-Produktion und -Verbrauch in Europa (einschließlich Deutschland, ausschließlich Türkei und Russland) für den Zeitraum von 1986 bis 2008 /EPF Annual Reports 2002 – 2009/.....	72

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 26 Siebkennlinien der Kiefern hackschnitzel ungesiebt und gesiebt, mechanische Siebfractionierung in Anlehnung an IHD-Werkstandard WIHS 74.....	85
Abbildung 27 links: Metso-Defibrator-Pilotanlage in Sundsvall/Schweden /Krug 1999/; rechts: Ablaufschema zur Faserstoffherstellung in der Metso-Defibrator-Pilotanlage einschließlich Leistungsangaben.....	86
Abbildung 28 links: Laborrefineranlage des IHD Dresden /Stephani 2006/; rechts: Anlagenlayout/Flowsheet der IHD-Laborrefineranlage (Bild Andritz AG) einschließlich Leistungsangaben.....	87
Abbildung 29 QualScan-System (McCarthy) zur optischen Partikelanalyse, links: Gesamtansicht, mittig: Mischung der Suspension im Mix-Tank, rechts: Flow Cell (Fotos IHD).....	90
Abbildung 30 Kurzzeitbewitterungsbeanspruchung (KZB, auch Short-term Technical Weathering = TW) im Xenotest-Gerät 1200 (links, Foto Stephani, IHD) sowie IHD-Versuchsstand zur Freilandbewitterung (FB, auch Outdoor Exposure = OE) nach DIN EN 152 (rechts, Foto Stephani, IHD).....	99
Abbildung 31 Einfluss des Aufschlussdrucks auf die Siebkennlinien (Summenhäufigkeitsverteilung) nach Luftstrahlsiebanalyse (IHD-Werkstandard FHIS 164) von labortechnisch erzeugten Kiefernholzfasern konstanter Aufschlusszeit (8 min).....	102
Abbildung 32 Einfluss der Aufschlussbedingungen auf die Siebkennlinien (Summenhäufigkeitsverteilung) nach QualScan-Analyse von labortechnisch erzeugten Kiefernholzfasern im Vergleich zu Industrie-Faserstoff aus Kiefernholz.....	103
Abbildung 33 Einfluss der Aufschlussbedingungen auf die Schüttdichte (IHD-Werkstandard FHIS 281) von labortechnisch erzeugten Kiefernholzfasern im Vergleich zu Industrie-Faserstoff aus Kiefernholz.....	104
Abbildung 34 Einfluss der Aufschlussbedingungen auf die Faservlieshöhen (vor Heißpresse) von labortechnisch erzeugten Kiefernholzfasern im Vergleich zu Industrie-Faserstoff aus Kiefernholz (Fotos Stephani, IHD).....	105
Abbildung 35 Einfluss der Aufschlussbedingungen auf die Strehöhe (rechte Skalierung), Faservlieshöhen (vorverdichtet sowie unmittelbar vor Heißpresse) und maximalen spezifischen Pressdruck von labortechnisch erzeugten Kiefernholzfasern im Vergleich zu Industrie-Faserstoff aus Kiefernholz.....	105
Abbildung 36 Auflichtaufnahmen von Kiefernholzfasern in 7-facher Vergrößerung, links: Faserstoff nach Aufschluss bei 8 bar und 4 min; rechts: Faserstoff nach Aufschluss bei 16 bar und 8 min (Fotos Weiß, IHD).....	106
Abbildung 37 REM-Aufnahmen in 35-, 1000- und 2000-facher Vergrößerung der labortechnisch erzeugten Kiefernholzfasern im Vergleich zu Industrie-Faserstoff aus Kiefernholz (Fotos Bäucker, TU Dresden).....	107
Abbildung 38 Einfluss der Aufschlussbedingungen auf den Mahlgrad Schopper-Riegler [°SR] als Maß für das Entwässerungsverhalten von labortechnisch erzeugten Kiefernholzfasern im Vergleich zu Industrie-Faserstoff aus Kiefernholz.....	110
Abbildung 39 Einfluss der Aufschlussbedingungen auf die Benetzbarkeit jeweils nass gebildeter und getrockneter Prüfblätter (Blattbildungsanlage nach Rapid Köthen, Verhältnis Holzfasern- zu Kiefersulfatzellstoff 1:1) auf Basis labortechnisch erzeugter Kiefernholzfasern im Vergleich zu Industrie-Faserstoff aus Kiefernholz.....	112
Abbildung 40 Einfluss der Aufschlussbedingungen auf den Gesamtenergiebedarf (Summe aus elektrischer Energie für Zerkleinerung und thermischer Energie für Dampferzeugung) zur Herstellung der labortechnisch erzeugten Kiefernholzfasern (Angaben Defibrator, Sundsvall), Ausnahme Industriefaserstoff (Angaben Wolf 2008).....	115
Abbildung 41 Einfluss der Aufschlussbedingungen auf den Materialverlust bei Herstellung der labortechnisch erzeugten Kiefernholzfasern.....	117
Abbildung 42 Rohdichteprofil senkrecht zur Plattenebene unterschiedlicher Industrie-MDF-Varianten (linkes Bild: Hersteller A, IHD-Code 269 mit PF-Bindung; mittleres Bild: Hersteller B, IHD-Code 275 mit MUF-Bindung; rechtes Bild: Hersteller C, IHD-Code 284 mit PMDI-Bindung).....	123
Abbildung 43 Entwicklung der Querkraftfestigkeit (relativ) der unbeschichteten Industrie-MDF-Varianten 269 (PF), 274 (MUF) und 284 (PMDI) nach 8, 16 bzw. 24 Wochen Kurzzeitbewitterung (KZB) sowie 24, 48, 72, 96 bzw. 120 Wochen Freibewitterung (FB).....	124
Abbildung 44 Entwicklung der Biegefestigkeit (relativ) der unbeschichteten MDF-Varianten 269 (PF), 274 (MUF) und 284 (PMDI) nach 8, 16 bzw. 24 Wochen Kurzzeitbewitterung (KZB) sowie 24, 48, 72, 96 bzw. 120 Wochen Freibewitterung (FB).....	125

Abbildung 45 Entwicklung der Dickenquellung nach 24 h WL (relativ) der unbeschichteten MDF-Varianten 269 (PF), 274 (MUF) und 284 (PMDI) nach 8, 16 bzw. 24 Wochen Kurzzeitbewitterung (KZB) sowie 24, 48, 72, 96 bzw. 120 Wochen Freibewitterung (FB).....	126
Abbildung 46 Querkzugfestigkeit bindemittelfreier MDF in Abhängigkeit von den Aufschlussbedingungen bei der labortechnischen Herstellung von Kiefernholzfasern.....	128
Abbildung 47 Biegefestigkeit bindemittelfreier MDF in Abhängigkeit von den Aufschlussbedingungen bei der labortechnischen Herstellung von Kiefernholzfasern.....	128
Abbildung 48 Dickenquellung nach 24 und 48 h Wasserlagerung bindemittelfreier MDF in Abhängigkeit von den Aufschlussbedingungen bei der labortechnischen Herstellung von Kiefernholzfasern.....	129
Abbildung 49 Dickenquellung bindemittelfreier MDF aus 8 bar-Faserstoff (jeweils oben) sowie MDF aus 16 bar-Faserstoff (jeweils unten) nach 30 min (mittiges Bild) sowie nach 24 h (rechtes Bild) zu einem Drittel in Wasser gelagert im Vergleich zur Ausgangsprobe vor Wasserlagerung (linkes Bild), Fotos Stephani (IHD).....	129
Abbildung 50 Wasseraufnahme nach 24 und 48 h Wasserlagerung bindemittelfreier MDF in Abhängigkeit von den Aufschlussbedingungen bei der labortechnischen Herstellung von Kiefernholzfasern.....	130
Abbildung 51 Formaldehydgehalt (Perforatorwert, B-Wert, feuchtenormiert) bindemittelfreier Labor-MDF in Abhängigkeit von den Aufschlussbedingungen bei der labortechnischen Herstellung von Kiefernholzfasern im Vergleich zu bindemittelfreien Platten aus Kiefernholz-Industriefaserstoff.....	131
Abbildung 52 Querkzugfestigkeit bindemittelfreier HDF in Abhängigkeit vom Presszeitfaktor und den Aufschlussbedingungen beim Faserstoffaufschluss, Plattennendicke 6 mm.....	133
Abbildung 53 Dickenquellung nach 48 h Wasserlagerung bindemittelfreier HDF in Abhängigkeit vom Presszeitfaktor und den Aufschlussbedingungen beim Faserstoffaufschluss, Plattennendicke 6 mm.....	133
Abbildung 54 Kantenquellung nach 24 h Wasserlagerung bindemittelfreier (unbeschichteter) HDF in Abhängigkeit vom Presszeitfaktor und den Aufschlussbedingungen beim Faserstoffaufschluss, Plattennendicke 6 mm.....	134
Abbildung 55 Biegefestigkeit von MDF in Abhängigkeit vom UF-Festharzanteil sowie von den Aufschlussbedingungen bei der labortechnischen Herstellung von Kiefernholzfasern.....	136
Abbildung 56 Biege-E-Modul von MDF in Abhängigkeit vom UF-Festharzanteil sowie von den Aufschlussbedingungen bei der labortechnischen Herstellung von Kiefernholzfasern.....	136
Abbildung 57 Querkzugfestigkeit von MDF in Abhängigkeit vom UF-Festharzanteil sowie von den Aufschlussbedingungen bei der labortechnischen Herstellung von Kiefernholzfasern.....	137
Abbildung 58 Dickenquellung nach 24 h Wasserlagerung von MDF in Abhängigkeit vom UF-Festharzanteil sowie von den Aufschlussbedingungen bei der labortechnischen Herstellung von Kiefernholzfasern.....	138
Abbildung 59 Formaldehydgehalt (Perforator-B-Wert) von MDF in Abhängigkeit vom UF-Festharzanteil sowie von den Aufschlussbedingungen bei der labortechnischen Herstellung von Kiefernholzfasern.....	138
Abbildung 60 Querkzugfestigkeit von Labor-MDF in Abhängigkeit von Bindemitteltyp (Anteil konstant 16 %) und Aufschlussbedingungen bei der labortechnischen Herstellung von Kiefernholzfasern (im Vergleich zu Industriefaserstoff).....	142
Abbildung 61 Querkzugfestigkeit nach 2 h Kochprüfung von Labor-MDF in Abhängigkeit von Bindemitteltyp (Anteil konstant 16 %) und Aufschlussbedingungen bei der labortechnischen Herstellung von Kiefernholzfasern (im Vergleich zu Industriefaserstoff).....	142
Abbildung 62 Querkzugfestigkeit nach Zyklustest von Labor-MDF in Abhängigkeit von Bindemitteltyp (Anteil konstant 16 %) und Aufschlussbedingungen bei der labortechnischen Herstellung von Kiefernholzfasern (im Vergleich zu Industriefaserstoff).....	143
Abbildung 63 Dickenquellung nach 24 h Wasserlagerung von Labor-MDF in Abhängigkeit von Bindemitteltyp (Anteil konstant 16 %) und Aufschlussbedingungen bei der labortechnischen Herstellung von Kiefernholzfasern (im Vergleich zu Industriefaserstoff).....	144
Abbildung 64 Dickenquellung nach Zyklustest von Labor-MDF in Abhängigkeit von Bindemitteltyp (Anteil konstant 16 %) und Aufschlussbedingungen bei der labortechnischen Herstellung von Kiefernholzfasern (im Vergleich zu Industriefaserstoff).....	144
Abbildung 65 Biegefestigkeit von Labor-MDF in Abhängigkeit von Bindemitteltyp (Anteil konstant 16 %) und Aufschlussbedingungen bei der labortechnischen Herstellung von Kiefernholzfasern (im Vergleich zu Industriefaserstoff).....	145

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 66 Biege-Elastizitätsmodul von Labor-MDF in Abhängigkeit von Bindemitteltyp (Anteil konstant 16 %) und Aufschlussbedingungen bei der labortechnischen Herstellung von Kiefernholzfaserstoffen (im Vergleich zu Industriefaserstoff).....	146
Abbildung 67 Längenänderung bei Änderung der relativen Luftfeuchte von Labor-MDF in Abhängigkeit von Bindemitteltyp (Anteil konstant 16 %) und Aufschlussbedingungen bei der labortechnischen Herstellung von Kiefernholzfaserstoffen.....	147
Abbildung 68 Dickenänderung bei Änderung der relativen Luftfeuchte von Labor-MDF in Abhängigkeit von Bindemitteltyp (Anteil konstant 16 %) und Aufschlussbedingungen bei der labortechnischen Herstellung von Kiefernholzfaserstoffen.....	147
Abbildung 69 Rohdichteprofil senkrecht zur Plattenebene von Labor-MDF aus labortechnisch bei 8 bar über 4 min aufgeschlossenem Kiefernholzfaserstoff in Abhängigkeit vom Bindemitteltyp (Anteil konstant 16 %).....	149
Abbildung 70 Rohdichteprofil senkrecht zur Plattenebene von Labor-MDF aus labortechnisch bei 8, 12 oder 16 bar über 4 min aufgeschlossenem Kiefernholzfaserstoff in Abhängigkeit vom Bindemitteltyp (Anteil konstant 16 %).....	150
Abbildung 71 Querzugfestigkeit von Labor-MDF in Abhängigkeit von Bindemitteltyp und -anteil sowie Aufschlussbedingungen bei der labortechnischen Herstellung von Kiefernholzfaserstoffen (im Vergleich zu Industriefaserstoff).....	152
Abbildung 72 Querzugfestigkeit nach Zyklustest von Labor-MDF in Abhängigkeit von Bindemitteltyp und -anteil sowie von den Aufschlussbedingungen bei der labortechnischen Herstellung von Kiefernholzfaserstoffen (im Vergleich zu Industriefaserstoff).....	153
Abbildung 73 Dickenquellung nach 24 h Wasserlagerung von Labor-MDF in Abhängigkeit von Bindemitteltyp und -anteil sowie Aufschlussbedingungen bei der labortechnischen Herstellung von Kiefernholzfaserstoffen (im Vergleich zu Industriefaserstoff).....	153
Abbildung 74 Biegefestigkeit von Labor-MDF in Abhängigkeit von Bindemitteltyp und -anteil sowie Aufschlussbedingungen bei der labortechnischen Herstellung von Kiefernholzfaserstoffen (im Vergleich zu Industriefaserstoff).....	154
Abbildung 75 Biege-Elastizitätsmodul von Labor-MDF in Abhängigkeit von Bindemitteltyp und -anteil sowie Aufschlussbedingungen bei der labortechnischen Herstellung von Kiefernholzfaserstoffen (im Vergleich zu Industriefaserstoff).....	154
Abbildung 76 Querzugfestigkeit nach 2 h Kochprüfung von Labor-MDF in Abhängigkeit von Bindemitteltyp und -anteil sowie Aufschlussbedingungen bei der labortechnischen Herstellung von Kiefernholzfaserstoffen (im Vergleich zu Industriefaserstoff).....	155
Abbildung 77 Dickenquellung nach Zyklustest von Labor-MDF in Abhängigkeit von Bindemitteltyp und -anteil sowie von den Aufschlussbedingungen bei der labortechnischen Herstellung von Kiefernholzfaserstoffen (im Vergleich zu Industriefaserstoff).....	155
Abbildung 78 Längenänderung bei Änderung der relativen Luftfeuchte von Labor-MDF in Abhängigkeit vom PMDI-Bindemittelanteil (16 und 8 %) und von den Aufschlussbedingungen bei der labortechnischen Herstellung von Kiefernholzfaserstoffen.....	156
Abbildung 79 Dickenänderung bei Änderung der relativen Luftfeuchte von Labor-MDF in Abhängigkeit vom PMDI-Bindemittelanteil (16 und 8 %) und von den Aufschlussbedingungen bei der labortechnischen Herstellung von Kiefernholzfaserstoffen.....	156
Abbildung 80 Biegefestigkeit von Labor-MDF in Abhängigkeit vom Bindemitteltyp (Anteil konstant 16 %) und Aufschlussdruck (Aufschlusszeit einheitlich 4 min) bei der labortechnischen Herstellung von Kiefernholzfaserstoffen (im Vergleich zu Industrie-MDF).....	172
Abbildung 81 Querzugfestigkeit von Labor-MDF in Abhängigkeit vom Bindemitteltyp (Anteil konstant 16 %) und Aufschlussdruck (Aufschlusszeit einheitlich 4 min) bei der labortechnischen Herstellung von Kiefernholzfaserstoffen (im Vergleich zu Industrie-MDF).....	172
Abbildung 82 Dickenquellung nach 24 h Wasserlagerung von Labor-MDF in Abhängigkeit vom Bindemitteltyp (Anteil konstant 16 %) und Aufschlussdruck (Aufschlusszeit einheitlich 4 min) bei der labortechnischen Herstellung von Kiefernholzfaserstoffen (im Vergleich zu Industrie-MDF).....	173
Abbildung 83 Bindemittelabhängiger Zusammenhang zwischen der Querzugfestigkeit nach 8 bzw. 24 Wochen KZB sowie 72 Wochen FB und der Querzugfestigkeit nach Kochprüfung von Labor-MDF (Bindemittel-Anteil konstant 16 %, unterschiedliche Aufschlussintensitäten (8, 12, 16 bar) zusammengefasst).....	176

Abbildung 84 Bindemittelabhängiger Zusammenhang zwischen der Querkzugfestigkeit nach 8 bzw. 24 Wochen KZB sowie 72 Wochen FB und der Querkzugfestigkeit nach Zyklustest von Labor-MDF (Bindemittel-Anteil konstant 16 %, unterschiedliche Aufschlussintensitäten (8, 12, 16 bar) zusammengefasst)	177
Abbildung 85 Bindemittelabhängiger Zusammenhang zwischen der Dickenquellung (24 h WL) nach 8 bzw. 24 Wochen KZB sowie 72 Wochen FB und der Dickenquellung (24 h WL) nach Zyklustest von Labor-MDF (Bindemittel-Anteil konstant 16 %, unterschiedliche Aufschlussintensitäten (8, 12, 16 bar) zusammengefasst)	178
Abbildung 86 Bindemittelabhängiger Zusammenhang zwischen der Dickenquellung (24 h WL) nach 8 bzw. 24 Wochen KZB sowie 72 Wochen FB und der Dickenquellung (24 h WL) von Labor-MDF (Bindemittel-Anteil konstant 16 %, unterschiedliche Aufschlussintensitäten (8, 12, 16 bar) zusammengefasst)	179
Abbildung 87 Aufschlussabhängiger Zusammenhang zwischen der Querkzugfestigkeit nach 8 bzw. 24 Wochen KZB sowie 72 Wochen FB und der Querkzugfestigkeit nach Kochprüfung von Labor-MDF (Aufschlusszeit einheitlich 4 min, unterschiedliche Bindemitteltypen (Anteil konstant 16 %) zusammengefasst)	180
Abbildung 88 Aufschlussabhängiger Zusammenhang zwischen der Querkzugfestigkeit nach 8 bzw. 24 Wochen KZB sowie 72 Wochen FB und der Querkzugfestigkeit nach Zyklustest von Labor-MDF (Aufschlusszeit einheitlich 4 min, unterschiedliche Bindemitteltypen (Anteil konstant 16 %) zusammengefasst)	181
Abbildung 89 Aufschlussabhängiger Zusammenhang zwischen der Dickenquellung (24 h WL) nach 8 bzw. 24 Wochen KZB sowie 72 Wochen FB und der Dickenquellung (24 h WL) nach Zyklustest von Labor-MDF (Aufschlusszeit einheitlich 4 min, unterschiedliche Bindemitteltypen (Anteil konstant 16 %) zusammengefasst)	182
Abbildung 90 Aufschlussabhängiger Zusammenhang zwischen der Dickenquellung (24 h WL) nach 8 bzw. 24 Wochen KZB sowie 72 Wochen FB und der Dickenquellung (24 h WL) von Labor-MDF (Aufschlusszeit einheitlich 4 min, unterschiedliche Bindemitteltypen (Anteil konstant 16 %) zusammengefasst)	183
Abbildung 91 Bindemittelabhängiger Zusammenhang zwischen der Querkzugfestigkeit nach 8 bzw. 24 Wochen KZB und der Querkzugfestigkeit nach 72 Wochen FB von Labor-MDF (Bindemittel-Anteil konstant 16 %, unterschiedliche Aufschlussintensitäten (8, 12, 16 bar) zusammengefasst)	184
Abbildung 92 Bindemittelabhängiger Zusammenhang zwischen der Dickenquellung (24 h WL) nach 8 bzw. 24 Wochen KZB und der Dickenquellung (24 h WL) nach 72 Wochen FB von Labor-MDF (Bindemittel-Anteil konstant 16 %, unterschiedliche Aufschlussintensitäten (8, 12, 16 bar) zusammengefasst)	184
Abbildung 93 Aufschlussabhängiger Zusammenhang zwischen der Querkzugfestigkeit nach 8 bzw. 24 Wochen KZB und der Querkzugfestigkeit nach 72 Wochen FB von Labor-MDF (Aufschlusszeit einheitlich 4 min, unterschiedliche Bindemitteltypen (Anteil konstant 16 %) zusammengefasst)	185
Abbildung 94 Aufschlussabhängiger Zusammenhang zwischen der Dickenquellung (24 h WL) nach 8 bzw. 24 Wochen KZB und der Dickenquellung (24 h WL) nach 72 Wochen FB von Labor-MDF (Aufschlusszeit einheitlich 4 min, unterschiedliche Bindemitteltypen (Anteil konstant 16 %) zusammengefasst)	186

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1 Anordnung, Form und Funktion der Nadelholzzellen /Autorenkollektiv 2008/.....	9
Tabelle 2 Vor- und nachteilige Veränderungen ausgewählter Holzeigenschaften durch eine thermische Behandlung /Großmann 2002; Mirako 2009/.....	16
Tabelle 3 Eigenschaften von mitteldichten Faserplatten aus Kiefern-Defibrator-Faserstoff bei Einsatz von UF- Harz, Plattendicke 16 mm, Heizplattentemperatur 170 °C, Oberflächenbefeuchtung mit 50 g Wasser /m ² , Presszeit 4 und 5 min zusammengefasst /Hinselmann et al. 1964/.....	19
Tabelle 4 Holz zur energetischen Nutzung in Mio. m ³ ; Stand 2005 /N. N. 2006c/.....	21
Tabelle 5 Szenario für die Holzbilanz in Deutschland von 2005 bis 2010 /Altenheld 2007/.....	22
Tabelle 6 Vergleich des potentiellen Rohholzaufkommens im Zeitraum 2003 bis 2022 zur Nutzungsmenge im Zeitraum 1987 bis 2002 /Polley, Kroiher 2006/.....	23
Tabelle 7 Formaldehydemissionsgrenzwerte für Holzwerkstoffe nach CARB-ATCM /Steckel 2009, Marutzky 2009 überarbeitet/.....	30
Tabelle 8 Vergleich thermomechanischer Holzaufschlussverfahren /Lampert 1966; Kollmann 1955; Koran et al. 1978; Krug, Mäbert 2007; Suchsland et al. 1983; Mannström 1972; Mäbert; Krug 2009; Mc Millin 1969; May 1974; Nagy 1964; Nelson 1973; Nicholls 1970; Šisler, Kéda 1962/.....	40
Tabelle 9 Klassen der Lasteinwirkungsdauer und Beispiel für die Lasteinwirkung nach DIN EN 622-5:2006-09	66
Tabelle 10 MDF-Plattentypen nach DIN EN 622-5:2006-09	66
Tabelle 11 Anforderungen an MDF.H (allgemeine Zwecke, Feuchtbereich) und MDF.HLS (tragende Zwecke, feucht) nach DIN EN 622-5:2006 im Vergleich zu Anforderungen an MDF.E (allgemeine Zwecke, Außenbereich) nach EMB-Industrienorm sowie zu Herstellerangaben für MDF Exterior von Medite, Fantoni und Finsa, Nenndickenbereich > 12 bis 19 mm	67
Tabelle 12 Anforderungen an MDF-GP MR (allgemein, Feuchtbereich), MDF-FN MR (Möbel, Feuchtbereich), MDF-LB MR (tragend, Feuchtbereich), MDF-GP HMR (allgemein, Bereich hoher Feuchte), MDF- FN HMR (Möbel, Bereich hoher Feuchte), MDF-LB HMR (tragend, Bereich hoher Feuchte) und MDF-FN EXT (Möbel, Außenbereich) nach ISO/DIS 16895-2:2007(E), Nenndickenbereich > 13 bis 22 mm.....	69
Tabelle 13 Prozentanteil der unterschiedlichen Holzwerkstoffe am Gesamt-Holzwerkstoffproduktionsvolumen in Europa im Zeitraum von 1999 bis 2008 /EPF Annual Reports 2002 – 2009/.....	71
Tabelle 14 Übersicht der Aufschlussbedingungen (Prozessparameter: Dampfdruck (und die dementsprechende Sattdampf Temperatur) sowie Verweilzeit im Kocher unmittelbar vor der Zerfaserung im Refiner) der labortechnisch erzeugten Kiefernholzfaserstoffe im Vergleich zu Industrie-Faserstoff aus Kiefernholz	86
Tabelle 15 Übersicht zu den eingesetzten Bindemitteln einschließlich ausgewählter Bindemittelkennwerte (Herstellerangaben)	88
Tabelle 16 Vierwöchiger Bewitterungszyklus im Xenotest-Gerät 1200 (KZB), Wiederholung ab der 5., 9., 13., 17., 21. Woche.....	99
Tabelle 17 Einfluss der Aufschlussbedingungen auf mittlere Korngröße und Korngrößenverteilung nach Luftstrahlsiebanalyse (IHD-Werkstandard FHS 164) von labortechnisch erzeugten Kiefernholzfaserstoffen im Vergleich zu Industrie-Faserstoff aus Kiefernholz	102
Tabelle 18 Einfluss der Aufschlussbedingungen auf mittlere Faserlänge und Faserbreite sowie Schlankheitsgrad nach QualScan-Analyse von labortechnisch erzeugten Kiefernholzfaserstoffen im Vergleich zu Industrie-Faserstoff aus Kiefernholz.....	103
Tabelle 19 Einfluss der Aufschlussbedingungen auf pH-Wert, wasserlösliche Anteile bei Heißwasserextraktion, Extraktstoffgehalt in Ethanol-Cyclohexan, alkalische und saure Pufferkapazität, Formaldehydgehalt, Formaldehydabgabe, Ligningehalt und Pentosangehalt von labortechnisch erzeugten Kiefernholzfaserstoffen im Vergleich zu Industrie-Faserstoff aus Kiefernholz.....	108
Tabelle 20 Einfluss der Aufschlussbedingungen auf Reißlänge, Falz- und Berstfestigkeit sowie Weißgrad jeweils nass gebildeter und getrockneter Prüfblätter (Blattbildungsanlage nach Rapid Köthen, Verhältnis Holzfasern- zu Kiefersulfatzellstoff 1:1) auf Basis labortechnisch erzeugter Kiefernholzfaserstoffe im Vergleich zu Industrie-Faserstoff aus Kiefernholz	111

Tabelle 21 Einfluss der Aufschlussbedingungen auf den Energieverbrauch für Zerfaserung, Dampfverbrauch, Dampfbedarf, normierten Dampfbedarf sowie den Gesamtenergiebedarf zur Herstellung der labortechnisch erzeugten Kiefernholzfaserstoffe (Angaben Defibrator, Sundsvall), Ausnahme Industriefaserstoff (Angaben von <i>Wolf 2008</i>)	113
Tabelle 22 Einfluss der Aufschlussbedingungen auf Ausbeute und Materialverlust bei Herstellung der labortechnisch erzeugten Kiefernholzfaserstoffe (Angaben IHD, Dresden)	116
Tabelle 23 Einfluss des Bindemittels auf physikalische und chemische Eigenschaften ausgewählter Industrie-MDF mit von den Herstellern ausgewiesener erhöhter Feuchtebeständigkeit der Verklebung, Vergleich zu normativen Vorgaben an MDF.HLS gemäß DIN EN 622-5	122
Tabelle 24 Ausgewählte physikalische und chemische Eigenschaften bindemittelfreier Labor-HDF in Abhängigkeit vom Presszeitfaktor bei der Plattenherstellung und von den Aufschlussbedingungen bei der labortechnischen Herstellung von Kiefernholzfaserstoffen, Plattenenddicke 6 mm, Vergleich zu normativen Vorgaben an MDF gemäß DIN EN 622-5	132
Tabelle 25 Einfluss der Aufschlussbedingungen bei der Faserstoffherstellung und der Bindemittelart auf mittlere Rohdichte, Feuchtegehalt, pH-Wert sowie Formaldehydgehalt von Labor-MDF aus Kiefernholzfaserstoffen mit konstantem Bindemittelanteil von 16 %	140
Tabelle 26 Einfluss der Aufschlussbedingungen bei der Faserstoffherstellung, der Bindemittelart und des Bindemittelanteils auf mittlere Rohdichte, Feuchtegehalt, pH-Wert sowie Formaldehydgehalt von Labor-MDF aus Kiefernholzfaserstoffen.....	151
Tabelle 27 Einfluss der Aufschlussbedingungen auf die Biegefestigkeit labortechnisch hergestellter MDF aus Kiefernholz-Faserstoffen nach KZB 8, KZB 24 bzw. FB 72 in Abhängigkeit vom eingesetzten Bindemitteltyp (Bindemittelanteil konstant 16 %), Vergleich zu Industrie-MDF der gleichen Bindemitteltypen	166
Tabelle 28 Einfluss der Aufschlussbedingungen auf den Biege-E-Modul labortechnisch hergestellter MDF aus Kiefernholz-Faserstoffen nach KZB 8, KZB 24 bzw. FB 72 in Abhängigkeit vom eingesetzten Bindemitteltyp (Bindemittelanteil konstant 16 %), Vergleich zu Industrie-MDF der gleichen Bindemitteltypen	167
Tabelle 29 Einfluss der Aufschlussbedingungen auf die Querkzugfestigkeit labortechnisch hergestellter MDF aus Kiefernholz-Faserstoffen nach KZB 8, KZB 24 bzw. FB 72 in Abhängigkeit vom eingesetzten Bindemitteltyp (Bindemittelanteil konstant 16 %), Vergleich zu Industrie-MDF der gleichen Bindemitteltypen	168
Tabelle 30 Einfluss der Aufschlussbedingungen auf die Dickenquellung nach 24 Stunden Wasserlagerung labortechnisch hergestellter MDF aus Kiefernholz-Faserstoffen nach KZB 8, KZB 24 bzw. FB 72 in Abhängigkeit vom eingesetzten Bindemitteltyp (Bindemittelanteil konstant 16 %), Vergleich zu Industrie-MDF der gleichen Bindemitteltypen	170

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

\bar{x}	Mittelwert	
atü	Atmosphäre Überdruck (auch atm) = 101325 Pa = 1,01325 bar	
ANSI	American National Standards Institute (engl.)	
ASTM	American Society for Testing and Materials (engl.)	
BAM	Bundesamt für Materialforschung und -prüfung	
bez.	bezogen	
BfR	Bundesanstalt für Risikobewertung	
BMU	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit	
BRE	Building Research Establishment	
CARB	California Air Resources Board (Kalifornische Umweltschutzbehörde)	
CTMP	chemo thermo mechanical pulp (engl.) = chemo-thermo-mechanischer Holzstoff	
D. o. R.	Derbholz ohne Rinde	
DEPV	Deutscher Energie-Pellet-Verband	
DIN	Deutsche Industrie-Norm	
DIY	do it yourself	
DP	Polymerisationsgrad	
Efm	Ernte-Festmeter	[Efm]
EMB	Euro MDF-Board	
EN	Europäische Norm	
EPF	European Panel Federation (engl.) = Europäischer Holzwerkstoffherstellerverband	
EPLF	Verband der europäischen Laminatfußbodenhersteller	
FB	Freibewitterung (Outdoor Exposure = OE)	
FPL	Forest Products Laboratory (engl.)	
FWD	Feuchte, Wärme und Druck -Verfahren (<i>Burmester</i>)	
HDF	High Density Fibreboard (engl.) = hochdichte Faserplatte, Trockenverfahren	
HDH	Hauptverband der Deutschen Holz und Kunststoff verarbeitenden Industrie	
HF	Hochfrequenz	
i. d. R.	in der Regel	
IARC	International Agency for Research on Cancer (engl.)	
IHD	Institut für Holztechnologie Dresden gemeinnützige GmbH	
IoS-MAT	Environmental Standards of IKEA Products (engl.) = IKEA Norm	
IR	Infrarot	
ISO/ DIS	International Organization for Standardization (engl.)	
JIS A	Japanese Industrial Standards (engl.)	
KZB	Kurzzeitbewitterung (Short-term Technical Weathering = TW)	
LDF	Low Density Fibreboard (engl.) = leichte Faserplatte, Trockenverfahren	
L-MDF	Leicht-MDF für allgemeine Zwecke zur Verwendung im Trockenbereich	
L-MDF.H	Leicht-MDF für allgemeine Zwecke zur Verwendung im Feuchtbereich	
MDF	Medium Density Fibreboard (engl.) = mitteldichte Faserplatte, Trockenverfahren für allgemeine Zwecke zur Verwendung im Trockenbereich	
MDF.E	MDF für allgemeine Zwecke zur Verwendung im Außenbereich	

MDF.H	MDF für allgemeine Zwecke zur Verwendung im Feuchtbereich	
MDF.HLS	MDF für tragende Zwecke zur Verwendung im Feuchtbereich	
MDF.LA	MDF für tragende Zwecke zur Verwendung im Trockenbereich	
MDF.RWH	MDF zur Verwendung als Unterdeckplatten für Dachdeckungen und Wände	
MDF-FN EXT	MDF für Möbel zur Verwendung im Außenbereich	
MDF-FN HMR	MDF für Möbel zur Verwendung in Bereichen hoher Feuchte	
MDF-FN MR	MDF für Möbel zur Verwendung im Feuchtbereich	
MDF-GP HMR	MDF für allgemein Zwecke zur Verwendung in Bereichen hoher Feuchte	
MDF-GP MR	MDF für allgemeine Zwecke zur Verwendung im Feuchtbereich	
MDF-LB HMR	MDF für tragende Zwecke zur Verwendung in Bereichen hoher Feuchte	
MDF-LB MR	MDF für tragende Zwecke zur Verwendung im Feuchtbereich	
MF	Melamin-Formaldehyd-Harz	
mUF	melaminverstärktes Harnstoff-Formaldehyd-Harz	
MUF	Melamin-Harnstoff-Formaldehyd-Harz	
MUPF	Melamin-Harnstoff-Phenol-Formaldehyd-Harz	
n	Anzahl	
n. b.	nicht bestimmt	
OSB	Oriented Strand Board	
PF	Phenol-Formaldehyd-Harz	
PLATO	Providing Lasting Advanced Timber Option (Thermoholz-Herstellungsverfahren)	
PMDI	polymeres Diphenylmethan-4,4-diisocyanat	
PRF	Phenol-Resorcin-Formaldehyd-Harz	
PUF	Phenol-Harnstoff-Formaldehyd-Harz	
PUR	Polyurethan (polymeres Urethan)	
PVAc	Polyvinylacetat	
rel. LF.	relative Luftfeuchte (relative humidity = rH)	[%]
REM	Rasterelektronenmikroskop	
RF	Resorcin-Formaldehyd-Harz	
s	Standardabweichung	
S1	äußere Sekundärwand (Übergangslamelle)	
S2	zentrale Sekundärwand	
S3	Tertiärwand	
SNP	Sägenebenprodukte	
SR	Mahlgrad Schopper-Riegler	[°SR]
SWP	Solid Wood Panel (Massivholzplatte)	
TF	Tannin-Formaldehyd-Harz	
TMP	thermo mechanical pulp (engl.) = thermo-mechanischer Holzstoff	
TMT	thermally modified timber (Thermoholz)	
TPC	Third Party Certifiers	
UF	Harnstoff-Formaldehyd-Harz	
UDF	ultra low density fibre board (engl.) = ultraleichte MDF, Trockenverfahren	
UL-MDF	Ultraleicht-MDF für allgemeine Zwecke zur Verwendung im Trockenbereich	
v	Variationskoeffizient	[%]

Abkürzungsverzeichnis

Vfm	Vorratsfestmeter	[Vfm]
VHI	Verband der Deutschen Holzwerkstoffindustrie	
VOC	volatile organic compounds (engl.) = flüchtige organische Bestandteile	
VTT	FinnForest Thermo Wood-Verfahren	
WH	Waldholz	
WHO	World Health Organization	
WIHS/FHIS	IHD-Werkstandard	
WKI	Wilhelm-Klauditz-Institut	
WL	Wasserlagerung	
WPC	Wood Plastic Composites, auch Wood Polymer Composites	
WRV-Wert	Wert für das Wasserrückhaltevermögen	
\bar{x}	Mittelwert	[%]
z. Z.	zur Zeit	

1 Einleitung und Zielsetzung

1.1 Ausgangssituation und Problemstellung

Der Kapazitätsausbau in der europäischen Holzwerkstoffplattenindustrie hielt bis in das Jahr 2006 trotz temporärer Marktsättigungstendenzen unverändert an und erreichte 2007 mit einer Gesamtproduktion von fast 55 Mio. m³ Spanplatten, OSB und Faserplatten ein neues Rekordniveau */European Panel Federation (EPF) 2008/*. Nachdem die Weltwirtschaftskrise in den Jahren 2008 und 2009 zu merklichen Rückgängen bei Nachfrage und Herstellung der partikelbasierten Holzwerkstoffplatten (für 2008 Minus 10 % auf 50 Mio. m³) führt, rechnet die EPF ab 2010 wieder mit leichten Kapazitäts- und Produktionszuwächsen */EPF 2009/*.

Für 2008 stellte die Holzwerkstoffindustrie Deutschlands mit einer Produktionskapazität von 8,4 Mio. m³ Spanplatten, 3,9 Mio. m³ Faserplatten nach dem Trockenverfahren (MDF, HDF) sowie 1,1 Mio. m³ Oriented Strand Board (OSB) trotz der weltweiten Krise einen sehr bedeutenden Industriezweig dar.

Überaus beeindruckend ist die Entwicklung des Werkstoffs MDF, dessen Produktions- und Verbrauchsvolumen sich gegenüber 1996 in Europa verdrei- und in Deutschland nahezu verfünffacht haben (allerdings von einem verhältnismäßig niedrigen Niveau ausgehend). Als Gründe dieser Entwicklung werden vor allem Innovationen bei der Herstellungstechnologie und die daraus resultierenden verbesserten Werkstoff- und Verarbeitungseigenschaften angesehen.

Es ist jedoch festzustellen, dass sich, ähnlich zu anderen Holzwerkstoffen, auch in der Faserplatten-Industrie eine Abschwächung des Wachstums abzeichnet. Als Hauptgründe dieser Entwicklung werden neben der unbefriedigenden Wirtschaftskonjunktur in der Möbel- und Bauwirtschaft (als den beiden wichtigsten Holzwerkstoffabsatzmärkten) insbesondere die beispiellose Investitionswelle in neue MDF/HDF-Anlagen der letzten Jahre und das daraus resultierende Überangebot an Faserplatten-Standardqualitäten sowie die Weltwirtschaftskrise angesehen. Dementsprechend ist der Rückgang der europäischen MDF/HDF-Produktion im Jahr 2008 um 8,4 % (gegenüber 2007) auf 12,2 Mio. m³ nicht verwunderlich */EPF 2009/*.

Problemen, wie Preisverfall oder Werkschließungen wird nur durch eine zunehmende Diversifikation der Produktpalette begegnet, wobei die materialspezifischen Vorteile der Faserplatten gegenüber anderen Holzwerkstoffen große Entwicklungspotentiale bieten */Fantoni 1997; Ernst 1997; Marutzky 2001/*.

In Mitteleuropa werden hochdichte Faserplatten vorzugsweise als Träger für Laminatfußböden (45 %) eingesetzt, während mitteldichte Faserplatten in der Möbelfertigung (25 %), sowie im konstruktiven Bereich (11 %) Anwendung finden */EPF 2008; 2009/*. Im Unterschied zum Möbel- und Innenausbau, in denen MDF auf Grund ihrer guten Verarbeitungseigenschaften - z. B. Profilierfähigkeit über den gesamten Querschnitt und vielfältige Beschichtungsmöglichkeiten - verbreitet Einsatz finden, hat dieser Holzwerkstoff im Bauwesen nur untergeordnete Bedeutung. Im HDF-Bereich wird für die nächsten Jahre u. a. vor dem Hintergrund der z.Z. laufenden beispiellosen Investitionsvorhaben in China, Russland und Nordamerika eher ein stagnierendes Wachstum für Europa prognostiziert, da diese Wirtschaftsräume perspektivisch selbst Laminatfußböden herstellen und vermarkten werden.

Obwohl bereits in den 1970er Jahren über die Herstellung feuchtebeständig gebundener MDF bzw. auch von MDF für die Außenanwendung berichtet wurde */Kehr 1977/*,

haben diese Plattentypen in der Folgezeit keine größere Bedeutung gewonnen. Der dominierende Einsatz von MDF im Möbelbau und HDF für Laminatboden beeinflusste die Entwicklung dieses Werkstoffs stark. Erst Ende der 1980er bzw. Anfang der 1990er Jahre wurden von verschiedenen Herstellern „feuchtebeständige“ MDF im geringen Umfang in den Verkehr gebracht. Von einer Marktdurchdringung oder einer breiten Marktakzeptanz kann jedoch bis zum heutigen Tage keine Rede sein.

Die Herstellung von MDF mit feuchtebeständiger Verleimung ist dabei nicht allgemeiner Stand der Technik. Als Bindemittel sind prinzipiell Phenol-Formaldehyd-Harze (PF), Melamin-Harnstoff-Formaldehyd-Harze (MUF), Melamin-Harnstoff-Phenol-Formaldehyd-Harze (MUPF), Tannin-Formaldehyd-Harze (TF) sowie polymere Diphenylmethan-4,4-Diisocyanate (PMDI) geeignet. Dabei werden allerdings bisher keinesfalls „einheitliche Feuchtebeständigkeiten“ erreicht. Die Untersuchungen von *Gressel et al. /1997/* zur Bestimmung der Feuchtebeständigkeit von Holzwerkstoffen zeigen, dass - im Gegensatz zu Spanplatten - für MDF noch keine gesicherten Zusammenhänge zwischen Kurzzeit- und Langzeit-Eigenschaften nachgewiesen werden konnten.

Bei Nachweis einer dauerhaften Feuchte- und Witterungsbeständigkeit werden aber gerade Anwendungen von MDF für nichttragende Zwecke im Feucht- oder Außenbereich als entwicklungsfähig angesehen, wobei aktuell unzureichende hygrische Eigenschaften (u. a. Quellungspotential nach Wasserlagerung oder Dimensionsänderung bei Klimawechsel) beeinträchtigend bzw. verhindernd wirken. Verwendungen in Bereichen hoher relativer Luftfeuchte erfolgen aus diesen Gründen nur eingeschränkt. Ausnahmen bilden geringfügige Mengen an Faserplatten mit erhöhter Feuchtebeständigkeit der Verklebung (Abbildung 1), bauaufsichtlich zugelassene Leicht-MDF (light density fibre board = L-MDF oder ultra light density fibre board = UL-MDF) zur Beplankung von Wänden und Dächern sowie PMDI-gebundene Leichtbau- und Dämmelemente mit Materialdicken von 40 bis 250 mm.



Abbildung 1 Anwendungsbeispiele von MDF für nichttragende Zwecke im Außenbereich /Quelle: MDF-Magazin 1997, 1998, 1999/

Das Interesse an solchen Platten dokumentiert auch die Ankündigung des irischen MDF-Herstellers Medite, ab Juni 2009 modifizierte MDF nach dem Tricoya[®]-Verfahren¹ herzustellen, die sich durch eine höhere Dauerhaftigkeit und Dimensionsstabilität für einen Einsatz im Außenbereich eignen sollen /N. N. 2009f/.

Alternative und ausbaufähige Produktbereiche für Exterior-MDF wären neben Einsätzen im Feuchtbereich (Bad- und Küchenmöbel) Verwendungen als endbeschichtete Fassadenelemente, Haustürfüllungen, Profilleisten oder hochwertige Ladenfronten, Werbeflächen sowie Zimmerarbeiten im Außenbereich /Willemse, P. 2001/. Gegenüber herkömmlichen, im Baubereich für Außenanwendungen bereits etablierten Spanformteilen, Fassadensperrholz, Furnierschichtholz, OSB, mehrlagigen Massivholzplatten aus nativem oder thermisch vergütetem Nadelholz sowie zementgebundenen Spanplatten zeichnen sich MDF besonders durch „freie“ Profilierungsmöglichkeiten (nicht an Gesenkform gebunden) und eine gute Eignung zur Flüssigbeschichtung aus. Nach Ergebnissen der Delphi-Studie zur Entwicklung der deutschen Holzindustrie werden perspektivisch Anwendungen im Außenbereich generell als ein sehr wichtiger Absatzmarkt für Holzprodukte gesehen /Knauf, Frühwald 2004; Knauf, Frühwald 2009; Korte 2006/. Die befragten Experten prognostizierten dabei insbesondere den Marktdurchbruch für Holz-Polymer-Verbunde, die sog. Wood Plastic Composites (WPC).

Erfahrungen zu Quellwerten und Dimensionsstabilität von MDF hoher Dichte (High Density Fibreboard = HDF) bei langjährigem Einsatz (≥ 5 Jahre) als Träger für Laminatböden zeigen aber auch, dass die durch Einsatz synthetischer Bindemittel mit maximalen Festharzdosierungen bzw. durch Hydrophobierung mit Paraffin erreichten Ergebnisse zur Minimierung von Klima-, Verlege- und Reinigungsfeuchte-Einflüssen nicht ausreichen. Als besonders kritisch sind dabei neben den Randaufquellungen die Öffnungen der Längs- und Quertugen bei den formschlüssigen, leimfreien Klickverbindungen anzusehen, die sich selbst durch eine Imprägnierung der Schmalflächen nur bedingt einschränken lassen.

Zu den Auswirkungen des Einsatzes von MDF-Bauelementen im Feucht- oder Außenbereich auf die physikalisch-mechanischen Eigenschaften des MDF-Trägermaterials gibt es bisher keine gesicherten Erkenntnisse. Es ist aus diesem Grund von wirtschaftlichem und wissenschaftlichem Interesse, die Feuchte- und Witterungsbeständigkeit dieses Werkstoffes näher zu untersuchen sowie durch gezielte Modifizierungen bei der MDF-Herstellung zu verbessern. Als wesentliche Voraussetzung für eine erfolgreiche Werkstoffentwicklung wird neben einer ausreichend feuchtebeständigen Verleimungsqualität (durch Typ und Anteil des gewählten Bindesystems signifikant beeinflussbar) die Quellungsmodifizierung der verwendeten Holzfasern angesehen.

Verschiedene Untersuchungen zum Einfluss der Faserstoff-Aufschlussbedingungen bestätigen deren wesentlichen Einfluss auf den Zerfaserungsprozess, die resultierende Faserstoffqualität sowie auf die Eigenschaften damit hergestellter Werkstoffe. Im Jahre 1934 erfolgte die industrielle Einführung des Defibratorverfahrens (thermo-mechanischer Holzaufschluss). Das Verfahren basiert auf der Zerfaserung feuchter lignocellulosehaltiger Fasermaterialien bei hohen Temperaturen von bis zu 180 °C. Bei diesen Temperaturen plastifiziert („schmilzt“) die Mittellamelle der Zellen, die aus Lignin und anderen inkrustierenden Stoffen (z. B. Kohlenhydraten) besteht. Nach dem Erweichen lassen sich die Fasermaterialien zwischen den Mahlscheiben praktisch ohne Beschädigung und mit stark verringertem Kraftbedarf freilegen und voneinander lösen. Der Ligningehalt ändert sich während dieser Behandlung nicht.

¹ Tricoya[®] ist eine von Titan Wood im März 2009 vorgestellte Modifizierungs-Technologie für Späne und Fasern und stellt eine Weiterentwicklung des aus dem Vollholzbereich bekannten Accoya[®]-Verfahrens dar.

1939 publizierte *Asplund* die wesentliche Abhängigkeit des Energiebedarfs von der Zerfaserungstemperatur bei der Zerfaserung des Holzes /*Asplund 1939*/. Dabei stellte er fest, dass der Kraftbedarf für die Defibrierung von Holz mit zunehmender Zerfaserungstemperatur aufgrund der vorstehend beschriebenen Plastifizierung der Mittelamelle sinkt, insbesondere oberhalb von 150 °C bei Laubhölzern und 160 °C bei Nadelhölzern (Abbildung 2). Im Ergebnis können die Zellen bei einem insgesamt reduzierten spezifischen Energieaufwand aus dem Faserverband des Holzes herausgelöst werden.

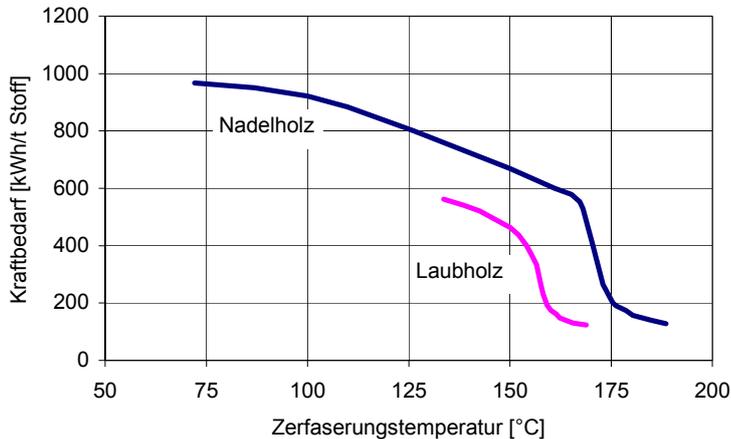


Abbildung 2 Abhängigkeit des Energieverbrauchs beim Defibrieren von Nadel- und Laubholz von der Zerfaserungstemperatur /*Asplund 1939*/

In späteren Arbeiten untersuchte *Asplund* den Zusammenhang zwischen dem Gewichtsverlust von Kiefernholz hackschnitzeln und den Aufschlussbedingungen bei der Zerfaserung. Dabei stellte er fest, dass eine weitere Erhöhung des Druckes und damit der Temperatur im Hinblick auf die mit der Temperatur rasch zunehmende Hydrolyse der Holzpolyosen² unzweckmäßig ist (Abbildung 3) /*Asplund 1949*/. Als übliche Werte wurde für die Zerfaserung von Nadelholz ein Druck von 11 kg/cm² und für Laubholz ein Druck von 10 kg/cm² angegeben.

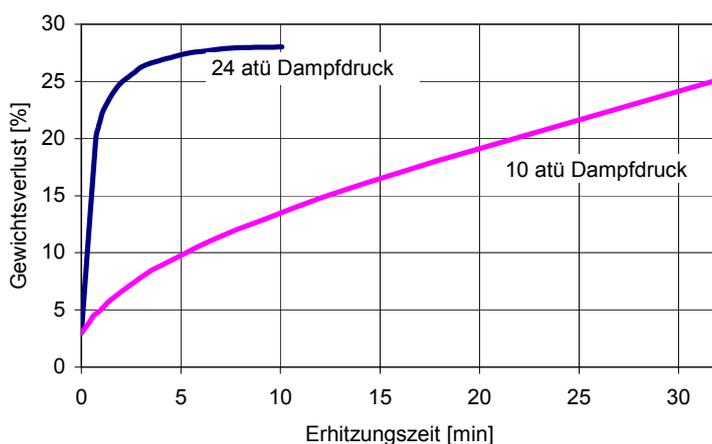


Abbildung 3 Abhängigkeit des Gewichtsverlustes von Kiefernholz hackschnitzeln von der Erhitzungszeit und dem Dampfdruck bei der Zerfaserung /*Asplund 1949*/

² Bezeichnung für die Hemicellulose des Holzes mit den Hauptbestandteilen Pentosan und Hexosan /*Staudinger, Reinicke 1939*/.

Der ausgeprägte Einfluss der wasserlöslichen Faserstoffbestandteile auf die Wasseraufnahme von im Trockenverfahren (ohne Zusatz von Bindemitteln) hergestellten harten Faserplatten wurde von /Šisler und Kéda 1962/ nachgewiesen. Pecina bestätigte, dass die Bindefestigkeit bindemittelfreier Faserplatten vom Aufschlussverfahren des Holzes beeinflusst wird /Pecina 1980, 1981a und 1981b/. Japanische Untersuchungen zur Entwicklung klebstofffreier Faserplatten zeigen, dass die bei einem Dampfdruck von 8 bar und Kochzeit von bis zu 30 min aufgeschlossenen Kenafmaterialien die Herstellung von Platten mit hoher Querzug- und Biegefestigkeit sowie niedriger Dickenquellung ermöglichen. Durch die Verlängerung der Heißpresszeit bzw. mit der Erhöhung der Heißpresstemperatur bei der Plattenherstellung konnten die Quellwerte nochmals reduziert sowie die Biege- und Quertzeigenschaften nach 12 Monaten Freilandbewitterung verbessert werden /Xu et al. 2006; Okuda et al. 2006; Okuda, Sato 2008/.

Für MDF sind die Aufschlussbedingungen bei der Zerfaserung von wesentlicher Bedeutung. Bei den im Zeitraum 1971 bis 1973 in Zusammenarbeit zwischen der damaligen Defibrator AB und dem Institut für Holztechnologie Dresden durchgeführten Untersuchungen wurde nachgewiesen, dass steigender Vorwärmdruck bzw. eine verlängerte Vorwärmzeit die hygri-schen Eigenschaften UF-Harz-gebundener MDF wesentlich beeinflussen /Kehr, Jensen 1971; Gran, Bystedt 1973; Kehr 1977/. Dabei beeinflusste die Temperatur bei der Dampfbehandlung des Holzes (steaming temperature) die Eigenschaften der aus diesen Faserstoffen hergestellten MDF in stärkerem Maße als die Behandlungsdauer mit Dampf (steaming time). Die maximalen Aufschlusstemperaturen lagen bei 190 °C. Auf eine weitere Erhöhung der Temperatur wurde im Hinblick auf die analog zur Temperatur zunehmende Hydrolyse der Holzpolyosen verzichtet.

Burmester stellte fest, dass bei optimal abgestimmten Bedingungen von Feuchte, Wärme und Druck (FWD-Verfahren) die Feuchteverformung (Quellung und Schwindung) holzartenabhängig um 52 bis 75 % vermindert werden konnte /Burmester 1970, 1973/. Auch die Dickenquellung von aus wärmebehandelten Spänen hergestellten Spanplatten war um ≈ 50 % reduziert. Bestätigend dazu ergaben die Untersuchungen von Giebler, dass nach dem FWD-Verfahren vergütete Spanplatten, Hartfaserplatten und OSB signifikant verbesserte Dickenquellungswerte nach Wasserlagerung aufwiesen /Giebler 1983/. Es wird angenommen, dass solche Effekte auch auf MDF übertragbar sind.

Die Ergebnisse von Roffael et al. /1994, 1995/ und Schneider et al. /2000/ zeigen, dass die Erhöhung der Vorwärmtemperatur auf 180 °C bei der Faserstoffherzeugung zu besseren Festigkeiten und Dickenquellungsergebnissen damit hergestellter MDF führt. Als Bindemittel für die MDF-Herstellung setzten Roffael et al. melaminverstärkte UF-Harze und PMDI-Klebstoffe ein, während bei Schneider et al. UF-Harze verwendet wurden.

Erkenntnisse zum Einfluss intensivierter Kocherbedingungen (Vorwärmdrücke ≥ 12 bar, ~ 188 °C und/oder verlängerten Vorwärmzeiten ≥ 4 min) bei der Faserstoffherstellung auf die Eigenschaften von MDF mit erhöhter Feuchtebeständigkeit der Verleimung wurden bisher nicht publiziert.

Unabhängig von der gewählten Verfahrenstechnologie zur MDF-Herstellung nimmt die Zerfaserung des Holzrohstoffes eine Schlüsselstellung ein. Als erste Stufe in der Folge laufender Stoffänderungsprozesse beansprucht dieser Teilprozess nach Informationen verschiedener Produzenten teilweise bis zu 50 %³ der Gesamtaufwendungen an elekt-

³ Dieser Wert wird maßgeblich durch anlagenspezifische Parameter, Verschleißgrad der Mahlscheiben sowie durch den eingesetzten Rohstoff beeinflusst und schwankt (teilweise auch innerhalb eines Werkes) zwischen 40 und 50 % des spezifischen Gesamtenergiebedarfs der MDF-Herstellung. Speziell die Verwendung von Industriestholz (Sägespäne etc.) bedingt einen entsprechend höheren Verbrauch an Elektroenergie bei der Zerfaserung.

rischer Energie und legt durch die gewählten Verfahrensbedingungen wesentliche Grenzen für die physikalisch-mechanischen Kennwerte der MDF fest. Höhere Zerfaserungs-/Vorwärmdrücke bzw. verlängerte Vorwärmzeiten implizieren eine stärkere Plastifizierung der Hackschnitzel und wirken sich damit positiv auf eine Reduzierung des Bedarfs an Elektroenergie bei der Zerfaserung aus. Die notwendigerweise höheren Dampf (Wärme)-Energienmengen zur Erzeugung der intensiveren Kocheinstellungen stehen in MDF-Werken i. d. R. zur Verfügung und sind damit im Verhältnis zur Elektroenergie auch deutlich weniger kostenintensiv.

1.2 Zielstellung der Arbeit

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, den Einfluss der Faserstoff-Aufschlussbedingungen⁴ und des Bindemittels auf die Eigenschaften von MDF für eine Verwendung im Feucht- und Außenbereich zu untersuchen. Mit den angestrebten Forschungsergebnissen können Impulse zur notwendigen Produktdiversifikation von MDF gegeben werden.

Die durch die Aufschlussintensivierung hergestellten, quellungsmodifizierten MDF sollen sich bei erfolgreichem Nachweis einer dauerhaften Feuchtebeständigkeit des gesamten Werkstoffs unter Ausnutzung der materialspezifischen Vorteile für vielfältige Anwendungen eignen. Neben der Verwendung als hochbelastbare Trägerwerkstoffe für leimfreie Klickverbindungen von Laminatfußböden im stark beanspruchten Objektbereich werden dabei Einsatzmöglichkeiten für Wand- und Deckenverkleidungen sowie Profilleisten in Feuchträumen, Bad- und Küchenmöbeln (speziell in öffentlichen Gebäuden wie Krankenhäuser, Gaststätten oder Hotels) sowie für differenzklimabeanspruchte Haustüren gesehen.

Derartige MDF könnten durch den homogenen Dichteverlauf über den Plattenquerschnitt und die damit diesem Werkstoff innewohnende „freie“ Profilierfähigkeit (nicht an Gesenkform gebunden) bei gleichzeitig guter Beschichtungseignung entscheidende Vorteile gegenüber alternativen Produkten (u. a. Spanformteile) haben und stellen damit auch neue Anwendungen im nichttragenden Außenbereich, z. B. als Fassadenelemente, Ladenfronten und Werbeflächen, in Aussicht.

Die Grundlage für die Herstellung der quellungsmodifizierten MDF bildet neben dem Einsatz qualitativ hochwertiger Bindemittel in jeweils hohen Dosierungen insbesondere die Verwendung spezieller Holzfasernstoffe, die unter intensivierten (verschärften Aufschlussbedingungen mit gezieltem Überschreiten industrieüblicher Zerfaserungsparameter hergestellt werden. Durch Dampfdrücke im Kocher bis max. 16 bar (entspricht einer Temperatur von etwa 200 °C) und eine Verlängerung der Verweilzeit bis 8 min soll eine intensivere hydrothermische Vorbehandlung der Hackschnitzel vor der Faserstoff-Herstellung erreicht werden.

Im Interesse einer Erweiterung bestehender sowie der Erschließung neuer Einsatzgebiete werden die mit der Aufschlussverschärfung einhergehende Beeinträchtigung der Biegeeigenschaften sowie eine Reduzierung der Holzausbeute und ein höherer Wärmeenergiebedarf für die Dampferzeugung akzeptiert. Vorteilhafterweise sollte sich pa-

⁴ Unter Aufschlussbedingungen werden die Prozessparameter absoluter Dampfdruck (und die dementsprechende Sattedampftemperatur) sowie Verweilzeit im Kocher unmittelbar vor dem Refiner verstanden, wobei davon ausgegangen wird, dass diese Parameter auch bei der eigentlichen Zerfaserung vorliegen. Bereits im Außenring des Refinergehäuses („Sammelkanal“ vor Abführung des Faserstoffs in die Blasleitung) liegt abhängig vom der eingestellten Dampfdruckhöhe ein geringfügig reduzierter Dampfdruck vor (abhängig u. a. vom Zerfaserungsmaterial sowie von Mahlscheiben-Spalt, -Geometrie, -Abnutzungsgrad), dem in der Praxis durch zusätzlich eingebrachten Dampfdruck entgegengewirkt wird.

rallel dazu durch die stärkere Plastifizierung der Hackschnitzel eine merkliche Reduzierung des Bedarfs an Elektroenergie bei der Zerfaserung ergeben.

Schwerpunkt bilden Untersuchungen zur Herstellung von MDF mit hoher Feuchte- und Witterungsbeständigkeit. Dabei sollen Abhängigkeiten der Feuchte- und Witterungsbeständigkeit von technologischen und stofflichen Parametern bei der labortechnischen MDF-Fertigung abgeleitet werden. Als maßgebende Größen für die Erhöhung der Feuchtebeständigkeit der Verklebung werden neben der Dickenquellung nach Wasserlagerung insbesondere die Dickenquellung nach Zyklustest sowie die Querzugfestigkeit nach Kochprüfung angesehen.

Der Nachweis der Witterungsbeständigkeit der Platten erfolgt über die Prüfung ausgewählter MDF-Eigenschaften nach technischer und natürlicher Alterung. Dabei werden nach Auslagerung der unbeschichteten, schmalflächenversiegelten MDF ins Freiland zu definierten Zeitpunkten Proben für die physikalischen Eigenschaftsprüfungen (u. a. Bestimmung der Veränderung von Querzug-, Biege- und Quellungswerten) entnommen. Die Auswertung beinhaltet neben der Diskussion der absoluten Ergebnisse auch den prozentualen Bezug der ermittelten Kennwerte auf die Ausgangseigenschaften.

Die Untersuchungen zur technischen Alterung werden an repräsentativen MDF-Industriemustern mit von den Herstellern ausgewiesener, erhöhter Feuchtebeständigkeit der Verklebung begonnen. Die gewonnenen Erkenntnisse dienen als Vergleichsbasis für die Untersuchungen an den labortechnisch erzeugten MDF. Aus den Ergebnissen der Bewitterungsverfahren werden Zusammenhänge zwischen Witterungsbeständigkeit und ausgewählten Parametern der MDF-Herstellung hergeleitet.

2 Stand der Wissenschaft und Technik

Die Ausführungen zum Stand der Wissenschaft und Technik beginnen mit grundlegenden Feststellungen zur Holzzusammensetzung und zu Holzeigenschaften. Dabei erfolgt nach Ausführungen zum Holzaufbau speziell eine Betrachtung der Ursachen für das hygroskopische Verhalten sowie zu Veränderungen der chemischen Zusammensetzung von Holz bei thermischer Behandlung.

Nach einer Vorstellung bekannter Holzvergütungsverfahren wird dann zur Technologie der Fertigung von MDF übergeleitet, wobei der Herstellung von Faserstoffen eine zentrale Rolle zukommt. Anschließend erfolgen detaillierte Ausführungen zur MDF-Technologie unter Berücksichtigung von direkten und indirekten Zusammenhängen variabel gestaltbarer Prozessparameter auf Faserplatteneigenschaften.

An Aussagen zur Feuchte-, Hydrolyse- und Witterungsbeständigkeit von MDF schließen Kapitel zu aktuellen und perspektivischen Einsatzgebieten, zu normativen Vorgaben an mitteldichte Faserplatten sowie zur wirtschaftlichen Situation und zum Produktionsvolumen dieser Werkstoffe an. Abschließend werden bisherige Forschungsarbeiten und Patente zur Aufschlussintensivierung und ihre Auswirkungen auf spätere Werkstoffeigenschaften (inkl. Aussagen zu flüchtigen organischen Verbindungen beim Holzaufschluss) sowie zu Erkenntnissen bei der Herstellung leimfreier MDF vorgestellt.

2.1 Grundlagen

2.1.1 Anatomischer Aufbau des Holzes

Holz ist kein gleichmäßiger, homogener Stoff mit einheitlichem Gefüge, sondern ein Gewebe aus sehr unterschiedlichen Zellen, die im lebenden Baum die Aufgaben der Wasserleitung, des Stoffwechsels, der Speicherung von Reservestoffen sowie der Festigung erfüllen. Für jede dieser Aufgaben gibt es bestimmte Zellformen */Kollmann 1951/*. Als ein sekundäres Dauergewebe der Bäume und Sträucher wird Holz durch eine ringförmige Bildungsschicht, das Kambium, erzeugt.

Sowohl im Nadel- als auch im Laubholz weisen die Leitungs-, Speicher-, und Festigungszellen charakteristische Merkmale auf. Aufgrund dieses unterschiedlichen Aufbaus sind die verschiedenen Zellarten auch für die technische Verarbeitung qualitativ verschieden geeignet */Lampert 1967/*.

Den einfachsten und zugleich regelmäßigsten anatomischen Bau besitzen die Nadelhölzer, deren im Querschnitt vier- bis sechseckigen Tracheiden in radialen Reihen vom Kambium zum Mark verlaufen. Es ist zwischen Früh- und Spätholztracheiden zu unterscheiden. Die dünnwandigen und weitleumigen Frühholztracheiden sind über Hoftüpfel an den Radialwänden untereinander verbunden. Diese Hoftüpfelverbindungen dienen dem Wassertransport zwischen den Tracheiden. Die Spätholztracheiden sind dagegen dickwandig und englumig mit zugespitzten Enden und dienen der Festigkeit des Holzes. Mit etwa 90 Volumenprozent bilden die Tracheiden die überwiegenden anatomischen Bausteine und zeichnen damit auch ausschlaggebend für die Eigenschaften daraus hergestellter Faserstoffe verantwortlich. Holzstrahl- und Parenchymzellen sind nur in geringer Menge vorhanden, Gefäße kommen nicht vor. Zwischen den Holzstrahlen befinden sich bei harzhaltigen Hölzern Harzgänge, die bei Fichte von dickwandigen und bei Kiefer von dünnwandigen Zellen umgeben sind */Lampert 1967/*. Dieser Zelltyp wird auch als Epithelzelle bezeichnet (Tabelle 1).

Tabelle 1 Anordnung, Form und Funktion der Nadelholzzellen /Autorenkollektiv 2008/

Zelltyp	Anordnung	Form	Funktion
Frühholztracheide	axial	langgestreckt	Wasserleitung
Spätholztracheide	axial	langgestreckt	Festigung
Holzstrahltracheide	radial	langgestreckt	Wasserleitung
Holzstrahlparenchym	radial	prismatisch	Speicherung
Längsparenchym	axial	prismatisch	Speicherung
Epithelzellen	axial/radial	rundlich bis oval	Harzausscheidung

Die Fasertracheiden und Libriformfasern bilden das Festigungsgewebe der Laubhölzer. Die Fasertracheiden sind nicht so lang wie die Libriformfasern und haben behöft Tüpfel. Als leitende Zellen dienen Gefäße, die unter Auflösung der Zwischenwände zu durchgehenden Leitungsbahnen aneinandergereiht sind. Dadurch ist - gegenüber Nadelholz - eine zehnmal größere Steiggeschwindigkeit des Wassers gegeben. Die Gefäßwände sind verhältnismäßig dick und allseitig reich behöft, was den Stoffaustausch mit angrenzenden Zellen ermöglicht.

Über die Gefäßanordnung auf dem Querschnitt wird zwischen ringporigen Laubhölzern (u. a. Ulme, Eiche, Esche, Robinie, Edelkastanie) und zerstreutporigen Laubhölzern (u. a. Rotbuche, Birke, Erle, Weide, Platane, Linde) unterschieden. Das Holzparenchym hat untergeordnete Bedeutung und ist hauptsächlich um Gefäße und Holzstrahlen gelagert. Der Anteil ist jedoch meist höher als bei Nadelholz. Die Parenchymzellen dienen der Speicherung von Stärke, Fetten, Wachsen und Gerbstoffen, wandeln diese Stoffe um und geben sie bei Bedarf wieder ab /Lampert 1967/.

Die nachfolgende Abbildung gibt einen Einblick in den mikroskopischen Holzaufbau mit den beschriebenen Unterschieden zwischen Nadel- und Laubholz.

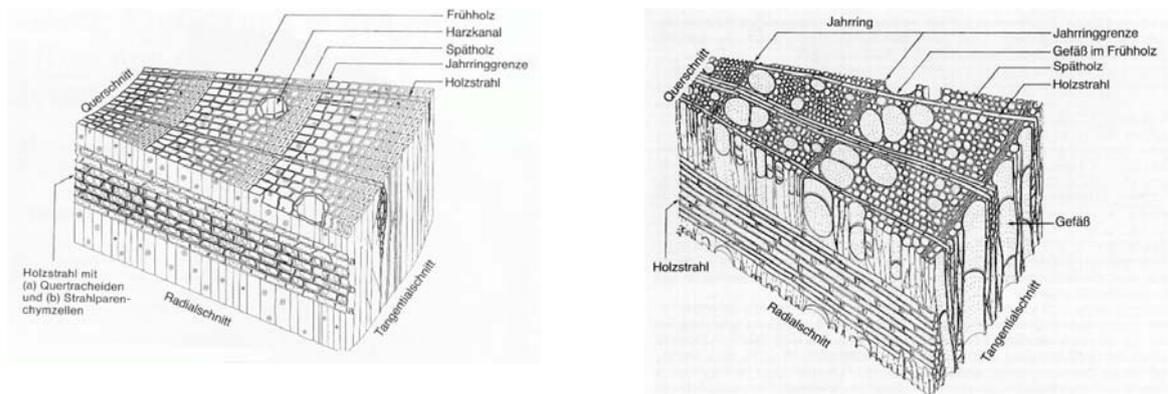


Abbildung 4 Mikroskopischer Aufbau des Holzes (links Nadelholz, rechts Laubholz) /Stähli 1992/

Nanoskopisch betrachtet besteht die Zellwandstruktur einer Nadelholztracheide bzw. der Libroformfaser eines Laubholzes aus Tertiär-, Sekundär- und Primärwand sowie aus Übergangs- und Mittellamelle (Abbildung 5).

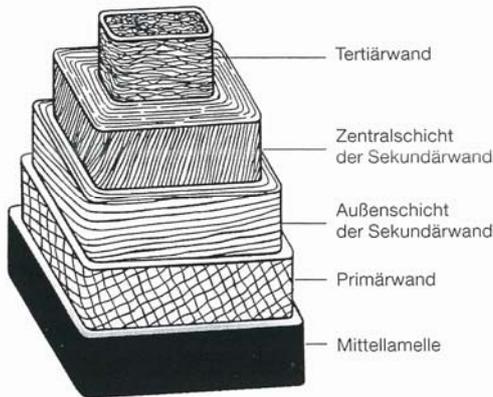


Abbildung 5 Zellwandmodell einer Nadelholztracheide, schematisch nach Liese /Wagenführ 1999/

Die äußerste Schicht einer Zelle (Primärwand) enthält Cellulosefibrillen mit hohem Ligningehalt. Die Sekundärwand wird unterteilt in eine dünne äußere Sekundärwand (S1 – auch als Überganglamelle bezeichnet), die den Hauptteil der Zellwand bildende zentrale Sekundärwand (S2 – für physikalisch mechanische Holzeigenschaften wichtig) und die Tertiärwand (S3), die wiederum sehr dünn die Zellwand zum Lumen abgrenzt. Die unterschiedlichen Dicken der Zellwandschichten sowie die differgenten Cellulosefibrillenverläufe und die damit einhergehende ungleiche Verteilung von Cellulose, Hemicellulose und Lignin geben in ihrer Einheit als Zelle ein mechanisch sehr widerstandfähiges Gerüst /Autorenkollektiv 2008/.

Die außenliegende Mittellamelle als isotrope Schicht zwischen den aneinanderstoßenden Zellen (auch als Interzellulärsubstanz bezeichnet) enthält keine Cellulose, sondern Pektinstoffe und Lignin. Mit der sich anschließenden Primärwand wird die Mittellamelle zur sog. „Mittelschicht“ zusammengefasst. Wesentliche Aufgabe der später beschriebenen Zerfaserungsverfahren ist es, die zusammenbindende Wirkung dieser Mittelschicht – die die höchste Konzentration an Lignin aufweist und die Fasern miteinander verbindet – aufzuschern und einzelne Fasern aus dem Faserverband des Ausgangsmaterials herauszulösen. Diese Auftrennung soll nach Möglichkeit die nativen Ausprägungen der Faser nicht beeinträchtigen, um die naturgegebenen mechanischen Fasereigenschaften in den Holzfaserwerkstoff zu übertragen.

2.1.2 Chemische Zusammensetzung des Holzes

Von der chemischen Zusammensetzung her besteht die verholzte pflanzliche Zellwand zu mehr als 95 % aus den Hauptkomponenten Cellulose (~ 40 %), Lignin (~ 30 %), Hemicellulose und Polyose (~ 25 %). Die verbleibenden ~ 5 % bilden die akzessorischen Bestandteile (u. a. Extraktstoffe, mineralische Bestandteile), die trotz der geringen Menge die spätere Holzverwertung entscheidend beeinflussen können /Autorenkollektiv 2008/. Die Verteilung der Hauptbestandteile über die Zellwand ist Bestandteil der folgenden Abbildung.

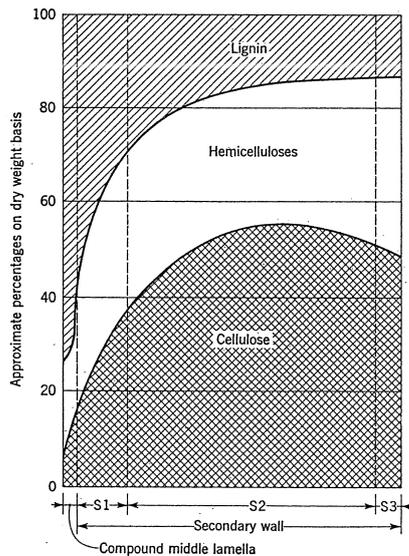


Abbildung 6 mittlere Verteilung der wichtigsten Holzbestandteile über den Zellwand-Querschnitt einer Nadelholztracheide /Sundholm 1999/

Hervorzuheben ist der hohe Ligninanteil auf der Zellwandaußenseite und die Abnahme des Anteils in Richtung Lumen auf weniger als 15 %, während sowohl Cellulose als auch Hemicellulose anteilig in Richtung Lumen zunehmen.

Die Struktur der Cellulose basiert auf linearen Ketten glycosidisch gebundener Glucosemoleküle. Diese (auch Glucanketten genannten) Verbindungen lagern sich zu Elementar- bzw. Mikrofibrillen mit zwei möglichen unterschiedlichen kristallinen Ausformungen zusammen. Die mittlere Länge einer Glucankette wird durch den Polymerisationsgrad (DP) gekennzeichnet, der als eine wichtige Kenngröße u. a. Rückschlüsse auf die Zugfestigkeit des Holzes zulässt. Die Cellulose ist nicht wasserlöslich und ebenso wenig schmelzbar /Autorenkollektiv 2008/.

Die Hemicellulose ist heterogen aufgebaut, basiert aber gleichfalls auf polymerisierten Zuckerbausteinen (Hexosen und Pentosen). Der DP-Wert der Hemicellulose ist gegenüber Cellulose weitaus geringer. Zudem ist Hemicellulose um den Faktor 1,6 hydrophiler als Cellulose. Resultierend daraus gilt Hemicellulose als maßgebliche Substanz für das Quellen und Schwinden des Holzes. Die Hemicellulosen werden vereinfacht nach der Hauptkette in Xylane und Glucomane eingeteilt, weitere Differenzierungen erfolgen über die Seitengruppen. Die Hemicellulose findet ihre Ausformung an der Oberfläche der Cellulosemikrofibrillen und dient in Richtung des interfibrillären Raums als Templat für Lignin. Als Folge einer thermischen Behandlung des Holzes spalten Hemicellulosen Ameisen- und Essigsäuren sowie Methan und CO₂ ab. Aus den Xylanen entstehen dann bei niedrigen pH-Werten Furfurale, die als reaktionsfreudige Substanz zu Kondensationsreaktionen mit sich selbst sowie mit Lignin neigen /Autorenkollektiv 2008/.

Lignine (lat. Lignum = Holz) sind amorphe, polymere Phenylpropanoide, die für die Druckfestigkeit der Zellwand verantwortlich sind. Über Anbindungen (durch kovalente Bindungen und Nebenvalenzen) an die Hemicellulose und die Polymerisation untereinander entstehen große zusammenhängende Ligninstrukturen (auch als „Verholzung“ bezeichnet). Nadelholzlignine bestehen zu ~ 90 % aus G-Ligninen (mit einem geringeren Methoxygruppengehalt), die in Position 5 des aromatischen Rings leicht für elektrophile Substitutionsreaktionen zugänglich sind. Abgespaltenes Furfural kann reagieren und bedingt Quervernetzungen, die im Falle von Nadelholz größer ausfallen, was auch durch einen etwas höheren Ligninerweichungspunkt (versus Laubholz) zum Ausdruck kommt /Autorenkollektiv 2008/.

Die Erweichungstemperatur kennzeichnet dabei den Bereich, in dem das Lignin aus einem glasartigen in einen plastisch fließenden Zustand übergeht. Für absolut trockene-

nes (atro) Fichtenlignin liegt die Temperatur dabei je nach Gewinnungsmethode zwischen 180 und 193 °C, während für Buchenholz mit 165 bis 180 °C niedrigere Werte ermittelt wurden. Die Erweichungstemperatur ist maßgeblich vom Holzfeuchtegehalt abhängig. So reduziert ein Feuchteanstieg von 0 auf 10 % die Erweichungstemperatur von Fichtenlignin um etwa 60 %. Steigt der Feuchtegehalt auf 30 %, erweicht das Lignin bereits bei Temperaturen um 100 °C /Goring 1963/.

Lignin weist eine hohe Empfindlichkeit gegenüber photometrischen Reaktionen auf, infolge dessen ungeschützte Holzoberflächen nach intensiver UV-Einstrahlung delignifizieren und vergrauen.

Die akzessorischen Bestandteile des Holzes, auch als Extraktstoffe bezeichnet, sind über den gesamten Holzkörper entsprechend ihrer Funktion (mit zum Teil olfaktorischen, wasserabweisenden und imprägnierenden Eigenschaften) verteilt, wobei unterschieden wird zwischen

- Fetten, Fettsäuren und Wachsen,
- Terpenoiden und
- phenolischen Verbindungen.

2.1.3 Hygroskopisches Verhalten von Holz und Holzwerkstoffen

Das hygroskopische Verhalten kennzeichnet die Eigenschaft von Stoffen, aus einem Wasserdampf-Gas-Gemisch Wasser aufzunehmen. Die absorbierte Masse ist von der Wasserdampfkonzentration der Umgebung und der Temperatur abhängig. Holz und Produkte aus Holz zählen aufgrund ihres anatomischen Aufbaus (und der damit verbundenen Möglichkeit, Wasser zu speichern oder abzugeben) als hygroskopische Werkstoffe und können beträchtliche Anteile an Feuchtigkeit (bis zum Fasersättigungsbereich⁵) aufnehmen. Der Holzfeuchtebereich zwischen dem Darrzustand (0 % Feuchte) und dem Fasersättigungspunkt wird hygroskopischer Bereich genannt /Kollmann 1951; Autorenkollektiv 2008/.

Ergebnis der Feuchteaufnahme- bzw. -abgabe-Prozesse ist das Quell-Schwindverhalten, das in den drei Schnittrichtungen aufgrund des anisotropen Verhalten⁶ des Holzes sehr unterschiedlich ausfällt. So beträgt das maximale Quell-/Schwindmaß⁷ mitteleuropäischer Nutzholzarten axial (in Faserrichtung) bis zu 0,4 %, radial bis zu 4,0 % und tangential bis zu 10 %. Neben den hygroskopischen unterscheiden sich nahezu alle weiteren Holzeigenschaften in den drei anatomischen Grundrichtungen des Holzes (axial, radial, tangential; vgl. dazu auch vorstehenden Gliederungspunkt).

Bei gleichbleibender Temperatur und relativer Luftfeuchte stellen sich in Holz und auch in Holzwerkstoffen zu diesen Klimafaktoren konforme Feuchtegehalte, die sog. Gleichgewichtsfeuchten ein. Die Feuchteänderung verläuft bei Vollholz bei steigender Feuchte auf einer anderen Kurve als bei fallender (Hysterese). Die Einwirkung von Wärme und/oder Wasser bei der Herstellung von Holzwerkstoffen ruft im Holz chemische Ver-

⁵ Fasersättigungsbereich: Zustand, bei dem im Holz Wasser derart vorhanden ist, dass die Zellwände vollständig mit Wasser gesättigt sind und in keinem Teil der lichtmikroskopisch sichtbaren Kapillarstruktur (Zellhohlräume) freies Wasser enthalten ist. Der Fasersättigungsbereich liegt abhängig von der Holzart bei 22 bis 36 % /Kollmann 1951; Autorenkollektiv 2008/.

⁶ Die Anisotropie kennzeichnet die Richtungsabhängigkeit einer Eigenschaft oder eines Vorgangs.

⁷ Das Quell-/Schwindmaß (auch Quellungs-/Schwindungskoeffizient bezeichnet) gibt die Maßänderung pro Prozent Holzfeuchteänderung an.

änderungen hervor, die auch Änderungen der physikalischen Eigenschaften zur Folge (u. a. Sorption⁸) haben. Die chemischen Hauptbestandteile des Holzes sind in folgender Weise an der Sorption beteiligt /Burmester 1970/:

1. Hemicellulosen sind wegen ihrer starken Hydrophilie und ihrem relativ hohen Anteil an der Holzzusammensetzung Hauptträger der Sorption.
2. Cellulose ist ein Sorbens beträchtlichen, die Hemicellulose jedoch keineswegs erreichenden Ausmaßes. Die Neigung zur Kristallisation und damit zur Absättigung großer Anteile ihrer freien OH-Gruppen schränkt die Hydrophilie der Cellulose ein.
3. Das größtenteils in der Mittellamelle eingelagerte Lignin sorbiert nur geringfügig und blockiert darüber hinaus dort, wo es Polysaccharide umschließt, deren sorptive Entfaltung.

Neben dieser Sorptionsvergütung kann durch den Zusatz bestimmter Vergütungs- und Bindemittel das Sorptionsvermögen der Werkstoffe weiter vermindert werden. Aus diesem Grund weisen harnstoffharzverleimte Holzspan- und -faserplatten gegenüber Nadelholz i. d. R. günstigere Sorptionsisothermen (und niedrigere Gleichgewichtsfeuchten bei hohen relativen Luftfeuchten) auf /Kehr 1990/. Im Unterschied dazu ergeben sich für phenolharzverleimte Holzspan- und -faserplatten aufgrund der in den PF-Harzen enthaltenen hygroskopischen Salze höhere Gleichgewichtsfeuchten.

Burmester stellte fest, dass bei optimal abgestimmten Bedingungen von Feuchte, Wärme und Druck (FWD-Verfahren) die Feuchteverformung (Quellung und Schwindung) holzartenabhängig um 52 bis 75 % vermindert werden konnte /Burmester 1973/.

Den aus diesem hygroskopischen Verhalten resultierenden unterschiedlichen Dimensionsänderungen in den anatomischen Grundrichtungen des Holzes wird mit der Zerkleinerung des Holzes in Kanthölzer, Bretter, Lamellen, Furniere, Späne und Fasern bei der Herstellung von Produkten aus Holz begegnet. Dabei gilt: Je größer der Aufschlussgrad, umso homogener sind die resultierenden Werkstoffeigenschaften. Trotz aller Bemühungen hat aber auch eine Holzwerkstoffplatte aus span- oder faserförmigen Partikeln in der Dicke gegenüber der Breite oder Länge ein um 5- bis 10-fach höheres Quellungs-/Schwindungspotential.

Zur Einschränkung dieses Potentials werden bei der Herstellung von MDF einerseits dem Harnstoffformaldehydharz quellungsvergütende Melaminanteile zugesetzt und andererseits bei der Herstellung von hochdichten Trägerfaserplatten für Laminatböden Hydrophobierungsmittelanteile von bis zu 2,5 % (bez. auf atro Fasern) eingesetzt. Die Einhaltung normativer oder werkspezifischer Anforderungen für die Dicken- und Kantenquellung kann damit gewährleistet werden, eine signifikante Reduzierung oder irreversible Vermeidung von Quellen und Schwinden der Faserplatten ist damit jedoch nicht möglich.

2.1.4 Verhalten von Holz bei thermischer Behandlung

Das Verhalten von Holz bei erhöhter Temperatur und die daraus folgenden Änderungen seiner Eigenschaften waren schon Gegenstand zahlreicher Untersuchungen. Zusammenfassend ist dabei festzustellen, dass Hemicellulose (Polylose) die temperaturempfindlichste chemische Holzkomponente ist. Am unempfindlichsten ist Lignin, Cellulose

⁸ Die Sorption kennzeichnet die Vorgänge bei der Aufnahme (Adsorption) eines Stoffes durch einen anderen oder bei dessen Abgabe (Desorption) /Kehr 1990/.

liegt zwischen beiden. Der Abbaugrad, gekennzeichnet als Gewichtsverlust, hängt von der Temperaturhöhe und Zeitdauer der Behandlung ab /Burmester 1970/. Lange Einwirkzeiten bedingen dabei bei Temperaturen zwischen 100 und 200 °C Gewichtsverluste (d. h. eine Zersetzung), die aber erst oberhalb 200 °C rascher deutlich werden /Kollmann 1951/. Ab Temperaturen von etwa 215 °C beginnt dann im Holz eine exotherme Reaktion, die ihr Maximum bei 270 °C erreicht /Domanský, Rendoš 1962/.

Grundlegende chemisch-physikalische Charakteristika zur Hitzestabilisierung von Holz erfolgten durch die Forschungsarbeiten des Forest Product Laboratory Madison /Stamm et al. 1946/ sowie mit den Arbeiten von Runkel /1951/, Kollmann /1951/, Sandermann und Augustin /1963, 1964/, Kollmann und Fengel /1965/ sowie Burmester /1970, 1973/.

Dabei wurde u. a. festgestellt, dass in Temperaturbereichen zwischen 100 und 180 °C die Abnahme des Trockengewichts bei Eiche und Kiefer neben der Wasserabspaltung durch Desorption und Dehydratisierungsreaktionen hauptsächlich auf den Abbau der niedermolekularen Hemicellulosen zu flüchtigen Produkten zurückzuführen ist. Pentosane werden schneller abgebaut als Hexosane /Kollmann, Fengel 1965/. Unter den thermischen Bedingungen, unter denen bevorzugt ein Abbau der Hemicellulose erfolgt, wird die Wasserdampfadsorptionskapazität und das Quellvermögen von Holz reduziert /Kollmann, Schneider 1963/.

Die Untersuchungen von Schneider /1971/ über den Einfluss der thermischen Holzbehandlung im Bereich von 100 bis 200 °C ergaben, dass als Folge einer Wärmebehandlung (für 48 h bei 180 °C) vor allem die dynamischen Holzeigenschaften, z. B. die Schlagzähigkeit, um bis zu 80 % abnehmen, während das Elastizitätsmodul und die Druckfestigkeit in wesentlich geringerem Maße beeinflusst werden.

Technisch wichtig sind als thermische Reaktionen die Plastifizierung des Holzes⁹ und seine Dimensionsstabilisierung.

Das „thermoplastische“ Verhalten von Holz wird sowohl bei einer Zerfaserung nach dem Mason-Prozess als auch nach dem Asplund-Defibrator-Verfahren unter Anwendung entsprechender Feuchte-, Temperatur- und Druckbedingungen für eine „zerstörungsfreie“ Zerfaserung genutzt /Runkel 1951/. Beim Masonverfahren bewirken dabei kurzzeitige Behandlungszeiten (40 s bei ~ 175 °C und 4 s bei 275 °C) einen Gewichtsverlust von ~ 25 % (flüchtige bzw. wasserlösliche Stoffe, u. a. Hemicellulose, Furfural) sowie tiefgreifende chemische Holzveränderungen („Aktivierung des Lignins“), die im Ergebnis die Herstellung von leimfreien Faserplatten ermöglichen.

Beim Asplundverfahren werden geringere Temperaturen (160 bis 180 °C) zur Anwendung gebracht, die hydrolytische Veränderungen im Holz hervorrufen. In der Folge werden nur etwa 10 % der flüchtigen Stoffe (i. d. R. Hemicellulose) abgespalten und das Lignin so weit plastifiziert, dass das Holz im anschließenden Defibrator ohne Beschädigung der Zellwände zerfasert werden kann /Runkel 1951/. Das Verfahren basiert auf der Zerfaserung feuchter lignocellulosehaltiger Fasermaterialien bei hohen Temperaturen von bis zu 180 °C. Bei diesen Temperaturen plastifiziert („schmilzt“) die Mittellamelle, die aus Lignin und anderen inkrustierenden Stoffen (z. B. Kohlenhydraten) besteht und die die Fasern im Holzgewebe zusammenbindet. Nach dem Erweichen lassen sich die Fasern zwischen den Mahlscheiben praktisch ohne Beschädigung und mit stark ver-

⁹ Durch Dämpfen, Kochen oder stärkeres Erhitzen kann die Holzsubstanz vorübergehend in einen plastisch verformbaren Zustand überführt werden. Als Ursachen werden chemische und kolloidale Veränderungen in der Zellwand angenommen, wie hydrolytische Spaltung von Wasserstoffbrücken und Lignin-Kohlenhydratverbindungen, Abbau von Hemicellulosen, verstärkte Quellung, wodurch die gegenseitige Verschiebbarkeit der Zellwandelemente (Fibrillieren) erleichtert wird /Autorenkollektiv 2008/

ringerten Kraftbedarf freilegen und voneinander lösen. Der Ligningehalt ändert sich während dieser Behandlung nicht.

In hohem Maße dimensionsstabiles Holz („Staywood“) entsteht unter Luftabschluss bei Temperaturen zwischen 120 und 320 °C /*Stamm et al. 1946*/. Dabei werden die Hygroskopizität und Schwindung durch intermolekulare Wasserabspaltung (und ggf. Etherbrückenbildung) herabgesetzt.

Einen wichtigen Beitrag zur Dimensionsstabilisierung von Holz leistete *Burmester* mit der Entwicklung des FWD-Verfahrens, bei dem unter optimierten Feuchte-, Wärme- und Druck-Bedingungen Feuchteverformungen (durch Quell- und Schwindprozesse) holzartenabhängig um bis 75 % vermindert werden konnten /*Burmester 1970, 1973*/. Gegenüber anderen Vergütungstechnologien hat das FWD-Verfahren einen Kostenvorteil, da keine zusätzlichen Rohstoffe in das Holz eingelagert werden müssen.

Im Druckautoklaven sind der Holzabbau und die Verminderung der Feuchteverformung 2- bis 7mal größer als in einer nicht komprimierten Atmosphäre bei ansonsten gleichen Bedingungen /*Giebeler 1983*/. Holzabbau (bis 20 % Gew.-%) und Verminderung der Feuchteverformung (bis zu 80 %) sind miteinander gekoppelt. Diese Korrelation ist aber stark holzartspezifisch. Der Gesamteffekt der Vergütung setzt sich aus zwei Komponenten zusammen /*Burmester 1973*/:

1. Es tritt, bezogen auf die Abmessungen vor der Vergütung, eine Vergrößerung der Darrabmessungen ein. Dieser „Blockierung“ genannte Vorgang kann durch Einlagerung von Abbauprodukten in den Zellwänden hervorgerufen werden.
2. Bezogen auf die Abmessungen vor der Vergütung sind zugleich die Endabmessungen beim Quellversuch beim FWD-Material reduziert. Als Ursache werden Vernetzungsreaktionen in den Zellwänden vermutet.

Burmester stellte fest, dass auch die Dickenquellung von aus wärmebehandelten Spänen hergestellten Spanplatten um ~ 50 % reduziert war. Bestätigend dazu ergaben die Untersuchungen von *Giebeler*, dass nach dem FWD-Verfahren vergütete Spanplatten, Hartfaserplatten und OSB signifikant verbesserte Dickenquellungswerte nach Wasserlagerung aufweisen /*Giebeler 1983*/. Es wird angenommen, dass solche Effekte auch auf Faserplatten nach dem Trockenverfahren (MDF) übertragbar sind.

2.1.5 Thermische Vergütung von Holz und Holzwerkstoffen

Es ist bekannt, dass sich die Eigenschaften von Holz und Holzwerkstoffen durch Temperatureinfluss verändern. Nachdem sich das von *Burmester* in den 1970er Jahren zur thermischen Behandlung von Holz entwickelte Feuchte-Wärme-Druck-Verfahren (FWD) wegen der Festigkeitsreduzierungen nicht zur Praxisreife durchsetzen konnte /*Militz 2000*/, wurde in den 1990er Jahren der Gedanke der Modifizierung von Holz durch Hitzebehandlung zur Herstellung von thermisch behandeltem Holz, sog. Thermoholz oder TMT (thermally modified timber) erneut aufgegriffen. Zu den bekannten Technologien zählen PLATO¹⁰-Verfahren, Öl-Hitze-Verfahren (Menz), Thermoholz-Verfahren, Mirako-Verfahren, FinnForest Thermo Wood (VTT)-Verfahren sowie Stellac-Verfahren /*u. a. EP 0922918; EP 0759137; AT 409184; WO 95/33170*/.

Mittlerweile gibt es im deutschsprachigen Raum (Deutschland, Österreich, Schweiz) Thermoholz-Produktionskapazitäten von ca. 50.000-60.000 m³, während sich die Kapa-

¹⁰ Providing Lasting Advanced Timber Option

zitäten im gesamten Europa mit steigender Tendenz auf ca. 200.000 m³ belaufen /Dünisch 2008/.

Das ursprüngliche Ziel der thermischen Behandlung war es, die für das Quellen und Schwinden des Holzes verantwortlichen endständigen Hydroxylgruppen in der molekularen Struktur des Holzes abzubauen, um die Anlagerung von Wasser an die Cellulosefibrillen und die Hemicellulosen des Holzes zu vermindern und damit u. a. die Feuchteaufnahme und Quellung zu reduzieren /Dünisch 2008/. Zusätzlich wird bei Temperaturen über 130 °C die chemische Struktur des Holzes derart verändert, dass die Zugänglichkeit des Holzes für einen Abbau durch holzerstörende Pilze deutlich vermindert wird /Boku 2002; Niemz 2008/.

Eine thermische Behandlung beeinflusst folgende Holzeigenschaften (Tabelle 2).

Tabelle 2 Vor- und nachteilige Veränderungen ausgewählter Holzeigenschaften durch eine thermische Behandlung /Großmann 2002; Mirako 2009/

Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> - Verringerung der Quellung und Schwindung, - Verringerung der Ausgleichsfeuchte des Materials, - Reduzierung innerer Spannungen, - Erhöhung der Dimensionsstabilität, - Verbesserung der Wärmedämmung, - Erzeugung von warmen Goldbraun- bis Schwarzbrauntönen über den gesamten Querschnitt, - Erhöhung der Dauerhaftigkeit gegen Pilzbefall und Witterungseinflüsse über den gesamten Querschnitt. 	<ul style="list-style-type: none"> - Verringerung der Biegefestigkeit und Bruchschlagarbeit, - Masseverlust und dadurch Verringerung der Rohdichte, - erhöhte Sprödigkeit, - evtl. Risse, - intensiver Geruch, - Mehrkosten durch die Behandlung.

Ausgewählte Untersuchungen zur thermischen Vergütung von Holzwerkstoffen werden nachfolgend aufgeführt:

Bei im Nassverfahren hergestellten harten Faserplatten können die physikalisch-mechanischen Eigenschaften durch eine Wärmevergütung verbessert werden. Diese kann bereits in der Heißpresse erfolgen, wodurch jedoch die Kapazität der Anlage reduziert wird. Deshalb wird die Hitzebehandlung bei 150 bis 180 °C über einen Zeitraum von drei bis sechs Stunden kontinuierlich in Kanälen oder diskontinuierlich in Kammern durchgeführt. Bei der thermischen Nachbehandlung ölprägnierter Faserplatten (sog. „Tempern“) darf die Heißluft aus Gründen der (Selbst-) Entzündungsgefahr 120 °C nicht überschreiten /Lampert 1966/.

Eine FWD-Vergütung (Temperatur 195 °C; Druck 10 bar, Behandlungsdauer 1 h) konnte die Dickenquellung (nach 24 h Wasserlagerung) von PF-Harz-gebundenen Span- und Faserplatten deutlich verbessern, wobei die Biegefestigkeit teilweise erhöht, aber auch teilweise reduziert wurde /Giebeler 1983/. Die Stapellagerung von PMDI-gebundenen OSB bei Temperaturen bis zu 180 °C zog eine teilweise Verbesserung der Eigenschaften nach sich /Ohlmeyer et al. 2003/. Eine Hitzebehandlung von Kiefernstrands reduzierte die Dickenquellung und verbesserte damit die Dimensionsstabilität von aus diesen Strands gefertigten OSB /Paul et al. 2006/. Die Querzugfestigkeit blieb unbeeinflusst. Del Menezzi et al. /2009/ untersuchten die thermische Nachbehandlung von Industrie-OSB in einer Einetagenpresse bei Temperaturen von 190 bzw. 220 °C. Die Behandlung führte zu einer verbesserten Dimensionsstabilität, indem die Dickenquellung, Wasseraufnahme und Ausgleichsfeuchte im Vergleich zu unbehandelten OSB gesenkt wurden. Der E-Modul reduzierte sich, während die weiteren Eigenschaften nicht negativ beeinträchtigt wurden.

In einer Studie von *Mohebbi et al. /2008/* wird der Einfluss einer hydrothermischen Behandlung von Fasern zur MDF-Herstellung auf die physikalischen und mechanischen Eigenschaften von MDF untersucht. Die Behandlung hat keinen Einfluss auf die Wasseraufnahme, während sich die Dickenquellung verbessert und die Platten formstabiler werden. Der Biege-E-Modul, die Biege- und die Querkzugfestigkeit nehmen ab. Die thermische Nachbehandlung PF-gebundener MDF bei verschiedenen Temperaturen und Behandlungsdauern führt zu einer Verbesserung der Dickenquellung, während die Wasseraufnahme und die lineare Ausdehnung negativ beeinflusst werden */Ayrilmis et al. 2009/*. Der E-Modul und die Biegefestigkeit reduzieren sich mit zunehmender Behandlungstemperatur. Das Kriechverhalten verschlechtert sich ebenfalls mit zunehmender Temperatur der Nachbehandlung.

Titan Wood, Hersteller von Accoya[®], einer „neuen Holzart“ aus acetyliertem Holz, und der MDF-Hersteller Medite gaben Anfang Juni 2009 ihre Zusammenarbeit zur Kommerzialisierung einer MDF aus acetylierten Fasern bekannt. Die MDF aus Tricoya[®] genannten Fasern hat den Anspruch, die Dauerhaftigkeit und Dimensionsstabilität des Werkstoffs deutlich zu verbessern */N. N. 2009f/*. Weiterhin besteht eine Option auf die Entwicklung von OSB aus acetylierten Strands.

2.2 MDF-Herstellung

MDF (Medium Density Fibreboard) sind homogen aufgebaute Holzfaserplatten, überwiegend aus mittleren bis höherwertigen, weitgehend rindenfreien, thermomechanisch aufgeschlossenen Holzsortimenten, deren Fasern unter Zugabe von dem späteren Verwendungszweck entsprechenden Bindemitteln im Trockenverfahren zu Platten verpresst werden. Nachfolgend erfolgen Ausführungen zur geschichtlichen Entwicklung dieses im Vergleich zur Spanplatte noch relativ jungen Holzwerkstoffs. Neben Aussagen zu Begriffsdefinitionen, Rohstoffeinsatz, verwendeten Kleb- und Hilfsstoffen wird die Erzeugung der Faserstoffe wie auch die Herstellung der Faserplatten selbst ausführlich vorgestellt.

2.2.1 Definitionen

DIN EN 316:2009 definiert Holzfaserplatten als plattenförmige Werkstoffe mit Nenndicken von 1,5 mm oder größer, die aus Lignocellulosefasern unter Anwendung von Druck und/oder Hitze hergestellt werden. Die Bindung der Fasern beruht entweder auf der Verfilzung der Fasern und deren inhärenter Verklebungseigenschaft oder auf der Zugabe eines synthetischen Bindemittels. Nach dem Herstellverfahren ist zwischen Platten nach dem Nass- und Trockenverfahren zu unterscheiden.

Faserplatten nach dem Trockenverfahren weisen im Stadium der Plattenformung eine Faserfeuchte von weniger als 20 % auf und haben eine Dichte von $\geq 450 \text{ kg/m}^3$. Diese Platten werden im Wesentlichen unter Zusatz eines synthetischen Bindemittels unter Druck und Hitze hergestellt. Durch Änderung der Zusammensetzung des synthetischen Bindemittels oder durch Zugabe anderer Zusätze können den Platten zusätzliche Eigenschaften verliehen werden, z. B. Feuerschutz, Feuchtebeständigkeit, Resistenz gegen biologischen Befall.

Im Interesse einer einheitlichen europäischen Vermarktung gelten folgende rohdichtebezogene Bezeichnungen für Faserplatten nach dem Trockenverfahren (MDF):

- UL-MDF: Ultraleicht-MDF mit Rohdichten $\leq 550 \text{ kg/m}^3$,

- L-MDF: Leicht-MDF mit Rohdichten > 550 bis ≤ 650 kg/m^3 ,
- MDF: MDF mit Rohdichten > 650 bis ≤ 800 kg/m^3 ,
- HDF: MDF mit Rohdichten > 800 kg/m^3 .

Nahezu äquivalent dazu unterscheidet ISO/DIS 16895-1:2007(E) zwischen:

- UDF: Ultra Low-density Fibreboard mit Rohdichten < 550 kg/m^3 ,
- LDF: Low-density Fibreboard mit Rohdichten von 550 bis 650 kg/m^3 ,
- MDF: Medium-density Fibreboard mit Rohdichten von > 650 bis 850 kg/m^3 ,
- HDF: High-density Fibreboard mit Rohdichten von > 850 kg/m^3 .

Gemäß der aktuell laufenden Überarbeitung von EN 316 definiert der Final Draft prEN 316:2008 ausschließlich für Platten nach dem Nassverfahren (hardboards, mediumboards, softboards) Rohdichtevorgaben. Bezüglich Platten nach dem Trockenverfahren (MDF) erfolgen keine Rohdichteangaben, es wird explizit auf EN 622-5 verwiesen.

Die Anforderungsnormen DIN EN 622-1:2003 sowie DIN EN 622-5:2006 enthalten neben allgemeinen und speziellen Anforderungen auch Angaben zu Anwendungsbedingungen und Verwendungszecken. Detaillierte Ausführungen dazu erfolgen unter Gliederungspunkt 2.4 Einsatzgebiete von MDF, normative Vorgaben und MDF-Typen.

Während DIN EN 12369-1:2001 die charakteristischen Werte für die Berechnung und Bemessung von Holzbauwerken unter Verwendung von Faserplatten einschließt, regelt DIN EN 13986:2004 wesentliche Eigenschaften und Informationen zur Bewertung der Konformität und Kennzeichnung bei Verwendung von Faserplatten im Bauwesen.

2.2.2 Entwicklung

MDF sind Holzwerkstoffplatten, deren Vorteile gegenüber Massivholz und Spanplatten auf der homogenen und dichten Struktur des Werkstoffs beruhen /Kehr, Jensen 1996/. Grundlegende Entwicklungen erfolgten bereits Anfang der 1960er Jahre in den USA und auch in der DDR /Hinselmann et al. 1964; Kehr 1977/. Die erste industrielle Anlage entstand 1965 bei der Firma Allied Chemical in Deposit, N. Y. /Maloney 1977; Williams 1995; Deppe, Ernst 1996/. Das erste MDF-Werk Europas nahm 1973 in Ribnitz-Damgarten (Abbildung 7) in der ehemaligen DDR seinen Betrieb auf /Rhodes 1996/.



Abbildung 7 Teilansicht der MDF-Anlage im VEB Faserplattenwerk Ribnitz-Damgarten im Jahr 1973 – links hinten im Bild vier Düsenrohtrockner mit nachgeschalteten Rotationsfiltern, rechts oben Produktionshauptgebäude mit Abscheidern für 4-Linienbetrieb (Deckschicht, Zwischenschicht, 2x Mittelschicht), ganz rechts Abscheider für Faserfließbildung, Foto IHD

Die Verfahrensentwicklung wurde neben dem Lieferumfang der Defibrator AB maßgeblich in Zusammenarbeit mit dem Forschungsinstitut für Holztechnologie, dem heutigen IHD, in Dresden betrieben. Eine wichtige Grundlage dafür bildeten die europaweit erstmaligen Versuche zur Herstellung von mitteldichten Faserplatten nach dem Trockenverfahren /Hinselmann et al. 1964/ (Tabelle 3).

Tabelle 3 Eigenschaften von mitteldichten Faserplatten aus Kiefern-Defibrator-Faserstoff bei Einsatz von UF-Harz, Plattendicke 16 mm, Heizplattentemperatur 170 °C, Oberflächenbefeuchtung mit 50 g Wasser /m², Presszeit 4 und 5 min zusammengefasst /Hinselmann et al. 1964/

Eigenschaft		Mittelwerte
Rohdichte	[kg/m ³]	708
Biegefestigkeit	[N/mm ²]	31,6
Querzugfestigkeit	[N/mm ²]	0,36
Dickenquellung ¹¹	[%]	3,8

Die Durchführung der Versuche in Dresden setzte die Errichtung umfangreicher Versuchs- und kleintechnischer Pilotanlagen voraus. So erfolgte im Zeitraum 1960 bis 1968 neben der Installation der Zerfaserungsaggregate (Versuchsdefibrator mit einer Leistung von 180 kg atro/h) auch der Aufbau einer Vliesbildungsanlage mit vier Streuköpfen zur kontinuierlichen Faservliesausbildung nach dem Trockenverfahren (Abbildung 8).

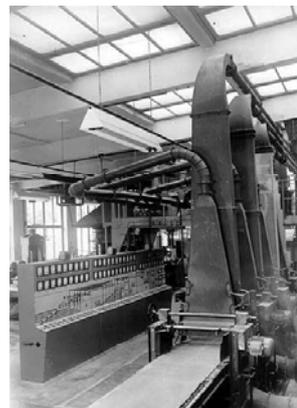
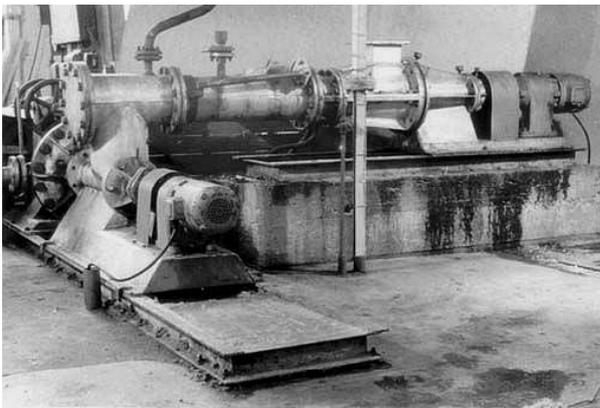


Abbildung 8
Versuchsdefibrator (links) und Vliesbildungsanlage zur kontinuierlichen Faservliesbildung (rechts) im IHD /Kehr 2006/

Die ersten ab 1973 industriell in Europa hergestellten MDF waren, mehrschichtig aufgebaut, als Werkstoff für den Möbelbau für Beschichtungen mit dünnen Finishfolien entwickelt worden. Die damals verbreitet angewandte sogenannte „Industriekante“ bei der Möbelgestaltung erforderte zwar eine exakte Bearbeitung der Schmalflächen, stellte jedoch noch keine besonderen Anforderungen an die „Profilierfähigkeit“, die erst später zum Gütesiegel von MDF wurde /Kehr, Tobisch 2002/. In Verbindung mit anderen Merkmalen wurden die mehrschichtigen MDF später als „MDF der ersten Generation“ bezeichnet /Kehr 1993/. Verfahren und Maschinenteknik wurden ständig weiterentwickelt und 1987 begann die Produktion homogen aufgebauter, einschichtiger MDF in Meppen, Deutschland, unter Nutzung einer kontinuierlich arbeitenden Pressenanlage.

Weltweit entstanden bereits ab Mitte der 1970er Jahre Werke zur Herstellung von MDF. Nach Studien von Wadsworth waren es 2004 bereits 510 Werke mit einer Anlagenkapazität von 42,8 Mio. m³ MDF /Wadsworth 2005, 2006/. Für 2006 prognostizierte Wadsworth weltweit 565 Werke mit einer Anlagenkapazität von mehr als 50 Mio. m³. Die größten Produktionskapazitäten bestehen dabei in Europa und China mit jeweils 16 Mio. m³, wobei diese Mengen in Europa von 70 Werken und in China von ca. 390 Werken gefertigt werden. Damit ist China weltweit der größte MDF-Produzent /Ye et al.

¹¹ nach 2 h Wasserlagerung, Prüfkörpergröße 25 mm x 25 mm

2008/. Bis 2010 soll das Marktvolumen für Holzböden beständig auf 600 Mio. m² zunehmen /Ye et al. 2009/.

2.2.3 Rohstoffe

Rohholz und Einjähropflanzen bilden weltweit die wichtigsten Ausgangsmaterialien für die Herstellung von MDF /Deppe, Ernst 1996/. Mengenmäßig ist dem Rohholz die wesentlich größere Bedeutung beizumessen. Alternativ dazu finden auch entsprechend aufbereitete Altholz- (Voraussetzung: nicht kontaminiert) und Altpapier-Sortimente Anwendung /Dube, Kehr 1995a, 1995b/.

Der Rohstoffbedarf in der europäischen MDF-Industrie belief sich im Jahre 2002 auf insgesamt 8,2 Mio. t (Trockenmasse). Davon stellte Nadelholz mit 86 % den überwiegenden Anteil, Laubholz kam auf 14 % /N. N. 2003c/. Neben Waldindustrieholz fanden als Rohstoffe Schwachholz, Durchforstungsholz, Industrierestholz (Koppelprodukt der mechanischen Holzbe- und -verarbeitung) sowie in geringeren Anteilen auch Recyclingholz Verwendung /Mantau et al. 2003/.

Eine zunehmende Beschaffungskonkurrenz zwischen stofflichen und energetischen Holzverwendern (aber auch innerhalb der einzelnen Branchen), Unsicherheiten zur gesicherten künftigen Rohholzversorgung angesichts begrenzter Rohholzpotentiale und Bemühungen um eine intensivere Rohholzmobilisierung sind in jüngster Zeit verstärkt zu beobachten /Alteheld 2007; Bemann, Gerold 2007; Frühwald 2007; Sauerwein 2007; Vorher, Kibat 2007/.

Untersuchungen von Mantau zur „Holzrohstoffbilanz Deutschland. Szenarien des Holzaufkommens und der Holzverwendung bis 2012“ zeigen, dass in den vergangenen Jahren die Energiepreise zunehmend Einfluss auf die Entwicklungen am Holzmarkt nahmen /Sörgel, Mantau 2006; Mantau 2008; Mantau 2009/. Zugleich setzte die Holzindustrie ihren Wachstumskurs auf nationalen und internationalen Märkten fort. In der Folge stieg der Holzverbrauch sehr stark an. Gleichzeitig baute die Holzindustrie ihre Kapazitäten aus und Fragen nach verfügbarem Rohholzpotential standen im Vordergrund. Mitte der 90er-Jahre setzt ein moderater Aufwärtstrend an, der ab 2003 eine enorme Beschleunigung erfährt. Von 90 Mio. m³ (Festmeteräquivalent) stieg der Verbrauch bis 2007 auf fast 130 Mio. m³ an. Die Weltwirtschaftskrise bremst die Expansion und lässt den Verbrauch bis 2009 wieder auf 115 Mio. m³ sinken. Die Darstellung nach Verwendungsgruppen zeigt, dass die Sägeindustrie die Nachfrage nach Holz mit fast 60 % der stofflichen Verwendung antreibt. Bei der energetischen Verwendung bewirken die Anfang 2000 einsetzenden Förderprogramme eine kräftige Belebung. Mit der steigenden Nachfrage nach Holzprodukten steigt auch das Angebot der sonstigen Holzrohstoffe. Das Altholzaufkommen (welches mittlerweile weitgehend mobilisiert ist) wird sowohl von der Nachfrage als auch von den gesetzlichen Bestimmungen beeinflusst. In den kommenden Jahren wird Landschaftspflegematerial eine zunehmende Bedeutung für die energetische Verwendung gewinnen. Die Rindenanteile schwanken mit dem Waldholzverbrauch und den Sägenebenprodukten in der Schnittholzproduktion.

Das Recycling von Möbelspanplatten oder MDF nach dem thermohydrolytischen Aufschluss (z. B. WKI-Verfahren, vgl. /Michanickel, Boehme 1997/) wurde wiederholt als eine interessante Rohstoffalternative benannt, wenngleich die Lenkung der Gebrauchtholzströme in die energetische an Stelle der stofflichen Verwertung durch staatlich abgesicherte Vergütungssätze für Strom aus Biomasse den Einsatz von Recyclingholz zur Holzwerkstoff-Herstellung in Deutschland begrenzen wird /Marutzky, Thole 2003/. Die

einzigste nach diesem Verfahren arbeitende Anlage (Nolte) wurde folgerichtig zwischenzeitlich stillgelegt.

Mit der 2004 erfolgten Inbetriebnahme des Zellstoffwerkes in Stendal hat sich die Rohstoffsituation insbesondere für die ost- und mitteldeutsche Holzwerkstoff-Industrie verändert. Für die Jahres-Zellstoffkapazität von mehr als 550.000 t werden umgerechnet etwa 2 Mio. fm Nadel-Industrieholz und 1 Mio. fm Hackschnitzel benötigt /N. N. 2004b/. In der Folge kam es vor allem für in dieser Region ansässige MDF-Produzenten ab 2005 zu einer Verschärfung der Rohstoffsituation.

Nach *Scheidung /2005/* steht die Holzwerkstoffindustrie ab dem Jahr 2005 bei Wald-Industrieholz insbesondere bei Nadelholz auf dem Nachfragemarkt zunehmend im Wettbewerb mit der Zellstoff- und Papierindustrie sowie künftig vermehrt mit Energieerzeugern. Nach Schätzungen des Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) beträgt das gesamte energetisch genutzte Holzvolumen in Deutschland 52 Mio m³. *Frühwald* prognostizierte bereits 2001, dass Holzwerkstoffproduzenten perspektivisch infolge der zunehmenden thermischen Verwertung mit höheren Holzkosten rechnen müssen /*Frühwald 2001/*.

Wie bereits erwähnt, erfolgten in den letzten Jahren erhebliche Investitionen im Bereich der stofflichen Holzverwertung. Parallel dazu wurden aber auch die Kapazitäten zur thermischen Nutzung erheblich ausgebaut. Nach Informationen des Deutschen Energie-Pellet-Verbandes (DEPV) erhöhte sich die Zahl der Pelletkessel in Deutschland von 3.000 Kesseln im Jahr 2000 auf 100.000 Pelletheizungen im Jahr 2008 /N. N. 2009c/. Die deutsche Pelletproduktion hat sich von 0,9 Mio. t im Jahr 2007 auf etwa 1,6 Mio. t im Jahr bis 2010 nahezu verdoppelt /N. N. 2008c; Meyerhöfer 2010/. Im Jahr 2015 könnte der erwartete jährliche Bedarf für Pelletheizungen nach Schätzungen des DEPV bei 3,8 bis 5 Mio. t liegen.

Derzeit stehen nach Angaben des DEPV jedoch aus den Säge- und Hobelwerken insgesamt maximal 2,3 Mio. t/a in Deutschland zur Verfügung. Die Pellethersteller können daher ihren zu erwartenden Bedarf nicht decken. Sie sind deshalb in erheblichem Maße von Importen abhängig und müssen vermehrt auf wertvolle Rohstoffsortimente zurückgreifen, die damit dem stofflichen Produktionskreislauf entzogen werden. Zu dem gestiegenen Rohstoffverbrauch für die Produktion von Holzpellets kommt allein beim Hausbrand eine Steigerung des Brennholzverbrauches in fünf Jahren von 11,3 Mio. m³ in 2000 auf 20,7 Mio. m³ in 2005. Davon entfallen mehr als zwei Drittel des Gesamtverbrauchs auf Wald-Scheitholz (Tabelle 4).

Tabelle 4 Holz zur energetischen Nutzung in Mio. m³; Stand 2005 /N. N. 2006c/

	Gesamt (WH, SNP und sonstige Holzbrennstoffe)	Waldholz (WH)	Sägenebenprodukte (SNP); einschl. Pellets	WH + SNP gesamt
private Haushalte	20,7	14,2	0,5	14,7
Biomasseanlagen	18,5	8,7	2,5	11,2
Gesamt	39,7	22,9	3,0	25,9

Vor dem Hintergrund des aktuell spürbar zunehmenden Wettbewerbs auf den Nadelindustrieholzmärkten bemühen sich fast alle Unternehmen der Holzwerkstoffindustrie um eine Ausweitung des Laubindustrieholzeinsatzes. In diesem Zusammenhang ist neben dem Nachfrageanstieg bei Buchenindustrieholz auch ein deutlich ansteigender Bedarf nach anderen Laubholzsortimenten zu beobachten, was auch durch einen anhaltend hohen Brenn- und Energieholzbedarf in allen Bundesländern zusätzlich forciert wird /N. N. 2003a; N. N. 2004d/.

Laut Aussagen des Verbandes der Deutschen Holzwerkstoffindustrie (VHI) und des Hauptverbandes der Deutschen Holz und Kunststoff verarbeitenden Industrie (HDH) führt der erhöhte Bedarf an Brennholz zur Energiegewinnung für die Holzindustrie zu einem verschärften Wettbewerb um das Material der Branche. Die Preise für Industrieholz sind durch die Verknappung des Rohstoffs im Jahr 2006 durchschnittlich um 50 % gestiegen. Immerhin beschäftigt die Holzindustrie in Deutschland mit ca. 216.000 Mitarbeitern ungleich mehr Menschen als im Bereich der Energieerzeugung aus Holz. Der Plan der Europäischen Kommission, die Energiegewinnung aus Biomasse bis zum Jahr 2010 nahezu zu verdoppeln, gefährdet nach Ansicht der Verbände tausende Arbeitsplätze in Deutschland (Tabelle 5).

Tabelle 5 Szenario für die Holzbilanz in Deutschland von 2005 bis 2010 /Altenheld 2007/

Verfügbarkeit 2005	Mio. Fm	Verwendung 2005	Mio. Fm	Entwicklung bis 2010	Mio. Fm
Nadelholz	43,1	Sägeindustrie	33,6	Sägeindustrie	41,1
Laubholz	14,7	Spanplatten, MDF, OSB	19,4	Spanplatten, MDF, OSB	20,8
Sägenebenprodukte	11,8	Energetische Nutzung	14,9	Energetische Nutzung	22,4
Altholz	11,0	Hausbrand	12,3	Hausbrand	18,8
Waldrestholz	7,1	Holzschliff & Zellstoff	8,5	Holzschliff & Zellstoff	8,85
Sonstiges Ind.-Restholz	4,1	andere	2,7	andere	2,7
Summe	91,8		91,4		114,7

Der in der Forstwirtschaft Deutschlands derzeit propagierte ökologische Waldumbau beinhaltet eine Umwandlung von heute auf der Waldfläche dominierenden Nadelbaumforsten in naturnähere Laub- und Laubmischwälder. Wesentliches Element des ökologischen Waldumbaus ist somit die Erhöhung der Naturnähe der Baumartenzusammensetzung. Der ökologische Waldumbau geht in der Regel aber auch einher mit einer Änderung der Betriebsform, also der Art und Weise der Verjüngung und Erziehung des Waldbestandes. Ausgedient hat dabei der Kahlschlagbetrieb, bei dem die Verjüngung nach vorherigem Abtrieb des Altbestandes künstlich und meist gleichzeitig auf großer Fläche erfolgt. Stattdessen wird zu unterschiedlichen Formen des Vorverjüngungsbetriebes übergegangen, bei dem die Verjüngung unter einem Schirm des Altholzbestandes auf natürlichem oder künstlichem Wege erfolgt. Damit wird eine mehr oder minder ausgeprägte Ungleichaltrigkeit des aus der Verjüngung hervorgehenden Bestandes erreicht. Häufig wird versucht, über eine einzelbaumweise Nutzung (Zielstärkennutzung) die Verjüngung einzuleiten und damit eine hohe Strukturvielfalt zu erzeugen /N. N. 2007a/.

1991 wurde das Regierungsprogramm "Langfristige ökologische Waldentwicklung – LÖWE" zur verbindlichen Waldbauphilosophie in den Niedersächsischen Landesforsten. Die bisherigen Ergebnisse zeigen, dass der dortige Landeswald bereits flächendeckend durch LÖWE geprägt ist. Das wohl bedeutendste Ziel von LÖWE, die großen Nadelholz-Reinbestände aus Fichte und Kiefer in Mischwälder umzubauen, ist in 15 Jahren ein gutes Stück vorangekommen. Die Anteile von Mischbeständen lagen 1991 nur bei 45 %, aktuell sind es bereits 67 %. Langfristig möchten die niedersächsischen Landesforsten auf 90 % ihrer 340.000 Hektar Mischbestände etablieren. Lag der Laubbaumanteil in der Verjüngung 1991 noch bei 52 %, so liegt er heute bei 75 %. Damit

wird in der kommenden Waldgeneration auch ein deutlich höherer Anteil an Laubbäumen zu finden sein, das langfristige Ziel liegt hier bei 65 % /N. N. 2007b/.

Die Ergebnisse einer 2005 im IHD durchgeführten Studie zum Laubholzaufkommen zeigen, dass Buche die dominierende Laub-Industrieholzart - allerdings ohne signifikantes Steigerungspotential - ist. Es folgen Eiche und Birke, wobei speziell bei Eiche mit einer deutlichen Zunahme zu rechnen ist /Scheidung 2005/. Perspektivisch stehen auch Pappel und Weide aus der Stilllegung bzw. dem Umbau landwirtschaftlicher Nutzflächen sowie der Rekultivierung ehemaliger Tagebaue zur Verfügung, deren Nutzungspotential jedoch eher als Energieholz gesehen wird. Analoges gilt für Buchenschwachholz.

Eine aktuelle Studie zur Entwicklung des potenziellen Rohholzaufkommens vom Institut für Waldökologie und Waldinventuren der Bundesforschungsanstalt für Forst- und Holzwirtschaft in Eberswalde, bestätigt die Ergebnisse der im IHD durchgeführten Studie. Ein in der Studie angewandtes Basisszenario ergibt bis zum Jahr 2022 ein durchschnittliches potenzielles Rohholzaufkommen von jährlich 76 Mio. Efm¹². Dabei werden rund 90 % des Zuwachses genutzt und der stehende Holzvorrat steigt um 5 % an. Der Überschuss beschränkt sich jedoch auf das Laubholz, bei dem das Aufkommen im Vergleichszeitraum deutlich über der genutzten Menge liegt. Beim Nadelholz ist das potenzielle Rohholzaufkommen unter dem Basisszenario künftig etwas geringer als die Nutzung im Vergleichszeitraum (Tabelle 6).

Tabelle 6 Vergleich des potentiellen Rohholzaufkommens im Zeitraum 2003 bis 2022 zur Nutzungsmenge im Zeitraum 1987 bis 2002 /Polley, Kroiher 2006/

	Deutschland [Mio. Efm/a]	* Alte Bundesländer [Mio. Efm/a]		
	Potential 2003-2022	Potenzial 2003-2022	Nutzung 1987-2002	Potenzial/ Nutzung
Fichte, Tanne, Douglasie	33,3	29,4	31,2	94 %
Kiefer, Lärche	14,5	7,6	7,0	110 %
Summe Nadelholz	47,8	37,0	38,1	97 %
Buche und sonstige Laubbäume außer Eiche	22,9	17,7	9,6	185 %
Eiche	5,3	4,1	2,0	210 %
Summe Laubholz	28,8	21,9	11,5	190 %
alle Holzarten	76,0	58,9	49,7	119 %
* für die neuen Bundesländer fehlen vergleichbare Daten für den Zeitraum 1987 bis 2002				

Als wichtigste Baumarten werden Buche und Eiche genannt, die zusammen etwa drei Viertel des Laubholzvorrates ausmachen. Die Studie zeigt, dass bei Buche - als der wichtigsten Laubbaumart - das Nutzungspotenzial etwa 60 % über der bisherigen Nutzung liegt. Die sonstigen Laubbäume, vor allem Birke, Erle, Esche, Ahorn und Pappel, weisen noch weit höhere Nutzungsreserven auf.

Während im europäischen Maßstab (z. B. bei Fantoni Italien, Kronospan Luxemburg, Kronospan Rumänien) bereits seit längerer Zeit Laubholz (insbesondere Buche, teilweise auch Pappel) genutzt wird, erfolgt die MDF-Herstellung in Deutschland bevorzugt mit verfügbaren, i. d. R. entrindeten Nadelholzsortimenten¹³, wobei in Ausnahmefällen auch

¹² Ernte-Festmeter (Efm.) = entspricht einem Vorratsfestmeter (Vfm. = Angabe des Holzvorrates eines stehenden Baumes oder stehenden Waldes oder Baumbestandes, erfasst nur Derbholz, gemessen mit Rinde.) abzüglich 10 % Rindenverluste und 10 % Verluste bei der Holzernte. Der Zusatz D.o.R. bedeutet Derbholz ohne Rinde.

¹³ Kiefer (*Pinus silvestris* L.), Fichte (*Picea abies* [L.] Karst.)

geringe Buchenanteile zur Herstellung von MDF in Tiefräsqualität eingesetzt werden /Soigné 2001/. Die Entrindung gewährleistet dabei eine hellere Werkstofffarbe.

Den perspektivischen Verfügbarkeiten entsprechend, erfolgten in Deutschland in den letzten Jahren verschiedene Arbeiten zur alleinigen Verwendung von Buche als alternativem MDF-Rohstoff. Untersuchungen der Universität Göttingen, des WKI Braunschweig und des IHD Dresden weisen Möglichkeiten und Potentiale einer Verwendung von Buchenholz im Vergleich zum in Deutschland üblichen Kiefernholz auf.

Abbildung 9 zeigt die Veränderung der durchschnittlichen Faserlängen des eingesetzten Kiefern- und Buchenrundholzes (jeweils vom Kambium bis zur Markröhre).

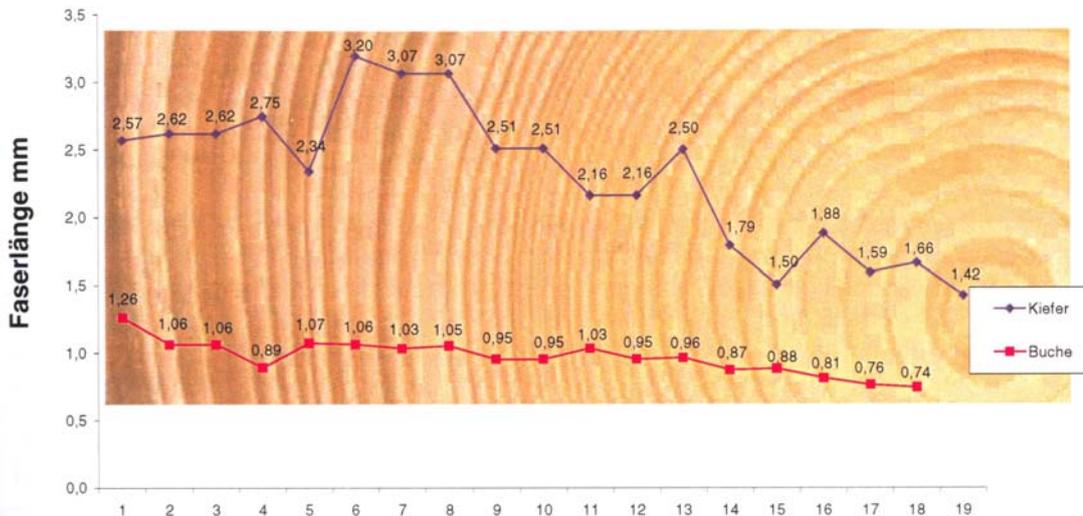


Abbildung 9 Mittlere Faserlänge (mm) im untersuchten Kiefern- und Buchenholz vom Kambium (Nr.1) zur Markröhre (Nr. 18 (Buche) bzw. Nr. 19 (Kiefer)). Die Einzelwerte sind jeweils Mittelwerte aus jeweils 30 Einzelmessungen /Roffael et al. 2003/.

Während beim nativen Kiefernholz mittlere Faserlängen zwischen 1,42 bis 3,20 mm gemessen wurden, lagen die Faserlängen beim Buchenholz zwischen 0,74 und 1,26 mm. Sowohl beim Kiefern- als auch beim Buchenholz nahm die Faserlänge vom Kambium zum Mark erwartungsgemäß tendenziell ab.

Bezüglich ausgewählter chemischer Eigenschaften ergab sich für den bei 175 °C über 5 min nach dem thermomechanischen Verfahren hergestellten Kiefernholzfaserstoff gegenüber dem Faserstoff aus Buche ein höherer Ligningehalt sowie ein niedrigerer Pentosangehalt. Hingegen lag die alkalische Pufferkapazität der kaltwässrigen Extrakte der Buchenholzfaser gegenüber dem Faserstoff aus Kiefernholz etwas höher. Dies ist auf die vermehrte Bildung von Essigsäure beim Aufschluss des Buchenholzes zurückzuführen.

Die durchschnittliche Faserlänge des Kiefernholzfaserstoffs lag bei 2,22 mm und die des Buchenholzfaserstoffs bei 0,22 mm. Es wird deutlich, dass vor allem das Buchenholz eine erhebliche Verkürzung der Faserlänge infolge des thermomechanischen Aufschlusses und der darauf folgenden Zerkleinerung im Refiner erfährt.

Die Ergebnisse zum Einfluss der Holzart auf die mechanisch-technologischen Eigenschaften der MDF zeigten, dass die Verwendung von Buchenholzfaserstoff zu grundsätzlich günstigeren Querzug- und Biegefestigkeitswerten der hergestellten MDF führte als die Verwendung von Kiefernholzfaserstoff. Die Quellungseigenschaften der MDF bei Wasserlagerung sowie die Maßänderungen bei Änderung der relativen Luftfeuchte wurden dagegen durch den Einsatz von Buchenholzfaserstoff nachteilig beeinflusst /Roffael et al. 2003; Krug et al. 2004/.

Es wurde deutlich, dass der Einsatz des perspektivisch im stärkeren Maße verfügbaren Buchenholzes eine wirtschaftliche Herstellung guter MDF-Qualitäten ermöglichen wird. Darauf lassen auch die Arbeiten von *Krug und Mäbert /2007/* rückschließen, die aus sortenreinen Laubholzsortimenten (Buche, Pappel, Birke, Eiche) MDF und HDF mit normenkonformen Produkteigenschaften herstellten. Als interessant erwiesen sich gleichfalls Holzartenmischungen aus Kiefernholz und unterschiedlichen Laubhölzern, die vor dem Hintergrund einer industriellen Umsetzung hohe Praxisrelevanz besitzen.

Da sich Laubholz sowohl im anatomischen Aufbau als auch in der chemischen Struktur grundlegend vom Nadelholz unterscheidet, erfordert die alleinige oder anteilige Verwendung von Laubholz zur Herstellung von MDF besondere technologische Maßnahmen. So ist bekannt, dass bereits die Verwendung geringer Laubholzanteile zur wesentlichen Veränderung des pH-Wertes des Faserstoffs und somit auch zur Veränderung der Pufferkapazität führen kann. In der Folge kommt es zu unerwünschten Verzögerungen/Beschleunigungen der Bindemittel-Aushärtung */Buchholzer 1995; Krug, Mäbert 2007/*. Außerdem ergibt sich durch die kürzeren Fasern des Laubholzes eine erhöhte Schüttdichte der Faservliese und dadurch ein verändertes Verdichtungs- und Entgasungsverhalten. Dieses bedingt zwingend eine Veränderung/Anpassung der Presstechnologie.

Andererseits kann der Einsatz bestimmter Laubholzarten zu vorteilhaften Produkteigenschaften führen. So ermöglichte beispielsweise der Einsatz von Faserstoff der Graupappel die Herstellung UF-Harzgebundener MDF mit Dickenquellungswerten unter 8 % nach 24 h Wasserlagerung */Kehr 1995/*. Andererseits führt z. B. die Verwendung von Buchenholzfaserstoff (gegenüber Nadelholz signifikant kürzere und glattere Fasern) zu mitteldichten Faserplatten mit besonderer Eignung zum Tiefräsen */Scheidung, Krug 2002/*. Interessanterweise emittieren labortechnisch erzeugte Pappel-MDF zudem signifikant weniger Formaldehyd als Kiefern-MDF, was vor dem Hintergrund aktueller Diskussionen zur Reduzierung der Formaldehydemissionen auch für die Verwendung von Pappelholz als Faserplattenrohstoff spricht */Knust et al. 2008/*.

Wie erwähnt, bilden speziell in tropischen und subtropischen Bereichen Bestandteile von Einjahrpflanzen (u. a. Getreidestroh, Miscanthus, Kenaf, Sisal, Hanf, Bagasse, Ölpalme, Jute) interessante Rohstoffalternativen für die Herstellung von MDF, die jedoch eine gezielte Technologieanpassung speziell im Hinblick auf die Auswahl geeigneter Bindemittelsysteme erfordern. Das zeigen auch jüngere Arbeiten zu MDF aus Bambus und Reisstrohfasern, die zwar zu zufriedenstellenden elastomechanischen, aber ungenügenden hygrischen Platteneigenschaften führten */Hiziroglu et al. 2007/*.

Bereits vor mehr als 50 Jahren erfolgten in Dresden erfolgreiche Untersuchungen zur Herstellung von Faserplatten aus Rapsstroh, auf deren Grundlage dann auch langjährig in den Werken Tangermünde und Ribnitz industriell gefertigt wurde */Lampert 1960, 1967/*. Vor dem Hintergrund der diskutierten Verknappung der Ausgangsmaterialien könnte in Deutschland Getreidestroh als landwirtschaftliches Nebenprodukt eine interessante Rohstoffalternative für MDF darstellen */Thole 2005/*.

Bundesweit wurden im Jahr 2004 auf ca. 6,9 Mio. ha Getreide angebaut. Davon entfielen ca. 3,2 Mio. ha auf Weizen */N. N. 2006b/*. Bei einem in der Literatur mit großer Schwankungsbreite angegebenen Strohertrag von ca. 3,0 t/ha */Röhrlich 1998; Deppe, Ernst 2000/* bedeutet das ein Strohaufkommen von ca. 9,6 Mio. t. Neben der Nutzung des Stroh zur Versorgung des Bodens mit organischer Substanz sowie in der Tierhaltung als Futter und Einstreu steht damit immer noch eine große Strohmenge für eine Nutzung außerhalb der Landwirtschaft zur Verfügung */Schulz 2006/*.

2.2.4 Bindemittel und Additive

2.2.4.1 Allgemeines

DIN EN 923 definiert einen Klebstoff als Bindemittel, das über Adhäsion¹⁴ und Kohäsion¹⁵ wirkt. Obwohl es auch Klebstoffe auf Basis anorganischer Substanzen gibt (z. B. Produkte auf Basis von Wasserglas oder Zement) basiert die überwiegende Mehrzahl der heute eingesetzten Klebstoffe auf organischen Substanzen. Damit ein Klebstoff eine ausreichende Adhäsion zu den zu verklebenden Substanzen erzielen kann, ist es notwendig, dass die Klebstoffe sehr nah an die Oberfläche des Substrates gelangen. Die für das Kleben zuständigen Wechselwirkungskräfte, z. B. Van-der-Waals-Kräfte¹⁶, Wasserstoffbrückenbindungen oder kovalente Bindungskräfte, wirken nur in atomaren Abständen von einigen Angström¹⁷ /Onusseit 2007/.

Ein solch naher Kontakt kann im Allgemeinen nur über einen flüssig aufgetragenen, die zu verklebende Fläche ausreichend benetzenden Klebstoff gewährleistet werden. Das setzt voraus, dass die Oberflächenenergie der zu verklebenden Substrate höher als die Oberflächenenergie des Klebstoffs ist. In der Folge kommt es zum Verlaufen (Spreiten) und damit zum Benetzen. Die Kohäsion als der innere Zusammenhalt eines Stoffes wird durch die chemische Zusammensetzung und die Wechselwirkung der einzelnen Bausteine untereinander bestimmt. Bei Klebstoffen spielen die Polymere eine besondere Rolle. Vernetzte Systeme zeigen dabei eine deutlich höhere Kohäsion als unvernetzte, wobei die Vernetzung sowohl chemisch erfolgen als auch physikalischer Natur sein kann.

Klebstoffe bilden einen essentiellen Bestandteil moderner Holzwerkstoffe. Sie bestimmen die Anwendungseigenschaften, sind entscheidende Kostenfaktoren und tragen über ihre Reaktivität zur Produktivität der Fertigungsanlagen bei. Die derzeit verwendeten synthetischen Bindemittel ermöglichen die Erzeugung von Holzwerkstoffen mit zweckbestimmten Eigenschaften für unterschiedliche Einsatzgebiete.

Formaldehydbasierte Klebstoffe auf Basis von Harnstoff haben Vorteile bei der Reaktivität sowie z.T. beim Anwendungsverhalten und bei der Recyclingfähigkeit. Diese wasserbasierten Systeme sind zudem frei von Halogenen und Schwermetallen. Obwohl diese Produkte mittlerweile ein sehr niedriges Emissionspotential aufweisen, stoßen speziell Harnstoff-Formaldehyd (UF)- und auch Melamin-Harnstoff-Formaldehyd (MUF)-Harze bei Verwendung in Innenräumen wegen ihrer Formaldehydabgabe wiederholt auf Skepsis in Verbraucherkreisen.

Hervorragende Verleimungsqualitäten mit hoher Feuchtebeständigkeit und niedrigem Formaldehydemissionspotential lassen sich mit Phenolharzen erreichen, denen vielfach bei Holzwerkstoffherstellern ein negatives Image in Bezug auf Verarbeitungsei-

¹⁴ Adhäsion [lateinisch] Aneinanderhaften von verschiedenen Stoffen infolge molekularer Anziehungskräfte (Adhäsionskräfte). Beispiele sind Adsorption, Haftreibung, Kleben oder die Benetzung fester Körper mit Flüssigkeiten /Brockhaus 2000/.

¹⁵ Kohäsion [lateinisch] Zusammenhalt der Atome und Moleküle eines Stoffes durch zwischenmolekulare Anziehungskräfte (Kohäsionskräfte). Die Kohäsion bewirkt die Zerreißfestigkeit der Festkörper und die Oberflächenspannung bei Flüssigkeiten /Brockhaus 2000/.

¹⁶ Van-der-Waals-Kräfte [nach J. D. van der Waals], Bindungskräfte zwischen Molekülen in Gasen, Flüssigkeiten und Kristallen (zwischenmolekulare Kräfte), die nicht auf einem teilweisen oder vollständigen Elektronenaustausch beruhen. Sie werden durch Wechselwirkungen zwischen permanenten elektrischen Dipolen (Dipolkräfte), induzierten elektrischen Dipolen (Dispersionskräfte) oder Induktionseffekten (Induktionskräfte) hervorgerufen /Brockhaus 2000/.

¹⁷ Angström [nach A. J. Ångström] Einheitszeichen Å, nichtgesetzliche Längeneinheit: $1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ m} = 0,1 \text{ nm}$ /Brockhaus 2000/.

genschaften anhaftet. Reale Einschränkungen bei Phenol-Formaldehyd (PF)-Harz-Anwendungen ergeben sich durch vergleichsweise geringere Reaktivitäten (und damit die langsamere Produktionsgeschwindigkeit) sowie die dunkelrote bis braune Farbe (gerade bei MDF oder OSB im optisch anspruchsvollen Innenausbau nachteilig).

Der Klebstoff PMDI (polymeres Diphenylmethan-4,4-Diisocyanat) unterscheidet sich von Amino- und Phenoplastharzen vor allem durch seine Formaldehydfreiheit und die verhältnismäßig geringen Bindemittelmengen zum Erreichen hochwertiger Werkstoffqualitäten. Einer breiteren Anwendung dieses Produktes stehen neben dem hohen Preis und den „verschärften“ Verarbeitungsvorgaben (vor allem durch Reaktionen mit Luftfeuchte) insbesondere Probleme der Selbsttrennung (u. a. sehr gute Metallklebrigkeit) sowie der Aushärtegeschwindigkeit entgegen. In der betrieblichen Praxis treten immer wieder Widerstände gegen die Verwendung dieses Bindemittels auf, da bei der Handhabung am Arbeitsplatz erhebliche Nachteile beobachtet wurden. Zu nennen sind hier insbesondere Reizungen und Sensibilisierungen der Atmungsorgane, die das Tragen von Schutzmasken und -kleidung erforderlich machen.

Abträglich wirken sich auch mögliche Umweltprobleme bei der späteren Entsorgung synthetisch gebundener Werkstoffe und daraus hergestellter Erzeugnisse aus. Als grundsätzliches Manko des Einsatzes synthetischer Klebstoffe ist die perspektivisch sinkende Verfügbarkeit der fossilen Grundrohstoffe (Erdöl, Ergas, Kohle) anzusehen.

In der Folge erfuhren Arbeiten zur Entwicklung formaldehydarmer bzw. weitgehend formaldehydfreier Bindemittel eine Renaissance. Neben Untersuchungen zur weiteren Optimierung synthetischer Harze sowie zu alternativen Bindemitteln auf Basis von Naturstoffen wurde wiederholt auch die Aktivierung holzeigener Bindekräfte (u. a. durch enzymatische Behandlung oder Aufschlussintensivierung) unter Nutzung der Verfilzungsneigung von Holzfasern und die damit verbundenen Möglichkeiten der Herstellung bindemittelfreier Faserplatten diskutiert.

Es ist einzuschätzen, dass biogene Klebstoffe (u. a. auf Basis natürlicher Polyphenole (Lignin, Tannin), Polysaccharide (Stärke), Proteine sowie Naturharze und -wachse) auch nach mehr als 3 Jahrzehnten intensiver Forschungsarbeit eher ein Nischendasein führen und von einer umfassenden, wirtschaftlichen Umsetzung weit entfernt sind /Krug 2007/. Chancen für alternative Klebstoffe auf Basis nachwachsender Rohstoffe werden bei einem Einsatz in Produktsegmenten mit höherem Wertschöpfungspotential und in der Regel auch preisintensiveren Bindemittelprodukten gesehen. Aktuelle Ergebnisse zeigen, dass mit Bindemittelkombinationen, bei denen synthetische Leime auf Basis von PF anteilig durch Tannin- /Roffael et al. 2001; N.N. 2005/ oder Proteinzusätze /Krug et al. 2006/ ersetzt wurden, Span- und Faserplatten hoher Feuchtebeständigkeit und mit sehr niedrigem Formaldehydemissionspotential hergestellt werden können.

2.2.4.2 Entwicklungen bei Formaldehyd

Bis 2004 ordnete die International Agency for Research on Cancer (IARC), ein Teilbereich der World Health Organization (WHO), Formaldehyd als „wahrscheinlich krebserregend“ ein. Nach der Auswertung weiter gefasster Forschungsarbeiten stufte IARC Formaldehyd im Sommer 2004 als „krebserregend“ ein /EUWID 2004, IARC 2004/.

Nicht zuletzt die zunehmende umweltpolitische Sensibilisierung der Gesellschaft führt dazu, dass das Bundesamt für Risikobewertung (BfR) Ende Mai 2006 in einer Presseerklärung vorgeschlagen hat, Formaldehyd als humankanzerogen einzustufen (bislang „mit begründetem Verdacht auf ein krebserzeugendes Potential“ klassifiziert). Allerdings

soll Formaldehyd nur im Hinblick auf die Aufnahme über die Atemluft als humankanzergen eingestuft werden. Auf der Basis von Tierdaten zur Zellproliferation sowie von Humandaten zur sensorischen Irritation des oberen Respirationstraktes wurde für Formaldehyd eine tolerierbare Luftkonzentration als sogenannter „safe level“ abgeleitet, welche bei 0,1 ppm (parts per million) – das sind 0,124 mg/m³ – liegt /N.N. 2006e/. Damit wird das E1-Level (DIN EN 13986) bestätigt. In Deutschland ist die Formaldehydabgabe aus Holzwerkstoffen und daraus hergestellten Produkten bereits seit 1986 auf einen Emissionswert von 0,1 ppm (0,1 ml Formaldehyd/m³ Luft) begrenzt.

Im Rahmen der Hauptversammlung des europäischen Holzwerkstoffherstellerverbandes (EPF) in Stresa/Italien am 29. Juni 2007 wurde über mögliche neue Emissionsgrenzwerte z. B. im Bereich der geltenden Vorgaben des „Blauen Engel“ (Unterschreitung des E1-Grenzwertes von 0,1 ppm um mindestens 50 %, also Formaldehydemissionen < 0,05 ppm) diskutiert. Die Bemühungen um eine neue Emissionsklasse resultieren zum Einen aus der o.a. Diskussion zur Toxizität von Formaldehyd. Andererseits fordern verschiedene Kunden niedrigere Emissionswerte /N.N. 2007c/.

Auf der Formacare¹⁸-Konferenz am 20. und 21. September 2007 in Barcelona stellten internationale Experten übereinstimmend fest, dass „der gewöhnliche Gebrauch von Formaldehyd in Verbraucherprodukten und anderen spezifischen Anwendungen kein Risiko für die menschliche Gesundheit darstellt“ /Gehrmann 2007/.

Anfang 2008 wurde dann aber bekannt, dass die fünf europaweit führenden Holzwerkstoffkonzerne im unmittelbaren Kontakt mit dem schwedischen Handels- und Möbelkonzern IKEA über eine deutliche Reduzierung der Formaldehydgrenzwerte Verhandlungen führen, in deren Ergebnis IKEA ab September 2008 nur noch Spanplatten und MDF mit quasi halbiertem Perforatorwert weiterverarbeitet /N. N. 2008a, b/.

Mit der aktualisierten Fassung des IoS-MAT-0003 („Formaldehyde requirements of wood-based materials and products“) gab der weltweit tätige Konzern IKEA für die von ihm verwendeten Platten am 10. März 2008 die neuen Grenzwerte für verschiedene Holzwerkstofftypen vor /N.N. 2008g/. Dabei gilt für die Bestimmung der Formaldehydemissionen in der Prüfkammer (DIN EN 717-1) ein Grenzwert von 0,06 ppm (bislang 0,1 ppm). Spanplatten müssen bei Prüfung des Formaldehydgehaltes nach der Perforatormethode (DIN EN 120) einen Grenzwert von 4,0 mg/100 g atmo Platte einhalten, für MDF über 8 mm Dicke gelten 5,0 mg/100 g. Mit Wirkung zum 1. Januar 2009 traten zudem erweiterte Anforderungen an die Qualitätssicherung der Holzwerkstoffhersteller in Kraft, wenn die Produkte über IKEA-Handelshäuser in Nordamerika vermarktet werden.

Zur „Technical Formaldehyde Conference“ am 13. und 14. März 2008 in Braunschweig wurden die aktuellen Bestimmungen aus Nordamerika, Europa und Japan sowie neue Entwicklungen zur Reduzierung der Formaldehydemission aus Holzwerkstoffen vorgestellt /Steckel 2008/. Frithiof erklärte, dass IKEA als weltweit agierendes Unternehmen bei der Festlegung von Bestimmungen jeweils die strengsten Gesetze jeglicher Länder, in die verkauft wird, zugrunde legt. Aktuell sind das mit Emissionsklasse E1 in Europa, F**** in Japan und den zukünftigen kalifornischen Regelungen CARB¹⁹ drei zentrale gesetzliche Vorgaben an Formaldehydemissionen aus Holzprodukten.

Diese Umstufung zwingt Holzwerkstoffhersteller perspektivisch, auf formaldehydärmere Klebstoffe und somit auch auf alternative Produkte auf Basis nachwachsender Rohstoffe zurückzugreifen (vgl. vorstehende Aussagen zu biogenen Klebstoffen).

¹⁸ Formacare = Europäischer Verband der Formaldehyd herstellenden und verarbeitenden Industrie

¹⁹ Sektion Stoffbewertung des Californian Air Resources Board (CARB)

Grundsätzlich können die Formaldehydgrenzwerte auch mit modifizierten UF-Harzesystemen erreicht werden. Beispiele sind Harze mit niedrigerem Molverhältnis, höheren Beileimungsfaktoren oder zusätzliche Harnstoff-/Härterdosierungen. Ein weiterer Ansatz ist, neben der formaldehydfreien Verleimung mit PMDI-Produkten, die Zugabe geringer PMDI-Anteile in die Mittelschicht, was allerdings zusätzliche Investitionen in geeignete Tanks und spezielle Dosiereinrichtungen erfordert. Übliche Alternativen sind zudem melaminverstärkte UF-Harze, Melamin-Formaldehyd (MF)-Harze, PF-Harze sowie Hybridsysteme, bei denen UF-, MUF- oder PF-Harze mit PMDI oder natürlichen Bindemitteln kombiniert werden. Verschiedene Bindemittelhersteller stellten mit „As-Wood“ (Dynea, proteinmodifiziertes PF-Harz), „Eco-Bind“ (Hexion) sowie dem aminogruppenreichen UF-Harz „Kaurit Plus“ (BASF) Bindemittelsysteme bzw. Technologien vor, die die Herstellung von Holzwerkstoffen mit Emissionen im Bereich des nativen Holzes in Aussicht stellen.

Holzwerkstoffhersteller geben zu bedenken, dass im Gegensatz zu E1 und F**** für die Emissionsforderungen nach CARB noch keine belastbaren Erfahrungen aus der kontinuierlichen Fertigung von Holzwerkstoffen vorhanden sind, jedoch von Leistungsverlusten von bis zu 10 % (durch verminderte Produktionsgeschwindigkeit und Anlagenverfügbarkeit) ausgegangen werden muss. Weitere finanzielle Aufwendungen entstehen für die formaldehydärmeren Leimsysteme, zusätzliche Maßnahmen in der Qualitätskontrolle sowie ggf. eine aufwendigere Lagerhaltung und Logistik. Die damit verbundenen Mehrkosten liegen in Abhängigkeit vom Holzwerkstoff zwischen 10 und 30 € je m³.

Zur EPF-Vorstandssitzung im Rahmen des 6. Europäischen Holzwerkstoff-Symposiums vom 8. bis 10. Oktober 2008 in Hannover wurde über das weitere Vorgehen bei der Einführung des ab Oktober 2008 verbindlichen neuen EPF-S-Standards (u. a. Einbeziehung von OSB und HDF) sowie über die Konsequenzen bei Überschreitung der Grenzwerte entsprechend deklariertes Ware diskutiert. Die Holzwerkstoffhersteller Egger, Glunz, Pfeleiderer, Kronospan und Krono-Gruppe Schweiz stellten ab dem 1. Januar 2009 weitgehend ihre auf die Belieferung der Möbelindustrie ausgerichteten Spanplatten- und MDF-Werke auf reduzierte Formaldehydwerte nach dem o.a. Industriestandard um /N.N. 2008j/.

Beim „Formaldehyd-Workshop“ am 23. und 24. Februar 2009 in Hannover standen wiederholt Formaldehydemissionen aus Holzwerkstoffen und ihre Regulierung im Vordergrund /Steckel 2009/. Dabei wurde deutlich, dass sich CARB auf Spanplatten, MDF sowie Laubsperrholz bezieht, währenddessen Produkte für konstruktive Zwecke (OSB oder Nadelsperrholz) von der Regulierung ausgenommen sind. Die folgende Tabelle zeigt, dass CARB in 2 Phasen umgesetzt wird und dass werkstoffabhängig unterschiedliche Grenzwerte gelten. Nach Ergebnissen von Ringversuchen im Rahmen eines EPF-internen Forschungsprojektes ergeben Kammerprüfungen nach nordamerikanischen ASTM sowie europäischen EN-Standards unterschiedliche absolute Werte. Für Spanplatten und MDF wurden sehr gute Korrelationen bestimmt, während für dünne MDF und Laubsperrholz hinreichende, aber weniger straffe Zusammenhänge nachweisbar sind. Aus den Ergebnissen wurden erste Äquivalenz-Grenzwerte²⁰ nach EN 717-1 ermittelt (Tabelle 7).

²⁰ Äquivalenz-Grenzwerte zu CARB II-Level aus Vergleichsmessungen von Kammerprüfungen nach ASTM E 1333 bzw. D 6007 sowie EN 717-1 (EU-Projekt „Joint European and North American Formaldehyde Testing Project“)

Tabelle 7 Formaldehydemissionsgrenzwerte für Holzwerkstoffe nach CARB-ATCM²¹ /Steckel 2009, Marutzky 2009 überarbeitet/

Werkstofftyp	CARB-Phase I		CARB-Phase II		Äquivalenz-Grenzwert nach EN 717-1 [ppm]
	Inkrafttreten	Grenzwert [ppm]	Inkrafttreten	Grenzwert [ppm]	
Spanplatte	01.01.2009	0,18	01.01.2011	0,09	0,065
MDF	01.01.2009	0,21	01.01.2011	0,11	0,12
dünne MDF (< 8 mm)	01.01.2009	0,21	01.01.2012	0,13	0,14
Laubsperrholz	01.01.2009	0,08	01.01.2010	0,05	0,03

Im Unterschied zu den nach CARB geforderten Formaldehydemissionsmessungen in Prüfkammern (gemäß ASTM E 1333 bzw. D 6007) favorisiert der EPF zum Nachweis der Einhaltung der Grenzwerte die Prüfung des Formaldehydgehaltes nach der Perforatormethode (DIN EN 120) mit Grenzwerten von 4,0 mg/100 g atro Spanplatte und 5,0 mg/100 g atro MDF. Diese Werte zielen auf die Einhaltung der durch CARB II festgelegten Werte ab. Die Perforatormethode kann bei CARB jedoch ausschließlich zur Prozesskontrolle genutzt werden.

IKEA beabsichtigte bei der im Oktober 2009 anstehende Aktualisierung der Spezifikation IoS-MAT-0003, die Grenzwerte für den Formaldehydgehalt und damit die Möglichkeit einer Prüfung nach der Perforatormethode (EN 120) zu streichen. Die maximal zulässige Formaldehydabgabe aus Holzwerkstoffen soll dann ausschließlich als Emissionswert angegeben werden /N. N. 2009b/.

Bis Februar 2009 wurden weltweit 353 Holzwerkstoff-Produktionslinien (europaweit 55) von den bislang insgesamt 23 als Third Party Certifiers (TPC) zugelassenen Prüfinstituten nach CARB I oder CARB II zertifiziert /N. N. 2009a/. Dabei ließen sich vor allem in Europa die meisten Hersteller bereits nach CARB II (vgl. Tabelle 7) zertifizieren.

2.2.4.3 Klebstoffmengen

Die europäische Holzwerkstoffindustrie lieferte im Jahr 2008 nahezu 56 Mio. m³ Holzwerkstoffe (Spanplatten, MDF, Sperrholz, harte und weiche Faserplatten, OSB) an die Verbraucher /EPF 2009/. Zur Herstellung dieser Holzwerkstoffe (inkl. Brettschichtholz und Sperrholz) werden mittlerweile mehr als etwa 4 Mio. t/a Klebstoffe (Festschubstanz) benötigt /Marutzky 2009/. Die Verteilung der Klebstoffe im Jahr 2005 ist in Abbildung 10 dargestellt. Weltweit beträgt der Klebstoffbedarf ca. 10 Mio. t/a und die Verbrauchstendenzen sind weiter steigend.

²¹ Ermittlung der Werte nach ASTM E 1333 (22 m³-Prüfkammer). Zu beachten ist, dass die Prüfparameter vom europäischen Kammertest (DIN EN 717-1) abweichen. ATCM = Airborne Toxic Control Measure

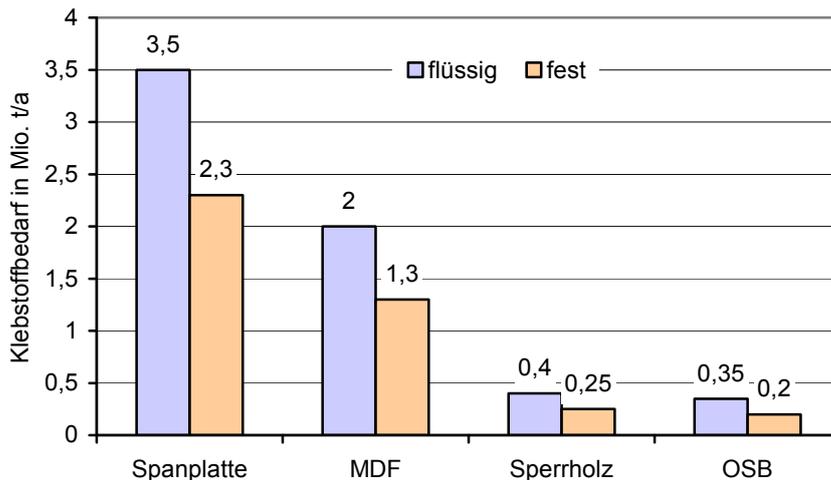


Abbildung 10 Klebstoffbedarf für Holzwerkstoffe in Europa im Jahre 2005 /Thole 2006/

Nach *Marutzky* ist davon auszugehen, dass die im Jahre 2005 europaweit (inkl. Türkei und Russland) hergestellten mehr als 65 Mio. m³ Holzwerkstoffplatten zu mehr als 90 % mit Harnstoff-Formaldehyd (UF)- sowie melaminverstärkten UF-Harzen (mUF, MUF) gebunden waren /*Marutzky 2006*/. Der Anteil an Phenol-Formaldehyd (PF)- oder Melamin-Harnstoff-Phenol-Formaldehyd (MUPF)-Harzen liegt unter 4 % und der Anteil an PMDI-Klebstoffen unter 1 %.

2.2.4.4 Klebstoffe für MDF

Eine wirtschaftliche Herstellung von Faserplatten nach dem Trockenverfahren (MDF), die sowohl normativen Anforderungen als auch qualitativen Kundenansprüchen genügen, erfordert in aller Regel die Verwendung synthetischer Bindemittel. Wenn man weiterhin berücksichtigt, dass die Bindemittelkosten etwa 30 % der MDF-Gesamtkosten ausmachen, wird offensichtlich, welche enorme wirtschaftliche Bedeutung Klebstoffe für das Produkt mitteldichte Faserplatte haben.

Die Herstellung von MDF für den Trockenbereich erfolgt deshalb nahezu ausschließlich unter Verwendung unmodifizierter und modifizierter säurehärtender UF-Harze. Diese Klebstoffe sind technisch ausgereift und dem späteren Verwendungszweck effizient angepasst. Steigende Formaldehydanteile im Harz (Zunahme des freien Formaldehyds bzw. der N-Methylolgruppen) bedingen eine höhere Reaktivität und damit kürzere Gelierzeiten /*Becker, Braun 1988*/. Dies ist zwar hinsichtlich kurzer Aushärtezeiten erwünscht, bedingt aber auch nachträglich höhere Formaldehydabgaben aus den Holzwerkstoffen.

Grundsätzlich gilt, dass im Unterschied zu den langjährigen Erfahrungen bei der Herstellung feuchtebeständig gebundener Spanplatten (z. B. PF-Harz- oder PMDI-gebundene P3/P5/P7-Platten nach EN 312) MDF mit ausgewiesener, höherer Feuchtebeständigkeit nur in geringem Umfang hergestellt werden. Im Ergebnis liegen nur sehr wenige Erfahrungen zur Eignung von Klebstoffen, die von ihren Leistungsparametern eine hohe Feuchtebeständigkeit der Verklebung gewährleisten (u. a. PF-, MUF-, MUPF-Harze sowie PMDI) sollten, im Hinblick auf dauerhafte Feuchte- und Witterungsbeständigkeit von MDF vor.

Diesbezüglich werden wesentliche Impulse durch die vorgelegte Arbeit erwartet.

Kondensationsharze auf Basis von Formaldehyd entstehen durch die Reaktion von Formaldehyd mit verschiedenen Verbindungen wie Harnstoff, Melamin, Phenol oder Resorcin sowie mit Kombinationen dieser Verbindungen. Allen Formaldehyd-Kondensationsharzen ist das Merkmal der duroplastischen Aushärtung gemeinsam. Sie bestehen in Liefer- und Verarbeitungsform aus linearen oder verzweigten oligomeren bzw. polymeren Molekülen und liegen in wässriger Lösung bzw. als Dispersion von Molekülen in wässrigen Lösungen der gleichen Molekülart vor. In Abhängigkeit von Harzart und eingesetztem Härtungskatalysator laufen die Härtungsreaktionen im sauren (UF, MF, MUF, MUPF), im alkalischen (PF, PUF) oder im neutralen Bereich (RF, PRF) ab /Dunky, Niemz 2002/.

Ausgehärtete UF-Harze unterliegen bei Einwirkung von Feuchtigkeit, insbesondere bei höheren Temperaturen, wegen der teilweise umkehrbaren Reaktion zwischen Harnstoff und Formaldehyd einer chemischen Zersetzung und sind damit nicht hydrolysestabil. Aus dieser fehlenden Hydrolyseresistenz resultiert dann die Freisetzung von Formaldehyd und eine entsprechende Emission in die Umgebung.

Bei Herstellung dünner MDF hoher Dichten (HDF), die als Trägerwerkstoff für Laminatfußböden Verwendung finden, werden neben UF-Harzen zunehmend auch melaminverstärkte UF-Harze sowie „echte“ MUF-Harze mit Melaminanteilen von 10 bis 25 % eingesetzt. Über den Melaminzusatz wird eine deutliche Verbesserung der Feuchtebeständigkeit der Verklebung und daraus resultierend, eine Reduzierung der Quellwerte nach Wasserlagerung erreicht.

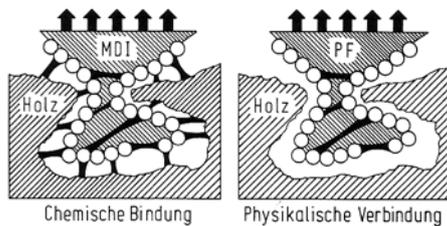
Wird während der Harzkondensation zusätzlich zum Melamin auch noch Phenol zugegeben, erhält man MUPF-Harze. Derartige Produkte werden bereits verbreitet für OSB-Deckschichten, nicht jedoch zur Herstellung von MDF eingesetzt, obwohl durch den elastifizierenden Phenolanteil gegenüber reinen MUF-Harzen eine deutlich bessere Festigkeit nach Kochprüfung erreicht wird. Das ist insofern bedeutsam, da gerade die Quersugfestigkeit nach Kochprüfung als entscheidendes Indiz für das Maß der Feuchtebeständigkeit einer Verklebung angesehen wird. Reine Melamin-Formaldehyd (MF)-Harze mit Melaminanteilen von bis zu 50 % weisen sehr hohe Feuchte- und Temperaturbeständigkeiten auf, finden wegen des hohen Preises i. d. R. jedoch nur als Zuzuschüsse zu MUF-Harzen Einsatz /Deppe, Ernst 1996/.

Ein weiteres Bindemittel zum Erreichen hoher MDF-Feuchtebeständigkeiten ist PF-Harz. Die Harzreaktion verläuft ähnlich zu UF und MUF, wobei das Formaldehyd im alkalischen pH-Bereich weitgehend hydrolyseresistent an das Phenol angelagert wird. Im Unterschied zu den aminoplastischen Harzen ist bei ausgehärteten Phenolharzen durch die quasi nicht aufspaltbare Bindung zwischen Formaldehyd und einem phenolischen Ring (C-C-Bindung) keine nachträgliche Formaldehydabgabe möglich.

Eine interessante Alternative zu PF-Harzen sind Tannin-formaldehydharze (TF-Harze). Der Grundrohstoff Tannin wird u. a. aus Akazienrinde und Quebrachorindenholz gewonnen. Tannin und Formaldehyd reagieren in der Kondensationsreaktion in einem alkalischen Milieu, die Eigenschaften entsprechen weitgehend PF-Harzen. In Deutschland gibt es einen Hersteller, der tanningebundene MDF für die Innenanwendung im Feuchtbereich anbietet und auch im Besitz einer allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung (Z-9.1-234) für derart gebundene Faserplatten ist.

Während die Verklebungseffekte der vorstehend angeführten, üblicherweise wasserbasierten Kondensationsharze vordergründig auf sich im MDF-Herstellungsprozess unter Einwirkung von Wärme und Druck zwischen den Fasern und den Klebstoffmolekülen ausbildenden Adhäsions- sowie die zwischen den Klebstoffmolekülen selbst ausbildenden

den Kohäsionskräfte zurückzuführen sind, wird polymeren Diisocyanaten (PMDI) neben diesen physikalischen auch eine chemische Bindung zwischen den OH-Gruppen des Holzes (vorzugsweise in Cellulose und Lignin) und den NCO-Gruppen des Diisocyanats zugesprochen.



Über dabei entstehende Urethanbrücken können echte chemische Bindungen zwischen den Holzpartikeln entstehen (Abbildung 11).

Abbildung 11 Theoretischer Wirkmechanismus einer Verklebung von Holz mit PMDI und PF-Harz /Deppe, Ernst 1996/

Daneben wird Polyharnstoff gebildet, der ebenfalls zur Verklebung beiträgt. Resultierend daraus sowie aus dem grundsätzlich veränderten Benetzungsverhalten von Diisocyanaten ergeben sich bei geeigneter Verwendung von PMDI-Klebstoffen trotz gegenüber Kondensationsharzen reduzierten Bindemittelmengen hochwertige Festigkeitseigenschaften und eine feuchtebeständige Verklebungsqualität /Kramer 1993; Marcinko et al. 1995; Festel et al. 1997/.

Die Aushärtung des PMDI erfolgt über drei mögliche Wege. Zum ersten reagieren die Isocyanatgruppen des PMDI mit anderen Gruppen, denen eine OH-Gruppe anhaftet, zu sogenannten Urethanen. Mit steigender Anzahl zugänglicher OH-Gruppen im Holzpartikelgemisch steigt die Anzahl chemischer Bindungen zwischen Klebstoff und Holzoberfläche. Zum Zweiten reagieren die Isocyanatgruppen mit Wasser zu Anilinderivaten unter Abspaltung von CO_2 , die sich im Dritten mit ursprünglichen Isocyanatgruppen zu einem Biuret verbinden. Durch die Wasser getriebene Bindung der PMDI untereinander wird die dreidimensionale Vernetzung des Klebstoffs (vgl. Abbildung 11) realisiert, die somit signifikant von der Faserstofffeuchte abhängig ist. Die geringe Viskosität des PMDI führt zu einer guten Penetration des Klebstoffs in die Faser, was die Faser-Matrix-Bindung verbessert.

Vor allem in Italien, Großbritannien und Spanien wird PMDI als Bindemittel für MDF erfolgreich eingesetzt. In Deutschland verfügt mindestens ein Hersteller über das Know-how zur Herstellung PMDI-gebundener, dicker MDF (40 bis 80 mm) im Rohdichtebereich von 180 bis 350 kg/m^3 , die speziell für Wärmedämmzwecke im Bauwesen eine interessante Alternative zu den marktüblichen, mineralischen Produkten darstellen.

Zusammenfassend wird eingeschätzt, dass sich die aufgezählten Bindemittel hinsichtlich des Benetzungsverhaltens unterscheiden. Im Gegensatz zu allen anderen Bindemitteln dringt PMDI in die Fasern ein (Imprägniereffekt) und bildet über die OH-Gruppen des Holzes chemische Bindungen zwischen PMDI und Holz aus. Die anderen üblicherweise zur MDF-Herstellung eingesetzten Bindemittel (UF, MUF, MUPF, PF) reagieren „nur“ physikalisch und „liegen“ damit quasi zwischen den Fasern. Wenn die Faserstoffe bei Feuchteeinwirkung quellen/schwinden, entstehen Querdruck- und Querkzugspannungen, die die Leimbrücken belasten. Die besten Ergebnisse bezüglich einer hochfeuchtebeständigen Verklebung sollten deshalb PMDI-gebundene MDF ergeben.

Es wird angenommen, dass durch die mit einer Aufschlussintensivierung bei der Faserstoffherstellung einhergehende Reduzierung des Quell- und Schwindverhaltens der Fasern im Ergebnis zu geringeren Querdruck- und Querkzug-Belastungen der Leimbrücken und damit zu besseren Festigkeits- und Quellungseigenschaften nach entsprechender Vorbehandlung (z. B. nach Zyklus- oder Kochtest) führt. Im Ergebnis könnten mit solcherart modifizierten Faserstoffen auch unter Verwendung von MUF-, MUPF- oder PF-Harzen MDF in feuchtebeständigen Verklebungsqualitäten hergestellt werden.

2.2.4.5 Zusatzstoffe für MDF

Für die Aushärtung der UF- und mUF-/MUF-Harze finden säureabgebende Substanzen auf Basis von Ammoniumsulfat oder Ammoniumnitrat Verwendung, die als wässrige Lösung der Bindemittelflotte zugesetzt werden. Ammoniumchlorid war über viele Jahrzehnte die maßgebliche, sehr effizient arbeitende Härtingskomponente. Seit Inkrafttreten der Altholzverordnung in Deutschland im Jahre 2002 (und dem in §3 festgeschriebenen Grenzwert für Chlorid von 600 mg/kg atro Platte) ist die Verwendung chloridhaltiger Härter nicht mehr zulässig.

Phenol-Formaldehyd-Harze benötigen zwar keine Härter, zur Reduzierung der längeren Presszeit wird aber i. d. R. „Pottasche“ (Kaliumcarbonat) in wässriger Lösung als Beschleuniger zugesetzt. Klebstoffe auf Basis polymerer Isocyanate können durch geeignete Polyole (u. a. natürliche Öle) ebenfalls eine Beschleunigung ihrer Reaktion erfahren.

Als Hydrophobierungsmittel finden bei der Fertigung von MDF grundsätzlich Paraffine Verwendung. Zum einen verbessert der Zusatz dieser Additive signifikant die Quellungsneigung (Dicken- und Kantenquellung) der Faserplatten nach Wasserlagerung. Andererseits bewirken die Paraffine eine bessere Dimensionsstabilität bei Änderung der relativen Luftfeuchte und tragen zur Beschichtungseignung der MDF mit wässrigen Leimen oder Lacken bei. Die Zugabe der Paraffine erfolgt entweder als geschmolzenes Wachs (Heißwachs) unmittelbar

- vor der Zerfaserung im Dämpfrohr des Kochers oder im Vorwärmer,
- während der Zerfaserung durch die Hohlwelle des Refiners zwischen die Zerfaserungsscheiben oder
- nach der Zerfaserung während des pneumatischen Transports des Faserstoffs.

Alternativ dazu werden die Paraffine als wässrige Dispersion der Bindemittelflotte zugesetzt, was heutzutage insbesondere durch die einfachere Verarbeitung verbreitet industrielle Praxis ist. Hohe Paraffindosierungen (> 2 %, bezogen auf Faserstoff) beeinflussen die Festigkeitseigenschaften grundsätzlich nachteilig, bleiben auf das Kriechverhalten der Faserplatten aber ohne charakteristische Auswirkung /Dube, Kehr 1996/. Die Effektivität der Paraffinwachse hängt von ihrer chemischen Zusammensetzung ab /Rofael et al. 2005a/.

Nach Praxiserfahrungen ist davon auszugehen, dass insbesondere die Kantenquellung der HDF-Träger von beschichteten Laminatböden durch die eingesetzte Paraffinqualität und -menge entscheidend beeinflusst werden kann /Wolf 2009/. Unter der Voraussetzung einer funktionierenden Einarbeitung bietet die Heißwachstechnologie dabei wirtschaftliche Vorteile (geringere Rohstoffkosten). Die an unbeschichteten Rohfaserplatten bestimmte Dickenquellung nach Wasserlagerung wird hingegen maßgeblich vom Bindemittel (wichtig Melaminanteil) und weniger vom Hydrophobierungsmittel geprägt.

Für Harnstoff-Formaldehyd-Harze und melaminverstärkte UF-Harze gilt, dass für das Erreichen von E1-Plattenqualitäten oftmals zusätzliche, formaldehydbindende Additive notwendig sind. Stand der Technik ist dabei die Verwendung von wässrigen Harnstofflösungen als Zusatz zur Bindemittelflotte, wobei sich zu hohe Dosierungen nachteilig auf ausgewählte Platteneigenschaften, vor allem auf die Quellung, auswirken.

Im Bedarfsfall können MDF durch die Zugabe von Schutzmitteln gegen Feuer (u. a. Ammoniumphosphate, z. B. „BHF 690P“), von Additiven zur Erhöhung der elektrischen Leitfähigkeit für pulverlackierbar bzw. antistatisch ausgerüstete „ableitfähige“ MDF (u. a. Erdalkalisalze auf Basis von Lithium-, Natrium- oder Kaliumnitrat sowie Cholinchloride,

z. B. „Kauropal S“) sowie von Schutzmitteln gegen biologischen Befall (anorganische Borverbindungen und Kaliumfluoride, z. B. „Xyligen 30 F“) Spezialeigenschaften verliehen werden. Analog zu den Aussagen für hydrophobierende und formaldehydbindende Additive gilt, dass die Zugabe der vorstehend aufgeführten Produkte die Faserwerkstoffeigenschaften beeinflusst.

In den letzten Jahren erfolgten in der MDF-Industrie vor allem intensive Bemühungen zur Verbesserung der elektrischen Leitfähigkeit. Einerseits entwickelten mehrere Hersteller pulverlackierbare MDF. Von großer Bedeutung sind andererseits aber auch die Arbeiten zur leitfähigen Ausrüstung von HDF, die als Trägerwerkstoff von Laminatfußböden die diesem Produkt innewohnenden elektrostatischen Aufladungen möglichst effizient ableiten müssen. Die diesbezüglich erreichten Lösungen sind zum jetzigen Standpunkt als noch nicht zufriedenstellend einzuschätzen.

2.2.5 Aufschlussverfahren zur Faserstoffherzeugung

Als Faserstoffe im Allgemeinen werden aus Holz oder Einjähropflanzen auf chemischem, chemisch-mechanischem oder mechanischem Wege gewonnene Fasermaterialien verstanden, die für die Herstellung von Papier, Pappe, Filterpapier, Formteilen, Faserplatten u.ä. Verwendung finden /Augustin 1988/. Aufgabe des jeweiligen Zerfaserungsverfahrens ist es, die verbindende Wirkung der Mittelamelle – die die höchste Konzentration an Lignin aufweist und die Fasern miteinander verbindet – aufzuschern und einzelne Fasern aus dem Faserverband des Ausgangsmaterials herauszulösen. Dies geschieht am einfachsten und besten zwischen zwei Scheiben, von denen eine fest steht und eine rotiert. Wird das Material nun durch diesen Spalt zwischen den beiden Scheiben gezwungen, wird es in Fasern bzw. Faserbündel abgeschert, geschnitten und abgerieben bzw. abgeschleudert. Über Jahrhunderte hinweg wurde Korn auf diese Weise gemahlen /FPL 1999/.

Das entstehende Faserstoffmaterial besteht im Wesentlichen aus Faser- und Feinstofffraktionen sowie zusätzlichen Anteilen an Splintern, Faserbündeln und Staubpartikeln.

Für die Zerfaserung finden Scheibenrefiner, Flachkegel-Refiner und Steilkegel-Refiner Verwendung. Scheibenrefiner werden vorwiegend zur Erzeugung von Holzstoffen verwendet. Die Zuführung des Mahlgutes erfolgt über Schnecken in das Scheibenzentrum. Die Scheiben sind mit Nuten und Federn versehen, die auf Grund der Drehbewegung der Scheiben beim Übereinandergleiten die Zerfaserung oder Defibrierung und anschließend eine Mahlung der erzeugten Fasern bewirken. Die Scheibendurchmesser liegen i. d. R. zwischen 90...150 cm und solche Zerfaserer können sowohl unter Druck als auch drucklos arbeiten. Das wesentliche Kriterium zur Regulierung der Mahlung ist der Scheibenabstand, der meist hydraulisch geregelt wird. Die Antriebsleistungen liegen i. d. R. zwischen 1.000...10.000 kW, wobei die Firma Andritz mittlerweile einen Refiner mit 14.000 kW anbietet /Andritz 2007/. Man unterscheidet innerhalb der Scheibenrefiner noch zwischen Einscheiben-Refiner (zwei parallele Mahlscheiben, von denen eine fixiert ist und die andere angetrieben wird (Stator und Rotor)), Doppelscheiben-Refiner (zwei parallele Mahlscheiben, die beide angetrieben werden und sich gegeneinander drehen, dadurch Reduzierung der Umdrehungsgeschwindigkeit der Einzelscheiben) und Twin-Refiner (zwei feststehende Scheiben und eine zentral sich drehende, beidseitig mit einer Mahlgarnitur bestückte Scheibe, i. d. R. Hochleistungsaggregate für die Faserstoffmahlung).

Der zweite Refiner-Typ ist der Flachkegel-Refiner. Er wird vor allen Dingen zur Faserstoffmahlung verwendet. Die Mahlgarnitur besteht aus einem rotierenden Kegel (Rotor)

und dem umgebenden Kegelmantel (Stator), von denen beide Mahlgarnituren besitzen. Die Einstellung des Mahlpaltes erfolgt durch die axiale Verstellung des Rotors. Der Kegelwinkel beträgt 20...35 Grad, der Stoffeintritt erfolgt von der schmalen Seite des Konus und der Stoffaustritt am Kegelfuß.

Der dritte Typ ist der Steilkegel-Refiner, der ebenfalls hauptsächlich zur Faserstoff-Mahlung verwendet wird. Der Kegelwinkel beträgt etwa 60 Grad, im Unterschied zum Flachkegel-Refiner ist der Verstellweg geringer und der Anpressdruck höher.

Nach der Art der Zerfaserung ist zwischen Steinschliff und Hackschnitzelschliff zu unterscheiden. Beim Steinschliff wird das Holz in Form von Rundholz eingesetzt und mit Hilfe von Schleifersteinen zu Weiß-, Braun- Druckschliff sowie chemischem Schliff zerfasert /*Schneider 1999*/. Beim Hackschnitzelschliff erfolgt die Zerfaserung der i. d. R. vorbehandelten Hackschnitzel nahezu ausschließlich mittels mechanischer Zerfaserungsverfahren hauptsächlich in Scheibenmühlen unter gleichzeitiger Einwirkung von Wasser und Wärme. Neben mechanisch erzeugtem Refiner-Holzstoff und thermo-mechanischem Holzstoff sind weiterhin chemisch-mechanische sowie chemo-thermo-mechanische Faseraufschlussverfahren bekannt /*Kehr 1990*/.

Die Faserplattenindustrie bedient sich zum Holzaufschluss nahezu ausschließlich thermo-mechanischer Verfahren, wobei darunter Verfahren verstanden werden, bei denen die Stoffänderungsprozesse vorrangig durch die Einleitung thermischer oder mechanischer Energie ausgelöst werden. Dabei ist zu beachten, dass durch die Einwirkung thermischer Energie in Form gesättigten Dampfes auf das Holz in diesem partielle Hydrolysen ablaufen, die infolge andauernder Dampfeinwirkung durch entstehende organische Säuren katalysiert werden.

International dominieren heute drei thermo-mechanische Verfahren, deren Grundlagen im Zeitraum 1924 bis 1937 geschaffen wurden:

1. Dampfexplosionsverfahren nach MASON,
2. Defibratorverfahren nach ASPLUND,
3. Bauer-Verfahren nach BAUER.

Das Dampfexplosionsverfahren nach MASON (auch Masonite-Verfahren) ist durch eine schnelle und intensive Plastifizierung des Holzes durch kurzzeitige Einwirkung²² hochgespannten Dampfes ($p_{\max} = 7,0$ bis $8,5$ MPa) mit nachfolgender Druckentspannung auf Atmosphärendruck gekennzeichnet (Abbildung 12).

²² 40 bis 50 s bei traditionellem Masonite-Verfahren sowie 160 bis 180 s bei modifiziertem Masonite Verfahren zur Senkung des Verlustes an Holzsubstanz /*Koran et al. 1978*/

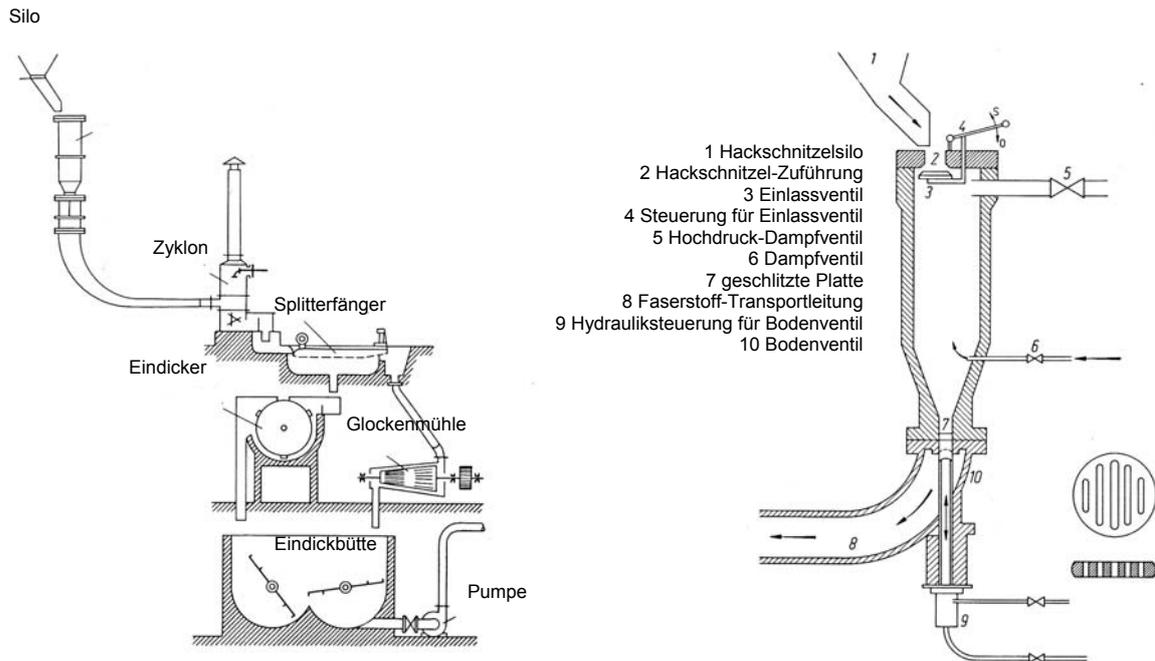


Abbildung 12 links: Schematische Darstellung des Holzaufschlussprozesses nach dem Masonite-Verfahren, rechts: Schnitt durch das Zerfaserungsaggregat (Explosionsgefäß = Kanone) / Mason 1927; Voith 1943/

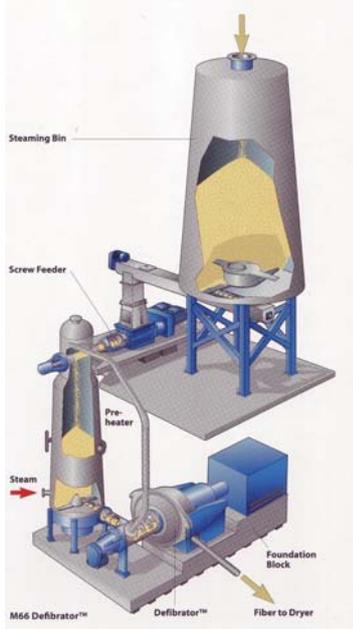
Das vorrangig auf dem nordamerikanischen und australischen Kontinent angewandte Verfahren verarbeitet Hackschnitzel im Längenbereich von 10 bis 25 mm. Die Beschriftung der das Kernstück des Verfahrens bildenden Masonkanone erfolgt periodisch durch die ventilgesteuerte Füllöffnung. Die Entleerung der Druckkammer wird nach einem festgelegten Druck-Zeit-Regime über ein hydraulisch gesteuertes Schnellschlussventil gesteuert.

Mit einer Geschwindigkeit von 1000 bis 1200 m/s expandieren Hackschnitzel und Dampf durch das Auslassventil in einen Raum von normalem atmosphärischem Druck, wobei die dabei auftretende Wandreibung an den Ventilschlitzten eine erste mechanische Vorzerkleinerung der plastifizierten Hackschnitzel bewirkt. Da die Druckentspannung des im Inneren der Holzsubstanz aufgespeicherten Dampfes nicht in gleicher Geschwindigkeit folgen kann, führt der innere Überdruck zu einer „Sprengung“ des Holzverbandes.

Im Resultat dieses Prozesses entstehen Fasern und Faserbündel, deren charakteristische Merkmale deformierte Einzelfasern und Zellelemente sind. Den zu beobachtenden Deformationen geht in der Regel ein Aufplatzen und damit gleichzeitig ein Aufstülpen der Fasern und Zellschichten voraus. Der schlauchartige Charakter der Fasern geht überwiegend verloren und es entsteht ein großer Teil an Faserbändern /Lampert 1967; Kollmann 1955; Koran et al. 1978; Suchsland et al. 1983/.

Nachdem das Masonite-Verfahren in den letzten Jahrzehnten zur Aufbereitung von Faserstoffen für MDF maßgeblich an Bedeutung verloren hat, erfährt diese Aufschlusstechnologie vor dem Hintergrund der weltweit intensiven Forschungsaktivitäten zur Herstellung von Bioethanol der 2. Generation (auch Zelluloseethanol genannt) eine Renaissance. Dabei finden im Unterschied zum Bioethanol der 1. Generation (Rohstoffe Mais und Weizen) grundsätzlich lignocellulosehaltige Rohstoffe Verwendung, die nicht als Nahrungsquelle für den Menschen nutzbar sind. Die Rohstoffe werden nach einer geeigneten Vorbehandlung und Hydrolyse des Pflanzenfaseranteils (Cellulose und Hemicellulose) mit dem Ziel einer möglichst effektiven Ausbeute an Monosacchariden (Glucose, Arabinose, Xylose) einem intensivem Aufschluss u. a. nach dem Dampfexplosionsverfahren unterzogen.

Beim Defibratorverfahren nach ASPLUND erfolgt die thermische Vorbehandlung der Hackschnitzel im Vorwärmer mittels Sattedampf bei Temperaturen von 150 bis 190 °C. Anschließend werden die plastifizierten Hackschnitzel unter Dampf im Defibrator zerfasert (Abbildung 13). Gegebenenfalls schließt sich der Zerfaserung unter Druck eine Nachzerfaserung im Raffinator bei atmosphärischen Druckverhältnissen an.



Das Typische des Defibrators ist die direkte Kombination der kontinuierlichen Vorerwärmung und der Zerfaserung bei erhöhter Temperatur und unter Dampfdruck in einem Aggregat. Das eigentliche Zerfaserungsaggregat ist eine Einscheibenmühle, die aus einer stehenden (Stator) und einer rotierenden Mahlscheibe (Rotor) besteht. Die Mahlscheiben sind mit austauschbaren, profilierten Mahlsegmenten bestückt, deren Geometrie hersteller-spezifisch unterschiedlich ist und die entscheidend die entstehenden Faserstoffqualität sowie den Energieverbrauch der Zerfaserung beeinflussen.

Abbildung 13 Schematische Darstellung des Holzauflösungsprozesses nach dem Defibratorverfahren /MDF Industry Update 2001/

Die Ausbildung und Profilierung der Mahlscheiben sind bestimmend für die erzeugte Faserqualität. Allgemein unterscheidet man zwischen zwei Haupttypen: Es werden Mahlscheiben mit gefrästen oder gegossenen Rillen verwendet. Bei gefrästen Scheiben ist ein mehrmaliges neues Anschleifen möglich. Scheiben aus gegossenen Rillen werden in der Regel mit Segmenten hergestellt. Sie bestehen aus hartem und säurefestem Stahl und werden mittels Bolzen als Bi- oder Uni-direktionale Mahlsegmente am Träger befestigt. Unidirektionale Mahlsegmente setzen durch die vorgegebene Drehrichtung eine tangentiale Faserstoffabführung zwingend voraus. Im Unterschied dazu erlauben die Bi-direktionalen Mahlsegmente einen radialen oder tangentialen Materialabfluss. Beim Mahlscheibenprofil ist generell zwischen Beschickungs- und Mahlzone zu unterscheiden /Lampert 1966/. Die Beschickungszone ist je nach Scheibendurchmesser bei Beförderung des Mahlgutes vom Mittelpunkt zur Scheibenperipherie vier- bis fünfmal breiter als die eigentliche Mahlzone.

Dem Defibratorverfahren liegt die Erkenntnis zugrunde, dass die stark ligninhaltige Mittellamelle im Temperaturbereich von 150 bis 180 °C erweicht und dass sich die Hackschnitzel zwischen den Mahlscheiben des Defibrators mit relativ geringem Energieaufwand ohne Beschädigung in Fasern zerlegen lassen. Nach Angaben verschiedener Hersteller beträgt der zur Zerfaserung der Hackschnitzel erforderliche spezifische Energieaufwand zwischen 80 und 200 (bei Sägespänen bis 400) kWh/t atro Faserstoff, was im Maximalfall immerhin 50 % des Gesamtenergiebedarfs einer MDF-Fertigung ausmacht.

Nach *Goring* ist bekannt, dass die Erweichungstemperatur (Glastemperatur, Glasumwandlungstemperatur) des Lignins in Abhängigkeit vom Feuchtegehalt des Holzes bereits ab etwa 95 °C einsetzt /Goring 1963/. Das Lignin erfährt in diesem Temperaturbereich reversible Strukturveränderungen und geht von einem amorphen (glasartigen) in einen gummielastischen Zustand über. Neben den Aufschlussbedingungen in Kocher und Refiner wird die Erweichungstemperatur des Lignins entscheidend durch die Scher-

frequenz (abhängig von Motordrehzahl, Scheibengeometrie, Scheibendurchmesser, Ein- oder Doppelscheibenrefiner) des Refiners bestimmt /Giertz 1974/. Die Erweichungstemperatur des Lignins steigt bei Erhöhung der Scherfrequenz um eine Zehnerpotenz um jeweils etwa 7 – 12 °C. Beispielhaft liegt die Erweichungstemperatur des Lignins feuchter Hackschnitzel in einem Refiner mit einer Scherfrequenz von ca. 10^4 Hz im Bereich von 120 bis 140 °C /Haunan et al. 1975; Blechschmidt et al. 1988/.

Das charakteristische Merkmal des überwiegend auf dem nordamerikanischen Kontinente beheimateten BAUER-Verfahrens besteht in der gerätetechnischen Trennung der Prozessstufen Plastifizierung und Zerkleinerung. Durch das Dämpfen von Hackschnitzeln mit einer Vorzugslänge von 10 bis 12 mm in Grenco-Kochern bei etwa 0,2 bis 0,6 MPa (120 bis 160 °C) wird der notwendige Hydrolysegrad innerhalb von 10 bis 15 min erreicht. Die Dämpfung kann durch eine 24-stündige Warmwasserbehandlung im Temperaturbereich von 70 bis 80 °C ersetzt werden. Alkalische Zusätze beschleunigen die Hydrolyse erheblich /Mc Millin 1969/.

Das auf diese Weise vorbehandelte Hackschnitzelgemisch wird der Bauer-Mühle, einem Doppelscheibenrefiner mit zwei gegenläufigen rotierenden Mahlscheiben, zugeführt. Der langfasrige Charakter des nach diesem Verfahren entstehenden Faserstoffes ist das Resultat stark reduzierter Zentrifugalkräfte bei gleichzeitiger Wirkung sehr hoher Relativgeschwindigkeiten auf den aufzuschließenden Stoffverband /Mc Millin 1969; Eisner 1978/.

Tabelle 8 zeigt einen Vergleich der in der Faserplattenindustrie üblichen thermomechanischen Holzaufschlussverfahren. Die Wertung der Wirtschaftlichkeit der Verfahren fällt eindeutig zugunsten des Defibratorverfahrens aus. Geringere rohstoffseitige Anforderungen, eine höhere Ausbeute und der mit Abstand geringste Energieverbrauch zeichnen diesen Prozess aus.

Explizit nicht eingegangen wird auf das BIFFAR-Verfahren, da es sich dabei um ein chemomechanisches Verfahren handelt, bei dem das Ausgangsmaterial in einem Kugel- oder Sturzkocher mit verdünnter Soda- oder Natronlauge über 2...6 h bei 6 bar Dampfdruck (130...150 °C) vorgekocht und zerkleinert wird.

Tabelle 8 Vergleich thermomechanischer Holzaufschlussverfahren /Lampert 1966; Kollmann 1955; Koran et al. 1978; Krug, Mäbert 2007; Suchsland et al. 1983; Mannström 1972; Mäbert; Krug 2009; Mc Millin 1969; May 1974; Nagy 1964; Nelson 1973; Nicholls 1970; Šisler, Kéda 1962/

Vergleichsgröße	Defibratorverfahren	Bauer-Verfahren	Masonite-Verfahren
Art des Rohstoffes	Nadel- und Laubholz-Hackschnitzel, Einjähropflanzen	Nadel- und Laubholz-Hackschnitzel	Nadelholz-Hackschnitzel
Abmessungen Hackschnitzel (Länge)	10 bis 40 (60) mm	10 bis 12 (20) mm	10 bis 25 mm
Feuchtegehalt Hackschnitzel	bis 100 %	etwa 100 %	etwa 50 %
Dämpfbedingungen - Druck - Temperatur - Zeit	0,62 ... 1,13 MPa 160 ... 185 °C 2 ... 5 min	0,19 ... 0,62 MPa 120 ... 160 °C 3 ... 10 ... 15 min	2,79 ... 7,00 MPa 210 ... 285 °C 1 ... 2 ... 3 min
Zerfaserung	unter Dampfdruck im Defibrator (Einscheibenmühlen) bei älteren Systemen Nachzerfaserung im Refiner (Raffinator)	unter Atmosphärendruck in Doppelscheibenmühle gegenläufig rotierende Mahlscheiben keine Nachzerfaserung	durch explosionsartige Druckentspannung Nachzerfaserung im Refiner (oftmals 2-stufig)
Gehalt an wasserlöslichen und flüchtigen Substanzen	5 ... 9 (10) %	7 ... 15 %	12 ... 17 %
Faserstoffausbeute	91 ... 95 %	85 ... 93 %	83 ... 88 %
Faserstoffcharakteristik			
- pH-Wert	3,5 ... 5,0	4,0 ... 4,2	3,8 ... 4,0
- Fasermorphologie	- Fasern nahezu unbeschädigt - wenig Faserkürzungen - mittlere Faserlänge 1 – 5 mm - mäßig fibrilliert	- Fasern nahezu unbeschädigt - wenig Faserkürzungen - mittlere Faserlänge 2 – 6 mm - gut fibrilliert (insbesondere im Temperaturbereich 120 – 135 °C)	- Fasern stark deformiert - großer Anteil an Faserbündeln (~ 70 %) - mittlere Faserlänge 0,5 – 2 mm - kaum fibrilliert
- Festigkeit Einzelfaser	hoch	hoch	niedrig
- Fähigkeit der Faser zur Ausbildung chemischer Bindungen	gering	hoch im Temperaturbereich 120 – 135 °C, gering bei höheren Temperaturen	sehr hoch

Infolge unterschiedlicher Dämpf- und Zerfaserungsbedingungen variieren Morphologie und chemische Aktivität der nach den einzelnen Verfahren hergestellten Faserstoffe erheblich. Zur Faserqualitätskontrolle liefern verschiedene Nass- oder Trockenanalysemethoden (u. a. Bauer McNett, Pulmac, Curl, QualScan, Luftstrahlsiebung, Fibreshape) mittlerweile vielfältige Qualitätsindizes sowie Hinweise zur Korngrößenverteilung /u. a. Koran et al. 1978; Wessbladh, Mohr 1999; Lilie et al. 2006; Ohlmeyer et al. 2006/. Zahlreiche Versuche, eine der angegebenen Möglichkeiten als Online-Messmethode zur Bestimmung der Fasermorphologie im Industriemaßstab zu etablieren, scheiterten aber bislang.

Die längeren Dämpfzeiten, die beim Bauer-Verfahren Anwendung finden, und die außerordentlich hohe Dampf-temperatur (respektive Dampfdruck) des Masonite-Verfahrens führen zu Substanzverlusten, die die Wirtschaftlichkeit dieser Verfahren stark

beeinträchtigen. Verschiedene Bestrebungen, insbesondere dem Masonite-Verfahren wieder Attraktivität zu verleihen, führten zwar zu einer Steigerung der Ausbeute (durch Verlängerung der Dämpfzeit auf 3 min bei gleichzeitiger Verkürzung des Maximaldruckes auf 4,48 MPa). Allerdings liegen die damit erreichbaren Ausbeuten unterhalb des Defibratorverfahrens /Koran et al. 1978; Suchsland et al. 1983/.

Durch die aus energieökonomischer Sicht gerechtfertigten Prozessbedingungen des Defibrator-Verfahrens entsteht ein Faserstoff, dessen Fähigkeit zur Ausbildung chemischer Bindungen im Prozess der Plattenpressung im Vergleich zur nativen Faser stark eingeschränkt ist. Die mögliche Umhüllung der Fasern durch eine Ligninschicht im Reitzustand schränkt die Bildung von Wasserstoffbrückenbindungen ein.

Die von Pecina /1979/ vertretene Ansicht, dass die Ausbildung chemischer Bindungen generell nicht möglich ist, teilt der Autor nach eigenen Erfahrungen bei der Herstellung bindemittelfreier MDF und HDF nicht /Krug 2005/.

Zwischen nach dem Bauer- und Defibrator-Verfahren hergestellten Faserstoffen bestehen hinsichtlich Morphologie und chemischer Aktivität kaum Unterschiede /Nagy 1964, 1969/. Diese Aussage kann allerdings nur dann Gültigkeit haben, wenn die Dämpfung der Hackschnitzel bei Temperaturen oberhalb von 135 °C stattgefunden hat. Untersuchungen im Temperaturbereich von 110 bis 135 °C (analog dem aus der Papierindustrie bekannten TMP²³-Verfahren) bestätigten die Eignung der genannten Verfahrensbedingungen für das Erzielen einer starken chemischen Aktivität des Faserstoffes, in deren Folge Faserplatten mit hohem Gebrauchswert hergestellt werden können. Bei Führung des Bauer-Verfahrens ist demzufolge eine höhere chemische Aktivität des Faserstoffes zu erwarten, wenngleich gegenwärtig (offensichtlich bestimmt durch energieökonomische Erwägungen) ein Temperaturbereich von 150 bis 160 °C in der industriellen Praxis üblich ist.

Aus den sich stark unterscheidenden Aufschlussbedingungen des Masonite-Verfahrens gegenüber dem Defibrator- oder Bauer-Verfahren resultieren Besonderheiten in der Faserstoffcharakteristik. Die Heftigkeit der ablaufenden Partialhydrolyse bewirkt einen stark sauren Charakter des Faserstoffes mit pH-Werten um 3,0 /Suchsland et al. 1983/. Im Vergleich zu Defibratorfaserstoff besitzen Fasern nach dem Masonite-Verfahren günstige Voraussetzungen für die Ausbildung von Wasserstoffbrückenbindungen, da durch die kurzzeitige Beanspruchung im Temperaturbereich von 255 °C eine Umwandlung des Lignins in Aktivlignin erfolgt. Neben der damit möglichen aktiven Beteiligung des Lignins an der Faser-Faser-Bindung entfällt die partielle Blockierung funktioneller Gruppen der Holocellulosen, die beim Defibrator-Verfahren beobachtet werden kann.

Diesen positiven Aspekten steht eine deutlich ungünstigere morphologische Struktur des Masonite-Faserstoffes gegenüber. Koran et al. berichten über starke Deformationen und partielle Schädigungen, die sich neben kürzeren Faserlängen in einer um etwa 50 % niedrigeren Reißlänge und Dehnbarkeit gegenüber Defibratorfaserstoff widerspiegeln /Koran et al. 1978/.

Zusammenfassend ist zu konstatieren, dass das Defibrator-Verfahren vor allem dank des günstigen Aufwand-Nutzen-Verhältnisses international ständig an Gewicht gewinnt. Die in der heutigen Zeit maßgeblichen Anlagenhersteller von Druckzerfaserungsanlagen (Metso, Andritz, Pallmann) arbeiten sämtlich nach der beschriebenen Technologie.

Es wird angenommen, dass energieökonomischen Betrachtungen bei zukünftigen Weiterentwicklungen entscheidende Bedeutung zukommt.

²³ TMP = Thermo-Mechanical-Pulp

Vor etwa 2 Jahrzehnten wurde der Energiebedarf für die Zerfaserung mit bis zu 200 kWh/t atro Faserstoff angegeben. Laut *Lundgren /1994/* betrug der Bedarf Anfang der 1990er Jahre sogar bis zu 350 kWh/t.

Nach persönlichen Informationen von einem MDF-Hersteller liegt der Energieverbrauch bei der Herstellung von MDF aus Hackschnitzeln zwischen 130 und 160 kWh/t. Die Qualität der Hackschnitzel und auch der Feuchtegehalt des Holzes beeinflusst dabei entscheidend den Stromverbrauch. Geringe Energieverbräuche ergeben sich u. a. bei Verwendung gewaschener Hackschnitzel relativ bestimmter geometrischer Form (aus Scheibenhackern) mit abgeseibtem Feingutanteil. In Europa aufgrund der Energiekosten mittlerweile unüblich ist die ausschließliche Verwendung von Sägespänen. Der Energieverbrauch für Zerfaserung dieser kubischen Partikel liegt zwischen 400 und 500 kWh/t.

Während für die Herstellung von Panel-MDF (mit Rohdichten zwischen 630 und 680 kg/m³ und vergleichsweise geringen Anforderungen an die Faserqualität) für die Zerfaserung zwischen 100 und 120 kWh/t benötigt werden, liegt der Energieverbrauch für MDF in Tieffräsqualität (mit mittleren Rohdichten ≥ 780 kg/m³ und hohen Anforderungen an die Faserqualität) bei 140 bis 170 kWh/t. Bei Verwendung von großen Sägespananteilen steigt der Energieverbrauch auf bis zu 220 kWh/t an. Für die Herstellung von HDF (mit Rohdichten über 830 kg/m³) liegt der Energieverbrauch hingegen mit 100 bis 130 kWh/t niedriger, was mit den geringeren Anforderungen an die Faserqualität begründet wird. In der Folge kann mit etwas „offenerem“ Mahlsplatt produziert werden */Wolf 2010/*. Das bestätigen auch die Erfahrungen von *Roll* zu energierelevanten Aspekten der Refinerscheibentechnologie bei der MDF-Herstellung unter Berücksichtigung der Faserqualität */Roll 2010/*.

Die tatsächliche Definition der Faserqualität hängt natürlich auch von der Weiterverarbeitung der HDF ab. Ein HDF-Hersteller, der seine eigenen Platten zu Laminatboden weiterverarbeitet, wird dabei i. d. R. mehr Splitter und Faserbündel tolerieren (und resultierend daraus auch mit etwas weniger Energieaufwand zerfasern können) als ein HDF-Hersteller, der seine Rohplatten an einen Fußbodenhersteller liefert.

Laut *Roll /2008/* ist von folgendem Bedarf an Zerfaserungsenergie auszugehen:

- Nadelholz (Fichte): 80...170 kWh/t Faserstoff atro,
- Laubholz (Buche): 90...150 kWh/t Faserstoff atro,
- Sägespäne: 250...400 kWh/t Faserstoff atro.

Es ist zu erwarten, dass die günstige Ausbeute- und Energiebilanz des Defibrator-Verfahrens weitere Optimierungen erfahren wird. So stellen aktuelle Arbeiten bei Metso Panelboard in Aussicht, dass mit der Entwicklung des EVO 64-Refiners (64“) gegenüber dem Vorgänger M54-Refiner (54“) durch verändertes Gerätedesign und verbesserte Lagerungstechnologien mehr als 20 % elektrische Zerfaserungsenergie sowie bis zu 45 % Dampfenergie eingespart werden können */Mattson 2006; Metso 2007/*. Die maßgebliche Energieersparnis wird von dem veränderten Refinergehäuse erwartet. Danach ermöglicht der spiralenförmige Faserweg („Nautilus“) in Kombination mit einem Auslass, der sich im Faserfluss öffnet, einen gleichmäßigen und geschmeidigen Ausstoß ohne Energieverlust durch Wirbel oder Verstopfungen im Faserfluss. Der diesbezügliche Praxisnachweis steht noch aus.

Von wesentlicher Bedeutung sind in diesem Zusammenhang auch die Mahlsegmente, wobei die Uni-direktionale Ausrichtung durch die vorgegebene Drehrichtung eine tangentielle Faserstoffabführung zwingend voraussetzt.

Parallele Entwicklungsarbeiten laufen bei den Refiner-Herstellern Andritz und Pallmann /N.N. 2008f/. So stellt das bezüglich Schneiden- und Werkzeugdesign optimierte Mahlscheibensystem LemaxX SpiralTM von Andritz bei gleichbleibenden oder besseren Faserqualitäten Energieeinsparungen von bis zu 20 % und Standzeiterhöhungen von bis zu 25 % in Aussicht /Börste 2008/.

Neben der Weiterentwicklung der einzelnen Zerfaserungsprozessstufen werden sich zukünftige Forschungsarbeiten schwerpunktmäßig auf die Nutzung der mechanischen und chemischen Bindungspotentiale der erzeugten Faserstoffe orientieren.

Interessante Ansatzpunkte dazu bietet eine chemische Vorbehandlung der Hackschnitzel (z. B. mit Natriumsulfit und Natriumhydroxid) vor der thermomechanischen Zerfaserung, die in der Folge eine Erweichung der Ligninstruktur und damit eine erleichterte mechanische Zerfaserung nach sich ziehen.

Neben dem reduzierten spezifischen Energieverbrauch zeichnet sich der chemo-thermo-mechanische Holzaufschluss dadurch aus, dass nach diesem Verfahren erzeugte Faserstoffe, speziell bei Verwendung von PF-Harz als Bindemittel, die Herstellung von MDF mit hoher Feuchtebeständigkeit erlauben /Roffael et al. 2006/.

Roffael et al. /1994, 1995/ stellten fest, dass bei Zugabe von Natriumsulfit vor oder während des Holzaufschlusses nach dem CTMP²⁴-Verfahren das native hydrophobe Lignin der Holzsubstanz teilweise sulfoniert wird (Einführung von Sulfonsäuregruppen in die Fasern). Der Sulfonsäuregruppengehalt von nach dem CTMP-Verfahren hergestellten MDF lag zwischen 0,25 und 0,30 % (bezogen auf atro Holz). Durch die Einbindung von Sulfonsäuregruppen in die Holzmatrix wird ein sowohl in physikalischer als auch in chemischer Hinsicht aktiver Faserstoff erzeugt. Es wird zudem angenommen, dass das Lignin während des CTMP-Aufschlusses teilweise in Lösung geht, wodurch sich die Zugänglichkeit der Faseroberfläche gegenüber dem Klebstoff erhöht, was dann zu einer erheblichen Verbesserung der Benetzbarkeit der Fasern führt /Schneider et al. 2007/.

Demgegenüber wird beim Holzaufschluss nach dem unter industrieüblichen Bedingungen angewandten TMP-Verfahren ein in physikalischer und chemischer Hinsicht weniger aktiver Faserstoff erzeugt, da das Lignin nach Aufschluss bei hohen Temperaturen und Abkühlung des Faserstoffs in einen glasartigen Zustand übergeht und als weitgehend inerte Kruste auf der Faseroberfläche liegt /Kleinert 1964, Kleinert und Marraccini 1964/. Uneinheitlich sind jedoch die Aussagen zu ggf. erniedrigten Ausbeuteraten bei Anwendung von chemisch katalysierten Aufschlussverfahren.

Ähnliches gilt für die Ergebnisse einer biotechnologischen Vorbehandlung der Hackschnitzel mit Braun- oder Weißfäulepilzen, die sich bei einer ausreichend langen Fermentationszeit (nach Möglichkeit über mehrere Wochen) der Hackschnitzel überaus positiv auf den Zerfaserungsenergieaufwand und die entstehende Faserqualität auswirken können /Körner et al. 1992/. Die bisherigen Erfahrungen zeigen aber auch, dass selbst bei sorgfältiger Steuerung der Prozessbedingung kein regelmäßiger Bewuchs der Hackschnitzel erfolgt, was (abgesehen von den unakzeptabel langen Fermentationszeiten) einer großtechnischen Umsetzung in einem kontinuierlichen Fertigungsablauf mit hohen Durchsatzleistungen entgegensteht /Deppe, Ernst 1996/.

Das gleiche Ziel verfolgten Versuche, das Lignin der Faseroberfläche mittels enzymatischer Behandlung oxidativ zu aktivieren und damit das Eigenbindevermögens der TMP-Faserstoffe zu erhöhen /Kharazipour et al. 1997/. Auch dieses Verfahren fand bislang

²⁴ CTMP = Chemo-Thermo-Mechanical-Pulp

aus Kostengründen (enzymatische Behandlung, Trocknung der behandelten Fasern) keine Anwendung in der Industrie.

Eine Alternative zu den vorstehend beschriebenen thermomechanischen Aufschlussverfahren stellt die Herstellung von Holzfaserstoffen im Doppelschneckenextruder dar, da diese Anlagen mobil aufgebaut werden können und zur Faserstoffherstellung gegenüber dem Defibratorverfahren einen niedrigeren spezifischen Energiebedarf aufweisen. Bisherige Untersuchungen zeigen zudem, dass es prinzipiell möglich ist, Faserstoffe nach dem Extruderverfahren aus Alt-/Gebraucht- sowie Restholzsortimenten zu erzeugen. Der maschinentechnische Aufwand zu dessen Herstellung ist im Vergleich zum Defibratorverfahren geringer. Nachteiligerweise erreicht der Extrudersfaserstoff jedoch bei Weitem nicht die Qualität eines Defibratorfaserstoffes. Bei einem geringeren Aufschlussgrad fällt ein relativ großer Grobpartikelanteil (spanähnliche Partikel) an, der zwingend entfernt und nachzerkleinert werden muss. Bei einem höheren Aufschlussgrad steigt der Feinstpartikelanteil (Staub) deutlich an, außerdem nimmt die Kapazität des Extruders signifikant ab /Scheidung 1999/.

Praxiserfahrungen aus Industrierversuchen des Autors im Zeitraum 2003 bis 2009 in den MDF-Werken Lampertswalde, Nidda, Beeskow, Heiligengrabe und Baruth bestätigten, dass sich intensivere Aufschlussbedingungen beim Kochen der Hackschnitzel (durch höhere Temperaturen und/oder längere Verweilzeiten im Kocher) sowohl auf den Verbrauch an elektrischer Zerkleinerungsenergie als auch auf ausgewählte hygrische Platteneigenschaften positiv auswirkten.

2.2.6 Technologie der MDF-Herstellung

Die folgende Abbildung 14 zeigt das Schema einer typischen Anlage zur Herstellung von mitteldichten Faserplatten nach dem Trockenverfahren (MDF).

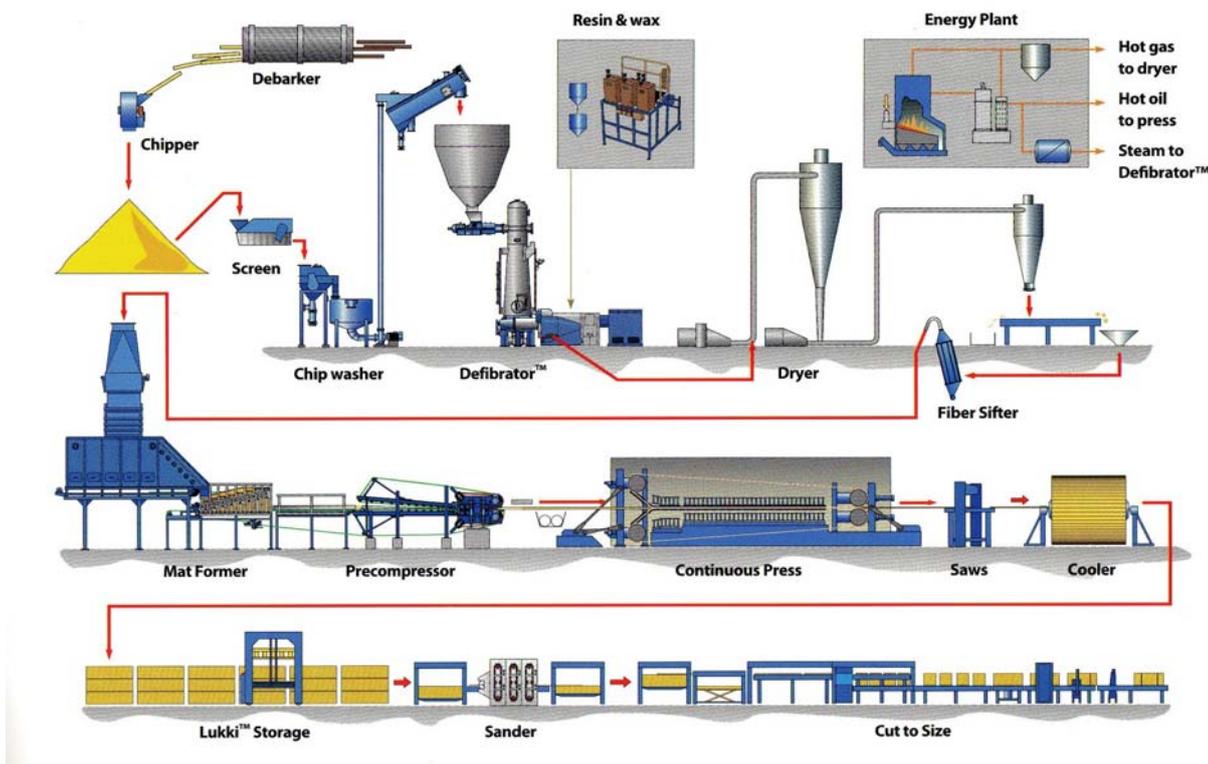


Abbildung 14 Schematische Darstellung einer typischen MDF-Anlage /MDF Industry Update 2001/

Bei dem heute üblichen Trockenverfahren zur Herstellung von MDF wird das entrindete Rundholz zunächst zu Hackschnitzeln verarbeitet und zu einer Hackschnitzelwaschanlage gefördert. Nach der Wäsche gelangen die Hackschnitzel über einen Beschickbunker in den Vorerhitzer, wo sie i. d. R. bei Temperaturen von 70 bis 80 °C vorgedämpft werden, um u. a. eventuelle Feuchtigkeitsunterschiede zwischen den Hackschnitzeln auszugleichen. Die vorgedämpften Hackschnitzel werden über eine Schnecke zur Entfernung von überflüssigem Wasser („Quetschwasser“) verdichtet. Stand der Technik ist dabei der Einsatz sogenannter Drainagerohre in der Stopfschnecke, die optional verlängert werden können, was eine nochmalige signifikante Reduktion der Materialfeuchte nach sich zieht /Roll 2008/.

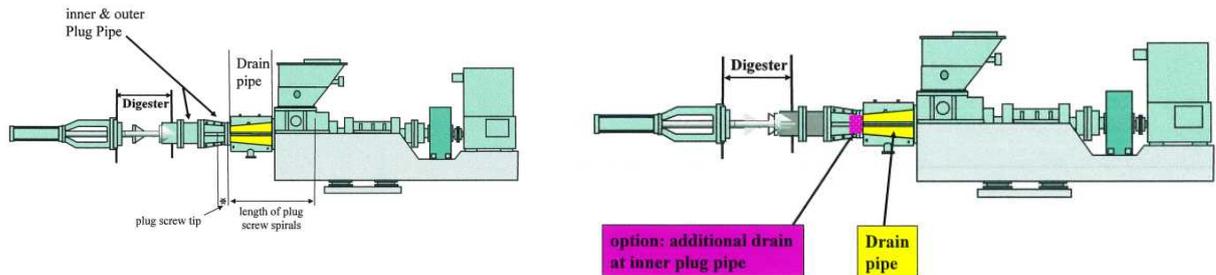


Abbildung 15 Drainagerohr der Stopfschnecke (links), Verlängerung der Drainagestrecke (rechts) /Roll 2008/

Anschließend gelangen die Hackschnitzel über eine Schneckenförderung in einen Kocher (wo sie üblicherweise bei Temperaturen von 160 bis 180 °C thermohydrolytisch aufgeschlossen werden) und weiter über spezielle Austragsschnecken in einen Druckrefiner. Vorzugsweise erfolgt die thermomechanische Zerfaserung der plastifizierten Hackschnitzel mittels Einscheibenrefinern (vgl. dazu auch Punkt 2.2.5).

In ausgewählten Werken werden während der Zerfaserung unmittelbar zwischen die Mahlscheiben geschmolzene Festparaffine zur Faserstoffhydrophobierung zugegeben. Vorteilhafterweise bewirkt dieser Paraffinzusatz auch eine Reduktion des Zerfaserungsenergieaufwandes. Als nachteilig ist jedoch die ungenügende Verteilung der Wachse anzusehen, da die eingesetzten Paraffinmengen (bezogen auf atro Holz) mit 0,6 bis 1,5 % (max. 2 %) sehr gering sind. Aus diesem Grund erfolgt die Hydrophobierung der Faserstoffe in den meisten Werken durch Zugabe dispergierter Paraffine während der Beleimung (entweder in Kombination mit dem Bindemittel oder bei Unverträglichkeit separat über Statikmischer).

In der Anfangsphase der MDF-Fertigung erfolgte die Beleimung grundsätzlich an getrocknetem Faserstoff. Dabei war zwischen einer Außenbeleimung in Trogmischern (Eindüsen des Leimes von der Stirnseite her auf den aufgewirbelten Faserstoff) oder einer Innenbeleimung in hochtourig drehenden Ringmischern (Eindüsen des Leimes in den sich ausbildenden Faserstoffring über innenliegende, stachelförmige Leimlanze) zu unterscheiden. Die Beleimung trockenen Faserstoffs in Mixern (Blender) wurde auf Grund von Leimfleckenbildungen (partielle Konzentrationen von Leim-Faserstoff-Agglomeraten) durch die Beleimung des feuchten Faserstoffs in der Blasleitung (Blowline) abgelöst. Bei der Blowline-Beleimung wird nach der Zerfaserung der Hackschnitzel im Refiner der feuchte Faserstoff durch den Dampfdruck im Mahlscheibengehäuse des Zerfaserungsaggregates mit hoher Geschwindigkeit (150 ... 250 m/s) in die Blowline eingeschleust und von dort zum Trockner transportiert. Das Prinzip dieser Beleimung besteht darin, dass das Bindemittel über Düsensysteme (die sowohl senkrecht zur Transportrichtung als auch in einem spritzen Winkel zur Blowline oder ringförmig positioniert sind) in die Blasleitung auf den sich mit hoher Geschwindigkeit bewegenden feuchten Faserstoffstrom gedüst wird. Infolge der hohen Transportgeschwindigkeit des

Faserstoffstroms sowie durch auftretende Turbulenzen wird das eingedüste Bindemittel gleichmäßig auf die feuchten Holzfasern verteilt. Dadurch konnte das Auftreten von Leimflecken auf ein Minimum reduziert werden /*Deppe, Ernst 1996*/.

Die Blowline-Beleimung bietet gegenüber der Blender-Beleimung zudem die Vorteile geringerer Investitions- und Trocknungsenergiekosten. Nachteilig ist bei der Blowline-Beleimung allerdings, dass das Bindemittel während des Trocknens durch Einwirkung von Temperatur und aus dem Holz freigesetzten flüchtigen Säuren, wie Ameisen- und Essigsäure, teilweise voraushärtet /*Roffael 1987; 1989a, 1989b; Deppe, Ernst 1996*/.

Daraus resultiert im Vergleich zur Blender-Beleimung bei gleichem Bindemittelsatz eine Verringerung der Biege- und Querkzugfestigkeit der Faserplatten, die i. d. R. durch einen erhöhten Bindemittelsatz kompensiert wird.

In der Vergangenheit erfolgten mehrfach Versuche, diesen zusätzlichen Bindemittelaufwand durch technologische Maßnahmen zu reduzieren. 1999 schlug *Buchholzer* u. a. vor, das Bindemittel im Endabschnitt des Rohrtrockners der Blowline-Anlage zuzusetzen („Rohrtrocknerbeleimung“).

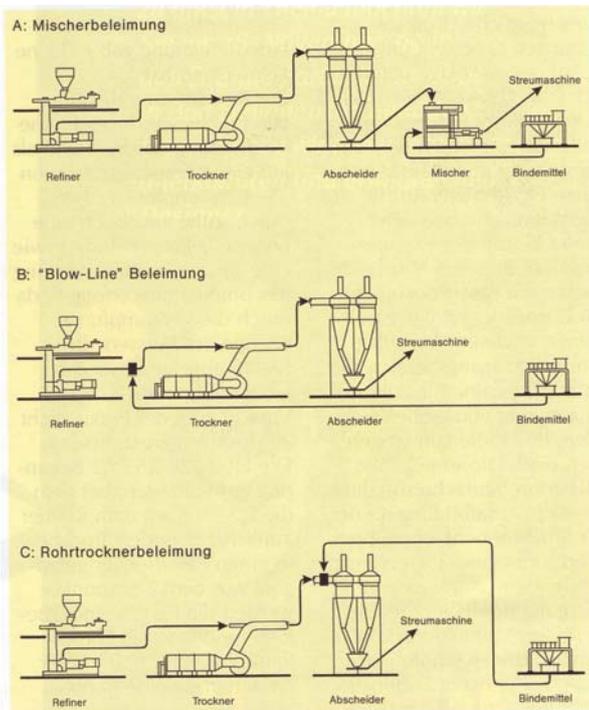


Abbildung 16 Schemazeichnungen unterschiedlicher Beleimungsverfahren für die MDF-Herstellung /*Buchholzer 1999*/

Das Grundprinzip dieses Verfahrens nutzen verschiedene MDF-Hersteller in geringfügig modifizierter Form zur Beleimung mit PMDI für die Herstellung von MDF mit formaldehydfreien Verleimungen hoher Feuchtebeständigkeit.

Ein anderer Weg ist die bereits in einigen MDF-Werken praktizierte Blowline-/ Blender-Kombinationsbeleimung. Dabei wird der Faserstoff mit einem reduzierten Bindemittelanteil in der Blasleitung vorbeleimt und nach der Trocknung während des Eintritts in den mechanischen Mischer nachbeleimt. Mit dem Wissen um die Vermeidung möglicher Bindemittelvoraushärtungen finden dabei in der Blowline gezielt weniger reaktive (und damit „langsame“), gering melaminverstärkte mUF²⁵-Harze Anwendung, währenddessen im Mischer mit hoch reaktiven (sehr „schnellen“) UF-Harzen beleimt wird /*Opitz 2007*/.

Nach Untersuchungen des Autors ist dabei davon auszugehen, dass mit jedem Prozent Blender-Bindemittel etwa 1,5 % Blowline-Bindemittel eingespart werden können /*Krug 2001b*/.

Diese Aussage wird durch die Erfahrungen von *Gotsmann und Roffael* bestätigt, die bei Kombinationsbeleimungsversuchen (Blowline/Blender) im Industriemaßstab während der kontinuierlichen Herstellung UF-Harz-gebundener MDF (Nennstärke 16 und 22 mm, Rohdichte 760 bis 780 kg/m³) Bindemittelreduzierungen von bis zu 24 % ohne Verschlechterung der physikalischen Werkstoffkennwerte erreichten. Ein mit 30 % noch höheres Einsparpotential ergab sich bei der Herstellung von HDF mit MUF-Harz-

²⁵ mUF-Harz = UF-Harz mit Melaminanteil von 1 bis 2 %

Bindung /Gotsmann, Roffael 2004/. Aus dem amerikanischen Raum ist weiterhin bekannt, dass dreischichtige MDF aus Blowline-beleimtem Deckschichtfaserstoff und Blender-beleimtem Mittelschichtfaserstoff industriell hergestellt werden.

Vor dem Hintergrund steigender Rohstoffkosten sowie der notwendigen Vermeidung von Trocknerabgasen aufgrund verschärfter Emissionsschutzgesetze ist die Umstellung auf eine 100 %ige Trockenbeleimung (generell nach der Trocknung) derzeit die interessanteste Modifikation für MDF-Anlagen. Unterschiedliche Systeme (u. a. Imal/Siempelkamp und Binos/Metso) stellen dabei eine Leimersparnis von bis zu 50 % bei gleichzeitig reduzierter Trockneremission in Aussicht.

So bestätigen aktuelle Anlagenversuche mit dem EVOjet™ dry resin blendig system (vormals Spike-Roll-Resinator) zur Herstellung hochwertiger 3 mm MDF mit 8 bis 10 % Festharz in Kalanderpresen zum Einen den deutlichen reduzierten Bindemittelaufwand. Andererseits wurde die Plattenqualität trotz 10 % geringerer Rohdichte aufrechterhalten oder teilweise sogar verbessert, was sich insbesondere durch verbesserte Lackierfähigkeit (u. a. fleckenfreie, geschlossene Oberfläche, höherer Glanzgrad), geringe Formaldehydemissionen und gute Quellwerte ausdrückt /DE 10226820B3; Greten 2005; Metso Panelboard 2007/. Diese positiven Ergebnisse führten dazu, dass das Unternehmen Sunds MDF Technologies (ehemals Metso) in Sundsvall, Schweden, nach der Übernahme durch Dieffenbacher mittlerweile 3 Aufträge zur Lieferung von „EVOjet™“-MDF-Trockenbeleimungssystemen erhalten hat /DE 10226820; N. N. 2008e/.

Unter Verwendung wartungsarmer Düsen wird dabei ein feinsten Leimnebel auf ein durch zwei schnell laufende Stachelwalzen erzeugtes Hochgeschwindigkeits-Faservlies gesprüht. Durch die lokale Hochgeschwindigkeit in der Beleimzone bietet das Fasermaterial den Leimdüsen eine sehr große Oberfläche im Verhältnis zur transportierten Fasermenge. Zudem werden Faseragglomerate aus dem Trockner vor der Beleimung zuverlässig aufgelöst. Die erneute Ausbildung von Agglomeraten verhindert die schnelle Abtrocknung des Materials sowie die besondere Ausgestaltung des Transportes. Durch die Rückführung und Einblasung von bereits beleimtem, trockenem Fasermaterial kann auf die bei einer Mischerbeleimung sonst zur Vermeidung von Agglomeraten notwendige Kühlung der Beleimzone verzichtet werden. Überbeleimtes Material entsteht kaum, störendes Grobmaterial wird durch die unmittelbar nachgeschaltete Sichterstufe zuverlässig durch Schwerkraft abgeschieden (Abbildung 17).

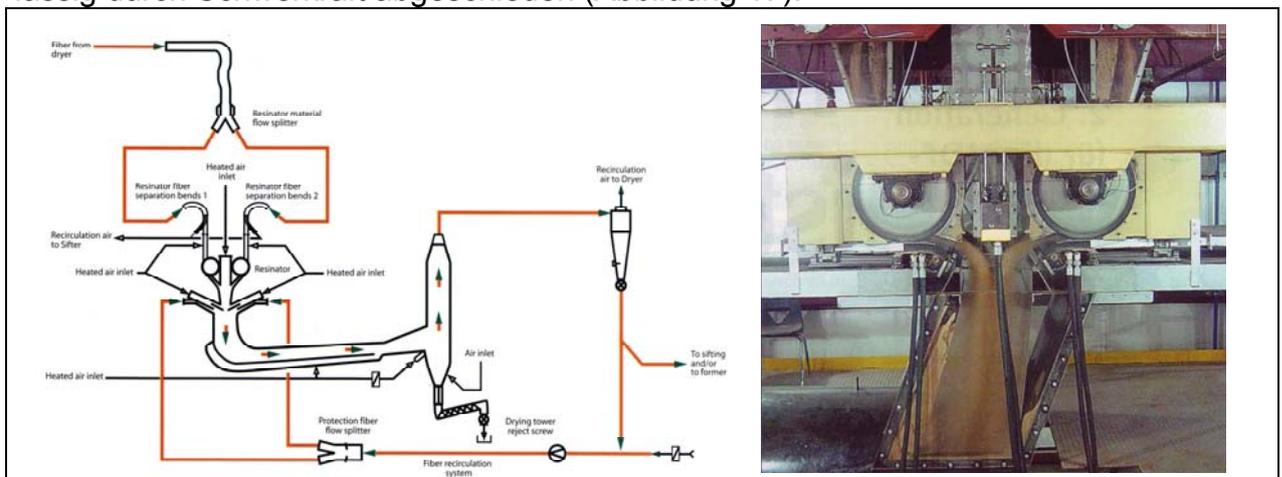


Abbildung 17 Trockenbeleimung (EVOjet™), schematische Darstellung und „Resinator“ in der MDF-Produktion /Greten 2005; Metso Panelboard 2007/

Der deutsche Faserdämmstoffplattenhersteller GUTEX in Waldshut-Tiengen im südlichen Schwarzwald setzte beim Umstieg vom Nass- auf das Trockenverfahren u. a. auf die Siempelkamp-Trockenbeleimung „Dry Blowline“ (Abbildung 18).

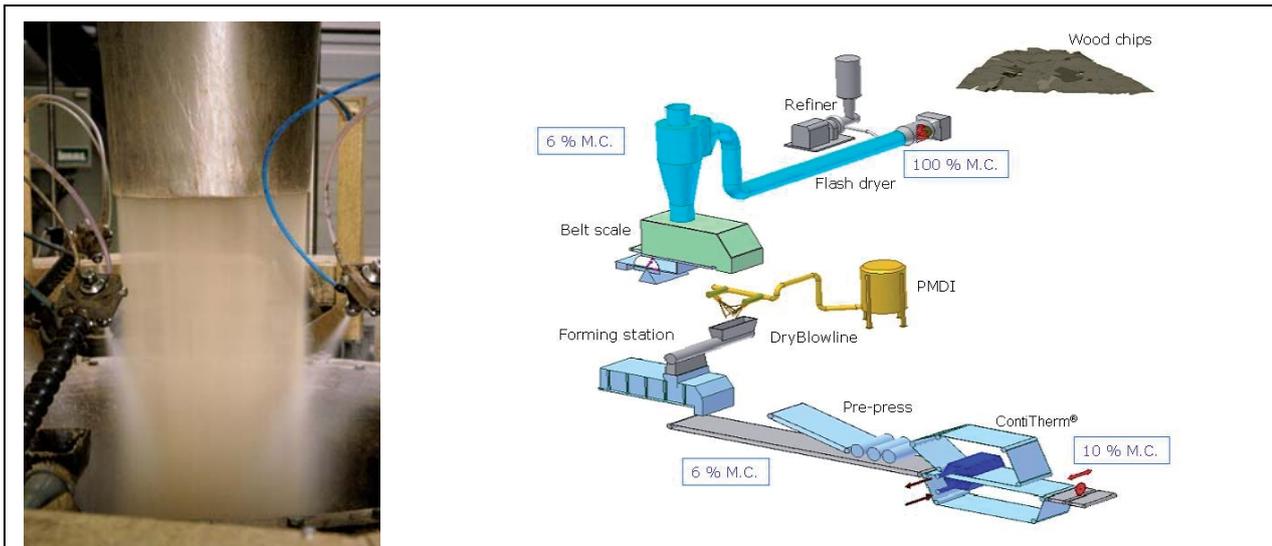


Abbildung 18 „Dry Blowline“ sowie schematische Darstellung des Trockenverfahrens beim Holzfaserdämmplattenhersteller Gutex /Siempelkamp 2008/

Ähnlich zu anderen Verfahren erfolgt die eigentliche Beleimung des bereits getrockneten, in einem vertikalen Luftstrom geführten Faserstoffs mittels Zweistoffdüsen. Diese Technologie ist seit 2007 erfolgreich im Industrieinsatz und erlaubt die Herstellung einschichtiger Dämmplatten bis 240 mm Dicke.

Trotz zahlreicher interessanter Entwicklungen zur Trockenbeleimung wird nach Meinung des Autors die Beleimung des nassen Faserstoffes in der Blowline perspektivisch das wichtigste Beleimungsverfahren bleiben. Große Chancen werden für Kombinationsbeleimungen (Blowline/Blender) gesehen /Krug et al. 2004/.

Inwiefern sich eine Aufschlussintensivierung bei der Faserstoffherstellung im industriellen Maßstab auf die folgende Nass- oder Trockenbeleimung auswirkt, war bislang nicht Gegenstand systematischer Untersuchungen. Es wird jedoch angenommen, dass in Übereinstimmung zu o. a. Aussagen die Nass-Beleimung eines intensiver aufgeschlossenen Faserstoffes gegenüber einer Trockenbeleimung Vorteile haben wird, da bei der Beleimung im Blender die trockenen Feinfaserteile verhältnismäßig mehr Klebstoff binden und daraus eine inhomogenere Leimverteilung resultieren wird.

Nach der Beleimung erfolgt die Trocknung der Faserstoffe mittels Heißluft in Ein- bzw. Zweistufen-Gleichstrom-Rohrtrocknern mit Trocknereingangstemperaturen im Bereich von 100 ... **150** ... 180 (200) °C. Die Temperaturführung erfolgt in Abhängigkeit vom Feuchtegehalt des eingehenden Fasermaterials und von der angestrebten Zielfeuchte am Trocknerausgang bezogen auf eine Temperatur von 80 bis 60 °C (Abbildung 19).



Abbildung 19 Stromrohrtrockner Büttner (links), Zweistufen-Stromtrockner (rechts) Masisa, Concordia (Argentinien) /N.N. 1996; Tobisch 2007/

Durch den Trocknungsvorgang wird die Fasereingangsfeuchte innerhalb weniger Sekunden auf eine Faserausgangsfeuchte von 5 ... 10 % herabgesetzt und die Fasern über einen Zyklon ausgeschieden /*Deppe, Ernst 1996*/. Die Regelung basiert auf konstanter Faserfeuchte und Trocknerausgangstemperatur. Die Erwärmung der Trocknerluft kann indirekt über Wärmetauscher oder alternativ direkt durch Zumischung von Heizgasen aus einer Feuerungsanlage erfolgen. Zur Verringerung der Abluftmengen und Optimierung der Energiebilanz ist auch ein Umluftbetrieb möglich. Soweit erforderlich wird die Trocknerabluft in einem Luftwäscher (ggf. mit biologischer Stufe und Nass-Elektrofilter) nachgereinigt. Nach einer Sichtung der beleimten und getrockneten Fasern (mit dem Abscheiden von Verunreinigungen und partiellen Leim-Faserstoff-Agglomeraten) formen Streumaschinen (inkl. vorgeschaltetem Faserbunker) ein endloses Faserlvies auf das umlaufende Formband.

Nach *Lampert /1967/* fanden für das Einstreuen zunächst Felter (Pendel)-Systeme Anwendung. Später wurden dann Rotationsventile bei der Einstreuung mittels Felter-System eingeführt (System Motala). Dabei streuten spezielle Streuköpfe ein oder auch mehrere Faserstoffschichten auf ein Bodenförderband, unter dem sich ein Vakuumsystem befand. Eine unter dem Band befindliche, schwingende Düse sorgte für eine Verteilung der Fasern. Das Vakuum diente der Fixierung der Fasermatte; Raket- oder Abkämmwalzen stellten eine gleichmäßige Oberfläche her. Dabei verwirbeln vor der eigentlichen Streuung zwei Verteildüsen die Fasern in der Streukammern. Optische Sensoren sowie gravimetrische und volumetrische Messeinrichtungen gewährleisteten die Einhaltung von Sollvorgaben für Gewicht und Dimension der Fasermatte.



Abbildung 20 Faserstoffstreuung mittels Felter-System, Masisa, Concordia (Argentinien) /Tobisch 2007/

Nach einer Weiterentwicklung von Weyerhaeuser wurden die beleimten Faserstoffe aus Zyklonen in Fallschächte geleitet und über rotierende Walzenbürsten durch gelochte Bleche auf das Siebband gestreut. Alternativ dazu kam es zur Entwicklung der Formkastenstreuung (Rand-Wood-MDF-Former), bei der die Fasern über ein Bodenband mit Hilfe verschiedener Walzensysteme auf ein Steilförderband transportiert werden. Ein definierter Luftstrom realisiert eine zusätzliche Verwirblung. Vor dem Eintritt zwischen zwei Verdichterbänder sorgen Abkämm- und Egalisierwalzen für eine homogene Faser-Verteilung. Nachteilig sind die bei diesem Verfahren teilweise eintretenden partiellen Verdichtungen, die auch Ungleichmäßigkeiten in der späteren Platte nach sich ziehen können /Hennecke 2005/.

Für die spätere Plattenqualität ist eine gleichmäßige Einstreuung von entscheidender Bedeutung. Abweichungen von den Sollwerten können weder beim Pressvorgang noch beim Kalibrierschliff ausgeglichen werden.

Im Normalfall arbeiten heutige MDF-Werke mit einer Streumaschine zur Mattenformung, wobei verschiedene mechanische Systeme (u. a. Schenck, Siempelkamp, Diefenbacher, Bison/Binos, Metso) mit ähnlichen Arbeitsweisen Anwendung finden. Beim Star-Former /Siempelkamp 2001/ erfolgt der Materialaustrag über ein Bodenband und Scheibenwalzen in der Bunkeraustragsfront. Die Fasern gelangen über Auflösewalzen auf den mechanischen, aus Zahnwalzen bestehenden Streukopf. Diese Walzen drehen sich gegeneinander, wobei die Kapazität über die verstellbaren Achsabstände und die Drehzahl variabel ist, und sorgen für ein genaues Abstreuen der Fasern auf das Streuband in Quer- und Längsrichtung. Neigung und Höhe des Streukopfes sind verstellbar. Ein nach dem Streukopf angeordneter, mit unterschiedlichen Egalisierungswalzen ausgerüsteter „Egalisator“ erzeugt unabhängig von Mattenhöhe und Schüttdichte ein gleichmäßiges Flächengewicht.

Die Streustation formt ein endloses Faservlies, das anschließend i. d. R. über eine kontinuierlich arbeitende Vorpresse entlüftet und kalt vorverdichtet wird. Dieser Prozess gewährleistet eine effiziente Beschickung der Heißpressen und reduziert die Gefahr der Beschädigung der Formlinge.



Die kontinuierliche Vorverdichtung erfolgt mit Band-, Plattenband- oder Walzenband-Vorpressen.

Abbildung 21 kontinuierliche Vorpresse /Dieffenbacher 2005/

Mit der Einführung der kontinuierlich arbeitenden Heißpressen wurden die Technologieschritte Vorpressen und Vorwärmen getrennt und nacheinander durchgeführt. Das Vlies wird dabei im Durchlauf in der Vorpresse zunächst kontinuierlich vorverdichtet. Vor der dann erfolgenden Heißpressung kann über unterschiedliche Verfahren der Vliesvorwärmung und der damit einhergehenden schnelleren Plastifizierung der Holzpartikel eine bessere MDF-Qualität (u. a. optimiertes Rohdichteprofil, geringere Formaldehyd-emissionen) sowie deutliche Reduzierungen von Presszeit und Pressdruck (und damit eine Steigerung der Anlagenkapazität) erreicht werden.

Das älteste und verbreitetste Verfahren ist das Dampfstoßverfahren. Es wird heutzutage in nahezu allen MDF-Werken zur Erhöhung der Produktivität sowie zum Erzielen guter Oberflächenqualitäten eingesetzt. Das zusätzlich aufgebrachte Oberflächenwasser verdampft bei Kontakt mit den heißen Pressplatten („Dampfstoß“), der heiße Dampf gelangt sehr schnell in die Mittelschicht und heizt diese auf, wodurch das Bindemittel schneller aushärtet.

Während beim Dampfstoßverfahren die Erwärmung der Innenzonen des Vlieses in der Anfangsphase des Heißpressens erfolgt, wird das Vlies bzw. die Vliesaußenzonen bei den Dampfinjektionsverfahren unmittelbar vor dem Transport in die Heißpresse mit Wasserdampf erwärmt. Dieffenbacher entwickelte 2000/2001 ein Verfahren, bei dem durch eine geregelte Menge an Satttdampf nur die Außenzonen eines Span- oder Faservlieses symmetrisch über Kanäle auf etwa 100 °C erwärmt werden. Diese partielle Vliesvorwärmung ermöglicht Presszeitverkürzungen von bis zu 15 % sowie die effiziente Herstellung dicker Platten (> 40 mm) mit homogenen Dichteprofilen.

Ziel des „Contitherm“-Verfahrens (Siempelkamp) ist es, eine schnelle und gleichmäßige Erwärmung des gesamten Holzpartikelvlieses zu erreichen. Durch Regelung des Dampfanteils in einem Dampf-Luft-Gemisch kann die Vorwärmtemperatur exakt eingestellt werden. Der Feuchtegehalt des Vlieses wird durch die Kondensation des Wasserdampfes um ca. 0,7 % je 10 K Temperaturerhöhung angehoben. Bei der MDF-Herstellung erfolgt die Zufuhr des Dampf-Luft-Gemisch über Dampfinjektionsplatten wegen des erheblich größeren Durchströmungswiderstandes des Faservlieses in einer ersten Sektion von oben nach unten und in einer folgenden zweiten Sektion in umgekehrter Richtung. Nach diesem Verfahren wurden bisher MDF des Dickenbereiches von 6 bis 60 mm hergestellt. Die Vorwärmtemperaturen betragen (50) 60 bis 75 °C. Der Klebstoff und das Pressprogramm müssen an die Produktionsbedingungen angepasst werden. Nach Angaben des Anlagenherstellers erlaubt der Einsatz der „Contitherm“-Vorwärmung bei MDF eine Kapazitätssteigerung von 30 bis 50 %. Infolge Vorkondensation ist damit zusätzlich ein geringerer Leimmehrverbrauch verbunden /Schletz,

Wöstheinrich 2000/. Nach einem ähnlichen Wirkprinzip arbeitet das „SteamJet“-Verfahren (Metso).

Seit längerer Zeit setzt Metso zur Vorwärmung der Faservliese auch ein sogenanntes Dampfschwert („Core Heater“) ein. Bei diesem (ursprünglich von Kvaerner entwickelten) Verfahren wird das vorgepresste Faservlies in Plattenmittelebene mittels Bandsäge aufgetrennt. Ein zwischen den Vlieshälften (ausdrücklich aber nicht mittig) positioniertes, keilförmiges „Dampfschwert“ bläst Dampf (Dampfdruck 3 bar, Temperatur 160 °C) nach oben und unten in die Vlieshälften ein. Dabei erfolgt eine Erwärmung des Vlieses auf ca. 70 °C, was insbesondere bei dickeren MDF (> 25 mm) eine Leistungssteigerung der Contipresse von bis zu 20 % nach sich ziehen kann. Praxiserfahrungen bei mehreren Herstellern zeigen allerdings, dass dieser Technologie durch Anhaftungen beleimter Fasern am Dampfschwert gerade im kontinuierlichen Betrieb Grenzen gesetzt sind.

Ein weiteres grundlegendes Verfahren ist die Mattenvorwärmung mit elektromagnetischen Wellen. Dabei wird zwischen Mikrowellenvorwärmung und Hochfrequenzvorwärmung unterschieden. Beide Verfahren setzen im Grundprinzip auf die Wärmeerzeugung durch die Schwingungsanregung der Wasserteilchen im atomaren bzw. molekularen Bereich mittels eines elektromagnetischen Wechselfeldes /*Frühwald, Gruchot 2002/*. Der auf diese Weise realisierte Wärmeeintrag verzeichnet als wesentliche Vorteile die Unabhängigkeit von der Permeabilität des Holzpartikelvlieses und die gleichmäßige Erwärmung des Pressstranges über den Querschnitt.

Ein wesentlicher Nachteil der Trennung der Technologieschritte Vorpressen und Vorwärmen besteht in der Rückfederung des vorverdichteten Vlieses unmittelbar nach dem Verlassen der Vorpresse (Spring-Back-Effekt). Intelligente Verfahren kombinieren deshalb Vorverdichtung und Vorerwärmung in der kontinuierlich arbeitenden Vorpresse. Dabei erlaubt z. B. die Anwendung der IVHF-Technologie (integriertes Vorpressen und Vorerwärmen mittels Hochfrequenz-Feld) die Herstellung von MDF mit normkonformen Eigenschaften bei um 50 % reduzierten Presszeiten sowie bei um 50 % reduziertem Bindemittelanteil /*Krug, Mäbert 2010/*.

Es folgt die Heißpressung in Takt- oder Contianlagen. Bei Taktpressen sind Ein- oder Mehretagenpressen zu unterscheiden. Zur Erzielung kurzer Presszeiten finden in Einetagenpressen höhere Temperaturen (bis 230 °C) Anwendung. Das Faservlies wird oben und unten mit i. d. R. vorgewärmten Pressplatten bedeckt und in die Presse transportiert. Diese schließt sich dann verhältnismäßig schnell und gewährleistet den Wärmübergang auf das Pressgut. Mehretagenpressen gewährleisten durch simultane Schließeinrichtungen identische Presszeiten und vergleichbare Plattenqualitäten. Gegenüber Einetagenpressen wird üblicherweise mit geringeren Temperaturen (bis 200 °C) gearbeitet.

Kontinuierlich arbeitende Pressen nutzen ein Pressenband oder Pressplatten, über die Druck und Temperatur übertragen werden. Vorlauftemperaturen von bis zu 260 °C sichern dabei Heizplattentemperaturen bis zu 230 °C. Während in Etagenpressen vorzugsweise MDF-Dicken von 8 bis 38 mm gefertigt werden, können in Contipressen auch sehr dünne Platten (im Bereich von 1,5 bis 4,5 mm) hergestellt werden.

Das Pressenband wird entweder von einem Rollenketten Teppich (Küsters/Metso), einem Rollenstappteppich (Siempelkamp/Dieffenbacher) oder einem Ölpolster (Hydro-Dyn-Verfahren, Bison) abgestützt. Die Rollenkette, auf der sich die zwei Endlosstahlbänder bewegen, dienen als Lager für die Gleitbewegung der Stahlbänder auf den Heizplatten. Ohne separaten Antrieb werden sie durch die Friktion des Stahlbandes angetrieben. Im

Unterschied zum Rollstabsystem mit festen, durchgehenden Rollstäben über die gesamte Pressenbreite besteht die Rollenkette aus Segmenten, die zwischen Stahlbändern und Heizplatten fahren und damit einen effizienten Wärmetransfer (d.h. geringe Temperaturdifferenz von 10 bis 20 K zwischen Heizplatte und Stahlbandoberfläche) ermöglichen. Der entscheidende Vorteil des Rollenstab-Systems ist vor allem im gleitreibungsfreien (und damit verschleißfreien) Lauf und daraus resultierend einem geringen Schmierstoffbedarf zu sehen.

Im Unterschied dazu beruht das Prinzip des Hydro-Dyn-Verfahrens darauf, dass die Stahlpressbänder unter Verzicht auf jegliche Mechanik lediglich auf einem Spezialbelag und zusätzlichem Ölfilm gleiten. Dieser Ölfilm muss dort reichlicher fließen, wo das Faservlies weniger dicht ist. In Bereichen hoher Dichte ist der Ölfilm entsprechend dünner /Deppe, Ernst 1996/.

Die weltweit erste kontinuierliche Presse wurde 1974 bei der Kunz-Gruppe im Werk Gschwend/Deutschland zur Herstellung von Spanplatten installiert und revolutionierte die bis dahin nur taktweise arbeitenden Holzwerkstoffplatten-Pressverfahren. Eine Arbeitsbreite von 2,10 m und eine Länge von 12 m erlaubten die Herstellung von 250 m³ Spanplatten pro Tag. Weltweit mehr als 350 laufende Anlagen zeugen von der imposanten Entwicklung des kontinuierlichen Pressenbaus. Mehr als 30 Jahre später stehen den Werkstoffherstellern heute Anlagen mit Arbeitsbreiten bis zu 4 m, Längen bis 77 m, Geschwindigkeiten von 2.000 mm/s (im Dünnplattenbereich) und Tagesleistungen von bis zu 2.400 m³ zur Verfügung.

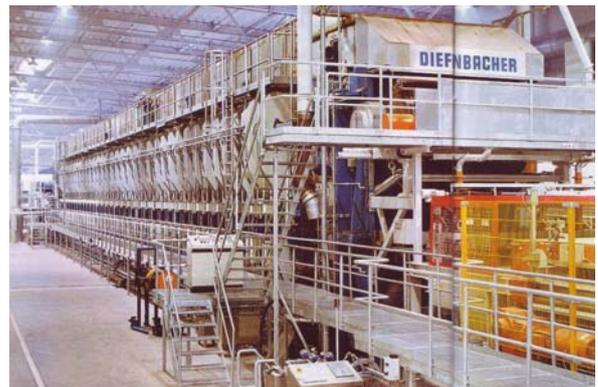
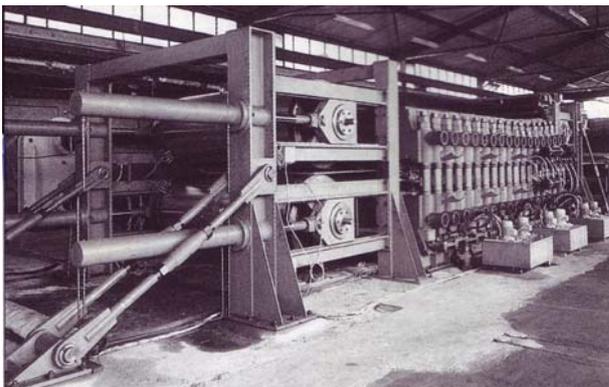


Abbildung 22 links: weltweit erst kontinuierliche Holzwerkstoffpresse 1974 (für Spanplatten) bei Kunz Gschwend (Küsters/Metso) /Bluthardt, Mohr 2000/, rechts: kontinuierliche Dünn-MDF-Anlage (Dieffenbacher) /N. N. 2006d/

Das seit vielen Jahren bewährte Kalanderverfahren (System Mende/Bison) zur kontinuierlichen Herstellung dünner Spanplatten konnte auch erfolgreich auf die Fertigung von MDF übertragen werden. Allerdings weisen nach diesem Verfahren gefertigte Faserplatten einige nachteilige Eigenschaften gegenüber den mit kontinuierlich umlaufenden Bandpressen hergestellten Faserplatten auf. Neben der limitierten Anlagenkapazität (Plattendicken > 6 mm sind unwirtschaftlich) sind das vor allem der höhere Leimverbrauch und die relativ geringere, maximale mittlere Dichte ($\leq 850 \text{ kg/m}^3$).

Die Pressenanlage besteht aus einer beheizten Walze großen Durchmessers (Kalander), die von einem Stahlband umschlungen wird, das zugleich Träger des endlosen Faservlieses ist. Nach dem Durchlaufen einer Vorverdichtungs- und Vorerwärmungszone (z. B. mit Hochfrequenz) erfolgt die eigentliche Heißpressung dabei durch (analog zum Kalander) beheizte Andruckrollen. Mittels Kalanderverfahren werden vorzugsweise dünne (2 – 10 mm), in Ausnahmefällen auch bis zu 20 mm dicke Faserplatten hergestellt. Moderne Anlagen erlauben die kontinuierliche Fertigung von bis zu 2,85 m breiten Faserplatten mit Geschwindigkeiten von bis zu 1.200 mm/s.



Abbildung 23 Kalanderpresse für Dünn-MDF, Masisa, Mapal (Chile) links: Gesamtansicht, rechts: Einlaufbereich /Tobisch 2007/

Über die Pressensteuerung (Druck-Weg-Zeit) erfolgt die gezielte Ausprägung wesentlicher Materialeigenschaften, wobei das Entdampfungs- und Verdichtungsverhalten des Formlings von zahlreichen Prozessfaktoren beeinflusst wird. Von Bedeutung sind dabei vor allem die Fasermorphologie (u. a. Schüttdichte, Korngrößenverteilung (Fein- und Feinstfaseranteil)), Permeabilität, Feuchtegehalt und Temperatur des Faserkuchens. In aller Regel wird zudem der Wärmeübergang in das Pressgut hinein durch verdampfendes, in Plattenmitte diffundierendes und unter Wärmabgabe kondensierendes Oberflächenwasser verbessert.

Eine von Metso entwickelte Kühlzone im hinteren Teil kontinuierlich umlaufender Pressen (Aufteilung in Kettensysteme für Heiz- und Kühlzone erforderlich) erlaubt das direkte und aktive Rückkühlen der Platten während des kontinuierlichen Pressens. Der dadurch verringerte Dampfdruck reduziert selbst bei schwankenden Eingangsfeuchten die Gefahr von Spaltern. Die Kühlzone ermöglicht die Einstellung eines gleichmäßigen Feuchteprofils über den Plattenquerschnitt sowie eine definierte, oftmals höhere Endfeuchte, was u. a. auch die Rückfederung der Platten einschränkt. Zudem werden durch diese Technologie der Plattenverzug minimiert und die Kühlzeit nach dem Pressen verringert. Die schnelle Abkühlung in der Presse unter Aufrechterhaltung des Druckes reduziert gleichfalls die Hydrolysegefahr, die zu verringerten Festigkeiten und erhöhten Formaldehydemissionen führen kann.

Die pressenfallenden, endlos langen Faserplatten werden unmittelbar am Pressenauslauf durch Längs- sowie diagonal mitlaufenden Vertikalsägen formatiert. Im Anschluss erfolgt der Weitertransport zu nachgeschalteten Kühlsternwendern, in denen die Platten vor der Abstapelung und dem Transport in das Reifelager mehrere Stunden abkühlen.

Nach einer Reifezeit von mindestens einem Tag erfolgt die Dickenkalibrierung der Rohplatten mittels Mehrkopfschleifmaschinen. Neben dem Erreichen der definierten Nennstärke ist das Schleifen auch zur Beseitigung der durch das Heißpressen verrotteten Rohplatten-Oberfläche zwingend, da nur dadurch die dem jeweiligen Verwendungszweck entsprechende Oberflächendichte (und damit auch –güte) erreicht wird. Heutige Schleifzugaben sind aufgrund moderner Prozesstechnologien (u. a. hohe Streugenauigkeit, integrierte Vorwärmung, Pressgenauigkeit, schnelle Komprimierung und Wärmezufuhr) mit 0,2 bis 0,5 mm sehr gering.

2.3 Feuchte-, Hydrolyse- und Witterungsbeständigkeit von MDF

2.3.1 Feuchtebeständigkeit von MDF

Unter dem Begriff Feuchtebeständigkeit wird das Vermögen eines Werkstoffs verstanden, gegenüber hohen relativen Luftfeuchten ($\geq 85\%$, vgl. dazu auch Definition Nutzungsklassen Feucht- und Außenbereich unter Punkt 2.4.2 Normative Vorgaben und MDF-Typen), starken Schwankungen der relativen Luftfeuchte sowie Kontakt mit freiem Wasser oder Wasserdampf seine Funktionalität beizubehalten.

Hygrisch bedingte Formänderungen parallel oder senkrecht zur Plattenebene (z. B. Quell-/Schwinderscheinungen in Dicke, Breite oder Länge) nach Wasserlagerung oder bei Änderung der relativen Luftfeuchte sind dabei nur in eingeschränktem Maß zulässig. Die Festigkeiten von MDF nehmen in Bereichen hoher Feuchte i. d. R. ab. Das hygroskopische Verhalten hängt dabei entscheidend von der Art des Holzaufschlusses, dem Heißpressvorgang, dem Grad der Verdichtung sowie der Art und dem Anteil des Bindemittels ab /Jensen, Kehr 1999/.

Nach Jensen und Kehr /1999/ erfährt das Holz durch die Wärmeeinflüsse bei der Werkstoffherstellung eine Vergütung, indem ein Teil der Holzpolyosen (Hemicellulose) als „Hauptträger der sorptiven Kräfte“ herausgelöst werden. MDF sind infolge der hydrothermischen Behandlung der Holzsubstanz bei der Faserstoffherstellung sowie durch die höhere Verdichtung bei der Plattenherstellung gegenüber Spanplatten stärker thermisch vergütet. Aus diesem Grund zeichnen sich Faserplatten bei klimatischen Belastungen durch geringere Quell- und Schwindbewegungen sowie Feuchtetransporte zwischen Werkstoff und Umgebung aus /Jensen, Kehr 1999/.

Noch nicht systematisch quantifiziert wurde, in welchem Maße Aufschluss-Verfahren bzw. -bedingungen bei der Zerfaserung die Feuchte- und auch die Hydrolysebeständigkeit von MDF beeinflussen.

Es gibt keine allgemeingültige Definition für die Feuchtebeständigkeit von Holzwerkstoffplatten. Die einschlägigen Normen enthalten Kurzzeitmethoden zur Bewertung der Feuchtebeständigkeit der Verklebung. Als wesentlich für die Verleimungsgüte von Holzwerkstoffplatten gilt dabei der Wert der Zugfestigkeit senkrecht zur Plattenebene (Querzugfestigkeit, auch als innere Werkstofffestigkeit bezeichnet) nach DIN EN 319. Die Bewertung der Feuchtebeständigkeit der Verleimung von MDF beinhaltet i. d. R. die Prüfung der Querzugfestigkeit nach unterschiedlichen Vorbehandlungen. Zusätzlich kann auch die Ermittlung der Dickenquellung (nach DIN EN 317) oder der Biegefestigkeit (nach DIN EN 310) durchgeführt werden.

Untersuchungen von Boehme /1991/ zeigten, dass nicht die Querzugfestigkeit, sondern vielmehr die irreversible Dickenquellung das bessere Maß zur Bewertung der Feuchtebeständigkeit UF- und PMDI-gebundener Spanplatten ist. Unter irreversibler Dickenquellung ist dabei die Dickenquellung nach Feuchtlagerung und Rückklimatisierung zu verstehen. Die mit PMDI hergestellten Spanplatten wiesen nach Feuchtlagerung bei 85 % relativer Luftfeuchte und Rückklimatisierung auf 65 % relative Luftfeuchte eine geringere irreversible Dickenquellung und damit eine höhere Feuchtebeständigkeit gegenüber den UF-Harz gebundenen Varianten auf. Darüber hinaus ergaben sich für mit PMDI hergestellte Spanplatten nach einer Lagerung bei 85 % relativer Luftfeuchte und Rückklimatisierung auf 65 % relativer Luftfeuchte teilweise eine gegenüber den bei Normalklima gelagerten Platten leicht erhöhte Querzugfestigkeit. Möglicherweise nimmt die Festigkeit im Zuge von Reaktionen zwischen der Feuchte und noch freien NCO-Gruppen im PMDI zu.

Nach DIN EN 622-5:2006 sind folgende Optionen zum Nachweis der Feuchtebeständigkeit von MDF für eine Verwendung im Feuchtbereich vorgesehen, wobei Platten mit MUF- oder MUPF-Harz-Bindung üblicherweise nach Option 1, Platten mit PF-Harz- oder PMDI-Bindung hingegen nach Option 2 geprüft werden:

- Option 1: Dickenquellung und Querzugfestigkeit nach Zyklustest (V313 nach DIN EN 321),
- Option 2: Querzugfestigkeit nach Kochprüfung (V100 nach DIN EN 1087-1:1995, samt modifiziertem Verfahren in Anhang A²⁶ nach DIN EN 622-5).

Bei einer Kochvorbehandlung quellen mit PMDI gebundene Platten stärker als mit UF-Harz gebundene MDF /Boehme 1993/. Es wurde zudem festgestellt, dass eine Verklebung der Proben mit den Jochen vor dem Kochen Spannungen nach sich zieht, die zu vergleichsweise geringen Querzugfestigkeiten nach der Kochprüfungen führen. Dies lässt sich zum Einen durch die Verklebung der Proben mit den Jochen nach dem Kochvorgang (vgl. modifiziertes Verfahren in Anhang A nach DIN EN 622-5) und zum Anderen durch eine Vakuumvorbehandlung vor dem Kochen verändern, da die Querzugfestigkeiten in beiden Fällen, noch mehr bei Kombination beider Möglichkeiten, nach der Kochprüfung höher sind als ohne Anwendung einer dieser Möglichkeiten /Boehme 2002/.

Bestätigend dazu wurde festgestellt, dass eine Vakuumvorbehandlung der MDF-Proben zu höheren Querzugfestigkeitswerten nach der Kochprüfung führte. Umgekehrt ergab die Vakuumvorbehandlung jedoch niedrige Werte für die Querzugfestigkeit nach Zyklustest /Roffael et al. 2006c/. Dies überrascht insofern nicht, als aus anderen Bereichen der Holzforschung bekannt ist, dass das Einfrieren des Wassers aufgrund der Volumenzunahme das Gefüge der Holzfasern sprengt, die Wasseraufnahmefähigkeit²⁷ erhöht und die Kristallinität erniedrigt /Brecht, Prydz 1941; Roffael 1992/. Anscheinend wirkt sich das anomale Verhalten des Wassers beim Gefrieren negativ auf die Querzugfestigkeit nach dem V313-Test aus, zumal das Einfrieren des Wassers im Verlaufe des V313-Tests dreimal wiederholt wird. Insofern ist dieser Einfluss besonders ausgeprägt.

Demgegenüber verringert die Behandlung der Fasern mit Wasser, wie dies im Kochtest (V100-Test) vorgeschrieben ist, das Wasserrückhaltevermögen (WRV-Wert) der Fasern /Jayme 1958/. Zudem können Verleimungen hoher Feuchtebeständigkeit (u. a. mit Phenolharzen) durch eine solche Nachbehandlung möglicherweise eine Nachhärtung erfahren, die zu einer Erhöhung der Querzugfestigkeit führen kann.

DIN EN 622-5:1997 enthielt als Anhang C Vorgaben für ein Zulassungsverfahren für MDF der Option 2 mit anderen Klebsystemen als alkalisch härtenden Phenolharzen oder dem Isocyanat PMDI. Dabei war u. a. die Querzugfestigkeit nach folgenden Vorbehandlungen zu prüfen:

- nach Kochprüfung (2 h Kochen bei 100°C),
- nach Säuretest und Kochprüfung (24 h Wasserlagerung mit pH-Wert 2 bei 70 °C),
- nach Xenotest-Klimazyklus (53 % Regen, 33 % UV-Licht, 14 % Frostperiode bei -20 °C, 2 h Kochen bei 100 °C).

Dieser Anhang C ist in DIN EN 622-5:2006 nicht mehr enthalten.

²⁶ Modifiziertes Verfahren bedeutet, dass die Verklebung der MDF-Prüfkörper mit den Prüfjochen nach der Kochprüfung erfolgt. Im Unterschied dazu werden Spanplatten vor der Kochprüfung verklebt.

²⁷ auch als Wasserrückhaltevermögen (WRV-Wert) bezeichnet

Für eine werkseigene Produktionskontrolle zum Nachweise der Feuchtebeständigkeit der Verklebung von MDF ist Option 1 aufgrund der notwendigen langen Prüfzeiträume (~ 3 Wochen Klimalagerung) relativ ungeeignet. Die Hersteller weichen deshalb auch mit weniger geeigneten Klebstoffsystemen auf den Kochtest (Option 2) aus, der nach verhältnismäßig kurzer Zeit Ergebnisse liefert.

Der internationale Standard ISO/DIS 16895-2 definiert für MDF zur Verwendung im Feucht- und Außenbereich zusätzliche Anforderungen für die Nassbiegefestigkeit:

- Option 3: Biegefestigkeit nach 2 h Wasserlagerung bei 70 °C (Methode A) sowie nach 2 Wasserlagerung bei 100 °C (Kochprüfung, Methode B).

Für vollholzähnliche Holzwerkstoffe (z. B. Massivholzplatten²⁸) sind noch intensivere Vorbehandlungsklassen zur Bewertung der Feuchtebeständigkeit der Verklebung üblich, z. B. Kochtest (6 h Kochen) für SWP/2 (Platten für den Feuchtbereich) oder Kochwechseltest (4 h Kochen, 16 – 20 h Trocknen bei 60 °C, 4 h Kochen) für SWP/3 (Platten für den Außenbereich), vgl. dazu auch DIN EN 13354:2009. Im Anschluss erfolgt dann eine Bewertung der Verklebungsqualität durch Bestimmung der Druckscherfestigkeit.

Systematische Ergebnisse zur Veränderung der Querzugfestigkeit und der Dickenquellung von mitteldichten Faserplatten mit feuchtebeständiger Verklebung durch Klimawechsel sind bislang nicht bekannt. So bestätigen auch die Untersuchungen von *Gresel et al. /1997/* zur Bestimmung der Feuchtebeständigkeit von Holzwerkstoffen, dass - im Unterschied zu Spanplatten - für MDF noch keine gesicherten Zusammenhänge zwischen Kurzzeit- und Langzeit-Eigenschaften nachgewiesen werden konnten.

Prinzipielles Problem aller angegebenen Testmethoden zum Nachweis der Feuchtebeständigkeit ist, dass sie nur Aussagen bezüglich der Feuchtebeständigkeit der Verleimung liefern, von Herstellern und Anwendern in Ermanglung von Alternativen jedoch zur Bewertung der Feuchtebeständigkeit des gesamten Werkstoffs genutzt werden.

2.3.2 Hydrolysebeständigkeit von MDF

Die Hydrolysebeständigkeit von MDF wird sehr maßgeblich über das Bindemittel beeinflusst. Wie unter Gliederungspunkt „2.2.4 Bindemittel und Additive“ ausgeführt, erfolgt die Herstellung von MDF vorzugsweise unter Verwendung säurehärtender, teilweise geringfügig melaminmodifizierter UF-Harze. Diese sind Kondensationsharze, bei denen sich zwei oder mehr Moleküle unter Abspaltung von Spaltprodukten, z. B. Wasser, verbinden */Ginzel 1971/*. Bei der Hydrolyse (als Gegenreaktion zur Kondensation) wird dann das größere Molekül unter Wassereinwirkung gespalten.

Ausgehärtete UF-Harze unterliegen bei der Einwirkung von Feuchtigkeit insbesondere bei höheren Temperaturen wegen der teilweise umkehrbaren Reaktion zwischen Harnstoff und Formaldehyd einer chemischen Zersetzung und sind damit nicht hydrolysestabil. Daraus resultiert dann auch immer die Freisetzung von Formaldehyd und eine entsprechende Emission in die Umgebung. Sofern nicht erhebliche Mengen an physikalisch absorbiertem Formaldehyd („freies Formaldehyd“) vorliegen und von einem ausreichenden Aushärtungsgrad ausgegangen wird, kann das freigesetzte Formaldehyd als Maß für den Hydrolysewiderstand eines gehärteten Harzes dienen */Myers 1982; Myers, Koutsky 1987/*. Ab einem bestimmten Ausmaß der Zerstörung der ausgehärteten Harzstruktur ist auch ein Festigkeitsverlust der Leimfuge unausweichlich, wobei ins-

²⁸ auch als Solid Wood Panel (SWP) bezeichnet

besondere die Methylolgruppen, daneben aber auch die Methylenätherbrücken und andere Zwischenprodukte der Harzsynthese, wieder leicht aufgespalten werden.

In Abhängigkeit vom Harztyp kommt es zu unterschiedlichen Hydrolysereaktionen, die teilweise Reaktionen erster Ordnung darstellen, aber auch parallel laufende Reaktionen mit unterschiedlichen Geschwindigkeitskonstanten sein können und die im Wesentlichen durch Temperatur, pH-Wert und Aushärtegrad des Harzes beeinflusst werden /Myers 1982/. Die Beständigkeit einer UF-gebundene Leimfuge ist damit sowohl von der chemischen Hydrolyseresistenz des ausgehärteten Harzes als auch von der Fähigkeit der Leimfuge abhängig, den infolge wiederholter Quell-Schwind-Bewegungen auftretenden Spannungen teilweise nachzugeben und damit Spannungsspitzen und Rissbildungen zu vermeiden /Dunsky, Niemz 2002/.

Auch die am Markt eingeführten Leimsysteme zur Herstellung von MDF mit höherer Feuchtebeständigkeit der Verleimung sind nicht hydrolyseresistent. So weisen zwar MUF- oder MUPF- gegenüber UF-Harzen eine bessere Feuchtebeständigkeit, keinesfalls aber eine Hydrolysebeständigkeit auf. Alkalisch härtende Phenolformaldehydharze sowie Produkte auf Grundlage von polymeren Diisocyanaten haben sich für die Herstellung von Spanplatten für den Feucht- und Außenbereichseinsatz langjährig als geeignet erwiesen. Nachteiligerweise ergeben sich aber speziell bei PF-Verleimungen bei höheren relativen Luftfeuchten (> 70 %) deutlich höhere Ausgleichsfeuchtegehalte und insbesondere bei höheren Alkaligehalten steil ansteigende Sorptionsisothermen. Im Unterschied dazu härten Klebstoffe auf PMDI-Basis als hochreaktive Monomere auch chemisch aus und weisen auch bei höheren relativen Luftfeuchten relativ niedrige Sorptionsbeträge auf. Im MDF-Bereich führte die Verwendung von PF-Harzen oder PMDI bei der industriüblichen Nassbeimung in der Blowline wiederholt zu Verstopfungen und damit zu Fehlbeimungen.

Die Untersuchung der Hydrolysebeständigkeit kann nach dem Kochtest (V100, Option 2, vgl. 2.3.1 Feuchtebeständigkeit von MDF) erfolgen. Eine interessante Alternative stellen Wasserlagerungsuntersuchungen dar. Dabei wurde bei Untersuchungen an Spanplatten festgestellt, dass die Querkzugfestigkeit nach Wasserlagerung (bei 20 bis 100 °C) mit zunehmender Lagerungstemperatur und Lagerungsdauer generell abnimmt und dass das Ausmaß dieser Veränderung vom Bindemittel abhängig ist /May 1976/. Die Geschwindigkeit der Hydrolyse ist erwartungsgemäß stark temperaturabhängig, wobei im Allgemeinen höhere Temperaturen bei der Wasserlagerung größere Hydrolysegeschwindigkeiten nach sich zogen. Auf eine Temperaturerhöhung reagierten MUF- und MUPF-Verleimungen mit einem weitaus stärkeren Abfall der mechanischen Festigkeit als PF-Verleimungen, wobei die mit MUF-Harz hergestellten Spanplatten den größeren Festigkeitsabfall im Vergleich zu MUPF aufwiesen.

Neben den Untersuchungen zur Hydrolysebeständigkeit nach Wasserlagerung erfolgte die Bestimmung der Hydrolyseresistenz auch nach einem Säuretest (ggf. in Kombination mit der Prüfung der Querkzugfestigkeit nach Kochprüfung, V100, Option 2). Dabei stellte Deppe /1983/ fest, dass der Festigkeitsverlust der mit MUF-Harz, Blutalbumin modifiziertem MUF-Harz, MUPF-Harz und Melamin-Harnstoff-Isocyanat-Mischkondensat hergestellten Spanplatten bei einem Säuretest mit Temperaturen zwischen 50 und 100 °C mit steigender Temperatur zunimmt. Ferner wurde bei höheren Temperaturen (70 bis 100 °C) bei den mit MUF-Harz gebundenen Spanplatten ein größeres Ausmaß an Festigkeitsabfall erreicht als bei mit MUPF-Harz hergestellten Platten. Den geringsten Festigkeitsverlust wiesen die mit einem Melamin-Harnstoff-Isocyanat-Mischkondensat hergestellten Spanplatten auf. Die Querkzugfestigkeit nach Kochprüfung (V100) war bei allen vier Bindemitteln höher als die Querkzugfestigkeit nach dem Säuretest. Eine

Kombination des Säuretests mit der Kochprüfung verringerte die Querkzugfestigkeit bei allen vier Bindemitteltypen.

Die Hydrolysebeständigkeit von Spanplatten ist im Allgemeinen vom Bindemittel abhängig, wie *Boehme /1991/* mit Hilfe von Klimatisierungsversuchen, Wasserlagerungsuntersuchungen und Vakuumvorbehandlungen vor der Wasserlagerung feststellte. Mit PMDI gebundene Spanplatten waren dabei erwartungsgemäß hydrolysebeständiger als UF-Harz verleimte Spanplatten.

Untersuchungen von *Lehnen und Janson /2005/* zeigten, dass die Hydrolysebeständigkeit von ausgehärteten Lignin-MUF-Harzen deutlich steigt, wenn elektrochemisch behandelte Lignine Einsatz finden. Die Beständigkeit reiner MUF-Harze wurde aber nur bei Entfernung der niedermolekularen Ablaugenbestandteile (< 1000 g/mol) erreicht.

Die Arbeiten von *Roffael et al. /2006a, 2006b/*, an denen auch der Autor mitwirkte, beinhalteten Untersuchungen zur Auswirkung des Aufschlussverfahrens auf die Hydrolyseresistenz von mit verschiedenen Bindemitteln hergestellten MDF. Als Maß für die Hydrolyseresistenz der PF-Harz-, TF-Harz- oder PMDI-gebundenen MDF aus nach dem TMP- und CTMP-Verfahren erzeugten Kiefernholzfasern diente die Veränderung der Querkzugfestigkeit, der Dickenquellung und der Wasseraufnahme der Platten nach Lagerung bei 40°C und 60°C Wassertemperatur für 24 Stunden und 3 Wochen.

Die Verwendung von PMDI beeinflusste bei Einsatz von CTMP im Vergleich zu TMP die Hydrolyseresistenz der hergestellten MDF überaus positiv. Bei Einsatz von TF-Harz und PF-Harz war die Wirkung des CTMP-Verfahrens auf die Hydrolyseresistenz der MDF vergleichsweise schwächer. Zudem lassen die Ergebnisse vermuten, dass bei Verwendung von PF-Harz eine Nachhärtung unter Einwirkung von Wasser und einer erhöhten Temperatur stattfindet. Insoweit scheint die Hydrolyseresistenz der MDF sowohl vom Aufschlussverfahren (TMP- und CTMP-Verfahren) als auch vom Bindemittel (PF-Harz, TF-Harz, PMDI) besonders beeinflusst zu werden. Die Wechselwirkung zwischen Aufschlussverfahren und Bindemittel ist je nach Bindemittel unterschiedlich.

Untersuchungen zur Hydrolysebeständigkeit von mit Weizenprotein modifizierten pPF-Harz-Systemen ergaben nach einer 3-wöchigen Lagerung im auf 40 °C temperierten Wasserbad gegenüber mit Standard-PF-Harz (ohne Proteinzusatz) gebundenen Faserplatten für die proteinmodifizierten Varianten vergleichbare Werte für Querkzugfestigkeit, Dickenquellung und Formaldehydgehalt, was auf eine ausreichende Hydrolysebeständigkeit der Verklebung schließen lässt */Krug et al. 2006/*.

Als weitere Prüfmethode zum Nachweis der Hydrolysebeständigkeit dienen u. a.:

- Bewitterungstunnel (9 Wochen Lagerung bei definierten klimatischen Bedingungen, u. a. Befeuchtungen, Temperaturen von -20 °C bis $+70$ °C, UV-Licht-Bestrahlung),
- Xenotest (mehrere Bewitterungszyklen a 4 Wochen mit definiert wechselnden klimatischen Bedingungen, u. a. Befeuchtungen auf 90 % rel. Luftfeuchte, Beregnung mit saurem Wasser, Temperaturen von -20 °C, UV- und Xenon-Bogen-Bestrahlung),
- tropische Kammer (56-tägige Lagerung bei Temperaturen von 40 °C und rel. Luftfeuchten von 95 %),
- Hydrolysetest nach *Clad und Schmidt-Hellerau* (3-tägige Lagerung unter Wasser, 7-tägige Klimatisierung bei 70 °C und 90 % rel. Luftfeuchte, 7-tägige Klimatisierung bei 40 °C und 50 % rel. Luftfeuchte) */Clad, Schmidt-Hellerau 1977/*.

Im Anschluss an diese Vorbehandlungen erfolgte dann die Prüfung wesentlicher Werkstoffeigenschaften (u. a. Querkzugfestigkeit) */Hennecke 2005/*.

2.3.3 Witterungsbeständigkeit von MDF

Die Witterungsbeständigkeit von Holzwerkstoffen ist als Kombination der Eigenschaften der Beschichtung und vor allem der Verleimungsqualität des Trägerwerkstoffes anzusehen. Wesentlichste Komponente zum Nachweis der Witterungsbeständigkeit von Holzwerkstoffen ist der Nachweis der Änderungen der physikalisch-mechanischen Eigenschaften als Folge der Bewitterung. Die Veränderungen sind von den Werkstoff-Eigenschaften im Ausgangszustand u. a. als Funktion der Herstellungstechnologie (Bindemitteltyp, Prozessparameter) und der Güte der eingesetzten Beschichtung (speziell im Kantenbereich) abhängig.

Ein Vergleich von Kurzzeittests mit bis zu zehn Jahren andauernden Bewitterungsversuchen an PF-Harz-gebundenen Spanplatten ergab keine direkten Zusammenhänge zwischen den Ergebnissen /*Lehmann 1977*/. Bei der genannten Untersuchung wurde die Beziehung zwischen dem Bindemittelanteil und dem Abbau der Querkzugfestigkeit nach einem Kurzzeittest und einem Freibewitterungsversuch ermittelt. Die Vakuum-Druck-Tränkung und der Trockentest nach ASTM-Prüfung führten zu Ergebnissen, die am nächsten mit den Untersuchungen zur natürlichen Bewitterung übereinstimmten. Auch *Deppe und Stolzenburg /1975/* fanden an Spanplatten keinen ausreichenden Zusammenhang zwischen den Ergebnissen von Kurzzeittests und Freibewitterungsversuchen. Interessanterweise ergaben sich zwischen der Dickenquellung im Wasserlagerungsversuch und der Dimensionsänderung bei Lagerung von Spanplatten im Feuchtklima ebenfalls keine eindeutigen Beziehungen /*Grigoriou 1983*/. Zudem ist die Witterungsbeständigkeit von mit UF-Harz hergestellten Spanplatten begrenzt /*Deppe 1983*/, was sich auch für MDF mit gleicher Bindung in Anbetracht der Hydrolyseanfälligkeit dieses Bindemitteltyps mit hoher Wahrscheinlichkeit bestätigen dürfte.

Mit dem an der BAM Berlin entwickelten Kurzzeitbewitterungstest im Xenotest-Gerät 1200 konnten für die Dickenquellung und Wasseraufnahme beschichteter Holzspanplatten bei Prüfung über 12 Wochen Kurzzeitbewitterung (wöchentliche Probenahme) und 3 Jahren Freibewitterung (vierteljährliche Probenahme) gleichsinnige Verläufe ermittelt werden /*Deppe, Schmidt 1982; 1983; 1989; Schmidt, Deppe 1996*/. Da sich diese Zusammenhänge auch für die Querkzugfestigkeit bestätigten, ist nach *Schmidt* von einer Eignung der Kurzzeit-Bewitterungs-Beanspruchung (KZB-Test) als zeitraffendes Alterungsverfahren zur Beurteilung einer dauerhaften Witterungsbeständigkeit von Spanplatten auszugehen /*Schmidt 1995*/.

Ringversuche zur Bewertung der Feuchtebeständigkeit von MDF – bei denen der BAM-KZB-Test angewendet wurde – zeigten u. a., dass der Zusammenhang zwischen der Querkzugfestigkeit nach Bewitterung bzw. nach Kochprüfung sehr unsicher ist /*Gressel 1997*/. Über Untersuchungen zu prüftechnischen Randbedingungen (Probenvorbereitung, Expositionswinkel) und deren Auswirkungen auf das Prüfergebnis (Festigkeitsänderungen) wurde ebenfalls berichtet /*Deppe, Schmidt 1989*/. Abhängigkeiten der Bewitterungsergebnisse von jahreszeitlichen Klimaschwankungen am Bewitterungsstandort /*Roux et al. 1988*/ sowie von der Belastung mit Luftschadstoffen /*Park et al. 1996; Schmidt, Deppe 1996*/ sind auch vorhanden. Generelle Unterschiede der Ergebnisse von Freilandbewitterungsversuchen an verschiedenen mitteleuropäischen Standorten existieren nicht.

Zur Witterungsbeständigkeit von Spanplatten, Spanformteilen, Sperrholz, Massivholzplatten und Furnierschichtholz liegen zahlreiche Untersuchungen vor /u. a. *Gressel 1968; Neußer 1971; Deppe, Schmidt, 1979; Mehlhorn 1987; Jokerst 1989; Wolf, Schmidt-Hellerau 1997; Deppe, Schmidt, 2001; 2009; Risi 2002; Hayashi et al. 2005*/.

Zur Witterungsbeständigkeit von MDF sind nur wenige, nachfolgend näher beschriebene Arbeiten bekannt:

Am BRE (Building Research Establishment) erfolgten Untersuchungen zur Leistungsfähigkeit von MDF in Exterior-Qualität nach bis zu 5jähriger Freilandbewitterung. Dabei wurde u. a. festgestellt, dass die Dickenquellung von MDF nach einem Jahr Freibewitterung gut mit den Ergebnissen zur Dickenquellung selbiger Platten nach 24 h Kaltwasserlagerung übereinstimmt */BRE 1996/*. Ähnlich positiv sind die Korrelationen zwischen der Dickenquellung nach 2 Jahren Freibewitterung sowie nach Zyklustest (V313 nach DIN EN 321, Option 1). Die Querkzugfestigkeit reduzierte sich nach 5 Jahren Freibewitterung um 15 %. Im ersten Jahr war dabei der stärkste Abfall (um ~ 10%) zu beobachten. Für die Querkzugfestigkeit nach Vorbehandlung Kochtest (V100 nach DIN EN 1087-1, Option 2) oder Zyklustest (V313 nach DIN EN 321, Option 1) ergaben sich keine gesicherten Übereinstimmungen zu den Ergebnissen nach Freibewitterung. Dahingegen stimmten die Ergebnisse zur Biegefestigkeit nach V313-Test überraschend gut mit den Werten nach 5 Jahren Freibewitterung überein.

River /1994/ unterzog phenolharzgebundene Holzwerkstoffplatten langjährigen Freibewitterungen und bewertete die Ergebnisse im Kontext zu unterschiedlichen technischen Kurzzeitalterungen:

- Vacuum-pressure-soak-dry-cycle (Lagerung unter Wasser, 30 min Unterdruck (98 kPa), Entspannen, 30 min Überdruck (414 kPa), Abtrocknen, 23 h Trocknung bei 82 °C),
- Boil-dry-cycle (10 min Lagerung im kochenden Wasser, Abtrocknen, 3 – 4 h Trocknung bei 107 °C),
- ASTM D 1037 accelerated aging (1 h Lagerung in auf 49 °C temperierten Wasser, 3 h Lagerung in Wasserdampf bei 93 °C, 20 h Gefrierlagerung bei – 12 °C, 3 h Trocknung bei 99 °C, 3 h Lagerung in Wasserdampf bei 93 °C, 3 h Trocknung bei 99 °C) */River 1994/*.

Die PF-gebundenen MDF aus Fichten-, Kiefern- oder Aspenholz wiesen bei Plattendicken von 10 bis 12 mm Rohdichten zwischen 660 und 830 kg/m³ auf. Nach dem ersten Freibewitterungsjahr wurde grundsätzlich eine erhebliche Abnahme der Biegeeigenschaften festgestellt, die sich im Verlaufe der weiteren 9 Bewitterungsjahre merklich verlangsamte. Vor allem das E-Modul reagierte nachteilig auf die zunehmende MDF-Oberflächenrauheit. Nach 10-jähriger Freilandbewitterung in Madison (USA) korrelierten die Ergebnisse für Biege-E-Modul, Biege- und Querkzugfestigkeit sowie Dickenquellung an MDF gut mit den Werten einer technischen Kurzzeitalterung nach 5 Zyklen Boil-dry- oder einer ASTM D 1037-Vorbehandlung. Deutlich einfacher realisierbar ist die Boil-dry-Vorbehandlung, die zudem eine gute Langzeitprognose der Witterungsbeständigkeit phenolharzgebundener Holzwerkstoffplatten ermöglicht.

Die Versuche von *Krug und Tobisch /2001/* zeigten speziell für MDF aus intensiv (bei Drücken bis 16 bar) aufgeschlossenen Faserstoffen und Verwendung geeigneter Bindemittel (z. B. PF-Harz, MUF-Harz oder PMDI) eine Witterungsbeständigkeit nach technischer oder natürlicher Alterung. Diese stellt einen Außeneinsatz derartiger Platten in Aussicht. Gute Plattenqualitäten bezüglich der im Ausgangszustand ermittelten physikalisch-mechanischen Werkstoffeigenschaften garantieren dabei auch bessere Witterungsbeständigkeiten. Insbesondere erlaubten Quellungsergebnisse nach Zyklustest oder das Maß der Querkzugfestigkeit nach Kochprüfung bzw. Zyklustest Rückschlüsse auf die spätere Witterungsbeständigkeit */Krug, Tobisch 2002; 2006/*. Neben der Bestimmung der Veränderung verschiedener physikalischer MDF-Eigenschaften zu defi-

nierten Entnahmezeitpunkten (als Maß für die absolute Witterungsbeständigkeit) erfolgte auch eine Bewertung der erreichten Ergebnisse in Bezug auf die Ausgangseigenschaften vor der Bewitterung (als Maß für die relative Witterungsbeständigkeit). Geringe prozentuale Veränderungen garantieren dabei gute Witterungsbeständigkeiten.

Wesentlicher Bestandteil der Arbeiten von *Roffael et al. /2006a, 2006b/* waren Untersuchungen zum Einfluss des Bindemittels auf die Witterungsbeständigkeit unterschiedlich gebundener MDF nach mehrjähriger Freilandlagerung. Zusammenfassend wurde eingeschätzt, dass die eingesetzten Bindemittel die Herstellung von MDF-Qualitäten ermöglichen, die nach einer dreijährigen natürlichen Alterung eine dauerhafte Witterungsbeständigkeit der Faserplatten in Aussicht stellen */Krug et al. 2006/*. Erwartungsgemäß ergaben sich klebstoffabhängige Unterschiede, wobei die überragenden Querkzugfestigkeiten von PF-Harz-gebundenen MDF sowie die ausgezeichneten Quellwerte der Platten mit TF-Harz-Bindung hervorzuheben sind. Die Untersuchungen dauern an.

Bestandteil der Arbeiten von *Norita et al. /2008/* waren Untersuchungen zur Tragfähigkeit MUF- sowie PMDI-gebundener MDF nach definierter Tränkung im Heiß- bzw. Kochwasser gemäß JIS A 5908 Prüfung A/B im Vergleich zu Außenbewitterungsprüfungen. Während bezüglich der Querkzugfestigkeit zwischen den Vorbehandlungen im Heiß- bzw. Kochwasser straffe Korrelationen ermittelt wurden, ergab sich zu einer einjährigen Freibewitterung kein gesicherter Zusammenhang.

Im Widerspruch zu den zahlreichen Untersuchungen von *Deppe und Schmidt* an Spanplatten gelang es bislang nicht, für MDF quantitativ zufriedenstellende Korrelationen zwischen einer zeitraffenden technischen Alterung (z. B. Kurzzeitbewitterung im Xenotest-Gerät) und einer mehrjährigen Bewitterung im Freiland zu ermitteln.

2.4 Einsatzgebiete von MDF, normative Vorgaben und MDF-Typen

2.4.1 Einsatzgebiete

Nach einer Studie von JAAKO PÖYRY wurden 2001 MDF in Deutschland zu 42 % als Laminatfußboden, zu 29 % als Möbel, zu 15 % als Leisten/Paneele, zu 9 % Laden- und Innenausbau sowie zu 5 % im Baubereich verwendet */Jaako Pöyry 2001/*.

Im Unterschied dazu unterteilten sich die Hauptverwendungsbereiche für MDF im Jahr 2002 in Europa in die Segmente Möbelfertigung (65 %), Laminatboden (15 %), konstruktiver Bereich (15 %) sowie Sonstiges (5 %) */N. N. 2003d/*. Nicht zuletzt durch die rasanten weltweiten Zuwächse im Laminatfußbodenbereich haben sich diese Anteile in den letzten Jahren (bei einer Steigerung der europäischen MDF-Produktion von 10,5 Mio. m³ in 2002 auf 13,3 Mio. m³ in 2007) erheblich verschoben. Der Einsatz als Trägerwerkstoff für Laminatböden erhöhte sich im Jahr 2007 auf 45 %, während Anwendungen im konstruktiven Bereich mit 11 % ein leicht rückläufige Tendenz ausweisen. Für die Möbelfertigung fanden 25 % mitteldichte Faserplatten Verwendung. Weitere, leicht ansteigende MDF-Applikationen sind der Formteil- und Innenausbausektor (etwa 11 %) sowie der Do-it-yourself-Bereich (etwa 8 %) */EPF 2008/*.

MDF im Nenndickenbereich > 12 bis 38 mm werden als Holzwerkstoff für anspruchsvolle Verwendungszwecke, insbesondere im Möbelbau, bezeichnet und dort eingesetzt, wo gestalterische Aspekte sowie gehobene Qualitätsanforderungen erfüllt werden sollen. Verbreitet kommen MDF im Möbel- und Innenausbau zum Einsatz, z. B. für profilierte Elemente im Küchen-, Büro-, Schlaf- und Wohnzimmerbereich, für rustikale Tischplatten ohne zusätzliche Anleimer, für Kindermöbel ohne scharfe Kanten, für Türfüllun-

gen, im Tonmöbelbau oder als verformbares Element im Innenausbau. Andere Anwendungsgebiete im Innenbereich sind u. a. Wand- und Deckenverkleidungen, Trennwände und Innentüren.

Anwendungen in Bereichen dauerhaft hoher relativer Luftfeuchte bilden bis heute eher die Ausnahme. Verschiedene europäische Hersteller (z. B. Medite, Fantoni, Finsa) bieten MDF mit erhöhter Feuchtebeständigkeit der Verklebung zur Anwendung im Feucht- bzw. Außenbereich unter Berücksichtigung firmenspezifischer Verarbeitungshinweise an. Es sind auch bauaufsichtlich zugelassene²⁹, diffusionsoffene Leicht-MDF zur Beplankung von Wänden und Dächern, PMDI-gebundene Leichtbau- und Dämmelemente mit Materialdicken von 40 bis 250 mm sowie Außenwanddämmungen „HFD Exterior Massiv“ verfügbar /Zscheile et al. 2002; N. N. 2008h/.

Alternative und ausbaufähige Produktbereiche für Exterior-MDF wären neben Einsätzen im Feuchtbereich (Bad- und Küchenmöbel) Verwendungen als endbeschichtete Fassadenelemente, Haustürfüllungen, Profilleisten oder hochwertige Ladenfronten, Werbeflächen sowie Zimmererarbeiten im Außenbereich /Willemse, P. 2001/.

Dünne Faserplatten nach dem Trockenverfahren (Nennstärke 4,5 bis 1,5 mm) finden u. a. im Möbelbau (Schrankrückwände, Schubladenböden, Türoberflächen), in der Türenindustrie (lackierte oder bedruckte Türblätter), im Automobilbau (Innentürverkleidungen, Kofferraumabdeckungen), im Wohnwagenbau, als Verpackungsmaterial, als Stanz- und Bohrunterlagen sowie für Leiterplatten Anwendung.

Hochdichte Faserplatten (HDF) im Nennstärkenbereich von 5 bis 12 mm haben sich als der Trägerwerkstoff für Laminatböden etablieren können. Die heutzutage üblichen leimfreien Klickverbindungen sowie die asymmetrische (sprich einseitige) Beschichtung mit harzgetränkten Papieren stellen dabei sehr hohe Anforderungen an die eingesetzten Platten. Neben einer exzellenten Festigkeit über den gesamten Plattenquerschnitt (zwingend für die spätere, dauerhaft haltende Profilierung) stellen dabei insbesondere Anforderungen an die Kantenquellung (gegenüber freiem Wasser) und die Dimensionsstabilität (gegenüber Temperatur- und Luftfeuchtwechsel) bei beschichteten Platten die wesentlichen Qualitätsmerkmale (und Kritikpunkte bei Reklamationen) dar.

Nach den sehr erfolgreichen mitteleuropäischen Produktentwicklungen der letzten fünf Jahre im Laminatbodenbereich wird für die nächsten Jahre u. a. vor dem Hintergrund der z.Z. laufenden Investitionsvorhaben in China, Russland und Nordamerika eher ein stagnierendes Wachstum prognostiziert, da diese Wirtschaftsräume perspektivisch u. a. selbst Laminatfußböden herstellen und vermarkten werden.

Allen MDF-Anwendungen gemein ist, dass materialspezifische Vorteile, z. B. relativ homogene Rohdichteverteilung über den Plattenquerschnitt und daraus resultierend gute Bearbeitbar- und Profilierbarkeit, isotropes Verhalten in der Ebene sowie die gute Beschichtbarkeit mit flüssigen und festen Materialien gezielt ausgenutzt werden. Gleichzeitig laufen intensive Bemühungen, Schwächen des Werkstoffs MDF (u. a. hoher Energieaufwand für die Zerfaserung, Quell- und Schwindpotential, Feuchteprofil über den Plattenquerschnitt, elektrisch isolierend und damit nicht ableitend, Emissionspotential, Brennbarkeit) durch Weiterentwicklungen zu optimieren.

Letztlich soll hierzu auch die vorliegende Arbeit geeignete Impulse geben.

Gegenüber herkömmlichen, im Baubereich für Außenanwendungen bereits etablierten Spanformteilen, Fassadensperrhölzern, Furnierschichtholz, OSB, mehrlagigen Massiv-

²⁹ „Agepan DWD“ (Glunz, Z-9.1-382), „KRONOTEC WP 50 und DP 50“ (Kronotex, Z-9.1-442), „Hornitex Masterwood D+W“ (Pfleiderer, Z-9.1-443), „FORMline DHF“ (Egger, Z-9.1-454)

holzplatten aus nativem oder thermisch vergütetem Nadelholz sowie zementgebundenen Spanplatten zeichnen sich MDF besonders durch „freie“ Profiliermöglichkeiten (nicht an Gesenkform gebunden), glatte Oberflächen und eine gute Eignung zur Flüssigbeschichtung aus. Ein weiterer Vorteil ist in dem zumindest gegenüber Spanformteilen und Zementspanplatten geringeren Gewicht der Faserplatten und resultierend daraus in den entsprechend reduzierten Anforderungen an die Stabilität der Unterkonstruktion einschließlich Befestigung der Platten zu sehen. Gegenüber den richtungsorientierten Werkstoffen (Sperrholz, OSB, Massivholzplatten) ist das mehr oder weniger isotrope Verhalten (Quellen, Schwinden, Verformen etc.) der Faserplatten in der Ebene förderlich. Auch preislich dürften MDF gegenüber den vorgenannten etablierten Werkstoffen für den Außenbereich (mit Ausnahme von OSB) Vorteile haben.

Allerdings ist die Herstellung von MDF in feuchtebeständiger Verklebungsqualität noch nicht europäischer Stand der Technik. So zeigen Erfahrungen zu Quellwerten und Dimensionsstabilität von HDF bei langjährigem Einsatz (≥ 5 Jahre) als Träger für Laminatböden, dass die durch Einsatz synthetischer Bindemittel mit maximalen Festharzdosierungen bzw. durch Hydrophobierung mit Paraffin erreichten Ergebnisse zur Minimierung von Klima-, Verlege- und Reinigungsfeuchten-Einflüssen nicht ausreichen. Als besonders kritisch sind dabei neben den Randaufquellungen die Öffnungen der Längs- und Querfugen bei formschlüssigen, leimfreien Klickverbindungen anzusehen, die sich selbst durch eine Imprägnierung der Schmalflächen nur bedingt einschränken lassen.

Im Hinblick auf tragende Anwendungen schneidet MDF bezüglich der elastomechanischen Kennwerte gegenüber den erwähnten Konkurrenzprodukten mit Ausnahme der Spanformteile eher ungünstig ab, woraufhin MDF-Anwendungen im Feucht- oder Außenbereich eher für nichttragende Zwecke gesehen werden. Auch hier ist allerdings zu beachten, dass MDF in Haupt- und Nebenachse vergleichbare Werte aufweisen, währenddessen richtungsorientierte Werkstoffe wie Sperrholz, OSB, Massivholzplatten in der Nebenachse zumindest teilweise deutlich ungünstigere Eigenschaften haben.

Zu den Auswirkungen des Einsatzes von MDF-Bauelementen im Feucht- oder Außenbereich auf die physikalisch-mechanischen Eigenschaften des MDF-Trägermaterials gibt es bisher keine gesicherten Erkenntnisse.

2.4.2 Normative Vorgaben und MDF-Typen

Bezüglich normativer Regelungen ist festzustellen, dass bereits die Industrienorm der Vereinigung der europäischen MDF-Hersteller EMB [Euro MDF Board] /*EMB MDF Industrienorm 1995, einschließlich Korrekturen 1996; EMB MDF Produktnormen 1997 und 1998*/konkrete Anforderungswerte u. a. an MDF für allgemeine und tragende Zwecke zur Verwendung im Trockenbereich (MDF), im Feuchtbereich (MDF.H) sowie im Außenbereich (MDF.E) definierte. MDF Exterior für eine Anwendung im Außenbereich durften nur für nichttragende Außenanwendungen (Außenverkleidungen, Schilder, Wintergärten, Kioske usw.) ohne direkten Erd- oder Wasserkontakt eingesetzt werden, wenn alle Kanten (Schmalflächen) und Oberflächen mit einem für den Außeneinsatz zugelassenen Beschichtungssystem dauerhaft isoliert waren /*EMB MDF-Industrienorm 1995*/. Nach dem Aufgehen des EMB-Verbandes in der EPF im Januar 1999 verloren jedoch sowohl die Industrienorm als auch die Produktnormen an Bedeutung. Die heute verbindlichen Anforderungen an Faserplatten nach dem Trockenverfahren sind in den

aktuellen Fassungen der DIN EN 622-5, des ISO/DIS 16895-1 und -2 sowie des JIS A 5905³⁰ festgeschrieben.

Den Vorgaben der EMB-Industrienorm nachkommend, definierte DIN EN 622-5:1997-08 zunächst drei Anwendungsbereiche für MDF:

1. Trockenbereich: Bedingungen entsprechend Nutzungsklasse 1³¹ nach EN 1995-1-1, gekennzeichnet durch einen Feuchtegehalt des Materials, der einer Temperatur von 20 % und einer relativen Luftfeuchte der umgebenden Luft entspricht, die nur für einige Wochen pro Jahr einen Wert von 65 % übersteigt. Platten dieses Typs eignen sich nur für die Verwendung in der Gefährdungsklasse 1³² nach EN 335-3.
2. Feuchtbereich: Bedingungen entsprechend Nutzungsklasse 2³³ nach EN 1995-1-1, gekennzeichnet durch einen Feuchtegehalt des Materials, der einer Temperatur von 20 % und einer relativen Luftfeuchte der umgebenden Luft entspricht, die nur für einige Wochen pro Jahr einen Wert von 85 % übersteigt. Platten dieses Typs eignen sich für die Verwendung in den Gefährdungsklassen 1 und 2³⁴ nach EN 335-3.
3. Außenbereich: Schließt Bewitterung oder Kontakt mit Wasser oder Wasserdampf an einem feuchten, jedoch belüfteten Ort ein. Platten dieses Typs eignen sich für die Verwendung in den Gefährdungsklassen 1, 2 und 3³⁵ nach EN 335-3.

Allerdings legte diese Norm im Unterschied zu der vorstehend beschriebenen EMB-Industrienorm keine konkreten Anforderungswerte an MDF für den Außenbereich fest. Hingegen sind für den Feuchtbereich Vorgaben an Platten für allgemeine und tragende Zwecke spezifiziert.

In der aktuellen DIN EN 622-5: 2006-09 ist eine Außenanwendung von MDF als möglicher Nutzungsbereich nicht mehr definiert. In der Folge sind auch keine Anforderungen an Platten einer solchen Qualität festgelegt. Die Definitionen für die Anwendungsbereiche Trocken- und Feuchtbereich entsprechen denen der Norm von 1997. Bezüglich der Einsatzzwecke erfolgt eine Unterteilung in Platten für:

- allgemeine Zwecke: alle nichttragende Anwendungen, die nicht anderweitig festgelegt sind (z. B. Möbel, Innenausbau),
- nicht tragende Zwecke: Einsatz unter nicht tragenden Bedingungen, z. B. als Teil eines Gebäudes oder einer Konstruktion,
- tragende Zwecke: Einsatz in einer tragenden Konstruktion, d.h. in planmäßig miteinander verbundenen Teilen, um einem Bauwerk mechanische Festigkeit und Standsicherheit zu verleihen (auch als „Tragwerk“ bezeichnet).

Für Platten für tragende Zwecke gelten dann weiterhin Klassen der Lasteinwirkungsdauer nach EN 1995-1-1. Diese sind gekennzeichnet durch die Wirkung einer konstanten Last, die für eine bestimmte Zeitperiode innerhalb der Lebensdauer auf das Tragwerk einwirkt (Tabelle 9).

³⁰ Japanese Industrial Standard (JIS) A 5905:2003: Auf diesen japanischen Fibreboards-Standard wird nicht näher eingegangen.

³¹ In Nutzungsklasse 1 wird eine mittlere Gleichgewichtsfeuchte von 12 % in den meisten Nadelhölzern nicht überschritten.

³² ohne Erdkontakt abgedeckt (trocken)

³³ In Nutzungsklasse 2 wird Gleichgewichtsfeuchte von 20 % in den meisten Nadelhölzern nicht überschritten.

³⁴ ohne Erdkontakt abgedeckt (Risiko einer Befeuchtung/feuchte Bedingungen). Gelegentlich kann ein Feuchtegehalt erreicht oder überschritten werden, der demjenigen entspricht, der sich bei einer Lufttemperatur von 20 °C und einer relativen Luftfeuchte von 90 % einstellen würde.

³⁵ ohne Erdkontakt nicht abgedeckt (Außenbedingungen). In dieser Umgebung können Faserplatten häufig einen Feuchtegehalt über 20 % haben und daher oft einem Angriff durch holzerstörende Pilze ausgesetzt sein.

Tabelle 9 Klassen der Lasteinwirkungsdauer und Beispiel für die Lasteinwirkung nach DIN EN 622-5:2006-09

Klasse der Lasteinwirkungsdauer	Größenordnung der akkumulierten Dauer der charakteristischen Lasteinwirkung	Beispiel für die Lasteinwirkung
ständig	länger als 10 Jahre	Eigengewicht
lang	6 Monate bis 10 Jahre	Lagerstoffe
mittel	1 Woche bis 6 Monate	Verkehrslasten, Schnee
kurz	kürzer als 1 Woche	Schnee, Wind
sehr kurz		Wind und außergewöhnliche Einwirkungen

Bereits unter Gliederungspunkt (2.2.1 Definitionen) erfolgte für Faserplatten nach dem Trockenverfahren eine Einteilung in UL-MDF, L-MDF, MDF und HDF nach den unterschiedlichen Rohdichtebereichen in Anlehnung an EN 316:1999.

Die seit September 2006 gültige DIN EN 622-5 unterteilt MDF nach Einsatzzwecken und Anwendungsbereichen für unterschiedliche Nenndickenbereiche (Tabelle 10). Unter Bezug auf die vorstehend erläuterten Begriffe wird dabei mit „Platten zur Verwendung als Unterdeckplatten für Dachdeckungen und Wände“ noch ein weiterer Plattentyp (MDF.RWH) definiert. HDF werden nicht explizit erwähnt, für sie gelten die Anforderungen analog zu MDF (mit entsprechend reduzierter Nenndicke, i. d. R. ≤ 12 mm).

Tabelle 10 MDF-Plattentypen nach DIN EN 622-5:2006-09

Plattentyp	Einsatzzweck	Anwendungsbereich	Nenndickenbereich [mm]
MDF	allgemein	trocken	1,8 bis > 45
MDF.H	allgemein	feucht	1,8 bis > 45
MDF.LA	tragend	trocken	1,8 bis > 45
MDF.HLS	tragend	feucht	1,8 bis > 45
L-MDF	nichttragend und allgemein	trocken	6 bis >45
L-MDF.H	nichttragend und allgemein	feucht	6 bis >45
UL1-MDF	nichttragend und allgemein	trocken	9 bis > 45
UL2-MDF	nichttragend und allgemein (i. d. R. mit aussteifender Funktion und dämmenden Eigenschaften)	trocken	9 bis > 45
MDF.RWH	Verwendung als Unterdeckplatten für Dachdeckungen und Wände		12 bis 20

Die folgende Tabelle 11 enthält beispielhaft Anforderungen an MDF im Nenndickenbereich > 12 bis 19 mm für allgemeine Zwecke bzw. tragende Zwecke zur Verwendung im Feuchtbereich. Da es keine europäischen normativen Vorgaben für Faserplatten zur Verwendung im Außenbereich gibt, enthält die Tabelle zusätzlich die entsprechenden Anforderungen für MDF.E gemäß EMB-Industrienorm. Exterior-Vorgaben finden sich auch in produktspezifischen Datenblättern verschiedener Hersteller, die MDF für den Außenbereich anbieten. Die Vorgaben für MDF Exterior der Hersteller Willamete Europe (Irland), Fantoni Osoppo (Italien) sowie FINSA Padrón-La Coruña (Spanien) sind deshalb gleichfalls Bestandteil der folgenden Übersicht /*Medite 1999, Fantoni 1994, Finsa 1998*/.

Bemerkenswert ist, dass die Anforderungen an MDF.H und MDF.HLS nach DIN EN 622-5 mit Ausnahme der Biegeeigenschaften den EMB-Vorgaben für MDF.E entsprechen (allerdings fehlen in der EMB-Norm Anforderungen für V313-MDF-Qualitäten). Widersprüchlich ist, dass sich die Vorgaben für Biegefestigkeit und Biege-E-Modul von MDF.E nach der EMB-Norm und MDF.HLS nach DIN EN 622-5 gleichen, obwohl die

Exterior-MDF für allgemeine Verwendungszwecke, die HLS-MDF hingegen für tragende Verwendungszwecke ausgewiesen ist.

Die Hersteller von Platten für den Außenbereich setzen grundsätzlich für alle Kennwerte höhere Anforderungskriterien voraus. Speziell Fantoni³⁶ stellt dabei an seine MDF Exterior Qualität sehr hohe Anforderungen gegenüber den Vorgaben für MDF.H bzw. MDF.HLS nach DIN EN 622-5. Beispielsweise werden für die Querkzugfestigkeit mindestens doppelt so hohe - und im Falle der Dickenquellung nahezu auf ein Drittel reduzierte Werte vorgeschrieben.

Tabelle 11 Anforderungen an MDF.H (allgemeine Zwecke, Feuchtbereich) und MDF.HLS (tragende Zwecke, feucht) nach DIN EN 622-5:2006 im Vergleich zu Anforderungen an MDF.E (allgemeine Zwecke, Außenbereich) nach EMB-Industrienorm sowie zu Herstellerangaben für MDF Exterior von Medite, Fantoni und Finsa, Nenndickenbereich > 12 bis 19 mm

Eigenschaft	Prüfverfahren	Einheit	MDF.H	MDF.HLS	MDF.E	Medite	Fantoni	Finsa
Rohdichte	EN 323	kg/m ³	-	-	-	740	740 - 820	740 - 780
Feuchtegehalt	EN 322	%	4 - 11	4 - 11	4 - 11	4 - 9	4 - 11	6 - 8
Dickenquellung 24 h WL	EN 317	%	8	8	8	9 - 5	3	3
Querkzugfestigkeit	EN 319	N/mm ²	0,75	0,75	0,75	1,20	1,50	1,0
Biegefestigkeit	EN 310	N/mm ²	24	30	30	40 - 37	52	40
Biege-E-Modul	EN 310	N/mm ²	2400	2700	2700	3500 - 3000	4200	3500
Option 1 (V313) Dickenquellung nach Zyklustest	EN 317	%	15	15	-	-	4,5	-
Querkzugfestigkeit nach Zyklustest	EN 321 EN 319 EN 321	N/mm ²	0,20	0,20	-	-	0,45	-
Option 2 (V100) Querkzugfestigkeit nach Kochprüfung	EN 319 EN 1087-1	N/mm ²	0,12	0,12	0,12	0,30	0,32	0,15

Die in der Tabelle enthaltenen Anforderungen müssen von 5%-Quantil-Werten (95%-Quantil-Werten im Falle der Dickenquellung) erfüllt werden, die aus Mittelwerten einzelner Platten nach DIN EN 326-1 berechnet wurden. Sie dürfen bezüglich der Dickenquellung nicht überschritten (Maximalwerte), bei allen anderen Eigenschaften nicht unterschritten (Mindestwerte) werden. Die angegebenen Werte für die Biegefestigkeit und den Elastizitätsmodul gelten für die schwächste Richtung der Plattenebene.

Mit Ausnahme der Dickenquellung nach Wasserlagerung, der Querkzugfestigkeit nach Kochprüfung sowie der Dickenquellung und Querkzugfestigkeit nach Zyklustest sind alle Tabellenwerte durch einen Feuchtegehalt des Werkstoffs gekennzeichnet, der einer Temperatur von 20 °C und einer relativen Luftfeuchte von 65 % entspricht. Die Tabellenwerte für die Dickenquellung nach Wasserlagerung, die Querkzugfestigkeit nach Kochprüfung sowie die Dickenquellung und Querkzugfestigkeit nach Zyklustest sind durch einen Feuchtegehalt des Werkstoffs gekennzeichnet, der einer Temperatur von 20 °C und einer relativen Luftfeuchte von 65 % vor der Behandlung (Wasserlagerung, Kochprüfung, Zyklustest) entspricht.

³⁶ Fantoni verwendet zur Herstellung von MDF Exterior sehr sorgfältig aufbereitetes Altholz (Vorimprägniereffekt) sowie relativ hohe PMDI- und Hydrophobierungsmittel-Anteile. Das erklärt die sehr gute MDF-Qualität.

ISO/DIS 16895-1:2007(E) definiert in Abhängigkeit von der Rohdichte folgende Faserplattentypen, die quasi europäischen Vorgaben entsprechen (vgl. 2.2.1 Definitionen, UDF, LDF, MDF, HDF).

Neben dem Einsatz im Trocken- und Feuchtbereich werden abweichend vom europäischen Standard auch Anwendungen für Bereiche hoher Feuchte (High Humid) sowie der Außenbereich (Exterior) als Serviceklassen definiert. Eine weitere Spezifikation erfolgt dann in Platten für DIY, Möbel, allgemeine sowie tragende Zwecke:

- REG (regular): for use in dry conditions³⁷ only,
- MR (moisture resistant): for use in humid conditions³⁸,
- HMR (high moisture resistant): for use in high-humid conditions³⁹,
- EXT (exterior): for exterior use⁴⁰ above ground,
- LB (load-bearing): for structural or load bearing use,
- GP (general purpose): for use in general applications not requiring the specific properties of furniture or load-bearing grades,
- FN (furniture): for use in furniture manufacture, cabinet making, fitments and joinery, and as a base for surface decorative treatments,
- DIY (do it yourself): for use in home projects rather than by professional trade persons.

Die Sonderklassen FR (fire retardant, geschützt gegen Feuer), I (insect retardant, geschützt gegen Insektenbefall) und F (fungi retardant, geschützt gegen Pilzbefall) ergänzen den Normentwurf ISO 17064:2004(E).

Die Plattentypen LDF, MDF und HDF finden in Bereichen hoher Feuchte Anwendung (z. B. Küchen- und Badschränke, Verpackungen, Industriefußböden, Unterdeckplatten für Wände und Dächer, Balken, Toilettentrennwände). Hingegen sind Verwendungen im Außenbereich ausschließlich nichttragenden MDF-FN EXT vorbehalten, u. a. für Verkleidungen, Traufbretter (fascias), Fenster, Terrassendielen sowie für durch geeignete Beschichtungen geschützte Außenkonstruktionen.

Die nachfolgende Übersicht enthält Anforderungen an MDF der Qualität MR, HMR und EXT nach ISO/DIS 16895-2:2007(Entwurf) im Nennickenbereich > 13 bis 22 mm sowohl für allgemeine und tragende Zwecke als auch für Platten für den Möbelbereich. Für den Außenbereich sind ausschließlich Anforderungen an Faserplatten für den Möbeleinsatz definiert (Tabelle 12).

³⁷ Interior conditions, or protected exterior end-use conditions, characterized by a moisture content in the materials corresponding to a temperature above 20 °C and a relative humidity of the surrounding air regularly exceeding 65 % for only a few weeks of the year, according to ISO 17064:2004(E).

³⁸ Interior conditions, or protected exterior end-use conditions, characterized by a moisture content in the materials corresponding to a temperature above 20 °C and a relative humidity of the surrounding air regularly exceeding 65 % and exceeding 85 % for only a few weeks of the year, according to ISO 17064:2004(E).

³⁹ Interior conditions, or protected exterior end-use conditions, characterized by a moisture content in the materials corresponding to a temperature above 20 °C and a relative humidity of the surrounding air regularly exceeding 85 % or where there is occasional risk of wetting of the panel (but excluding submerging or housing), according to ISO 17064:2004(E).

⁴⁰ end-use conditions, characterized by exposure to climatic and environmental conditions such as rain, sunlight, atmospheric pollutants, etc., according to ISO 17064:2004(E).

Analog zu DIN EN 622-5 gilt, dass die in der Tabelle enthaltenen Anforderungen von 5%-Quantil-Werten (95%-Quantil-Werten im Falle der Dickenquellung) erfüllt werden müssen, die im Falle der Dickenquellung nicht überschritten (Maximalwerte), bei allen anderen Eigenschaften nicht unterschritten (Mindestwerte) werden dürfen.

Tabelle 12 Anforderungen an MDF-GP MR (allgemein, Feuchtbereich), MDF-FN MR (Möbel, Feuchtbereich), MDF-LB MR (tragend, Feuchtbereich), MDF-GP HMR (allgemein, Bereich hoher Feuchte), MDF-FN HMR (Möbel, Bereich hoher Feuchte), MDF-LB HMR (tragend, Bereich hoher Feuchte) und MDF-FN EXT (Möbel, Außenbereich) nach ISO/DIS 16895-2:2007(E), Nenndickenbereich > 13 bis 22 mm

Eigenschaft	Prüfverfahren	Einheit	MDF-Typ						
			GP MR	FN MR	LB MR	GP HMR	FN HMR	LB HMR	FN EXT
Biegefestigkeit (MOR)	ISO 16978	MPa ⁴¹	22	24	28	22	24	28	26
Biege-E-Modul (MOE)	ISO 16978	MPa	2200	2300	2500	2200	2300	2500	2000
Querkzugfestigkeit	ISO 16984	MPa	0,45	0,50	0,60	0,45	0,50	0,60	0,60
Dickenquellung 24 h WL	ISO 16983	%	9	9	8	7	7	7	5
Abhebefestigkeit	ISO 16981	MPa	-	0,9	-	-	0,9	-	-
Feuchtbeständigkeit									
Option 1 (V313) Querkzugfestigkeit nach Zyklustest Dickenquellung nach Zyklustest	ISO 16987	MPa %	0,20 13	0,20 13	0,20 13	0,25 11	0,25 11	0,30 11	0,30 10
Option 2 (V100) Querkzugfestigkeit nach Kochprüfung	ISO 16998	MPa	0,12	0,12	0,12	0,15	0,15	0,15	0,20
Option 3 Biegefestigkeit nach Wasserlagerung bei 70 °C	ISO 20585 Method A	MPa	5	5	6	8	10	13	10

Erwartungsgemäß werden an Platten zur Verwendung im Außenbereich mit Ausnahme der Biegeeigenschaften die höchsten Anforderungen gestellt. Im Vergleich zu den bereits diskutierten Vorgaben ordnen sich die Werte für die Dickenquellung mit 5 % nach 24 h Wasserlagerung zwischen den Empfehlungen des EMB (8 %) sowie den Herstellerspezifikationen von Finsa, Fantoni und Medite (3 bis 9 %) ein. Ähnliches gilt für die Querkzugfestigkeit nach Vorbehandlung 2 h Kochen (V100 - Option 2) als ein wesentliches Maß für die Feuchtbeständigkeit der Verklebung. Dabei liegen die vorgegebenen 0,2 MPa zwischen den 0,12 N/mm² (EMB) und 0,32 N/mm² (Fantoni). Anders verhält es sich für die Querkzugfestigkeit trocken, wo die geforderten 0,6 MPa relativ deutlich unter den EMB- (0,75 N/mm²) sowie Hersteller-Vorgaben (1,0 bis 1,5 N/mm²) zurückbleiben. Auch an die Biegefestigkeit und das Biege-Elastizitätsmodul werden von der EMB-Industrienorm und den Herstellern von MDF Exterior teilweise deutlich höhere Anforderungen gestellt.

ISO/DIS 16895 unterteilt im Unterschied zu DIN EN 622-5 in Anwendung im Feuchtbereich (MR) sowie Bereichen hoher Feuchte (HMR). Für beide Einsatzbereiche werden dabei gegenüber den MDF.H bzw. MDF.HLS (nach DIN EN 622-5) höhere Anforderungen an die Dickenquellung und die Querkzugfestigkeit nach Zyklustest (V313 – Option 1)

⁴¹ MPa = N/mm²

gestellt. Faserplatten zur Verwendung in Bereichen hoher Feuchtbelastung müssen im Falle der Querkzugfestigkeit nach Kochprüfung (V100 – Option 2) höheren Ansprüchen genügen. Als drittes Kriterium zur Einschätzung der Feuchtebeständigkeit der Verklebung dient die Prüfung der Biegefestigkeit nach 2 h Wasserlagerung bei 70 °C (Option 3). Erwartungsgemäß sind die Vorgaben für HMR-Anwendungen höher. Ein Vergleich mit Vorgaben nach DIN EN 622-5 ist nicht möglich, da Option 3 in dieser Norm nicht enthalten ist.

Mit Ausnahme von Medite, Fantoni und Finsa sind keine weiteren Hersteller bekannt, die MDF für Bereiche hoher Feuchte (HMR) oder den Außenbereich (EXT) anbieten. Nach bisherigen Erfahrungen realisieren die aufgeführten Produzenten die besondere Verklebungsgüte und Witterungsbeständigkeit der MDF durch den Aufschluss sorgfältig aufbereiteter Rohholzsortimente (Altholz – Vorimprägniereffekt) bei relativ industrieüblichen Aufschlussdrücken von 8 bis 9 bar (zum Einsatz intensiverer Aufschlussbedingungen konnte nichts recherchiert werden), die Verwendung geeigneter Klebstoffsysteme in relativ hoher Dosierungen (8 bis 12 % PMDI, 9 bis 16 % PF-Harz), sowie der Zugabe hoher Hydrohobierungsmittelanteile (1,5 bis 2,5 %). Presszeitfaktoren von bis zu $16 \text{ s/mm}_{\text{Plattendicke}}$ bei Presstemperaturen von 180 bis 190 °C sind nicht mit industrieüblichen Parametern vergleichbar, ermöglichen aber eine sehr intensive Klebstoffaushärtung, die Einstellung eines sehr gleichmäßigen Dichte- und Feuchteverlaufes über den Plattenquerschnitt und damit eine überaus homogene Plattenqualität.

Eine wesentliche Aufgabe der Arbeit besteht darin, praktikable Kriterien/Prüfmethoden auf Grundlage umfassender Untersuchungen zur Feuchte- und Witterungsbeständigkeit an Faserplatten in hoch feuchtebeständiger Verklebungsqualität zu testen und weiter zu entwickeln.

2.5 Wirtschaftliche Situation und Produktionsvolumen

Der in den Jahren 2006 und 2007 beobachtete, im Vergleich zu den Vorjahren wieder stärkere Anstieg der Produktions- und Verbrauchszahlen für Spanplatten, MDF/HDF und OSB hat sich nach Einschätzung der European Panel Federation (EPF) für 2008 und 2009 nicht fortgesetzt /EPF 2009/. Nach dem Produktionszuwachs von 2,8 % auf 13,3 Mio. m³ (ohne Türkei und Russland) im Jahr 2007 verzeichneten MDF für das Jahr 2008 einen drastischen Rückgang um 8,4 % auf 12,2 Mio. m³. MDF „leidet“ dabei insbesondere unter Rückgängen im Laminatbodenbereich.

Massiv blieb der Aufbau weiterer Kapazitäten in der Türkei, die Ende Jahr 2008 eine MDF-Produktionskapazität von 2,4 Mio. m³ aufwies und damit nach Deutschland (3,9 Mio. m³ MDF) zweitgrößter europäischer Produzent ist. Es folgen Polen mit 1,4 Mio. m³ und Spanien mit 1,2 Mio. m³ MDF. Nach Deutschland (MDF-Verbrauch in 2008 3,4 Mio. m³) sind Großbritannien, Italien, Polen, Spanien, Belgien und Luxemburg die nächstgrößeren Absatzmärkte, die 2008 in summa mit 4,7 Mio. m³ MDF etwa 42 % des europäischen Gesamtverbrauchs ausmachten. Eine erheblichen Anstieg verzeichnete nach EPF-Angaben das Verkaufsvolumen chinesischer MDF- und HDF-Anbieter.

Einen Überblick die Entwicklung der Produktion aller Holzwerkstoffplattenarten gibt Abbildung 24.

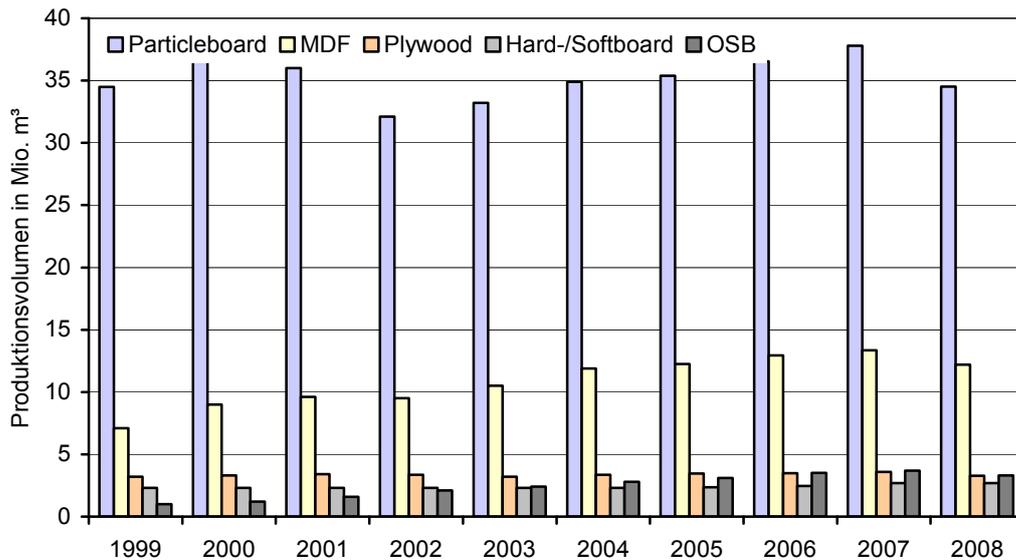


Abbildung 24 Produktion von Particleboard, MDF, Plywood, Hard-/Softboard und OSB in Europa (einschließlich Deutschland, ausschließlich Türkei und Russland) für den Zeitraum von 1999 bis 2008 /EPF Annual Reports 2002 – 2009/

MDF zeichnet sich durch das größte Produktionswachstum aus. Gleichfalls beachtliche Zuwächse ergeben sich für OSB und Spanplatten, währenddessen die Produktion von Sperrholz und Faserplatten nach dem Nassverfahren nahezu stagniert. Eine andere Form der Darstellung enthält die Produktionsvolumina der jeweiligen Holzwerkstoffplatten in Bezug auf die Gesamtjahres-m³-Menge an Holzwerkstoffen (Tabelle 13).

Tabelle 13 Prozentanteil der unterschiedlichen Holzwerkstoffe am Gesamt-Holzwerkstoffproduktionsvolumen in Europa im Zeitraum von 1999 bis 2008 /EPF Annual Reports 2002 – 2009/

Jahr	Holzwerkstoffe gesamt ⁴²	Particleboard	MDF	Plywood	Hard-/Softboard	OSB
	Mio. m ³	%	%	%	%	%
1999	48,1	71,7	14,8	6,7	4,8	2,1
2000	52,6	70,0	17,1	6,3	4,4	2,3
2001	52,9	68,1	18,1	6,4	4,3	3,0
2002	49,4	65,0	19,3	6,8	4,7	4,3
2003	51,6	64,3	20,3	6,2	4,5	4,7
2004	55,3	63,2	21,5	6,1	4,2	5,1
2005	56,6	62,6	21,7	6,1	4,2	5,5
2006	59,0	62,0	22,0	5,9	4,2	5,9
2007	61,1	61,8	21,8	5,9	4,4	6,1
2008	56,0	61,6	21,8	5,9	4,8	5,9

Es wird deutlich, dass bei einer steigenden Gesamtmenge von 48,1 Mio. m³ im Jahr 1999 auf 56,0 Mio. m³ im Jahr 2008 der MDF-Anteil nahezu um den Prozentsatz steigt, um den der Spanplattenanteil sinkt und dabei etwa 1/5 der gesamten europäischen Holzwerkstoffproduktion ausmacht. Sperrholz und Faserplatten nach dem Nassverfahren

⁴² entspricht 100 %

ren haben leicht rückläufige Tendenzen. OSB verzeichnet starke Zuwächse (Verdreifachung gegenüber 1999).

Auf der Generalversammlung der EPF am 25. Juni 2009 in Santiago de Compostela/Spanien wurden MDF weiterhin als vielversprechender Holzwerkstoff der Zukunft charakterisiert. Diese Annahme begründet sich auf der beeindruckenden Entwicklung von Produktion und Verbrauch dieses Faserwerkstoffs in Europa in den letzten 22 Jahren (Abbildung 25).

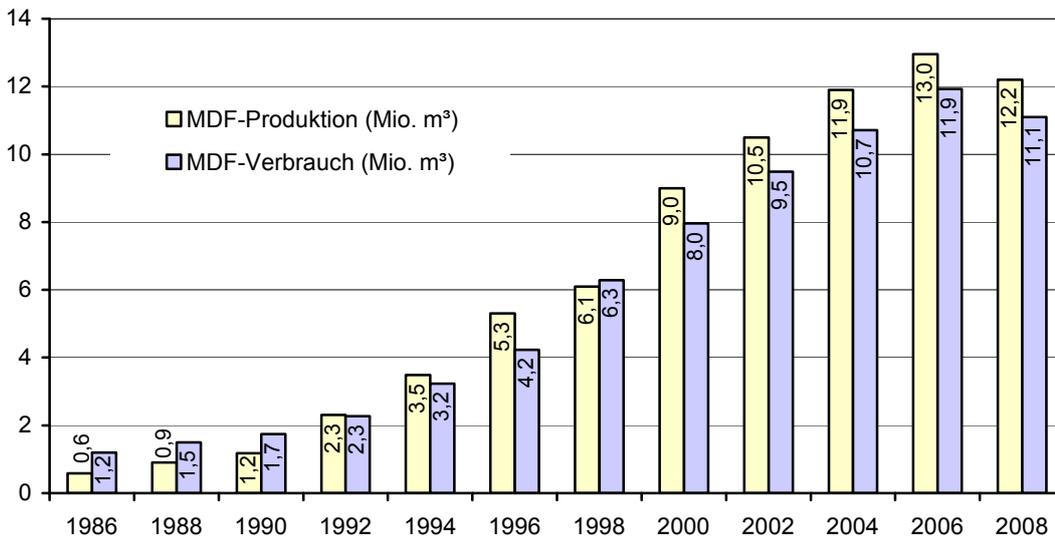


Abbildung 25 MDF-Produktion und -Verbrauch in Europa (einschließlich Deutschland, ausschließlich Türkei und Russland) für den Zeitraum von 1986 bis 2008 /EPF Annual Reports 2002 – 2009/

Trotz dieser beeindruckenden Entwicklung ist festzustellen, dass sich ähnlich zu anderen Holzwerkstoffen auch in der Faserplatten-Industrie eine Abschwächung des Wachstums abzeichnet. Als Folge der Weltwirtschaftskrise sank in Europa im Jahr 2008 die Produktion von MDF auf 12,2 Mio. m³ und der Verbrauch auf 11,1 Mio. m³. In Deutschland wurden mit 3,9 Mio. m³ MDF 9,3 % weniger Faserplatten gegenüber 2007 produziert /N.N. 2009e/. Nachdem die Krise in 2009 zu Rückgängen bei der Herstellung der aller partikelbasierten Holzwerkstoffplatten führte, rechnet die EPF ab 2010 wieder mit geringfügigen Kapazitäts- und Produktionszuwächsen /EPF 2009/.

HDF für die Verwendung als Laminatboden-Trägerwerkstoff mit den größten Produktionszuwächsen im letzten Jahrzehnt wird vor dem Hintergrund der z.Z. laufenden Investitionsvorhaben in China, Russland und Nordamerika eher ein stagnierendes Wachstum prognostiziert, da diese Wirtschaftsräume perspektivisch selbst Laminatböden herstellen und vermarkten werden. Der Verband der europäischen Laminatfußbodenhersteller (EPLF) stellte fest, dass der weltweite Absatz der 19 EPLF-Mitglieder im Jahr 2008 um 7,8 % auf 496 Mio. m² (2007: 507 Mio. m²) zurückgegangen ist /N. N. 2009d/.

Damit einhergehenden Problemen verschiedener westeuropäischen Produktionsstandorte (u. a. auch drohende Werkschließungen) ist voraussichtlich nur durch eine zunehmende Diversifikation der MDF-Produktpalette unter Rückbesinnung auf die material-spezifischen Vorteile des Werkstoffs MDF zu begegnen. Als problematisch sind dabei heute übliche Anlagengrößen von $\geq 350.000 \text{ m}^3$ Jahresleistung und mehr zu sehen, die zwar eine sehr wirtschaftliche Produktion von Massenprodukten erlauben, die Herstellung von Spezialprodukten ($\leq 100 \text{ m}^3$) jedoch nahezu ausschließen.

Interessanterweise gibt es in jüngerer Zeit aber auch gegenläufige Entwicklungen, wie erstmals rückläufige Laminatboden-Exportzahlen aus China 2007 zeigen /N. N. 2008d/. Das ist insofern bemerkenswert, als dass China ausgehend von einem relativ geringen Niveau in 2003 seine Exportlieferungen in den Jahren 2004 und 2005 jeweils verfünffacht und in 2006 immerhin noch verdoppelt hatte. Erhebliche Einbußen ergaben sich für Lieferungen leimfrei verlegbarer Laminatböden in die USA (den Herstellern fehlen die entsprechenden Lizenzen) sowie für Lieferungen nach Kanada (infolge 2005 eingeführter und 2007 verschärfter Anti-Dumping-Zölle).

Die chinesischen Hersteller konzentrieren sich aufgrund von Kostensteigerungen und der daraus resultierenden Einschränkung der Wettbewerbsfähigkeit sowie der o.a. Zugangsbeschränkungen in verschiedenen Exportmärkten wieder verstärkt auf eine Bearbeitung des weiterhin wachsenden chinesischen Marktes.

Nach persönlichen Informationen deutscher Laminatfußbodenhersteller agieren mittlerweile russische Anbieter trotz der immensen Transportkosten mit Marktpreisen $< 3 \text{ €/m}^2$ Laminat auf einem Preisniveau, das unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten selbst in modernsten westeuropäischen Produktionsstandorten nicht realisiert werden kann /Kleiner 2008/. Die Konzeption der osteuropäischen Standorte basierte seinerzeit auf der Annahme, dass sich entsprechende Vorortmärkte rasch entwickeln würden. Diese Vermutungen haben sich allerdings nicht bestätigt.

Vor dem Hintergrund weltweit vergleichbar steigender Rohstoff- und Energiekosten sowie dem relativ niedrigen Personalkostenanteil (Personalkosten betragen etwa 5 bis 8 % vom Gesamtprodukt MDF) sollte es perspektivisch trotzdem möglich sein, unter Nutzung vorhandener Fachkompetenz und Know-hows auch in westeuropäischen MDF-Werken Faserplatten auf gleichbleibendem Qualitätsniveau zu wettbewerbsfähigen Preisen herzustellen.

Sehr interessante Alternativen stellen aus Sicht des Autors neben nichttragenden MDF-Anwendungen im Feucht- bzw. Außenbereich sowie HDF-Anwendungen im Feuchtbereich insbesondere diffusionsoffene MDF oder Dämmplatten, jeweils in ausreichend feuchtebeständiger Verklebungsqualität zur Verwendung im Baubereich dar.

2.6 Bisherige Forschungsarbeiten zu Aufschlussintensivierung und leimfreien Faserplatten

Der ausgeprägte Einfluss der in Abhängigkeit von der Aufschlussintensität variierenden, wasserlöslichen Faserstoffbestandteile auf die Wasseraufnahme von im Trockenverfahren ohne Zusatz von Bindemitteln hergestellten harten Faserplatten wurde bereits 1962 nachgewiesen /Šisler, Kéda 1962/ und in Pravanec (Tschechische Republik) industriell angewendet. Dabei wurde Rotbuche bei 12 bar ($\sim 187 \text{ °C}$) aufgeschlossen, dem Faserstoff 1 bis 1,5 % Paraffin zugeführt, auf $\sim 18 \text{ %}$ Feuchtegehalt getrocknet und zu 3,2 mm dicken Faserplatten mit Rohdichten von 1150 kg/m^3 verpresst /Šwidorski 1963/. In Anbetracht von Holzart, Nenndicke und Rohdichte sowie vor dem Hintergrund des Verzichts auf Bindemittel sind die erreichten Dickenquellungswerte nach 24 h Wasserlagerung von 15,3 bis 24 % als hervorragend zu bewerten.

Asplund hatte schon 1949 den Zusammenhang zwischen dem Masseverlust des Holzes und den Aufschlussbedingungen bei der Zerfaserung erkannt /Asplund 1949/.

Šisler und Kéda /1962/ sowie Onisko /1972/ hoben hervor, dass zwischen dem Dampfdruck und der Dampfeinwirkungszeit ein enges Wechselverhältnis besteht. In Abhängigkeit von diesen beiden Parametern wurden folgende Reaktionen beobachtet:

- Umschlag der neutralen in eine saure Reaktion als Resultat der reagierenden Acetylgruppen und der Bildung von Essig- und Ameisensäure,
- Kohlenhydrathydrolyse in der Reihenfolge: Pektine – Pentosane – Hexosane – Cellulose,
- Zerreißen der Bindungen im Lignin sowie der Lignin-Kohlenhydrat-Bindungen, Entstehung von Ligninmolekülen kleinerer Molekulargewichte,
- Kondensationsreaktionen mit Produkten der Hemicellulosespaltung,
- Erhöhung des Anteils an Karboxylgruppen als Folge von Oxydationsprozessen.

Grundsätzlich ist mit einer Dampfdruckerhöhung bei Aufschluss eine verstärkte Depolymerisation der Holzpolymere verbunden, die zu einem höheren Anteil niedrigmolekularer und flüchtiger Verbindungen führt. Dabei bestimmt der gewählte Temperatur-(Druck)-Bereich maßgeblich die Reaktionsfähigkeit der Holzbestandteile und deren Hydrolyseprodukte. Die Steuerung der Dampf Temperatur im Vorwärmer setzt Kenntnisse über das Verhalten unterschiedlicher Holzarten und –bestandteile im Sattedampf voraus. Während bei Kiefernholz beispielsweise bereits ab 100 °C ein deutlicher Abbau der α -Cellulose nachweisbar ist, zeigt sich Eichenholz unter gleichen Bedingungen als sehr beständig. Erst Temperaturen größer 130 °C rufen den chemischen Abbau der α -Cellulose dieser Holzart hervor. Gleiches gilt für das Verhalten der Holocellulose.

Auch beim Lignin unterscheidet sich das Erweichungsverhalten von Laub- und Nadelhölzern. Temperaturintervalle bestimmen den thermischen Abbau dieser wohl kompliziertesten Holzsubstanz. Danach vollzieht sich im Temperaturbereich von 150 – 160 °C bei Laubhölzern und 165 – 175 °C bei Nadelhölzern eine sprunghafte Erweichung der Holzsubstanz, in deren Ergebnis eine starke Abnahme des Energiebedarfes für die Zerkleinerung registriert wird /Onisko 1972/.

Bei den Untersuchungen von Nagy /1964/ zur Herstellung beidseitig glatter, harter Faserplatten ohne Bindemittel im Trockenverfahren wurde in Abhängigkeit vom Plastifizierungsgrad der Holzfasern (definiert als Menge der wasserlöslichen Stoffe, die durch hydrothermische Holzzerlegung bei der Plastifizierung entstehen) zwischen niedrighydrolysierten (Gehalt an wasserlöslichen Stoffen bis 14 %) und hochhydrolysierten (Gehalt an wasserlöslichen Stoffen über 14 %) Holzfaserstoffen unterschieden. Als günstig erwiesen sich (relativ übereinstimmend mit den Aussagen von Onisko) für Nadelholz Aufschlusstemperaturen bis 175 °C, für Laubholz bis 165 °C. Zum Verbinden der plastifizierten Fasern zu einer Platte konnten synthetische Harze durch Wasser ersetzt werden, dessen Menge von Plastifizierungsstufe, Holzart und den Bedingungen der Plattenbildung abhing und in einem Bereich von 4 bis 24 % Feuchte liegen konnte.

Untersuchungen zum Einfluss der Aufschlusstemperatur auf die chemische Zusammensetzung der kaltwässrigen Extrakte aus Fichtenholzfaserstoff ergaben, dass eine Erhöhung der Aufschlusstemperatur insbesondere in Bereichen oberhalb von 160 °C zu einer deutlichen Zunahme der Kaltwasserextraktgehalte führte /Schneider et al. 2004/. Auch wurde ein signifikanter Anstieg des Gehaltes an Cellobiose (freier Zucker) sowie an löslichen Kohlenhydraten beobachtet, was den Schluss zulässt, dass bereits bei Temperaturen > 160 °C ein Celluloseabbau stattfindet.

Für MDF sind die Aufschlussbedingungen bei der Zerkleinerung von ausschlaggebender Bedeutung. Im IHD wurde bereits bei den im Zeitraum 1971 bis 1973 in Zusammenarbeit mit der damaligen Defibrator AB durchgeführten Untersuchungen nachgewiesen, dass die Aufschlussbedingungen bei der Zerkleinerung von wesentlicher Bedeutung sind /Kehr, Jensen 1971; Gran, Bystedt 1973; Kehr 1977/. Die Versuche ergaben, dass ein

steigender Vorwärmdruck bzw. eine verlängerte Vorwärmzeit ausgewählte physikalische Eigenschaften Harnstoff-Formaldehyd (UF)-Harz-gebundener MDF wesentlich beeinflussen. So reduzierte sich mit zunehmender Aufschlussintensivierung die Dickenquellung der Faserplatten nach Wasserlagerung signifikant. Die maximalen Aufschluss-temperaturen lagen dabei bei 190 °C.

Weitere Arbeiten des IHD zeigen, dass die Herstellung von Faserstoffen mit höheren Aufschlussdrücken und/oder längeren Aufschlusszeiten zu einer signifikanten Quellungsvergütung damit hergestellter MDF führt /Krug, Kehr 2000; 2001/ und dass derartige Faserplatten bei Verwendung geeigneter Bindemittel auch eine verbesserte Witterungsbeständigkeit beim Außeneinsatz aufweisen /Krug, Tobisch 2001/. Besonders deutlich wurde die Faservergütung durch die Aufschlussintensivierung bei der Herstellung bindemittelfreier MDF. Zur Erzeugung prüffähiger MDF waren dabei zwar Presszeitfaktoren von 60 s/mm zwingend, jedoch reduzierte sich für MDF aus 16 bar Faserstoff die Dickenquellung nach 24 h Wasserlagerung auf Werte < 10 %. Im Gegensatz dazu wiesen Platten aus industriell üblich bei 8 bar aufgeschlossenen Fasern Quellwerte im Bereich von 50 % auf. Ein Aufschluss bei 12 bar ergab Dickenquellungen im Bereich von 15 % /Krug 2001/.

Die Festlegung der Aufschlussbedingungen erfolgt in jüngerer Zeit vor allem verstärkt auf Basis energieökonomischer Erwägungen. Danach vollzieht sich im Temperaturbereich von 150 bis 160 °C bei Laubhölzern und 165 bis 180 °C bei Nadelhölzern eine sprunghafte Erweichung der Holzsubstanz, in deren Ergebnis eine drastische Abnahme des Energieaufwandes für die Zerfaserung registriert wird /Krug 2001a; Lilie, Krug 2008/.

Nachdem aktuelle Untersuchungen am IHD-Laborrefiner Zerfaserungsenergie-Einsparpotentiale von mehr als 50 % (bei Erhöhung der Aufschluss-temperatur bei der Zerfaserung von Kiefernholz von 160 auf 180 °C) aufzeigten, bestätigten Industrierversuche mit der gleichen Holzart bei einem HDF-Hersteller, dass die Erhöhung der Aufschluss-temperatur von 155 auf 175 °C eine Energieersparnis bei der Zerfaserung von mehr als 25 % nach sich zieht /Wolf 2008/. Trotz der Beschleunigung des Heißpressvorgangs (Reduktion des Presszeitfaktors) aufgrund des veränderten Verdichtungsverhaltens der höher aufgeschlossenen Faserstoffe lagen die Eigenschaften der aus diesen Kiefernholzfasern hergestellten HDF auf einem normenkonformen Niveau.

Untersuchungen zum Einfluss hoher Zerfaserungstemperaturen auf die Eigenschaften von MDF aus Laccase-behandelten Fichtenholzfasern zeigten, dass eine Zunahme der Zerfaserungstemperatur die Reaktivität der Fasern während der laccase-katalysierten Reaktion verbesserte. Ein Aufschluss bei 202 °C ergab für 12 mm dicke Platten ohne synthetische Harze die günstigsten Quell- und Festigkeitswerte /Widsten et al. 2004/. Eine Behandlung des Faserstoffs mit handelsüblicher Laccase oder einem speziellen Enzym-Malz-Gemisch ermöglichte bereits 1999 die Herstellung bindemittelfreier Faserwerkstoffe mit verbesserten Produkteigenschaften /Kühne, Dittler 1999/.

Groom et al. /2000/ untersuchten den Einfluss des Aufschlussdruckes bei der Faserstoffherstellung aus Kiefern-Kern- und -Splintholz (*pinus taeda* L.) im Hinblick auf resultierende Faserstoff- (vor allem Benetzungsverhalten mit UF-Harz) und MDF-Eigenschaften. Bei einheitlicher Aufschlusszeit von 4 min wurde der Aufschlussdruck in den Stufen 4, 8 und 12 bar variiert. Die Fasern, die bei 8 bar aufgeschlossen wurden, wiesen die größten mittleren Faserlängen auf. Eigenschaftsprüfungen an aus den Faserstoffen hergestellten UF-Harz-gebundenen MDF zeigten erwartungsgemäß die höchsten Biegefestigkeiten bei Verwendung der 8 bar-Faserstoff-Varianten aus Kiefern-

Kernholz. Interessanterweise ergaben sich für Platten aus 12 bar-Faserstoffen die höchsten Querkzugfestigkeiten.

In späteren Arbeiten wurde der Druckbereich beim Aufschluss bis auf 18 bar erweitert /Groom et al. 2002/. Grundsätzlich beeinflusste der Aufschlussdruck bei der Herstellung des Faserstoff signifikant die Elastizität und die Festigkeit daraus hergestellter Faserplatten. Hinsichtlich minimaler Feinanteile und Länge/Schlankheitsgrad der Fasern lag das Optimum für den Aufschlussdruck zwischen 7,7 und 8,1 bar.

Aufschlussdrücke von 12 bar und mehr bedingen i. d. R. eine dunklere Farbe der Faserstoffe. Die 18 bar-Varianten wiesen die höchsten Feinanteile und eine dunkelbraune Färbung auf, was hauptsächlich auf das bei solch hohen Aufschlusstemperaturen (> 200 °C) in den Holzfasern verbleibende Lignin bei gleichzeitig herausgelösten Hemicellulosen zurückzuführen ist /Groom et al. 2004/. Spezielle Untersuchungen an Faserstoffen aus dem Kernholz einer 54 alten Kiefer (*pinus taeda* L.) zeigten für Holzfasern, die bei 2 bis 4 bar aufgeschlossen wurden, Nanorisse im Bereich von 50 nm. Bei Aufschlussdrücken von 6 bis 12 bar traten in den Fasern Mikrorisse > 5 µm auf. Drücke von 14 bis 18 bar schädigten weniger die Faseroberfläche als vielmehr die Schichten im Bereich des Lumens /Cheng et al. 2008/.

Die im Rahmen einer Wiederverwendbarkeit von Altholz für die MDF-Herstellung als Referenz an frischem Kiefernholz durchgeführten Untersuchungen bestätigten, dass höhere Aufschlussdrücke niedrigere Quellungswerte und schlechtere elasto-mechanischen Eigenschaften der Platten nach sich ziehen /Erbreich 2004/. Die geringeren Festigkeiten werden auf vermehrte Kondensationsreaktionen des Lignins an der Faseroberfläche und daraus folgend einer verschlechterten Faser-Klebstoff-Bindung zurückgeführt. Im Unterschied zu den Ergebnissen der Arbeiten von Groom et al. /2002/ sowie Krug und Kehr /2001/ wurde bei höheren Aufschlussgraden größere mittlere Faserlängen festgestellt /Erbreich 2004/.

Bei den Versuchen von Roffael et al. und Schneider et al. kamen Aufschlusstemperaturen von 140 bis 180 °C zur Anwendung /Roffael et al. 1994, 1995, 2001, 2005b; Schneider et al. 2000/. Als Bindemittel für die MDF-Herstellung setzten Roffael et al. melaminverstärkte UF-Harze und polymere Diphenylmethan-4,4-Diisocyanat (PMDI)-Klebstoffe ein, während bei Schneider et al. UF-Harze verwendet wurden. Die Ergebnisse zeigten für MDF aus Faserstoffen, die thermo-mechanisch (TMP) oder durch Zusatz von Na₂SO₃ bzw. NaOH chemo-thermo-mechanisch (CTMP) aufgeschlossen wurden, bei der höchsten Faserstoffaufschluss-Temperatur von 180 °C die geringsten Dickenquellungswerte. In späteren Arbeiten zeigte sich zudem, dass bindemittelfreie MDF aus chemo-thermo-mechanisch (CTMP mit 0,5 % NaOH und 1 % Na₂SO₃) bei 170 °C aufgeschlossenem Kiefernholz-Faserstoff deutlich geringere Formaldehydemissionen gegenüber Platten aus ausschließlich thermo-mechanisch (TMP) aufgeschlossenem Faserstoff aufwiesen /Roffael et al. 2007/.

Nach intensiver Kochung über 2 bis 10 min bei 180 bis 240 °C erfolgte die Zerfaserung von Pappelholz (*populus tremula* L.) mittels Dampfexplosion /Josefsson et al. 2002/. Das explodierte Material bestand im wesentlichen aus Cellulose, Hemicellulose und abgebauten Polysacchariden, die sich nach Klasonligninanalyse und Messung der Kapazahl als Lignin erwiesen.

Xing et al. untersuchten /2006/ den Einfluss der thermomechanischen Aufschlussbedingungen im Refiner (Dampfdruck 6 bis 12 bar, Verweilzeit 3 bis 7 min) auf die Eigenschaften von MDF aus Schwarzfichtenholz. Hohe Dampfdrücke von 12 bar (~ 187 °C) beeinflussten Dickenquellung, Wasseraufnahme und Längenausdehnung überaus posi-

tiv. Lange Verweilzeiten im Kocher zogen eine signifikante Erhöhung der Querkzugfestigkeiten nach sich, während die Biegeeigenschaften erwartungsgemäß eher nachteilig auf intensivere Aufschlussbedingungen reagierten.

Bei Untersuchungen zum Benetzungsverhalten von Prüfblättern aus Faserstoffen wurde für Prüfblätter aus Kiefernkerneholz mit Erhöhung der Aufschlusstemperatur von 150 auf 180 °C eine drastische Abnahme der Benetzbarkeit festgestellt. Im Unterschied dazu beeinflusste die Aufschlusstemperatur die Benetzbarkeit der Prüfblätter aus Kiefern-splintholz kaum /*Schneider et al. 2007*/. Das Benetzungsverhalten von Prüfblättern aus bei 180 °C nach dem TMP-Verfahren aufgeschlossenen Faserstoffen war im Vergleich zum CTMP-Verfahren schlechter. Dies ist einerseits mit dem höheren Gehalt hydrophober Extraktstoffe beim TMP-Faserstoff und zu anderen durch das dem CTMP anhaftende hydrophile Alkali zu begründen.

Die Modifikation des Faserstoffs durch Xylanase-/Cellulase-Komplexe führte bei Enzymdosierungen von 3 bis 7 % und Inkubationszeiten von wenigen Minuten zu bindemittelfreien MDF, deren Eigenschaften den Vorgaben nach DIN EN 622-5 entsprechen /*Unbehaun et al. 2005*/. Bereits 1993 wurde ausführlich über Möglichkeiten einer enzymatischen Behandlung von Holzfasern zur Herstellung leimfreier Faserplatten berichtet /*Hüttermann, Kharazipour 1993*/.

Leimfreie 3 mm dicke Faserplatten hoher Dichte ($\sim 1100 \text{ kg/m}^3$) aus nach dem Masonite-Verfahren (Dampfexplosion) aufgeschlossenem Chinaschilf (*Miscanthus sinensis* L.) wiesen in Abhängigkeit von den Aufschluss- und Pressbedingungen zum Teil exzellente physikalische Kennwerte auf. Vorteilhaft waren insbesondere hohe Vorbehandlungstemperaturen im Kocher und lange Presszeiten von bis zu 18,4 min /*Velásquez et al. 2003; Salvadó et al. 2003*/. Bei den Untersuchungen von *Xu et al. /2006/* wurde Kenaf (*Hibiscus cannabinus* L.) bei 4 bis 8 bar Dampfdruck und extrem langen Kochzeiten (10 bis 30 min) aufgeschlossen. Die intensivsten Aufschlussbedingungen führten im Ergebnis bei der Herstellung bindemittelfreier Faserplatten aus Kenaf zu den höchsten Festigkeits- und niedrigsten Quellwerten. Nach einer Alterung über einen speziellen Kochwechsellast⁴³ sowie nach 12 Monaten Freilandbewitterung ergaben sich für bindemittelfreie MDF aus bei 200 °C verpresstem Kenaf im Vergleich zu kommerziellen MDF (Nadelholz mit Bindemittel) bessere Querkzugfestigkeits- und drastisch reduzierte Dickenquellungswerte /*Okuda, Sato 2007; 2008*/.

Untersuchungen zur Aktivierung fasereigener Bindekräfte von /*Lehnen et al. 2000*/ ergaben, dass die Behandlung von Fichtenholzfasern im Hochkonsistenzbereich mit zunehmender Ozon-Einsatzmenge zur Verbesserung der Querkzugfestigkeit und des Quellverhaltens damit gefertigter MDF führt. Die Herstellung prüffähiger Platten erforderte allerdings Presszeitfaktoren von bis 60 s/mm.

1997 berichtete ein spanischer Holzwerkstoffhersteller von der Herstellung leimfreier Faserplatten aus Eukalyptusholz mit Rohdichten von 950 kg/m^3 als Trägerwerkstoff für Laminatböden /*N. N. 1997*/.

Eine Gammabestrahlung von Kiefern- oder Birkenholz-Hackschnitzeln wirkte sich vorteilhaft auf den Energiebedarf beim Faserstoffaufschluss aus. Ein Einfluss der Bestrahlungsdosis auf die Scherfestigkeit oder die Dickenquellung nach Wasserlagerung von leimfreien, harten Faserplatten nach dem Nassverfahren wurde aber nicht festgestellt /*Pecina, Krauss 1987*/.

⁴³ 4 h Kochen, Kühlen in 20 ° C temperierten Wasser, Trocknung bei 70 ° C (Building Standard Law – Bauregelwerk, Japan, Mitteilung 1539 vom Oktober 2001)

Mit bindemittelfreien Deckschichten aus nach dem Masonite-Verfahren hergestellten Laubholzfaserstoffen konnten 9,5 mm dicke dreischichtige MDF (Mittelschicht aus Nadel- bzw. Laubholz mit 9 % Festharzanteil) bei Presszeitfaktoren von 24 s/mm mit guter Dimensionsstabilität bei wechselnder relativer Luftfeuchte hergestellt werden /Suchsland et al. 1986/.

Während des Aufschlusses im Kocher und Refiner erfährt das Holz infolge Thermohydrolyse einen chemischen Teilabbau in den Hauptbestandteilen (Hemicellulosen, Cellulose, Lignin), die zur Bildung von Formaldehyd und weiteren flüchtigen organischen Verbindungen (VOC⁴⁴) führt, die während der Fasertrocknung und aus den Werkstoffen teilweise emittiert werden. Die chemische Zusammensetzung der VOC sowie ihre mengenmäßigen Anteile werden von der Holzart (Laub- und Nadelhölzer), dem Aufschlussverfahren (thermomechanisch oder chemo-thermomechanisch), den Aufschlussbedingungen (Temperatur/Druck, Dauer) und dem Bindemittel beeinflusst.

Die Hemicellulosen der Laubhölzer bestehen größtenteils aus Xylanen, die über einen relativ großen Acetylgruppengehalt verfügen. Demgegenüber sind in Nadelhölzern die schwach acetylierten Galactoglucomannane dominant /Timell 1957/. Während der Thermohydrolyse werden aus den Hemicellulosen Acetylgruppen abgespalten, die in Abhängigkeit von Holzart und Hydrolysebedingungen zur Bildung unterschiedlicher Essigsäuremengen führen. Ameisensäure wird infolge der Hydrolyse in Spuren freigesetzt /Plath, Plath 1955/. Aus den Hydrolyseprodukten der Hemicellulose bilden sich durch Folgereaktionen weitere dampfflüchtige Verbindungen wie Furfural (aus Pentosen) und Hydroxymethylfurfural (aus Hexosen).

Die Cellulose ist gegenüber den Hemicellulosen relativ hydrolyseresistent, kann aber bei hohen Temperaturen der Hydrolyse unterliegen und zur Bildung von monomeren Zuckern und deren Folgeprodukten führen /Kollmann, Fengel 1965/.

Das Lignin kann durch eine Thermohydrolyse des Holzes gleichfalls Veränderungen erfahren, es können flüchtige organische Verbindungen (z. B. Formaldehyd) gebildet werden /Marutzky, Roffael 1977/. Es ist weiterhin bekannt, dass aus den Holzinhaltsstoffen flüchtige Bestandteile (z. B. Monomere) entweichen und dass aus den Fetten (Triglyceride) und ungesättigten Fettsäuren durch Oxidation Aldehyde wie Pentanal und Hexanal entstehen können /Back 2000/.

Bei einem Einsatz von Holzwerkstoffen in Innenräumen kommt den VOC-Emissionen und Verfahren zu ihrer Verminderung eine zunehmende Bedeutung zu. Verschiedene Forschungsarbeiten (u. a. zum chemo-thermomechanischen Aufschluss unter Einsatz spezieller Chemikalien, z. B. von Roffael et al. 2007) zeigen dabei erste Wege zur Minimierung auf, eine nachhaltige Umsetzung in den Industriemaßstab steht aus.

2.7 Patente zum Faserstoffaufschluss bei der MDF-Herstellung

Aus der Literatur hinlänglich bekannt ist das so genannte Masonverfahren (Dampfexplosionszerfaserung), das in der Vergangenheit insbesondere in den USA und auch in einigen anderen Ländern zur Herstellung von Faserplatten nach dem Nassverfahren genutzt wurde /US 2303345/. Eine wesentliche Lehre des Mason-Verfahrens besteht in der Nutzung der natürlichen Holzbestandteile für die Verklebung, d. h. die Herstellung von Faserplatten ohne Zugabe von Bindemitteln. Durch die Einwirkung hoher Temperaturen von 200 °C verbunden mit der extrem langen Reaktionszeit von 35 min (und einer

⁴⁴ VOC = volatile organic compounds (flüchtige organische Bestandteile)

kurzzeitigen Erhöhung der Temperatur auf 285 °C über eine Dauer von 10 Sekunden) entsteht ein mit Hydrolyseprodukten angereicherter Faserstoff. Dieser kann zwar für die Herstellung von Faserplatten mit niedriger Quellung nach dem Nassverfahren zum Einsatz kommen, ist jedoch für die MDF-Herstellung nach dem Trockenverfahren wegen der erheblichen Verschiebung des pH-Wertes sowie der Pufferkapazität und einer infolge der extremen Temperaturbelastung einhergehenden „Verhornung“ des Faserstoffes ungeeignet.

Bei der MDF-Technologie hat, wiederum im Gegensatz zum Nassverfahren bzw. zur Herstellung zweiseitig glatter harter Faserplatten, das Härtings- und Abbindeverhalten der Klebstoffe mit den Wechselwirkungen zwischen Holzfasernstoff und Klebstoff eine immense Bedeutung. Die o. g. Besonderheiten des Mason- Verfahrens würden bei der Herstellung von Faserplatten mittlerer Dichte zu negativen Auswirkungen auf die Eigenschaften der Platten und zu einer unzureichenden Qualität außerhalb der gültigen Normen führen.

Das ist auch der wesentliche Grund dafür, dass weltweit in den MDF-Werken das Mason-Verfahren nicht zu Anwendung gekommen ist. Es kommt hinzu, dass die extrem lange, intensive Vorbehandlung zu einem energetisch unwirtschaftlichen Aufschluss des Faserstoffes führt und weiterhin mit erheblichen Substanz- und Ausbeuteverlusten des Holzes einhergeht. In der Literatur werden Substanzverluste von ca. 15 bis zu 30 % angegeben.

Shen entwickelte und patentierte Mitte der 1980-er Jahre einen Dampf-Explosionsprozess als Vorbehandlung lignocellulosehaltiger Rohstoffe bei der Herstellung leimfreier Faserplatten /US 5017319; WO 03/092972/. Der besondere Vorteil dieses Verfahrens (Bagassemethode und Dampfdruckverfahren) ist in dem Verzicht auf Binde- und Hydrophobierungsmittel zu sehen. Aufgrund der chemischen Umwandlung der Hemicellulose während des Verfahrens soll sich eine gegenüber Wasser hydrophob wirkende, äußerst dimensionsstabile Polymersubstanz ausbilden, die sogar eine Außenverwendung der leimfreien Platten in Aussicht stellt. Dazu wurde jedoch nie der praktische Nachweis über Bewitterungsprüfungen erbracht. Nach diesem Verfahren (jedoch unter Zusatz eines Novolak-„Verstärkers“) produzierte ein MDF-Hersteller Ende der 1990-er Jahre Dünn-HDF hoher mittlerer Rohdichte (~ 1400 kg/m³) mit sehr gleichmäßigem Dichteverlauf senkrecht zur Plattenebene in Nenndicken von 5 bis 8 mm für die Verwendung als Fassadenelemente mit exzellenter Verklebungsqualität.

Für die Herstellung von Holzfasernwerkstoffen wurde mit dem Ziel, auf den Einsatz von Bindemitteln zumindest teilweise zu verzichten und fasereigene Bindestärken zu nutzen, die Vorbehandlung der Hackschnitzel vor der Zerkleinerung mit Chemikalien, vorzugsweise Natriumsulfit (Na₂SO₃), Natriumperoxid (Na₂O₂) oder Ätznatron (NaOH) unter Temperaturen von 110 bis 150 °C vorgeschlagen /DD 242193/.

Der Aufschluss des Holzes für die Herstellung von Fasern nach dem CTMP (chemo-thermo-mechanical pulp)-Verfahren unter Zusatz von Na₂SO₃ oder NaOH oder in Kombination bei Anwendung verschiedenartiger Bindemittel ist bekannt /EP 0639434, DE 4327774/. Dadurch wird jedoch keine Quellungsvergütung (speziell keine Reduzierung der Dickenquellung nach Wasserlagerung) erreicht.

Bei der Herstellung von MDF aus trocken beleimten Faserstoffen wirkte sich insbesondere beim CTMP-Aufschluss eine Erhöhung der Trocknungstemperatur von 150 auf 170 °C positiv auf die Reduzierung der Dickenquellung der hergestellten Platten aus. Die Quellwerte reduzierten sich im Mittel von 20 % auf unter 10 % nach 24 h Wasserlagerung /DE 19858079/. Im Unterschied zum üblichen Stand der Technik erfolgte die Faserstofftrocknung vor der Beleimung.

Der Einsatz von Na_2SO_3 oder Natriumhydrogensulfit (NaHSO_3) bei der Zerfaserung dient dem Ziel, den Energieverbrauch bei der Zerfaserung und die Formaldehydabgabe der Faserplatten zu senken /WO 93/25358/.

Polyisocyanat-Bindemittel werden bei der MDF-Herstellung seit Jahren industriell genutzt /EP 092699, DE 4122842/. Die nach diesem Verfahren hergestellten Faserplatten weisen zwar im Vergleich zu anderen Bindemitteln reduzierte Dickenquellungen auf, sie genügen jedoch nicht den Anforderungen an eine dauerhafte Quellungsvergütung.

Es ist weiterhin bekannt, dass die Herstellung von Faserplatten unter Verwendung von Polyurethan als Bindemittel erfolgt /EP 0646057/. Danach werden die Fasern in einem eine Gesamtrohdichte von etwa 550 bis 650 kg/m^3 ergebenden Anteil und das Bindemittel mit 0,5 bis 4,0 Gew.-% eingesetzt und der beim Aufheizen gebildete Wasserdampf ohne Vorabscheidung durch den Trockner geführt und dabei zur Bildung einer die Vorreaktion des Bindemittels behindernden Umhüllung aus Polyharnstoff genutzt. Die so erzeugten Faserplatten weisen allerdings bereits nach 2 h Wasserlagerung erhebliche Quellungswerte von 3,2 bis 4,0 % auf und erreichen somit keine dauerhafte Quellungsvergütung.

EP 1323509 kennzeichnet ein Verfahren, nach dem die Hackschnitzel bei hoher Temperatur im Kocher (190 bis 230 °C, Dampfdruck 12 bis 16 bar) und langen Verweilzeiten (> 3 min) thermisch vorbehandelt werden. In der Folge bilden sich aus den Hemicellulosen verklebbare Substanzen, das Lignin an der Faseroberfläche wird aktiviert und es entsteht ein sehr gut aufgeschlossener Faserstoff (ohne Grob-Faserbündel-Anteile), der nach der Heißpressung eine geschlossene Plattenoberfläche gewährleistet. Förderlich auf die Verklebung wirkt sich die Zugabe von Säure in den Kocher zur Oberflächenaktivierung der Fasern aus. Bei der Beleimung kann dann ein Formaldehydvernetzer zugegeben werden, der mit den gebildeten verklebbaren Substanzen Reaktionen eingeht und damit zur Klebstoffreduktion (von 10 auf 5 % Festharz) beiträgt.

3 Arbeitshypothesen und Lösungsweg

Aufbauend auf der Zielstellung der Arbeit und in Auswertung des intensiven Studiums des bisherigen Wissensstandes wurden die Vorgehensweise und Methodik der eigenen Untersuchungen geplant. Die Auseinandersetzung mit dem Stand der Wissenschaft und Technik zeigte folgende Mängel:

- Bisher liegen keine quantitativ gesicherten Erkenntnisse zum Einfluss intensivierter Aufschluss-/Kocherbedingungen (Vorwärmdrücke ≥ 12 bar, ~ 188 °C und/oder verlängerten Vorwärmzeiten ≥ 4 min) bei der Faserstoffherstellung auf die folgenden Prozessschritte der MDF-Herstellung (u. a. Beleimung in Blowline oder Blender, Faserservliesbildungs-, Verdichtungs- und Entdampfungsverhalten, Heißpressen) sowie auf die Feuchte-, Hydrolyse- und Witterungsbeständigkeit von MDF aus solcherart hergestellten Faserstoffen mit erhöhter Feuchtebeständigkeit der Verklebung vor.
- Im Unterschied zu den langjährigen Erfahrungen bei der Herstellung feuchtebeständig gebundener Spanplatten (z. B. PF-Harz- oder PMDI-gebundene P3/P5/P7-Platten nach EN 312) werden MDF mit ausgewiesener, höherer Feuchtebeständigkeit nur in geringem Umfang hergestellt. Im Ergebnis liegen nur sehr wenige Erfahrungen zur Eignung von Klebstoffen, die von ihren Leistungsparametern eine hohe Feuchtebeständigkeit der Verklebung gewährleisten (u. a. PF-, MUF-, MUPF-Harze sowie PMDI) sollten, im Hinblick auf dauerhafte Feuchte- und Witterungsbeständigkeit von MDF vor. Aus diesem Grund ist die Herstellung von MDF in feuchtebeständiger Verklebungsqualität noch nicht europäischer Stand der Technik. Erfahrungen zu Quellwerten und Dimensionsstabilität von HDF bei langjährigem Einsatz (≥ 5 Jahre) als Träger für Laminatböden zeigen, dass die durch Einsatz synthetischer Bindemittel mit maximalen Festharzdosierungen bzw. durch Hydrophobierung erreichten Ergebnisse nicht ausreichen. Als besonders kritisch sind dabei neben den Randaufquellungen die Öffnungen der Längs- und Quertugen bei formschlüssigen, leimfreien Klickverbindungen anzusehen, die sich auch durch eine Imprägnierung der Schmalflächen nur bedingt einschränken lassen.
- Systematische Ergebnisse zur Veränderung von Querzugfestigkeit und Dickenquellung von Faserplatten mit feuchtebeständiger Verklebung durch Klimawechsel sind nicht bekannt. Prinzipielles Problem aller Testmethoden zum Nachweis der Feuchtebeständigkeit ist, dass sie Aussagen zur Feuchtebeständigkeit der Verleimung liefern, von Herstellern und Anwendern in Ermanglung von Alternativen jedoch zur Bewertung der Feuchtebeständigkeit des gesamten Werkstoffs genutzt werden.
- MDF aus intensiv (bei Drücken bis 16 bar) aufgeschlossenen Faserstoffen und Verwendung geeigneter Bindemittel (z. B. PF-Harz oder PMDI) wiesen eine Witterungsbeständigkeit nach technischer oder natürlicher Alterung auf. Im Widerspruch zu den zahlreichen Untersuchungen an Spanplatten gelang es bislang nicht, für MDF quantitativ zufriedenstellende Korrelationen zwischen einer zeitraffenden technischen Alterung (z. B. Kurzzeitwitterung im Xenotest-Gerät) und einer mehrjährigen Bewitterung im Freiland zu ermitteln.
- Zu den Auswirkungen des Einsatzes von MDF-Bauelementen im Feucht- oder Außenbereich auf die physikalisch-mechanischen Eigenschaften des MDF-Trägermaterials fehlen gesicherte Erkenntnisse.
- Es gibt keine europäischen normativen Vorgaben für Faserplatten zur Verwendung im Außenbereich. Entsprechenden Anforderungen finden sich für den Plattentyp MDF Exterior (MDF.E) ausschließlich in der nicht mehr gültigen EMB-Industrienorm.

Weitere Exterior-Vorgaben finden sich auch in produktspezifischen Datenblättern verschiedener Hersteller, die MDF für den Außenbereich anbieten. Diese Hersteller setzen grundsätzlich für alle Kennwerte höhere Anforderungskriterien voraus. Beispielsweise werden gegenüber den Vorgaben für MDF.H bzw. MDF.HLS nach DIN EN 622-5 für die Querkzugfestigkeit mindestens doppelt so hohe - und im Falle der Dickenquellung nahezu auf ein Drittel reduzierte - Werte vorgeschrieben. Widersprüchlich ist, dass sich die Vorgaben für Biegefestigkeit und Biege-E-Modul von MDF.E nach der EMB-Norm und MDF.HLS nach DIN EN 622-5 gleichen, obwohl die Exterior-MDF für allgemeine Verwendungszwecke, die HLS-MDF hingegen für tragende Verwendungszwecke ausgewiesen ist.

- Trotz der immensen Bedeutung energieökonomischer Betrachtungen liegen keine systematischen Untersuchungsergebnisse zum möglichen Einsparpotential an Elektroenergie bei der Zerfaserung durch intensivierete Aufschlussbedingungen vor. *Asplund /1939/* hatte festgestellt, dass der Kraftbedarf für die Nadelholzerfaserung insbesondere bei Aufschlusstemperaturen von 160 °C sinkt (vgl. Abbildung 2).
- Zum Thema Materialausbeute- und Verlustbetrachtungen bei der Faserstoffherstellung wurden gleichfalls ausschließlich die relativ lang zurückliegende Untersuchungen von *Asplund /1949/* gefunden. Dessen Versuche zu Materialverlusten infolge intensiver Aufschlussbedingungen bei der Zerfaserung von Kiefernholzhackschnitzeln zeigen, dass bei 9 bar Dampfdruck und einer Erhitzungszeit von 4 min der Gewichtsverlust 8 % beträgt, vgl. Abbildung 3. Bei gleichem Dampfdruck und einer Erhitzungszeit von 8 min lag der Verlust dann bereits bei 13 %.

Unter Berücksichtigung der Zielstellung der Arbeit (vgl. 1.2 Zielstellung der Arbeit) und den aufgezeigten Mängeln aus dem Stand der Wissenschaft und Technik lassen sich mehrere essentielle Arbeitshypothesen ableiten:

1. Die thermomechanische Aufschlussintensivierung bei der Faserstoffherstellung beeinflusst wesentliche morphologische und chemische Faserstoffeigenschaften.
2. Zusätzliche Energieaufwendungen zur Erzeugung hoher Drücke/Temperaturen reduzieren durch einen zunehmenden Plastifizierungsgrad der Hackschnitzeln den Aufwand an Elektroenergie für die Zerfaserung.
3. Die erzielbare Faserstoffausbeute sinkt mit zunehmender Aufschlussverschärfung maßgeblich.
4. Der Grad der Aufschlussintensivierung (Aufschlussgrad) beeinflusst signifikant die Eigenschaften von MDF mit und ohne Bindemittel. Thermomechanisch induzierte höhere Aufschlussgrade führen zu Faserstoffen, aus denen Faserplatten mit verminderter Neigung zur Quellung, besserer Dimensionsstabilität, ungünstigeren Biegeelastizitäten und geringen Formaldehydemissionen hergestellt werden können.
5. Bei Feuchtebelastungen des Werkstoffs entstehen Querdruck- und Querkzugspannungen, die die Leimbrücken belasten. Die mit Aufschlussverschärfung einhergehende Reduzierung des Quell-/Schwindverhaltens der Faserstoffe führt im Ergebnis zu geringen Querdruck- und Querkzug-Belastungen der Klebstoffbrücken und damit zu besseren Festigkeitseigenschaften nach Prüfungen zur Feuchtebeständigkeit der Verleimung (z. B. Kochprüfung oder Zyklustest).
6. Der Aufschlussgrad sowie Art und Anteil des eingesetzten Bindemittels beeinflussen die MDF-Eigenschaften sowohl vor als auch nach der Bewitterung.

7. Die physikalischen Eigenschaften der MDF im Ausgangszustand (Kurzzeiteigenschaften) erlauben Rückschlüsse auf eine spätere Feuchte- und/oder Witterungsbeständigkeit des Werkstoffs.
8. Die Platteneigenschaften nach technischer Alterung im Xenotest-Gerät ermöglichen Prognosen über eine spätere Witterungsbeständigkeit und korrelieren mit den tatsächlich bestimmten Eigenschaften nach natürlicher Alterung im Freien.

Schlussfolgernd für den Lösungsweg zur Arbeit gilt, dass die eigenen Aufschlussuntersuchungen grundsätzlich unter Verwendung von Kiefernholz erfolgen sollen. Zwar werden perspektivisch infolge des Waldumbaus im stärkeren Maße Laubholzsortimente zur MDF-Herstellung Anwendung finden und neuere Untersuchungen bestätigen auch, dass aus sortenreinen Laubholzsortimenten sowohl MDF als auch HDF mit normenkonformen Produkteigenschaften wirtschaftlich gefertigt werden können. Die Festlegung auf Kiefernholz begründet sich insbesondere mit der Tatsache, dass diese Holzart mit mehr als 80 % Anteil immer noch Hauptholzart der europäischen MDF-Industrie ist.

Als Bindemittel sollen neben PMDI vor allem MUF-, MUPF- und PF-Harze in jeweils hohen Dosierungen Einsatz finden, die eine gute Feuchte- und Hydrolysebeständigkeit der Verklebung in Aussicht stellen. Die besten diesbezüglichen Ergebnisse werden für PMDI-gebundene MDF erwartet. Weitere Grundlage für die Herstellung der quellungsmodifizierten MDF bildet die Verwendung spezieller Holzfasern, die unter intensivierte Aufschlussbedingungen mit gezieltem Überschreiten industrieüblicher Zerfaserungsparameter hergestellt werden. Durch Dampfdrücke im Kocher bis max. 16 bar (entspricht einer Temperatur von etwa 200 °C) und eine Verlängerung der Verweilzeit bis 8 min soll eine intensivere hydrothermische Vorbehandlung der Hackschnitzel vor der Faserstoff-Herstellung erreicht werden.

Es wird vermutet, dass die mit einer Aufschlussintensivierung bei der Faserstoffherstellung einhergehende Reduzierung des Quell- und Schwindverhaltens der Fasern im Ergebnis zu geringeren Querdruck- und Querkraft-Belastungen der Leimbrücken und damit zu besseren Festigkeits- und Quellungseigenschaften z. B. nach Zyklus- oder Kochtest führen wird. Im Ergebnis könnten mit solcherart modifizierten Faserstoffen auch unter Verwendung von MUF-, MUPF- oder PF-Harzen MDF mit hoher Feuchtebeständigkeit hergestellt werden.

Wesentliche Aufgabe der sich an den Kocherprozess anschließenden Zerfaserung ist es, die zusammenbindende Wirkung der Mittellamelle – die die höchste Konzentration an Lignin aufweist und die Fasern miteinander verbindet – aufzubrechen und einzelne Fasern aus dem Faserverband des Ausgangsmaterials herauszulösen. Diese Auftrennung soll nach Möglichkeit die nativen Ausprägungen der Faser nicht beeinträchtigen, um die naturgegebenen mechanischen Fasereigenschaften in den Holzfaserverwerkstoff zu übertragen. Höhere Aufschluss Temperaturen und/oder längere Verweilzeiten im Kocher lassen eine intensivere Plastifizierung des lignocellulosehaltigen Ausgangsmaterials erwarten, aus der infolge einer besseren Auflockerung der Mittellamelle eine homogenere Faserqualität resultiert. Die mit der Aufschlussverschärfung einhergehende Beeinträchtigung der Biegeeigenschaften sowie eine Reduzierung der Holzausbeute und ein höherer Wärmeenergiebedarf für die Dampferzeugung werden akzeptiert. Vorteilhafterweise sollte sich parallel dazu durch die stärkere Plastifizierung der Hackschnitzel eine merkliche Reduzierung des Bedarfs an Elektroenergie bei der Zerfaserung ergeben.

Schwerpunkt bilden Untersuchungen zur Herstellung von MDF mit hoher Feuchte- und Witterungsbeständigkeit. Dabei sollen Abhängigkeiten der Feuchte- und Witterungsbeständigkeit von technologischen und stofflichen Parametern bei der labortechnischen MDF-Fertigung abgeleitet werden. Als maßgebende Größen für die Erhöhung der Feuchtebeständigkeit der Verklebung werden neben der Dickenquellung nach Wasserlagerung insbesondere die Dickenquellung nach Zyklustest sowie die Querkzugfestigkeit nach Kochprüfung angesehen.

Der Nachweis der Witterungsbeständigkeit der Platten erfolgt über die Prüfung ausgewählter MDF-Eigenschaften nach technischer und natürlicher Alterung. Dabei werden nach Auslagerung der unbeschichteten, schmalflächenversiegelten MDF ins Freiland zu definierten Zeitpunkten Proben für die physikalischen Eigenschaftsprüfungen (u. a. Bestimmung der Veränderung von Querkzug-, Biege- und Quellungswerten) entnommen. Die Auswertung beinhaltet neben der Diskussion der absoluten Ergebnisse auch den prozentualen Bezug der ermittelten Kennwerte auf die Ausgangseigenschaften.

Die konsequente Auseinandersetzung mit den Arbeitshypothesen legt folgenden Lösungsweg nahe:

1. Festlegung der Versuchsmethodik für eigene Untersuchungen.
2. Materialauswahl und labortechnische Zerfaserungsversuche unter Variation der Aufschlussbedingungen von „industrieeüblichen“ 8 bar Kocherdruck und 4 min Kocherverweilzeit bis zu „verschärften“ 16 bar Kocherdruck und 8 min Kocherverweilzeit.
3. Charakterisierung der Faserstoffe bezüglich der morphologischen, anatomischen und chemischen Eigenschaften sowie Bestimmung der wesentlichen Holzbestandteile, vergleichende Einbeziehung von Industriefaserstoffen.
4. Bestimmen ausgewählter Eigenschaften nass gebildeter Prüfblätter sowie Ermittlung von Energiebedarf und Ausbeute bei der Faserstoffherstellung.
5. Einsatz der unterschiedlich intensiv aufgeschlossenen Faserstoffe zur labortechnischen Herstellung von MDF und HDF ohne Zusatz von Bindemitteln oder anderen Additiven sowie Prüfung und Bewertung ausgewählter Werkstoffeigenschaften.
6. Einsatz der unterschiedlich intensiv aufgeschlossenen Faserstoffe zur labortechnischen Herstellung von MDF mit UF-, PF-, MUF-, MUPF-Harzen sowie PMDI, jeweils unter Variation des Bindemittelanteils.
7. Untersuchung industriell hergestellter MDF mit herstellerseitig ausgewiesener hoher Feuchtebeständigkeit der Verklebung, aber normalem Aufschlussgrad.
8. Prüfen der labortechnisch und industriell erzeugten MDF hinsichtlich der chemischen und physikalischen Eigenschaften, der Feuchtebeständigkeit der Verklebung und der Witterungsbeständigkeit nach technischer und natürlicher Alterung.
9. Diskussion der Ergebnisse unter Rückgriff auf normative Vorgaben, vorhandenes Wissen aus dem Stand der Wissenschaft und Technik sowie auf die eingangs aufgestellten Arbeitshypothesen.
10. Herausarbeiten von Zusammenhängen, Zusammenfassung, Schlussfolgerungen und Bedeutung der Forschungsergebnisse für die weitere Forschung und Praxis.

4 Eigene Untersuchungen - Material und Methode

Die folgenden Ausführungen beginnen mit den Aussagen zu den eingesetzten Versuchsmaterialien. Ausgehend vom Rundholz werden gemäß den technologisch notwendigen Prozessschritten die Hackschnitzel sowie die unterschiedlich intensiv aufgeschlossenen Faserstoffe inkl. der zugehörigen Versuchsanlagen vorgestellt. An den Überblick zu den eingesetzten Bindemitteln und Additiven schließen sich Ausführungen zu den industriell hergestellten MDF mit erhöhter Feuchtebeständigkeit an, die als Vergleichsbasis für die Untersuchungen einbezogen wurden.

Unter Methodik folgen Erklärungen zur Charakterisierung der Faserstoffe bezüglich der morphologischen, anatomischen und chemischen Eigenschaften sowie zur Bestimmung wesentlicher Holzbestandteile. Weiterhin werden die Bestimmung ausgewählter Eigenschaften nass gebildeter Prüfblätter sowie die Ermittlung des Energiebedarfs und der Ausbeute bei der Herstellung der unterschiedlichen Faserstoffe beschrieben.

Abschließend erfolgt die Beschreibung der labortechnischen sowie der industriellen MDF-Herstellung einschließlich der Bestimmung der wesentlichen chemischen und physikalischen Platteneigenschaften, der Qualität der Verklebung und der Witterungsbeständigkeit der Werkstoffe.

4.1 Faserstoff

Ausgangsmaterial für die Laborversuche war Holz aus einem (nachhaltig verfügbaren) 35- bis 45-jährigen Kiefernbestand (*Pinus sylvestris* L.), das im Frühjahr eingeschlagen, entrindet und zu Hackschnitzeln aufbereitet wurde. Der Feuchtegehalt der Hackschnitzel betrug ~ 100 %, der pH-Wert lag bei 5,3. Vor der Zerkleinerung erfolgte die Aufbereitung der Hackschnitzel mittels Vibrationsstufensiebmaschine. Dabei wurde die Nutzfraktion mit einer Siebmaschenweite von > 3 mm und < 40 mm separiert. Anschließend erfolgte eine vergleichende morphologische Bewertung der Hackschnitzel-Korngrößenverteilung mittels mechanischer Laborschwingsiebfraktionierung.

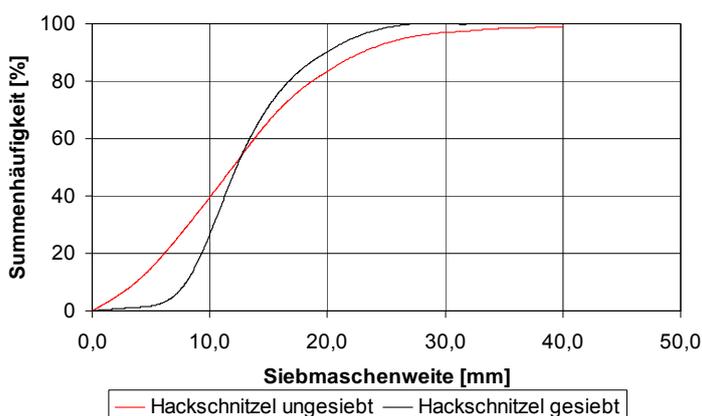


Abbildung 26 Siebkennlinien der Kiefern hackschnitzel ungesiebt und gesiebt, mechanische Siebfraktionierung in Anlehnung an IHD-Werkstandard WIHS 74

Die Ermittlung der Schüttdichte der aufbereiteten Hackschnitzel ergab mit 125 kg/m^3 bekannte Werte. Aus diesen Hackschnitzeln wurden analog zum großtechnischen Aufschluss nach dem thermo-mechanischen Verfahren in der kontinuierlich arbeitenden Defibrator-Pilotanlage von Metso Panelboard in Sundsvall/Schweden (Abbildung 27) mittels 20“-Refiner ohne Zusatz von Bindemitteln oder anderen Additiven Faserstoffe mit einem Materialdurchsatz von $80 \text{ kg Faserstoff}_{\text{atro}}/\text{h}$ hergestellt, über die Blowline (ohne Beleimung) zum Trockner transportiert und bei Temperaturen um $120 \text{ }^\circ\text{C}$ (Ein-

gang) sowie um 70 °C (Ausgang) auf Feuchtegehalte von 6 bis 10 % getrocknet. Diese Faserstoffe bildeten dann das Basismaterial zur labortechnischen Herstellung von mittel- und hochdichten Faserplatten nach dem Trockenverfahren.

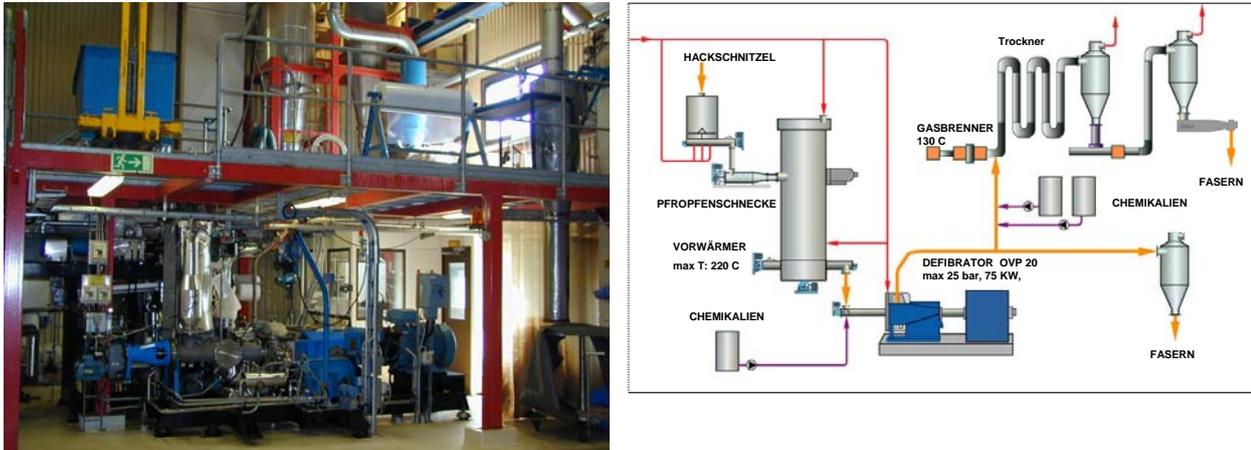


Abbildung 27 links: Metso-Defibrator-Pilotanlage in Sundsvall/Schweden /Krug 1999/; rechts: Ablaufschema zur Faserstoffherstellung in der Metso-Defibrator-Pilotanlage einschließlich Leistungsangaben

Der Aufschlussdruck wurde in den Stufen 8, 12 und 16 bar variiert und mit Aufschlusszeiten von 4 und 8 min kombiniert. Der Abstand der Mahlscheiben (Mahlpalt) während der Zerkleinerung sollte nach Möglichkeit konstant gehalten werden, in der Realität variierte er zwischen 0,63 und 0,66 mm bei 4 min Verweilzeit und zwischen 0,77 und 0,79 mm bei 8 min Verweilzeit.

Als industrieübliche Einstellung ist ein Aufschluss bei einem Aufschlussdruck von 8 bar (etwa 170 °C) über einen Zeitraum von 4 min (Variante 6) anzusehen. In die Versuche zur labortechnischen Faserplattenherstellung wurde ein industriell hergestellter Faserstoff aus Kiefernholz vergleichend einbezogen, der nach Angaben des Industriepartners bei einem Druck von 8 bar und einer Dämpfzeit von 4 min (Variante Industrie) mit einem Mahlpalt von etwa 0,7 mm aufgeschlossen wurde /Wolf 2003/.

Tabelle 14 Übersicht der Aufschlussbedingungen (Prozessparameter: Dampfdruck (und die dementsprechende Sattdampftemperatur) sowie Verweilzeit im Kocher unmittelbar vor der Zerkleinerung im Refiner) der labortechnisch erzeugten Kiefernholzfasern im Vergleich zu Industrie-Faserstoff aus Kiefernholz

Aufschlussbedingungen: Druck, Temperatur, Zeit						
8 bar	12 bar	16 bar	8 bar	12 bar	16 bar	8 bar
170 °C	187 °C	200 °C	170 °C	187 °C	200 °C	170 °C
4 min	4 min	4 min	8 min	8 min	8 min	4 min
Mahlpalt [mm]						
0,63	0,63	0,66	0,77	0,77	0,79	0,70
Variante						
6	5	4	3	2	1	Industrie

Diese Industriefaserstoffvariante war für die Beurteilung einer Übertragbarkeit der Versuchsergebnisse vom Labor- auf einen späteren großtechnischen Maßstab wichtig. Für die Herstellung der durch höheren Vorwärmdruck bzw. längere Vorwärmzeit „modifizierten“ Faserstoffe wurden ein höherer Energiebedarf für die Dampferzeugung, eine Reduzierung der Holzausbeute sowie schlechtere Biegeeigenschaften durch kürzere Faserlängen in Kauf genommen.

Bei den Versuchen in Sundsvall wurde neben der Zerkleinerungsenergie auch der Dampfenergiebedarf für den Kocher und Vorwärmer zur Herstellung der Faserstoffe erfasst. Diese Angaben ermöglichten die Ermittlung des Gesamtenergiebedarfs für die labortechnische Erzeugung der jeweiligen Faserstoffvarianten (Hypothese: Aufschlussintensivierung bedingt höheren Energieverbrauch für Dampferzeugung und geringeren Energieverbrauch für die Zerkleinerung).

Vergleichend dazu erfolgten aus dem o.a. Holzsortiment Aufschlussversuche in der gleichfalls kontinuierlich arbeitenden Versuchsanlage des IHD Dresden. Diese Anlage gestattet neben der Erfassung des Energieverbrauchs für die Dampferzeugung und Zerkleinerung auch die exakte Erfassung der jeweils zu einer Versuchsvariante gehörigen Hackschnitzel- und Faserstoffmengen (jeweils auf Masse_{atro} rückgerechnet) und damit Aussagen zu auftretenden Faserstoffverlusten bei intensiverem Aufschluss (Hypothese: Aufschlussintensivierung bedingt reduzierte Faserstoffausbeute).

Erkenntnisse zu Materialverlusten konnten bei den Versuchen in Dresden genauer als in Sundsvall ermittelt werden, da die Materialdosierung in den Kocher bei der IHD-Laboranlage nicht über eine Stopfschnecke, sondern über einen integrierten Steilförderer erfolgt. Direkt unterhalb des Befülltrichters befindet sich eine Druckschleuse, bestehend aus zwei Kugelsegmentventilen mit zwischengeschaltetem Druckbehälter, durch die das zu zerkleinernde Material in den Druckbereich der Anlage eintritt. Die Druckschleuse ermöglicht den kontinuierlichen Betrieb des Kochers unabhängig vom Verdichtungsverhalten des Ausgangsmaterials sowie die exakte Zuordnung des zu einer Versuchsvariante gehörigen Ausgangsmaterials.

Das Zerkleinerungsgut wird dann im Kocher beim eingestellten Betriebsdruck unter ständiger Bewegung in einem Zeitraum von bis zu 10 min plastifiziert und anschließend via Stopfschnecke zur Zerkleinerung bei Drücken von bis zu 16 bar in den eigentlichen Refiner gefördert. Der Austritt des Faserstoffes aus dem Refinergehäuse in die Blowline erfolgt wahlweise über einen radialen oder über einen tangentialen Materialaustrag, wobei der radiale Blowlineanschluss die in weiten Teilen der Holzwerkstoffindustrie übliche Variante darstellt. An die Zerkleinerung schließt sich ggf. eine Blowline-Beimischung und die Trocknung in einem Stromtrockner auf Feuchtegehalte auf minimal 2 % an.

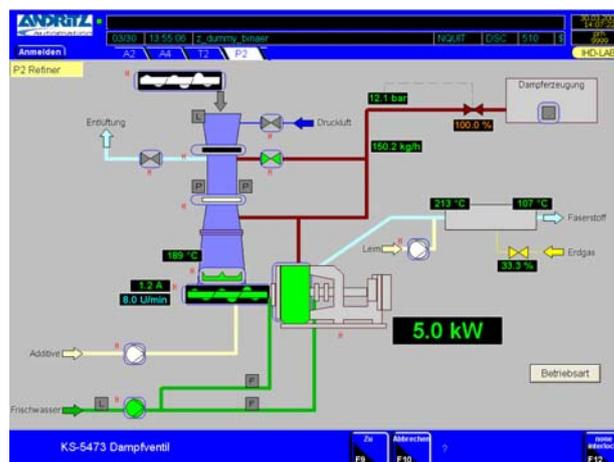


Abbildung 28 links: Laborrefineranlage des IHD Dresden /Stephani 2006/; rechts: Anlagenlayout/Flowsheet der IHD-Laborrefineranlage (Bild Andritz AG) einschließlich Leistungsangaben

4.2 Bindemittel und Zusatzstoffe

Für die labortechnische Herstellung einschichtiger MDF kamen als Bindemittel PF-, UF-, MUF- und MUPF-Harze sowie PMDI in verhältnismäßig hohen Dosierungen (teilweise bis 20 % Feststoffanteil, bezogen auf Faserstoff_{atro}) zum Einsatz (Tabelle 15).

Tabelle 15 Übersicht zu den eingesetzten Bindemitteln einschließlich ausgewählter Bindemittelkennwerte (Herstellerangaben)

Bindemittel	Dichte bei 20 °C [g/cm ³]	Viskosität bei 20 °C [mPas]	pH-Wert []	Feststoffgehalt [%]
PF	> 1,20	450 bis 500	10,0 bis 13,0	57 ± 1
UF	1,28 bis 1,30	350 bis 650	8,0 bis 9,0	69 ± 1
MUF	1,29 bis 1,30	150 bis 400	9,4 bis 10,0	65 ± 1
MUPF	1,29 bis 1,30	150 bis 400	9,0 bis 9,6	64 ± 1
PMDI	1,23	160 bis 240	keine Angaben	> 98

Zur besseren Verdeutlichung des quellungsmodifizierenden Einflusses einer Aufschlussintensivierung bei der Faserstoffherstellung wurden auch bindemittelfreie Faserplatten hergestellt.

Als quellungsvergütendes Additiv kam eine Paraffindispersion (Typ Mobilcer 730) zur Anwendung. Das Hydrophobierungsmittel wurde bei Verträglichkeit mit dem Bindemittel im Gemisch mit selbigem verdüst oder separat vor der Bindemittelzugabe als 20 %-ige Lösung auf den Faserstoff gesprüht. Der Festparaffinanteil lag bei 1,2 % bezogen auf atro Faserstoff. Die bindemittelfreien Faserplatten enthielten grundsätzlich kein Hydrophobierungsmittel.

Weitere Additive, wie z. B. Härtungsbeschleuniger oder Formaldehydfänger, kamen generell nicht zum Einsatz.

4.3 Industrie-MDF

Durch Vermittlung des europäischen MDF-Herstellerverbandes (EMB, mittlerweile aufgegangen in der EPF) konnten insgesamt 11 industriell gefertigte MDF-Typen mit ausgewiesener erhöhter Feuchtebeständigkeit für den Einsatz im Feucht- und Außenbereich von 5 Herstellern (CSC Forest Products Schottland, FINSA Portugal, FINSA Holland, Willamete Irland und Plaxil Italien) in die Untersuchungen einbezogen werden. Diese Industrieplatten haben für eine vergleichende Bewertung der eigenen Laborplatten-Ergebnisse eminente Bedeutung.

Bei dem Versuchsmaterial handelte es sich um MDF mit PMDI- sowie MUF- und PF-Harz-Bindung⁴⁵, die für nachfolgende, vom Hersteller ausgeschriebenen Verwendungen eingesetzt werden können:

- MDF.E: MDF für allgemeine Zwecke zur Verwendung im Außenbereich
- MDF.H: MDF für allgemeine Zwecke zur Verwendung im Feuchtbereich
- MDF.H.V313: MDF nach Option 1 (Zyklustest) für allgemeine Zwecke zur Verwendung im Feuchtbereich
- MDF.H.V100: MDF nach Option 2 (Kochprüfung) für allgemeine Zwecke zur Verwendung im Feuchtbereich
- MDF.HLS: MDF für tragende Zwecke zur Verwendung im Feuchtbereich
- MDF.HLS.V313: MDF nach Option 1 (Zyklustest) für tragende Zwecke zur Verwendung im Feuchtbereich
- MDF.HLS.V100: MDF nach Option 2 (Kochprüfung) für tragende Zwecke zur Verwendung im Feuchtbereich.

⁴⁵ Die Hersteller lieferten Angaben zum Bindemitteltyp, nähere Angaben zu Bindemittelanteil oder zusätzlichen Additiven (u. a. Härtungsbeschleuniger, Formaldehydfänger) stellten die Hersteller nicht zur Verfügung.

4.4 Faserstoff-Charakterisierung

Gegenstand der Faserstoffcharakterisierung waren Untersuchungen zu Auswirkungen eines intensivierten Aufschlusses auf wesentliche morphologische und chemische Faserstoff-Eigenschaften sowie auf die Benetzbarkeit von Prüfblättern aus den unterschiedlichen Faserstoffen. Durch die verschiedenen Analysemethoden sollten die modifizierten Faserstoffe hinreichend charakterisiert und bezüglich ihrer Zusammensetzung sowie in Abhängigkeit von der Aufschlussintensität bezüglich ihrer „Vergütung“ bewertet werden. Abschließend folgten Untersuchungen zur Energiebilanz (Dampf- und Elektroenergieverbrauch) und zur Faserstoffausbeute während der Holzfasertstoffherstellung.

4.4.1 Morphologische und anatomische Eigenschaften

Luftstrahlsiebanalyse

Die morphologische Charakterisierung der trockenen Faserstoffe erfolgte mittels Luftstrahlsiebanalyse nach IHD-Werkstandard FHIS 164. Die ausgewählten Siebsätze bestanden aus bis zu 9 Prüfsieben. Die jeweilige Zusammensetzung variierte in Abhängigkeit von der Faserstofffeinheit zwischen Siebmaschenweiten von 0,063 bis 2,0 mm; die exakte Zusammensetzung der Siebsätze ist den Prüfprotokollen zur Fraktionierung (Anlage) zu entnehmen. Die Luftstrahlsiebanalyse ergab folgende Kennwerte der Korngrößenverteilung.

Je Fraktionierung waren die Massen des Rückstandes der Fraktionen festzuhalten. Diese stellen unter Bezug auf die Gesamtmasse je Fraktionierung die Grundlage zur Ermittlung der Siebkennlinie dar. Die Schnittpunkte der Siebkennlinie mit den Koordinatenwerten von 16, 50 und 84 % Summenhäufigkeit des Durchganges sowie die Schnittpunkte der Koordinaten mit den Siebmaschenweiten 0,315 und 1,0 mm dienen zur Berechnung der Korngrößenwerte, die das Faserstoffgemisch charakterisieren.

Der durchgangslimitierende Faktor der Luftstrahlsiebanalyse ist der Querschnittsdurchmesser der einzelnen Faser. Die Methode ist damit zur Charakterisierung der Faserquerschnittsverteilung geeignet, welche aber nicht zwangsläufig mit der Faserlängenverteilung korrelieren muss. Die mittlere Korngröße K_m in mm Siebmaschenweite gibt den arithmetischen Mittelwert des Faserquerschnitts auf Grundlage der Siebmaschenweite (K) wieder und wird wie folgt ermittelt:

$$\text{Gleichung 1} \quad K_m = (K_{16} + K_{50} + K_{84}) / 3$$

Es bedeuten: K_{16} – Siebmaschenweite in mm bei der Durchgangssumme von 16 %

K_{50} – Siebmaschenweite in mm bei der Durchgangssumme von 50 %

K_{84} – Siebmaschenweite in mm bei der Durchgangssumme von 84 %.

Weiterhin definiert sich das Korngrößenintervall ΔK in mm Siebmaschenweite (K) als Differenz der Durchgangssummen von 16 und 84 % folgendermaßen:

$$\text{Gleichung 2} \quad \Delta K = K_{84} - K_{16}$$

Zur Charakterisierung kann weiterhin der Staub- (Feinst-) Anteil $D_{0,315}$ in % sowie der Feingutanteil $D_{1,0}$ in % herangezogen werden:

$D_{0,315}$ – Summenhäufigkeit des kumulativen Durchganges bei Siebmaschenweite 0,315 mm

$D_{1,0}$ – Summenhäufigkeit des kumulativen Durchganges bei Siebmaschenweite 1,0 mm.

Optisches Partikelanalyzesystem (QualScan)

Parallel zur klassischen Siebanalyse besteht im IHD auch die Möglichkeit einer Partikelanalyse mittels QualScan. Das Prinzip dieses Systems beruht auf der Analyse einer Partikel-Wasser-Suspension, wobei die Partikel beim Abfließen der Suspension aus dem Mischbehälter in einer speziellen Zelle mittels Digitalkamera fotografiert und anhand der gewonnenen Bildpunkte (Pixel) vermessen werden (Abbildung 29).



Abbildung 29 QualScan-System (McCarthy) zur optischen Partikelanalyse, links: Gesamtansicht, mittig: Mischung der Suspension im Mix-Tank, rechts: Flow Cell (Fotos IHD)

Es wird eine definierte Partikelmenge in den zu $\frac{1}{4}$ mit Wasser gefüllten Mischbehälter (Mix-Tank) gegeben. Anschließend wird der Behälter mit Wasser aufgefüllt, währenddessen sorgt ein speziell konstruierter Quirl für die vollständige Durchmischung der Dispersion, ohne die Partikel durch zusätzlich eingetragene Scherkräfte zu deformieren. Danach wird der Behälter kontrolliert entleert und das Partikel-Wasser-Gemisch durch eine Flow Cell mit Sichtfenster geleitet. In der Zelle wird der Volumenstrom unterhalb des Sichtfensters durch die Veränderung des Rohrquerschnittes von kreisförmig (\varnothing 23 mm) auf rechteckig (Höhe 4 mm, Breite 77 mm) auseinander gezogen, womit eine Überlagerung der Partikel nahezu ausgeschlossen wird. Die Fließgeschwindigkeit des Volumenstromes ist über ein direkt angesteuertes Auslassventil einstellbar.

Eine über dem Sichtfenster der Zelle angeordnete Digitalkamera erzeugt vom vorbeifließenden Volumenstrom 10 Bilder/s. Die Abmessungen der Partikel werden durch die Auszählung der Bildpunkte (Pixel) ermittelt, deren Größe wiederum genau definiert ist. Auf diese Weise werden die Partikellänge und die Partikelfläche bestimmt und daraus die Partikelbreite (oder Partikeldicke) berechnet. Das System ermöglicht es, eine Dimensionsunterteilung der geometrischen Eigenschaften (Länge, Breite/Dicke) in Teilbereiche, ähnlich der Abstufung der Siebmaschenweiten der Siebanalyse (vgl. Luftstrahlsiebanalyse) vorzunehmen. Die erfassten Partikel werden auf Grund ihrer Größe in diese Bereiche eingeordnet und daraus die Häufigkeitsverteilung der Gesamtprobe bezüglich der jeweiligen Eigenschaften berechnet.

Eine im IHD entwickelte Software ermöglicht es, aus den Häufigkeitsverteilungen von 5 Messungen, die für eine Analyse notwendig sind, eine Siebkennlinie zu errechnen. Aus der Kennlinie werden die mittlere Korngröße (K_m) und das Korngrößenintervall (ΔK) berechnet. Die prozentuale Verteilung des Staub-, Feinst-, Fein- und Grobanteils wird anhand der vom Nutzer festgelegten Grenzen berechnet. Ebenso ist es möglich, den Schlankheitsgrad der Partikel aus der Partikellänge und der Partikelbreite (oder Partikeldicke) zu errechnen. Die Zusammenfassung aller relevanten Ergebnisse der Analyse erfolgt abschließend in einem Prüfprotokoll.

Schüttdichte

Die Ermittlung der Schüttdichte der trockenen Faserstoffe erfolgte in Anlehnung an den IHD-Werkstandard FHIS 281. Unter dem Begriff Schüttdichte ist dabei der Quotient aus Masse und Volumen von kontinuierlich oder periodisch als Haufwerk geschütteten und unter diesen Bedingungen abgelegten Partikeln zu verstehen.

Die Prüfung beinhaltet das Befüllen eines definierten, zylindrischen Messgefäßes (Volumen 10 bis 15 l, Verhältnis Durchmesser zu Höhe wie 1 zu 2) mit Partikeln. Vorab sind Masse und Volumen des Messgefäßes exakt zu bestimmen. Der Faserstoff wurde aus einer Höhe von etwa 500 mm bis zum Gefäßrand eingefüllt. Im Anschluss wurde die Masse auf 5 g genau bestimmt. Die Messung ist als 3-fache Bestimmung durchzuführen. Weichen die Einzelwerte der Massebestimmung mehr als 5 % vom Mittelwert ab, sind die Messungen zu wiederholen.

Streuhöhe, Vlieshöhe und spezifischer Pressdruck

Im Vorfeld der Plattenherstellung erfolgten Untersuchungen zur Streuhöhe der Faservliese aus den unterschiedlichen Faserstoffvarianten. Die Ergebnisse zur Schüttdichte ließen erwarten, dass eine Intensivierung des Aufschlussdruckes infolge der signifikant veränderten Fasermorphologie deutlich reduzierte Vliesstreuhöhen (ohne und mit Vorverdichtung) sowie resultierend ein komplett verändertes Verdichtungsverhalten nach sich zieht. Die Permeabilität eines Faservlieses ist für die Betrachtung der Wasserdampf- und damit Temperaturentwicklung während des Heißpressvorganges von wesentlicher Bedeutung /Thömen, Kloeppel 2008/.

Die Versuchsdurchführung beinhaltete die Herstellung leimfreier Vliese aller Faserstoffvarianten, die vorab auf einen einheitlichen Feuchtegehalt von 10 % eingestellt wurden. An den Varianten wurden die Streuhöhe (unverdichtetes Faservlies), die Vlieshöhe in der Vorpresse (Vorverdichtung mit 10 bar spezifischen Pressdruck über 1 min bei Raumtemperatur von 20 °C) sowie die Vlieshöhe unmittelbar vor dem Heißpressen bestimmt.

Das Heißpressen der leimfreien Vliese zu MDF mit einer Rohdichte von $\sim 750 \text{ kg/m}^3$ erfolgte bei 200 °C und einem Presszeitfaktor von $25 \text{ s/mm}_{\text{Plattendicke}}$ (notwendig zur Erzielung prüfbarer, leimfreier Platten) wegzeitprogramm-gesteuert, wobei speziell der maximal erforderliche spezifische Pressdruck zur Verdichtung der unterschiedlichen Faservliese als maßgebliches Ergebnis bewertet wurde.

Lichtmikroskopische Untersuchungen

Die unterschiedlichen Kiefernholzfasern wurden vereinzelt und lichtmikroskopisch mit dem Auflichtmikroskop SMZ-1500 im Normallicht bei 10 ... 100facher Vergrößerung untersucht. Es wurden Übersichtsaufnahmen der Faserstoffproben im Maßstab 1:1 angefertigt. Über Kopplung mit dem Bildverarbeitungssystem „Lucia M“ und der digitalen „Kamera DXM 1200“ der Fa. Nikon wurden Auflichtfotos im Normallicht, Maßstab 7:1, erstellt.

Rasterelektronenmikroskopische Untersuchungen

Sämtliche Faserstoffe wurden auch elektronenmikroskopisch mittels Rasterelektronenmikroskop (REM) untersucht. Im Unterschied zum Lichtmikroskop werden bei REM-Aufnahmen Elektronenstrahlen und elektronische Signale zur Probenabbildung genutzt. Die-

se Untersuchung beruht auf dem Prinzip, dass Elektronen mit der Probenoberfläche in Wechselwirkung treten. Dabei bewirkt das Oberflächenrelief der Probe (Faser) die Erzeugung des Bildkontrastes.

Das Verfahren erfordert eine aufwendige Präparation des Probenmaterials. Zunächst werden die Fasern in einem komplizierten Verfahren (Critical Point Drying) unter Einsatz von Äthanol, Aceton und flüssigem CO₂ absolut zerstörungsfrei getrocknet und anschließend auf einen Probenhalter aufgeklebt.

Danach erfolgt die Beschichtung (Material wird aufgesputtert, Schichtdicke 20 – 70 nm) der Fasern mit leitfähigem korrosionsfestem Material höherer Ordnungszahl (Gold) in einer HV-Bedampfungsanlage (Sputter Coater). Der auf diese Weise vorbereitete Probenhalter wird im nächsten Schritt in die elektronenoptische Säule des Rasterelektronenmikroskops eingesetzt und diese evakuiert (Hochvakuum 10⁻³ bis 5 * 10⁻⁴ Pa).

Zur Analyse führt das System einen fein fokussierten Elektronenstrahl zeilenweise über die Oberfläche des Präparates. Durch die Wechselwirkung der Elektronen mit der Präparatoberfläche entstehen verschiedene Signale, die, durch Detektoren verstärkt, auf einem Bildschirm zeilenweise ein Abbild erzeugen.

Die Rasterelektronenmikroskopie ermöglicht Tiefenschärfen, die etwa den 300- bis 500-fachen Wert des Lichtmikroskops erreichen können. Infolgedessen eignet sich die REM-Technologie sehr gut für die Darstellung von Oberflächenstrukturen, sie gibt jedoch keine Informationen zur farblichen Gestaltung der Probe.

4.4.2 Chemische Eigenschaften und wesentliche Holzbestandteile

Die Untersuchungen zu den chemischen Eigenschaften der Faserstoffe beinhalteten:

Bestimmung des pH-Wertes

Die Ermittlung der kaltwässrigen pH-Werte erfolgte nach WIHS 176. Dazu wurden je 2 g des zerkleinerten Fasermaterials mit einem Trockenmassenanteil > 90 % mit mindestens 50 ml destilliertem Wasser suspendiert (Zielstoffdichte der Suspension 3,5 bis 4 %). Die Bestimmung des pH-Wertes erfolgt mittels Elektrodenkette (Einstabmesskette) am pH-Meter bei 20 °C.

Bestimmung der wasserlöslichen Anteile bei Heißwasserextraktion

Die Bestimmung der wasserlöslichen Anteile bei Heißwasserextraktion erfolgte nach FHIS 175. Alle benötigten Glasgefäße wurden bei 103 °C bis zur Massekonstanz getrocknet und anschließend gewogen. Im Anschluss wurde das Fasermaterial mit Hilfe einer Retsch-Universalzentrifugalmühle zu Holzmehl aufgemahlen. Zur Bestimmung der wasserlöslichen Anteile wurden je 2 g atro des zerkleinerten Fasermaterials in einen 200 ml Rundkolben eingewogen und mit 100 ml destilliertem Wasser versetzt. Der Kolben wurde dann mit einem Kugelkühler versehen und derart in ein mäßig siedendes Wasserbad eingehängt, dass der äußere Flüssigkeitsspiegel mit dem inneren gleich ist. Nach 3 h wurde die Extraktion abgeschlossen und das Fasermaterial über einen zuvor bei 103 °C konstant getrockneten und gewogenen Filtertiegel abfiltriert. Nach dem Waschen mit heißem Wasser und dem anschließenden Trocknen bei 103 °C stellte die Gewichtsabnahme der Fasern nach der Extraktion mit Heißwasser den Gehalt an Heißwasserextrakten dar. Die Bestimmung der wasserlöslichen Anteile erfolgt als Doppelbestimmung.

Bestimmung des Extraktstoffgehaltes in Ethanol-Cyclohexan /nach Schneider 1999/

Jeweils 6 g atro des vorzerkleinerten Fasermaterials (vgl. Heißwasserextraktion) wurden in vorher bei 103 °C getrocknete und gewogene 250 ml Rundkolben überführt. Die Extraktion erfolgte über 6 h in einer Soxhlet-Apparatur in Kombination mit einer Reihenheizbank unter Verwendung von 200 ml eines Lösungsmittelgemischs aus Ethanol und Cyclohexan (Verhältnis 1 : 2). Nach der Extraktion wurden die Extrakte in einem Vakuum-Rotationsverdampfer eingeengt und 24 h im Exsikkator getrocknet. Das Endgewicht wurde auf die Einwaage bezogen. Die Ermittlung des lipophilen Extraktstoffgehalts der Fasern erfolgte generell als Doppelbestimmung.

Bestimmung der Pufferkapazität

Nach WIHS 303 wurden 25 g Faserstoff in einem 750 ml Rundkolben eingewogen und mit 500 ml destilliertem Wasser übergossen. Der Kolben ist mit einem Kühler zu versehen und 20 min unter Rücklauf zu kühlen. Nach dem Abkühlen wurden die Extrakte abfiltriert. 100 ml Faserstoffextrakt wurden in ein Becherglas überführt und entweder mit 0,1 mol/l H₂SO₄ (als alkalische Pufferkapazität) bis zu einem pH-Wert von 3 oder mit 0,1 mol/l NaOH-Lösung (als saure Pufferkapazität) bis zum Neutralpunkt titriert.

Das saure Pufferungsvermögen (auch als Säureäquivalent bezeichnet) errechnet sich über die verbrauchte Natronlauge bis zum Erreichen des Neutralpunktes (pH-Wert 7), während sich das alkalische Pufferungsvermögen über die bis zum Erreichen von pH-Wert 3 verbrauchte Schwefelsäure ergibt. Die Messungen wurden prinzipiell als Doppelbestimmung durchgeführt.

Weiterhin wurde an den Faserstoffen der

Formaldehydgehalt (Perforator) nach DIN EN 120 sowie die

Formaldehydabgabe (Flaschenmethode) nach DIN EN 717-3

bestimmt.

Es erfolgten auch Untersuchungen zu den wesentlichen Holzbestandteilen durch die Bestimmung des Lignin- und Pentosangehalts.

Bestimmung des Ligningehaltes

Die Bestimmung des Ligningehaltes erfolgte als Doppelbestimmung nach einer gravimetrischen Methode, die auf saurer Hydrolyse der Polysaccharide mit nachfolgendem Auswägen des Ligninrückstandes beruht /Halse 1923/.

Etwa 1 g atro des vermahlenden und mit Ethanol-Cyclohexan extrahierten Fasermaterials (vgl. Bestimmung Extraktstoffgehalt) wurde in einem 300 ml Erlenmeyerkolben eingewogen, mit 50 ml 37-%iger Salzsäure versetzt und für 15 min stehen gelassen. Der Zugabe von 5 ml 95-%iger Schwefelsäure folgte eine intensive Durchmischung der Probe. Nach mehrstündigem Ruhen wurde das Reaktionsgemisch in ein 1000 ml Becherglas überführt und mit entionisiertem Wasser auf 500 ml aufgefüllt. Die Suspension wurde für 10 min gekocht und schließlich über einen zuvor bei 103 °C getrockneten und gewogenen Filtertiegel abgesaugt. Der Ligninrückstand wurde mit heißem Wasser bis zum Neutralpunkt gewaschen, bei 103 °C gedarrt und ausgewogen.

Bestimmung des Pentosangehalts

Gleichfalls als Doppelbestimmung erfolgte die Bestimmung des Pentosangehalts nach einem von *Jayme und Büttel /1968/* beschriebenen Verfahren. Dabei werden die Pentosane bzw. Pentosen unter dem Einfluss von Mineralsäure und Hitze in Furfurol umgewandelt, das anschließend quantitativ bestimmt wird.

Für die Bestimmung des Pentosangehalts wurden jeweils 2 g atro Fasern in einen 500 ml Rundkolben eingewogen, mit 200 ml bromfreier 3,2 N Bromwasserstoffsäure versetzt und langsam zum Kochen gebracht. Im Anschluss folgte innerhalb von 30 min ein Überdestillieren von 90 ml des Rundkolbeninhalts. Die 90 ml Destillat wurden durch 90 ml entionisiertes Wasser ersetzt. Nach 60-minütigem Kochen wurden weitere 90 ml überdestilliert, erneut 90 ml entionisiertes Wasser zugegeben und die Destillation bis zum Erhalt von 240 ml Destillat fortgesetzt. Das Destillat wurde für die anschließende Titration des Furfurol mit entionisiertem Wasser auf 250 ml aufgefüllt und gut durchmischt. Nach der Titration des Destillats folgte die Berechnung des Pentosangehalts.

4.4.3 Eigenschaften nass gebildeter Prüfblätter

Aus den Faserstoffen wurden jeweils in Abmischung mit einem ungebleichten Kiefern-sulfatzellstoff Prüfblätter gebildet. Dazu erfolgte zunächst die Herstellung einer Suspension aus einer definierten Holzfaser- und Zellstoffmenge (Verhältnis 1 : 1). Aus dieser Suspension wurde in einem Blattbildner (Blattbildungsanlage nach Rapid Köthen, nach DIN EN ISO 5269-2) durch das Entwässern der Suspension über ein Sieb ein Vlies gebildet, dass nach der anschließenden Trocknung das sogenannte Prüfblatt ergab.

Vor der eigentlichen Blattbildung erfolgte die Bestimmung des Entwässerungsverhaltens der Suspension (Mahlgrad).

Entwässerungsverhalten – Mahlgrad

Das Schopper-Riegler-Verfahren liefert ein Maß für die Entwässerungsgeschwindigkeit einer verdünnten Faserstoffsuspension, das in Schopper-Riegler-Einheiten (SR) ausgedrückt wird. Das Entwässerungsverhalten ist abhängig von der Oberflächenbeschaffenheit, dem Feinstoffanteil sowie dem Quellungszustand (unmittelbar nach Suspendierung) der Fasern und stellt somit eine Kennzahl zur Beurteilung der mechanischen Behandlung der Fasern dar.

Das Schopper-Riegler-Gerät besteht aus einer trichterförmigen Scheidekammer mit zwei Auslauföffnungen. Auf der Scheidekammer ist eine Füllkammer aufgesetzt. Der Boden der Füllkammer ist ein Sieb mit definierter Maschenweite und Fläche. Ein in die Füllkammer eingesetzter Dichtkegel schließt die Füllkammer gegen die Scheidekammer ab, damit vor dem Versuchsstart das Stoff-Wasser-Gemisch eingefüllt werden kann.

Nach dem Einfüllen wird der Mechanismus zum Abheben des Dichtkegels ausgelöst und die Suspension passiert das im Boden der Siebkammer befindliche Sieb. Je nach Zustand der Fasersuspension fließt das Wasser mehr oder weniger schnell in die Scheidekammer, wo ein seitlicher Abfluss direkt in einen Mahlgradbecher mündet. Im Mahlgradbecher wird das Wasser aufgefangen und gibt den Mahlgrad in °SR (DIN EN ISO 5267-1) an. Dabei entsprechen 10 ml Wasser 1 °SR.

An den getrockneten Prüfblättern aus Abmischungen der unterschiedlichen Kiefernholz-faserstoffen und ungebleichten Kiefernulfatzellstoff wurden verschiedene, papierrelevante Eigenschaften ermittelt:

- Reißlänge und Falzfestigkeit nach DIN EN ISO 1924-2,
- Berstfestigkeit nach DIN EN ISO 2758,
- Weißgrad nach DIN 53145-1.

Weiterhin erfolgten Untersuchungen zur Benetzbarkeit der Prüfblätter. Die Benetzung der Fasern (u. a. mit verschiedenen Bindemitteln) ist von entscheidender Bedeutung für die Entstehung der Faser-zu-Faser-Bindung und damit zur Festigkeit der Holzfaserplatten. Darüber hinaus bestimmen die physikalischen und chemischen Fasereigenschaften die Benetzbarkeit wesentlich /Roffael et al. 2002/.

Benetzbarkeit

Das Prinzip dieser von Roffael et al. entwickelten Prüfmethode besteht darin, unter Einsatz von Holzfasern nass hergestellte Prüfblätter bezüglich ihrer Benetzbarkeit mit Wasser zu untersuchen /Roffael et al. 2002; Roffael et al. 2005c/. Für die Bestimmung der Benetzbarkeit wird ein Tropfen (25 µl) einer wässrigen 0,1 %-igen Anilinblau-Lösung mit einer Mikropipette auf die Oberfläche eines Prüfblattes gegeben. Als Maß für die Benetzung wird das Zeitintervall in Sekunden von der Aufgabe des gefärbten Wassertropfens auf die Prüfblattoberfläche bis zu seinem vollständigen Eindringen in das Prüfblatt gemessen. Aus jeweils 12 gleichmäßig über die Prüfblattoberfläche verteilten Einzelmessungen wird der arithmetische Mittelwert gebildet.

4.4.4 Energiebedarf und Ausbeute bei Faserstoffherstellung

Bei den Aufschlussversuchen in Sundsvall wurde neben der Elektroenergie für die Zerfaserung auch der Dampfenergiebedarf für den Kocher und Vorwärmer zur Herstellung der unterschiedlichen Faserstoffvarianten erfasst. Aus diesen Angaben erfolgte unter Berücksichtigung der jeweiligen Versuchsdauer (i. d. R. je Variante 1 h) die Ermittlung des Gesamtenergiebedarfs für die Erzeugung der jeweiligen Faserstoffvarianten.

Im Anschluss erfolgten aus vergleichbaren Hackschnitzeln (zu den Versuchen in Sundsvall) Aufschlussversuche in der Refiner-Versuchsanlage des IHD Dresden. Diese Anlage ermöglicht neben der Erfassung des Energieverbrauchs für die Dampferzeugung und Zerfaserung Aussagen zu auftretenden Faserstoffverlusten insbesondere bei intensiverem Aufschluss.

Die Zerfaserungsversuche erfolgten je Aufschlusseinstellung über einen Zeitraum von etwa 2 h. In dieser Zeit können in der IHD-Versuchsanlage ~ 100 kg Hackschnitzel_{atro} zu Faserstoff aufgeschlossen werden. Der Feuchtegehalt der Hackschnitzel betrug ca. 100 %, der pH-Wert lag bei 5,1. Je Aufschlusseinstellung wurden 2 x 100 kg Hackschnitzel_{atro} bereitgestellt, da die Versuchsreihe im Interesse reproduzierbarer Einstellungen 1 x komplett wiederholt wurde.

Aufgrund der besonderen Beschickvorrichtung der IHD-Anlage (doppeltes Druckschleusensystem anstatt MSD-Stopfschnecke, kein druckdichter Verschluss des Kochers über Hackschnitzelstopfen erforderlich) konnten einerseits die zu einer Aufschlusseinstellung gehörigen Hackschnitzel exakt zugeordnet werden. Zum anderen entfallen die sonst notwendigen, undefinierten Zwischenchargen beim An- und Abfahren der Anlage bzw. beim Variantenwechsel. Ohne Zusatz von Bindemitteln oder anderen Additiven wurden

die Faserstoffe nach der Trocknung im Stromrohr Trockner exakt gewogen und die Faserstoffmasse_{atro} unter Beachtung auf die ermittelten Feuchtegehalte (im Bereich von 8 bis 10 %) bestimmt. Mit Bezug auf die Hackschnitzel-Ausgangsmasse ergab sich die Ausbeute.

4.5 Labor-MDF

4.5.1 Technologie der labortechnischen Plattenherstellung

Die labortechnische Herstellung einschichtiger MDF erfolgte in Anlehnung an eine industrielle Fertigung. Maßgebliche Unterschiede waren die Trockenbeimischung der Faserstoffe in einem speziellen Pflugscharmischer sowie die diskontinuierliche, chargenweise Plattenherstellung. Als Faserstoffe fanden die 6 Varianten Verwendung, die bei Drücken von 8, 12 und 16 bar über 4 bzw. 8 min thermo-mechanisch aufgeschlossen wurden (vgl. Tabelle 14). Vergleichend fand ein Industriefaserstoff Anwendung, der gleichfalls bei 8 bar über 4 min aufgeschlossen wurde.

Während die MDF und HDF ohne Bindemittelzusatz generell auch ohne Hydrophobierung hergestellt wurden, enthielten alle anderen labortechnisch hergestellten Platten einheitlich 1,2 % Festparaffin, bezogen auf atro Faserstoff. Dieses wurde grundsätzlich vor der Bindemittelverdüsung auf den Faserstoff aufgesprüht.

Als Bindemittel fanden UF-, MUF-, PF-, MUPF-Harze sowie PMDI Verwendung (vgl. Tabelle 15). Platten mit MUPF-Harz- bzw. PMDI-Bindung wurden nur aus den Faserstoffen mit 4 min Aufschlusszeit hergestellt.

Alle Varianten wurden prinzipiell ohne Zusatz von Härtern oder Additiven zur Formaldehydreduzierung hergestellt. Die nachfolgende Aufzählung enthält die wesentlichen Prozessparameter der labortechnischen Plattenherstellung:

- Plattenformat/-aufbau: 460 mm x 440 mm, einschichtig
- Plattenanzahl: 4 Platten pro Variante
- Plattendicke: 17 mm pressblank, 16 mm geschliffen
 - Ausnahme bindemittelfreie MDF: 11 mm pressblank, 10 mm geschliffen
 - Ausnahme bindemittelfreie HDF: 7 mm pressblank, 6 mm geschliffen
- Zielrohichte: MDF: 750 bis 800 kg/m³
HDF: 860 bis 920 kg/m³
- Bindemittelanteil: 8 bis 20 % bez. auf atro Faserstoff (abhängig von der Bindemittelart, teilweise gestuft)
- Bindemittelzugabe: Sprüh-Umwälzverfahren, Pflugscharmischer
- Bindemitteldurchsatzmenge: 80 bis 100 g/min
- Sprühluftdruck: 2 bar
- Nachtrocknen im Stromtrockner: Eingangstemperatur ~ 150 °C
- Zielfeuchtegehalt vor Vliesbilden: 8 bis 10 %
- Vliesbildung: von Hand in Streurahmen

- Vorpressen: 1 min bei Raumtemperatur
10 bar spezifischer Pressdruck
- Heißpressen: hydraulische 1-Etagen-Unterkolbenpresse
mit Thermoölheizung,
weg-zeit-programm-gesteuert
- max. spezifischer Pressdruck: 27 bis 62 bar, faserstoffabhängig
(durch Weg-/Zeitsteuerung stellt sich der
spezifische Pressdruck abhängig vom
Verdichtungsverhalten automatisch ein)
- Heizplattentemperatur: 190 bis 200 °C ± 2 K
Ausnahme bindemittelfreie MDF/HDF:
220 °C ± 2 K
- Presszeitfaktor: 18 s/mm Plattendicke
- Ausnahme bindemittelfreie MDF/HDF:
40 bis 60 s/mm Plattendicke
(notwendig zur Herstellung prüffähiger Platten)
- Konditionieren der Platten: mindestens 3 bis 5 Tage im Plattenstapel
- Besäumen auf Fertigformat: 400 mm x 380 mm
- Schleifen auf Nenndicke
- Prüfkörper einschnitt: Einschnitt in Anlehnung an DIN EN 326-1.

4.5.2 Prüfung der Platteneigenschaften

Nach Einschnitt und Klimatisierung der Prüfkörper im Normalklima bei 20 °C und 65 % rel. Luftfeuchte bis zur annähernden Massekonstanz erfolgte die Prüfung der folgenden chemischen und physikalischen Platteneigenschaften im Ausgangszustand. Der Formaldehydgehalt wurde an „frischen“, nichtklimatisierten Proben bestimmt.

- Werkstandard FHIS 176: Bestimmung des pH-Wertes in wässrigen Lösungen
und Suspensionen (an ausgewählten Varianten)
- DIN EN 120: Bestimmung des Formaldehydhaltes
Perforatormethode (an ausgewählten Varianten)
- DIN EN 323: Bestimmung der Plattendicke und der Rohdichte
- Werkstandard ihd-W 401: Bestimmung des Rohdichteprofiles senkrecht zur
Plattenebene (an ausgewählten Varianten)
- DIN EN 317: Bestimmung der Dickenquellung und der Wasserauf-
nahme nach 2, 24 und teilweise 48 h Wasserlagerung
(in 20 °C)
- DIN EN 13329: Bestimmung der Dickenquellung (Kantenquellung)
nach 24 h Wasserlagerung (an ausgewählten
Varianten, abweichend von der Norm unbeschichtet)
- DIN EN 318: Bestimmung der Maßänderungen in Verbindung mit
Änderungen der relativen Luftfeuchte
(an ausgewählten Varianten)

- DIN EN 310: Bestimmung des Biege-Elastizitätsmoduls und der Biegefestigkeit
- DIN EN 319: Bestimmung der Zugfestigkeit senkrecht zur Plattenebene (Querzugfestigkeit)
- DIN EN 322: Bestimmung des Feuchtegehaltes.

4.5.3 Prüfung der Feuchtebeständigkeit der Verklebung

Nach Einschnitt und Klimatisierung der Prüfkörper im Normalklima bei 20 °C und 65 % rel. Luftfeuchte bis zur annähernden Massekonstanz erfolgte die Bewertung der Feuchtebeständigkeit der Verklebung anhand folgender Platteneigenschaften.

- DIN EN 321 und DIN EN 317: Bestimmung der Dickenquellung nach Zyklustest (Option 1, V313)
- DIN EN 321 und DIN EN 319 Bestimmung der Querzugfestigkeit nach Zyklustest (Option 1, V313)
- DIN EN 1087-1 und DIN EN 319: Bestimmung der Querzugfestigkeit nach Kochprüfung (Option 2, V100).

Diese Prüfungen wurden i. d. R. nur an solchen Faserplatten vorgenommen, deren zur Verklebung eingesetzte Bindemittel eine erhöhte Feuchtebeständigkeit der Verklebung erwarten ließen. Aus diesem Grund blieben sowohl die leimfreien als auch die UF-Harzgebundenen Platten ungeprüft.

4.5.4 Prüfung der Witterungsbeständigkeit

Mit den Bewitterungsuntersuchungen sollte nachgewiesen werden, dass MDF aus Kiefernholz-Faserstoffen, die unter verschärften Bedingungen mit gezieltem Überschreiten industriüblicher Einstellungen aufgeschlossen wurden, tatsächlich über eine dauerhafte Quellungsvergütung und langfristige Witterungsbeständigkeit verfügen. Weiterhin wurde geprüft, ob sich der BAM- Kurzeitbewitterungstest-Test als zeitraffende Methode zur Beurteilung der Witterungsbeständigkeit von MDF eignet und eine Korrelation zu Ergebnissen parallel laufender Freibewitterungsversuche besteht.

Ausgangsmaterial für die Versuche bildeten labortechnisch hergestellte MDF mit MUF-, MUPF- und PF-Harz-Bindung sowie PMDI-gebundene MDF (einheitlich mit 16 % Bindemittelanteil, bei den MUF-Varianten zusätzlich mit 20 %, bei den PMDI-Varianten zusätzlich mit 8 %, Anteile jeweils bez. auf Faserstoff_{atro}) aus unterschiedlich intensiv aufgeschlossenen Kiefernholzfasern (Aufschlussdruck 8, 12, 16 bar, kombiniert mit 4 und teils mit 8 min Aufschlusszeit). Als Vergleichsbasis wurden industriell hergestellte MDF mit MUF- und PF-Harz- bzw. PMDI-Bindung mit vom Hersteller ausgeschriebener erhöhter Feuchtebeständigkeit herangezogen (vgl. nächster Gliederungspunkt). Sämtliche Bewitterungsprüfungen erfolgten an unbeschichteten Proben.

Für die technische Alterung nach BAM- Kurzeitbewitterungstest-Test wurden jeweils 6 Zyklen des Tests (a 4 Wochen = 24 Wochen) im Xenotest-Gerät 1200 mit einem in etwa ausgeglichenem Verhältnis Beregnen/Belichten realisiert. Vergleichend dazu lief die natürliche Alterung der MDF im Freibewitterungstest über einen Zeitraum von bis zu 160 Wochen (obere, unbeschichtete Proben in Abbildung 30).



Abbildung 30 Kurzzeitbewitterungsbeanspruchung (KZB, auch Short-term Technical Weathering = TW) im Xenotest-Gerät 1200 (links, Foto Stephani, IHD) sowie IHD-Versuchsstand zur Freilandbewitterung (FB, auch Outdoor Exposure = OE) nach DIN EN 152 (rechts, Foto Stephani, IHD)

Im sogenannten Xenotest-Gerät kann das Freiluftklima unter Zeitraffereffekten simuliert werden. Die Prüfkörper werden auf einem Probeträger hängend in das Gerät eingelagert und umkreisen mit einer Umlauffrequenz von $0,6 \text{ min}^{-1}$ ein in der Prüfkammer zentral eingelagertes Strahlungssystem. Nach jedem Umlauf erfolgt eine Probenwendung um 180° . Die UV-IR-Bestrahlung wird von drei Langfeld-Xenonstrahlern (Leistung jeweils 4.500 Watt) mit einer Lichtbogenlänge von 640 mm in einem Wellenbereich von 280 bis 830 nm erzeugt. Die Strahler sind von Quarzgläsern umgeben, die die Strahlung von kurzweiligem Ultraviolett bis zum mittleren Infrarot durchlassen. Das Strahlungsspektrum ist dem der Sonne ähnlich. Zusätzlich werden die Prüfkörper in definierten Abständen mit entionisiertem Wasser (24 l Wasser je h und m^2 Probenoberfläche) beregnet, zum Teil mit laufender Bestrahlung. Bestrahlung und Beregnen sorgen für ein intensives Bewitterungsklima.

Tabelle 16 enthält die spezifischen Anforderungen eines vierwöchigen Bewitterungszyklus im Xenotest-Gerät 1200.

Tabelle 16 Vierwöchiger Bewitterungszyklus im Xenotest-Gerät 1200 (KZB), Wiederholung ab der 5., 9., 13., 17., 21. Woche

Zeit	Prüfungsart
3 Tage	Beregnung
4 Tage	je Tag 9 h 40 min Beregnung, 17 h 30 min Belichtung, 3 h 10 min beides
7 Tage	je Tag 8 h 30 min Beregnung, 17 h 50 min Belichtung, 2 h 20 min beides
7 Tage	je Tag 17 h 40 min Beregnung, 10 h 10 min Belichtung, 3 h 50 min beides
3 Tage	je Tag 19 h 50 min Beregnung, 6 h 10 min Belichtung, 2 h beides
3 Tage	im Wechsel 16 h Kältelagerung bei -20°C und 7 h 30 min Beregnung
1 Tag	Beregnung

Ein typischer Kurzzeitbewitterungstest der unbeschichteten MDF lief i. d. R. über einen Zeitraum von 24 Wochen, der sich aus 6 Einzelzyklen gemäß Tabelle 16 im Xenotest-Gerät zusammensetzte.

Je Versuchsvariante wurden insgesamt 6 Proben im Format 195 mm x 125 mm x Platendicke der beschleunigten, technischen Bewitterungsbeanspruchung im Xenotest-Gerät unterzogen.

Wesentliche Kriterien zur Versuchsdurchführung der parallel laufenden natürlichen Alterung von MDF im Freibewitterungstest nach DIN EN 152 über einen Zeitraum von bis zu 160 Wochen waren:

- südwestliche Probenausrichtung (stärkste Klimabeanspruchung in Mitteleuropa),
- Probeneinbau in 45°-Schräglage, mindestens 1 m über Untergrund bzw. 0,5 m über Bewuchs,
- Probenabmessungen: 375 mm x 200 mm x Plattendicke (6 bis 12 Proben je Versuchsvariante).

Zu definierten Zeitpunkten erfolgte bei beiden Bewitterungsverfahren die Entnahme von jeweils zwei Proben für zerstörende Eigenschaftsprüfungen:

- Kurzzeitbewitterung (KZB): nach 8, 16 und 24 Wochen
- Freibewitterung (FB): nach 24, 48 und 72 Wochen
(teilweise auch nach 96, 120 und 160 Wochen).

An diesen Proben wurden nach Reklimatisierung bis Erreichen annähernder Massekonstanz im Normklima (Temperatur 20 °C, relative Luftfeuchte 65 %) folgende Platteneigenschaften bestimmt:

- DIN EN 323: Bestimmung der Plattendicke und der Rohdichte
- DIN EN 322: Bestimmung des Feuchtegehaltes
- DIN EN 317: Bestimmung der Dickenquellung nach 24 h Wasserlagerung (in 20 °C)
- DIN EN 310: Bestimmung des Biege-Elastizitätsmoduls und der Biegefestigkeit (verkürzte Biegestablänge)
- DIN EN 319: Bestimmung der Zugfestigkeit senkrecht zur Plattenebene (Querzugfestigkeit).

Die notwendigen Reklimatisierungszeiträume vor Prüfung lagen für die Prüfungen nach Kurzzeitbewitterung (KZB) bei 21 bis 28 Tagen, für die Prüfungen nach Freibewitterung (FB) bei 28 bis 42 Tagen.

Die Auswertung beinhaltete die Bewertung der ermittelten Eigenschaften vorzugsweise zum Entnahmzeitpunkt „Bewitterungsende“ sowie vergleichende Bewertungen von Kurzzeit- zu Freibewitterung. Die Ergebnisse wurden sowohl als Absolutwerte als auch prozentual bezogen auf die Ausgangseigenschaften der MDF (relativ) als Maß zur Beurteilung der Witterungsbeständigkeit angegeben. Da ein wichtiges Ziel der Arbeit in der Verbesserung der Witterungsbeständigkeit von MDF bestand, erfolgte die Bewertung der Labor-Platten grundsätzlich durch einen Vergleich mit denjenigen Industrie-MDF, die nach Bewitterung die besten Eigenschaften aufwiesen.

4.6 Industrie-MDF

4.6.1 Technologie der industriellen Plattenherstellung

Der maßgebliche Unterschied der industriellen zur labortechnischen Faserplattenherstellung besteht in der kontinuierlichen Fertigung der MDF. Die industriell üblichen Verfahrenstechnologien wurden im Stand der Wissenschaft und Technik hinreichend beschrieben. Als wesentliche Unterschiede⁴⁶ seien hervorgehoben:

⁴⁶ Nach Angaben der Hersteller, ggf. unvollständig.

- anteilige Verwendung von Laubholz- bzw. Recyclingholz (insbesondere bei Plaxil),
- Bindemittelzugabe auf die feuchten Fasern in der Blowline,
- pneumatische (Felter) bzw. mechanische (Rakel) Faservliesbildung,
- Aufsprühen von Oberflächenwasser zur Verstärkung des Dampfstoßeffectes,
- Heißpressen in kontinuierlichen Bandpressen bei Temperaturen bis 260 °C (Ausbildung einer in Plattenebene entgegengesetzt zur Vorschubgeschwindigkeit „wandernden Dampffront/Dampfwelle“) und
- Presszeiten von 12 bis 6 s/mm_{Plattendicke}.

Vergleichbare Parameter zur labortechnischen Herstellung waren:

- die Verwendung entrindeter Holzsortimente,
- die Aufschlussbedingungen bei der Faserstoffherstellung mit Dampfdrücken von 8 bis 9 bar und Verweilzeiten im Kocher von 3 bis 4 min,
- der homogene, einschichtige Aufbau der MDF,
- Faservliesfeuchten vor dem Pressen im Bereich von 8 bis 10 % und die
- Verwendung von Hydrophobierungsmitteln im Bereich von 1 bis 2 %, bezogen auf Faserstoff_{atro}.

Die Hersteller lieferten zudem verbindliche Angaben zu den eingesetzten Bindemitteltypen (MUF-, PF-Harz sowie PMDI), wobei zwischen Plattentypen gleicher Qualitäten, insbesondere in Abhängigkeit vom eingesetzten Bindemittel, teilweise erhebliche Differenzen bei den Platteneigenschaften festgestellt wurden.

Nähere Angaben zum exakten Bindemittelanteil oder zu ggf. zusätzlich eingesetzten Additiven (u. a. Härtingsbeschleuniger, Formaldehydfänger) stellten die Hersteller allerdings nicht zur Verfügung.

4.6.2 Prüfung der Platteneigenschaften

Die Bestimmung der chemischen und physikalischen Eigenschaften erfolgte analog zu Labor-MDF.

4.6.3 Prüfung der Feuchtebeständigkeit der Verklebung

Die Prüfungen zur Feuchtebeständigkeit der Verklebung wurden parallel zu den labortechnisch hergestellten Faserplatten nach den gleichen Methoden realisiert.

4.6.4 Prüfung der Witterungsbeständigkeit

Die Beurteilung der Witterungsbeständigkeit erfolgte analog zu den Laborplatten über die Bestimmung und Bewertung ausgewählter physikalischer Eigenschaften nach technischer (KZB) und natürlicher Bewitterung (FB).

5 Eigene Untersuchungen - Ergebnisse

5.1 Charakterisierung der Faserstoffe

5.1.1 Morphologische und anatomische Eigenschaften

Die Charakterisierung der Faserstoffe durch Siebanalysen mittels Luftstrahlsieb wies speziell für die Varianten mit 8 min Aufschlusszeit eine deutliche Differenzierung der Faserstoffe in Abhängigkeit vom Aufschlussdruck aus. Offensichtlich bewirken höhere Drücke eine feinere Faserstoff-Struktur mit kürzeren Faserlängen (Abbildung 31).

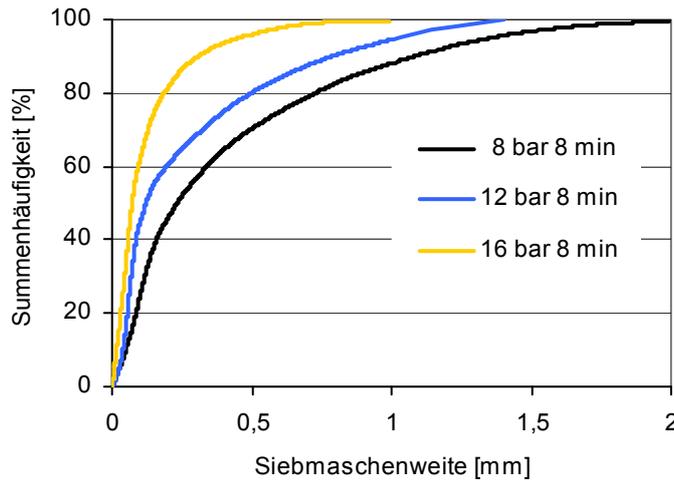


Abbildung 31 Einfluss des Aufschlussdrucks auf die Siebkennlinien (Summenhäufigkeitsverteilung) nach Luftstrahlsiebanalyse (IHD-Werkstandard FHS 164) von labortechnisch erzeugten Kiefernholzfasern konstanter Aufschlusszeit (8 min)

Hingegen führte die Verlängerung der Aufschlusszeit von 4 auf 8 min nur bei maximalem Aufschlussdruck von 16 bar zur nochmaligen Steigerung der Faserstoff-Feinheit. Währenddessen wurden bei den 8 und 12 bar Faserstoff-Varianten gegenüber 4 min Dämpfzeit geringfügig höhere Werte für die mittlere Korngröße und das Korngrößenintervall ermittelt (Tabelle 17), was möglicherweise auch auf den etwas größeren Mahlpalt von 0,77 bis 0,79 mm bei den Varianten mit 8 min Verweilzeit zurückzuführen ist. Die Industriefaserstoffvariante lag zwischen den 8 bar-Laborvarianten, was für industrieadäquate Aufschlussbedingungen bei diesen Versuchsvarianten spricht.

Tabelle 17 Einfluss der Aufschlussbedingungen auf mittlere Korngröße und Korngrößenverteilung nach Luftstrahlsiebanalyse (IHD-Werkstandard FHS 164) von labortechnisch erzeugten Kiefernholzfasern im Vergleich zu Industrie-Faserstoff aus Kiefernholz

Faserstoffeigenschaften	Aufschlussbedingungen:						
	Druck, Temperatur, Zeit						
	8 bar	12 bar	16 bar	8 bar	12 bar	16 bar	8 bar
	170 °C	187 °C	200 °C	170 °C	187 °C	200 °C	170 °C
	4 min	4 min	4 min	8 min	8 min	8 min	4 min
	Mahlpalt [mm]						
	0,63	0,63	0,66	0,77	0,77	0,79	0,70
	Variante						
	6	5	4	3	2	1	Industrie
Mittlere Korngröße K_m [mm]	0,34	0,24	0,19	0,35	0,25	0,11	0,33
Korngrößen-Intervall ΔK [mm]	0,51	0,41	0,30	0,67	0,55	0,20	0,58

Die Analyse der Faserstoffvarianten bezüglich der Summenhäufigkeitsverteilung von Faserbreite (oder Faserdicke) und der Faserlänge mit dem optischen Partikelanalyse-system QualScan ergab insbesondere für die Faserlänge deutliche Unterschiede zwischen den Faserstoffen, während die Ergebnisse zur Verteilung der Faserbreite (Faserdicke) relativ eng beieinander lagen. Die größte Feinheit wies analog zum Luftstrahlsieb der bei 16 bar über 8 min am intensivsten aufgeschlossene Faserstoff auf. Der Indust-

riefaserstoff lag übereinstimmend zu den Ergebnissen der Luftstrahlsiebanalyse im Bereich der 8 bar- Laborvarianten (Abbildung 32).

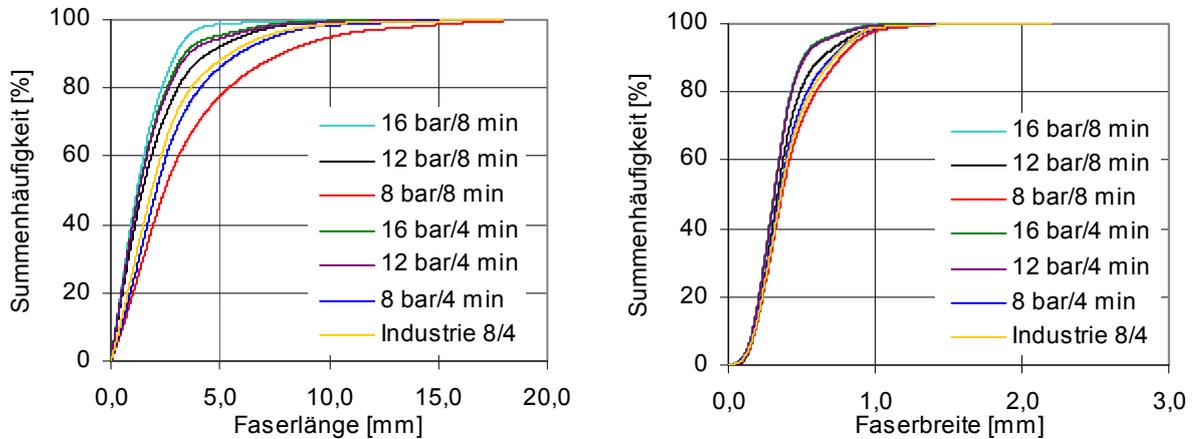


Abbildung 32 Einfluss der Aufschlussbedingungen auf die Siebkennlinien (Summenhäufigkeitsverteilung) nach QualScan-Analyse von labortechnisch erzeugten Kiefernholzfasern im Vergleich zu Industrie-Faserstoff aus Kiefernholz

Die Auswertung der Ergebnisse zur mittleren Faserlänge und -breite zeigt erwartungsgemäß für die Extremvarianten (Aufschlussdruck 16 bar) die geringsten Werte (Tabelle 18). Mit Abnahme der Aufschlussintensität im Kocher nimmt die erzielte Faserlänge zu. Der Schlankheitsgrad als Maß für das Verhältnis von mittlerer Partikellänge zu mittlerer Partikelbreite folgt diesem Trend, was damit begründet wird, dass die Faserlänge überproportional von der Aufschlussintensität beeinflusst wird. Die mittlere Faserbreite liegt dahingegen für alle Varianten in einem relativ engen Bereich und lässt aus diesem Grund nur bedingt Rückschlüsse auf die Aufschlussintensität zu.

Tabelle 18 Einfluss der Aufschlussbedingungen auf mittlere Faserlänge und Faserbreite sowie Schlankheitsgrad nach QualScan-Analyse von labortechnisch erzeugten Kiefernholzfasern im Vergleich zu Industrie-Faserstoff aus Kiefernholz

Faserstoffeigenschaften	Aufschlussbedingungen:						
	Druck, Temperatur, Zeit						
	8 bar 170 °C 4 min	12 bar 187 °C 4 min	16 bar 200 °C 4 min	8 bar 170 °C 8 min	12 bar 187 °C 8 min	16 bar 200 °C 8 min	8 bar 170 °C 4 min
	Mahlspalt [mm]						
	0,63	0,63	0,66	0,77	0,77	0,79	0,70
	Variante						
	6	5	4	3	2	1	Industrie
Mittlere Faserlänge [mm]	2,49	1,59	1,48	3,16	1,77	1,38	2,24
Mittlere Faserbreite [mm]	0,38	0,34	0,32	0,41	0,36	0,32	0,39
Schlankheitsgrad []	3,24	1,84	1,77	3,51	2,09	1,53	2,84

Die größte mittlere Faserlänge ergab sich für die unter industrieanalogen Drücken von 8 bar und der langen Verweilzeit von 8 min aufgeschlossene Faserstoffvariante. Möglicherweise ist dieser Effekt auf die durch die längere Dämpfzeit intensivere Hackschnitzelerweichung und resultierend sehr homogene Zerfaserung zurückzuführen. Das bedingt sicherlich auch den bei dieser Versuchsvariante höchsten Wert für den Schlankheitsgrad. Eine andere Ursache wird in dem, bei den 8 min-Versuchsvarianten grundsätzlich geringfügig größeren Mahlspalt (zwischen 0,77 und 0,79 mm) gesehen, der die Herstellung etwas größerer Faserstoffe fördert.

Die Kennwerte des Industriefaserstoffs entsprachen nahezu den Kennwerten des unter ähnlichen Kochereinstellungen aufgeschlossenen Laborfaserstoffs. Die ausführlichen Protokolle zur Luftstrahlsieb- und QualScan-Analyse sind Bestandteil der Anlage.

Die Ergebnisse zur Schüttdichte zeigen, dass eine zunehmende Aufschlussintensität höhere Werte für die Schüttdichte und damit auch ein signifikant verändertes Streu- und Verdichtungsverhalten nach sich zieht. Der Wert für die Extremversuchsvariante (16 bar, 8 min) liegt mit einer Schüttdichte von 90 kg/m^3 bei mehr als dem Fünffachen der Normal-Aufschlussvariante (8 bar, 4 min) mit 16 kg/m^3 . Für den über 4 min bei 16 bar aufgeschlossenen Faserstoff ergab sich mit 52 kg/m^3 ein Wert, der die Normalvariante gleichfalls weit überschritt. Für den Industriefaserstoff wurde mit 19 kg/m^3 ein Wert ermittelt, der mit bisherigen Erfahrungen aus der Industrie zur Schüttdichte von Kieferholzfaserstoffen (zwischen 15 und 30 kg/m^3) gut übereinstimmt.

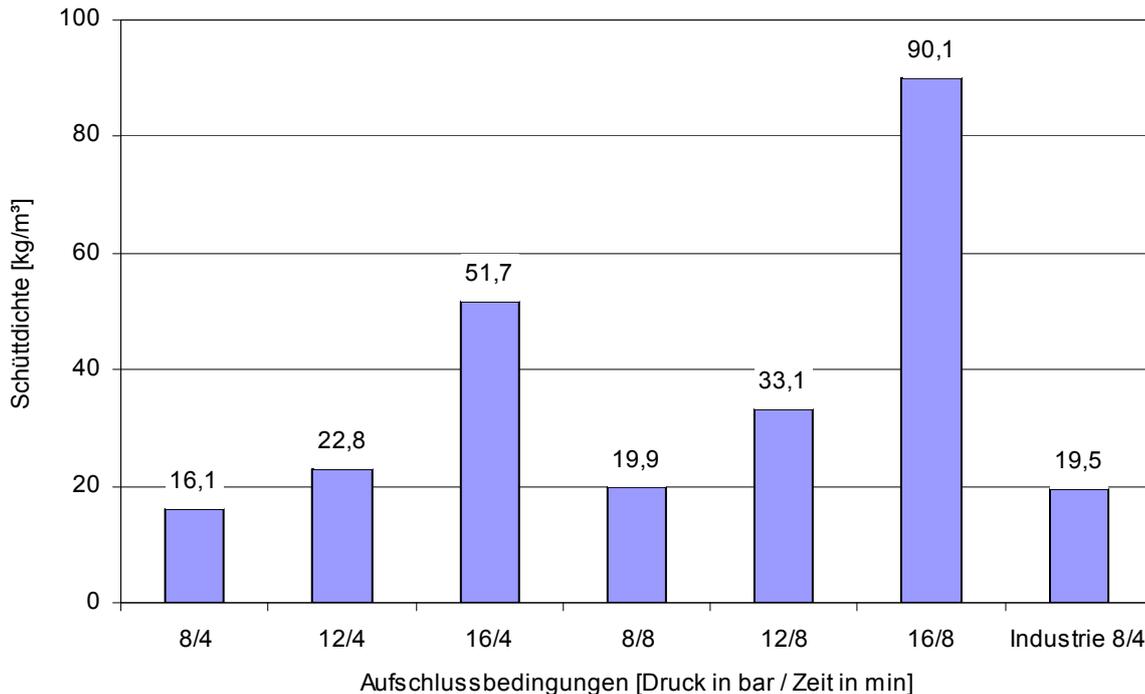


Abbildung 33 Einfluss der Aufschlussbedingungen auf die Schüttdichte (IHD-Werkstandard FHIS 281) von labor-technisch erzeugten Kieferholzfaserstoffen im Vergleich zu Industrie-Faserstoff aus Kieferholz

Es wird deutlich, dass bei Aufschlussdrücken von 12 bar (entspricht $187 \text{ }^\circ\text{C}$ im Kocher) aufgeschlossene Faserstoffe mit Schüttdichten von 33 kg/m^3 bei 8 min Dämpfzeit und 23 kg/m^3 bei 4 min Dämpfzeit zu industrieadäquate Werten (siehe oben, 15 und 30 kg/m^3) führt. Die Verlängerung der Dämpfzeit wirkte sich speziell bei dem hohen Druck gravierend aus.

Vor dem Hintergrund einer Übertragung der Versuchsergebnisse vom Labor- in den Industriemaßstab ist den Ergebnissen zur Schüttdichte und damit zu dem in Abhängigkeit von der Aufschlussintensität veränderten Streu- und Verdichtungsverhalten der Faservliese wesentliche Bedeutung beizumessen. Die intensiv aufgeschlossenen Faserstoffe wiesen nach der Faservliesbildung und Vorverdichtung deutlich reduzierte Streuhöhen auf, was neben nachteiligen Effekten (u. a. schlechtere Entgasung) durchaus auch positive Auswirkungen auf die folgenden Prozessstufen (u. a. geringere Energieaufwendungen für Vor- und Heißpressen, reduzierte maximale Pressdrücke) hat.

Die nachfolgende Abbildung zeigt, dass die Vlieshöhen der vorverdichteten Faserstoffe unmittelbar vor der Heißpresse, infolge vorhandener Rückstellkräfte im Faserstoff (Auffederung), stark differieren. Dabei lag die Vlieshöhe der Extremvariante (16 bar, 8 min) mit 60 mm nur etwa bei 30% der Normalvariante (8 bar, 4 min) mit 150 mm . Das aus

Industriefaserstoff gebildete Faservlies lag mit 120 mm genau zwischen vorstehender Normalvariante und der bei 8 bar über 8 min aufgeschlossenen Variante (115 mm).

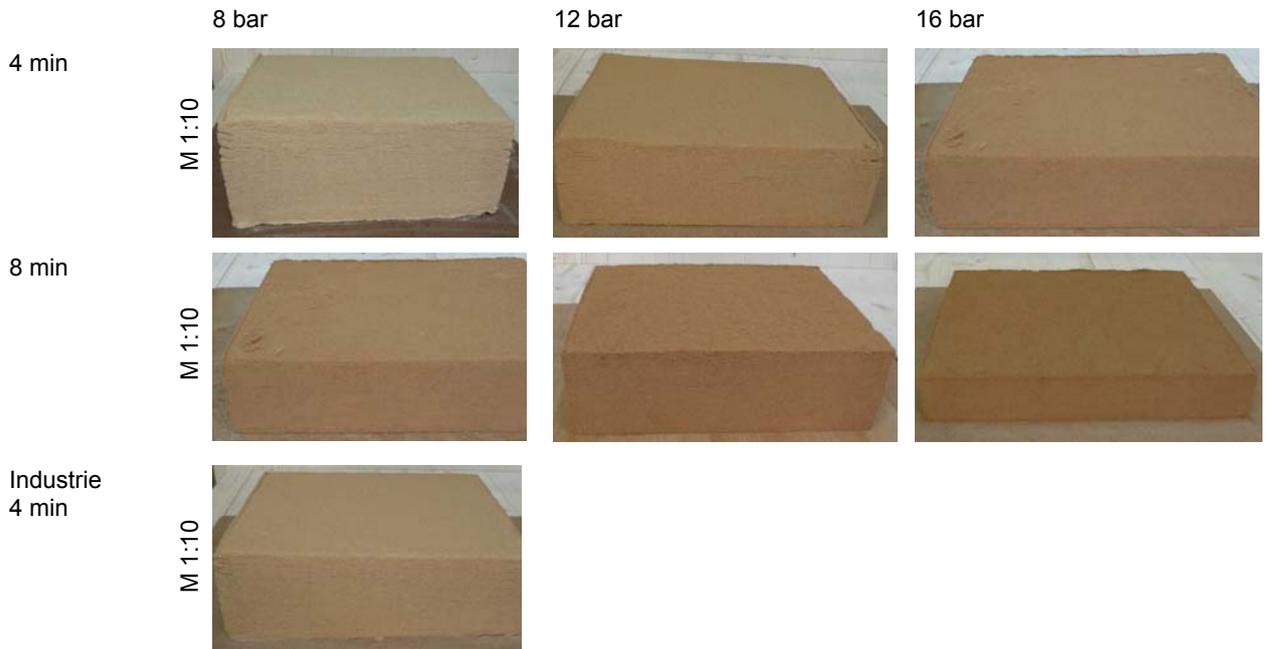


Abbildung 34 Einfluss der Aufschlussbedingungen auf die Faservlieshöhen (vor Heißpresse) von labortechnisch erzeugten Kiefernholzfasern im Vergleich zu Industrie-Faserstoff aus Kiefernholz (Fotos Stephani, IHD)

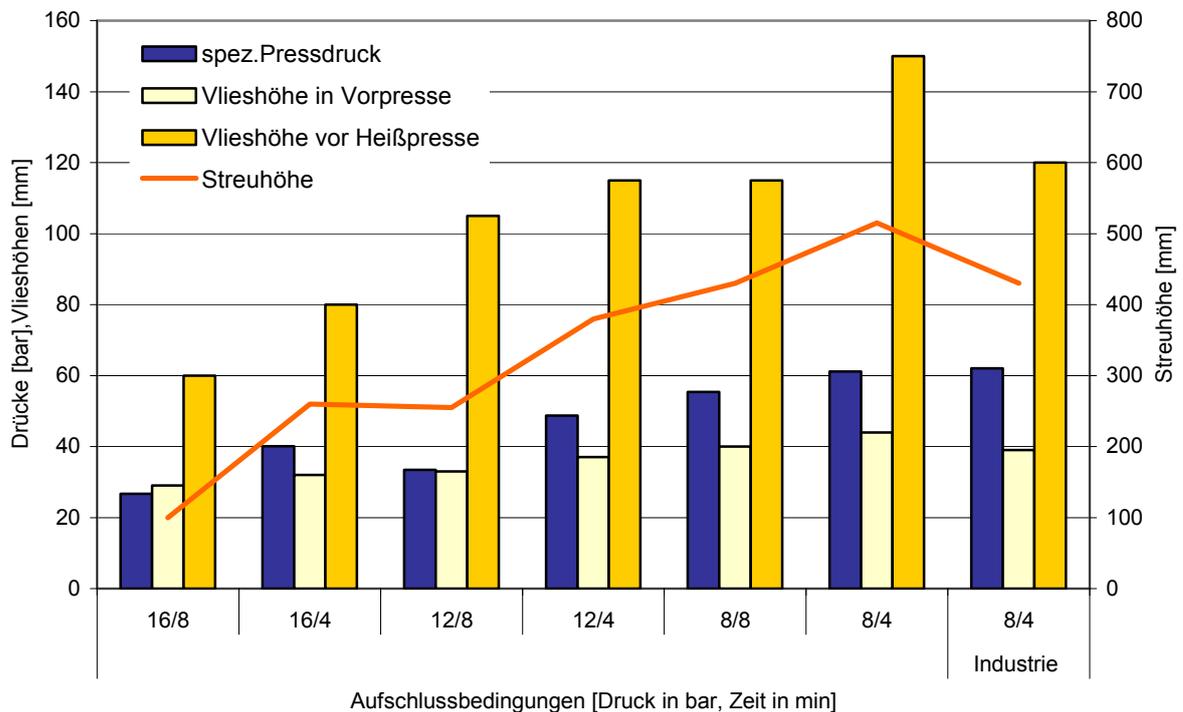


Abbildung 35 Einfluss der Aufschlussbedingungen auf die Streuhöhe (rechte Skalierung), Faservlieshöhen (vorverdichtet sowie unmittelbar vor Heißpresse) und maximalen spezifischen Pressdruck von labortechnisch erzeugten Kiefernholzfasern im Vergleich zu Industrie-Faserstoff aus Kiefernholz

Übereinstimmend dazu zeigt Abbildung 35 den gravierenden Einfluss der Aufschlussbedingungen auf die Streuhöhe der unverdichteten Vliese. Dabei wurden die höchsten Werte mit 515 mm für den industrieüblichen Aufschlussdruck (8 bar, 4 min) ermittelt. Die geringste Streuhöhe lag bei 100 mm für den bei 16 bar über 8 min aufgeschlossene-

nen Faserstoff. Relativ gleichläufige Tendenzen ergaben sich für die vorverdichtete Faservlieshöhe unmittelbar vor dem Heißpressen (Auffederung), während für die Faservlieshöhe in der Vorpresse keine signifikanten Unterschiede ermittelt wurden.

Der maximal erforderliche spezifische Pressdruck zur Verdichtung der unterschiedlichen Faservliese variierte gleichfalls erheblich und nahm mit zunehmender Aufschlussintensität signifikant ab. Ausgehend von 61 bar spezifischem Pressdruck für den industriüblichen Aufschluss (8 bar, 4 min), der im übrigen auch gut mit dem Pressdruck für das Faservlies aus Industriefaserstoff (65 bar) übereinstimmte, reduzierte sich der maximale spezifische Pressdruck auf 27 bar für den 16 bar –Aufschluss über 8 min. Sehr interessant sind auch die Ergebnisse für die Vliese aus bei 12 bar aufgeschlossenen Faserstoffen, die mit 33 bzw. 49 bar (bei 8 min bzw. 4 min Kochzeit) gleichfalls gegenüber der Normalvariante deutlich reduzierte, notwendige Pressdrücke aufwiesen. Im Falle einer industriellen Umsetzung könnten sich auf Grundlage dieser Ergebnisse erhebliche wirtschaftliche Effekte, z. B. durch den Einsatz „leichterer“ Vorpress- und Heißpressanlagen mit geringeren notwendigen spezifischen Pressdrücken, ergeben.

Die lichtmikroskopischen Untersuchungen veranschaulichen die Ausführungen zur Luftstrahlsieb- und QualScan-Analyse, wonach höhere Aufschlussdrücke und auch längere Dämpfzeiten zu einer feineren Faserstoff-Struktur mit kürzeren Faserlängen führen. Die folgende Abbildung 36 enthält Auflichtaufnahmen verschiedener Kiefernholzfasern. Gegenübergestellt sind auf der linken Seite Kiefernholzfasern, der unter industriüblichen Kocher-Einstellungen bei 8 bar und 4 min aufgeschlossen wurde und auf der rechten Seite Kiefernholzfasern, der bei 16 bar und 8 min aufgeschlossen wurde. Beide Aufnahmen zeigen die Fasern in 7-facher Vergrößerung.

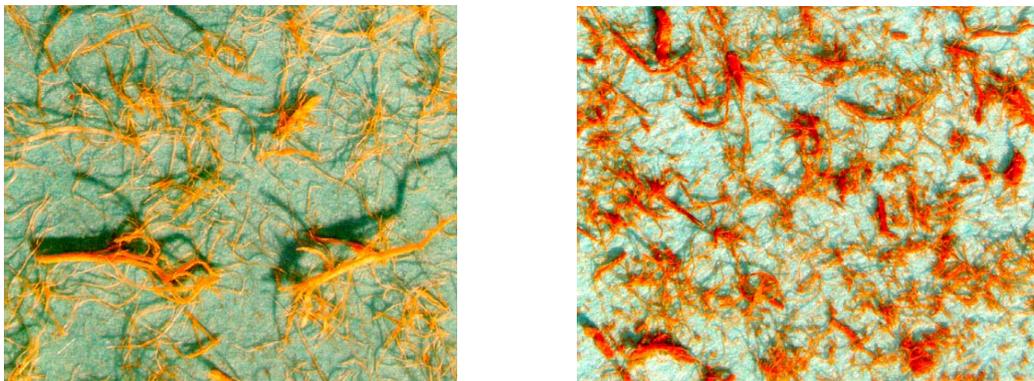


Abbildung 36 Auflichtaufnahmen von Kiefernholzfasern in 7-facher Vergrößerung, links: Faserstoff nach Aufschluss bei 8 bar und 4 min; rechts: Faserstoff nach Aufschluss bei 16 bar und 8 min (Fotos Weiß, IHD)

Neben deutlichen Farbunterschieden (zunehmende Aufschlussintensität bedingt dunkelbraune Fasern, die nach *Groom et al. /2004/* hauptsächlich auf das bei hohen Aufschlusstemperaturen in den Holzfasern verbleibende Lignin bei gleichzeitig herausgelösten Hemicellulosen zurückzuführen ist) resultiert aus der Aufschlussverschärfung eine ausdrückliche Veränderung der Faserstofffeinheit. Als weitere Begründung für die Farbänderung der Fasern gibt *Schiegl /2004/* an, dass die Ligninpolymere als Folge der thermohydrolytischen Beanspruchung oxidativ gespalten bzw. chromophore Gruppen durch Oxidation zerstört werden und dass die entstehenden Ligninfragmente aufgrund ihrer photochemischen Eigenschaften rasch dunkeln.

Die Untersuchungen am Rasterelektronenmikroskop erfolgten an allen Faserstoffvarianten mit 35-, 1000- bzw. 2000-facher Vergrößerung (Abbildung 37). Trotz intensiver Bemühungen bei der Probenahme stellen die jeweiligen Aufnahmen nur einen kleinen Bereich dar und müssten durch eine Vielzahl weiterer Bildauswertungen bestätigt werden.

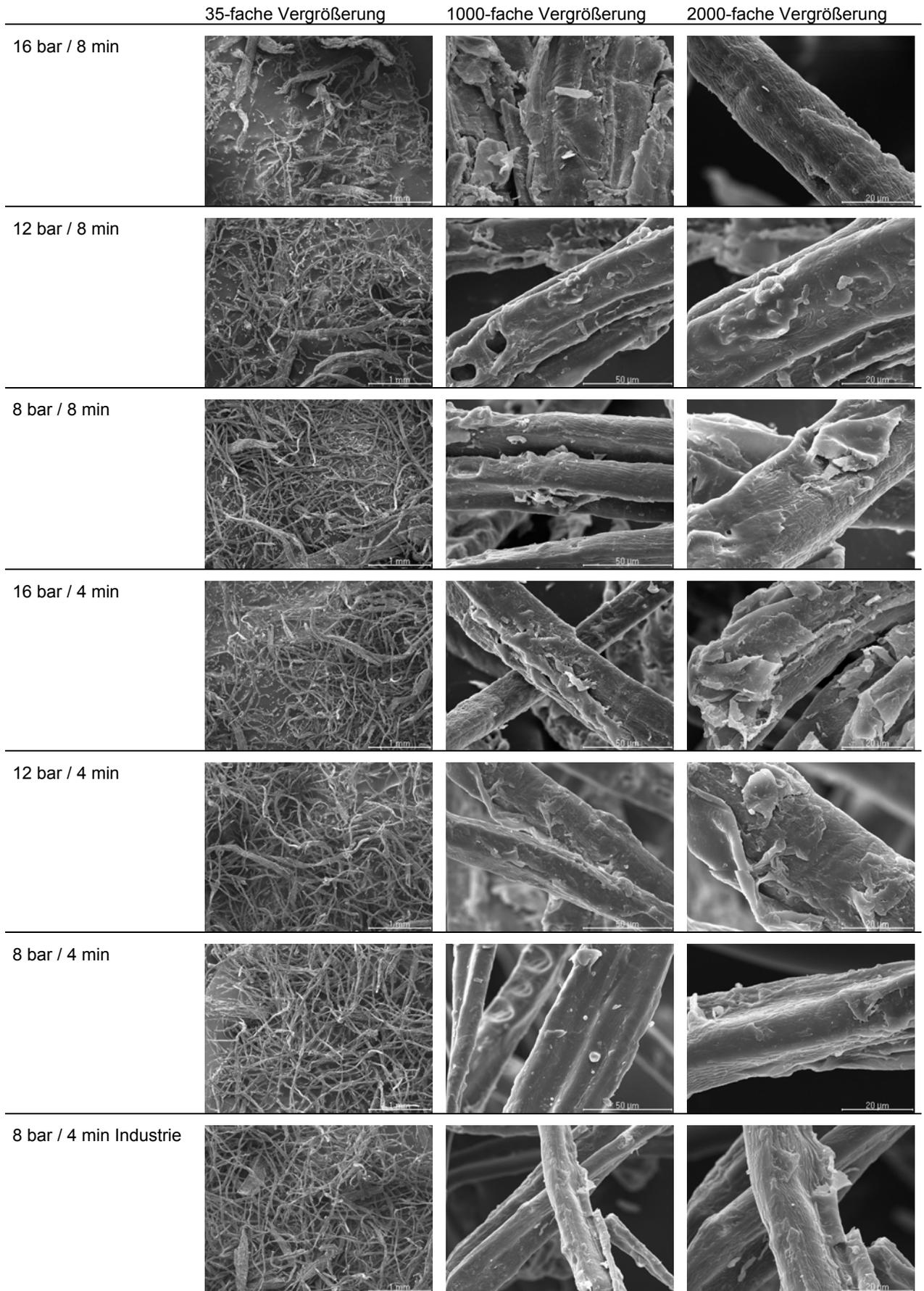


Abbildung 37 REM-Aufnahmen in 35-, 1000- und 2000-facher Vergrößerung der labortechnisch erzeugten Kiefernholzfasern im Vergleich zu Industrie-Faserstoff aus Kiefernholz (Fotos Bäucker, TU Dresden)

Die Aufnahmen mit 35-facher Vergrößerung zeigen bei dem Extremaufschluss mit 16 bar über 8 min übereinstimmend zu den Aussagen der Sieb- und QualScan-Analyse erhöhte Feinanteile und kürzere Fasern. Diese Variante weist zudem nicht aufgeschlossene Faserbündel (Splitter) auf, was ggf. damit zusammenhängt, dass die Faserbündel durch die hohe Beanspruchung im Kocher vor der Zerfaserung verkürzt werden, wohingegen sie bei weniger intensiven Aufschlussbedingungen im Verbund verbleiben.

Bei 1000-facher Vergrößerung weisen die Faseroberflächen eine „bucklige“ Struktur und eine größere Rauigkeit auf, was auf den bei Temperaturen von 200 °C nachweislich intensiveren thermohydrolytischen Holzabbau zurückzuführen ist. An diesen Fasern ist der flächenbezogene Anteil der Faseroberflächendeformation größer und bis zur Freilegung der Mikrofibrillen erkennbar (2000-fache Vergrößerung). Diese Aussagen stehen in Übereinstimmung mit den Ergebnissen von *Groom et al. 2000*, wonach ein zunehmender Aufschlussdruck zu einer größeren Faseroberflächenrauheit führt. Sinngemäß gelten diese Feststellungen auch für den 16 bar-Aufschluss über 4 min. Eine weitere Differenzierung bezüglich der Druckstufen 12 bzw. 8 bar sowie der variierten Kochzeiten konnte anhand der vorliegenden REM-Aufnahmen nicht nachgewiesen werden, was mit den Aussagen von *Mäbert und Krug* an bei unterschiedlichen Drücken aufgeschlossenen Faserstoffen übereinstimmt /2009/. Auffällig ist jedoch, dass speziell der Normalaufschluss (8 bar, 4 min) mit einer weniger intensiven hydrothermischen Belastung des Holzes zu einem großen Anteil langer Einzelfasern und sehr wenigen Splintern führt. Im Unterschied dazu weist der industriell bei vergleichbaren Einstellungen aufgeschlossene Faserstoff relativ hohe Splitteranteile auf, was möglicherweise auf hohe Feinanteile im Hackschnitzelausgangsmaterial zurückzuführen ist.

5.1.2 Chemische Eigenschaften und wesentliche Holzbestandteile

Die pH-Wert-Analyse von Kaltwasserextrakten aus thermo-mechanisch aufgeschlossenem Faserstoff ergab mit zunehmendem Aufschlussgrad sinkende Werte (Tabelle 19).

Tabelle 19 Einfluss der Aufschlussbedingungen auf pH-Wert, wasserlösliche Anteile bei Heißwasserextraktion, Extraktstoffgehalt in Ethanol-Cyclohexan, alkalische und saure Pufferkapazität, Formaldehydgehalt, Formaldehydabgabe, Ligningehalt und Pentosangehalt von labortechnisch erzeugten Kiefernholzfasern im Vergleich zu Industrie-Faserstoff aus Kiefernholz

Faserstoffeigenschaften	Aufschlussbedingungen: Druck, Temperatur, Zeit							
	8 bar 170 °C 4 min	12 bar 187 °C 4 min	16 bar 200 °C 4 min	8 bar 170 °C 8 min	12 bar 187 °C 8 min	16 bar 200 °C 8 min	8 bar 170 °C 4 min	
	Variante							
	6	5	4	3	2	1	Industrie	
pH-Wert bei Kaltwasserextraktion []	4,6	4,4	4,1	4,4	4,2	4,0	4,4	
wasserlösliche Anteile bei Heißwasserextraktion [% /atro Holz]	10,09	16,09	18,56	12,74	18,41	19,52	13,20	
Extraktstoffgehalt Ethanol-Cyclohexan [% /atro Holz]	4,16	7,80	11,23	4,08	7,53	12,21	5,29	
Pufferkapazität alkalisch [mMol H ₂ SO ₄ /100 g atro Holz]	1,01	1,20	1,24	1,15	1,27	1,32	1,10	
Pufferkapazität sauer [mMol NaOH /100 g atro Holz]	3,12	4,58	7,16	4,75	6,22	9,76	4,64	
Formaldehydgehalt [mg HCHO /100 g atro Holz]	A-Wert	1,6	1,1	1,5	1,5	1,4	2,2	1,6
	B-Wert	1,5	1,3	1,9	1,5	1,6	2,7	1,8
Formaldehydabgabe [mg HCHO /1000 g atro Holz] 24h-Wert	20,23	19,40	28,87	20,94	14,33	32,30	20,58	
Ligningehalt [% /atro Holz]	29,43	32,36	33,38	30,71	32,56	33,98	31,05	
Pentosangehalt [% /atro Holz]	8,40	7,36	6,33	8,19	6,36	4,96	8,16	

Dahingegen nahmen bei Aufschlussintensivierung der Gehalt an wasserlöslichen Stoffen bei Heißwasserextraktion, der Extraktstoffgehalt in Ethanol-Cyclohexan sowie die Pufferkapazität mit Natronlauge bis zum Erreichen des Neutralpunktes signifikant zu.

Mit diesen Untersuchungen konnten aus der Literatur bekannte Ergebnisse /u. a. Jensen, Kehr 1971; Hsu et al. 1988; Groom et al. 2000/ bestätigt und um Werte bisher nicht untersuchter Aufschlussdrücke bzw. Aufschlusszeiten ergänzt werden. Die Zunahme der wasserlöslichen Anteile ist dabei vorwiegend auf das „Löslichwerden“ der Hemicellulose zurückzuführen. Dieses „Löslichwerden“ wird, insbesondere bei Temperaturen > 180 °C und unter dem Einfluss thermisch abgespaltener Anteile an Ameisen- und Essigsäure, durch den Abbau von langen Polysaccharidketten begünstigt. Bekanntlich weist Kiefer gegenüber anderen Holzarten (Fichte, Buche) mit ca. 3,5 g Ameisensäure pro 100 g atro Faserstoff und 1,8 g Essigsäure pro 100 g atro Faserstoff relativ hohe Säureanteile auf, die in Abhängigkeit der schärfer werdenden Aufschlussbedingungen freigesetzt werden und somit sowohl die Abnahme der pH-Werte als auch die Zunahme des Puffervermögens begründen.

Bezüglich Formaldehydgehalt und Formaldehydabgabe weist die Extremvariante (Aufschluss bei 16 bar über 8 min Dämpfzeit) die höchsten Werte auf. Vermutlich werden die Faserstoffe bei diesen intensiven Aufschlussbedingungen stärker thermisch angegriffen und besitzen deshalb ein höheres Formaldehydemissionspotential. Schäfer und Roffael /2000/ weisen darauf hin, dass insbesondere beim industriellen Trocknen von Holz durch Thermolyse des Lignins Formaldehyd entstehen kann. Die von Hasch und Grundwald ermittelten Perforatorwerte an industriell erzeugten Faserstoffen bestätigen die Ergebnisse des Industriefaserstoffs /Hasch, Grunwald 2006/.

Interessanterweise ergaben sich für die 12 bar –Varianten die niedrigsten Formaldehydabgaben, wohingegen die 8 bar –Varianten jeweils geringfügig höhere Werte zeigten. Die Verlängerung der Dämpfzeit im Kocher von 4 auf 8 min führte nur beim Aufschluss mit 16 bar zu höheren Formaldehydemissionen. Hingegen lagen die Werte bei einem Aufschlussdruck von 8 bar auf einem vergleichbaren Niveau und beim 12 bar –Aufschluss ergaben sich durch die Verlängerung sogar niedrigere Werte.

Die mit Ausnahme von der Extremvariante ansonsten grundsätzlich niedrigen Formaldehydhalte aller anderen Versuchsvarianten sind möglicherweise auf die verhältnismäßig geringe Temperaturbelastung bei der Faserstofftrocknung in Sundsvall (Trocknereingang um 120 °C, Trocknerausgang um 70 °C) zurückzuführen. Die Formaldehydeigenschaften bestätigen bisherige Untersuchungsergebnisse /u. a. Schneider 1999/ und ergänzen den Stand des Wissens um bislang nicht untersuchte Bereiche.

Gleiches gilt für die Bestimmung des Lignin- und Pentosangehalts. Sowohl Schneider /1999/ als auch Groom et al. /2000/ stellten fest, dass der Ligningehalt mit zunehmender Aufschlussintensität zunimmt. Groom et al. untersuchten Faserstoffe, die bei 4, 8 und 12 bar aufgeschlossen wurden und ermittelten bei 8 und 12 bar mit 30,6 bzw. 32,4 % Ligningehalte, die gut mit den Ergebnissen aus Tabelle 19 übereinstimmen. Der mit der Aufschlussintensität steigende Ligningehalt ist möglicherweise darauf zurückzuführen, dass die Hemicellulosen bei TMP-Aufschluss stärker abgebaut werden, so dass der auf die verbleibende Masse bezogene Ligningehalt rechnerisch zunimmt.

Allgemein wird angenommen, dass die thermische Verschmelzung des Lignins nur dann eintritt, wenn das Lignin plastifiziert wird und gleichzeitig Kohlenhydrate aus der Holzsubstanz hydrolysiert und herausgelöst werden /Kleinert und Marrassini 1964/.

Die Prozesse der hydrothermischen Vorbehandlung und Zerfaserung des Holzes werden von einer ständigen Hydrolyse der Holzbestandteile begleitet. Dabei kommt es be-

reits in Anwesenheit geringer Wassermengen zu thermohydrolytischen Umsetzungen im Holz, im besonderen Maße an den Pentosen /Runkel 1951/. Die Acetylgruppen der Hemicellulose werden unter Einwirkung von Wärme und Druck u. a. zu Ameisen- und Essigsäure abgebaut, die die Hydrolyse des Holzes vorantreiben. I. d. R. sind die Hemicellulosen am meisten durch den Säureangriff gefährdet /Pecina 1981a, 1981b/.

Um festzustellen, wie intensivere Aufschlussbedingungen den Hemicellulosegehalt beeinflussen, erfolgte exemplarisch die Bestimmung der Pentosengehalte. Dabei zogen sowohl eine Erhöhung des Aufschlussdrucks als auch die Verlängerung der Dämpfzeit abnehmende Pentosengehalte nach sich, was gleichfalls Ergebnis der Arbeiten von Schneider /1999/ war. Übereinstimmend dazu stellten Groom et al. /2000/ fest, dass eine Intensivierung des Aufschlussdruckes bis auf 12 bar zu einer signifikanten Abnahme des Hemicellulosegehalts führte.

Als Folge der thermischen Holzbehandlung werden zunächst die Pentosane mit niedrigstem Molekulargewicht abgebaut. Sie tragen damit unmittelbar zur Erhöhung des Wasserextraktgehalts bei /Schneider 1999/. Übereinstimmend führten intensivere Aufschlussbedingungen generell zu höheren wasserlöslichen Anteilen bei Heißwasserextraktion sowie zu höheren Extraktstoffgehalten in Ethanol-Cyclohexan (vgl. Tabelle 19).

5.1.3 Eigenschaften nass gebildeter Prüfblätter

Für alle nachfolgend diskutierten Eigenschaften gilt, dass ein Vergleich der Varianten untereinander (z. B. in Abhängigkeit vom Aufschlussdruck) möglich ist, Normanforderungen zur Bewertung der Ergebnisse aber nicht existieren.

Die Auswertung des Entwässerungsverhaltens der Faserstoffvarianten nach dem Schopper-Riegler-Verfahren ergab signifikante Unterschiede (Abbildung 38).

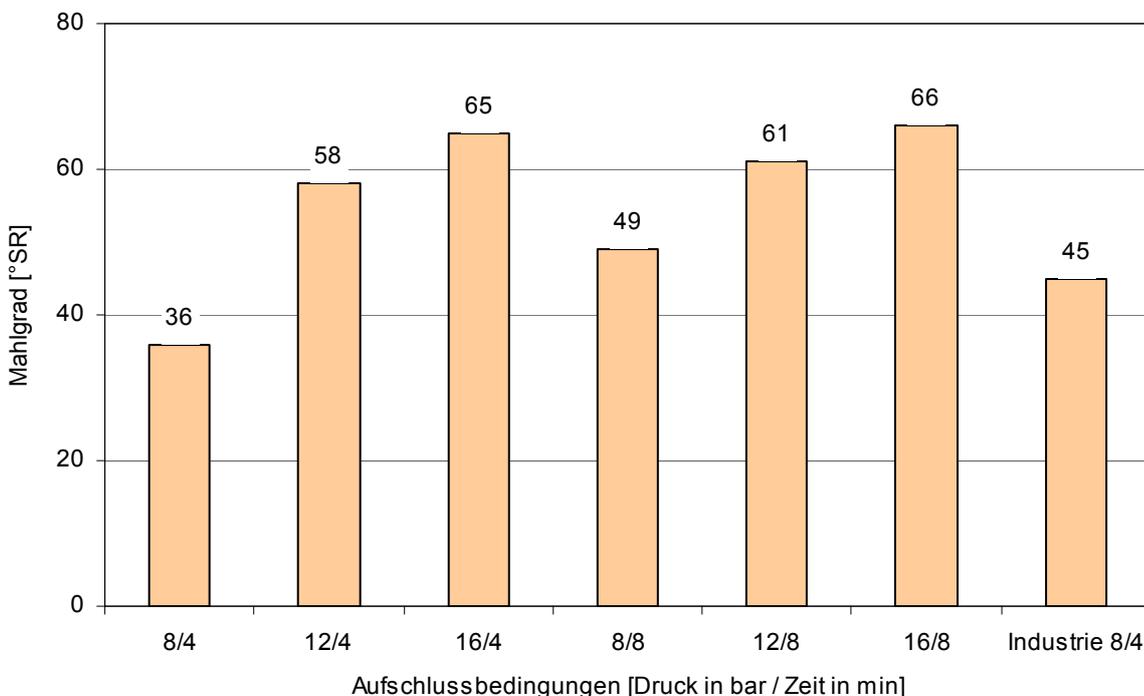


Abbildung 38 Einfluss der Aufschlussbedingungen auf den Mahlgrad Schopper-Riegler [°SR] als Maß für das Entwässerungsverhalten von labortechnisch erzeugten Kiefernholzfaserstoffen im Vergleich zu Industrie-Faserstoff aus Kiefernholz

Allgemein gilt, dass der Mahlgrad Schopper-Riegler mit der Abnahme der Partikelgröße bzw. mit der Steigerung der Oberflächenrauigkeit der Fasern zunimmt.

Erwartungsgemäß weisen die bei den höchsten Aufschlussdrücken von 16 bar aufgeschlossenen Faserstoffe die höchsten Mahlgrade SR auf. Dieser Effekt kann nach den Ergebnissen der morphologischen Fasercharakterisierung mit dem relativ hohen Feinst- und Feinanteil der Extremvarianten aufgrund der höheren thermomechanischen Belastung während der Zerkleinerung begründet werden. Übereinstimmend mit den Aussagen der REM-Aufnahmen zeigen die 16 bar-Faserstoffe zudem eine relativ spröde, wenig homogene Oberflächenbeschaffenheit.

Die mit der Erhöhung des Aufschlussdruckes einhergehende Abnahme des Hemicellulosegehalts bei gleichzeitiger Zunahme des Extraktstoffgehaltes lässt zudem ein hydrophoberes Verhalten der Faserstoffe und daraus resultierend eine Quellungsbehinderung (unmittelbar nach Suspendierung) erwarten.

Eine Verlängerung der Dämpfdauer von 4 auf 8 min bewirkte gleichfalls höhere Mahlgrade. Allerdings ist der Unterschied bei den 16 und 12 bar-Varianten mit 1 bzw. 3 °SR relativ gering. Bei dem industriüblichen Aufschluss mit 8 bar resultiert aus der verlängerten Kochzeit eine Erhöhung des Mahlgrades von 36 auf 49 °SR. Der vergleichend mitgeprüfte Industriefaserstoff ordnet sich mit 45 °SR gut in die labortechnisch erzeugten 8 bar-Faserstoffe ein.

Die Ergebnisse zum Mahlgrad werden durch die Resultate der Prüfungen an den nass gebildeten, vor der Prüfung getrockneten Prüfblättern bestätigt (Tabelle 20), wobei der Industriefaserstoff sich jeweils im Bereich der 8 bar-Faserstoffe einordnet.

Tabelle 20 Einfluss der Aufschlussbedingungen auf Reißlänge, Falz- und Berstfestigkeit sowie Weißgrad jeweils nass gebildeter und getrockneter Prüfblätter (Blattbildungsanlage nach Rapid Köthen, Verhältnis Holzfasern- zu Kiefersulfatzellstoff 1:1) auf Basis labortechnisch erzeugter Kiefernholzfaserstoffe im Vergleich zu Industrie-Faserstoff aus Kiefernholz

Prüfblatteigenschaften	Aufschlussbedingungen:						
	Druck, Temperatur, Zeit						
	8 bar 170 °C 4 min	12 bar 187 °C 4 min	16 bar 200 °C 4 min	8 bar 170 °C 8 min	12 bar 187 °C 8 min	16 bar 200 °C 8 min	8 bar 170 °C 4 min
	Variante						
	6	5	4	3	2	1	Industrie
Reißlänge [m]	4830	4780	4230	4400	4370	4330	4570
Falzfestigkeit [N/mm ²]	92	63	49	67	62	35	75
Berstfestigkeit [(kPa m ²)/g]	2,44	2,29	2,06	2,25	2,14	2,07	2,16
Weißgrad [%]	30,1	24,1	21,2	26,4	22,4	20,4	27,3

Übereinstimmend zu den vorstehenden Aussagen ist festzustellen, dass mit zunehmender Aufschlussintensität (und damit stärkerer thermomechanischer Beanspruchung des Holzes) Reißlänge, Falzfestigkeit und Berstfestigkeit der Prüfblätter abnehmen. Wiederum resultiert aus der gestuften Druckerhöhung gegenüber der verlängerten Dämpfzeit eine stärkere Abnahme dieser papierrelevanten Eigenschaften. Als Ursache dafür wird insbesondere die veränderte Fasermorphologie (inkl. Versprödung der Faseroberfläche) angesehen.

In Analogie zu den Erkenntnissen der lichtmikroskopischen Untersuchungen (vgl. Abbildung 36) bedingt die Verschärfung der Aufschlussbedingungen u. a. durch thermohydrolytische Veränderungen der Holzbestandteile (signifikante Abnahme des Hemicelluloseanteils, photochemische Lignineigenschaften) eine Abnahme des Weißgrades der hergestellten Prüfblätter.

Benetzungsverhalten

Die Prüfblätter wiesen in Abhängigkeit von den Aufschlussbedingungen deutliche Unterschiede in ihrem Benetzungsverhalten auf. Längere Benetzungszeiten stehen dabei für einen besser hydrophobierten Faserstoff (Abbildung 39).

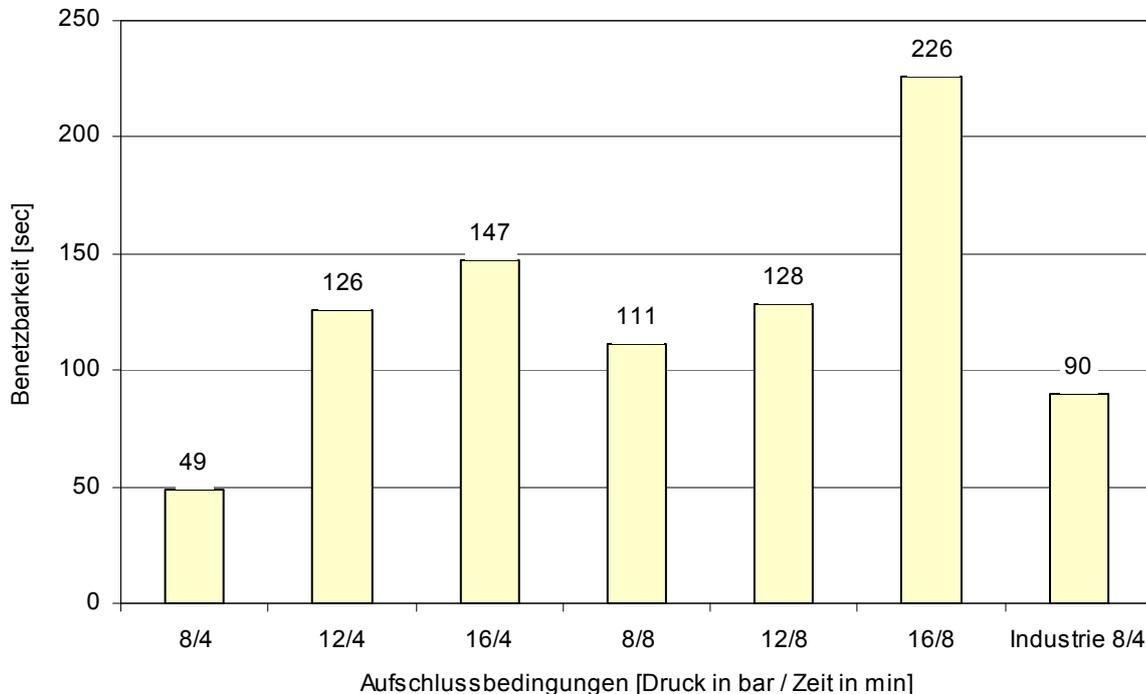


Abbildung 39 Einfluss der Aufschlussbedingungen auf die Benetzbarkeit jeweils nass gebildeter und getrockneter Prüfblätter (Blattbildungsanlage nach Rapid Köthen, Verhältnis Holzfaser- zu Kiefersulfatzellstoff 1:1) auf Basis labor-technisch erzeugter Kiefernholzfasernstoffe im Vergleich zu Industrie-Faserstoff aus Kiefernholz

Erwartungsgemäß ließen sich die Prüfblätter, die bei 16 bar aufgeschlossene Faserstoffe enthielten, am schwersten benetzen. Dabei betrug die Zeit vom Aufbringen des Wassertropfens auf das Prüfblatt bis zum vollständigen Eindringen für die über 8 min am intensivsten aufgeschlossene Variante durchschnittlich 226 sec. Mit einer Benetzungszeit von 147 sec wurde für den 16 bar-Faserstoff, der mit einer Vorwärmzeit von 4 min aufgeschlossen wurde, der zweithöchste Wert ermittelt, was gleichfalls für einen sehr hydrophoben Faserstoff spricht. Als maßgebliche Ursache für die signifikant längere Benetzungsdauer der 16 bar-Faserstoffe wird – wie bereits diskutiert – die mit der Erhöhung des Aufschlussdruckes einhergehende Abnahme des Hemicellulosegehaltes bei gleichzeitiger Zunahme des Extraktstoffgehaltes und die daraus resultierend reduzierte Wasseraufnahmefähigkeit angesehen.

Bei den Prüfblättern aus 12 bar-Faserstoffen ergeben sich bezüglich der verschiedenen Dämpfzeiten keine Benetzungszeitunterschiede, wohl aber grundsätzlich längere Benetzungszeiten gegenüber Prüfblättern aus 8 bar-Faserstoffen. Prüfblätter aus industriell üblich bei 8 bar über 4 min aufgeschlossene Faserstoffen zeigten mit durchschnittlich 49 sec die kürzesten Benetzungszeiten. Aus der Verlängerung der Kochzeit auf 8 min resultierte eine signifikante Verlängerung der Benetzungszeit auf 111 sec. Der gleichfalls bei 8 bar aufgeschlossene Industriefaserstoff lag mit 90 sec zwischen den beiden 8 bar-Laborvarianten, was eine industrieadäquate labortechnische Faserstoffherstellung wiederholt bestätigt.

Zusammenfassend ist zu den Ergebnissen zum Benetzungsverhalten einzuschätzen, dass der bisherige Stand des Wissens /*Schneider 1999, Roffael et al. 2002*/ bestätigt und um bisher nicht untersuchte Aufschlussbedingungen ergänzt werden konnte. Grundsätzlich führt die Erhöhung des Aufschlussdruckes zu einer Verlängerung der Benetzungszeit und damit zu besser hydrophobierten Prüflättern. Während in industriellen Druckbereichen beim Faserstoffaufschluss (8 bar) eine Verlängerung der Dämpfzeit zu einer Verdopplung der Benetzungszeit führte und auch bei 16 bar Aufschlussdruck längere Kochzeiten deutlich größere Benetzungszeiten ergaben, wurden bei 12 bar-Aufschlussdruck-Varianten keine Benetzungszeitunterschiede festgestellt.

5.1.4 Energiebedarf und Ausbeute bei Faserstoffherstellung

Die nachfolgende Tabelle enthält den bei den Aufschlussversuchen in Sundsvall bestimmten elektrischen Energieverbrauch für die Zerfaserung sowie den Dampfverbrauch für Kocher und Vordämpfer unter Berücksichtigung eines einheitlichen Materialdurchsatzes und einer definierten thermischen Energiemenge zur Dampferzeugung.

Vergleichend einbezogen wurde der Industriefaserstoff, der im Interesse analoger Bedingungen mit einer identischen Energiemenge für die Dampferzeugung betrachtet wurde. Die Angaben zu Durchsatz, Energieverbrauch für Zerfaserung und Dampfverbrauch erfolgten durch den Hersteller (Tabelle 21).

Tabelle 21 Einfluss der Aufschlussbedingungen auf den Energieverbrauch für Zerfaserung, Dampfverbrauch, Dampfbedarf, normierten Dampfbedarf sowie den Gesamtenergiebedarf zur Herstellung der labortechnisch erzeugten Kiefernholzfasern (Angaben Defibrator, Sundsvall), Ausnahme Industriefaserstoff (Angaben von *Wolf 2008*)

	Aufschlussbedingungen:							
	Druck, Temperatur, Zeit							
	8 bar 170 °C 4 min	12 bar 187 °C 4 min	16 bar 200 °C 4 min	8 bar 170 °C 8 min	12 bar 187 °C 8 min	16 bar 200 °C 8 min	8 bar 170 °C 4 min	
	Variante							
	6	5	4	3	2	1	Industrie	
Durchsatz [t Faserstoff _{atro} /h]	0,08							35
Energie $W_{\text{elektrisch}}$ für Zerfaserung [kWh/t Faserstoff _{atro}]	139	94	86	80	60	50	146	
Dampfverbrauch [t/h]	0,175	0,221	0,251	0,185	0,236	0,298	15,75	
Dampfbedarf [t Dampf/t Faserstoff _{atro}]	2,188	2,763	3,138	2,313	2,950	3,725	0,450	
Energie $W_{\text{thermisch}}$ für Dampferzeugung [kWh/t Dampf]	500							500
Energie $W_{\text{thermisch}}$ für Dampfbedarf [kWh/t Faserstoff _{atro}]	1094	1382	1569	1157	1475	1863	225	
Energie $W_{\text{thermisch}}$ normiert ⁴⁷ für Dampfbedarf [kWh/t Faserstoff _{atro}]	225	284	323	238	303	383	225	
Gesamtenergiebedarf $W_{\text{elektrisch}} + W_{\text{thermisch}}$ [kWh/t Faserstoff _{atro}]	364	378	409	318	363	433	371	

⁴⁷ Der normierte Dampfenergiebedarf wurde unter der Annahme errechnet, dass die Energie für den Dampfbedarf zur labortechnischen Herstellung der industriellen Faserstoff-Versuchsvariante (Var. 6: 8 bar/4 min) der Energie für den Dampfbedarf zur industriellen Faserstoffherstellung (Var. 7: 8 bar/4 min) entspricht. Auf Grundlage dieser Normierungsannahme erfolgte dann über Verhältnisgleichungen die Umrechnung der weiteren Faserstoff-Versuchsvarianten (Var. 1 – 5). Die Normierung war erforderlich, da Laborrefiner- gegenüber industriellen Refineranlagen durch sehr ungünstige Verhältnisse von Kocheroberfläche zu Kochervolumen sowie durch eine ungenügende bzw. fehlende Kocherisolierung einen 5 bis 10-fach höheren Dampfbedarf aufweisen.

Nach Aussagen Lieferanten und Betreibern von Refineranlagen /*Mohr 2004; Mraz 2006*/ ist bekannt, dass Laborrefineranlagen (max. 20“ Refiner) gegenüber industriellen Refineranlagen (bis 70“ Refiner) zum Einen aufgrund ihres sehr ungünstigen Verhältnisses von Kocheroberfläche zu Kochervolumen und andererseits durch einen ungenügenden bzw. fehlende Kocherisolierung einen 5 bis 10-fach höheren Dampfbedarf haben (vgl. Angaben in Tabelle 21, Dampfbedarf). Deshalb erfolgte zur Betrachtung des Gesamtenergiebedarfes die Errechnung eines normierten Dampfenergiebedarfes unter der Annahme, dass die Energie für den Dampfbedarf zur labortechnischen Herstellung der industrieüblichen Faserstoff-Versuchsvariante (Var. 6: 8 bar/4 min) der Energie für den Dampfbedarf zur industriellen Faserstoffherstellung (Var. 7: 8 bar/4 min) entspricht. Diese Normierung ermöglichte eine realistische Bewertung des Dampfenergiebedarfes.

Es sei aber bereits an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass zahlreiche Gespräche mit MDF-Herstellern zu dieser Thematik ergaben, dass in Industrieanlagen Dampfenergie prozesstechnisch bedingt (u. a. durch eigene Energieerzeugung) i. d. R. in ausreichendem Maße (und quasi kostenfrei) vorhanden ist. Von entscheidender Bedeutung für die Wirtschaftlichkeit des Herstellungsprozesses ist hingegen der Verbrauch an elektrischer Energie für die Zerfaserung beim thermomechanischen Holzaufschluss.

Wie Tabelle 21 zeigt, wirken sich die deutlich höheren Energieaufwendungen zur Erzeugung hoher Drücke und längerer Verweilzeiten durch einen zunehmenden Plastifizierungsgrad der Hackschnitzel überaus positiv auf den Energieaufwand bei der Zerfaserung aus. So verringerte sich die Zerfaserungsenergiemenge beim Faserstoffaufschluss mit maximalem Aufschlussdruck von 16 bar und 8 min Dämpfzeit auf etwa 1 Drittel gegenüber der industrieüblichen Zerfaserungsvariante mit 8 bar und 4 min.

Im Unterschied zu den 70 Jahre alten Erfahrungen von *Asplund /1939/* (Aussage: Kraftbedarf für Nadelholzzerfaserung sinkt insbesondere ab Aufschlussstemperaturen von 160 °C, vgl. Abbildung 2) wurde festgestellt, dass das größte Energieeinsparpotential im Temperaturbereich von 180 bis 200 °C liegt. Die *Asplund*-Untersuchungen endeten seinerzeit bei ~185 °C.

Sehr interessant ist der Vergleich der 8 bar-Varianten: Eine Verlängerung der Dämpfzeit (durch eine Vergrößerung des Kochers oder eine reduzierte Produktionsgeschwindigkeit) reduzierte die Zerfaserungsenergiemenge von 139 auf 80 kWh/t Faserstoff_{atro}.

Der Dampfverbrauch ist insbesondere bei den intensiveren Aufschlussbedingungen erheblich höher. So wurden für die Bereitstellung von 16 bar bei einer Dämpfzeit von 4 min 251 kg Dampf/h und bei einer Dämpfzeit von 8 min sogar 298 kg Dampf/h benötigt. Trotzdem lassen die deutlich reduzierten Zerfaserungsenergiewerte bei einer Aufschlussintensivierung zumindest eine anteilmäßige Kompensation des höheren thermischen Energieaufwandes für die Dampferzeugung erwarten.

Die bei 8 bar aufgeschlossene Industriefaserstoffvariante liegt mit 146 kWh/t im Bereich der 8 bar-Laborvariante mit 4 min Dämpfzeit. Unter Industriebedingungen ist bei der Zerfaserung von Kiefernholz hackschnitzeln für die Herstellung von MDF mit einem Energiebedarf von 130 bis 160 kWh/t Faserstoff_{atro} zu rechnen. Während für die Herstellung von Panel-MDF (mit Rohdichten zwischen 630 und 680 kg/m³ und vergleichsweise geringen Anforderungen an die Faserqualität) für die Zerfaserung zwischen 100 und 120 kWh/t benötigt werden, liegt der Energieverbrauch für MDF in Tieffräsqualität (mit mittleren Rohdichten ≥ 780 kg/m³ und hohen Anforderungen an Faserqualität) bei 140 bis 170 kWh/t. Bei Verwendung von großen Sägespananteilen steigt der Energieverbrauch auf bis zu 220 kWh/t an. Für die Herstellung von HDF (mit Rohdichten über

830 kg/m³) liegt der Energieverbrauch hingegen mit 100 bis 130 kWh/t niedriger, was mit den geringeren Anforderungen an die Faserqualität begründet wird. In der Folge kann mit etwas „offenerem“ Mahlpalt produziert werden /Wolf 2010/.

Bestätigend dazu gibt *Roll /2008/* für die Zerfaserung von Fichten-Nadelholz einen Energieverbrauch von 80 bis 170 kWh/t Faserstoff_{atro} (für Sägespäne 250 bis 400 kWh/t Faserstoff_{atro}) an.

Erwartungsgemäß und übereinstimmend zu Industrieerfahrungen führen sowohl die höheren Drücke als auch die Verlängerung der Dämpfzeit zu einer signifikanten Reduzierung der elektrischen Zerfaserungsenergie. Bei Betrachtung des Gesamtenergiebedarfs ist allerdings festzustellen, dass insbesondere die bei Aufschlussdrucksteigerungen höheren Aufwendungen für thermische Energie zur Dampferzeugung über die gleichzeitige Reduktion der elektrischen Zerfaserungsenergie nicht vollständig ausgeglichen werden können (Abbildung 40). Interessanterweise resultierte aus einer Aufschlussintensivierung über verlängerte Kochzeiten bei den 8 bar-Faserstoffen ein deutlicher und bei den 12 bar-Faserstoffen immer noch ein messbarer geringerer Gesamtenergiebedarf. Die Industriefaserstoffvariante ordnete sich im Bereich über 4 min bei 8 bzw. 12 bar aufgeschlossenem Faserstoff ein.

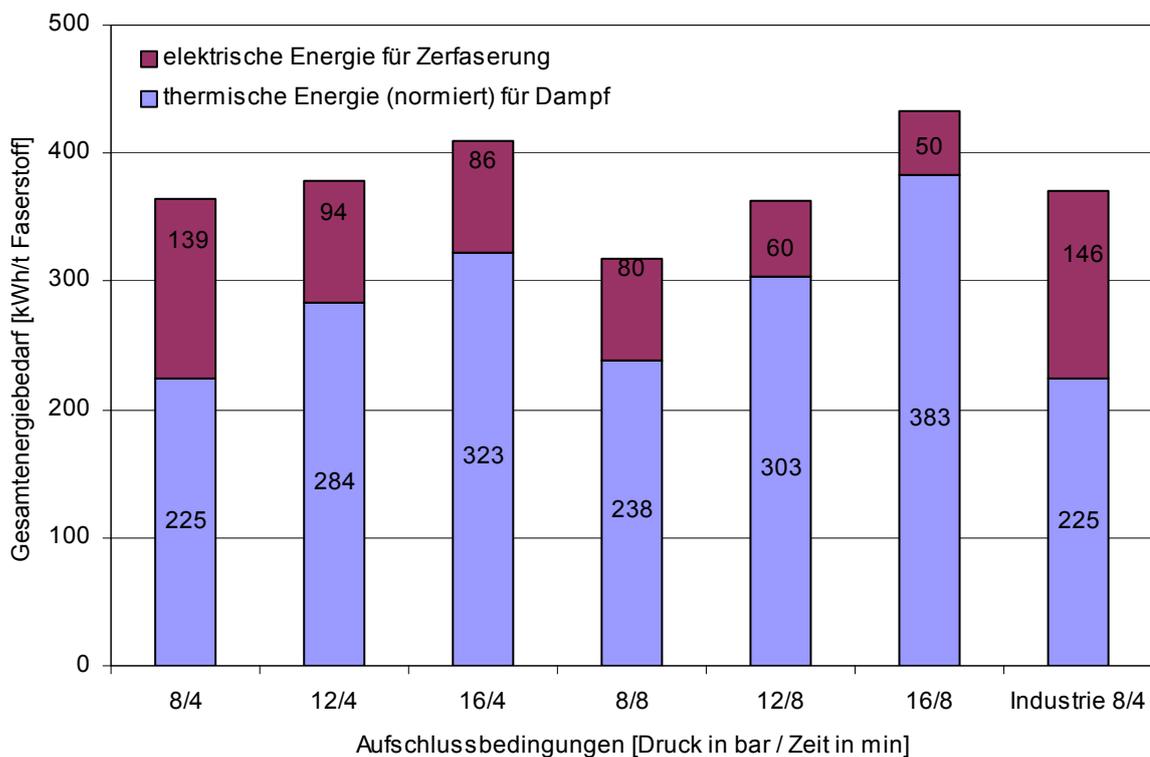


Abbildung 40 Einfluss der Aufschlussbedingungen auf den Gesamtenergiebedarf (Summe aus elektrischer Energie für Zerfaserung und thermischer Energie für Dampferzeugung) zur Herstellung der labortechnisch erzeugten Kiefernholzfasern (Angaben Defibrator, Sundsvall), Ausnahme Industriefaserstoff (Angaben Wolf 2008)

Wie bereits erwähnt, zeigten intensive Gespräche mit verschiedenen MDF-Herstellern, dass in den Industrieanlagen Dampfenergie prozesstechnisch bedingt quasi kostenfrei in ausreichendem Maße vorhanden ist, hingegen die elektrische Energie für die Zerfaserung beim thermomechanischen Holzaufschluss ein entscheidender Kostenfaktor für die Ökonomie des Herstellungsprozesses ist.

Das diesbezüglich nachgewiesene Einsparpotential an Elektroenergie bietet die Chance, Faserplatten nach dem Trockenverfahren wesentlich energieeffizienter und damit wirtschaftlicher herzustellen.

Erfahrungen aus Industrieversuchen mit Dampfdrücken von 11 bar bestätigen das immense Energieeinsparpotential gegenüber den üblicherweise realisierten 8 bis 9 bar /Wolf 2009/. Es konnte nachgewiesen werden, dass eine Verlängerung der Dämpfzeit von 3 auf 6 min nur unwesentlich höhere Energieaufwendungen für die Dampferzeugung nach sich zog. Einschränkend sei darauf hingewiesen, dass diese Erkenntnisse unter der Voraussetzung gewonnen wurden, dass der Kocher nicht unter Vollast lief.

Zur Ermittlung der Faserstoffverluste (insbesondere bei intensiverem Aufschluss) wurden die jeweils zu einer Versuchsvariante gehörigen Hackschnitzel- und Faserstoffmengen (jeweils auf Masse_{atro} rückgerechnet) exakt erfasst. Unter Berücksichtigung der Hackschnitzel- und Faserstofffeuchten erfolgte dann die Berechnung des Verlustes. Je Aufschlusseinstellung wurden 2 x ~100 kg Hackschnitzel_{atro} bereitgestellt, da die Versuchsreihe im Interesse reproduzierbarer Einstellungen 1 x komplett wiederholt wurden.

Die Ergebnisse der als 6-fach Bestimmung durchgeführten Feuchtemessungen an den Hackschnitzeln variierten je Variante um bis zu 15 %, während die Faserstofffeuchten maximal um 2 % differierten. Da die Rückrechnung auf atro Materialmengen mit einem gemittelten Feuchtwert erfolgte, ergaben sich für die Hackschnitzelmengen trotz genauester Ausmessung gewisse Streuungen und Unterschiede in den Hackschnitzelausgangsmengen von Variante zu Variante. Die Angaben zu Ausbeute bzw. Verlust sind als Mittelwerte der Versuchsreihen I und II dargestellt (Tabelle 22).

Tabelle 22 Einfluss der Aufschlussbedingungen auf Ausbeute und Materialverlust bei Herstellung der labortechnisch erzeugten Kiefernholzfasernstoffe (Angaben IHD, Dresden)

	Aufschlussbedingungen:					
	Druck, Temperatur, Zeit					
	8 bar 170 °C 4 min	12 bar 187 °C 4 min	16 bar 200 °C 4 min	8 bar 170 °C 8 min	12 bar 187 °C 8 min	16 bar 200 °C 8 min
	Variante					
	6-IHD	5-IHD	4-IHD	3-IHD	2-IHD	1-IHD
Versuchsreihe I						
Hackschnitzelmenge [kg atro]	111,9	101,9	101,9	111,0	94,9	97,3
Faserstoffmenge [kg atro]	105,2	95,4	90,1	112,2	90,3	88,3
Versuchsreihe II						
Hackschnitzelmenge [kg atro]	99,2	98,3	95,8	104,9	103,9	100,1
Faserstoffmenge [kg atro]	100,0	92,1	87,7	97,0	96,5	83,5
Gesamthackschnitzelmenge [kg atro]	211,1	200,2	197,7	215,9	198,8	197,4
Gesamtfaserstoffmenge [kg atro]	205,2	187,5	177,8	209,2	186,8	171,8
Gesamtausbeute [%]	97,2	93,7	89,9	96,9	94,0	87,0
Gesamtverlust [%]	2,8	6,3	10,1	3,1	6,0	13,0

Trotz intensiver Bemühungen wurden zu dem Thema Materialausbeute- und Verlustbetrachtungen bei der Faserstoffherstellung ausschließlich die relativ lang zurückliegenden Untersuchungen von *Asplund* gefunden. Dessen Versuche zu Materialverlusten infolge intensivierter Aufschlussbedingungen zeigten, dass bei 10 bar Dampfdruck und einer Erhitzungszeit von 4 min von etwa 8 % Gewichtsverlust bei der Zerfaserung von Kiefernholz hackschnitzeln ausgegangen werden muss, vgl. Abbildung 3 /*Asplund 1949*/. Bei gleichem Dampfdruck und einer Erhitzungszeit von 8 min lag der Verlust bereits bei 13 %. Eine nochmalige Erhöhung des Dampfdrucks auf 24 bar ergab dann bei 4 min Erhitzungszeit Verluste von deutlich über 20 %.

Diese Ergebnisse konnten mit den vorliegenden Untersuchungen nicht bestätigt werden.

Erwartungsgemäß führte die Intensivierung der Aufschlussbedingungen zu reduzierten Faserstoffausbeuten. Dabei ergab sich durch die Verlängerung der Kochzeit auf 8 min bei den 8 bar-Laborvarianten ein um 0,3 % geringfügig höherer Verlust. Mit 2,8 bzw. 3,1 % wurden dabei Materialverluste bestimmt, die relativ gut mit industriellen Erfahrungen bei ähnlichen Aufschlusseinstellungen übereinstimmen /Kleiner 2008, Wolf 2008/.

Die weitere Steigerung des Aufschlussdruckes auf 12 bar und insbesondere auf 16 bar zog erwartungsgemäß deutlich reduzierte Faserstoffausbeuten und damit höhere Verluste nach sich.

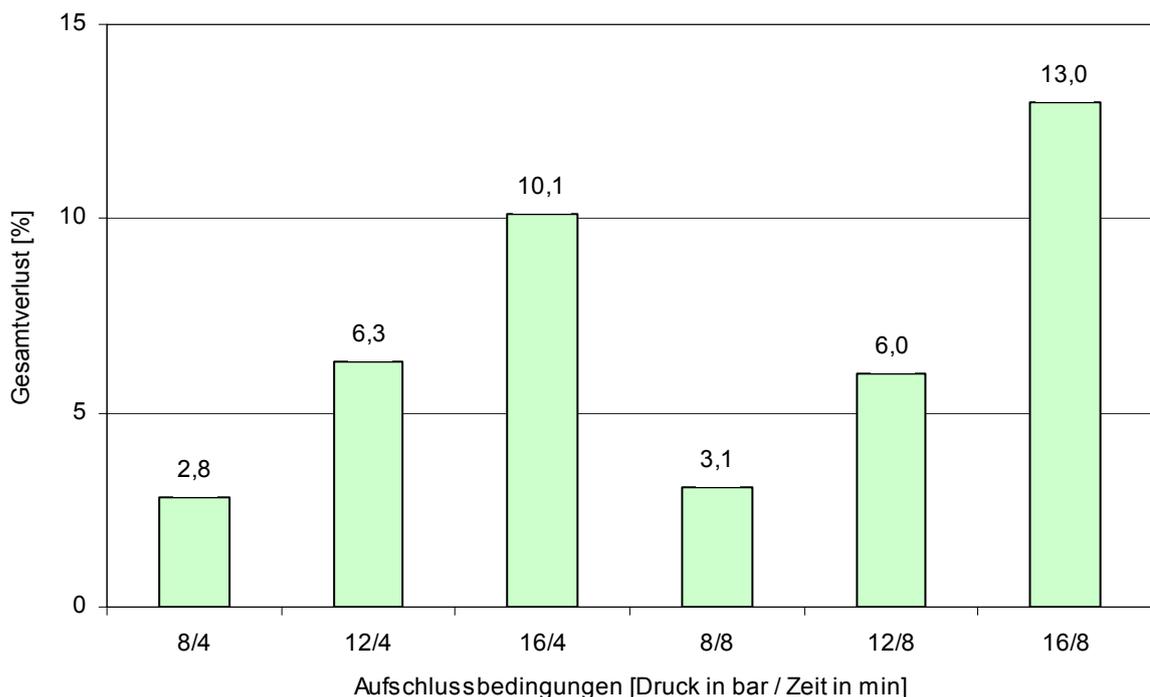


Abbildung 41 Einfluss der Aufschlussbedingungen auf den Materialverlust bei Herstellung der labortechnisch erzeugten Kiefernholzfasern

Bemerkenswert ist die gute Übereinstimmung zur Verlängerung der Dämpfzeit zwischen 8 und 12 bar-Fasern. Dabei resultierte für einen Aufschluss mit 12 bar über 8 min gegenüber der 4 min-Variante sogar eine um 0,3 % erhöhte Ausbeute.

Die für die 12 bar-Varianten ermittelten Faserstoffmasseverluste von 6,3 und 6,0 % stellen vor dem Hintergrund der vorstehend aufgezeigten Elektroenergieersparnis bei der Zelfaserung sowie einer mit der Verwendung derart „quellungsvergüteter“ Fasern möglichen Bindemittel- und Hydrophobierungsmittel-Ersparnis die wirtschaftliche Herstellung von Faserplatten bei einem Aufschlussdruck von 12 bar in Aussicht.

Überraschenderweise lag bei den 16 bar-Fasern der Verlust mit 10,1 bzw. 13 % für den Aufschluss im niedrigen 2stelligen Prozentbereich. Hier waren nach den bislang vorliegenden Erkenntnissen von *Asplund* deutlich höhere Verluste zu erwarten.

Als Fazit der Untersuchungen zur morphologischen Charakterisierung der Fasern bleibt festzuhalten, dass insbesondere die Siebanalysen mittels Luftstrahlsieb eine deutliche Differenzierung der bei der längeren Kochzeit aufgeschlossenen Fasern

in Abhängigkeit vom Aufschlussdruck ergaben. Neben den Kenngrößen der Korngrößenverteilung spiegeln auch die Siebkennlinien wieder, dass höhere Drücke zu einer feineren Faserstoff-Struktur und kürzeren Faserlängen führen. Der vergleichend geprüfte Industriefaserstoff lag zwischen den 8 bar-Varianten, was als ein wesentliches Indiz für industrieadäquate Einstellungen beim labortechnischen Aufschluss zu werten ist.

Gleichfalls geeignet erwiesen sich Faserstoffanalysen bezüglich der Summenhäufigkeitsverteilung von der Faserlänge und Faserbreite (Faserdicke) mit dem optischen Partikelanalysesystem QualScan. Dabei wurden speziell für die Faserlänge deutliche Unterschiede zwischen den Faserstoffen festgestellt, während die Ergebnisse zur Verteilung der Faserbreite relativ eng beieinander lagen. Der Schlankheitsgrad als Maß für das Verhältnis von mittlerer Partikellänge zu mittlerer Partikelbreite folgt diesem Trend, was damit begründet wird, dass die Faserlänge überproportional von der Aufschlussintensität beeinflusst wird. Den kleinsten Schlankheitsgrad und die größte Feinheit (analog zur Trockensiebanalyse) wies der bei 16 bar über 8 min am intensivsten aufgeschlossene Faserstoff auf. Gleichfalls bestätigend zur Luftstrahlsiebanalyse entsprach der Industriefaserstoff den 8 bar-Laborvarianten. Aus einem Aufschluss bei industrieüblichen Drücken von 8 bar und der langen Verweilzeit von 8 min resultierte die größte mittlere Faserlänge. Möglicherweise ist dieser Effekt auf die durch die längere Dämpfzeit intensivere Hackschnitzelerweichung und resultierend sehr homogene Zerfaserung zurückzuführen. Das bedingt sicherlich auch den bei dieser Versuchsvarianten höchsten Wert für den Schlankheitsgrad.

Vor dem Hintergrund einer Übertragung der Versuchsergebnisse vom Labor- in den Industriemaßstab ist den Ergebnissen zur Schüttdichte und damit dem in Abhängigkeit von der Aufschlussintensität veränderten Streu- und Verdichtungsverhalten der Faservliese wesentliche Bedeutung beizumessen. Die intensiver aufgeschlossenen Faserstoffe wiesen nach der Faservliesbildung und Vorverdichtung infolge gravierend höherer Schüttdichten deutlich reduzierte Streuhöhen auf, was neben nachteiligen Effekten (u. a. schlechtere Entgasung) durchaus auch positive Auswirkungen auf die folgenden Prozessstufen (u. a. geringere Energieaufwendungen für Vor- und Heißpressen, reduzierte maximale Pressdrücke) haben dürfte.

Die lichtmikroskopischen Untersuchungen bestätigen, dass höhere Aufschlussdrücke und auch längere Dämpfzeiten zu einer feineren Faserstoff-Struktur mit kürzeren Faserlängen führen. Zudem bedingt eine zunehmende Aufschlussintensität dunkelbraune Fasern, was vornehmlich auf das bei hohen Aufschluss Temperaturen in den Holzfasern verbleibende Lignin bei gleichzeitig herausgelösten Hemicellulosen zurückzuführen ist /Groom et al. 2004/. Eine andere interessante Begründung für die Farbveränderung der Fasern gibt Schiegl /2004/, wonach Ligininpolymere als Folge der thermohydrolytischen Beanspruchung oxidativ gespalten bzw. chromophore Gruppen durch Oxidation zerstört werden. Die entstehenden Ligninfragmente dunkeln aufgrund ihrer photochemischen Eigenschaften entsprechend rascher.

Im Unterschied zu den vorstehend diskutierten Ergebnissen lassen die Rasterelektronenmikroskop (REM)-Aufnahmen nur eingeschränkte Aussagen zur Fasermorphologie zu. Als wesentliches Ergebnis wies der bei 16 bar über 8 min extrem aufgeschlossene Faserstoff eine erhöhte Anzahl nicht vollständig aufgeschlossener sehr kurzer Faserbündel (Splitter) sowie „bucklige“ Faseroberflächen und eine größere Rauigkeit auf. Die Splitter sind ggf. darauf zurückzuführen, dass die Faserbündel durch die hohe Beanspruchung im Kocher bereits vor der Zerfaserung im Refiner verkürzt werden, wohingegen sie bei weniger intensiven Aufschlussbedingungen im Verbund verbleiben. An diesen Fasern war zudem der flächenbezogene Anteil der Faseroberflächendeformation

größer und bis zur Freilegung der Mikrofibrillen erkennbar. Diese Aussagen stehen in Übereinstimmung mit den Ergebnissen von *Groom et al. 2000*, wonach ein zunehmender Aufschlussdruck zu einer größeren Faserflächenrauheit führt. Auffällig war zudem, dass ein industrieüblicher Aufschluss bei 8 bar mit einer weniger intensiven hydrothermischen Belastung des Holzes zu einem größerem Anteil langer Einzelfasern und sehr wenigen Splintern führt. Dahingegen weist der industriell bei vergleichbaren Einstellungen aufgeschlossene Faserstoff relativ hohe Splitteranteile auf, was mit großen Feinanteilen im Hackschnitzelausgangsmaterial im Zusammenhang stehen kann.

Bezüglich der chemischen Faserstoffeigenschaften ist zusammenzufassen, dass eine Intensivierung der Aufschlussbedingungen sinkende pH-Werte für die kaltwässrigen Extrakte aus den thermo-mechanisch aufgeschlossenen Faserstoffen ergab. Indessen nahmen bei Verschärfung der Aufschlussbedingungen sowohl der Gehalt an wasserlöslichen Stoffen bei Heißwasserextraktion als auch der Extraktstoffgehalt in Ethanol-Cyclohexan sowie die Pufferkapazität mit Natronlauge bis zum Erreichen des Neutralpunktes signifikant zu. Die Zunahme der wasserlöslichen Anteile ist dabei u. a. auf das „Löslichwerden“ der Hemicellulose zurückzuführen, welches insbesondere bei Temperaturen > 180 °C und - unter dem Einfluss thermisch abgespaltener Anteile an Ameisen- und Essigsäure - durch den Abbau von langen Polysaccharidketten begünstigt wird. Mit diesen Untersuchungen konnten aus der Literatur bekannte Ergebnisse /u. a. *Jensen, Kehr 1971; Hsu et al. 1988; Groom et al. 2000/* bestätigt und um Werte bisher nicht untersuchter Aufschlussbedingungen vervollständigt werden.

Zu Formaldehydgehalt und Formaldehydabgabe ergaben sich für die Extremvariante (Aufschluss bei 16 bar und 8 min Dämpfzeit) die höchsten Werte. Die festgestellten Formaldehydeigenschaften bestätigen bisherige Untersuchungen /u. a. *Schneider 1999/* und ergänzen den Stand des Wissens. Die von *Hasch und Grundwald* ermittelten Perforatorwerte an industriell erzeugten Faserstoffen bestätigen die Ergebnisse des Industriefaserstoffs /*Hasch, Grundwald 2006/*.

Um den Einfluss steigender Aufschlussbedingungen auf die Hemicellulosegehalte näher zu untersuchen, erfolgte exemplarisch die Bestimmung der Pentosangehalte. Dabei zogen sowohl die Erhöhung des Aufschlussdrucks als auch die Verlängerung der Dämpfzeit abnehmende Pentosangehalte nach sich, was gleichfalls Ergebnis der Arbeit von *Schneider /1999/* war. Übereinstimmend dazu stellten *Groom et al. /2000/* fest, dass eine Intensivierung des Aufschlussdruckes bis auf 12 bar eine signifikante Abnahme des Hemicellulosegehalts nach sich zog. Als Folge der thermischen Holzbehandlung werden zunächst die Pentosane mit niedrigstem Molekulargewicht abgebaut. Sie tragen damit unmittelbar zur Erhöhung des Wasserextraktgehalts bei. Übereinstimmend dazu ergaben sich unter schärferen Aufschlussbedingungen generell höhere wasserlösliche Anteile bei Heißwasserextraktion sowie höhere Extraktstoffgehalte in Ethanol-Cyclohexan.

Die Untersuchungen der nass gebildeten Prüfblätter zeigten erwartungsgemäß für die bei den höchsten Aufschlussdrücken von 16 bar aufgeschlossenen Faserstoffe die höchsten Mahlgrade SR. Dieser Effekt wird nach den Ergebnissen der morphologischen Fasercharakterisierung mit dem relativ hohen Feinst- und Feinanteil der Extremvarianten aufgrund der höheren thermomechanischen Belastung während der Zerkleinerung begründet. Im Kontext zu den Aussagen der REM-Aufnahmen zeigen die 16 bar-Faserstoffe zudem eine relativ spröde, wenig homogene Oberflächenbeschaffenheit. Die mit der Erhöhung des Aufschlussdruckes einhergehende Abnahme des Hemicellulosege-

halts bei gleichzeitiger Zunahme des Extraktstoffgehaltes lässt zudem ein hydrophoberes Verhalten der Faserstoffe und daraus resultierend eine Quellungsbehinderung (unmittelbar nach Suspendierung) erwarten.

Die Ergebnisse zum Mahlgrad werden durch die Resultate zur Reißlänge, Falzfestigkeit und Berstfestigkeit an den nass gebildeten, vor der Prüfung getrockneten Prüfblättern bestätigt, wobei der Industriefaserstoff sich jeweils im Bereich der 8 bar-Faserstoffe einordnet. In Analogie zu lichtmikroskopischen Untersuchungen resultiert aus einer Intensivierung der Aufschlussbedingungen u. a. durch thermohydrolytische Veränderungen der Holzbestandteile (signifikante Abnahme des Hemicelluloseanteils, photochemische Lignineigenschaften) eine Abnahme des Weißgrades der Prüfblätter.

Die Prüfblätter wiesen zudem in Abhängigkeit von den Aufschlussbedingungen deutliche Unterschiede in ihrem Benetzungsverhalten auf. Längere Benetzungszeiten kennzeichnen dabei einen besser hydrophobierten Faserstoff. Erwartungsgemäß ließen sich die Prüfblätter, die bei 16 bar aufgeschlossene Faserstoffe enthielten, am schwersten benetzen. Als Ursache für die signifikant längere Benetzungsdauer der 16 bar-Faserstoffe wird die mit der Erhöhung des Aufschlussdruckes einhergehende Abnahme des Hemicellulosegehalts bei gleichzeitiger Zunahme des Extraktstoffgehaltes und die daraus resultierend reduzierte Wasseraufnahmefähigkeit angesehen. Bei Prüfblättern aus 8 und 16 bar-Faserstoffen ergaben längere Verweilzeiten im Kocher gleichfalls längere Benetzungszeiten, bei 12-Faserstoff wurde diese Tendenz nicht festgestellt.

Grundsätzlich ergaben erhöhte Aufschlussdrücke verlängerte Benetzungszeiten und damit besser hydrophobierte Prüfblätter. Der bisherige Stand des Wissens /u. a. Schneider 1999, Roffael et al. 2002/ konnte bestätigt und um bisher nicht untersuchte Aufschlussbedingungen erweitert werden.

Als Quintessenz der Ausführungen zum Energiebedarf bei der Faserstoffherstellung gilt, dass sich die deutlich höheren Energieaufwendungen zur Erzeugung hoher Drücke sowie zur Verlängerung der Dämpfzeit durch einen zunehmenden Plastifizierungsgrad der Hackschnitzel überaus positiv auf den thermischen Energieaufwand zur Zerkleinerung auswirken. So verringerte sich die Zerkleinerungsenergiemenge beim Faserstoffaufschluss mit maximalem Druck von 16 bar und 8 min Dämpfzeit auf etwa 1 Drittel gegenüber der industrieüblichen Zerkleinerungsvariante mit 8 bar und 4 min. Im Unterschied zu den 70 Jahre alten Erfahrungen von *Asplund /1939/* (Aussage: Kraftbedarf für Nadelholzzerkleinerung sinkt insbesondere bei Aufschlusstemperaturen von 160 °C) wurde festgestellt, dass das größte Energieeinsparpotential im Temperaturbereich von 180 bis 200 °C liegt. Die *Asplund*-Untersuchungen endeten seinerzeit jedoch bei ~185 °C.

Bei Betrachtung des Gesamtenergiebedarfs ist allerdings festzustellen, dass insbesondere die bei Aufschlussdrucksteigerungen höheren Aufwendungen für thermische Energie zur Dampferzeugung über die gleichzeitige Reduktion der elektrischen Zerkleinerungsenergie nicht in jedem Fall ausgeglichen werden können (Abbildung 40). Interessanterweise resultierte aus einer Aufschlussintensivierung über verlängerte Kochzeiten bei den 8 bar-Faserstoffen ein deutlicher und bei den 12 bar-Faserstoffen immer noch ein messbarer geringerer Gesamtenergiebedarf. Die Industriefaserstoffvariante ordnete sich im Bereich über 4 min bei 8 bzw. 12 bar aufgeschlossenen Faserstoffe ein.

Intensive Gespräche mit MDF-Herstellern zu dieser Thematik ergaben, dass in den Industrieanlagen Dampfenergie prozesstechnisch bedingt (u. a. durch eigene Energieerzeugung) i. d. R. in ausreichendem Maße und quasi kostenfrei vorhanden ist. Von entscheidender Bedeutung für die Wirtschaftlichkeit des Herstellungsprozesses ist hinge-

gen die Elektroenergie für die Zerfaserung bei thermomechanischem Holzaufschluss. Das diesbezüglich nachgewiesene Einsparpotential bietet die Chance, Faserplatten nach dem Trockenverfahren wesentlich energieeffizienter und damit wirtschaftlicher herzustellen.

Erfahrungen aus Industrieversuchen mit Druckbereichen von 11 bar bestätigen das immense Energieeinsparpotential gegenüber den üblicherweise realisierten 8 bis 9 bar /Wolf 2009/. Es konnte nachgewiesen werden, dass eine Verlängerung der Dämpfzeit von 3 auf 6 min nur unwesentlich höhere Energieaufwendungen für die Dampferzeugung nach sich zog, jedoch zu einer deutlichen Verringerung der Zerfaserungsenergie führte.

Erwartungsgemäß führte die Intensivierung der Aufschlussbedingungen zu reduzierten Faserstoffausbeuten. Dabei ergab sich durch die Verlängerung der Kochzeit auf 8 min bei den 8 bar-Laborvarianten ein um 0,3 % geringfügig höherer Verlust. Mit 2,8 bzw. 3,1 % wurden dabei Materialverluste bestimmt, die relativ gut mit industriellen Erfahrungen bei ähnlichen Aufschlusseinstellungen übereinstimmen /Kleiner 2008, Wolf 2008/.

Überraschenderweise lag bei den 16 bar-Faserstoffen der Verlust mit 10,1 bzw. 13 % im niedrigen 2stelligen Prozentbereich. Hier waren nach den bislang vorliegenden Erkenntnissen von *Asplund* deutlich höhere Verluste erwartet wurden. Dessen Versuche bei der Zerfaserung von Kiefernholzhacksnitzeln ergaben bei 10 bar Dampfdruck und einer Erhitzungszeit von 4 min Gewichtsverluste von etwa 8 % /Asplund 1949/. Bei gleichem Dampfdruck und einer Erhitzungszeit von 8 min lag der Verlust bereits bei 13 %. Die weitere Erhöhung des Dampfdrucks auf 24 bar führte dann bei 4 min Erhitzungszeit zu Verlusten von über 20 %.

Die für die 12 bar-Varianten ermittelten Faserstoffmasseverluste von 6,3 und 6,0 % stellen vor dem Hintergrund der vorstehend aufgezeigten Elektroenergieersparnis bei der Zerfaserung sowie einer mit der Verwendung derart „quellungsvergüteter“ Faserstoffe möglichen Bindemittel- und Hydrophobierungsmittel-Ersparnis die wirtschaftliche Herstellung von Faserplatten bei einem Aufschlussdruck von 12 bar in Aussicht.

5.2 Charakterisierung der Industrie-MDF

5.2.1 Platteneigenschaften sowie Feuchtebeständigkeit

Zur Schaffung einer charakteristischen Vergleichsbasis für die Laboruntersuchungen wurde in der ersten Versuchsreihe an 11 unterschiedlichen MDF-Typen mit vom Hersteller ausgewiesener erhöhter Feuchtebeständigkeit der Verklebung ein umfassendes Profil wesentlicher physikalischer und chemischer Platteneigenschaften im Ausgangszustand ermittelt. Im Ergebnis konnte ein repräsentativer Querschnitt wichtiger Kurzzeiteigenschaften von Industrie-MDF mit erhöhter Feuchtebeständigkeit aufgestellt werden, die als Tabelle A1 Bestandteil der Anlage sind.

Ausgewählte Ergebnisse von Industrie-MDF mit PF-, MUF- bzw. PMDI-Bindung sind Bestandteil der folgenden Übersicht:

Tabelle 23 Einfluss des Bindemittels auf physikalische und chemische Eigenschaften ausgewählter Industrie-MDF mit von den Herstellern ausgewiesener erhöhter Feuchtebeständigkeit der Verklebung, Vergleich zu normativen Vorgaben an MDF.HLS gemäß DIN EN 622-5

MDF-Eigenschaften		MDF-Hersteller			Anforderungen nach DIN EN 622-5	
		A	B	C		
n = 18, Ausnahme pH-Wert und Formaldehydgehalt mit n = 2		Bindemittel			HLS	
		PF	MUF	PMDI		
		MDF-Typ			HLS	
		HLS V 313	HLS V 313	H V 100		
Nennplattendicke		15 mm	18 mm	18 mm	> 12 – 19 mm	
IHD-Code		269	275	284		
Rohdichte	[kg/m³]	\bar{x} s	753 16	752 11	768 12	-
Querzugfestigkeit	[N/mm²]	\bar{x} s	1,02 0,09	1,21 0,07	1,81 0,12	0,75
Querzugfestigkeit nach Zyklustest, Option 1 (V 313)	[N/mm²]	\bar{x} s	0,09 0,01	0,28 0,06	0,56 0,14	0,20
Querzugfestigkeit nach Kochprüfung, Option 2 (V 100)	[N/mm²]	\bar{x} s	0,01 0,01	0,04 0,01	0,35 0,08	0,12
Biegefestigkeit	[N/mm²]	\bar{x} s	47,2 2,2	43,1 2,0	37,6 1,9	30
Biege-Elastizitätsmodul	[N/mm²]	\bar{x} s	4500 170	3920 160	3340 150	2700
Dickenquellung nach 24 h WL	[%]	\bar{x} s	4,6 0,2	3,4 0,2	2,8 0,2	8,0
Dickenquellung nach Zyklustest, Option 1 (V 313)	[%]	\bar{x} s	27,1 3,8	22,8 4,9	3,5 0,5	15,0
Feuchtegehalt bei Prüfung	[%]	\bar{x} s	7,7 0,1	8,3 0,2	9,1 0,3	4 - 11
pH-Wert	[]		5,4	5,2	4,8	-
Formaldehydgehalt, B-Wert (nach DIN EN 622-1, Tab. 1)	[mg HCHO/100 g Platte atro]		6,4	3,6	0,2	8,0

Unerwarteterweise genügte ausschließlich MDF des Herstellers C den Anforderungen für den Plattentyp MDF.E (MDF für Außenbereich) nach EMB-Industrienorm bzw. MDF.H oder HLS nach DIN EN 622-5. In diesem Zusammenhang ist darauf hinzuweisen, dass die Anforderungen als 5% bzw. 95 %-Quantilwerte (aus Mittelwerten einzelner Platten nach DIN EN 326-1) gelten, die Eigenschaften der MDF hier jedoch als Mittelwerte angegeben wurden. Die Platte des Herstellers C wies grundsätzlich sowohl die höchsten Querzugfestigkeitswerte als auch die niedrigsten Dickenquellungswerte und (aufgrund der PMDI-Bindung) den geringsten Formaldehydgehalt auf.

Beide, durch die Hersteller als V 313-MDF-Typ ausgewiesene Varianten verfehlten die Anforderungen an die Dickenquellung nach Zyklustest deutlich. Gleiches galt für die Querzugfestigkeit nach Zyklustest der PF-Harz-gebundenen Platte. Insofern konnte dann die Nichteinhaltung der Normvorgaben für die Querzugfestigkeit nach Kochprüfung erwartet werden.

Die pH-Werte der industriell hergestellten MDF lagen grundsätzlich im schwach sauren Bereich.

An allen Industrie-MDF wurde zusätzlich zu den physikalisch-mechanischen Platteneigenschaften auch das Rohdichteprofil senkrecht zur Plattenebene nach dem radiometrischen Prinzip ermittelt. Die nachfolgende Abbildung 42 mit der Darstellung ausgewählter Varianten verdeutlicht, dass zwischen den MDF erkennbare Unterschiede bestehen, was auf mehrere, sich teilweise direkt beeinflussende Faktoren zurückzuführen ist. Als entscheidende Einflussgröße wird dabei die variable Technologie des kontinuierlichen

Pressprozesses angesehen, wozu die verschiedenen Hersteller jedoch verständlicherweise keine konkreten Aussagen treffen wollten. Weitere wichtige Faktoren sind Holzart, Faserstoffqualität, Bindemittelart und -anteil sowie die Vliesfeuchte vor dem Pressen.

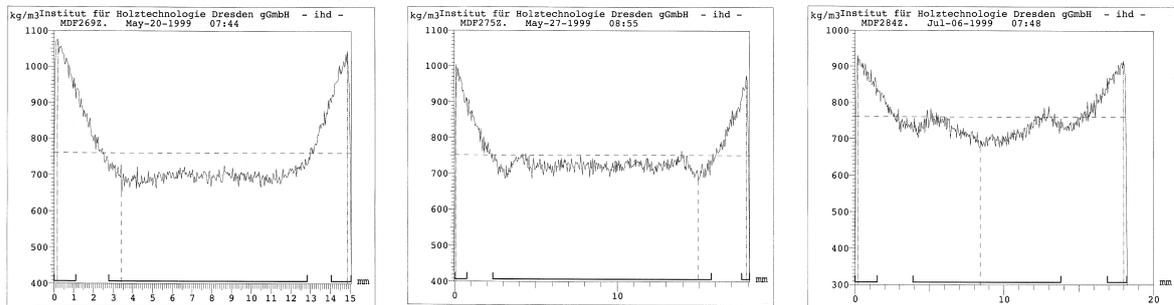


Abbildung 42 Rohdichteprofil senkrecht zur Plattenebene unterschiedlicher Industrie-MDF-Varianten (linkes Bild: Hersteller A, IHD-Code 269 mit PF-Bindung; mittiges Bild: Hersteller B, IHD-Code 275 mit MUF-Bindung; rechtes Bild: Hersteller C, IHD-Code 284 mit PMDI-Bindung)

Interessanterweise führte das „schlechteste“ Profil mit einerseits ausgeprägten Rohdichteschwankungen in der Mittelzone und im Übergangsbereich zu den Deckschichten zu den besten Querkzugfestigkeits- und Dickenquellungseigenschaften, obwohl die mittlere Rohdichte in der Mittelzone im Vergleich zu den beiden Varianten nur geringfügig höher liegt. Als wesentliche Ursache dafür ist das eingesetzte PMDI-Bindemittel anzusehen.

Die beiden anderen Profile ähnelten sich. Speziell die PF-Harz-gebundene Platte zeigte den MDF-typischen Verlauf mit einer homogenen Mittelzone und hochverdichteten Randbereichen (auch als „U-Profil“ bezeichnet), was im Ergebnis auch zu signifikant besseren Biegeeigenschaften gegenüber der PMDI-gebundenen MDF führte.

5.2.2 Witterungsbeständigkeit

Als Maß für die Witterungsbeständigkeit der unbeschichteten Industrie-MDF wurden u. a. die Veränderungen von Querkzugfestigkeit, Biegefestigkeit und Dickenquellung der Platten nach Kurzzeit- bzw. Freibewitterung bestimmt. Die Probenentnahme aus dem Xenotest-Gerät erfolgte nach 8, 16 sowie 24 Wochen und vom Freibewitterungsstand nach 24, 48, 72, 96, 120 sowie teilweise 160 Wochen. Die Auswertung beinhaltete den Bezug der ermittelten Eigenschaften zu den Entnahmezeitpunkten bzw. am Bewitterungsende auf die Ausgangseigenschaften der MDF sowie die vergleichende Bewertung von Kurzzeit- zu Freibewitterung.

Die Auswertung zeigt, dass die Eigenschaften i. d. R. mit zunehmender Bewitterungszeit schlechter werden. Der Kurzzeitbewitterungstest (KZB) belastet die Proben stärker und führte zu einem deutlicheren Abfall der Materialeigenschaften. Das Bindemittel hat einen starken Einfluss auf die Witterungsbeständigkeit. Die besten Ergebnisse zeigten MDF mit PMDI als Bindemittel. Hingegen wiesen Faserplatten mit PF-Bindung bereits bei Freibewitterung stärkere Eigenschaftsverschlechterungen als PMDI-gebundene Platten nach Kurzzeitbewitterung auf.

Abbildung 43 enthält die prozentuale Veränderung der Querkzugfestigkeit ausgewählter unbeschichteter MDF nach Kurzzeit- und Freibewitterung. Die vollständigen Ergebnisse sind Bestandteil der Anlage. Für die Auswertung wurden die MDF ausgewählt, zu denen im vorstehenden Gliederungspunkt die physikalischen und chemischen Platteneigenschaften sowie die Feuchtebeständigkeit der Verklebung diskutiert wurden.

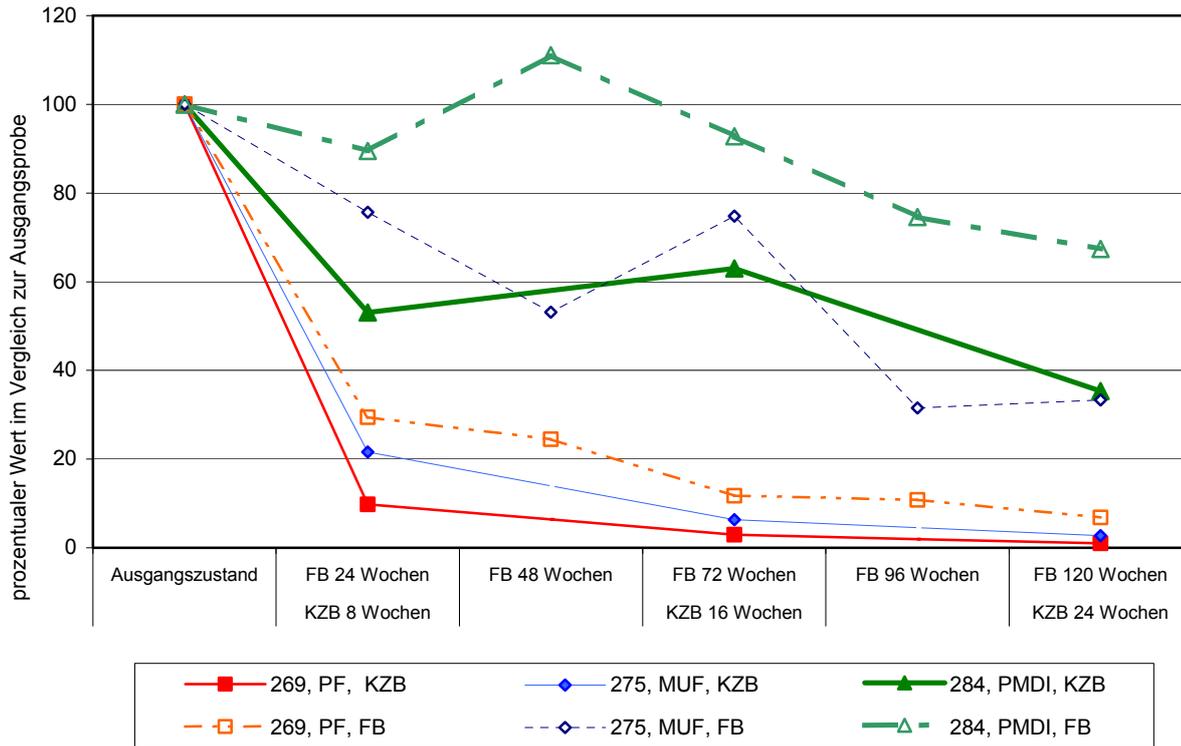


Abbildung 43 Entwicklung der Querkzugfestigkeit (relativ) der unbeschichteten Industrie-MDF-Varianten 269 (PF), 274 (MUF) und 284 (PMDI) nach 8, 16 bzw. 24 Wochen Kurzzeitbewitterung (KZB) sowie 24, 48, 72, 96 bzw. 120 Wochen Freibewitterung (FB)

Die geringsten prozentualen Festigkeitsabnahmen wies die PMDI-gebundene MDF auf. Diese Platten verfügten nach 120 Wochen Freibewitterung noch über 67 % und nach 24 Wochen Kurzzeitbewitterung noch über 36 % ihrer Ausgangsfestigkeit. Im Vergleich dazu lag das Festigkeitsniveau bei MUF-Bindung nach 16 Wochen KZB bzw. 120 Wochen FB bereits bei weniger als 10 % der Ausgangsfestigkeit. Gleiches galt für die PF-Variante nach 24 Wochen KZB-Beanspruchung, wohingegen nach 120 Wochen Freibewitterung (FB) noch etwa 35 % der Querkzugfestigkeit im Ausgangszustand erreicht wurde.

Generell stellte die technische Bewitterung die schärfere Beanspruchungsmethode dar und führte mit fortschreitender Belastungsdauer (Ausnahme der Industrie-MDF mit PMDI-Bindung nach 16 Wochen) zur Verschlechterung der Festigkeitswerte.

Die Ergebnisse zur Biegefestigkeit bestätigten tendenziell die bisherigen Aussagen. Allerdings verdeutlicht Abbildung 44, dass der maximale Festigkeitsverlust im Vergleich zur Querkzugfestigkeit geringer ausfällt. Die höchsten Biegefestigkeiten nach Bewitterung wies wiederum die PMDI-Variante, gefolgt von den PF- und MUF-gebundenen MDF, auf. Erwartungsgemäß folgte der nicht dargestellte Elastizitätsmodul bei Biegebeanspruchung diesem Trend.

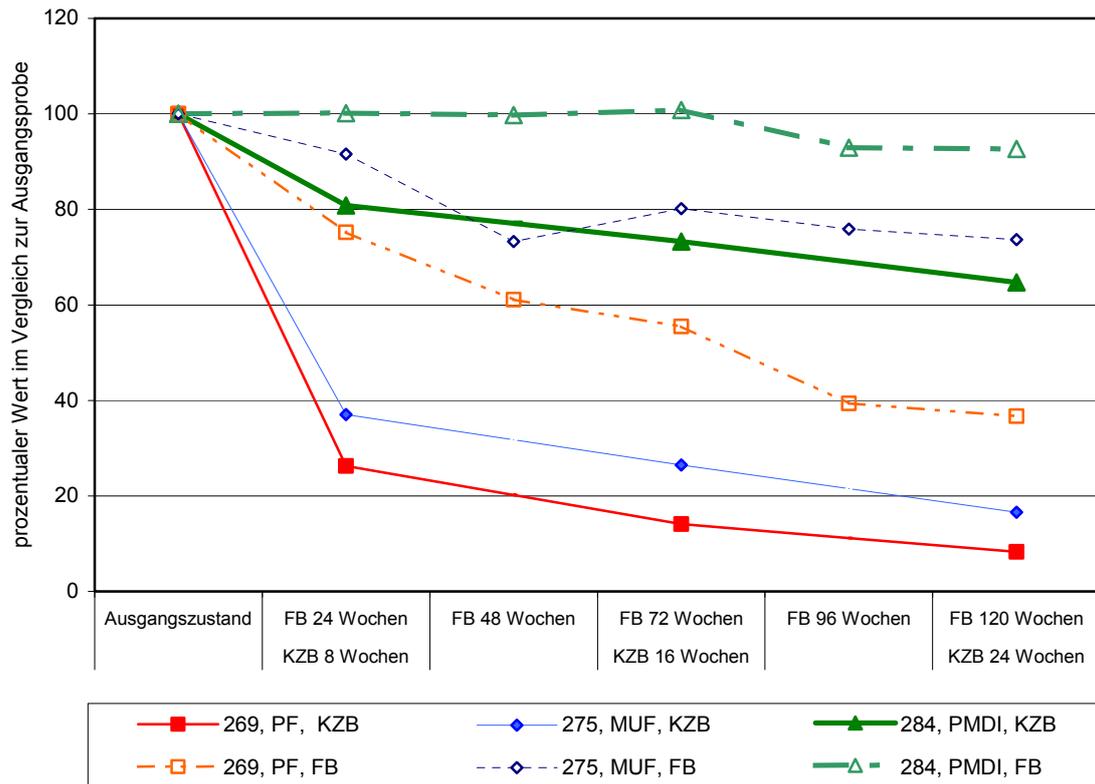


Abbildung 44 Entwicklung der Biegefestigkeit (relativ) der unbeschichteten MDF-Varianten 269 (PF), 274 (MUF) und 284 (PMDI) nach 8, 16 bzw. 24 Wochen Kurzzeitbewitterung (KZB) sowie 24, 48, 72, 96 bzw. 120 Wochen Freibewitterung (FB)

Am drastischsten wirkte sich die Bewitterungsbeanspruchung auf die Entwicklung der Dickenquellung nach Wasserlagerung auf (Abbildung 45). So verfünffachten sich die Quellwerte der PF-Varianten bereits nach 8 Wochen Kurzzeitbewitterung. MDF mit MUF-Bindung standen mit einer Steigerung der Quellwerte auf 300 %, bezogen auf den Ausgangszustand, kaum nach. Einzig die PMDI-Platte wies eine gewisse Beständigkeit bei technischer Bewitterung auf, wenngleich auch bei dieser Variante am Ende des KZB nahezu dreifach höhere Dickenquellungswerte als im Ausgangszustand ermittelt wurden.

Die natürliche Bewitterung im Freien (FB) beanspruchte die Dickenquellung der MDF-Proben wesentlich weniger. Analog zu den Aussagen zur Festigkeitsentwicklung erreichten wiederum die Varianten mit PMDI-Bindung die besten Ergebnisse, gefolgt von MUF- und PF-Harz-gebundenen Platten.

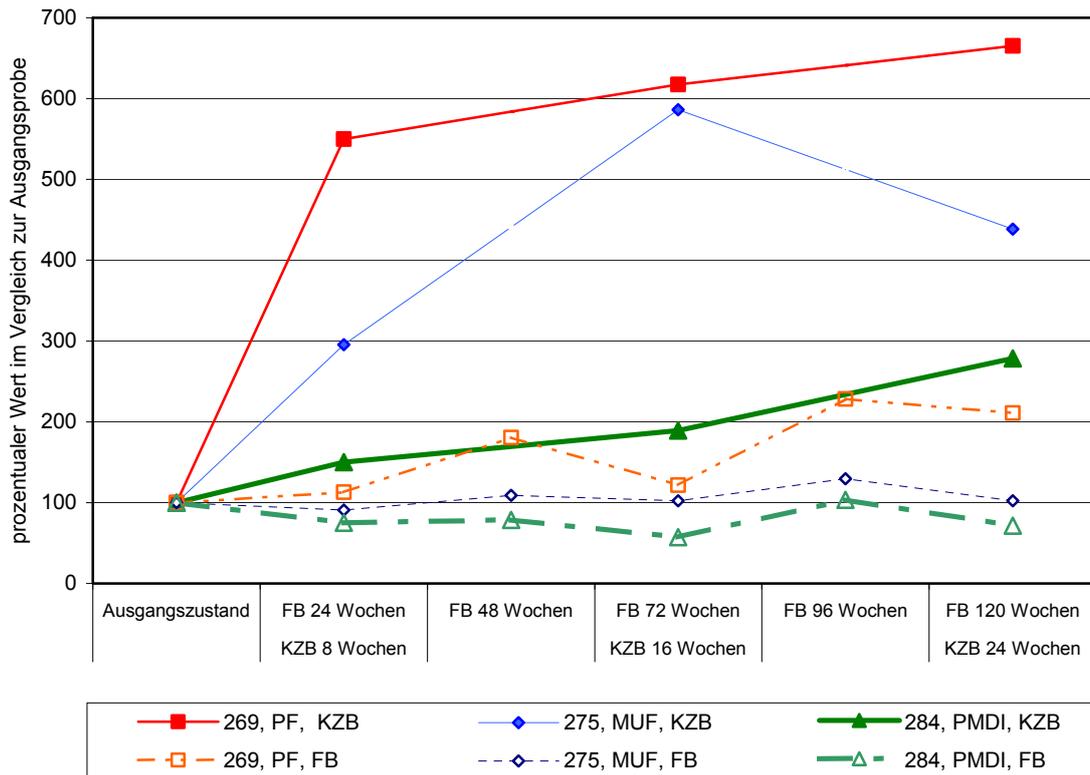


Abbildung 45 Entwicklung der Dickenquellung nach 24 h WL (relativ) der unbeschichteten MDF-Varianten 269 (PF), 274 (MUF) und 284 (PMDI) nach 8, 16 bzw. 24 Wochen Kurzzeitbewitterung (KZB) sowie 24, 48, 72, 96 bzw. 120 Wochen Freibewitterung (FB)

Mit den Bewitterungsuntersuchungen konnten die Ergebnisse der an den Industrie-MDF ermittelten Kurzzeiteigenschaften dahingehend bestätigt werden, als dass insbesondere MDF mit PMDI-Bindung neben den besten Kurzzeiteigenschaften auch über die günstigste Witterungsbeständigkeit verfügen. Wenn auch die tendenziellen Aussagen zwischen der technischen und natürlichen Bewitterung übereinstimmen und die Materialeigenschaften mit zunehmender Bewitterungszeit nahezu ausnahmslos abnahmen, muss dennoch kritisch eingeschätzt werden, dass eine Kurzzeitbewitterung im Xenotest-Gerät über einen Zeitraum von 24 Wochen keine vergleichbaren Ergebnisse zu MDF-Eigenschaften nach 120 Wochen Freibewitterung lieferte. Insbesondere die Dickenquellungswerte sind nach technischer Bewitterung wesentlich höher. Gerade die Quellungseigenschaften sind aber im Hinblick auf einen Außeneinsatz von MDF von entscheidender Bedeutung.

Zusammenfassend wird eingeschätzt, dass sich sowohl eine technische Bewitterung nach dem BAM-Kurzzeitbewitterungstest als auch eine natürliche Freibewitterung zur Beurteilung der Witterungsbeständigkeit unterschiedlicher MDF-Ausgangsmaterialien gut eignen. Gute Plattenqualitäten bezüglich der im Ausgangszustand ermittelten physikalisch-mechanischen Werkstoffeigenschaften garantieren dabei auch bessere Witterungsbeständigkeiten. Insbesondere erlauben dabei Quellungsergebnisse nach Zyklustest oder das Maß der Querkzugfestigkeit nach Kochprüfung bzw. Zyklustest Rückschlüsse auf die spätere Witterungsbeständigkeit, währenddessen die Biegefestigkeit kein geeignetes Kriterium zur Beurteilung einer möglichen Witterungsbeständigkeit darstellt. Die besten Materialeigenschaften im Ausgangszustand und nach Bewitterung unbeschichteter Industrie-MDF wiesen generell Platten mit PMDI-Bindung auf.

Obwohl hinsichtlich der tendenziellen Aussagen zwischen den Bewitterungsprüfungen Übereinstimmung besteht, ist die große Abweichung bezüglich der nach Bewitterung ermittelten Eigenschaften als kritisch anzusehen. Das der nach der BAM-Methode durchgeführte Kurzzeitbewitterungstest zu Aussagen hinsichtlich einer langfristigen Witterungsbeständigkeit im Sinne einer Freibewitterung von MDF führt, muss nach den vorliegenden Ergebnissen angezweifelt werden. Aufklärung dazu könnten längerfristige Freibewitterungsversuche (über 5 bis 10 Jahre) an geeigneten Industrie-MDF-Varianten im Vergleich zu den vorhandenen Ergebnissen der Kurzzeitbewitterung bringen.

5.3 Charakterisierung der Labor-MDF

5.3.1 Platteneigenschaften von bindemittelfreien MDF

Um die Auswirkungen einer Aufschlussintensivierung bei der Faserstoffherstellung besser herauszuarbeiten, wurden im Rahmen einer zweiten Versuchsreihe MDF ohne Zusatz von Bindemitteln oder anderen Additiven (z. B. Härter, Paraffin) hergestellt. Die vollständigen Prozessparameter der Plattenherstellung wurden unter Technologie der Plattenherstellung hinreichend erläutert, wesentlich waren ein Feuchtegehalt der Fasern vor dem Heißpressen von 8 %, eine Heizplattentemperatur von 220 °C, ein Presszeitfaktor von 60 s/mm (notwendig zur Herstellung prüfbarer Platten) und eine Plattenenddicke von 10 mm.

Als Faserstoffe fanden die 6 Varianten Verwendung, die bei Drücken von 8, 12 und 16 bar über 4 bzw. 8 min thermo-mechanisch aufgeschlossen wurden (vgl. Tabelle 14) sowie zum Vergleich ein ebenfalls bei 8 bar über 4 min aufgeschlossener Industriefaserstoff.

Die vollständigen Versuchsergebnisse sind Bestandteil von Tabelle A2 der Anlage.

Alle Varianten waren bezüglich der Rohdichte mit Werten zwischen 750 und 780 kg/m³ gut vergleichbar. Trotz ausreichender Klimatisierung lag der Feuchtegehalt bei der Prüfung mit 4,3 bis 6,9 % relativ niedrig, wobei MDF aus industriell üblichem aufgeschlossenem Faserstoff (8 bar, 4 min) die höchsten Werte aufwies. Dagegen wurden für MDF aus Faserstoff, der bei 16 bar über 8 min aufgeschlossen wurde, grundsätzlich die niedrigsten Feuchten bestimmt.

Die Querkzugfestigkeit lag, wie für bindemittelfreie Platten erwartet werden konnte, auf einem verhältnismäßig niedrigen Niveau. Es zeigte sich jedoch, dass ein zunehmender Aufschlussdruck bei der Faserstoffherstellung zu einem signifikanten Ansteigen der Festigkeit führte und dass das Querkzugfestigkeitsniveau bei der längeren Aufschlusszeit von 8 min generell höher lag (Abbildung 46). Der Wert für die Platte aus Industriefaserstoff ordnete sich mit 0,19 N/mm² genau zwischen den MDF aus den bei 8 bar über 4 bzw. 8 min labortechnisch aufgeschlossenen Faserstoffen ein.

Als mögliche Ursache wird ein durch den verschärften Faserstoffaufschluss größerer Anteil aktivierter Holzbestandteile bzw. -inhaltsstoffe (insbesondere an der Faseroberfläche aktives Lignin) angesehen. Bestätigend dazu nahm der Gehalt wasserlöslicher Stoffe bei Heißwasserextraktion sowie der Extraktstoffgehalt in Ethanol-Cyclohexan mit steigendem Aufschlussdruck und längerer Aufschlusszeit deutlich zu (vgl. dazu auch Tabelle 19).

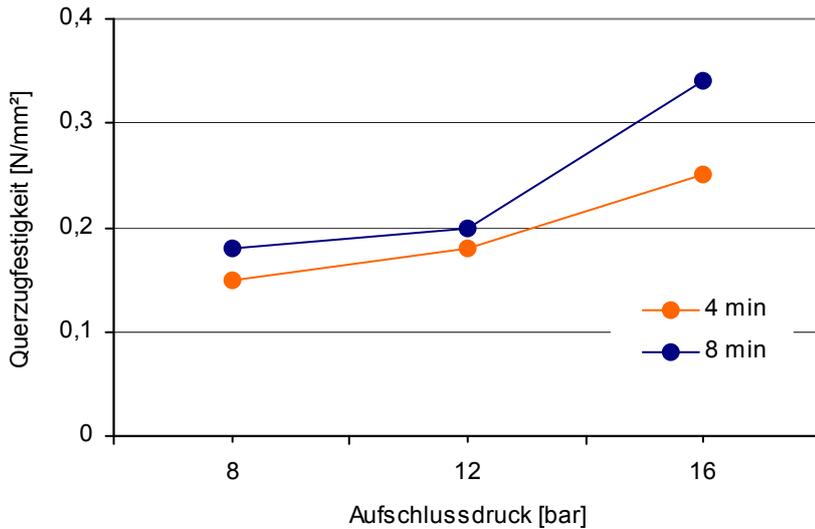


Abbildung 46 Querzugfestigkeit bindemittelfreier MDF in Abhängigkeit von den Aufschlussbedingungen bei der labortechnischen Herstellung von Kiefernholzfasern

Auch das Niveau der Biegefestigkeit ist – verglichen mit handelsüblichen MDF – als sehr niedrig anzusehen. Wie Abbildung 47 zeigt, nimmt die Biegefestigkeit bei Erhöhung des Drucks beim Faserstoffaufschluss erwartungsgemäß signifikant ab. Die Verlängerung der Aufschlusszeit auf 8 min zieht eine nochmalige Abnahme der Werte nach sich. Der bei den Biegeprüfungen ermittelte Elastizitätsmodul folgt diesem Trend.

Die Biegefestigkeit der labortechnisch hergestellten, bindemittelfreien Faserplatte aus Industriefaserstoff folgt dem Trend zur Querzugfestigkeit und liegt mit 17,5 N/mm² im Bereich der 8 bar-Varianten. Gleichzeitig wies diese Versuchsvariante mit 3040 N/mm² den höchsten E-Modul-Wert aller MDF ohne Leimzusatz auf (vgl. Tabelle A2, Anlage).

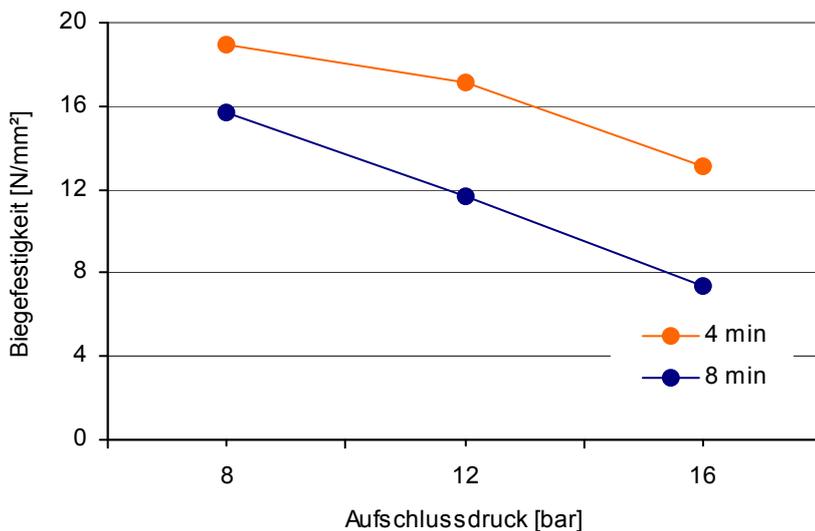


Abbildung 47 Biegefestigkeit bindemittelfreier MDF in Abhängigkeit von den Aufschlussbedingungen bei der labortechnischen Herstellung von Kiefernholzfasern

Diese Ergebnisse bestätigen, dass die mit einer Intensivierung der Aufschlussbedingungen einhergehende Verkürzung der Faserlängen (vgl. auch Abbildung 31 und Tabelle 18) eine signifikante Abnahme der MDF-Elastizität und -Festigkeit bei Biegebeanspruchung nach sich ziehen. Als eine weitere Ursache dafür wird der Abbau der Hemicellulosen angesehen, die ja u. a. der Aufnahme von Zugspannungen dienen.

Hervorzuheben ist der gravierende Einfluss der Aufschlussbedingungen auf die angestrebte Quellungsmodifizierung. Insbesondere Dickenquellungswerte nach 24 und 48 h Wasserlagerung zeigen, dass intensiviertere Aufschlussbedingungen bei der Faserstoffherstellung zu einer signifikanten Reduzierung der Quellungsneigung bindemittelfreier MDF führten (Abbildung 48). An dieser Stelle sei nochmals darauf hingewiesen, dass diese MDF generell ohne Hydrophobierungsmittelzusatz hergestellt wurden.

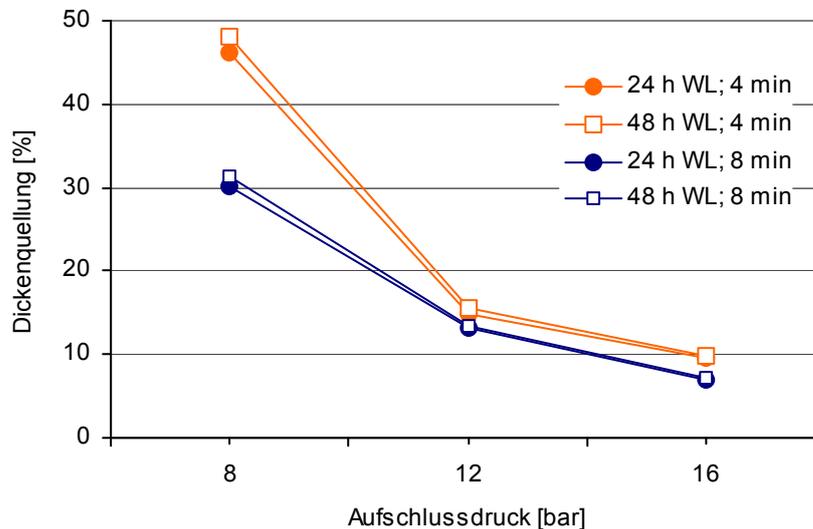


Abbildung 48 Dickenquellung nach 24 und 48 h Wasserlagerung bindemittelfreier MDF in Abhängigkeit von den Aufschlussbedingungen bei der labortechnischen Herstellung von Kiefernholzfasern

Es wurde deutlich, dass bei allen Varianten das Hauptquellungspotential bereits nach 24 h Wasserlagerung ausgeschöpft war und die Wasserlagerung über 48 h nur noch eine geringfügige Erhöhung der Dickenquellungswerte ergab. Die Verlängerung der Aufschlusszeit auf 8 min führte bei einem industrieüblichen Aufschlussdruck von 8 bar zu einer erheblichen Reduzierung der Quellungsneigung. Signifikanter wurde die Dickenquellung jedoch vom Aufschlussdruck beeinflusst. So lagen die Werte der MDF aus 12 bar Faserstoff mit 14 % sehr deutlich unter den Quellwerten von MDF aus 8 bar Faserstoff mit 46 % bei 4 min Aufschlusszeit bzw. mit 30 % bei 8 min Aufschlusszeit. Bei Aufschlussdrücken von 16 bar konnten die Ergebnisse dann mit Quellwerten unter 10 % nochmals deutlich verbessert werden. Dabei wiesen MDF aus Faserstoff, der unter extremsten Aufschlussbedingungen (16 bar, 8 min) hergestellt worden war, mit 7 % nach 24 h bzw. mit 7,2 % nach 48 h Wasserlagerung die niedrigsten Werte auf.

Abbildung 49 zeigt die Dickenquellung nach Wasserlagerung von bindemittelfreiem MDF aus Kiefernholzfasern, der bei einem Druck von 8 bzw. 16 bar über einen Zeitraum von 4 min aufgeschlossen wurde.



Abbildung 49 Dickenquellung bindemittelfreier MDF aus 8 bar-Faserstoff (jeweils oben) sowie MDF aus 16 bar-Faserstoff (jeweils unten) nach 30 min (mittiges Bild) sowie nach 24 h (rechtes Bild) zu einem Drittel in Wasser gelagert im Vergleich zur Ausgangsprobe vor Wasserlagerung (linkes Bild), Fotos Stephani (IHD)

Diese Aussagen wurden durch Untersuchungen zur Wasseraufnahme der bindemittelfreien MDF bestätigt (Abbildung 50).

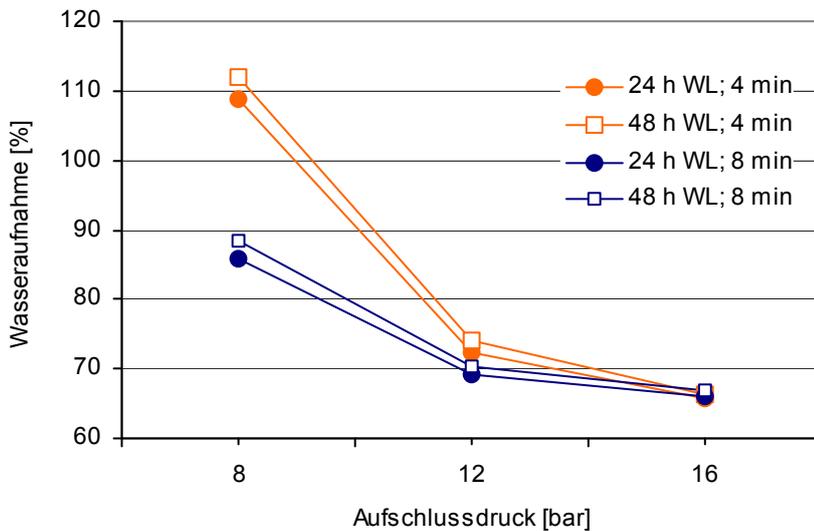


Abbildung 50 Wasseraufnahme nach 24 und 48 h Wasserlagerung bindemittelfreier MDF in Abhängigkeit von den Aufschlussbedingungen bei der labortechnischen Herstellung von Kiefernholzfasern

Erwartungsgemäß nahm die Wasseraufnahme bei Erhöhung des Aufschlussdruckes von 8 auf 12 bar deutlich ab. Im Unterschied zum Dickenquellungsergebnis konnte hingegen für MDF aus 16 bar-Faserstoffen gegenüber Platten aus 12 bar-Faserstoffen keine weitere deutliche Abnahme der Wasseraufnahme festgestellt werden. Analog zur Dickenquellung führte die Verlängerung der Aufschlusszeit bei der Faserstoffherstellung nur zu einer unwesentlichen Verringerung der Wasseraufnahme daraus hergestellter MDF.

Bezüglich des Formaldehydgehaltes hatten die Untersuchungen an Faserstoffen gezeigt, dass die Extremvariante (Aufschluss bei 16 bar und 8 min Dämpfzeit) mit 2,7 mg HCHO den höchsten Wert aufwies. Alle anderen Varianten wiesen mit 1,3 bis 1,9 mg HCHO/100 g atro Holz grundsätzlich verhältnismäßig niedrige und untereinander gut vergleichbare Formaldehydgehalte auf.

Die Ergebnisse zum Formaldehydgehalt leimfreier MDF relativieren die bisherigen Aussagen und zeigen für alle Versuchsvarianten vergleichbare Werte auf einem prinzipiell niedrigen Niveau. Dabei weist die Faserplatte, die aus industrieüblich bei 8 bar über 4 min labortechnisch aufgeschlossenem Faserstoff hergestellt wurde, mit 1,5 mg HCHO den höchsten Formaldehydgehalt auf, der im übrigen nahezu mit dem Faserstoffwert (1,6 mg HCHO/100 g atro Holz, vgl. dazu auch Tabelle 19) übereinstimmt. Dagegen reduzieren sich für Platten aus dem Extremfaserstoff (16 bar, 8 min) die relativ hohen Ausgangswerte des Faserstoffes (Tabelle 19 von 2,7 auf 1,3 mg HCHO (Abbildung 51).

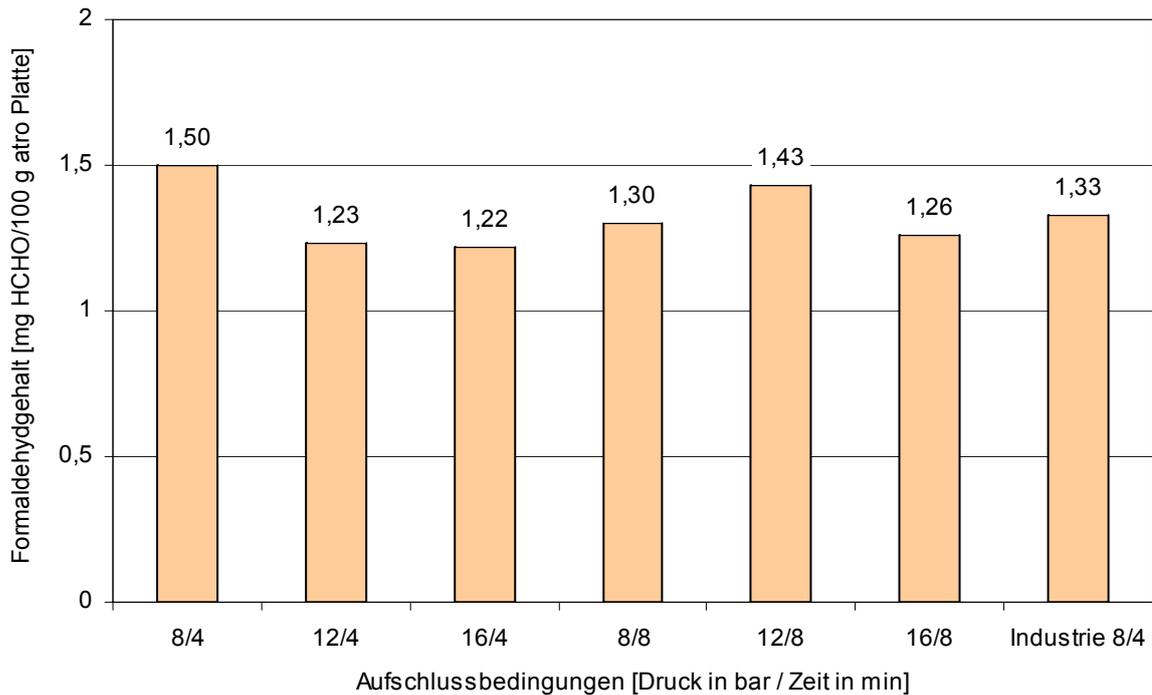


Abbildung 51 Formaldehydgehalt (Perforatorwert, B-Wert, feuchtenormiert) bindemittelfreier Labor-MDF in Abhängigkeit von den Aufschlussbedingungen bei der labortechnischen Herstellung von Kiefernholzfasern im Vergleich zu bindemittelfreien Platten aus Kiefernholz-Industrie-Faserstoff

Die festgestellte Reduzierung des Formaldehydgehaltes bei den Platten aus Extrem- und Industriefaserstoff sind als Folge der mit Presszeitfaktor $60 \text{ s/mm}_{\text{Plattendicke}}$ verhältnismäßig langen Presszeiten (und den dabei auf den Faserverbund intensiv einwirkenden Dampfdruck) anzusehen. Die langen Presszeiten waren zur Herstellung der bindemittelfreien MDF notwendig. Das dabei erreichte niedrige Niveau entspricht dabei quasi dem Formaldehydgehalt der anderen Versuchsvarianten (als Faserstoff bzw. als Platte). Eine weitere Reduzierung durch nochmals verlängerte Presszeiten ist auszuschließen.

5.3.2 Platteneigenschaften von bindemittelfreien HDF

Im Rahmen der dritten Versuchsreihe erfolgte unter Verwendung der bei Drücken von 8, 12 und 16 bar über 4 min thermo-mechanisch aufgeschlossenen Faserstoffe (vgl. Tabelle 14) die Herstellung von 6 mm dicken HDF im Rohdichtebereich von 860 bis 920 kg/m^3 , mit Presszeitfaktoren von 60 und 40 s/mm . Eine weitere Verkürzung der Presszeit führte insbesondere bei Platten aus intensiver aufgeschlossenen Faserstoffen zu Plattenreißen. Signifikant waren weiterhin ein Feuchtegehalt der Fasern vor dem Heißpressen von 8 % und eine Heizplattentemperatur von 220 °C.

Resultierend aus der im Vergleich zu den MDF aus Versuchsreihe 2 deutlich höheren mittleren Rohdichten ergaben sich für die HDF ohne Leimzusatz grundlegend bessere Platteneigenschaften, die im Ergebnis sogar teilweise den normativen Vorgaben nach DIN EN 622-5 entsprachen. Tabelle A3 der Anlage enthält die Versuchsergebnisse.

Bestätigend zu den Ergebnissen an leimfreien MDF ergaben sich für HDF aus industriell bei 8 bar und 4 min aufgeschlossenem Faserstoff die höchsten Feuchten nach Normalklimatisierung. Das Feuchteniveau lag mit 4,6 bis 5,7 % signifikant niedriger (Tabelle 24).

Tabelle 24 Ausgewählte physikalische und chemische Eigenschaften bindemittelfreier Labor-HDF in Abhängigkeit vom Presszeitfaktor bei der Plattenherstellung und von den Aufschlussbedingungen bei der labortechnischen Herstellung von Kiefernholzfaserstoffen, Plattenenddicke 6 mm, Vergleich zu normativen Vorgaben an MDF gemäß DIN EN 622-5

HDF-Eigenschaften	IHD-Code	Presszeitfaktor [s/mm _{Plattendicke}]						Anforderungen nach DIN EN 622-5 MDF > 6 – 9 mm
		60			40			
		Aufschlussbedingungen: Druck, Temperatur, Zeit						
n = 12, Ausnahmen pH-Wert und Formaldehyd-gehalt mit n = 2 sowie Feuchtegehalt mit n = 4		8 bar 170 °C 4 min	12 bar 187 °C 4 min	16 bar 200 °C 4 min	8 bar 170 °C 4 min	12 bar 187 °C 4 min	16 bar 200 °C 4 min	
		3090	3091	3094	3095	3097	3098	
Rohdichte [kg/m ³]	\bar{x} s	924 20,2	903 35,9	865 52,4	908 24,5	905 37,3	859 52,9	-
Querzugfestigkeit [N/mm ²]	\bar{x} s	0,19 0,05	0,30 0,16	0,35 0,15	0,20 0,15	0,49 0,19	0,41 0,15	0,65
Biegefestigkeit [N/mm ²]	\bar{x} s	35,7 6,7	28,5 7,2	23,4 2,1	38,7 4,1	24,3 2,0	30,8 4,1	23
Biege-Elastizitätsmodul [N/mm ²]	\bar{x} s	4975 217	4981 197	4024 323	4842 379	4626 135	4345 436	2700
Dickenquellung nach 24 h WL [%]	\bar{x} s	159,5 15,5	56,6 3,3	26,0 2,6	201,2 30,2	61,1 5,3	41,5 3,7	17
Feuchtegehalt bei Prüfung [%]	\bar{x} s	5,4 0,2	4,6 0	4,7 0,3	5,7 0,2	4,9 0	4,7 0,1	4 - 11
pH-Wert bei Kaltwasserextraktion []		4,6	4,3	4,3	4,4	4,3	4,2	-
Formaldehyd-gehalt, B-Wert [mg HCHO/100 g Platte atro]		0,75	0,72	0,62	nicht bestimmt			8,0

Unabhängig vom Presszeitfaktor wiesen die HDF vergleichsweise positive Biegeeigenschaften auf, die i. d. R. auch den Normvorgaben an MDF gemäß DIN EN 622-5 entsprachen. Ein intensiverer Faseraufschluss führte in Übereinstimmung zu den Aussagen an leimfreien MDF zu einer Verschlechterung der Biegefestigkeiten und E-Moduln. Ausnahme bildete die Variante aus 16 bar-Faserstoff, die mit dem verkürzten Presszeitfaktor von 40 s/mm hergestellt wurde. Gegenüber der hochdichten Faserplatte aus 12 bar-Faserstoff erhöhte sich die Biegefestigkeit um mehr als 20 %. Das ist auch insofern bemerkenswert, da die 16 bar Variante eine um 45 kg/m³ reduzierte mittlere Rohdichte aufwies.

Die pH-Wert-Analyse (Kaltwasserextraktion) ergab für HDF mit zunehmenden Aufschlussdruck geringfügig abnehmende Werte, was in tendenzieller Übereinstimmung mit den bisherigen an Faserstoffen gewonnenen Erkenntnissen steht.

Optimistisch stimmen die Ergebnisse zum Formaldehyd-gehalt nach EN 120, die unabhängig vom Aufschlussgrad bei der Zerfaserung mit Perforatorwerten von deutlich unter 1 mg Formaldehyd pro 100 g atro Platte auf einem sehr niedrigen Niveau lagen. Übereinstimmend zu den Ergebnissen der leimfreien MDF reduziert sich bei Platten aus Extremfaserstoff der verhältnismäßig hohe Faserstoffausgangswert am stärksten (von 2,7 mg HCHO, siehe Tabelle 19, auf 0,6 mg HCHO). Die gegenüber den leimfreien MDF nochmals reduzierten Formaldehyd-werte werden auf den, infolge der verhältnismäßig langen Presszeit auf den Faserverbund einwirkenden, Dampfdruck zurückgeführt, der durch eine 15 bis 20 % höhere mittlere HDF-Rohdichte erhöht und damit gegenüber den MDF-Varianten nochmals verstärkt ist.

Für die Querzugfestigkeit wurden verhältnismäßig niedrige Werte bestimmt, die Normvorgabe von 0,65 N/mm² wurde von keiner Versuchsvariante eingehalten. Analog zu den MDF-Ergebnissen ergaben sich für Platten aus verschärft aufgeschlossenen Faserstoffen bessere Ergebnisse. Allerdings wird eine Diskussion von Unterschieden zwischen den Versuchsvarianten durch die im Falle bindemittelfreier Platten verhältnismäßig hohen Standardabweichungen der Messwerte erschwert (Abbildung 52).

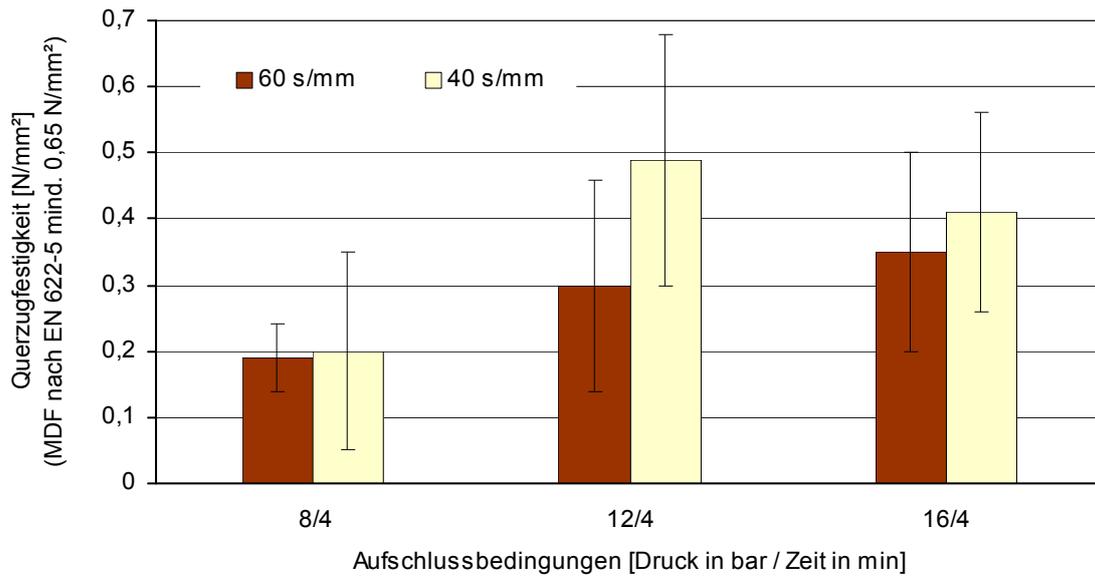


Abbildung 52 Querzugfestigkeit bindemittelfreier HDF in Abhängigkeit vom Presszeitfaktor und den Aufschlussbedingungen beim Faserstoffaufschluss, Plattenenddicke 6 mm

Die Ergebnisse zur Dickenquellung nach Wasserlagerung bestätigen das enorm quellungsvergütende Potential einer Aufschlussintensivierung. Unabhängig von der Presszeit reduzierten sich die Quellwerte von Platten aus verschärft aufgeschlossenem Faserstoff auf ein Viertel bis ein Fünftel gegenüber HDF aus industrieüblichem Faserstoff. Wie der Vergleich der Ergebnisse in Tabelle 24 (Quellwerte nach 24 h WL) und Abbildung 53 (Quellwerte nach 48 h WL) verdeutlicht, war übereinstimmend zu den MDF-Ergebnissen das Quellungspotential bereits nach 24 h Wasserlagerung nahezu vollständig ausgeschöpft.

Auffallend war dabei die relativ geringfügigen Streuungen der Messergebnisse speziell bei den höheren Aufschlussintensitäten, was eine hohe Signifikanz der Aussagen erwarten lässt.

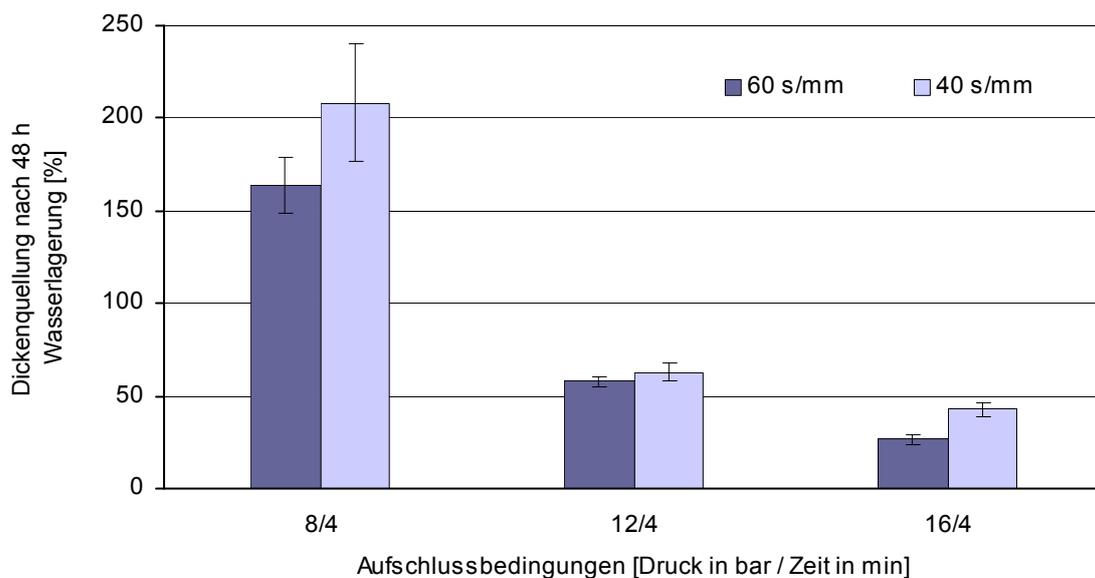


Abbildung 53 Dickenquellung nach 48 h Wasserlagerung bindemittelfreier HDF in Abhängigkeit vom Presszeitfaktor und den Aufschlussbedingungen beim Faserstoffaufschluss, Plattenenddicke 6 mm

Bestätigend dazu liegen die Ergebnisse zur Kantenquellung mit in Anbetracht der Bindemittel- und Hydrophobierungsmittel-Freiheit beachtlich niedrigen Werten nach Aufschlussintensivierung (Abbildung 54). Es sei darauf hingewiesen, dass die Prüfung der Kantenquellung abweichend von den normativen Vorgaben der DIN EN 13329 grundsätzlich an *unbeschichteten* HDF erfolgte.

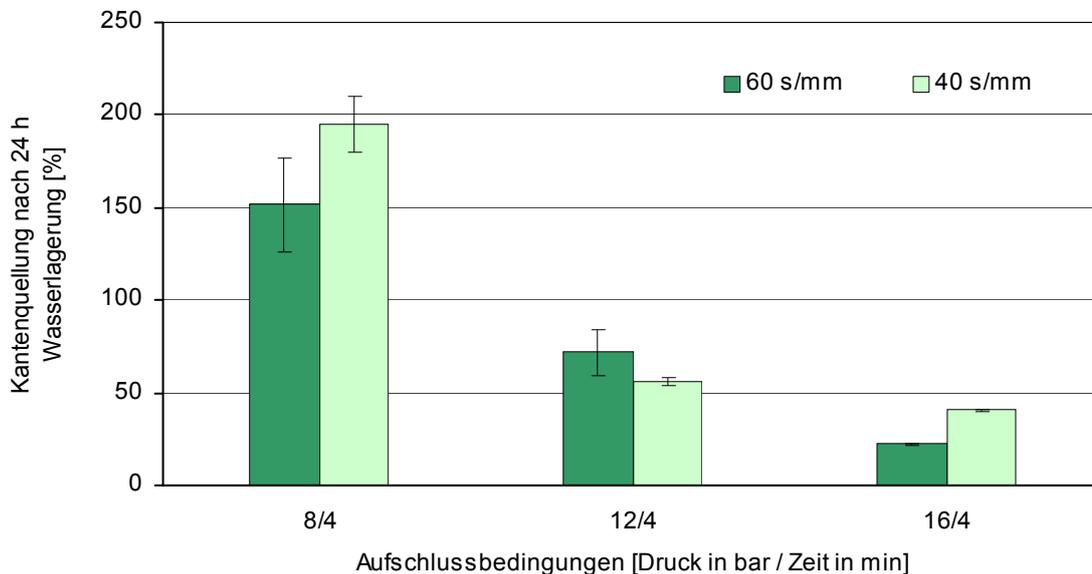


Abbildung 54 Kantenquellung nach 24 h Wasserlagerung bindemittelfreier (unbeschichteter) HDF in Abhängigkeit vom Presszeitfaktor und den Aufschlussbedingungen beim Faserstoffaufschluss, Plattenenddicke 6 mm

Auch hier spielt die Verkürzung der Presszeiten speziell bei den schärferen Aufschlussbedingungen keine maßgebliche Rolle. Hervorzuheben ist die wiederum sehr geringe Streuung der Messwerte, die im Falle der bindemittelfreien HDF aus bei 16 bar über 4 min aufgeschlossenem Faserstoff bei einem Presszeitfaktor von 60 s/mm_{Plattendicke} bei 0,2 % und bei einem Presszeitfaktor von 40 s/mm_{Plattendicke} bei 0,8 % lag.

Zusammenfassend ist einzuschätzen, dass durch die Herstellung bindemittelfreier Faserplatten das enorme Potential einer möglichen Faserquellungsvergütung durch eine Aufschlussintensivierung bei der Faserstoffherstellung deutlich herausgearbeitet werden konnte. So reduzierte sich für MDF aus 16 bar Faserstoff die Dickenquellung nach 24 h Wasserlagerung auf Werte < 10 %. Im Gegensatz dazu wiesen Platten aus industriüblich bei 8 bar aufgeschlossenem Fasern Quellwerte im Bereich von ~ 50 % auf. Ein Aufschluss bei 12 bar ergab Dickenquellungen im Bereich von 15 % /Krug 2001/. Bestätigend dazu reduzierten sich unabhängig von der Presszeit die Quellwerte von hochdichten Faserplatten aus verschärft bei 12 bzw. 16 bar aufgeschlossenem Faserstoff auf ein Viertel bis ein Fünftel gegenüber HDF aus industriüblich bei 8 bar aufgeschlossenem Faserstoff /Krug 2005/.

Im Hinblick auf das Erreichen definierter Plattenqualitäten und einer wirtschaftlichen MDF-Herstellung wird auch in Zukunft sicherlich nicht auf Bindemittel verzichtet werden. In Kombination mit einer Aufschlussintensivierung sollte es aber möglich sein, mit reduziertem Bindemittelsatz bzw. durch Verwendung geeigneter Additive Faserplatten mit hoher Wirtschaftlichkeit herzustellen. Vor dem Hintergrund der eingangs angesprochenen Formaldehydproblematik ergeben sich durch eine Bindemittelreduktion ggf. auch ökologisch interessante Aspekte.

Als Vorzugsvariante ist ein Aufschluss bei 12 bar anzusehen, der eine quasi „ausgeglichene“ Energiebilanz aufweist. Der höhere Energie-Bedarf für die Dampferzeugung wird durch die Elektroenergieersparnis bei der Zerfaserung (etwa 2/3 gegenüber Aufschluss bei 8 bar und 4 min) nahezu ausgeglichen (vgl. Tabelle 21, Abbildung 40) und der bei Aufschlussdrücken von 12 bar (entspricht Temperaturen von 187 °C) durch das Herauslösen von Holzbestandteilen festgestellte Faserstoffmasseverlust fällt mit ~ 6 % (vgl. Tabelle 22, Abbildung 41) verhältnismäßig moderat aus.

5.3.3 Platteneigenschaften und Feuchtebeständigkeit von MDF

5.3.3.1 MDF mit UF-Harzbindung

Vorzugsweise erfolgt die Herstellung von MDF unter Verwendung von UF-Harzen /Marutzky 2006/. Es ist davon auszugehen, dass mehr als 90 % der nach dem Trockenverfahren hergestellten Faserplatten Harnstoffformaldehydharz-gebunden sind.

Um der industriellen Bedeutung dieses Bindemittels zu entsprechen und um die Auswirkungen der intensiver aufgeschlossenen Faserstoffe besser herauszuarbeiten wurden deshalb in der vierten Versuchsreihe UF-Harz-gebundene MDF mit 10 und 14 % Festharzanteil, bezogen auf Faserstoff_{atro} hergestellt. Alle Versuchsvarianten enthielten 1,2 % Hydrophobierungsmittel, bezogen auf Faserstoff_{atro}.

Derartige Platten lassen aufgrund der Hydrolyseanfälligkeit des UF-Harzes keine erhöhte Feuchtebeständigkeit der Verklebung oder gar eine Witterungsbeständigkeit erwarten. In Analogie zu den leimfreien Platten wird jedoch angenommen, dass die mit der Aufschlussintensivierung einhergehenden quellungsmodifizierenden Effekte nachgewiesen werden können.

Die MDF-Herstellung mit einer mittleren Rohdichte von 750 kg/m³ erfolgte unter Verwendung der bei Drücken von 8, 12 und 16 bar über 4 min bzw. 8 min aufgeschlossenen Faserstoffe (vgl. Tabelle 14) mit Presszeitfaktoren von 18 s/mm. Der Feuchtegehalt der Fasern vor dem Heißpressen lag zwischen 8 und 10 %, die Heizplattentemperatur betrug 190 °C. Das Niveau des Feuchtegehaltes der MDF bei Prüfung lag mit 6 bis 8 % in einem erwartungsgemäß (in Anbetracht der gegenüber den leimfreien Platten deutlich verkürzten Presszeit) höheren, untereinander gut vergleichbaren Bereich.

Die kaltwässrigen pH-Wertextrakte lagen 4,6 bis 5 in einem – in Anbetracht des Bindemittelsystems erwarteten – relativ engen Bereich. Bestätigend zu den bisherigen Aussagen ergaben zunehmende Aufschlussintensitäten geringfügig abnehmende Werte.

In Tabelle A4 der Anlage sind sämtliche Versuchsergebnisse zusammengefasst.

Die in Abbildung 55 dargestellten Ergebnisse zur Biegefestigkeit wiesen für MDF aus industrieüblich bei 8 bar und 4 min aufgeschlossenem Faserstoff ausreichende Biegefestigkeiten auf. Bestätigend zu den Ergebnissen der leimfreien Faserplatten ergaben sich für die Versuchsvarianten aus intensiver aufgeschlosseneren Faserstoffen drastisch schlechtere Biegeeigenschaften, die dann auch nicht mehr den normativen Vorgaben an MDF nach DIN EN 622-5 entsprachen. Unter Berücksichtigung der Streuung lagen die Biegefestigkeiten der Platten aus bei 12 bar über 4 min aufgeschlossenen Faserstoffen bereits unter der Normvorgabe von 20 N/mm².

Die Erhöhung des Leimanteils von 10 auf 14 % zog zwar grundsätzlich eine geringfügige Verbesserung der Werte nach sich, änderte aber nichts an vorstehender Aussage zur Aufschlussintensität.

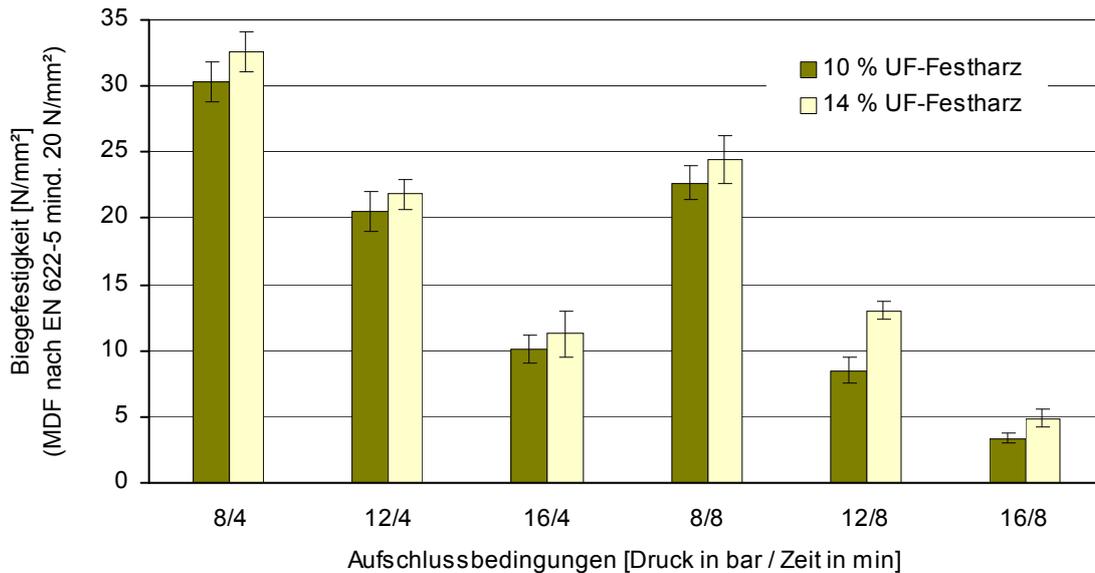


Abbildung 55 Biegefestigkeit von MDF in Abhängigkeit vom UF-Festharzanteil sowie von den Aufschlussbedingungen bei der labortechnischen Herstellung von Kiefernholzfasern

Die Ergebnisse zum Biege-E-Modul folgten dem Trend zur Biegefestigkeit und führten für Platten mit 10 % UF-Harz ab einer Aufschlussintensität von 12 bar und 8 min zu Werten, die unter Berücksichtigung der Streuung der Messwerte nicht mehr den Normvorgaben an MDF zur Verwendung im Trockenbereich (Typ MDF) genügten.

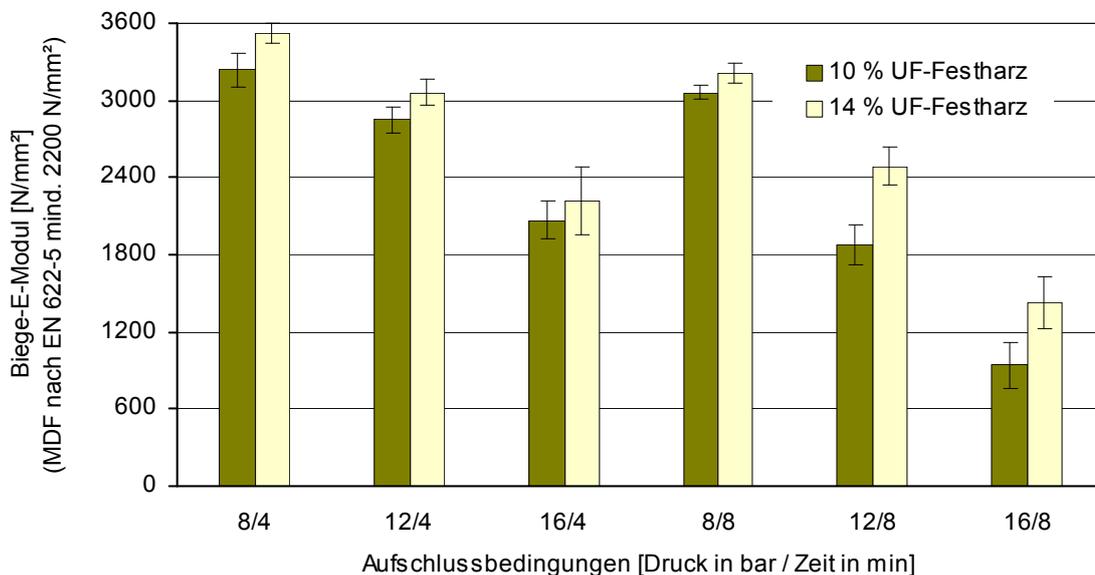


Abbildung 56 Biege-E-Modul von MDF in Abhängigkeit vom UF-Festharzanteil sowie von den Aufschlussbedingungen bei der labortechnischen Herstellung von Kiefernholzfasern

Während bei den leimfreien Faserplatten unabhängig vom Faserstoffaufschlussgrad eine hohe Streuung der Einzelwerte (insbesondere bei der Festigkeit) festgestellt wurde, wiesen bezüglich der Biegeeigenschaften bei den UF-Harz-gebundenen MDF speziell die Platten aus 16 bar-Faserstoff die höchsten Standardabweichungen der Messwerte auf. Zudem führte die Verlängerung der Kochzeit von 4 auf 8 min zu schlechteren Ergebnissen bei Biegebeanspruchung. Als Ursache dafür werden zum Einen die insbesondere aus dem hohen Feinstfaseranteil der Extremaufschlussvarianten resultierenden Beleimungsschwierigkeiten sowie zum Anderen die kürzeren Fasern bei höheren

Aufschlussgraden angesehen. Ein weiterer Grund liegt (wie bereits bei den leimfreien MDF diskutiert) im Abbau der Hemicellulosen bei intensivem Faserstoffaufschluss. Hemicellulosen können bekannterweise auftretende Zugspannungen aufnehmen. Das bestätigen auch die Ergebnisse zur Querkzugfestigkeit (Abbildung 57).

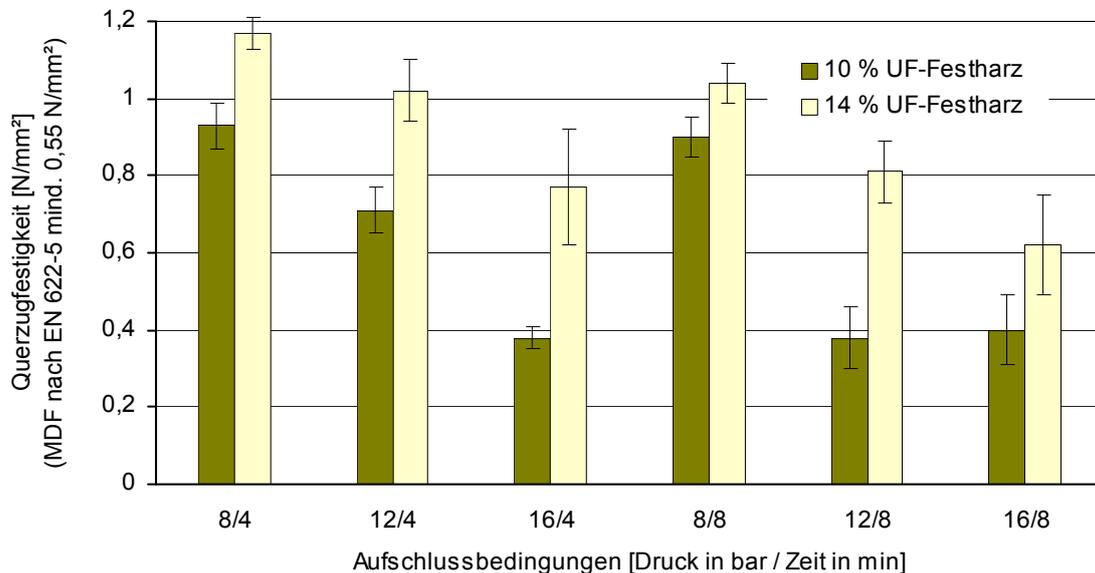


Abbildung 57 Querkzugfestigkeit von MDF in Abhängigkeit vom UF-Festharzanteil sowie von den Aufschlussbedingungen bei der labortechnischen Herstellung von Kiefernholzfasern

Im Unterschied zu den Biegeeigenschaften wurde allerdings festgestellt, dass die Erhöhung des Bindemittelanteils von 10 auf 14 % teilweise eine gravierende Verbesserung der Zugfestigkeiten senkrecht zur Plattenebene nach sich zog. Dabei kam es für MDF aus bei 16 bar über 4 min sowie aus bei 12 bar über 8 min aufgeschlossenen Faserstoff fast zu einer Verdopplung der Querkzugfestigkeiten. Im Ergebnis entsprachen alle Faserplatten mit 14 % UF-Harz bezüglich der Querkzugfestigkeit den Normvorgaben gemäß DIN EN 622-5.

Abweichend zu den Ergebnissen der bindemittelfreien Platten ergaben sich mit zunehmender Aufschlussintensität bei der Faserstoffherstellung signifikant geringere Festigkeiten. Es sei aber darauf hingewiesen, dass das Querkzugfestigkeitsniveau der leimfreien Faserplatten deutlich geringer war. Zudem ist davon auszugehen, dass die infolge eines verschärften Faserstoffaufschlusses erhöhten Anteile aktivierbarer Holzbestandteile bzw. -inhaltsstoffe (insbesondere an der Faseroberfläche aktivierbares Lignin) erst bei den zur Herstellung prüffähiger leimfreier Platten notwendigen langen Presszeiten von 60 bis 40 s/mm_{Plattendicke} tatsächlich aktiviert werden konnten.

Die Dickenquellungswerte nach 24 h Wasserlagerung liegen in Anbetracht des gewählten Bindemittels unabhängig vom Aufschlussgrad der unterschiedlichen Versuchsvarianten auf einem sehr günstigen, niedrigen Niveau (Abbildung 58). Alle Varianten entsprachen damit sicher den normativen Vorgaben für MDF mit max. 15 %, MDF.H mit max. 10 % sowie MDF.HLS mit 8 %. Dieses überraschende Ergebnis ist auf die exzellente hydrophobe Wirkung des bei allen Varianten zugesetzten Hydrophobierungsmittels zurückzuführen. Möglicherweise war auch der gewählte einheitliche Anteil von 1,2 % zu hoch und überdeckt die eigentlich erwarteten, deutlicheren Aussagen zur Quellungsvergütung bei einer Faserplattenherstellung aus unter intensiveren Bedingungen aufgeschlossenen Faserstoffen.

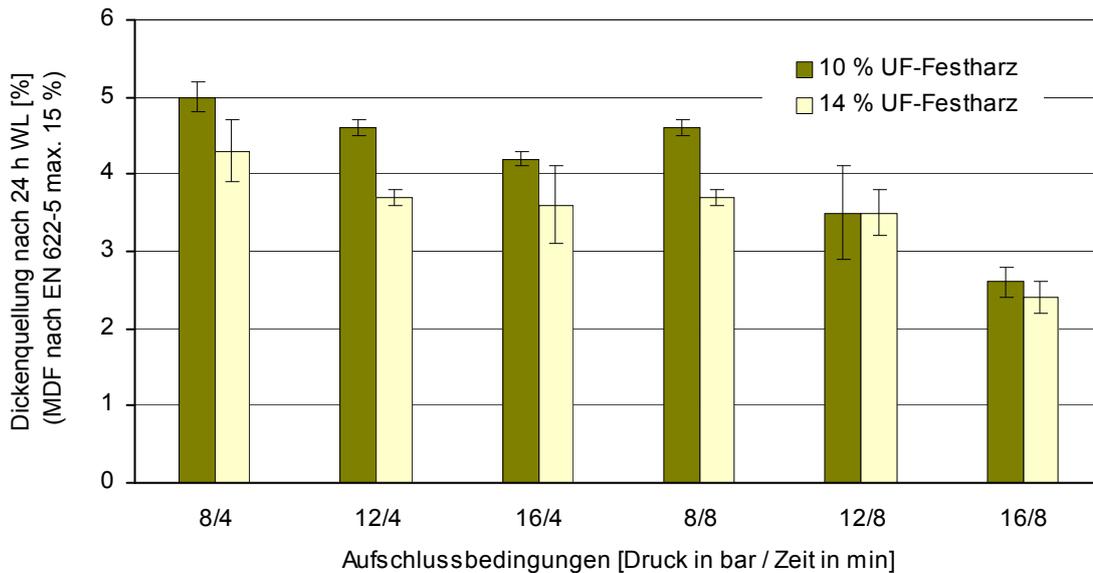


Abbildung 58 Dickenquellung nach 24 h Wasserlagerung von MDF in Abhängigkeit vom UF-Festharzanteil sowie von den Aufschlussbedingungen bei der labortechnischen Herstellung von Kiefernholzfasern

Trotz der grundsätzlich sehr niedrigen Werte wird deutlich, dass sowohl die Verschärfung der Aufschlussbedingungen als auch die Erhöhung des Leimanteils i. d. R. günstigere Quellwerte nach Wasserlagerung nach sich ziehen. Mit 2,6 % (bei 10 % UF) bzw. 2,4 % (bei 14 % UF) weisen MDF aus dem unter extremsten Bedingungen (bei 16 bar über 8 min) aufgeschlossenen Faserstoff die besten Dickenquellungsergebnisse nach 24 h WL auf, was sinngemäß die Aussagen zu den leimfreien Faserplatten bestätigt.

Der Formaldehydgehalt (Perforator-B-Wert) lag für alle Versuchsvarianten mit 14 % Festharzanteil unabhängig von der Aufschlussintensität auf einem sicheren E1-Niveau. Die Reduktion des Leimanteils auf 10 % zog – gleichfalls unbeeinflusst vom Faserstoffaufschlussgrad – grundsätzlich eine signifikante Erhöhung der Perforatorwerte nach sich.

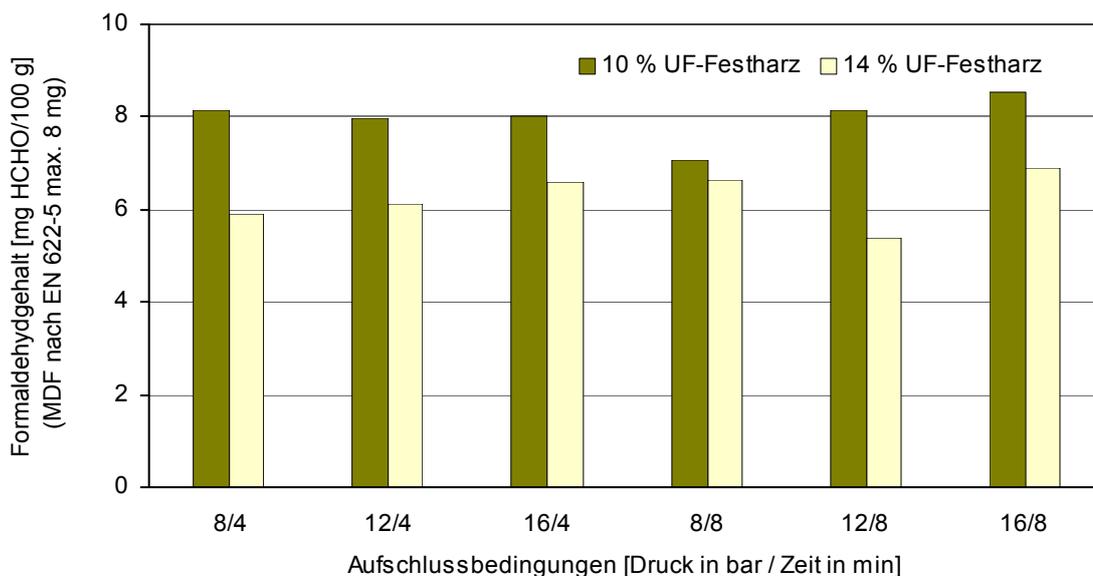


Abbildung 59 Formaldehydgehalt (Perforator-B-Wert) von MDF in Abhängigkeit vom UF-Festharzanteil sowie von den Aufschlussbedingungen bei der labortechnischen Herstellung von Kiefernholzfasern

Das Phänomen abnehmender Formaldehydhalte trotz zunehmender Festharzanteile der Kondensationsharze kann auf eine verstärkte intermolekulare Wechselwirkung

(zwischen den höheren Harnstoff- und Formaldehydanteilen) unter Abspaltung von Spaltprodukten (z. B. Wasser) bei der Kondensation zurückgeführt werden. Dementsprechend vernetzen die Klebstoffe intensiver, das Auftreten freier Methylolgruppen wird gemindert und das Formaldehyd wird beständiger im Netzwerk eingebaut. Da bei der Formaldehydprüfung nach EN 120 (Perforator) über die Extraktion mit Toluol⁴⁸ größtenteils nur freies Formaldehyd bestimmbar ist, nimmt der Formaldehydgehalt folgerichtig bei zunehmendem Festharzanteil ab.

Erfahrungen aus der industriellen Span- und Faserplatten- bzw. Spanformteilherstellung bestätigen diesen Effekt /u. a. Dietz 2003; Hof 2004; Kantner 2002; Prantz 2007; Steindl 2010; Wolf 2004; Wolf 2010; Zeissig 2009/. Untersuchungen zur Herstellung von MDF unter Anwendung einer in den Vorpressprozess integrierten Hochfrequenzvorerwärmung zeigten, dass bei Einsatz von vier unterschiedlichen, industrieüblichen UF-Harzen der Formaldehydgehalt mit zunehmenden Festharzanteil (Stufung 5, 7 und 11 %) signifikant sinkt /Krug, Mäbert 2010/. Hoferichter und Kehr führen dieses Phänomen auf eine zum steigenden Leimanteil korrelierende Erhöhung der Bindungsmöglichkeiten des freien Formaldehyds und der daraus resultierenden stärkeren Netzwerkausbildung zurück /Hoferichter 1996; Hoferichter, Kehr 1996/.

Abschließend (in Übereinstimmung und Ergänzung bisheriger Arbeiten, u. a. von Rofael et al. 1994, 1995; Schneider 1999 oder Groom et al. 2002, 2004) ist festzuhalten, dass der Einfluss intensivierter Aufschlussbedingungen auch bei der Herstellung von MDF mit 10 bzw. 14 % UF-Harz-Bindemittelzusatz deutlich wurde.

Erwartungsgemäß und in Übereinstimmung mit den Aussagen zu leimfreien Platten ergaben sich mit zunehmender Aufschlussverschärfung ungünstigere Biegeeigenschaften. Für die Querszugfestigkeit wurden mit zunehmender Aufschlussintensität bei der Faserstoffherstellung gleichfalls signifikant geringere Werte ermittelt, was quasi im Widerspruch zu den bisherigen Ergebnissen an bindemittelfreien Platten steht. Als Ursache dafür wird die – im Vergleich zu den leimfreien Faserplatten – deutlich verkürzte Presszeit angesehen, die offensichtlich nicht ausreicht, um die infolge eines verschärften Faserstoffaufschlusses erhöhten Anteile aktivierbarer Holzbestandteile tatsächlich nutzbar zu machen.

Obwohl alle Varianten sehr niedrige Quellwerte nach Wasserlagerung aufweisen, zieht sowohl die Verschärfung des Aufschlussgrades als auch die Erhöhung des Leimanteils ein reduziertes Dickenquellungspotential nach sich, womit sinngemäß die Aussagen zu den Faserplatten ohne Leimzusatz bestätigt werden. Der Formaldehydgehalt (Perforator-B-Wert) lag für alle Versuchsvarianten mit 14 % Festharzanteil unbeeinflusst von der Aufschlussintensität auf einem sicheren E1-Niveau.

Auf Prüfungen zur Feuchtebeständigkeit der Verklebung nach Kochprüfung oder Zyklustest bzw. zur Witterungsbeständigkeit nach technischer oder natürlicher Alterung wurde wegen der mangelnden Hydrolysebeständigkeit der UF-Harz-Bindung verzichtet. Diese Untersuchungen waren vielmehr wesentlicher Bestandteil der folgenden Versuchsreihen zur Herstellung von Faserplatten nach dem Trockenverfahren mit Bindemitteln, die aufgrund von Zusammensetzung, Wirkungsweise und Anteil eine gute Feuchte- und Witterungsbeständigkeit damit hergestellter Werkstoffe ermöglichen sollten.

⁴⁸ Im Unterschied zur Extraktion mit Toluol wäre bei einem Totalaufschluss z. B. mit konzentrierter Schwefelsäure (Hydrolyse/Destillation als Gegenreaktion zur Kondensation) auch das gebundene Formaldehyd nachweisbar.

5.3.3.2 MDF mit MUF-, PF-, MUPF-Harz- sowie PMDI-Bindung, konstanter Bindemittelanteil

Nach den Untersuchungen mit UF-Harzen erfolgten die weiteren MDF-Versuche mit MUF-, PF-, MUPF-Harz- sowie PMDI-Klebstoffen, die grundsätzlich eine erhöhte Feuchtebeständigkeit der Verklebung und damit ggf. auch Witterungsbeständigkeit erwarten ließen. Zur Herausarbeitung des quellungsmodifizierenden Einflusses einer Intensivierung der Aufschlussbedingungen bei der Faserstoffherstellung erfolgten die Versuche im Rahmen von Versuchsreihe 5 dabei zunächst mit einem konstanten Bindemittelanteil von 16 %, bezogen auf Faserstoff_{atro}, unabhängig von Art und Qualität des eingesetzten Bindemittels. Alle Versuchsvarianten enthielten 1,2 % Hydrophobierungsmittel, bezogen auf Faserstoff_{atro}.

Die Herstellung der MUF-gebundenen MDF erfolgte unter Verwendung der bei Drücken von 8, 12 und 16 bar über 4 min bzw. 8 min aufgeschlossenen Faserstoffe sowie vergleichend mit dem bei 8 bar über 4 min aufgeschlossenen Industriefaserstoff (vgl. auch Tabelle 14). Zur Fertigung der Platten mit PF-Harz fanden sämtliche labortechnisch erzeugten Faserstoffe Anwendung, während die MDF mit MUPF-Harz- bzw. PMDI-Bindung nur aus den bei 8, 12 und 16 bar über 4 min aufgeschlossenen Faserstoffen hergestellt wurden. Der Presszeitfaktor betrug bei einer einheitlichen Heizplattentemperatur von 190 °C konstant 18 s/mm_{Plattendicke}. Der Feuchtegehalt der Fasern vor dem Heißen lag zwischen 8 und 10 %. Die vollständigen Ergebnisübersichten sind Bestandteil von Tabelle A5 der Anlage.

Die Rohdichten der klimatisierten MDF-Varianten lagen mit Werten zwischen 740 und 785 kg/m³ auf einem gut vergleichbaren Niveau (Tabelle 25).

Tabelle 25 Einfluss der Aufschlussbedingungen bei der Faserstoffherstellung und der Bindemittelart auf mittlere Rohdichte, Feuchtegehalt, pH-Wert sowie Formaldehydgehalt von Labor-MDF aus Kiefernholzfasern mit konstantem Bindemittelanteil von 16 %

MDF-Eigenschaften	Aufschlussbedingungen:						
	Druck, Temperatur, Zeit						
\bar{x} (Basis n = 18, Ausnahmen pH-Wert und Formaldehydgehalt mit n = 2)	8 bar 170 °C 4 min	12 bar 187 °C 4 min	16 bar 200 °C 4 min	8 bar 170 °C 8 min	12 bar 187 °C 8 min	16 bar 200 °C 8 min	8 bar 170 °C 4 min Industrie
Rohdichte [kg/m ³]							
PF-Bindung	755	755	760	755	750	770	n. b. ⁴⁹
MUF-Bindung	785	785	770	780	775	780	780
MUPF-Bindung	770	770	760	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.
PMDI-Bindung	740	740	740	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.
Feuchtegehalt bei Prüfung [%]							
PF-Bindung	10,3	10,4	11,0	10,6	11,8	12,5	n. b.
MUF-Bindung	7,2	6,6	6,0	5,8	5,1	5,4	8,1
MUPF-Bindung	7,3	6,5	6,3	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.
PMDI-Bindung	6,9	5,8	6,8	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.
pH-Wert bei Kaltwasserextraktion []							
PF-Bindung	8,4	7,7	7,3	8,3	7,7	7,1	n. b.
MUF-Bindung	5,2	5,4	4,9	5,3	5,1	4,7	5,2
MUPF-Bindung	5,4	5,4	5,1	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.
PMDI-Bindung	4,5	4,4	4,4	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.
Formaldehydgehalt, B-Wert [mg HCHO/100 g Platte atro]							
PF-Bindung	1,0	1,5	1,1	1,6	1,9	1,5	n. b.
MUF-Bindung	14,0	12,1	9,1	9,6	9,4	7,6	15,3
MUPF-Bindung	13,9	11,6	12,6	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.
PMDI-Bindung	0,1	0,3	0,3	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.

⁴⁹ n. b. = nicht bestimmt

Bestätigend zu den Ergebnissen bei bindemittelfreien MDF wurden für MDF mit MUF-, MUPF- oder PMDI-Bindung bei Verwendung von industrieüblich aufgeschlossenem Faserstoff (8 bar, 4 min) die höchsten Werte, für MDF aus bei 16 bar über 8 min aufgeschlossenem Faserstoff die niedrigsten Feuchten bestimmt. Die Ausnahme bildeten aufgrund des Alkalianteils erwartungsgemäß die PF-Harz-gebundenen Platten mit Feuchtegehalten zwischen 10,3 bis 12,5 % nach Normalklimatisierung (bei 20 °C und 65 % rel. Luftfeuchte), wobei im Unterschied zu den anderen Bindemitteln die höchsten Werte für MDF aus Faserstoff ermittelt wurden, der bei einem Aufschlussdruck von 16 bar und einer Aufschlusszeit von 8 min hergestellt wurde.

Die pH-Werte der MDF lagen, bedingt durch die eingesetzten Bindemittel, für die MUF-Harz-, MUPF-Harz- und PMDI-Varianten im sauren und für die PF-Harz-Varianten im neutralen bis schwach basischen Bereich. Bei Verwendung von PMDI wurden mit 4,4 bis 4,5 erwartungsgemäß die geringsten pH-Werte bestimmt, die im Bereich der Holzfasernstoffe liegen. Der Einfluss von steigendem Aufschlussdruck und zunehmender Aufschlusszeit auf den pH-Wert der Fasernstoffe bestätigte sich auch für den pH-Wert von MDF, die aus diesen Fasernstoffen erzeugt wurden.

Die PMDI- und PF-Harz-gebundenen MDF wiesen sehr niedrige Formaldehydgehalte auf. Dagegen wurde der Gütewert von 8 mg HCHO/100 g gemäß DIN EN 622-5 bei allen MUF- und MUPF-Harz-Varianten mit einer Ausnahme überschritten. Zwischen den einzelnen Varianten trat eine deutliche Differenzierung auf, wobei für MDF aus Fasernstoffen, die unter industrienahen Bedingungen (8 bar, 4 min) hergestellt waren, die höchsten Werte ermittelt wurden.

Mit Ausnahme der MUF-Harz-Bindung konnten keine eindeutigen Abhängigkeiten einer Aufschlussverschärfung auf die resultierenden Formaldehydgehalte daraus hergestellter MDF festgestellt werden, was mit den Aussagen aus Versuchsreihe 4 zu UF-Harz-gebundenen Platten übereinstimmt. Im Falle des MUF-Harzes reduzierte sich aber der Formaldehydgehalt von Faserplatten aus intensiver aufgeschlossenem Faserstoff signifikant. Dabei lag der Perforatorwert der MDF aus bei 16 bar über 8 min (Extremvariante) aufgeschlossenem Faserstoff mit 7,6 mg HCHO bei nur etwa 50 % der Formaldehydgehalte der Varianten aus unter Normalbedingungen labortechnisch oder industriell bei 8 bar über 4 min aufgeschlossenem Faserstoff (14,0 bzw. 15,3 mg HCHO). Bei den Versuchen wurde prinzipiell auf Einsatz von Additiven zur Formaldehydreduzierung verzichtet.

Die Quersugfestigkeit lag erwartungsgemäß – in Anbetracht des Bindemittelanteils von 16 %, bez. auf atro Faserstoff – auf einem hohen, die normativen Vorgaben deutlich überschreitenden Niveau (Abbildung 60). Die Streuung der Messergebnisse war bei Platten mit MUPF-Harz-Bindung am höchsten.

Generell wiesen die MUF-Harz-gebundenen MDF, unabhängig vom Faserstoffaufschluss, die höchsten Quersugfestigkeiten auf. Zwischen den unterschiedlichen Bindemitteltypen konnten bei Aufschlussverschärfung keine eindeutigen Tendenzen bezüglich Festigkeitsveränderungen festgestellt werden, was auch durch die bereits besprochene Streuung der einzelnen Messergebnisse bedingt wird.

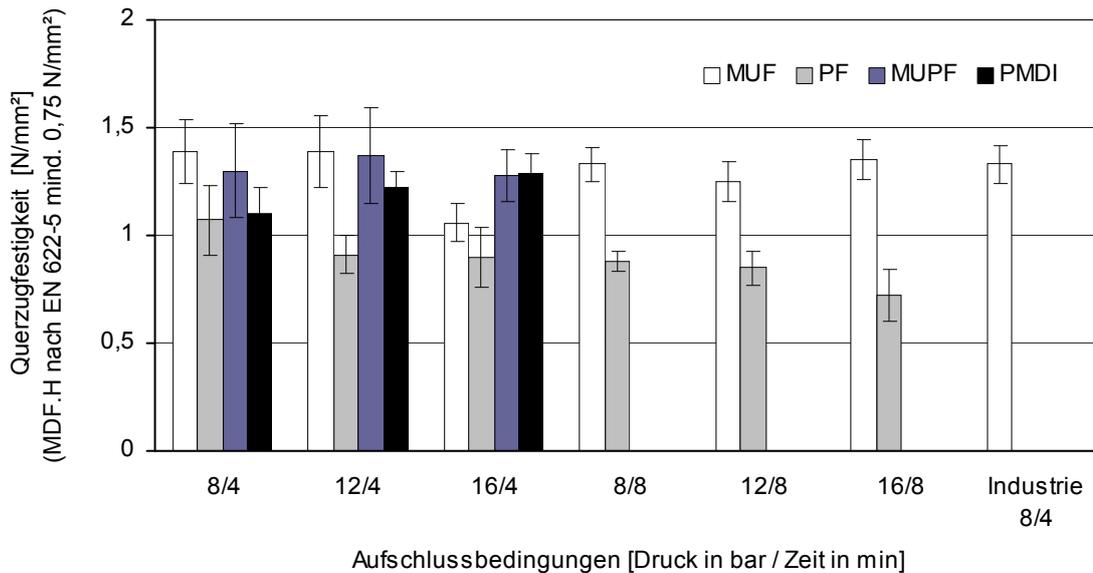


Abbildung 60 Querzugfestigkeit von Labor-MDF in Abhängigkeit von Bindemitteltyp (Anteil konstant 16 %) und Aufschlussbedingungen bei der labortechnischen Herstellung von Kiefernholzfasern (im Vergleich zu Industriefaserstoff)

Die besten Querzugfestigkeitswerte nach Kochprüfung wurden bei Verwendung von PMDI erzielt, wobei mit Ausnahme der MUF-Harz-Varianten gilt, dass bei Aufschlussverschärfung höhere Querzugfestigkeiten ermittelt wurden (Abbildung 61). Als Ursache wird die mit der Aufschlussverschärfung einhergehende Reduzierung des Quell-/Schwindverhaltens der Faserstoffe angesehen, die speziell nach einer Kochvorbehandlung der MDF-Proben geringere Querdruck- und Querzugbelastungen der Klebstoffbrücken und damit bessere Festigkeitseigenschaften nach sich zieht. Alle Varianten entsprachen den normativen Vorgaben für MDF.H bzw. HLS nach EN 622-5.

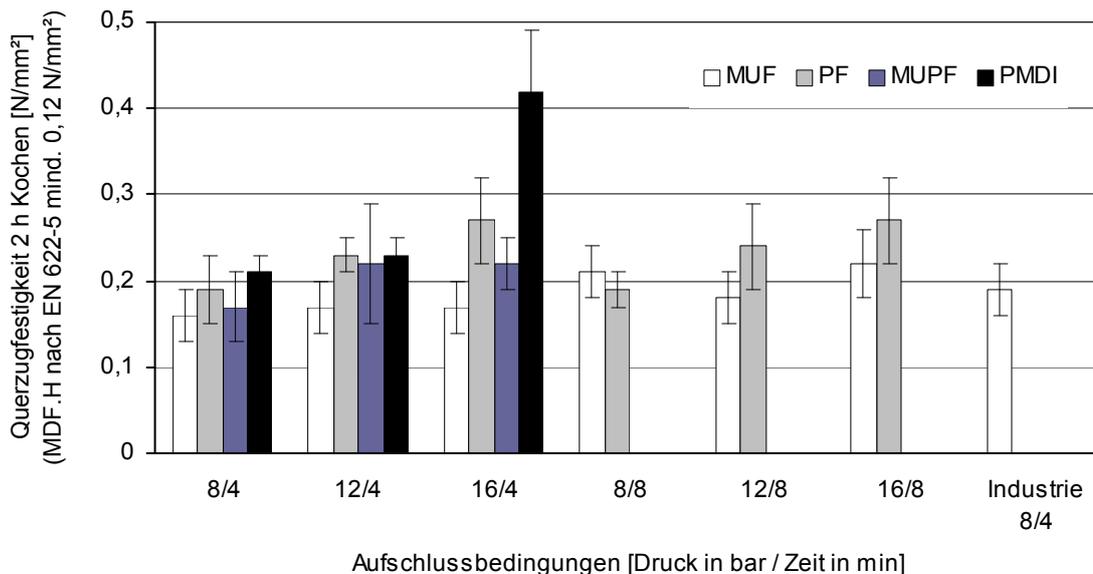


Abbildung 61 Querzugfestigkeit nach 2 h Kochprüfung von Labor-MDF in Abhängigkeit von Bindemitteltyp (Anteil konstant 16 %) und Aufschlussbedingungen bei der labortechnischen Herstellung von Kiefernholzfasern (im Vergleich zu Industriefaserstoff)

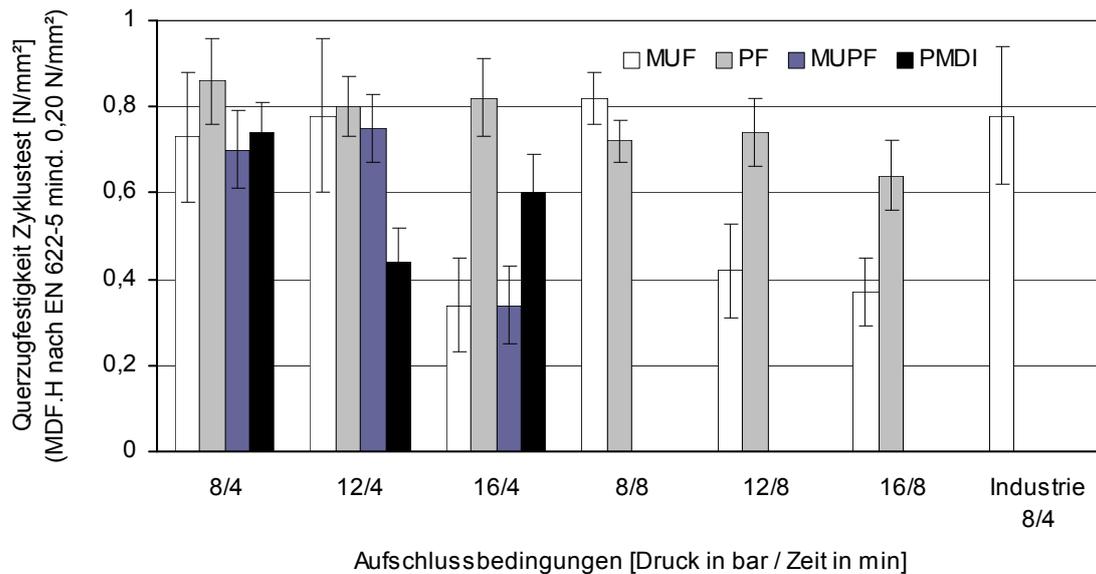


Abbildung 62 Querzugfestigkeit nach Zyklustest von Labor-MDF in Abhängigkeit von Bindemitteltyp (Anteil konstant 16 %) und Aufschlussbedingungen bei der labortechnischen Herstellung von Kiefernholzfasern (im Vergleich zu Industriefaserstoff)

Abbildung 62 enthält die Ergebnisse zur Querzugfestigkeit nach Zyklustest. Die Streuung der Einzelwerte war bindemittelunabhängig nach der V313-Vorbehandlung am höchsten. Für Platten aus Industriefaserstoff ergaben sich vergleichbare Werte gegenüber Platten aus bei 8 bar über 4 min labortechnisch aufgeschlossenem Faserstoff. Die höchsten Querzugfestigkeiten nach Zyklustest wurden an MUF- und PF-Harz-gebundenen MDF ermittelt, die aus der industrieüblichem Faserstoff-Variante (8 bar, 4 min) hergestellt wurden.

In der Regel führte die Aufschlussverschärfung mit Ausnahme des PF-Harzes bei allen weiteren Bindemitteln zu schlechteren Werten, wobei auffällig ist, dass trotzdem auch bei dem hohen Aufschlussdruck von 16 bar der Anforderungswert von 0,20 N/mm² nach EN 622-5 deutlich erfüllt wird. Während die Intensivierung der Aufschlussbedingungen bei PF-Harz- und PMDI-gebundenen MDF analog zur Querzugfestigkeit trocken keine Tendenzen bezüglich Festigkeitszu- oder -abnahme ergab, resultierte speziell für die MUF-Harz-MDF aus beiden 16 bar-Faserstoffen sowie aus dem über 8 min bei 12 bar aufgeschlossenen Faserstoff eine merkliche Verschlechterung der Querzugfestigkeit nach Zyklustest.

Die Ursache dafür wird in dem höheren Feinst- und Feinanteil der extremer aufgeschlossenen Faserstoffe gesehen. Bekannterweise binden diese Faserfraktionen einen Großteil des eingesetzten Klebstoffs, der damit dann nur noch eingeschränkt für die Bindung der Fasern untereinander zur Verfügung steht. Möglicherweise tritt dieser Effekt gerade bei diesem Bindemitteltyp im besonderen Maße nach der sehr intensiven Materialbeanspruchung durch den 3-wöchigen Klimawechsel im Zyklustest auf. Bestätigend dazu ergaben sich bei späteren Untersuchungen mit höheren MUF-Festharzanteil (20 %) gleichsinnige Tendenzen (vgl. Abbildung 72).

Bezüglich der Dickenquellung nach 24 h Wasserlagerung ist auffällig, dass bei Einsatz aller Bindemittel ein hervorragend niedriges Quellungs-niveau erreicht und die normativen Anforderungen sicher erfüllt wurden. Das ist natürlich im unmittelbaren Zusammenhang mit dem hohen Bindemittelanteil von 16 % zu sehen. Mit zunehmendem Aufschlussgrad wurden für alle Platten abnehmende Quellwerte bestimmt, wobei sich für MDF mit PF-Bindung die deutlichste Quellungsvergütung zeigte (Abbildung 63).

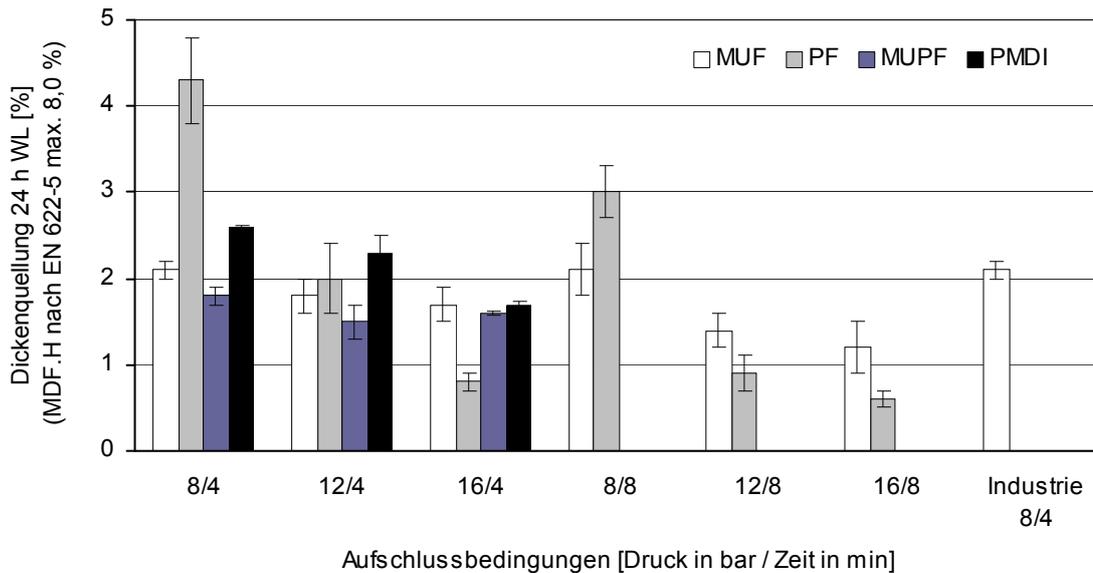


Abbildung 63 Dickenquellung nach 24 h Wasserlagerung von Labor-MDF in Abhängigkeit von Bindemitteltyp (Anteil konstant 16 %) und Aufschlussbedingungen bei der labortechnischen Herstellung von Kiefernholzfasern (im Vergleich zu Industriefaserstoff)

Die Aussagen zur Dickenquellung nach 24 h Wasserlagerung werden durch die Ergebnisse zur Dickenquellung nach Zyklustest bestätigt, wobei alle Varianten – auch unter Berücksichtigung der Messwertstreuung – die Anforderungen nach EN 622-5 erfüllten (Abbildung 64).

Wiederum führte die Aufschlussintensivierung zu einer ausdrücklichen Quellungsvergütung. Die niedrigsten Werte wiesen erneut die PF-Harz-Varianten auf, wobei für MDF aus 12 und 16 bar-Faserstoff durch ein Schwinden der Prüfkörper nach Zyklustest „negative“ Dickenquellungswerte bestimmt wurden. Dieses Phänomen ist von der PF-Harz-Aushärtung bekannt.

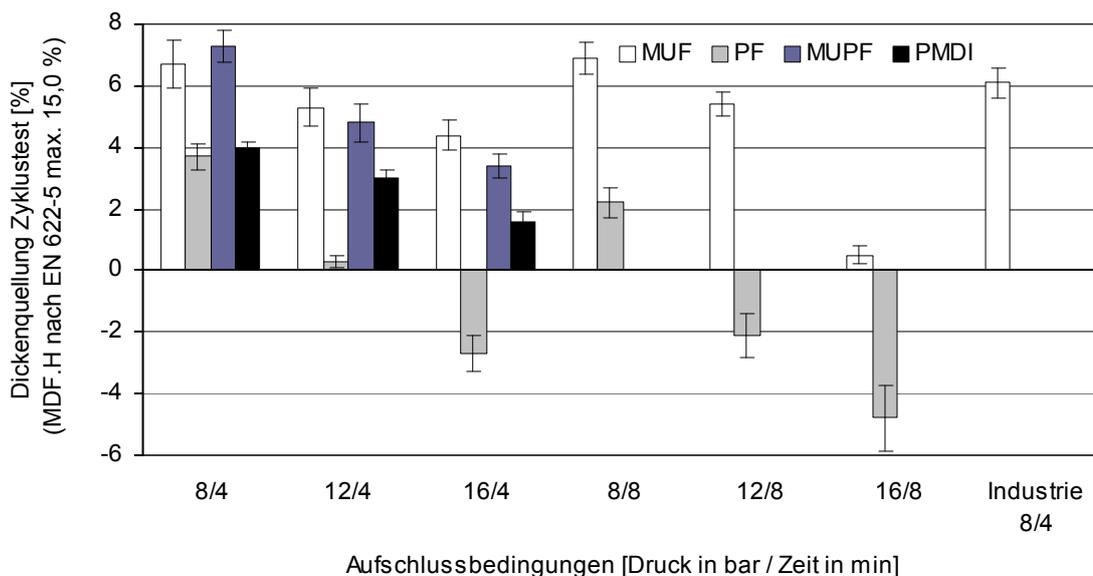


Abbildung 64 Dickenquellung nach Zyklustest von Labor-MDF in Abhängigkeit von Bindemitteltyp (Anteil konstant 16 %) und Aufschlussbedingungen bei der labortechnischen Herstellung von Kiefernholzfasern (im Vergleich zu Industriefaserstoff)

Die MUF-Harz-gebundene MDF aus Industriefaserstoff entsprach den Werten der aus vergleichbaren Laborfaserstoffen hergestellten Platten und bestätigte damit erneut die sehr gute Vergleichbarkeit des labortechnischen zum industrieeüblichen Aufschluss bei 8 bar und 4 min Kochzeit. Diese Aussage ist im Hinblick auf eine Übertragbarkeit der Messergebnisse in den Industriemaßstab wesentlich.

Die Ergebnisse zur Biegefestigkeit zeigten, dass die angestrebte Quellungsvergütung von MDF zulasten der elastomechanischen Eigenschaften ging. Höhere Aufschlussdrücke und/oder längere Aufschlusszeiten führten neben einer feineren Faserstoff-Struktur insbesondere zu kürzeren Faserlängen und bedingten dadurch bei allen Bindemitteln eine drastische Biegefestigkeitsabnahme (Abbildung 65). Den Normvorgaben entsprechen – auch unter Berücksichtigung der Messwertstreuung – mit Ausnahme der PF-Harz-Varianten (mit grundsätzlich sehr niedrigen Werten) relativ bindemittelunabhängig alle MDF aus 8 und 12 bar über 4 min aufgeschlossenem Faserstoff. Eine höhere Aufschlussintensität bedingte nicht zwangsläufig höhere Standardabweichungen. Die Faserplatte aus Industriefaserstoff ordnete sich gut in die Ergebnisse ein.

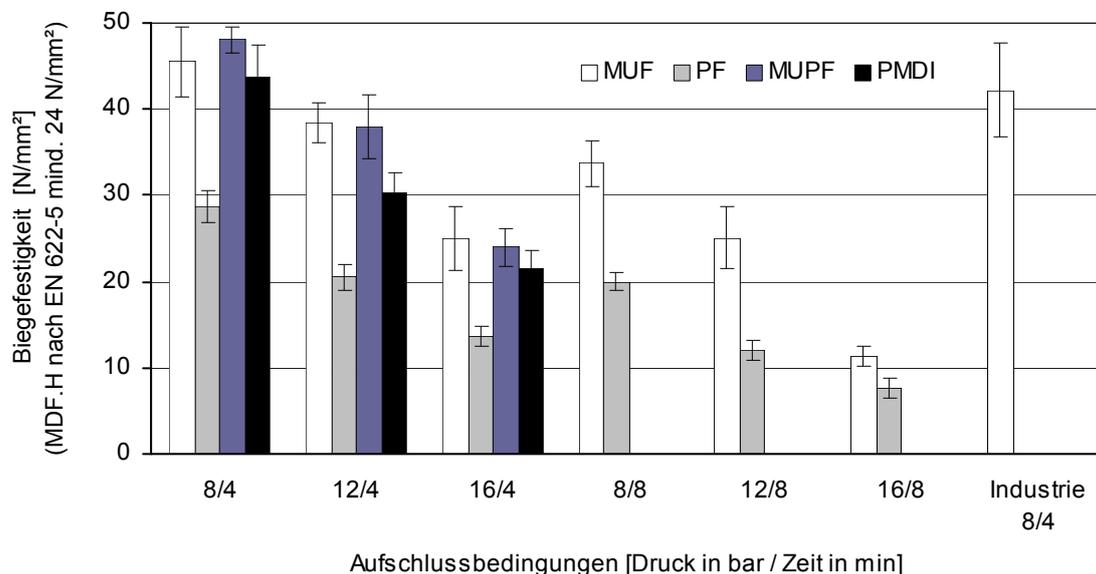


Abbildung 65 Biegefestigkeit von Labor-MDF in Abhängigkeit von Bindemitteltyp (Anteil konstant 16 %) und Aufschlussbedingungen bei der labortechnischen Herstellung von Kiefernholzfasern (im Vergleich zu Industriefaserstoff)

Diese Aussagen stehen in Übereinstimmung mit bisherigen Untersuchungen von *Rofael et al. /1994, 1995/*, *Schneider /1999/*, *Groom et al. /2002, 2002/*, *Krug, Kehr /2001/* und auch *Erbreich /2004/*. Letzterer hatte im Unterschied zum bisherigen Stand des Wissens bei einer Aufschlussintensivierung größere mittlere Faserlängen festgestellt. Gleichzeitig verschlechterten sich aber die elastomechanischen Eigenschaften signifikant, was *Erbreich* auf vermehrte Kondensationsreaktionen des Lignins an der Faseroberfläche und daraus folgend eine verschlechterte Faser-Klebstoff-Bindung zurückführt.

Der bei den Biegeprüfungen ermittelte Elastizitätsmodul folgt dem Trend der Biegefestigkeit. Dabei wiesen MDF mit MUF- bzw. MUPF-Harz-Bindung die höchsten E-Moduln auf, wohingegen die Verwendung von PF-Harz vergleichbar zur Biegefestigkeit auch zu den geringsten Elastizitätswerten führte (Abbildung 66).

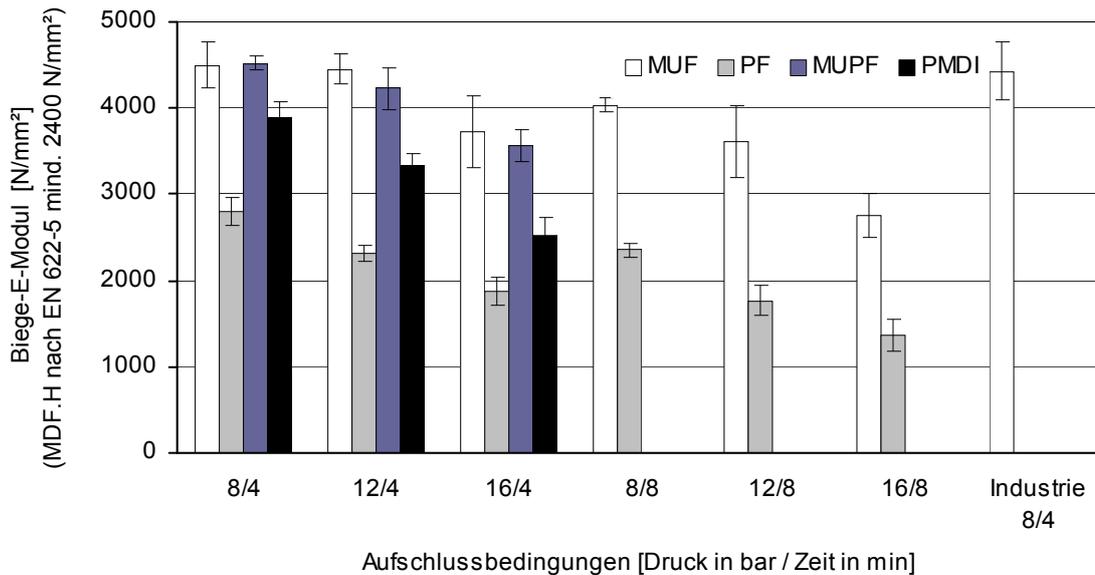


Abbildung 66 Biege-Elastizitätsmodul von Labor-MDF in Abhängigkeit von Bindemitteltyp (Anteil konstant 16 %) und Aufschlussbedingungen bei der labortechnischen Herstellung von Kiefernholzfasern (im Vergleich zu Industriefaserstoff)

An den MDF-Varianten aus bei 8, 12 und 16 bar über 4 min aufgeschlossenem Faserstoff mit 16 % MUPF-Harz- bzw. 16 % PMDI-Bindung erfolgte zudem die Bestimmung der Dimensionsänderungen bei Änderung der relativen Luftfeuchte (rel. LF).

Erwartungsgemäß wurden für die Längenänderung nach einer Klimatisierung von 65 auf 35 % rel. LF. („Trocknung“) aufgrund von Schwindbewegungen der Proben grundsätzlich geringfügig negative Werte ermittelt. Ein Einfluss des Aufschlussdrucks war nicht erkennbar, grundsätzlich waren die Beträge der PMDI-gebundenen Platte geringfügig höher. Die „Auffeuchtung“ von 65 auf 85 % rel. LF. ergab im Falle der MUPF-Varianten mit zunehmender Aufschlussintensität geringfügig ansteigende Werte, während für Platten mit PMDI-Bindung keine klare Tendenz erkannt wurde.

Die als Betrag dargestellte Längenänderung im Bereich von 35 auf 85 % rel. LF. bestätigt, dass der Aufschlussdruck quasi ohne Einfluss auf die Längenänderungen blieb (Abbildung 67).

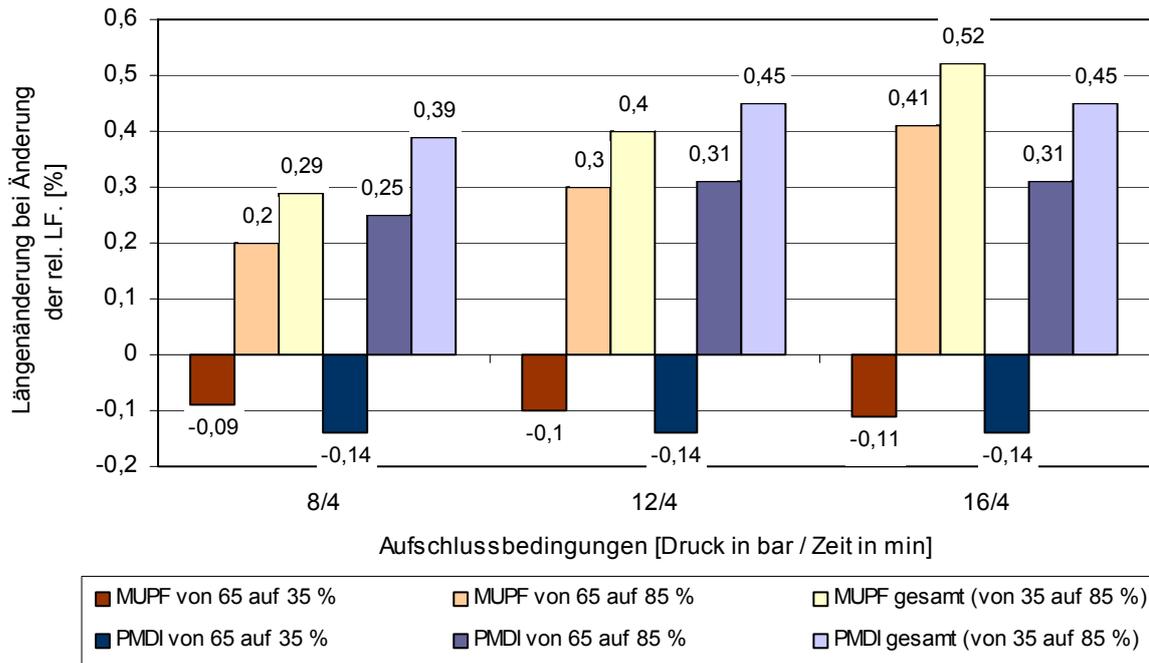


Abbildung 67 Längenänderung bei Änderung der relativen Luftfeuchte von Labor-MDF in Abhängigkeit von Bindemitteltyp (Anteil konstant 16 %) und Aufschlussbedingungen bei der labortechnischen Herstellung von Kiefernholzfasern

Für die Dickenänderung bei Änderung der rel. LF. wurden hingegen bindemittel- und aufschlussdruckabhängige Unterschiede ermittelt (Abbildung 68).

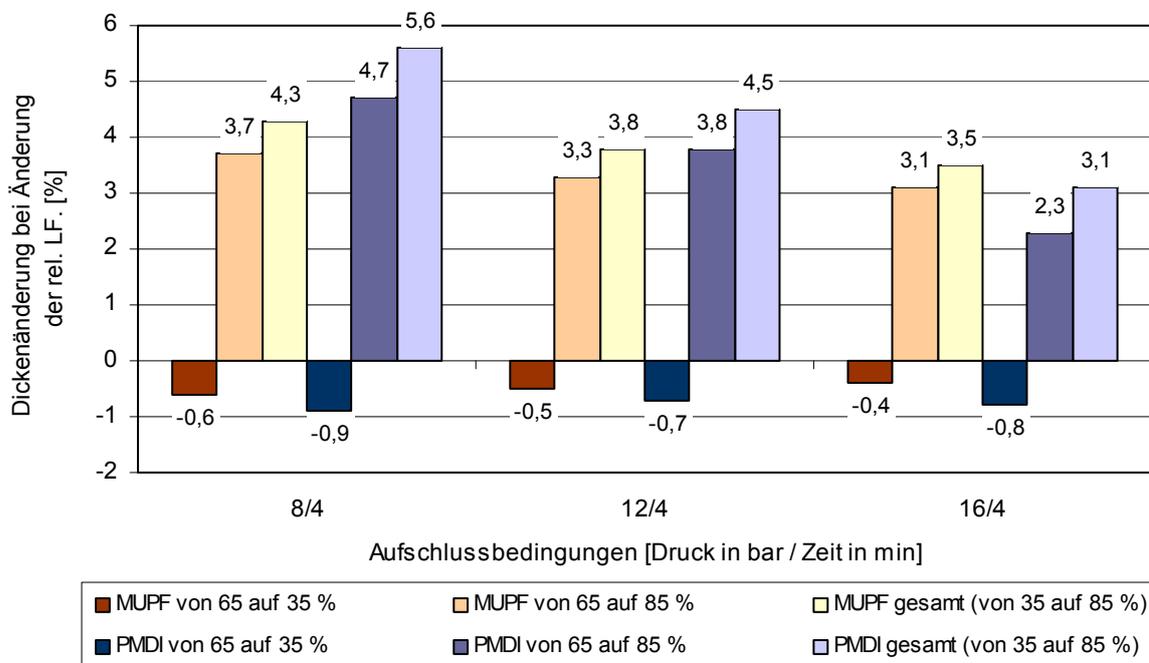


Abbildung 68 Dickenänderung bei Änderung der relativen Luftfeuchte von Labor-MDF in Abhängigkeit von Bindemitteltyp (Anteil konstant 16 %) und Aufschlussbedingungen bei der labortechnischen Herstellung von Kiefernholzfasern

Eine Intensivierung des Aufschlussdruckes ergab dabei sowohl für Faserplatten mit MUPF- als auch für Platten mit PMDI-Bindung signifikant reduzierte Dickenänderungswerte. Die geringsten Dickenänderungen wiesen die MDF aus 16 bar-Faserstoff auf.

Dieser Effekt wird übereinstimmend mit den vorstehenden Aussagen zur Querkzugfestigkeit auf die mit der Aufschlussverschärfung einhergehende Reduzierung des Quell-/Schwindverhaltens der Faserstoffe und der daraus resultierenden geringen Querdruck- und Querkzugbelastungen der Klebstoffbrücken erklärt, die eine Verbesserung des inneren Werkstoffverbundes (Faser-zu-Faser-Bindung) nach sich zieht. Übereinstimmend zu den Ergebnissen der Längenänderung ergaben sich bei „Trocknung“ (Klimatisierung von 65 auf 35 % rel. LF.) prinzipiell geringfügig negative Werte, die für die MUPF-Varianten geringer ausfielen. Eine Klimalagerung von 65 auf 85 % zog mit zunehmender Aufschlussintensität in jedem Falle eine Reduzierung der Beträge nach sich, im Falle der PMDI-MDF war die Reduzierung am deutlichsten.

Die Aussagen zur Dimensionsänderung bei Änderung der rel. LF. bestätigen und erweitern bisherige Ergebnisse von *Roffael et al. /2003/*, die Untersuchungen an mit 12 bzw. 20 % MUF-Festharzanteil (bezogen auf Faserstoff_{atro}) gebundenen MDF aus bei 140, 160 und 175 °C aufgeschlossenen Kieferholz-Faserstoffen durchführten.

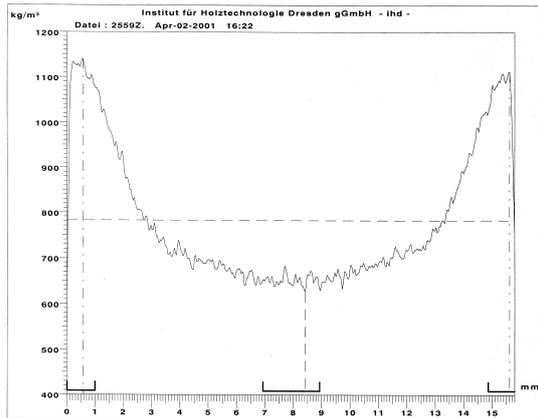
An den mit konstantem Bindemittelanteil von 16 % hergestellten Labor-MDF aus bei Aufschlussdrücken von 8, 12 und 16 bar mit Dämpfzeiten von 4 min labortechnisch aufgeschlossenen Faserstoffen wurde analog zu den Industrie-MDF zusätzlich zu den physikalisch-mechanischen Platteneigenschaften das Rohdichteprofil senkrecht zur Plattenebene nach dem radiometrischen Prinzip ermittelt.

Die nachfolgende Abbildung 69 mit der Darstellung ausgewählter Varianten verdeutlicht, dass zwischen den MDF in Abhängigkeit vom eingesetzten Bindemitteltyp erkennbare Unterschiede bestehen.

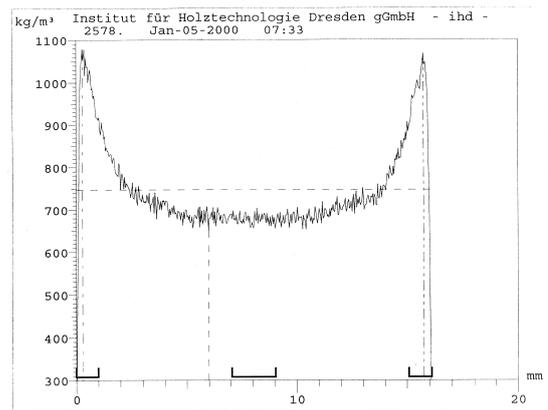
Das ist insofern bemerkenswert, als dass alle Platten aus dem gleichen, labortechnisch unter „industrieeüblichen“ Einstellungen bei 8 bar und 4 min Dämpfzeit aufgeschlossenen Faserstoff mit identischer Presstechnologie (Weg-Zeit-Steuerung) hergestellt wurden.

Variabel sind natürlich die Feststoffgehalte der eingesetzten Bindemittel mit 57 % für PF-Harz, 64 % für MUPF-Harz, 65 % für MUF-Harz und 98 % für PMDI (vgl. Tabelle 15). Aus diesen Unterschieden resultierten unter Berücksichtigung der für alle Bindemittel identischen Feststoffdosierung von 16 % unterschiedliche Bindemittelflottenmengen. Höhere Anteile stellen dabei eine homogenere Klebstoffzerteilung und –verteilung auf den Fasern und damit eine gleichmäßigere Verdichtung in Aussicht, woraus dann u. a. ein günstigeres Dichteprofil senkrecht zur Plattenebene resultieren sollte.

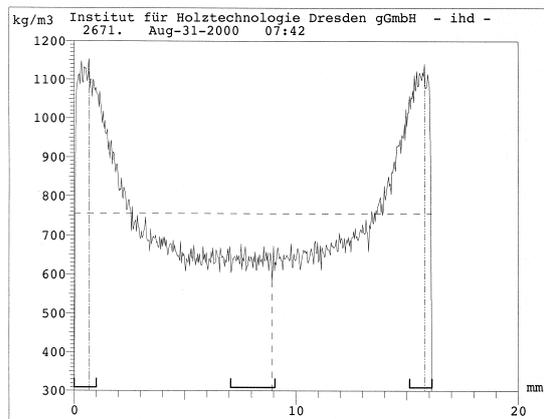
Den größten Wasseranteil in der Leimflotte enthielten die PF-Varianten, während bei PMDI quasi „wasserfrei“ gearbeitet wurde.



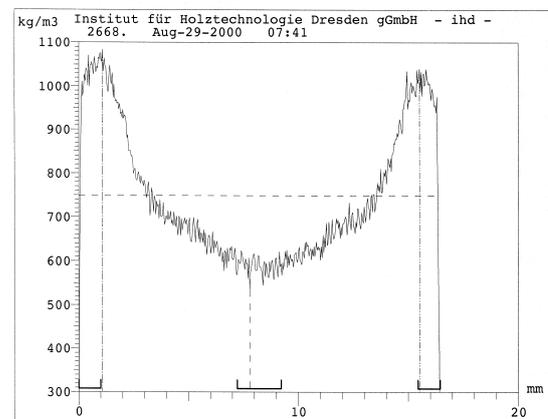
8 bar / 4 min, MUF-Harz-Bindung (IHD-Code: 2559)



8 bar / 4 min, PF-Harz-Bindung (IHD-Code: 2578)



8 bar / 4 min, MUPF-Harz-Bindung (IHD-Code: 2671)



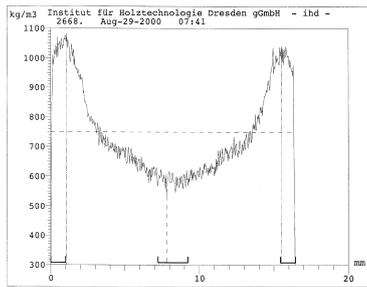
8 bar / 4 min, PMDI-Bindung (IHD-Code: 2668)

Abbildung 69 Rohdichteprofil senkrecht zur Plattenebene von Labor-MDF aus labortechnisch bei 8 bar über 4 min aufgeschlossenem Kiefernholzfaserstoff in Abhängigkeit vom Bindemitteltyp (Anteil konstant 16 %)

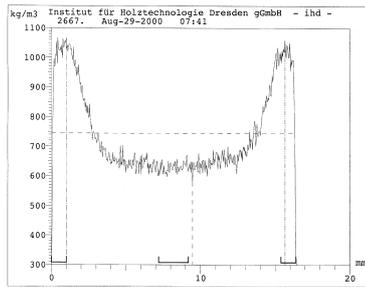
Das vergleichsweise beste Rohdichteprofil wies die PF-gebundene MDF (mit dem höchsten Wasseranteil in der Leimflotte) auf. Während Platten mit MUPF- bzw. MUF-Bindung ebenfalls zufriedenstellende Ergebnisse erzielten, zeigten die Faserplatten mit PMDI („wasserfreie“ Leimflotte) den ungünstigsten Rohdichteverlauf über den Plattenquerschnitt.

Unter Berücksichtigung der Tatsache, dass sämtliche Parameter der Plattenherstellung und auch der Bindemittelfeststoffanteil konstant gehalten wurden, verdeutlichen die Resultate, dass sich der Bindemitteltyp sowie die aus dem Feststoffanteil resultierende Leimflotte unmittelbar auf das Verdichtungsverhalten und damit das entstehende Rohdichteprofil auswirkt.

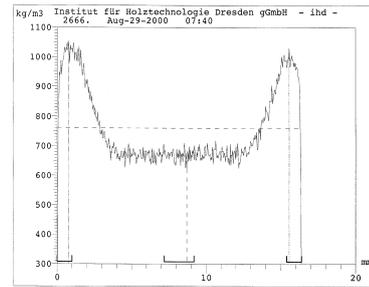
Weitere Untersuchungen sollten klären, inwiefern die mit der realisierten Aufschlussintensivierung einhergehende (und nachgewiesene) Veränderung der Faserstoffmorphologie den Verlauf der Rohdichte senkrecht zur Plattenebene beeinflusst (Abbildung 70).



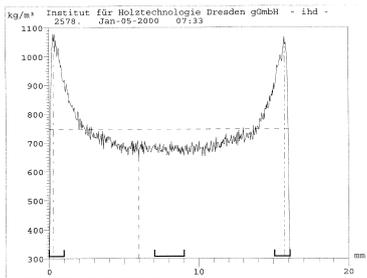
8 bar / 4 min, PMDI-Bindung
(IHD-Code: 2668)



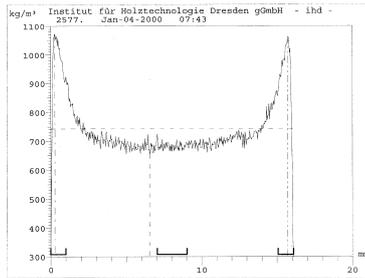
12 bar / 4 min, PMDI-Bindung
(IHD-Code: 2667)



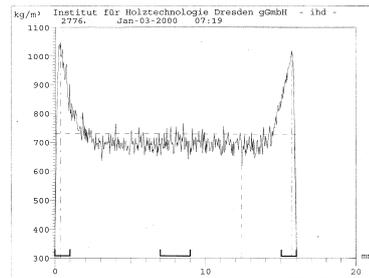
16 bar / 4 min, PMDI-Bindung
(IHD-Code: 2666)



8 bar / 4 min, PF-Harz-Bindung
(IHD-Code: 2578)



12 bar / 4 min, PF-Harz-Bindung
(IHD-Code: 2577)



16 bar / 4 min, PF-Harz-Bindung
(IHD-Code: 2576)

Abbildung 70 Rohdichteprofil senkrecht zur Plattenebene von Labor-MDF aus labortechnisch bei 8, 12 oder 16 bar über 4 min aufgeschlossenem Kiefernholzfaserstoff in Abhängigkeit vom Bindemitteltyp (Anteil konstant 16 %)

Die Veränderung des Aufschlussgrades bei der Faserstoffherstellung wirkte sich speziell bei Platten mit PMDI-Bindung signifikant auf das Verdichtungsverhalten der Faser-
vliese beim Pressen und damit auf den entstehenden Rohdichteverlauf senkrecht zur
Plattenebene aus. Intensivere Aufschlussbedingungen ergaben homogenere Rohdicht-
teprofile. Bei den PF-Harz-gebundenen Varianten wurde eine solche „eindeutige“ Ab-
hängigkeit nicht festgestellt, wenngleich die Erhöhung des Aufschlussdruckes von 8 auf
12 bar zu einer erkennbaren Rohdichteprofil-Verbesserung führte.

Dieses galt gleichsinnig auch für die nicht dargestellten MDF-Varianten mit MUF- bzw.
MUPF-Harz-Bindung, die ebenfalls den MDF-typischen Verlauf mit einer homogenen
Mittelzone und hochverdichteten Randbereichen (auch als „U-Profil“ bezeichnet) auf-
wiesen.

Ein Vergleich der Rohdichteprofile von Industrie- zu Labor-MDF bestätigte, dass die
labortechnisch hergestellten Faserplatten bezüglich des Rohdichteprofiles senkrecht zur
Plattenebene industriell gefertigten MDF entsprachen (vgl. dazu Abbildung 42).

Die innerhalb der Laborplatten festgestellten relativ geringen Rohdichteprofil-Unterschie-
de wirkten sich auf die physikalisch-mechanischen MDF-Eigenschaften nicht gravierend
aus, so dass auf eine diesbezügliche Diskussion der Abhängigkeit bestimmter Material-
eigenschaften vom Rohdichteprofil an dieser Stelle verzichtet werden kann.

5.3.3.3 MDF mit MUF-, PF-, MUPF-Harz- sowie PMDI-Bindung, variierter Bindemittelanteil

An die Untersuchungen mit konstantem Bindemittelanteil schloss sich in Versuchsreihe 6 die labortechnische MDF-Herstellung mit einer der Bindemittelqualität (nach Rücksprache mit Klebstoff- und MDF-Herstellern) entsprechenden Stufung des Bindemittelanteils (8 % PMDI, 16 % PF, 16 % MUPF und 20 % MUF, Festanteil jeweils bezogen auf Faserstoff_{atro}) an. Bei den Varianten mit 16 % PF- sowie 16 % MUPF-Harz handelte es sich um die bereits in Versuchsreihe 5 behandelten Faserplatten. Alle MDF enthielten wiederum 1,2 % Hydrophobierungsmittel, bezogen auf Faserstoff_{atro}.

Die eingesetzten Faserstoffe wie auch die Parameter der Plattenherstellung entsprechen im Interesse vergleichbarer Ergebnisse den Einstellungen von Versuchsreihe 5, auf eine nochmalige detaillierte Aufführung wird aus diesem Grund verzichtet. Tabelle A6 (Anhang) enthält die vollständigen Ergebnisübersichten.

Wie die nachfolgende Tabelle zeigt, lagen die Rohdichten der klimatisierten MDF-Varianten mit Werten von 740 und 780 kg/m³ im Bereich der angestrebten Zielrohichte und waren damit zum Einen untereinander und zum Anderen auch zu den Faserplatten aus Versuchsreihe 5 gut vergleichbar.

Tabelle 26 Einfluss der Aufschlussbedingungen bei der Faserstoffherstellung, der Bindemittelart und des Bindemittelanteils auf mittlere Rohdichte, Feuchtegehalt, pH-Wert sowie Formaldehydgehalt von Labor-MDF aus Kiefernholzfasern

MDF-Eigenschaften	Aufschlussbedingungen:						
	Druck, Temperatur, Zeit						
\bar{x} (Basis n = 18, Ausnahmen pH-Wert und Formaldehydgehalt mit n = 2)	8 bar 170 °C 4 min	12 bar 187 °C 4 min	16 bar 200 °C 4 min	8 bar 170 °C 8 min	12 bar 187 °C 8 min	16 bar 200 °C 8 min	8 bar 170 °C 4 min Industrie
Rohdichte [kg/m ³]							
16 % PF-Bindung	755	755	760	755	750	770	n. b. ⁵⁰
20 % MUF-Bindung	780	770	770	780	775	780	775
16 % MUPF-Bindung	770	770	760	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.
8 % PMDI-Bindung	750	740	740	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.
Feuchtegehalt bei Prüfung [%]							
16 % PF-Bindung	10,3	10,4	11,0	10,6	11,8	12,5	n. b.
20 % MUF-Bindung	7,1	6,4	6,3	5,9	5,0	4,8	7,7
16 % MUPF-Bindung	7,3	6,5	6,3	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.
8 % PMDI-Bindung	7,4	6,3	5,5	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.
pH-Wert bei Kaltwasserextraktion []							
16 % PF-Bindung	8,4	7,7	7,3	8,3	7,7	7,1	n. b.
20 % MUF-Bindung	5,3	5,3	5,1	5,4	5,1	4,7	5,4
16 % MUPF-Bindung	5,4	5,4	5,1	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.
8 % PMDI-Bindung	4,4	4,3	4,3	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.
Formaldehydgehalt, B-Wert [mg HCHO/100 g Platte atro]							
16 % PF-Bindung	1,0	1,5	1,1	1,6	1,9	1,5	n. b.
20 % MUF-Bindung	13,6	11,5	9,5	9,1	9,5	7,4	13,0
16 % MUPF-Bindung	13,9	11,6	12,6	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.
8 % PMDI-Bindung	0,4	0,2	0,4	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.

Übereinstimmend zu den bisherigen Aussagen wiesen Platten aus unter intensiveren Bedingungen aufgeschlossenen Faserstoffen die niedrigsten Feuchtegehalte nach Klimatisierung auf (Ausnahme MDF mit PF-Harz-Bindung). Gleichfalls resultierte aus der Aufschlussverschärfung eine Abnahme der pH-Werte und – ausdrücklich nur bei MUF-Harz-Bindung – eine Reduzierung des Formaldehydgehaltes damit hergestellter MDF. Der normative Gütewert von 8 mg HCHO wurde erwartungsgemäß ausschließlich von

⁵⁰ n. b. = nicht bestimmt

den Faserplatten mit PMDI bzw. PF-Harz eingehalten, was ausdrücklich auch auf den prinzipiellen Verzicht formaldehydreduzierender Additive⁵¹ zurückzuführen ist.

Die Versuchsreihen mit variiertem Bindemittelanteil (8 % PMDI, 16 % PF, 16 % MUPF und 20 % MUF) führten trotz einer der Bindemittelqualität entsprechenden Stufung zu einem Festigkeits- und Dickenquellungslevel, das relativ gut mit den Aussagen zu den MDF mit konstantem Bindemittelanteil übereinstimmt. Die festgestellten Standardabweichungen der Einzelwerte entsprachen üblichen Werten.

Erwartungsgemäß resultierten aus der Reduzierung des PMDI-Anteils auf 8 % eine Abnahme sämtlicher Querkzug- und Biegefestigkeiten sowie eine Zunahme der Dickenquellungswerte. Im Unterschied dazu verbesserten sich die Eigenschaften bei den Varianten mit MUF-Harz-Bindung durch den auf 20 % erhöhten Bindemittelanteil. Äquivalent zu den Aussagen mit konstantem Bindemittelanteil gilt, dass die Intensivierung der Aufschlussbedingungen i. d. R. zu einer Verbesserung der Dickenquellungseigenschaften führte und dass die unterschiedlichen Zugfestigkeiten senkrecht zur Plattenebene teilweise besser, größtenteils zumindest nicht signifikant schlechter ausfielen. Übereinstimmend zu den Aussagen an MDF mit konstantem Bindemittelanteil von 16 % resultierten für die Querkzugfestigkeit nach Zyklustest für MUF-Harz-MDF aus beiden 16 bar-Faserstoffen sowie aus dem über 8 min bei 12 bar aufgeschlossenen Faserstoff deutlich schlechtere Werte, was ggf. an dem höheren Feinst- und Feinanteil der extremer aufgeschlossenen Faserstoffe liegt (vgl. Aussagen zu Abbildung 62).

Die Variante aus Industriefaserstoff lag zumeist im Bereich der Platten aus bei 8 bar über 4 min labortechnisch aufgeschlossenen Faserstoffen. Aus höheren Drücken und/oder längeren Zeiten beim Faserstoffaufschluss resultierte bei allen Bindemitteln, unabhängig vom Anteil, eine deutliche Abnahme von Biege-Elastizitätsmodul und -festigkeit (Abbildung 71 bis Abbildung 75).

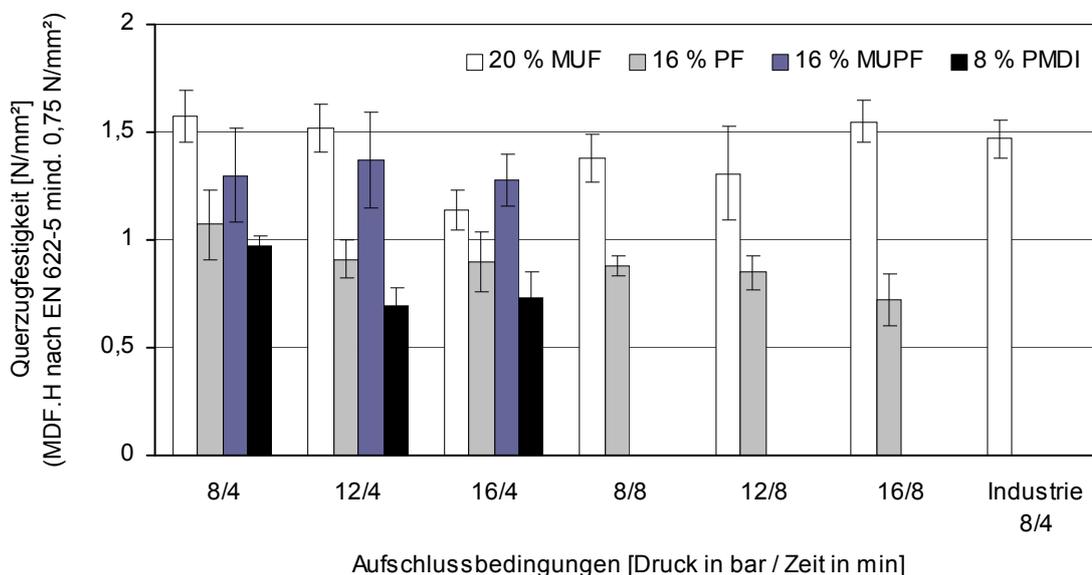


Abbildung 71 Querkzugfestigkeit von Labor-MDF in Abhängigkeit von Bindemitteltyp und -anteil sowie Aufschlussbedingungen bei der labortechnischen Herstellung von Kiefernholzfasern (im Vergleich zu Industriefaserstoff)

⁵¹ Abweichend davon ist im Industriemaßstab bei der Herstellung von UF- oder MUF-Harz-gebundenen MDF der Einsatz formaldehydreduzierender Additive (u. a. Harnstoff) üblich.

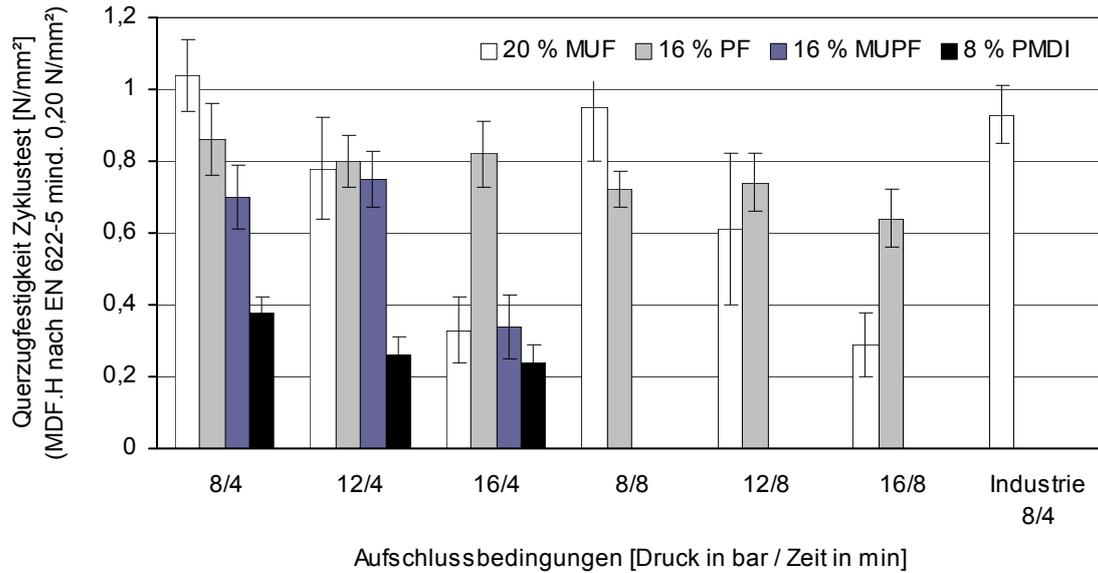


Abbildung 72 Querzugfestigkeit nach Zyklustest von Labor-MDF in Abhängigkeit von Bindemitteltyp und -anteil sowie von den Aufschlussbedingungen bei der labortechnischen Herstellung von Kiefernholzfasern (im Vergleich zu Industriefaserstoff)

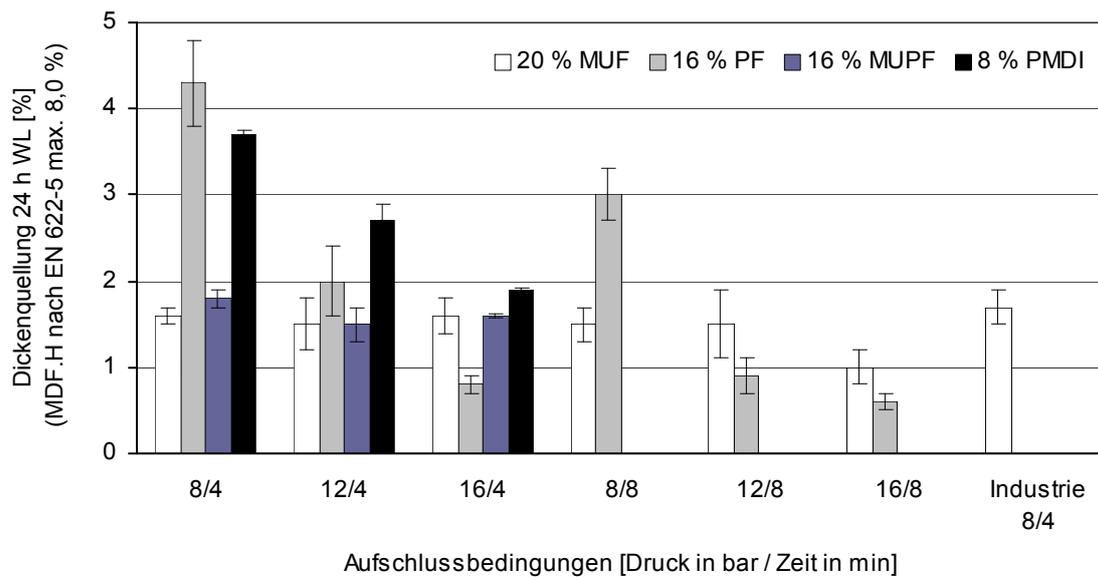


Abbildung 73 Dickenquellung nach 24 h Wasserlagerung von Labor-MDF in Abhängigkeit von Bindemitteltyp und -anteil sowie Aufschlussbedingungen bei der labortechnischen Herstellung von Kiefernholzfasern (im Vergleich zu Industriefaserstoff)

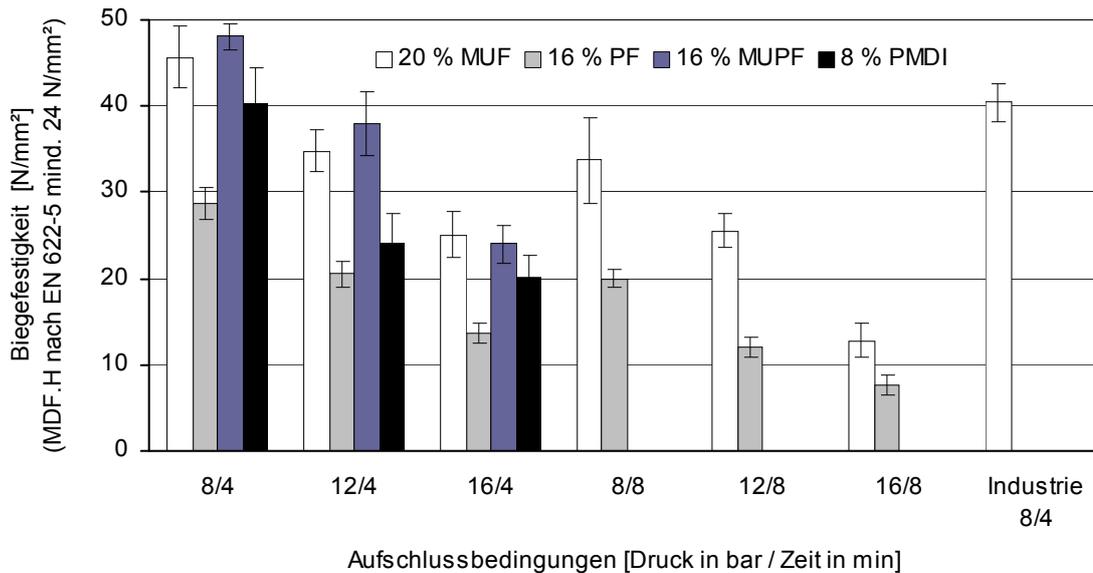


Abbildung 74 Biegefestigkeit von Labor-MDF in Abhängigkeit von Bindemitteltyp und -anteil sowie Aufschlussbedingungen bei der labortechnischen Herstellung von Kiefernholzfasern (im Vergleich zu Industriefaserstoff)

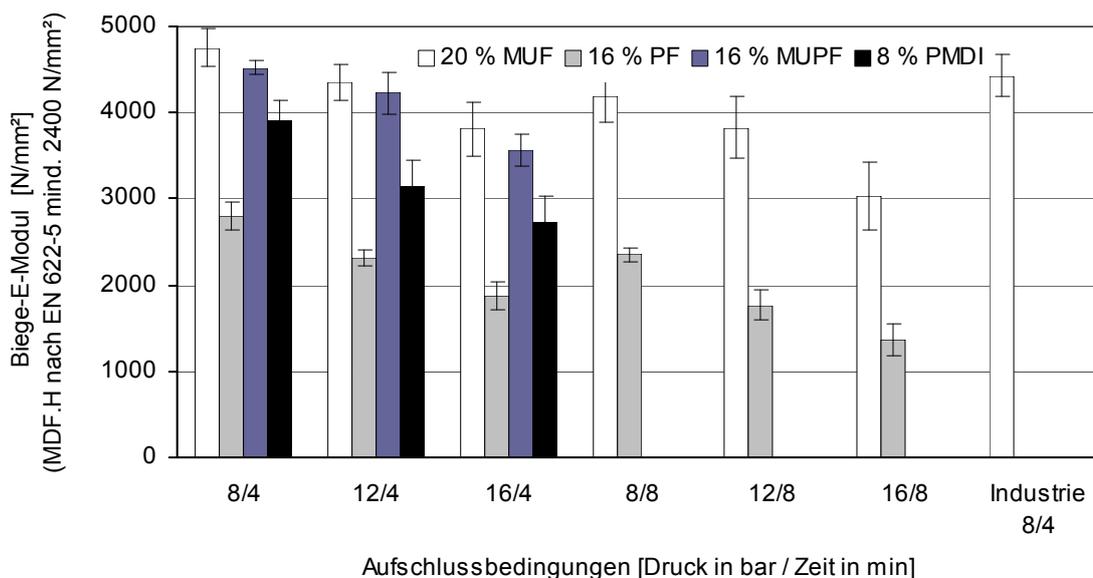


Abbildung 75 Biege-Elastizitätsmodul von Labor-MDF in Abhängigkeit von Bindemitteltyp und -anteil sowie Aufschlussbedingungen bei der labortechnischen Herstellung von Kiefernholzfasern (im Vergleich zu Industriefaserstoff)

Im Vergleich zu MDF mit konstant 16 % Bindemittelanteil, bei denen die PMDI-Varianten die höchsten Kochquerzugfestigkeiten aufwiesen, zeigten Platten nach Reduzierung des PMDI-Bindemittelanteils auf 8 % das niedrigste Festigkeitsniveau nach Kochprüfung. Hingegen führte die Erhöhung des MUF-Harz-Anteils auf 20 % speziell bei der Faserstoffvariante 16 bar/8 min zu den besten Ergebnissen. Im Unterschied zu MDF mit konstantem Bindemittelanteil zeigten MDF mit variiertem Bindemittelanteil bei Aufschlussverschärfung keine eindeutigen Tendenzen bezüglich Zu- oder Abnahme der Querzugfestigkeit nach 2 h Kochen (Abbildung 76).

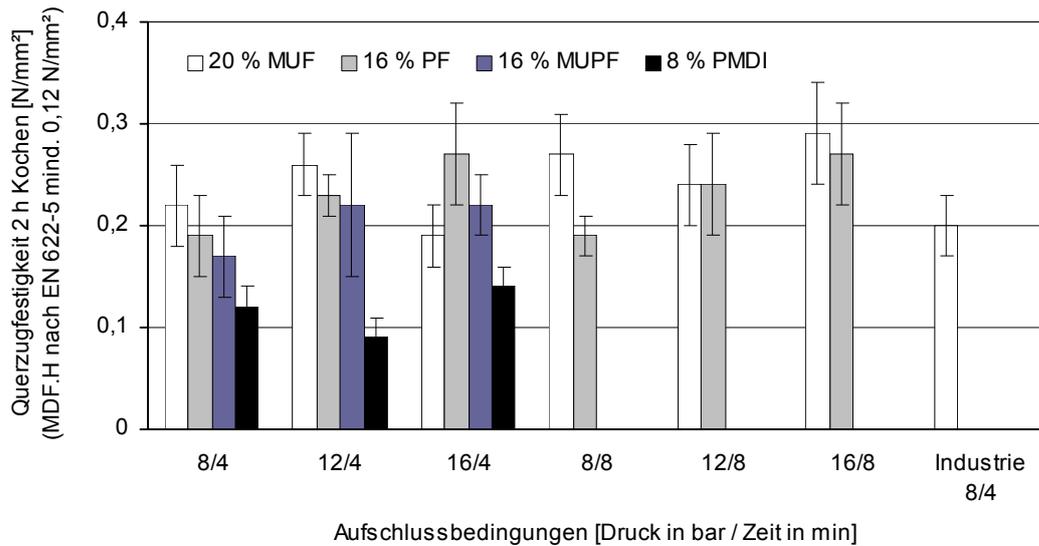


Abbildung 76 Querzugfestigkeit nach 2 h Kochprüfung von Labor-MDF in Abhängigkeit von Bindemitteltyp und -anteil sowie Aufschlussbedingungen bei der labortechnischen Herstellung von Kiefernholzfasern (im Vergleich zu Industriefaserstoff)

Auch bei der Dickenquellung nach Zyklustest zog die Reduzierung des PMDI-Anteils ungünstigere Werte nach sich. Währenddessen konnte mit der Erhöhung des MUF-Harz-Anteils auf 20 % gegenüber der 16 % Variante nochmals eine Verbesserung der Quellwerte erreicht werden. Den normativen Vorgaben für MDF.H gemäß DIN EN 622-5 wurde grundsätzlich sicher entsprochen (Abbildung 77).

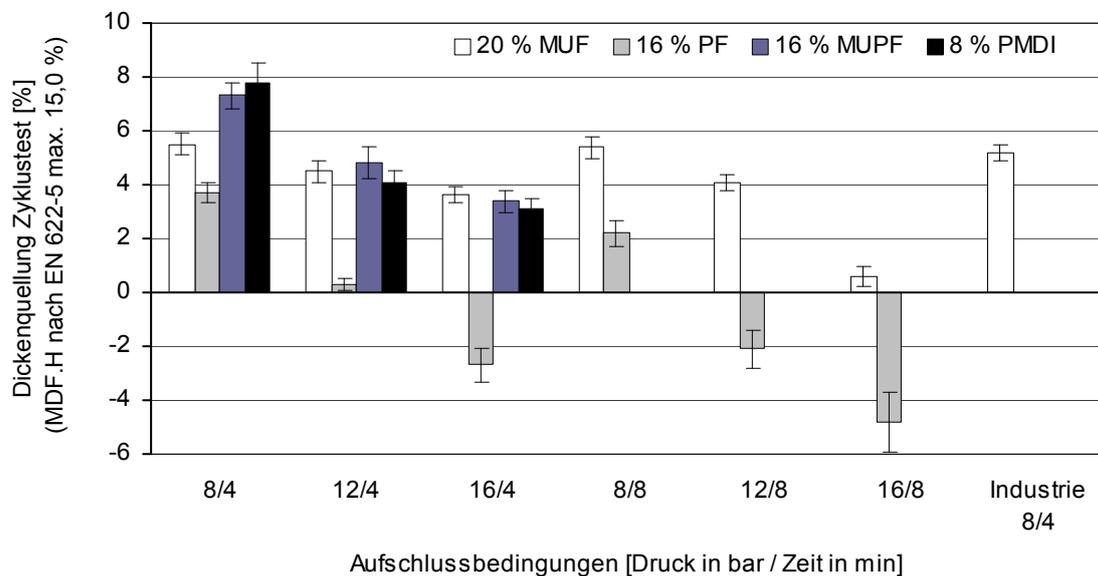


Abbildung 77 Dickenquellung nach Zyklustest von Labor-MDF in Abhängigkeit von Bindemitteltyp und -anteil sowie von den Aufschlussbedingungen bei der labortechnischen Herstellung von Kiefernholzfasern (im Vergleich zu Industriefaserstoff)

Die Untersuchungen zu Dimensionsänderungen bei Änderung der relativen Luftfeuchte zeigten insbesondere für MDF mit PMDI-Bindung, dass bei Betrachtung der als Betrag dargestellten Längenänderung im Bereich von 35 auf 85 % rel. LF. die Klebstoffreduzierung von 16 auf 8 % aufschlussunabhängig nahezu ohne Auswirkung blieb. Tendenziell ist für die Varianten mit 8 % PMDI sogar eine leichte Abnahme der Werte festzustellen. Nach einer Klimatisierung von 65 auf 35 % rel. LF. ("Trocknung") ergaben sich aufgrund von Schwindbewegungen der Proben geringfügig negative Werte (Abbildung 78).

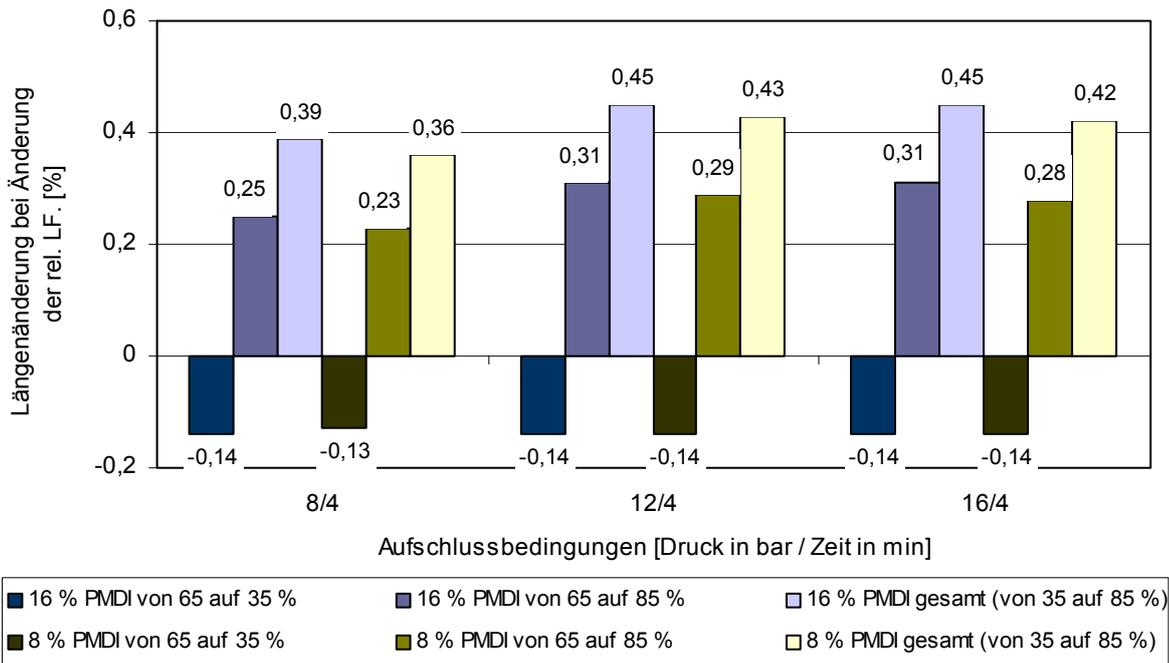


Abbildung 78 Längenänderung bei Änderung der relativen Luftfeuchte von Labor-MDF in Abhängigkeit vom PMDI-Bindemittelanteil (16 und 8 %) und von den Aufschlussbedingungen bei der labortechnischen Herstellung von Kiefernholzfasern

Für die Dickenänderung bei Änderung der rel. LF. wurden dahingegen bindemittelanteil- und aufschlussdruckabhängige Unterschiede ermittelt. Die Reduzierung des PMDI-Anteils zog grundsätzlich eine Zunahme der Dickenänderung nach sich (Abbildung 79).

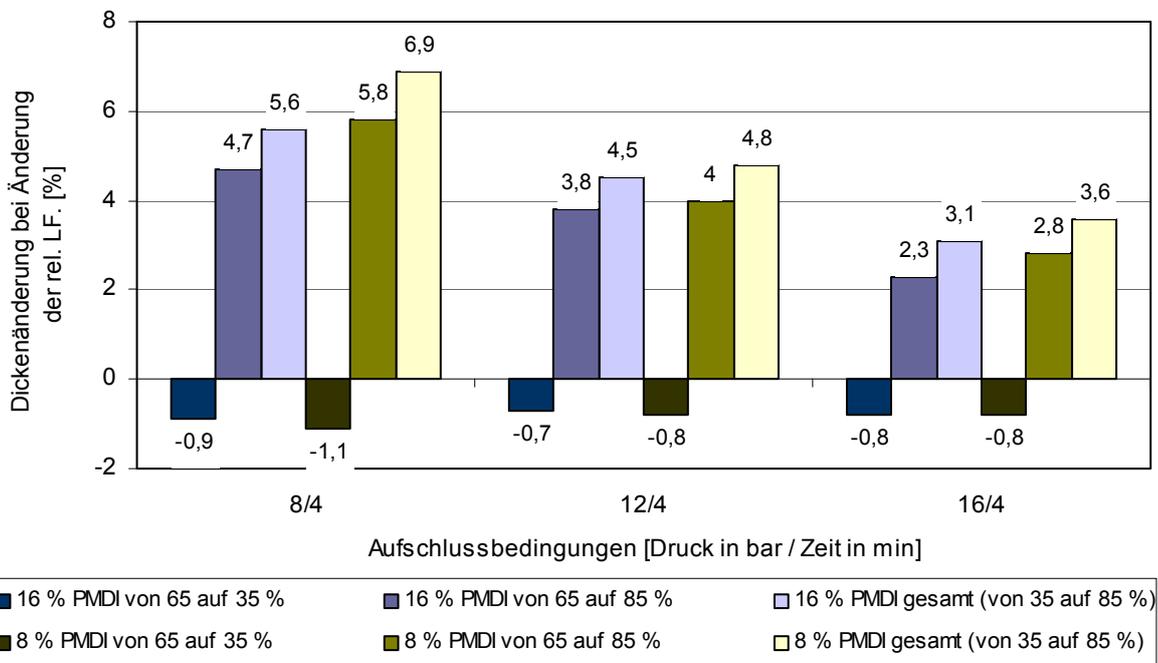


Abbildung 79 Dickenänderung bei Änderung der relativen Luftfeuchte von Labor-MDF in Abhängigkeit vom PMDI-Bindemittelanteil (16 und 8 %) und von den Aufschlussbedingungen bei der labortechnischen Herstellung von Kiefernholzfasern

Übereinstimmend zu den Aussagen mit konstantem Bindemittelanteil (vgl. auch Abbildung 68) führte die Verschärfung des Aufschlussdruckes zu signifikant reduzierten Dickenänderungswerten. Die günstigsten Ergebnisse zeigten die MDF aus 16 bar-Faserstoff, was mit den vorstehenden Aussagen zur Querkzugfestigkeit auf die mit der Aufschlussverschärfung einhergehende Reduzierung des Quell-/Schwindverhaltens der Faserstoffe und der daraus resultierenden geringen Querdruck- und Querkzugbelastungen der Klebstoffbrücken erklärt wird.

Als Fazit der Untersuchungen zur labortechnischen Herstellung von MDF mit Bindemittelzusatz bleibt festzuhalten, dass durch die Herstellung von „vergüteten“ Faserstoffen mit höheren Aufschlussdrücken und längeren Aufschlusszeiten unter Anwendung geeigneter, hochdosierter synthetischer Klebstoffe eine signifikante Quellungsverbesserung der MDF erreicht wurde.

Für die Beurteilung der Quellungsmodifizierung von MDF mit Bindemittelzusatz erwiesen sich neben der Dickenquellung nach Wasserlagerung insbesondere die Dickenquellung nach Zyklustest sowie die Querkzugfestigkeit nach Kochprüfung als maßgebend. Bezüglich der Dickenquellung nach 24 h Wasserlagerung wurde mit allen Bindemitteln ein sehr niedriges Quellungsniveau erreicht. Diese Aussagen wurden durch die Resultate der Dickenquellung nach Zyklustest bestätigt, wonach höhere Drücke und/oder längere Zeiten beim Faserstoffaufschluss zu deutlich günstigeren Quellwerten führten. Die niedrigsten Dickenquellungen zeigten die PF-gebundenen Faserplatten mit zum Teil „negativen“ Werten. Dieses Phänomen ist von der PF-Harz-Aushärtung her bekannt. Im Unterschied zu den MUF-Varianten wiesen die MDF mit PF-Harz-Bindung nach der Zyklusbelastung einen absolut rissfreien Probenquerschnitt auf.

Im Unterschied zu MDF mit konstantem Bindemittelanteil von 16 % (bei denen die PMDI-Varianten die höchsten Kochquerkzugfestigkeiten aufwiesen) zeigten Platten nach Reduzierung des PMDI-Bindemittelanteils auf 8 % das niedrigste Festigkeitsniveau nach Kochprüfung. Dagegen führte die Erhöhung des MUF-Harz-Anteils auf 20 % bei derart gebundenen MDF speziell bei der Faserstoffvariante 16 bar/8 min zu den besten Ergebnissen. Nach dem Zyklustest wurden die höchsten Querkzugfestigkeiten an MUF- und PF-Harz-gebundenen MDF ermittelt, die aus der industrieüblichen Faserstoff-Variante (8 bar, 4 min) hergestellt wurden.

Die Bewertung der Eigenschaften bei Biegung zeigte erwartungsgemäß, dass höhere Aufschlussdrücke und/oder längere Aufschlusszeiten, insbesondere durch die kürzeren Faserlängen, eine deutliche Abnahme des Elastizitätsmoduls und der Festigkeit nach sich zogen.

Optimistisch stimmen die Ergebnisse zum Formaldehydgehalt der MUF-Harz-gebundenen MDF, nach denen höhere Drücke und längere Verweilzeiten beim Aufschluss zur Abnahme des Formaldehydgehalts nach EN 120 von MDF aus derartigen Faserstoffen führten. Beispielsweise wurden für MDF, die aus der Faserstoff-Variante 8 bar/4 min hergestellt wurden, Formaldehydgehalte von 14,0 mg HCHO pro 100 g atro Platte ermittelt. Hingegen lag der Formaldehydgehalt für Platten der Faserstoffvariante 16 bar/8 min bei 7,6 mg HCHO pro 100 g atro Platte. Beide Varianten wurden mit dem gleichen Bindemittelanteil von 16 % ohne Zusatz von Additiven zur Reduzierung der Formaldehydemission hergestellt.

Aktuelle Messungen an der IHD-Refineranlage zeigen, dass die Ursachen dieses Phänomens u. a. Hydrolysereaktionen durch einen intensiveren Faserstoffaufschluss und daraus resultierend flüchtiges Formaldehyd sein können. Bestätigend dazu wurden bei

Aufschlussverschärfung höhere Formaldehydemissionen am Trockner und auch in der Heißpressenabluft festgestellt. Eine weitere Erklärung wird in der Erhöhung des Anteils der reaktiven OH-Gruppen des Holzes infolge der stärkeren hydrothermischen Beanspruchung vor dem Aufschluss gesehen, aus der zusätzliche Formaldehyd-Bindungsmöglichkeiten resultieren.

Die deutlichen Verbesserungen der Dickenquellung und teilweise auch der Querkzugfestigkeit zeigen, dass sich MDF aus Kiefernholz-Faserstoffen, die bei höheren Aufschlussdrücken und längeren Aufschlusszeiten hergestellt wurden, zur Erweiterung bestehender sowie zur Erschließung neuer Anwendungsgebiete für MDF eignen können. Die Steigerung des Aufschlussdruckes wirkte sich generell stärker auf die erreichbare Quellungsmodifizierung aus als eine Verlängerung der Aufschlusszeit.

5.3.4 *Witterungsbeständigkeit von MDF mit Bindemittelzusatz*

Die Freibewitterung (FB) wurde auf dem Freibewitterungsstand des IHD mit einer maximalen Bewitterungszeit von 160 Wochen durchgeführt, während die Kurzzeitbewitterung (KZB) im Xenotest-Gerät 1200 des IHD über die maximale Dauer von 24 Wochen erfolgte. Als Untersuchungsmaterial dienten, neben Industrie-MDF, labortechnisch hergestellte PF-Harz-, MUF-Harz-, MUPF-Harz- und PMDI-gebundene MDF, deren Faserstoff unterschiedlich aufgeschlossen wurde.

Die Faserstoffe für die Laborplatten wurden mit Aufschlussdrücken von 8 bis 16 bar und Aufschlusszeiten von 4 bis 8 min hergestellt. Der Bindemittelgehalt der labortechnisch hergestellten Platten lag in einem Bereich von 8 bis 20 %, vorzugsweise bei 16 % Feststoffanteil, bez. auf Faserstoff_{atro}. Die Kombination aus Aufschlussdruck und Aufschlusszeit wird im weiteren als Aufschlussgrad bezeichnet (z. B. Aufschlussgrad 12/4: Aufschlussdruck 12 bar, Aufschlusszeit 4 min).

Die zu untersuchenden Eigenschaften (Rohdichte, Plattendicke, Feuchtegehalt, Biegefestigkeit und -E-Modul, Querkzugfestigkeit und Dickenquellung nach 24 h Wasserlagerung) wurden sowohl im Ausgangszustand (unbewittert) als auch zu unterschiedlichen Bewitterungszeitpunkten jeweils nach einer Reklimatisierung im Normklima 20 °C / 65 % rel. LF. bestimmt. Die Auswertung beinhaltete die Bewertung der ermittelten Eigenschaften vorzugsweise zum Entnahmezeitpunkt „Bewitterungsende“ (bei KZB nach 24 Wochen, bei FB nach 72 bzw. 96 Wochen, fallweise nach 120 bzw. 160 Wochen) sowie vergleichende Bewertungen von Kurzzeit- zu Freibewitterung. Da eine Kurzzeitbewitterung über 24 Wochen eine äußerst intensive Belastung des Probenmaterials nach sich zog, wurden fallweise auch die Ergebnisse nach 8 Wochen technischer Bewitterung im Xenotest-Gerät mitbetrachtet.

Durch die längeren Freibewitterungszeiträume (bis zu 160 Wochen) „verschlechterten“ sich die danach untersuchten Querkzug- und Dickenquellungswerte gegenüber den Entnahmezeitpunkten nach 72 bzw. 96 Wochen Freibewitterung weniger signifikant, so dass auf eine detaillierte Auswertung verzichtet wird. Die Prüfwerte sind aber Bestandteil der Anlage.

Die Ergebnisse wurden sowohl als Absolutwerte als auch prozentual bezogen auf die Ausgangseigenschaften der MDF (relativ) als Maß zur Beurteilung der Witterungsbeständigkeit angegeben. Da ein wichtiges Ziel der Arbeit in der Verbesserung der Witterungsbeständigkeit von MDF bestand, erfolgte die Bewertung der Labor-Platten grundsätzlich durch einen Vergleich mit denjenigen Industrie-MDF, die nach Bewitterung die besten Eigenschaften aufwiesen.

5.3.4.1 Auswertung im Vergleich zu Industrie-MDF

PF-Harz gebundene MDF

Labor- und Industrieplatten lagen bezüglich der *Rohdichte* in einem gut vergleichbaren Bereich von 740 bis 770 kg/m³. Die Rohdichte aller Platten nahm mit zunehmender Bewitterungszeit prinzipiell ab. Grundsätzlich ist festzustellen, dass die prozentual nach *KZB 24* (24 Wochen Kurzzeitbewitterung) vorliegenden Werte der Laborplatten deutlich höher waren als die entsprechenden Werte der Industrieplatten, die bei durchschnittlich 62 % der Ausgangswerte lagen. Die Freibewitterung führte nach einer Expositionszeit von 72 Wochen (*FB 72*) nicht zu diesem Ergebnis. Dort lagen die Rohdichten einheitlich in einem Bereich von 85 bis 96 % der Ausgangswerte.

Die *Plattendicke* der Laborplatten änderte sich bei Bewitterung nur geringfügig - zumeist war mit zunehmendem Aufschlussgrad eine Abnahme der Plattendicke zu beobachten. Die Industrieplatten zeigten im Gegensatz dazu eine Zunahme der Plattendicke auf bis zu 162 % nach *KZB 24*.

Die *Biegefestigkeit* der Laborplatten lag im Ausgangszustand erwartungsgemäß deutlich unter den Werten der vergleichbaren Industrieplatten (höher aufgeschlossene und damit i. allg. kürzere Fasern führen zu geringeren Festigkeiten in der Zugzone). Die Biegefestigkeit verhielt sich über die Bewitterungszeiträume hin uneinheitlich: Während an Platten aus Faserstoffen, die mit Aufschlussgraden von 8/4 bzw. 12/4 hergestellt wurden, grundsätzlich geringere Festigkeiten mit zunehmender Bewitterungsdauer bestimmt wurden, stiegen ab einem Aufschlussgrad von 12/8 die zu den unterschiedlichen Bewitterungszeiten bestimmten Biegefestigkeiten an (bis max. 167 % des Ausgangswertes nach *KZB 24*).

Mit zunehmendem Aufschlussgrad sanken die ermittelten Ausgangsfestigkeitswerte und die nach *KZB 24* und *FB 72* bestimmten Absolutwerte. Die Witterungsbeständigkeit im Sinne der prozentualen Restbiegefestigkeit stieg jedoch nach der Kurzzeitbewitterung mit erhöhtem Aufschlussdruck von 69 % (Var. 2578) auf 167 % (Var. 2573) an. Die nach *FB 72* vorliegenden Restfestigkeiten lagen über den Ausgangswerten – ein signifikanter Einfluss des Aufschlussgrads konnte jedoch nicht nachgewiesen werden.

Es war festzustellen, dass sich die Verringerung der Absolutwerte nach *KZB* stärker ausprägte als nach *FB*, was auf die größere Belastung der Proben (sog. „accelerated test method“) zurückgeführt wird.

Nach Bewitterung waren sowohl die Absolutwerte der Restfestigkeit als auch die prozentualen Werte der Laborplatten im Vergleich zu den geprüften Industrieplatten bis zu 8fach (nach *KZB*) höher.

Die *Biege-Elastizitätsmoduln* der im Labormaßstab hergestellten Platten im Ausgangszustand lagen, wie die Biegefestigkeiten, unter den Werten der Industrieplatten. Eine Erhöhung des Aufschlussgrads führte im Ausgangszustand erwartungsgemäß zu einer Verringerung der Absolutwerte.

Die *KZB* und die *FB* bewirkten bereits nach 8 bzw. 24 Wochen eine deutliche Senkung der Werte, danach schwächte sich der Einfluss ab. Die Laborplatten zeigten jedoch eine deutlich höhere Witterungsbeständigkeit als die Industrieplatten (nach *KZB 24* bis zu 20fach höhere Absolutwerte). Eine Erhöhung des Aufschlussgrads führte nach *KZB* zu höheren prozentualen Rest-Biege-Elastizitätsmoduln nach Bewitterung – nach *FB* war dieser Trend nicht eindeutig festzustellen.

Die Industrieplatten wiesen deutlich niedrigere, nach 24 Wochen Kurzzeitbewitterung kaum noch messbare Absolut- und Relativwerte auf und zeigten sich damit ausdrücklich weniger witterungsbeständig.

Die Querzugfestigkeit der geprüften Platten nahm über die Bewitterungszeiträume hin grundsätzlich ab – an den Industrieplatten konnten nach *KZB 24* teilweise keine Werte mehr bestimmt werden.

Die Querzugfestigkeit der labortechnisch hergestellten- und der Industrie-MDF lag im Ausgangszustand in einem vergleichbaren Bereich von 0,9 bis 1,3 N/mm². Unter Berücksichtigung des hohen Bindemittelgehalts der Laborplatten (16 % Festharz, bezogen auf Faserstoff_{atro}) sind die an den Laborplatten ermittelten Querzugfestigkeiten als eher gering einzustufen (bedenke: Faserkürzungen).

Die Erhöhung des Aufschlussgrads führte erwartungsgemäß zu einer Verringerung der Querzugfestigkeit im Ausgangszustand.

Der entsprechende Einfluss nach Bewitterung war uneinheitlich ausgeprägt: Die beste Witterungsbeständigkeit nach *FB 72* und *KZB 24* im Sinne der verbleibende prozentualen Querzugfestigkeit wurde bei einem Aufschlussgrad von 12/4 erreicht. Im Gegensatz zur oben besprochenen Biegefestigkeit wurden für die Querzugfestigkeit jedoch nach *KZB 24* höhere Werte bestimmt als nach *FB 72*.

Die Witterungsbeständigkeit der mit modifizierten Fasern hergestellten Laborplatten lag um ein Vielfaches höher als die der Industrieplatten.

Die Dickenquellung nach 24 h Wasserlagerung nahm im Ausgangszustand mit zunehmendem Aufschlussgrad ab. Gleichzeitig lagen die Werte deutlich unter den vergleichbaren Werten der Industrieplatten.

Mit andauernder Bewitterung nahm die Dickenquellung erwartungsgemäß zu. Der quellungsvergütende Einfluss des Aufschlussgrads kehrte sich bei Bewitterung um: Aus einer Erhöhung des Aufschlussdrucks und der Aufschlusszeit resultierte nach Bewitterung (sowohl nach *KZB* als auch nach *FB*) eine erhöhte Dickenquellung. Analog zur Querzugfestigkeit wurden auch hier nach *FB* höhere Werte ermittelt als nach *KZB*.

Die prozentuale Restquellung lag, aufgrund der teilweise sehr geringen Ausgangswerte (Minimum bei Var. 2573, Aufschlussgrad 16/8, Dickenquellung 0,6 %), extrem hoch (bis zu 1400 % nach *KZB* bzw. bis zu 1600 % nach *FB*). Vergleicht man jedoch die nach *KZB 24* vorliegenden Absolutwerte, so ist auch hier die Dickenquellung der mit modifizierten Fasern hergestellten Laborplatten um bis zu 66 % geringer als die an den Industrieplatten ermittelte Werte. Nach *FB 72* wurden an den Industrieplatten kleinere prozentuale Restquellungen und Absolutwerte ermittelt.

MUF-Harz gebundene MDF

Die Rohdichte der MUF-Harz gebundenen labortechnisch hergestellten Faserplatten lag über den Werten der zum Vergleich herangezogenen Industrieplatten. Sie blieb jedoch bei allen Platten, unabhängig von Art und Dauer der Bewitterung, relativ unverändert. Die Rohdichte der Industrieplatten nach 24 Wochen *KZB* erreichte nur noch 73 bis 76 % der jeweiligen Ausgangswerte, bei den Laborplatten waren minimal 88,5 % zu beobachten.

Die Plattendicke der Laborplatten änderte sich bei Bewitterung nur geringfügig - mit zunehmendem Aufschlussgrad war nur nach *KZB* eine Abnahme der Plattendicke zu beobachten. Die Industrieplatten zeigten im Gegensatz dazu eine stetige Zunahme der

Plattendicke auf bis zu 126 % nach 24 Wochen *KZB*. Bei Freibewitterung über 96 Wochen war keine signifikante Zunahme der Plattendicke zu beobachten.

Die Biegefestigkeit der Laborplatten im Ausgangszustand war, abhängig vom Aufschlussgrad, teilweise gut vergleichbar mit den Werten der Industriplatten (bis Aufschlussgrad 8/8 gleiche Werte, bei 12/4 gut vergleichbar, ab 12/8 geringer).

Die *FB* hat nur einen unwesentlichen Einfluss auf die Biegefestigkeit der mit modifizierten Fasern hergestellten Laborplatten: Auch hier zeigte sich, ähnlich wie bei den PF-Harz gebundenen Platten, ein teilweise leichter Anstieg der Werte mit zunehmender Bewitterungsdauer im Vergleich zum Ausgangszustand. Die Biegefestigkeit der Industriplatten nahm mit zunehmender *FB*-Dauer deutlich ab.

Wie bereits beschrieben, hatte die *KZB* einen stärkeren Einfluss auf die Veränderung der Platteneigenschaften als die *FB*. So nahm die Biegefestigkeit aller geprüften Platten mit zunehmender *KZB*-Dauer deutlich ab, wobei sich die erhöhte Witterungsbeständigkeit der Laborplatten durch teilweise dreifach höhere Restfestigkeiten im Vergleich zu den Industriplatten ausdrückt.

Die Erhöhung des Aufschlussdrucks und der Aufschlusszeit führten, unabhängig vom variierten Bindemittelgehalt, aufgrund der Faserkürzungen im Ausgangszustand zu einer Verringerung der Biegefestigkeit.

Nach *KZB 24* bzw. *FB 96* war der Einfluss des Aufschlussgrads jedoch uneinheitlich ausgeprägt: Es wurden zwar im Allgemeinen geringere Restfestigkeiten ermittelt, die Witterungsbeständigkeit (beurteilt als Maß der prozentualen Restfestigkeit bezogen auf den Ausgangszustand) blieb von der Intensivierung der Aufschlussparameter relativ unbeeinflusst. So stellten sich die Restfestigkeiten bei 53 ... 71 % nach *KZB 24* bzw. bei 81 ... 110 % nach *FB 96* im Vergleich zum Ausgangszustand ein.

Die Erhöhung des Bindemittelgehalts von 16 auf 20 % führte wider Erwarten nicht zu einer signifikanten Veränderung der Biegefestigkeit im Ausgangszustand. Nach *KZB 24* und *FB 96* erhöhte sich die Witterungsbeständigkeit (höhere prozentuale Restfestigkeiten).

Die Biege- Elastizitätsmoduln der im Labormaßstab hergestellten Faserplatten im Ausgangszustand lagen nur bei einem Aufschlussgrad von 16/8 deutlich unter denen der Industrie - MDF. Bei Aufschlussgraden von 8/4, 8/8 und 12/4 wurden signifikant höhere *E* Moduln bestimmt.

Bereits nach *KZB 8* war ein starkes Absinken der Biege- Elastizitätsmoduln zu erkennen, im weiteren Verlauf änderten sich die Werte nur noch unwesentlich. Der stärkste Verlust im Vergleich zur Ausgangsprobe zeigte sich bei den Industriplatten, die nach 24 Wochen *KZB* nur noch 6,3 ... 6,7 % der Ausgangs- Elastizitätsmoduln aufwiesen. Die Laborplatten zeigten mit einer Abnahme von 60 bis maximal 78 % die höhere Witterungsbeständigkeit. Die Kurzzeitbewitterung hatte eine stärkere Eigenschaftsminderung zur Folge als die Freibewitterung.

Eine Erhöhung des Aufschlussgrads führte grundsätzlich zu niedrigeren Absolutwerten der elastischen Eigenschaften (Faserkürzungen). Gleichzeitig dazu sanken die prozentualen Restwerte nach Bewitterung, wobei dieser Trend nach *KZB 24* stärker ausgeprägt war als nach *FB 96*.

Die Erhöhung des Bindemittelgehalts hatte im Ausgangszustand keine signifikante Änderung des Biege- Elastizitätsmoduls zur Folge, führte jedoch nach den jeweiligen Bewitterungszeiträumen zu höheren Restwerten bzw. zu höheren prozentualen Rest- Elastizitätsmoduln.

Die *KZB 24* führte bei den Industrieplatten zu einem starken Abfall der Eigenschaft (deutlich geringere Witterungsbeständigkeit als die Laborplatten), wohingegen der Unterschied der an den Industrieplatten ermittelten Werte zu den Laborplatten nach *FB 96* weniger extrem ausfiel.

Die Querzugfestigkeit der Labor- und der Industrieplatten lag in einem gut vergleichbaren Bereich von 1,1 bis 1,6 N/mm², wobei jedoch für weitere Betrachtungen auch hier der im Vergleich zu den Industrieplatten vermutlich höhere Bindemittelgehalt und die höhere Rohdichte der Laborplatten in Ansatz zu bringen ist.

Die Zugfestigkeit senkrecht zur Plattenebene nahm mit zunehmender Bewitterung der geprüften Platten grundsätzlich ab. Auch hier hatte die *KZB* eine stärkere Abnahme der Werte als die *FB* zur Folge. Die Witterungsbeständigkeit der mit modifizierten Fasern hergestellten MDF war deutlich größer als die der Industrieplatten.

Die Erhöhung des Aufschlussdrucks hatte keine signifikante Änderung der Querzugfestigkeit der Platten im Ausgangszustand zur Folge. Nach *KZB 24* führte sie jedoch zu einer Verringerung der Witterungsbeständigkeit im Sinne der Querzugfestigkeit (deutlicher Einbruch der Werte ab einem Aufschlussdruck von 16 bar). Dieser Trend war nach *FB 96* derart ausgeprägt nicht zu beobachten.

Die Erhöhung der Aufschlusszeit führte im Ausgangszustand zu einer leichten Verringerung der Querzugfestigkeit. Nach Bewitterung kam es erst bei höheren Aufschlussgraden (ab 12/4) zu einer Verringerung der Witterungsbeständigkeit.

Die Erhöhung des Bindemittelgehalts war im Allgemeinen mit einer Erhöhung der Querzugfestigkeit sowohl im Ausgangszustand als auch nach Bewitterung (hier: Absolutwerte) verbunden. Nach *KZB 24* und *FB 96* waren Platten mit höherem Bindemittelgehalt zumeist auch witterungsbeständiger.

Die Dickenquellung nach 24 h Wasserlagerung der mit modifizierten Faserstoffen hergestellten Faserplatten war sowohl im Ausgangszustand als auch nach Bewitterung deutlich geringer als die Dickenquellung der Industrie-MDF. Neben dem veränderten Faserstoffaufschluss ist dies sicher auch auf den erhöhten Bindemittelgehalt der Labor-MDF zurückzuführen.

Ähnlich wie bei den PF-gebundenen Platten kam es nach der *KZB* zu einer teilweise extremen Erhöhung der prozentualen Restquellwerte (sehr geringe Ausgangswerte, Zunahme nach *KZB 24* bis zu 750 %). Die Zunahme entsprach den Werten der Industrieplatten – damit lag die Witterungsbeständigkeit der Labor- und Industrieplatten in einem vergleichbaren Bereich. Nach *FB 96* wurden überraschenderweise deutlich geringere Quellwerte als im Ausgangszustand ermittelt.

Mit zunehmendem Aufschlussgrad kam es im Ausgangszustand zu einer Reduzierung der Quellwerte.

Die Erhöhung des Aufschlussdrucks führte nach *FB 96* nicht zu einer signifikanten Veränderung der Restquellungen. Bei *KZB 24* dagegen sanken die Absolutwerte (hier jedoch verbunden mit uneinheitlich ausgeprägten prozentualen Restquellungen) mit steigendem Aufschlussdruck ab.

Die Erhöhung der Aufschlusszeit führte nach *KZB 24* nur bei hohen Aufschlussgraden (ab 16/4) zu einer leichten Verbesserung der Absolutwerte und der prozentualen Restquellungen. Nach *FB 96* kehrte sich dieser Trend um: Bei Aufschlussgraden bis 8/8 sank die prozentuale Restquellung, die Witterungsbeständigkeit stieg. Ab 12/4 nahm die Witterungsbeständigkeit mit zunehmender Aufschlusszeit ab.

Die Erhöhung des Bindemittelgehalts führte einheitlich zu einer Senkung sowohl der Ausgangs- als auch der Restquellwerte, wobei der Einfluss mit zunehmendem Aufschlussgrad abnahm.

MUPF-gebundene MDF

Die folgende Auswertung der erreichbaren Witterungsbeständigkeit MUPF-Harzgebundener Faserplatten ist dahingehend eingeschränkt, dass keine Variation der Aufschlusszeit durchgeführt werden konnte. Weiterhin gelang es nicht, vergleichbar gebundene Industrie-MDF zu beschaffen, so dass eine Gegenüberstellung mit entsprechenden Werten entfällt.

Die Rohdichte der Plattenvarianten lag im Ausgangszustand eng beieinander und nahm über die Bewitterungszeiträume hin grundsätzlich ab. Die *KZB* hatte eine stärkere Verringerung der Werte zur Folge als die *FB*.

Die Plattendicke zeigte sich im Ausgangszustand unbeeinflusst vom Aufschlussgrad. Nach *KZB 24* sank die Plattendicke jedoch mit zunehmendem Aufschlussgrad der Faserstoffe. Ein derartiger Trend war nach *FB 72* nicht nachweisbar.

Erwartungsgemäß sank die Biegefestigkeit im Ausgangszustand mit der Erhöhung des Aufschlussgrades. Dieser Trend setzte sich auch in den Absolutwerten nach *KZB 24* bzw. *FB 72* fort. Grundsätzlich wurden die Werte nach Bewitterung kleiner. Die Verwendung hochaufgeschlossener Faserstoffe führte nur nach *KZB 24* zu einer leichten Erhöhung der prozentualen Restbiegefestigkeiten von 56 auf 63 % der Ausgangsfestigkeit.

Der Biege- Elastizitätsmodul folgte dem Trend der Biegefestigkeit: Mit steigendem Aufschlussgrad und mit zunehmender Bewitterungsdauer sanken die Werte. Auch hier konnte eine größere Beeinflussung der *KZB* auf die Eigenschaftsminderung als nach *FB* beobachtet werden. Ein direkter Einfluss des Aufschlussdrucks auf die Veränderung der Witterungsbeständigkeit war nicht festzustellen.

Die Querzugfestigkeit nahm mit zunehmendem Faserstoffaufschluss ab. Alle Werte sanken nach Bewitterung.

Die Veränderung des bei der Zerfaserung verwendeten Aufschlussdrucks zeigte sowohl im Ausgangszustand als auch nach *FB 72* keinen Einfluss auf die ermittelten Eigenschaften. Nur nach *KZB 24* nahm die Zugfestigkeit senkrecht zur Plattenebene und die diesbezügliche Witterungsbeständigkeit mit erhöhtem Aufschlussgrad ab.

Die Dickenquellung nach 24 h Wasserlagerung der mit unterschiedlich aufgeschlossenen Faserstoffen hergestellten Laborplatten lag im Ausgangszustand vergleichsweise eng beieinander (1,8 ... 1,5 %) und stieg nach *KZB* deutlich an. Gegensätzlich dazu zeigte die Freibewitterung keinen signifikanten Einfluss auf die Veränderung der Quellwerte.

Die Erhöhung des Aufschlussdrucks führte im Ausgangszustand zu einer leichten Quellungsvergütung. Nach *KZB 24* war dieser Einfluss stärker ausgeprägt: Obwohl die Werte deutlich höher waren als im Ausgangszustand, halbierten sich nahezu sowohl die Absolutwerte als auch die prozentuale Restquellung bei Faserplatten aus hochaufgeschlossenen Faserstoffen. Nach *FB 72* war, gegensätzlich dazu, keine Quellungsvergütung zu erkennen.

PMDI-gebundene MDF

Vorangestellt ist einschränkend anzumerken, dass die Aufschlusszeit nicht variiert und die verwendeten Faserstoffe einheitlich bei 4 min aufgeschlossen wurden.

Die Rohdichte der im Labor hergestellten PMDI-gebundenen MDF (730 bis 750 kg/m³) war sowohl im Ausgangszustand als auch nach Bewitterung grundsätzlich geringer als die Rohdichte der vergleichbaren Industriefaserplatten (Bereich 730 bis 810 kg/m³). Die Werte aller Platten nahmen mit zunehmender Bewitterung gleichsinnig auf etwa 90 bis 95 % der Ausgangswerte ab.

Die Plattendicke der Laborplatten änderte sich nach Bewitterung nur geringfügig. Die größte Dickenzunahme bei Bewitterung war bei einem Aufschlussdruck von 8 bar zu verzeichnen und war damit den Industrie-Platten vergleichbar. Mit zunehmendem Aufschlussdruck war eine leichte Abnahme der Plattendicke zu beobachten.

Die Biegefestigkeit der labortechnisch hergestellten Faserplatten lag im Ausgangszustand aufgrund des unterschiedlichen Aufschlussgrads der Faserstoffe erwartungsgemäß unter den vergleichbaren Werten der Industrieplatten.

Die Bewitterung hatte grundsätzlich eine Abnahme der Biegefestigkeit zur Folge, wobei die Kurzzeitbewitterung einen stärkeren Einfluss ausübte als die Freibewitterung.

Die Erhöhung des Aufschlussdrucks bei der Faserherstellung führte zur Verringerung der Biegefestigkeit im Ausgangszustand (Verringerung um bis zu 50 %). Nach Bewitterung sanken zwar gleichfalls die absoluten Werte – die prozentuale Restfestigkeit stieg jedoch an. Die Witterungsbeständigkeit der Laborplatten lag bis zu einem Aufschlussgrad von 12/4 im gleichen Bereich wie die der Industrieplatten. Darüber hinaus zeigten sich die Labor-MDF deutlich witterungsbeständiger.

Die eingesetzten Bindemittelanteile sind mit 8 bzw. 16 % gegenüber industrieüblich hergestellten Platten als vergleichsweise hoch einzustufen. Die Erhöhung des Bindemittelanteils führte innerhalb der Varianten sowohl im Ausgangszustand als auch nach Bewitterung zu einer deutlichen Verbesserung der Biegefestigkeit – die Witterungsbeständigkeit stieg mit erhöhtem Bindemittelanteil an.

Die Biege- Elastizitätsmoduln der Labor-MDF lagen im Ausgangszustand ab einem Aufschlussgrad von 12/4 unter den Werten der Industrieplatten. Eine Erhöhung des Aufschlussdruckes führte im Ausgangszustand erwartungsgemäß zu niedrigeren Absolutwerten der Laborplatten. Nach Bewitterung kehrte sich diese Tendenz um: Eine Erhöhung des Aufschlussdrucks bewirkte eine Erhöhung der prozentualen Rest- Elastizitätsmoduln. Die elastischen Eigenschaften nach Bewitterung stiegen erwartungsgemäß mit höherem Bindemittelanteil an.

Auch die Querzugfestigkeit der Laborplatten war im Ausgangszustand aufgrund der erhöhten Aufschlussgrade, trotz der vermutlich höheren Bindemittelanteile, deutlich kleiner als die entsprechenden Werte der Industrieplatten. Nach Bewitterung glichen sich die Werte aus – trotzdem konnte das Niveau der Industrieplatten nicht erreicht werden. Alle Werte nahmen im Laufe der Bewitterung ab.

Die Erhöhung des Aufschlussdrucks führte nur bei Bindemittelanteilen von 16 % zu einem Anstieg der Querzugfestigkeit im Ausgangszustand.

Die Erhöhung des Bindemittelanteils von 8 auf 16 % brachte sowohl im Ausgangszustand als auch nach Bewitterung eine Erhöhung der Absolutwerte sowie der Witterungsbeständigkeit (verstärkt nach *KZB 24*) im Sinne der prozentual vorliegenden Restfestigkeiten mit sich.

Die Dickenquellung nach 24 h Wasserlagerung der Laborplatten lag sowohl im Ausgangszustand als auch nach Bewitterung bei Aufschlussgraden von 8/4 im Bereich der an den Industriepplatten ermittelten Werte. Darüber hinaus wurden grundsätzlich geringere Quellwerte bestimmt (Quellungsvergütung durch erhöhten Aufschlussgrad). Alle Werte stiegen nach den unterschiedlichen Bewitterungen an. Die FB führte grundsätzlich zu einer geringeren Verschlechterung der Werte als die KZB.

Die Erhöhung des Aufschlussdrucks führte im Ausgangszustand zu einer Verringerung der Dickenquellung. Nach *KZB 24* sanken zwar die ermittelten Absolutwerte - die auf den Ausgangszustand bezogene Restquellung verhielt sich bei einem Bindemittelanteil von 8 % aber eher uneinheitlich und stieg bei 16 % PMDI sogar noch an.

Die Erhöhung des Bindemittelanteils hatte nur im Ausgangszustand einen signifikanten Einfluss auf die Verbesserung der Dickenquellung. Nach Bewitterung war nur bei niedrigem Aufschlussgrad (8/4) eine Quellungsvergütung nachzuweisen.

Wie die bindemittelbezogene Auswertung zeigte, zog eine Kurzzeitbewitterung über 24 Wochen eine äußerst intensive Belastung des Probenmaterials nach sich. Die im Anschluss an das Kurzzeitbewitterungsende bestimmten Eigenschaften lagen im Falle von Biegeeigenschaften und Querkzugfestigkeit teilweise bei nur ~30 % derjenigen Eigenschaften, die nach einer 72-wöchigen Freibewitterung bestimmt wurden. Aus diesem Grund wurden fallweise auch die Ergebnisse nach 8 Wochen technischer Bewitterung im Xenotest-Gerät (*KZB 8*) in die Ergebnisdiskussion einbezogen.

Die nun folgenden zusammenfassenden, bindemittelübergreifenden Aussagen stützen sich auf die Bewertung der Witterungsbeständigkeit im Sinne der wesentlichen Platteneigenschaften bei Biegung, Zug und Quellung nach Wasserlagerung: Eine gute Witterungsbeständigkeit wird bei geringen prozentualen Veränderungen der Eigenschaften im Vergleich zu den Ausgangswerten erreicht.

Es erfolgt sowohl eine Bewertung der absolut als auch der relativ nach Bewitterungsende (8 bzw. 24 Wochen Kurzzeitbewitterung sowie 72 Wochen Freibewitterung) vorliegenden Eigenschaften (Restfestigkeit und -dickenquellung) im Vergleich zu ausgewählten Industriepplatten, welche die jeweilig besten Eigenschaften nach Bewitterung zeigten.

Biegefestigkeit

Die beste Witterungsbeständigkeit im Sinne der Biegefestigkeit erreichten die MUF- und PF-gebundenen Platten. Dort stiegen bei bestimmten Faserstoffaufschlussgraden (PF: ab 12/4; MUF: bis 12/4) die Eigenschaften nach *KZB 8* bzw. *KZB 24* sowie *FB 72* im Vergleich zum Ausgleichszustand sogar noch an (siehe Tabelle 27).

Die unter Verwendung von 16 % MUF-Harz gebundene Labor-MDF aus bei 8 bar über 4 min industriell aufgeschlossenem Faserstoff entsprach nahezu der Platte aus dem unter vergleichbaren Einstellungen labortechnisch erzeugten Faserstoff. Die MUPF-Varianten ordneten sich vor den PMDI-gebundenen Platten ein, bei denen eine deutliche Verschlechterung der Biegefestigkeit (bis auf 88 % des Ausgangswertes) zu verzeichnen war.

Tabelle 27 Einfluss der Aufschlussbedingungen auf die Biegefestigkeit labortechnisch hergestellter MDF aus Kiefernholz-Faserstoffen nach KZB 8, KZB 24 bzw. FB 72 in Abhängigkeit vom eingesetzten Bindemitteltyp (Bindemittelanteil konstant 16 %), Vergleich zu Industrie-MDF der gleichen Bindemitteltypen

Biegefestigkeit [N/mm ²] nach EN 310	Labor-MDF Aufschlussbedingungen: Druck, Temperatur, Zeit							Industrie-MDF (IHD-Code)
	8 bar 170 °C 4 min	8 bar 170 °C 8 min	12 bar 187 °C 4 min	12 bar 187 °C 8 min	16 bar 200 °C 4 min	16 bar 200 °C 8 min	8 bar 170 °C 4 min (Industriefaserstoff)	
PF-Harz-Bindung								(269)
Ausgangszustand	28,7	20,0	20,5	12,1	13,7	7,6	n. b. ⁵²	47,6
nach 8 Wochen KZB	24,3	18,7	19,2	12,5	13,3	9,3	n. b.	12,5
nach 24 Wochen KZB	19,8	18,9	19,5	13,1	14,8	12,7	n. b.	4,0
nach 72 Wochen FB	30,4	19,8	23,4	13,2	14,4	7,8	n. b.	26,4
MUF-Harz-Bindung								(275)
Ausgangszustand	45,6	33,7	38,4	25,1	25,0	11,4	42,2	43,1
nach 8 Wochen KZB	31,8	24,4	21,9	17,8	15,6	8,4	30,1	14,2
nach 24 Wochen KZB	24,3	22,6	21,0	14,0	14,7	6,3	22,4	5,9
nach 72 Wochen FB	45,6	33,7	39,7	22,1	23,1	9,1	45,2	31,1
MUPF-Harz-Bindung								(... ⁵³)
Ausgangszustand	49,1	n. b.	38,0	n. b.	24,0	n. b.	n. b.	n. b.
nach 8 Wochen KZB	34,9	n. b.	20,6	n. b.	17,2	n. b.	n. b.	n. b.
nach 24 Wochen KZB	27,7	n. b.	23,7	n. b.	15,1	n. b.	n. b.	n. b.
nach 72 Wochen FB	44,6	n. b.	33,9	n. b.	20,7	n. b.	n. b.	n. b.
PMDI-Bindung								(284)
Ausgangszustand	43,9	n. b.	30,3	n. b.	21,5	n. b.	n. b.	37,6
nach 8 Wochen KZB	24,8	n. b.	18,8	n. b.	15,5	n. b.	n. b.	30,4
nach 24 Wochen KZB	23,7	n. b.	19,2	n. b.	15,6	n. b.	n. b.	24,6
nach 72 Wochen FB	33,4	n. b.	26,0	n. b.	18,7	n. b.	n. b.	37,9

Die *KZB* führte nach 24 Wochen Belastung zu einer starken Abnahme der Witterungsbeständigkeit der PMDI- und der MUF-Harz-gebundenen Platten (bis auf 35 bzw. 53 % der Ausgangswerte). Die beste prozentuale Restfestigkeit erreichten Faserplatten mit PF-Harz-Bindung (70 % bis zu 170 % der Ausgangswerte, die allerdings teilweise sehr gering waren). Überraschend gering fielen im Gegensatz dazu die Werte für die vergleichsweise geprüften Industrie-MDF aus (PF-Variante 9 % und MUF-Variante 14 % des jeweiligen Ausgangswertes). Als Ursache dafür wird ein gegenüber den Labor-MDF drastisch geringerer Bindemittelanteil der Industrieplatten vermutet. Einzig die PMDI-Variante wies mit 65 % vom Ausgangswert noch akzeptable Biegefestigkeiten nach 24 Wochen Kurzzeitwitterung auf.

Erwartungsgemäß niedriger war demgegenüber die Abnahme der Biegefestigkeiten nach *KZB 8*. Allerdings wurden die Werte für die Biegefestigkeit nach *FB 72* bindemittelunabhängig von keiner einzigen Versuchsvariante erreicht.

Die teilweise Erhöhung der Biegefestigkeit bei *FB 72* kann derzeit nur mit einer Versprödung des Bindemittels (keine Erhöhung der Rohdichte) oder einer Nachhärtung erklärt werden. Der stärkste Einfluss der Aufschlussintensität auf die Verbesserung der Witterungsbeständigkeit war bei den PF-gebundenen Platten, der geringste bei PMDI-gebundenen Platten nachzuweisen.

Biege-Elastizitätsmodul

Der Biege- Elastizitätsmodul der mit hochaufgeschlossenen Faserstoffen hergestellten MDF folgte dem für die Biegefestigkeit beschriebenen Trend: Mit zunehmendem Auf-

⁵² n. b. = nicht bestimmt

⁵³ MUPF-Harz-gebundene Industrie-MDF standen für die Untersuchungen nicht zur Verfügung.

schlussgrad sanken die Werte. Nach *FB 72* wiesen die Platten unter MUF- bzw. MUPF-Harz-Bindung die besten Eigenschaften, gefolgt von den Platten mit PMDI- bzw. PF-Harz-Bindung, auf (Tabelle 28).

Tabelle 28 Einfluss der Aufschlussbedingungen auf den Biege-E-Modul labortechnisch hergestellter MDF aus Kiefernholz-Faserstoffen nach KZB 8, KZB 24 bzw. FB 72 in Abhängigkeit vom eingesetzten Bindemitteltyp (Bindemittelanteil konstant 16 %), Vergleich zu Industrie-MDF der gleichen Bindemitteltypen

Biege-E-Modul [N/mm ²] nach EN 310	Labor-MDF Aufschlussbedingungen: Druck, Temperatur, Zeit							Industrie-MDF (IHD-Code)
	8 bar 170 °C 4 min	8 bar 170 °C 8 min	12 bar 187 °C 4 min	12 bar 187 °C 8 min	16 bar 200 °C 4 min	16 bar 200 °C 8 min	8 bar 170 °C 4 min (Industriefaserstoff)	
PF-Harz-Bindung								(269)
Ausgangszustand	2810	2350	2320	1770	1880	1370	n. b. ⁵⁴	4500
nach 8 Wochen KZB	1630	1390	1480	1180	1200	945	n. b.	700
nach 24 Wochen KZB	1290	1370	1380	1070	1210	990	n. b.	110
nach 72 Wochen FB	1670	1260	1510	1050	1170	650	n. b.	1590
MUF-Harz-Bindung								(275)
Ausgangszustand	4500	4030	4450	3620	3720	2760	4430	3920
nach 8 Wochen KZB	2070	1770	1790	1480	1420	910	1930	790
nach 24 Wochen KZB	1550	1530	1440	1160	1240	600	1460	260
nach 72 Wochen FB	3000	2630	3110	2370	2280	1320	3000	1550
MUPF-Harz-Bindung								(... ⁵⁵)
Ausgangszustand	4520	n. b.	4230	n. b.	3560	n. b.	n. b.	n. b.
nach 8 Wochen KZB	2040	n. b.	1300	n. b.	1300	n. b.	n. b.	n. b.
nach 24 Wochen KZB	1570	n. b.	1560	n. b.	1210	n. b.	n. b.	n. b.
nach 72 Wochen FB	2640	n. b.	2530	n. b.	2130	n. b.	n. b.	n. b.
PMDI-Bindung								(284)
Ausgangszustand	3900	n. b.	3330	n. b.	2530	n. b.	n. b.	3340
nach 8 Wochen KZB	1440	n. b.	1280	n. b.	1200	n. b.	n. b.	1830
nach 24 Wochen KZB	1370	n. b.	1270	n. b.	1250	n. b.	n. b.	1340
nach 72 Wochen FB	2140	n. b.	1890	n. b.	1670	n. b.	n. b.	2310

Während nach *KZB 8* noch Unterschiede (und im Falle der PF-gebundenen MDF teilweise eine überraschend gute Übereinstimmung zu den Ergebnissen nach *FB 72*) festgestellt wurden, zeigten nach *KZB 24* alle Platten vergleichbare Werte. Übereinstimmend zu den Aussagen zur Biegefestigkeit wurde für Industrie-MDF mit PF- bzw. MUF-Harz-Bindung ein gravierender Abfall des Elastizitätsmoduls bei Biegeprüfung nach *KZB* festgestellt.

Sichere Zusammenhänge zwischen einer technischen Alterung im Xenotest-Gerät und einer tatsächlichen Freibewitterung konnten bezüglich der Biegeeigenschaften nicht festgestellt werden. Übereinstimmend zu den Untersuchungen von *River /1994/* nahmen sowohl E-Modul als auch Biegefestigkeit insbesondere im ersten Bewitterungsjahr ab. Das bestätigen auch die für ausgewählte Labor- und Industrie-MDF-Varianten vorliegende Ergebnisse nach dreijähriger Freibewitterung (*FB 160*), wonach sich die Biegeigenschaften zwischen einer Prüfung nach *FB 48* und *FB 160* um nochmals maximal 20 % reduzierten. Im Gegensatz zu den Aussagen von *River* an PF-gebundenen MDF ergaben sich aber keine signifikanten Abhängigkeiten zwischen einer technischen Alterung und einer „echten“ Freibewitterung. *River* hatte festgestellt, dass sowohl eine technische Alterung mittels Boil-dry-cycle als auch eine ASTM D 1037-Vorbehandlung eine gute Langzeitprognose der Witterungsbeständigkeit ermöglichen */River 1994/*.

⁵⁴ n. b. = nicht bestimmt

⁵⁵ MUPF-Harz-gebundene Industrie-MDF standen für die Untersuchungen nicht zur Verfügung.

Querzugfestigkeit

Die Querzugfestigkeit der untersuchten Platten nahm nach Bewitterung grundsätzlich ab (Tabelle 29).

Tabelle 29 Einfluss der Aufschlussbedingungen auf die Querzugfestigkeit labortechnisch hergestellter MDF aus Kiefernholz-Faserstoffen nach KZB 8, KZB 24 bzw. FB 72 in Abhängigkeit vom eingesetzten Bindemitteltyp (Bindemittelanteil konstant 16 %), Vergleich zu Industrie-MDF der gleichen Bindemitteltypen

Querzugfestigkeit [N/mm ²] nach EN 319	Labor-MDF Aufschlussbedingungen: Druck, Temperatur, Zeit							Industrie-MDF (IHD-Code)
	8 bar 170 °C 4 min	8 bar 170 °C 8 min	12 bar 187 °C 4 min	12 bar 187 °C 8 min	16 bar 200 °C 4 min	16 bar 200 °C 8 min	8 bar 170 °C 4 min (Industriefaserstoff)	
PF-Harz-Bindung								(269)
Ausgangszustand	1,07	0,88	0,91	0,85	0,90	0,76	n. b. ⁵⁶	1,02
nach 8 Wochen KZB	0,87	0,73	0,85	0,72	0,65	0,51	n. b.	0,10
nach 24 Wochen KZB	0,87	0,68	0,82	0,73	0,77	0,46	n. b.	0,01
nach 72 Wochen FB	0,94	0,59	0,91	0,33	0,24	0,30	n. b.	0,12
MUF-Harz-Bindung								(275)
Ausgangszustand	1,39	1,33	1,39	1,25	1,39	1,35	1,33	1,21
nach 8 Wochen KZB	0,84	0,79	0,65	0,49	0,39	0,47	0,51	0,17
nach 24 Wochen KZB	0,72	0,81	0,53	0,44	0,43	0,34	0,55	0,07
nach 72 Wochen FB	1,08	1,24	1,04	0,83	0,62	0,43	1,10	0,62
MUPF-Harz-Bindung								(... ⁵⁷)
Ausgangszustand	1,30	n. b.	1,37	n. b.	1,28	n. b.	n. b.	n. b.
nach 8 Wochen KZB	0,79	n. b.	0,82	n. b.	0,65	n. b.	n. b.	n. b.
nach 24 Wochen KZB	0,60	n. b.	0,50	n. b.	0,38	n. b.	n. b.	n. b.
nach 72 Wochen FB	1,05	n. b.	0,90	n. b.	0,75	n. b.	n. b.	n. b.
PMDI-Bindung								(284)
Ausgangszustand	1,10	n. b.	1,22	n. b.	1,29	n. b.	n. b.	1,81
nach 8 Wochen KZB	0,65	n. b.	0,70	n. b.	0,78	n. b.	n. b.	0,96
nach 24 Wochen KZB	0,25	n. b.	0,37	n. b.	0,52	n. b.	n. b.	0,64
nach 72 Wochen FB	0,78	n. b.	0,83	n. b.	0,88	n. b.	n. b.	1,68

Die beste Witterungsbeständigkeit nach *FB 72* erreichten MUF- sowie MUPF-gebundenen Platten, gefolgt von den PF- und den PMDI-gebundenen Platten. Die unter Verwendung von 16 % MUF-Harz gebundene Labor-MDF aus bei 8 bar über 4 min industriell aufgeschlossenem Faserstoff entsprach wiederum nahezu der Variante aus dem unter vergleichbaren Einstellungen labortechnisch erzeugten Faserstoff. Von den Industrieplatten zeigte die Variante mit PMDI die mit Abstand beste Witterungsbeständigkeit.

Zwischen den Werten nach *KZB 8* und *KZB 24* konnten im Falle der PF- und MUF-Faserplatten aufschlussunabhängig kaum Unterschiede ermittelt werden, während die Querzugfestigkeiten der Varianten mit MUPF- sowie PMDI-Bindung nach dem längeren Bewitterungszeitraum signifikant niedriger lagen.

Nach *KZB 24* war die Witterungsbeständigkeit der PF-gebundenen Platten (gefolgt von MUF-, MUPF- und PMDI-gebundenen Platten) am besten. Die maximale Querzugfestigkeit erreichten PF-gebundene Labor-MDF bei einem Aufschlussgrad von 12/4, MUF-Platten bei 8/8 und PMDI-MDF bei 16/4. Nach *FB* wurden ebenfalls die höchsten Festigkeiten für PF-gebundene Labor-MDF bei einem Aufschlussgrad von 12/4, für MUF-Platten bei 8/8 und für PMDI-Platten bei 16/4 ermittelt.

⁵⁶ n. b. = nicht bestimmt

⁵⁷ MUPF-Harz-gebundene Industrie-MDF standen für die Untersuchungen nicht zur Verfügung.

Der stärkste Einfluss einer höheren Aufschlussintensität bei der Zerfaserung auf die Verbesserung der Witterungsbeständigkeit war bei den PMDI-gebundenen Platten nachzuweisen.

Sowohl von PF-Harz- als auch PMDI-gebundenen Labor-MDF wurde die Querkzugfestigkeit vergleichbarer Industriepplatten im Ausgangszustand nicht erreicht, bei den MUF-gebundenen Laborplatten wurden höhere Werte ermittelt. Nach Bewitterung wurden von den Labor-MDF mit PF-Harz- bzw. MUF-Harz-Bindung deutlich höhere Werte als bei den Industriepplatten bestimmt. Die PMDI-gebundenen Platten lagen in ihrer Querkzugfestigkeit unter den Werten der Industriepplatten. Die *KZB 24* führte bei den MUF-Harz- bzw. den PMDI-gebundenen Labor-MDF zu einer stärkeren Beeinträchtigung der Querkzugfestigkeit als die *FB*. Bei den PF-Harz-gebundenen MDF wurden bis zu einem Aufschlussgrad von 12/4 nach *KZB* überraschenderweise teilweise höhere Werte als nach *FB 72* bestimmt.

Die Intensivierung der Aufschlussbedingungen führte bei den PF- und MUF-Harz-gebundenen Labor-MDF zu einer Verringerung der Querkzugfestigkeit sowohl im Ausgangszustand als auch nach Bewitterung. Im Gegensatz dazu stieg die Querkzugfestigkeit der PMDI-gebundenen MDF vor und nach Bewitterung mit zunehmendem Aufschlussgrad an.

Die Witterungsbeständigkeit (Restquerkzugfestigkeit) lag für die MUF-Labor-MDF deutlich über den Werten der Industriepplatten. Bei PF-gebundenen Platten war die Witterungsbeständigkeit nur bis zu einem Aufschlussgrad von 12/8 höher, danach wurden die Werte der Industriepplatten nicht mehr erreicht. Die PMDI-gebundenen Labor-MDF zeigten eine geringere Witterungsbeständigkeit als die Industriepplatten. Die Erhöhung des Aufschlussgrads wirkte sich, bis auf eine Ausnahme (PF-Harz-gebundene MDF bis 12/4), negativ auf die Erhöhung der Restquerkzugfestigkeit nach Bewitterung aus. Die maximale Witterungsbeständigkeit erreichten PF-gebundene Platten bei 12/4 (*KZB* und *FB*), MUF-Platten bei 8/8 (*KZB* und *FB*) sowie PMDI-Platten bei 12/4 (*KZB*) bzw. 16/8 (*FB*).

Grundsätzlich ist festzustellen, dass die Ergebnisse zur Querkzugfestigkeit nach *KZB 8* und *FB 72* für alle untersuchten Bindemitteltypen und Aufschlussgrade relativ gut übereinstimmen und damit mit einer 8-wöchigen technischen Alterung im Xenotest-Gerät eine 72-wöchige natürliche Alterung simuliert werden kann. Im Kontext zu den zahlreichen Erfahrungen von *Deppe* und *Schmidt* zur Bewitterung von Spanplatten kann deshalb von einer Eignung der Kurzzeit-Bewitterungs-Beanspruchung (*KZB*-Test) als zeitraffendes Alterungsverfahren zur Beurteilung einer dauerhaften Witterungsbeständigkeit ausgegangen werden (*Deppe 1996, Deppe, Schmidt 1982; 1983; 1989; Schmidt 1995*). Im Unterschied zu den Erfahrungen vorgenannter Autoren, die mit einer 12-wöchigen *KZB* eine dreijährige *FB* simulierten, wird eine Bewitterungszeit von 8 Wochen *KZB* als ausreichend eingeschätzt. Dem Aspekt einer verkürzten Expositionszeit ist dabei vor dem Hintergrund der sehr kostenintensiven Xenotest-Prüfungen hohe wirtschaftliche Bedeutung beizumessen.

Dickenquellung nach 24 h Wasserlagerung

Die Dickenquellung der geprüften MDF nahm nach Bewitterung zu (Ausnahme: MUF-Harz-gebundene MDF bis zu einem Aufschlussgrad von 12/4). Alle an den Labor-MDF ermittelten Dickenquellungen lagen im Ausgangszustand zum Teil deutlich unter den an den vergleichbaren Industrie-MDF bestimmten Werten. Diese Aussage stimmte nach Bewitterung nur für MDF mit PF- und MUF-Bindung.

Die beste Witterungsbeständigkeit (d.h. die geringste prozentuale Restquellung) wurde nach *FB 72* von den MUPF-, MUF- und PMDI- gebundenen Platten erreicht (Tabelle 30). Hier kam es nach Bewitterung stellenweise sogar zu einer Verringerung der Dickenquellungswerte, was zum Teil daran lag, dass die Proben nach der Bewitterung (trotz mehrwöchiger Rekonditionierung im Normalklima vor der Prüfung) etwas höhere Plattendicken aufwiesen und damit das verbleibende Quellungspotential geringer war.

Die schlechteste Witterungsbeständigkeit (d.h. die höchsten prozentualen Zuwächse) zeigten die PF-gebundenen Platten bei einem Aufschlussgrad 16/4 (Zunahme von 0,8 % im Ausgangszustand auf 13,0 % nach *FB 72*).

Tabelle 30 Einfluss der Aufschlussbedingungen auf die Dickenquellung nach 24 Stunden Wasserlagerung labor-technisch hergestellter MDF aus Kiefernholz-Faserstoffen nach KZB 8, KZB 24 bzw. *FB 72* in Abhängigkeit vom eingesetzten Bindemitteltyp (Bindemittelanteil konstant 16 %), Vergleich zu Industrie-MDF der gleichen Bindemitteltypen

Dickenquellung [%] nach EN 317	Labor-MDF Aufschlussbedingungen: Druck, Temperatur, Zeit							Industrie-MDF (IHD-Code)
	8 bar 170 °C 4 min	8 bar 170 °C 8 min	12 bar 187 °C 4 min	12 bar 187 °C 8 min	16 bar 200 °C 4 min	16 bar 200 °C 8 min	8 bar 170 °C 4 min (Industriefaserstoff)	
PF-Harz-Bindung								(269)
Ausgangszustand	4,3	3,0	2,0	0,9	0,8	0,6	n. b. ⁵⁸	4,6
nach 8 Wochen KZB	3,2	7,0	5,6	8,1	9,3	9,5	n. b.	25,3
nach 24 Wochen KZB	4,6	9,8	8,2	8,6	9,0	8,4	n. b.	30,6
nach 72 Wochen FB	5,7	8,1	4,5	9,6	13,0	7,9	n. b.	5,6
MUF-Harz-Bindung								(275)
Ausgangszustand	2,1	2,1	1,8	1,4	1,7	1,2	2,1	3,4
nach 8 Wochen KZB	7,0	2,8	8,8	9,2	9,1	4,6	5,9	21,9
nach 24 Wochen KZB	11,0	10,5	10,7	9,9	8,0	5,4	11,9	26,9
nach 72 Wochen FB	1,9	1,9	1,5	1,9	1,4	1,9	1,7	5,1
MUPF-Harz-Bindung								(... ⁵⁹)
Ausgangszustand	1,8	n. b.	1,6	n. b.	1,5	n. b.	n. b.	n. b.
nach 8 Wochen KZB	5,1	n. b.	5,0	n. b.	3,9	n. b.	n. b.	n. b.
nach 24 Wochen KZB	1,3	n. b.	0,9	n. b.	0,8	n. b.	n. b.	n. b.
nach 72 Wochen FB	1,6	n. b.	1,4	n. b.	1,4	n. b.	n. b.	n. b.
PMDI-Bindung								(284)
Ausgangszustand	2,6	n. b.	2,3	n. b.	1,7	n. b.	n. b.	2,8
nach 8 Wochen KZB	3,3	n. b.	3,2	n. b.	3,7	n. b.	n. b.	4,2
nach 24 Wochen KZB	7,8	n. b.	7,4	n. b.	6,3	n. b.	n. b.	7,8
nach 72 Wochen FB	3,6	n. b.	3,0	n. b.	2,1	n. b.	n. b.	1,6

Wiederum ordnete sich die unter Verwendung von 16 % MUF-Harz gebundene Labor-MDF aus bei 8 bar über 4 min industriell aufgeschlossenem Faserstoff gut in die Ergebnisse ein.

Die *KZB* führte generell zu einer beträchtlichen Erhöhung der Dickenquellung im Vergleich zu den Ausgangswerten. Nach *KZB 24* wiesen die MUPF-gebundenen Platten, gefolgt von den PMDI-, MUF- und PF-gebundenen Platten, die beste Witterungsbeständigkeit auf. Mit Ausnahme der MUPF-Harz-Varianten ergaben sich nach *KZB 8* grundsätzlich günstigere, d.h. niedrigere Quellwerte. Unerklärbar sind die gegenüber *KZB 24* signifikant (3-fach) erhöhten Dickenquellungswerte für die Faserplatten mit MUPF-Harz-Bindung nach 8-wöchiger *KZB*, unabhängig vom Aufschlussgrad bei der Zerfaserung.

⁵⁸ n. b. = nicht bestimmt

⁵⁹ MUPF-Harz-gebundene Industrie-MDF standen für die Untersuchungen nicht zur Verfügung.

In Übereinstimmung zu den Aussagen bzgl. Biege- und Querkzugfestigkeit wiesen die vergleichsweise geprüften Industrie-MDF mit PF- bzw. MUF-Harz-Bindung signifikant erhöhte Dickenquellungswerte nach *KZB 8* und *KZB 24* auf (was die Hypothese eines gegenüber den Labor-MDF reduzierten Leimanteils stützt). Nur bei der PMDI-Variante wurden akzeptable Werte ermittelt.

Mit der Verschärfung der Aufschlussbedingungen ging bei allen Platten eine Verringerung der Dickenquellung im Ausgangszustand einher.

Nach *KZB 24* erhöhten sich die Quellwerte allerdings bei PF-gebundenen Platten mit steigendem Aufschlussgrad, was teilweise eine extreme Verringerung der Witterungsbeständigkeit nach sich zog. Bei den MUF-Platten wurde indessen eine Quellungsvergütung festgestellt. Die Dickenquellung der PMDI-Platten zeigte sich nach *KZB* nicht signifikant beeinflusst vom Aufschlussgrad.

Nach *FB* wurde bei PMDI-gebundenen Platten von den Absolutwerten her eine leichte Quellungsvergütung, bei den PF-Harz-gebundenen Platten eine Verschlechterung der Quellwerte mit steigender Aufschlussintensität festgestellt. Die Werte der MUF- bzw. MUPF-Harz gebundenen Platten nach *FB* ließen keinen Einfluss der Aufschlussbedingungen auf die Quellung erkennen. Die geringste Dickenquellung wurden bei den PF-Platten bei einem Aufschlussgrad von 8/4 (*KZB*) bzw. 12/4 (*FB*), bei den MUF-Platten bei 16/8 (*KZB*, *kein Einfluss des Aufschlussgrads bei FB*) und bei den PMDI-Platten bei 16/4 (*FB*, *kein Einfluss des Aufschlussgrads bei KZB*) bestimmt.

Die Witterungsbeständigkeit (Restdickenquellung) nach *KZB* lag im Bereich der Industrieplatten (MUF) bzw. darunter (PF bis zu einem Aufschlussgrad von 12/4 und PMDI generell). Nach *FB* waren nur die MUF-Harz gebundenen Platten witterungsbeständiger als die entsprechenden Industrieplatten. Die Verschärfung der Aufschlussbedingungen führte bei den PF-Harz gebundenen Platten sowohl nach *KZB* als auch nach *FB* zu einer dramatischen Verschlechterung der Restdickenquellung. Die prozentuale Restquellung der MUF-, MUPF- bzw. PMDI-Platten blieb von einer Verschärfung der Aufschlussbedingungen hingegen nahezu unberührt.

Für Platten mit MUPF-Harz- sowie PMDI-Bindung stimmen die Ergebnisse zur Dickenquellung aufschlussunabhängig nach *KZB 8* und *FB 72* relativ gut überein. Damit werden die vorstehenden Aussagen zur Querkzugfestigkeit und damit auch die zahlreichen Erfahrungen von *Deppe* und *Schmidt* zur Eignung der Kurzzeit-Bewitterungsbeanspruchung (*KZB*-Test) als zeitraffendes Alterungsverfahren bestätigt.

Einen zusammenfassenden Überblick zu den Ergebnissen geben die folgenden Abbildungen, die die absoluten Werte im Ausgangszustand sowie nach Bewitterung (*KZB 8* und *FB 72*) für Biegefestigkeit, Querkzugfestigkeit und Dickenquellung der PF-, MUF-, MUPF-Harz sowie PMDI-gebundenen Labor-MDF aus bei 8, 12 und 16 bar über 4 min aufgeschlossenem Kiefernholzfaserstoff zeigen.

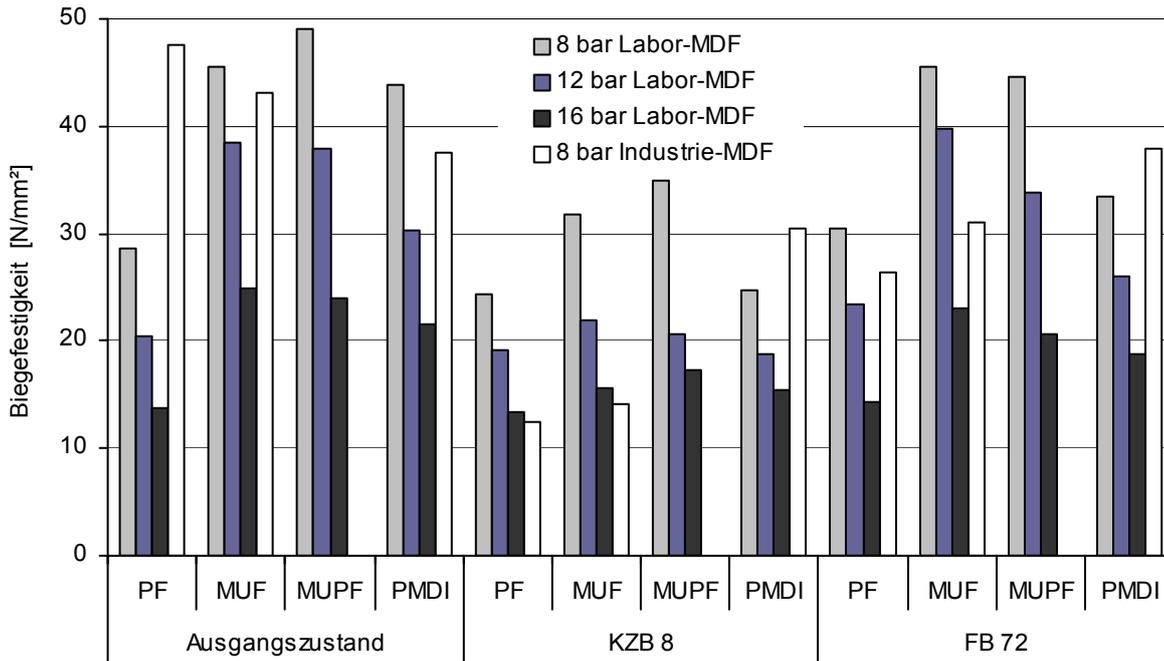


Abbildung 80 Biegefestigkeit von Labor-MDF in Abhängigkeit vom Bindemitteltyp (Anteil konstant 16 %) und Aufschlussdruck (Aufschlusszeit einheitlich 4 min) bei der labortechnischen Herstellung von Kiefernholzfasern (im Vergleich zu Industrie-MDF)

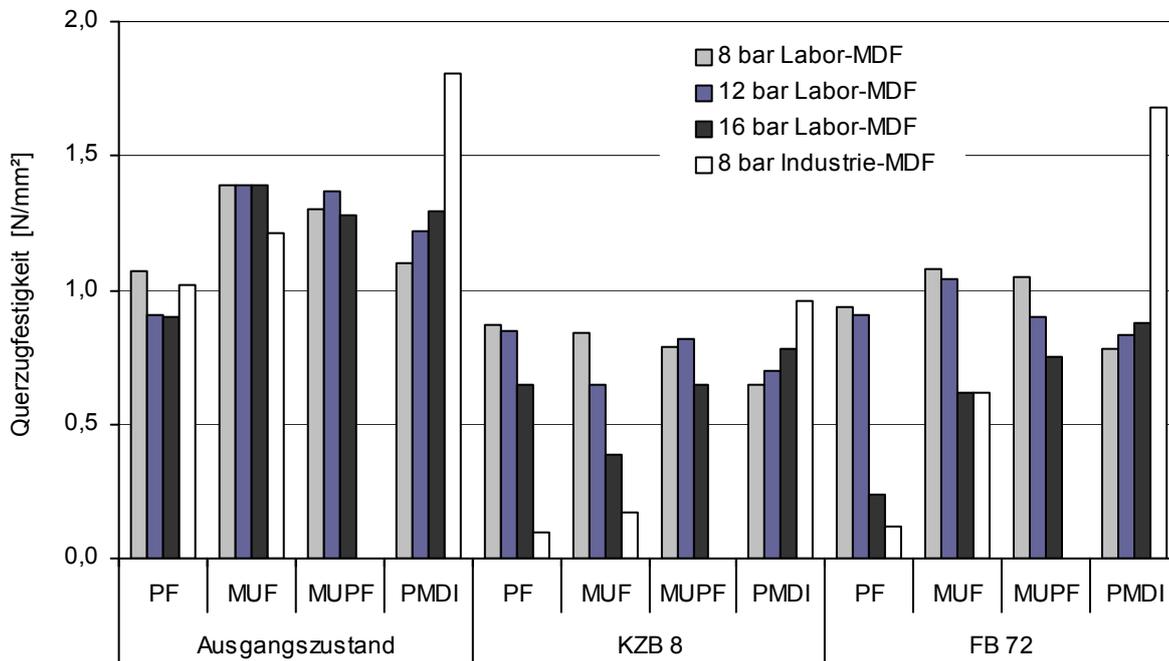


Abbildung 81 Querzugfestigkeit von Labor-MDF in Abhängigkeit vom Bindemitteltyp (Anteil konstant 16 %) und Aufschlussdruck (Aufschlusszeit einheitlich 4 min) bei der labortechnischen Herstellung von Kiefernholzfasern (im Vergleich zu Industrie-MDF)

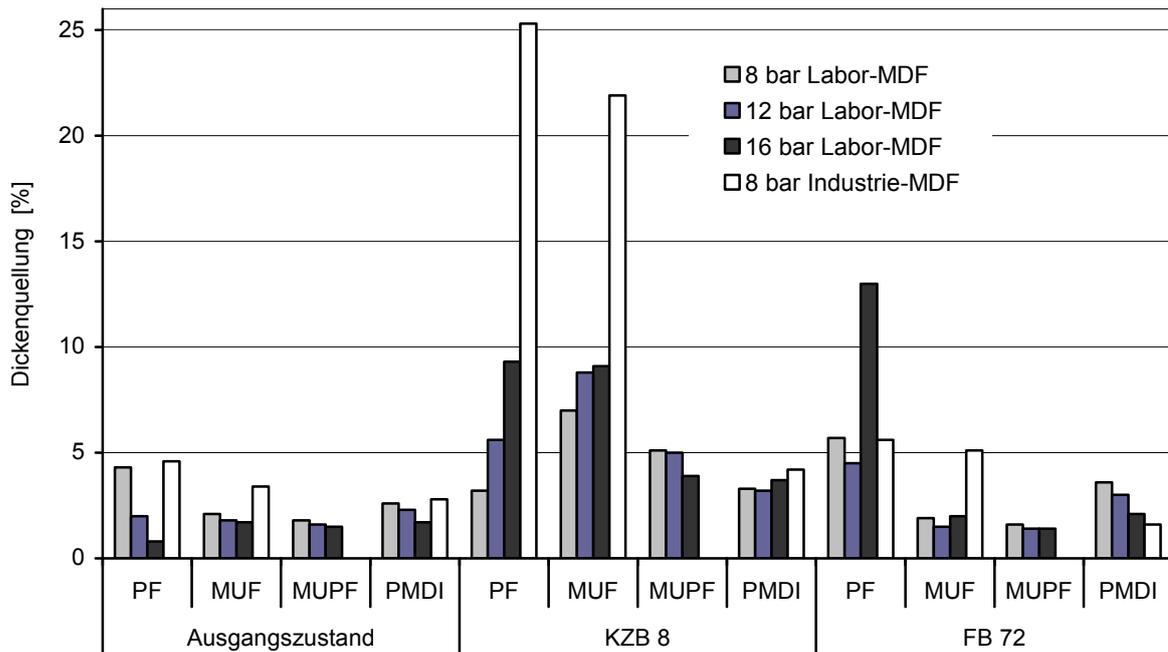


Abbildung 82 Dickenquellung nach 24 h Wasserlagerung von Labor-MDF in Abhängigkeit vom Bindemitteltyp (Anteil konstant 16 %) und Aufschlussdruck (Aufschlusszeit einheitlich 4 min) bei der labortechnischen Herstellung von Kiefernholzfasern (im Vergleich zu Industrie-MDF)

Als Fazit bleibt festzuhalten, dass durch die Herstellung von „vergüteten“ Faserstoffen mit höheren Aufschlussdrücken und längeren Aufschlusszeiten eine signifikante Quellungsvergütung und damit auch eine verbesserte Witterungsbeständigkeit der MDF erreicht wurde. Die mit modifizierten Fasern hergestellten MUF- und PF-Harz gebundenen Labor-MDF wiesen sowohl im unbewitterten als auch im bewitterten Zustand bessere absolute Querzug- und Dickenquellungs-Eigenschaften im Vergleich zu den Industriepplatten auf. Sie zeigten gleichfalls die bessere Witterungsbeständigkeit (Restquerzugfestigkeit nach *KZB 8* bzw. *KZB 24* und *FB 72*). Einzig die MUF-Platten aus extrem aufgeschlossenem Faserstoff (Aufschlussgrade $\geq 12/8$) lagen nach *FB* geringfügig unter den Werten der Industriepplatten.

Mit Bezug auf die Restquellung nach Bewitterung wurde von den PF-Harz- und den PMDI-gebundenen Platten mit mittleren Aufschlussgraden (bis 12/4) die bessere Witterungsbeständigkeit gegenüber den Industriepplatten erreicht.

Die Absolutwerte der PMDI-gebundenen Laborplatten waren geringer als bei den Industriepplatten; im Sinne der Witterungsbeständigkeit wurden nur für die Dickenquellung bessere Werte erzielt. Nach Freibewitterung waren keine so deutlichen Abstände zwischen den Labor- und Industriepplatten festzustellen. Am besten schnitten hier bezüglich der nach Bewitterung vorliegenden Absolutwerte die MUF-Harz-gebundenen Faserplatten ab.

Die Aufschlussverschärfung führte, insbesondere bei den PMDI-Platten, zu einer Quellungsvergütung nach Bewitterung. Die Steigerung des Aufschlussdruckes wirkte sich generell stärker auf die erreichbare Quellungsvergütung aus als eine Verlängerung der Aufschlusszeit.

Übereinstimmend zu den Untersuchungen von *River /1994/* nahmen die Biegeeigenschaften insbesondere im ersten Bewitterungsjahr ab. Das bestätigen auch die für aus-

gewählte Labor- und Industrie-MDF-Varianten vorliegende Ergebnisse nach dreijähriger Freibewitterung (*FB 160*), wonach sich die Biegeigenschaften zwischen einer Prüfung nach *FB 48* und *FB 160* um nochmals maximal 20 % reduzierten. Im Gegensatz zu den Aussagen von *River* ergaben sich aber keine signifikanten Abhängigkeiten zwischen einer technischen Alterung und einer Freibewitterung.

Grundsätzlich ist für die Ergebnisse zur Querkzugfestigkeit und teilweise der Dickenquellung (nur MUPF und PMDI) nach *KZB 8* und *FB 72* eine relativ gute aufschlussgradunabhängige Übereinstimmung festzustellen. Schlussfolgernd kann mit einer 8-wöchigen technische Alterung im Xenotest-Gerät eine 72-wöchige natürliche Alterung simuliert werden.

Diese Erkenntnisse stehen im Kontext zu den zahlreichen Erfahrungen von *Deppe* und *Schmidt* zur Bewitterung von Spanplatten. Im Unterschied zu den Erfahrungen vorgenannter Autoren, die mit einer 12-wöchigen KZB eine dreijährige *FB* simulierten, wird eine Bewitterungszeit von 8 Wochen *KZB* als ausreichend eingeschätzt.

Mit den Bewitterungsversuchen konnte, insbesondere für MDF aus Faserstoff, der unter verschärften Aufschlussbedingungen bei Drücken bis 12 bar aufgeschlossen wurde, bei Verwendung geeigneter Bindemittel (z. B. MUF und PMDI) eine dauerhafte Witterungsbeständigkeit nachgewiesen werden, die einen Außeneinsatz derartiger Platten als möglich erscheinen lässt.

5.3.4.3 *Korrelation zwischen Feuchtebeständigkeit der Verklebung und Witterungsbeständigkeit*

Die bisherigen Ausführungen lassen erwarten, dass mit einer 8-wöchigen technischen Alterung im Xenotest-Gerät eine 72-wöchige natürliche Alterung simuliert werden kann und dass sich damit die *KZB* als zeitraffendes Alterungsverfahren zur Beurteilung einer dauerhaften Witterungsbeständigkeit eignet. Nachteiligerweise verursachen Bewitterungsprüfungen zur technischen und natürlichen Alterung grundsätzlich hohe Betriebskosten und sind sehr zeitintensiv. So schließt sich an die eigentliche 8 bis 24-wöchige *KZB* nach der Probenahme eine 3- bis 4-wöchige Reklimatisierung an. Bis zum Vorliegen eines Prüfergebnisses verstreichen also 11 bis 28 Wochen.

Alternativ zu den Bewitterungsergebnissen sollte deshalb überprüft werden, inwiefern sich die ermittelten Eigenschaften Dickenquellung nach 24 h Wasserlagerung, Dickenquellung und Querkzugfestigkeit nach Zyklustest (Option 1) sowie Querkzugfestigkeit nach Kochprüfung (Option 2) nicht nur zum Nachweis der Feuchtebeständigkeit der Verklebung sondern auch zur Vorhersage einer späteren Witterungsbeständigkeit eignen können. Zudem sollten die im Zuge der Untersuchungen zur Feuchtebeständigkeit der Verklebung festgestellten *aufschluss- und bindemittelabhängigen* Zusammenhänge verifiziert werden.

Aus diesem Grund wurden über Korrelationsrechnungen Tendenzen zu Abhängigkeiten zwischen folgenden Eigenschaften untersucht:

- Querkzugfestigkeit nach 8 bzw. 24 Wochen Kurzzeitbewitterung sowie 72 Wochen Freibewitterung versus Querkzugfestigkeit nach Kochprüfung,
- Querkzugfestigkeit nach 8 bzw. 24 Wochen Kurzzeitbewitterung sowie 72 Wochen Freibewitterung versus Querkzugfestigkeit nach Zyklustest,

- Dickenquellung (24 h WL) nach 8 bzw. 24 Wochen Kurzzeitbewitterung sowie 72 Wochen Freibewitterung versus Dickenquellung nach Zyklustest,
- Dickenquellung (24 h WL) nach 8 bzw. 24 Wochen Kurzzeitbewitterung sowie 72 Wochen Freibewitterung versus Dickenquellung nach 24 h WL.

Die Auswertung erfolgte einerseits *bindemittelabhängig*. Dabei wurden die vorhandenen Ergebnisse für MDF unterschiedlicher Aufschlussintensitäten (Druck 8, 12, 16 bar, Zeit einheitlich 4 min) für die variierten Bindemittel zusammengefasst. Als Datenbasis für die Korrelationsrechnungen dienten die je Bindemitteltyp vorliegenden Mittelwerte auf Basis von 10 bis 18 Einzelwerten, die dann für die jeweiligen Aufschlussgrade zusammengezogen wurden.

Im Anschluss wurde untersucht, inwiefern *aufschlussabhängige* Korrelationen ermittelt werden konnten. Hierfür erfolgte eine Zusammenfassung der unterschiedlich gebundenen MDF (PF-, MUF-, MUPF-Harz sowie PMDI) und eine Bewertung des Einflusses des Aufschlussdruckes. Die Datenbasis bildeten in diesem Falle die je Aufschlussgrad vorliegenden Mittelwerte auf Basis von 10 bis 18 Einzelwerten, welche für die jeweiligen Bindemitteltypen zusammengezogen wurden.

Grundsätzlich wurde für Korrelationen ab einem Bestimmtheitsmaßen $\geq 0,5$ ein statistischer Zusammenhang zwischen den Variablen angenommen. Reguläre Abhängigkeiten ergaben sich dabei prinzipiell aus positiven Anstiegen der linearen Korrelationen. Demgegenüber ließen sich aus negativen Anstiegen trotz Bestimmtheitsmaßen $\geq 0,5$ nur im Falle der Querkzugfestigkeiten zumindest teilweise sinnvolle Zusammenhänge ableiten, während für die Quellwerte keine sinnvollen Abhängigkeiten bestanden. Ein negativer Anstieg bedeutet ja sinngemäß, dass zunehmenden Werten der abhängigen Variablen abnehmende Werte der feststehenden Einflussgröße (bzw. umgekehrt) gegenüberstehen.

Die folgende Abbildung 83 zeigt den *bindemittelabhängigen* Zusammenhang für die Querkzugfestigkeit nach Bewitterung versus Querkzugfestigkeit nach 2 h Kochen.

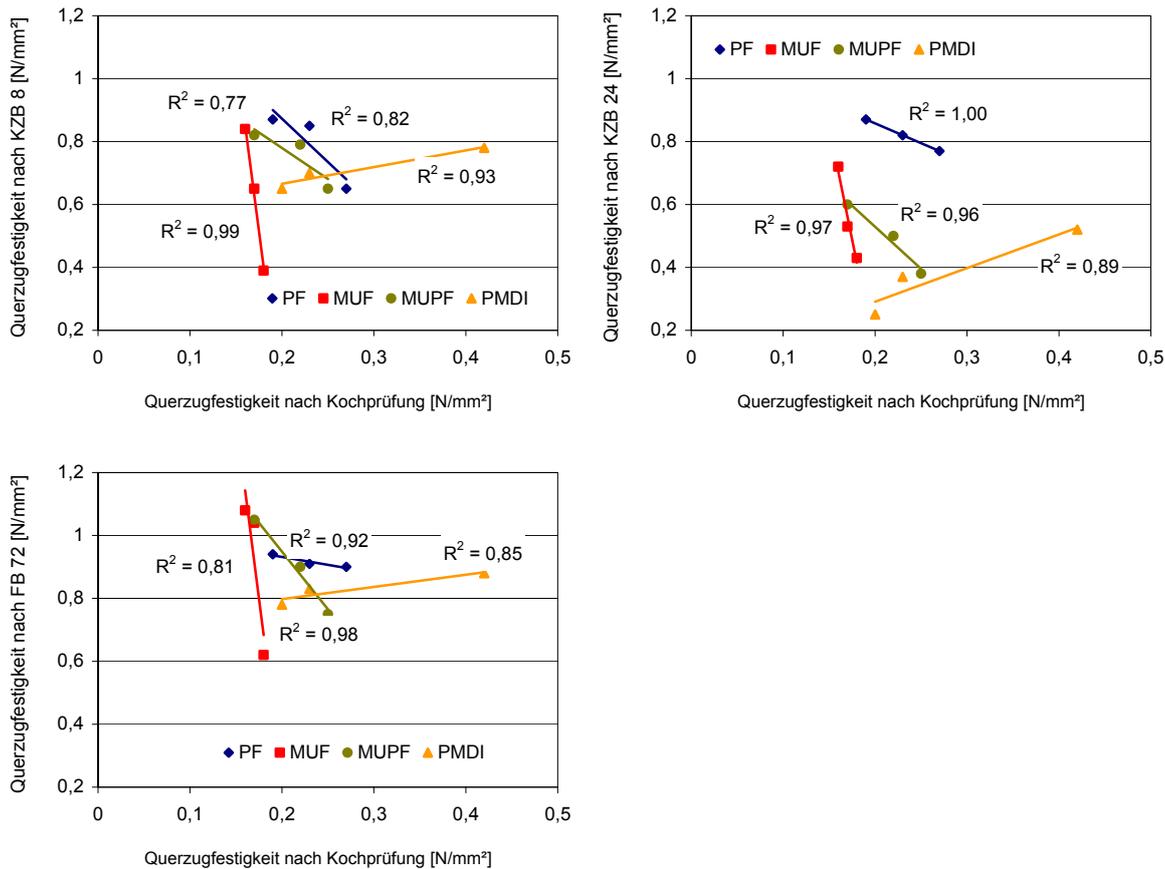


Abbildung 83 Bindemittelabhängiger Zusammenhang zwischen der Querzugfestigkeit nach 8 bzw. 24 Wochen KZB sowie 72 Wochen FB und der Querzugfestigkeit nach Kochprüfung von Labor-MDF (Bindemittel-Anteil konstant 16 %, unterschiedliche Aufschlussintensitäten (8, 12, 16 bar) zusammengefasst)

Die Querzugfestigkeit nach 2 h Kochen (V100, Option 2 nach DIN EN 1087-1) korreliert für alle Bindemittel mit der Querzugfestigkeit nach Kurzzeit- und Freibewitterung.

Nach *KZB 8* ergibt sich ein klarer Trend, der auch nach *KZB 24* bzw. *FB 72* Bestätigung findet. Danach korreliert bei PMDI-MDF der Koch-Querzug linear mit hohem Bestimmtheitsmaß mit der Querzugfestigkeit nach Bewitterung, d. h. Varianten mit größeren Werten für die Querzugfestigkeit nach 2 h Kochen ergeben auch höhere Querzüge nach Kurzzeit- und Freibewitterung.

Für alle anderen Bindemittel ergaben sich gleichfalls lineare Abhängigkeiten mit ausreichendem Bestimmtheitsmaß. Allerdings wiesen die PF-, MUF- oder MUPF-Harzgebundenen MDF signifikant unterschiedlich zu den Platten mit PMDI-Bindung infolge des negativen Anstieges der Korrelation bei steigenden Querzugfestigkeiten nach Kochprüfung sinkende Werte für die Querzugfestigkeit nach 8 oder 24 Wochen Kurzzeitbewitterung bzw. 72 Wochen Freibewitterung auf.

Zusammenfassend ist deshalb einzuschätzen, dass sich die Querzugfestigkeit nach Kochprüfung insbesondere für PMDI-gebundene Platten zur Vorhersage langfristiger Verklebungsqualitäten und damit ausreichender Witterungsbeständigkeit eignen sollte.

Wie die Auswertung zur Querzugfestigkeit nach Zyklustest (V313, Option 1 nach DIN EN 321) zeigt, ergaben sich auch zwischen dieser wichtigen Kenngröße zur Bewertung der Feuchtebeständigkeit der Verklebung und der Querzugfestigkeit nach Bewitterung deutliche Zusammenhänge. Vollständig entgegengesetzt zu den o. a. Aussagen zur

Abhängigkeit der Kochprüfung resultierten für den Querzug nach Zyklustest versus den Querzug nach Bewitterung mit Ausnahme der PMDI-gebundenen MDF grundsätzlich linear positive Korrelationen (Abbildung 84).

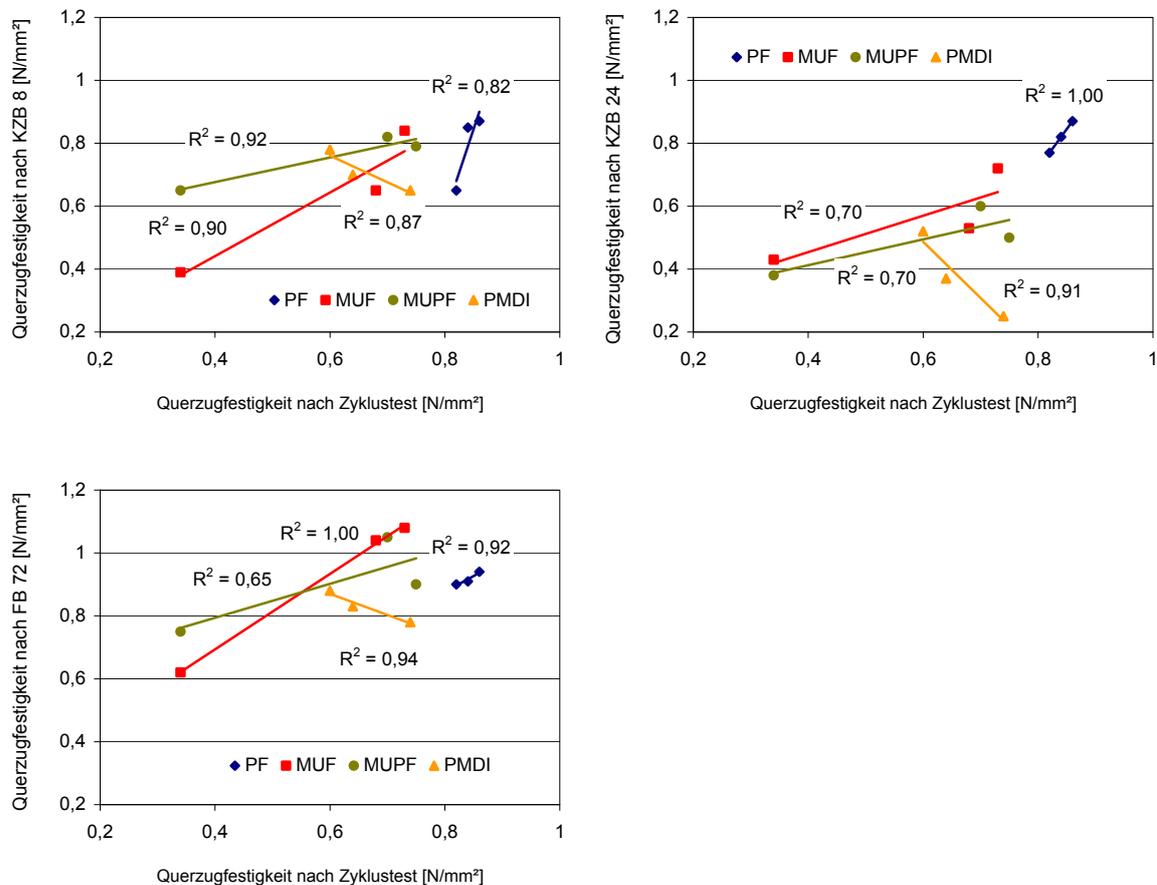


Abbildung 84 Bindemittelabhängiger Zusammenhang zwischen der Querzugfestigkeit nach 8 bzw. 24 Wochen KZB sowie 72 Wochen FB und der Querzugfestigkeit nach Zyklustest von Labor-MDF (Bindemittel-Anteil konstant 16 %, unterschiedliche Aufschlussintensitäten (8, 12, 16 bar) zusammengefasst)

Hohe Werte für die Querzugfestigkeit nach Zyklustest gewährleisteten für MDF mit PF-, MUF- oder MUPF-Harz-Bindung auch hohe Werte für die Querzugfestigkeit nach *KZB* oder *FB* und bestätigen die Eignung dieser Prüfung zur Vorhersage von Feuchte- und Witterungsbeständigkeit. Diese Aussagen stehen im Widerspruch zu bisherigen Erfahrungen zum Zusammenhang zwischen der Querzugfestigkeit nach 2 h Kochen bzw. Zyklustest versus der Querzugfestigkeit nach technischer oder natürlicher Bewitterung. Sowohl für die technische Alterung als auch für die natürliche Bewitterung hatten *Gresel/1997/* sowie *BRE/1996/* seinerzeit keine statistisch gesicherten Abhängigkeiten gefunden.

Bezüglich eines Zusammenhangs zwischen der Dickenquellung nach Zyklustest und der Dickenquellung nach Bewitterung ist mit Ausnahme leicht uneinheitlicher Aussagen nach *KZB 8* festzustellen, dass für MUF-, MUPF- und PMDI-gebundene Faserplatten lineare Abhängigkeiten mit positiven Anstieg ermittelt wurden. Bestimmtheitsmaße zwischen 0,77 und 1,00 nach *KZB 24* bzw. *FB 72* bestätigen den signifikanten Zusammenhang und die gute Korrelation für die Ergebnisse zur Dickenquellung nach Zyklustest im Vergleich zur Dickenquellung nach Bewitterung (Abbildung 85).

Danach führen abnehmende Quellwerte nach Zyklustest zu sinkenden Werten für die Dickenquellung nach Bewitterung.

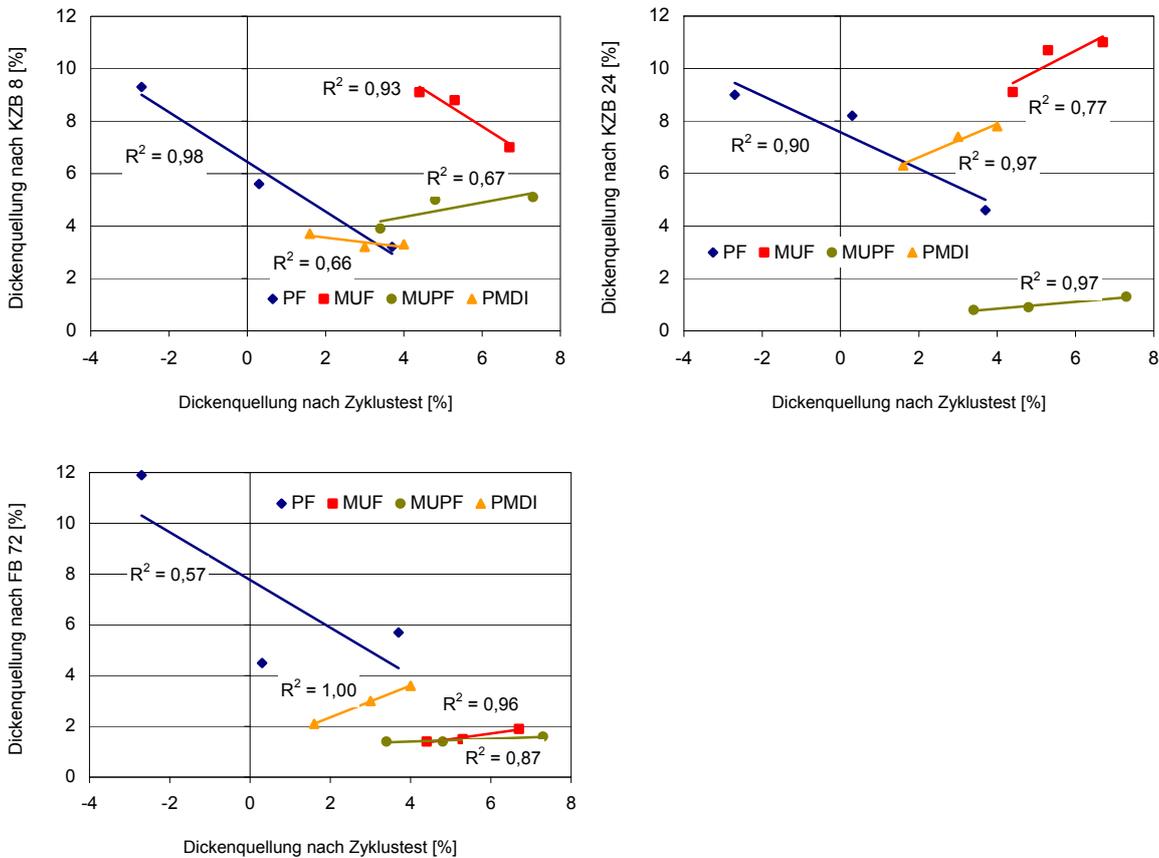


Abbildung 85 Bindemittelabhängiger Zusammenhang zwischen der Dickenquellung (24 h WL) nach 8 bzw. 24 Wochen KZB sowie 72 Wochen FB und der Dickenquellung (24 h WL) nach Zyklustest von Labor-MDF (Bindemittel-Anteil konstant 16 %, unterschiedliche Aufschlussintensitäten (8, 12, 16 bar) zusammengefasst)

MDF mit PF-Bindung wiesen nach Zyklustest grundsätzlich die günstigsten, d. h. die niedrigsten (teilweise sogar negativen) Dickenquellungswerte auf. Dabei ergaben sich die besten Ergebnisse für Platten aus Faserstoff, der bei 16 bar am intensivsten aufgeschlossen wurden war. Nach Bewitterung kehrte sich diese Tendenz um. Im Ergebnis wiesen MDF aus Extremfaserstoff die höchsten Quellwerte nach *KZB* und *FB* auf, woraus lineare Abhängigkeiten mit negativem Anstieg resultierten.

Die nachfolgenden Aussagen zum Zusammenhang zwischen der Dickenquellung nach 24 h Wasserlagerung und der Dickenquellung nach Bewitterung bestätigen inhaltlich die vorstehend beschriebenen Tendenzen zur Dickenquellung nach Zyklustest gegenüber der Dickenquellung nach Bewitterung (Abbildung 86).

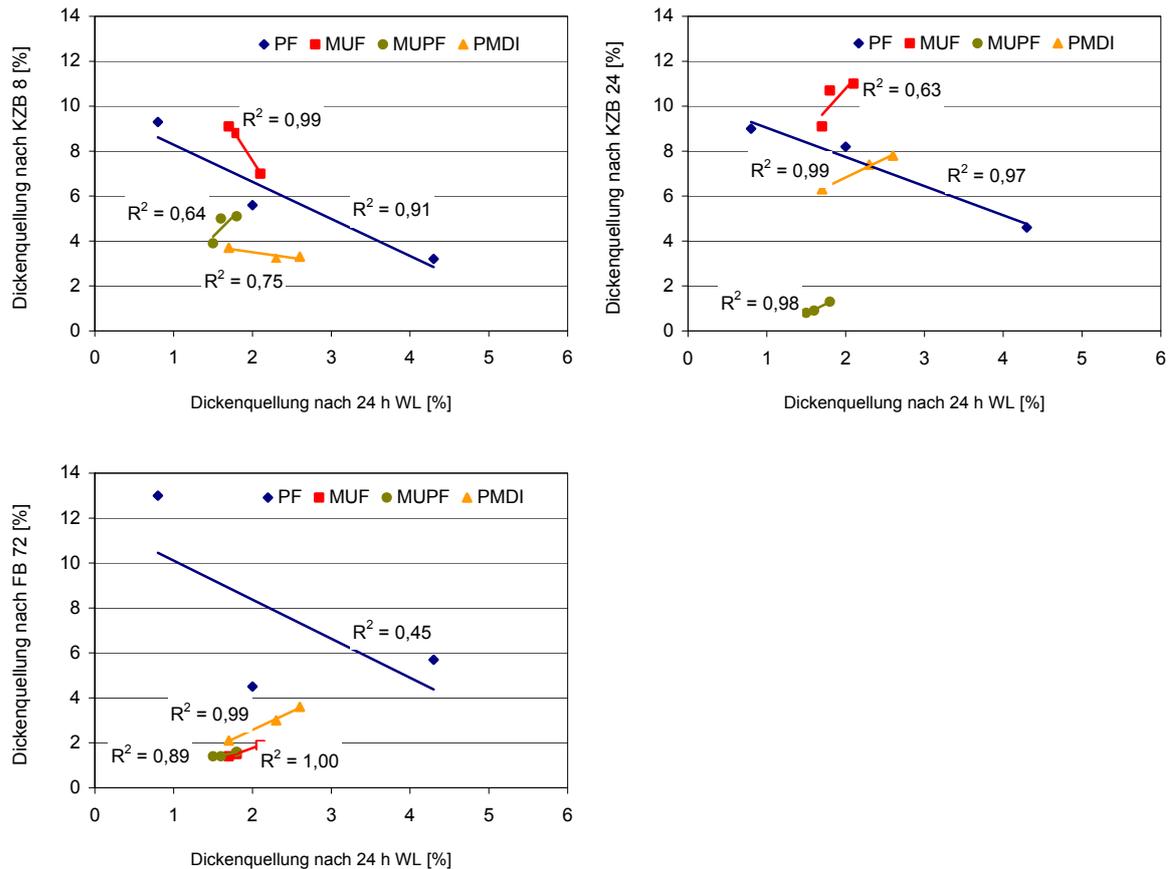


Abbildung 86 Bindemittelabhängiger Zusammenhang zwischen der Dickenquellung (24 h WL) nach 8 bzw. 24 Wochen KZB sowie 72 Wochen FB und der Dickenquellung (24 h WL) von Labor-MDF (Bindemittel-Anteil konstant 16 %, unterschiedliche Aufschlussintensitäten (8, 12, 16 bar) zusammengefasst)

Als Fazit bleibt festzuhalten, dass sich sowohl die Dickenquellung nach Zyklustest als auch die Dickenquellung nach 24 h Wasserlagerung zur Vorhersage einer Feucht- und Witterungsbeständigkeit MUF-, MUPF- und PMDI-gebundener Platten eignen können. Diese Ergebnisse sind als Bestätigung der Aussagen des Building Research Establishment (BRE) anzusehen, wonach die Werte für die Dickenquellung von MDF nach Freibewitterung mit den Ergebnissen nach 24 h Kaltwasserlagerung gut übereinstimmen und Korrelationen zwischen der Dickenquellung nach Zyklustest und der Dickenquellung nach Freibewitterung bestehen /BRE 1996/.

Übereinstimmend zu den Ergebnissen zur Querkzugfestigkeit nach Kochprüfung zeigen dabei speziell die Faserplatten mit PMDI-Bindung eine gute Witterungsbeständigkeit. Bestätigend zu den Erfahrungen nach den Kurzzeitprüfungen erzielen insbesondere MDF aus besonders intensiv aufgeschlossenem Faserstoff die besten Festigkeits- und Quellungsresultate.

Nach den *bindemittelabhängigen* Zusammenhängen wurde unter Zusammenschluss der verschiedenen Bindemitteltypen untersucht, ob tendenziell *aufschlussabhängige* Korrelationen bestehen.

Die nachfolgende Abbildung 87 enthält die Ergebnisse zur Querkzugfestigkeit nach 2 h Kochen in Gegenüberstellung zur Querkzugfestigkeit nach technischer Bewitterung und natürlicher Alterung.

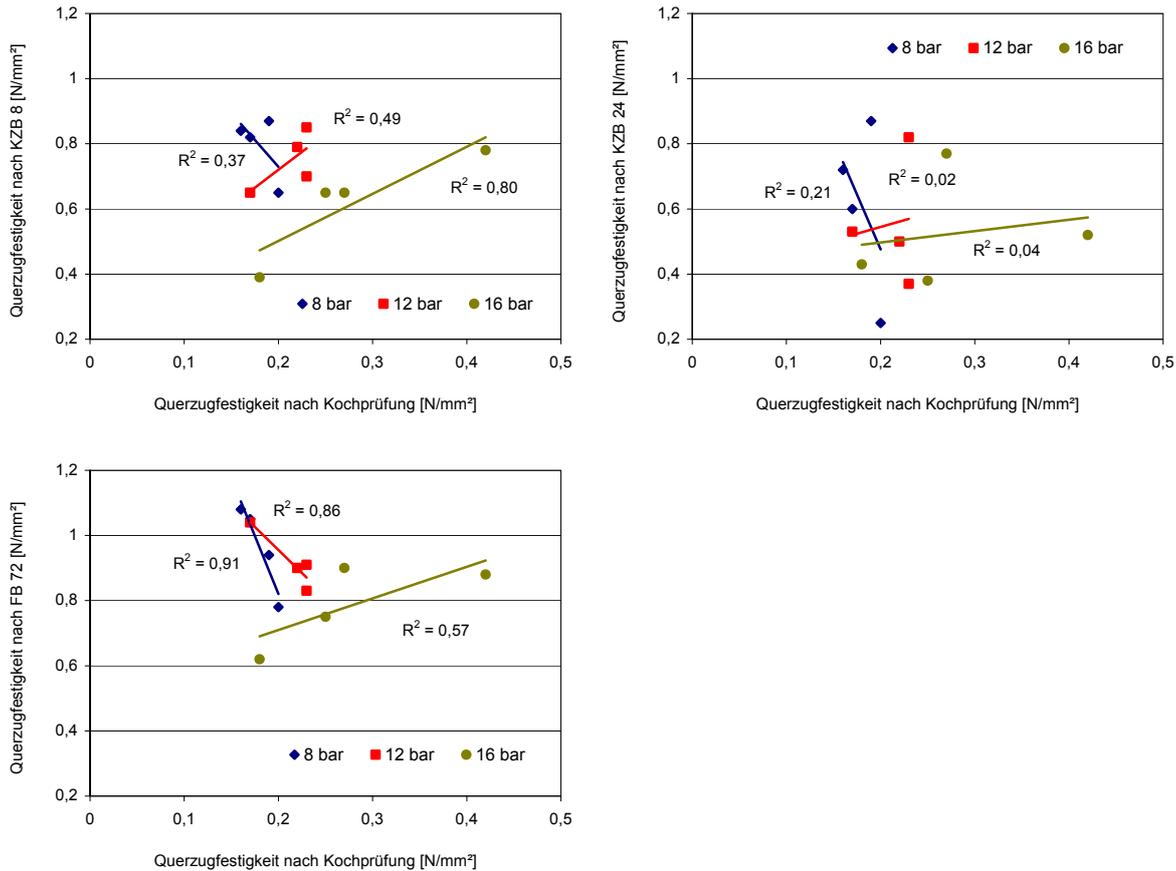


Abbildung 87 Aufschlussabhängiger Zusammenhang zwischen der Querzugfestigkeit nach 8 bzw. 24 Wochen KZB sowie 72 Wochen FB und der Querzugfestigkeit nach Kochprüfung von Labor-MDF (Aufschlusszeit einheitlich 4 min, unterschiedliche Bindemitteltypen (Anteil konstant 16 %) zusammengefasst)

Es wird deutlich, dass ausschließlich für MDF aus 16 bar-Faserstoff lineare Korrelationen zwischen der Querzugfestigkeit nach Kochprüfung und der Querzugfestigkeit nach *KZB 8* und *FB 72* bestehen. Die Bestimmtheitsmaße lagen dabei bei 0,80 bzw. 0,57. Für Platten aus 8 oder 12 bar-Faserstoff ergaben sich nur für die Querzugfestigkeit nach Kochprüfung versus der Querzugfestigkeit nach *FB 72* lineare Zusammenhänge mit akzeptablen Bestimmtheitsmaßen. Allerdings wiesen die Abhängigkeiten einen negativen Anstieg auf, sprich: abnehmenden Festigkeiten nach 2 h Kochen standen hohe Festigkeiten nach Bewitterung gegenüber.

Eine gute Korrelation (Bestimmtheitsmaß 0,81) zwischen Querzugfestigkeit nach Zyklustest und Querzugfestigkeit nach Bewitterung wiesen MDF aus 12 bar-Faserstoff nach 8 Wochen Kurzzeitbewitterung auf (Abbildung 88). Von den absoluten Werten her betrachtet stimmten die nach diesen beiden Vorbehandlungen ermittelten Werte (auf die verschiedenen Bindemittel bezogen) nahezu vollständig überein.

Die Ergebnisse bestätigen teilweise die Erfahrungen von *Gressel /1997/*, der in Ringversuchen zur Bewertung der Feuchtebeständigkeit von MDF (unter Einbeziehung des BAM-Kurzzeitbewitterungstest) nur sehr unsichere Zusammenhänge zwischen der Querzugfestigkeit nach Bewitterung und Kochprüfung gefunden hatte. Übereinstimmend dazu führten auch die Untersuchungen des Building Research Establishment (BRE) zu keinen statistisch gesicherten Abhängigkeiten zwischen der Querzugfestigkeit nach Kochprüfung oder Zyklustest und der Querzugfestigkeit nach Freibewitterung */BRE 1996/*.

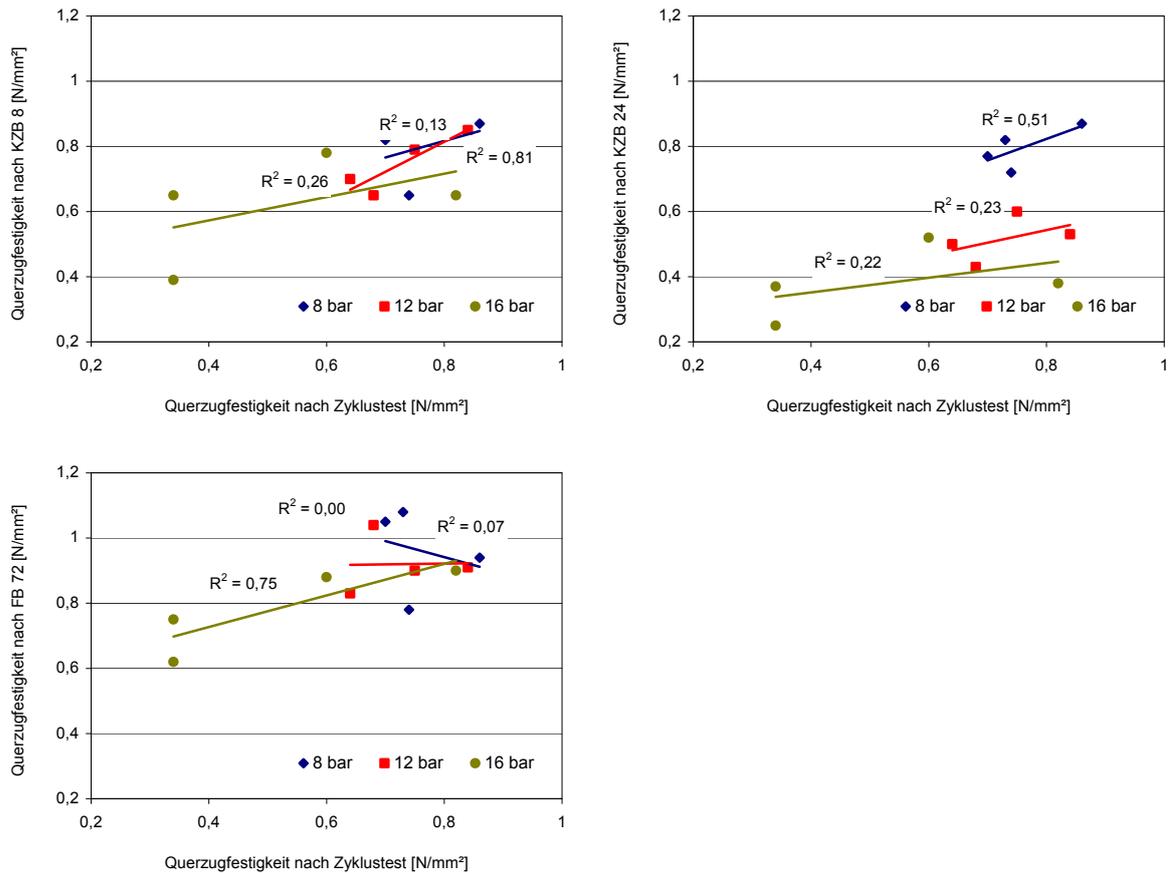


Abbildung 88 Aufschlussabhängiger Zusammenhang zwischen der Querzugfestigkeit nach 8 bzw. 24 Wochen KZB sowie 72 Wochen FB und der Querzugfestigkeit nach Zyklustest von Labor-MDF (Aufschlusszeit einheitlich 4 min, unterschiedliche Bindemitteltypen (Anteil konstant 16 %) zusammengefasst)

Mit einem Bestimmtheitsmaß von 0,75 ergab sich für die 16 bar-Variante für die Querzugfestigkeit nach Zyklustest und 72 Wochen Freibewitterung gleichfalls ein charakteristischer Zusammenhang, was zumindest teilweise die Ergebnisse zum Kochquerzug bestätigt.

Die anderen Korrelationen zeigten keine statischen Zusammenhänge.

Abbildung 89 beinhaltet die Ergebnisse zur Dickenquellung nach Zyklustest in Gegenüberstellung zur Dickenquellung nach Bewitterung in Abhängigkeit von der Aufschlussintensität bei der Faserstoffherstellung. Offensichtlich stehen ausschließlich die Quellwerte nach 72 Wochen Freibewitterung im Zusammenhang mit den Quellwerten nach Zyklustest. Bestimmtheitsmaße von 0,84 bis 0,98 bedeuten dabei für alle Aufschlussintensitäten verhältnismäßig hohe statische Sicherheit. Allerdings lassen die negativen Anstiege der linearen Korrelationen keine geeigneten Aussagen zu, da den niedrigsten Werten für die Dickenquellung nach Zyklustest (– 2,7 % für die 16 bar-Variante mit PF-Bindung) die höchsten Werte für die Dickenquellung nach FB 72 (13 % für die 16 bar-Variante mit PF-Bindung) gegenüberstehen.

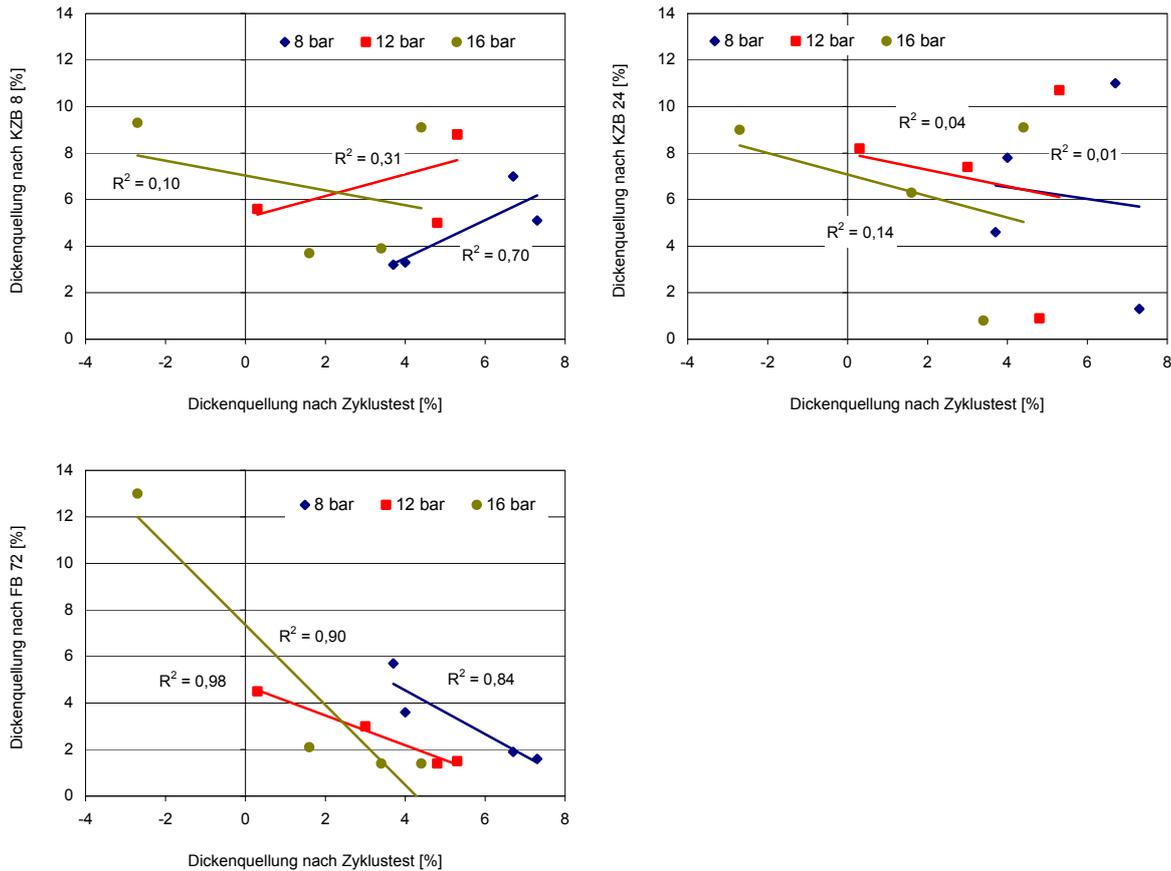


Abbildung 89 Aufschlussabhängiger Zusammenhang zwischen der Dickenquellung (24 h WL) nach 8 bzw. 24 Wochen KZB sowie 72 Wochen FB und der Dickenquellung (24 h WL) nach Zyklustest von Labor-MDF (Aufschlusszeit einheitlich 4 min, unterschiedliche Bindemitteltypen (Anteil konstant 16 %) zusammengefasst)

Gute Korrelationen mit linearem Anstieg bestehen zwischen der Dickenquellung nach Zyklustest und der Dickenquellung nach *KZB 8* für MDF-Varianten aus 8 bzw. 12 bar-Faserstoff. Allerdings lässt ausschließlich die 8 bar-Variante bei einem Bestimmtheitsmaß von 0,70 eine Prognose von Quellwerten nach Bewitterung in Kenntnis der Ergebnisse nach Zyklustest zu. Die absoluten Werte für die verschiedenen Bindemittel stimmen bei dieser Versuchsvariante überraschend gut überein, womit sich zumindest für MDF aus 8 bar-Faserstoff durch die Ermittlung der Dickenquellung nach Zyklustest die Dickenquellung nach *KZB 8* vorhersagen lässt.

Die Gegenüberstellung der Dickenquellung nach 24 h Wasserlagerung zu den Ergebnissen nach Bewitterung bestätigen vorstehende Aussagen zum Zyklustest. Lineare Abhängigkeiten wurden nur zwischen den Quellwerten nach 24 h Wasserlagerung und der Dickenquellung nach *FB 72* festgestellt.

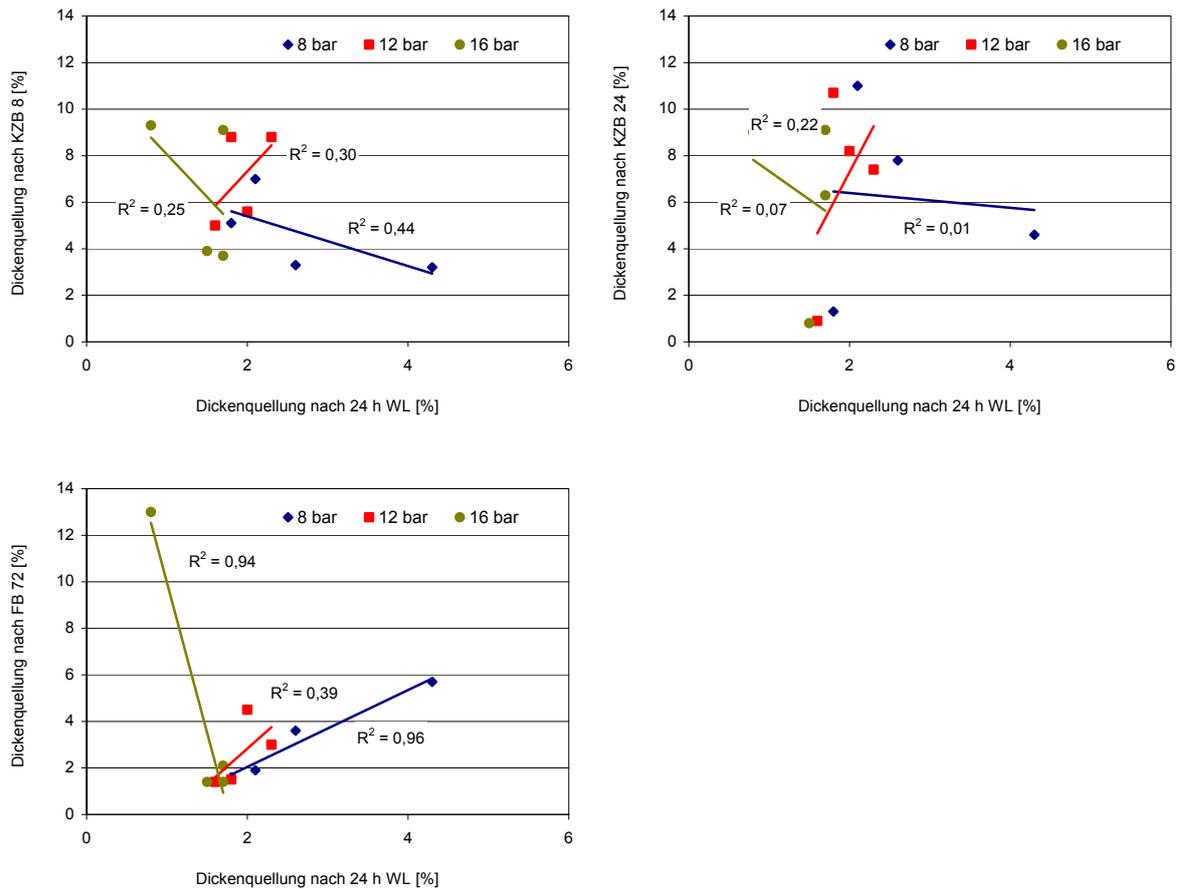


Abbildung 90 Aufschlussabhängiger Zusammenhang zwischen der Dickenquellung (24 h WL) nach 8 bzw. 24 Wochen KZB sowie 72 Wochen FB und der Dickenquellung (24 h WL) von Labor-MDF (Aufschlusszeit einheitlich 4 min, unterschiedliche Bindemitteltypen (Anteil konstant 16 %) zusammengefasst)

Ein statistischer Zusammenhang besteht ausschließlich für Faserplatten aus bei 8 bar aufgeschlossenem Faserstoff. Bei MDF aus 12 bar-Faserstoff ist das Bestimmtheitsmaß mit 0,39 zu gering und für Platten aus 16 bar-Faserstoff verhindert ein negativer Anstieg trotz des hohen Bestimmtheitsmaßes (0,94) die Prognosemöglichkeit von Quellwerten nach Bewitterung durch Kenntnis der Dickenquellungswerte nach 24 h Wasserlagerung.

Im Unterschied zu den *bindemittelabhängigen* Zusammenhängen, nach denen sich sowohl die Dickenquellung nach Zyklustest als auch die Dickenquellung nach 24 h Wasserlagerung prinzipiell zur Vorhersage einer Feuchte- und Witterungsbeständigkeit eignen, ermöglichen bei *aufschlussabhängiger* Betrachtung einzig die Zusammenhänge zwischen den Quellwerten nach Zyklustest gegenüber 8 Wochen Kurzzeitbewitterung bzw. zwischen der Dickenquellung nach 24 h Wasserlagerung und der *FB 72* Aussagen zur dauerhaften Quellungsverbesserung.

5.3.4.5 Korrelation zwischen Freibewitterung und Kurzzeitbewitterung

Mit den folgenden Korrelationsbetrachtungen sollte festgestellt werden, inwiefern die Ergebnisse nach einer natürlichen Alterung im Freien mit den Resultaten der technischen Alterung im Xenotest-Gerät tendenziell übereinstimmen. Folgende Korrelationsberechnungen wurden realisiert:

- Querkzugfestigkeit nach 8 bzw. 24 Wochen Kurzzeitbewitterung zu Querkzugfestigkeit nach 72 Wochen Freibewitterung,
- Dickenquellung (24 h WL) nach 8 bzw. 24 Wochen Kurzzeitbewitterung zu Dickenquellung nach 72 Wochen Freibewitterung.

Die Auswertung erfolgte analog zum vorherigen Gliederungspunkt zunächst *bindemittelabhängig*. Dabei wurde festgestellt, dass die Querkzugfestigkeit nach Freibewitterung grundsätzlich gut mit der Querkzugfestigkeit nach Kurzzeitbewitterung korreliert. Die höchsten Bestimmtheitsmaße wiesen die PMDI-Varianten mit 0,98 (*KZB 8* versus *FB 72*) sowie 1,00 (*KZB 24* versus *FB 72*) auf, was als Bestätigung der bisherigen Aussagen zu werten ist. Selbst das mit 0,56 „schlechteste“ Bestimmtheitsmaß lässt zumindest einen statischen Zusammenhang zwischen den Ergebnissen für die Querkzugfestigkeit nach technischer und natürlicher Alterung erwarten (Abbildung 91).

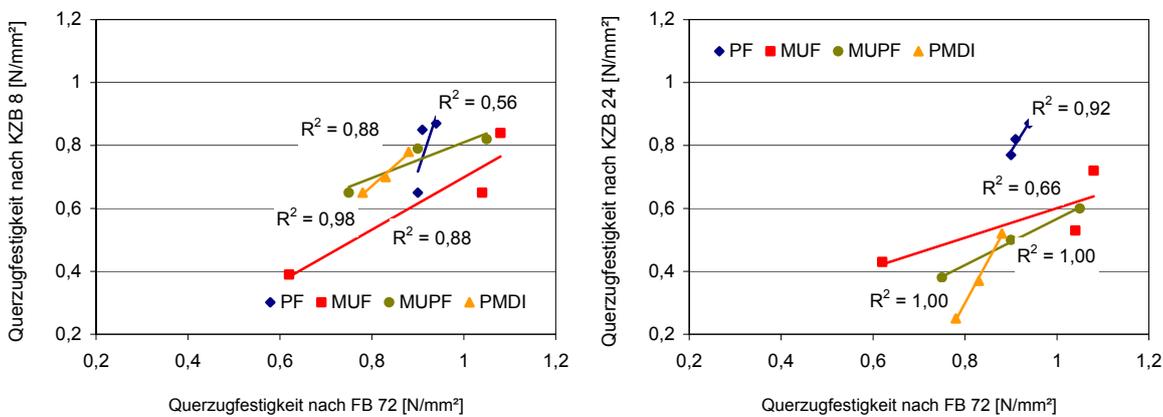


Abbildung 91 Bindemittelabhängiger Zusammenhang zwischen der Querkzugfestigkeit nach 8 bzw. 24 Wochen KZB und der Querkzugfestigkeit nach 72 Wochen FB von Labor-MDF (Bindemittel-Anteil konstant 16 %, unterschiedliche Aufschlussintensitäten (8, 12, 16 bar) zusammengefasst)

Bezüglich der Dickenquellung muss zwischen den Ergebnissen nach 8 und 24 Wochen Kurzzeitbewitterung unterschieden werden (Abbildung 92).

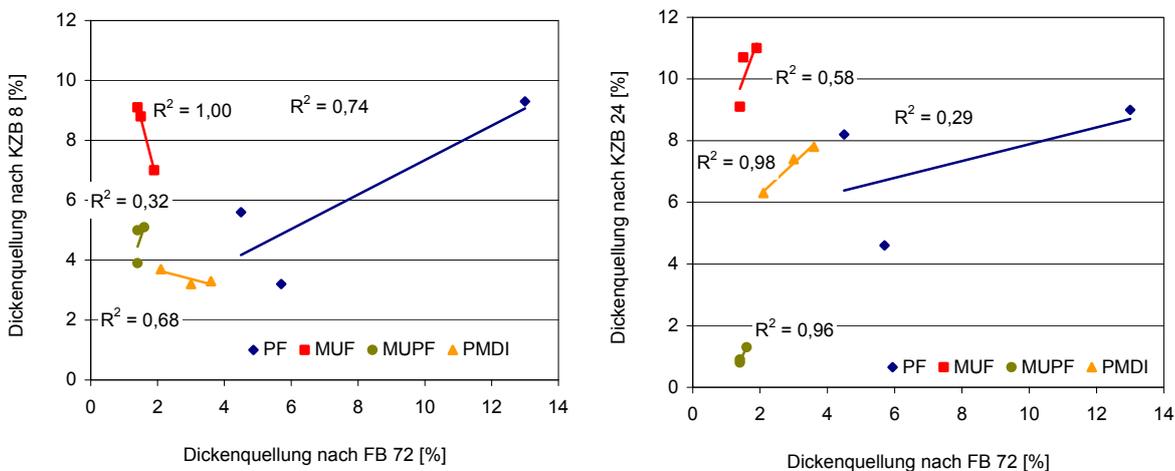


Abbildung 92 Bindemittelabhängiger Zusammenhang zwischen der Dickenquellung (24 h WL) nach 8 bzw. 24 Wochen KZB und der Dickenquellung (24 h WL) nach 72 Wochen FB von Labor-MDF (Bindemittel-Anteil konstant 16 %, unterschiedliche Aufschlussintensitäten (8, 12, 16 bar) zusammengefasst)

Nach *KZB 8* korreliert einzig die Dickenquellung der PF-Harz-gebundenen MDF mit der Dickenquellung nach 72 Wochen Freibewitterung. Für die MUF- und PMDI- Varianten ergeben sich hohe Bestimmtheitsmaße, die negativen Anstiege schließen aber Vorhersagen aus.

Ein komplett anderes Bild ergibt sich nach 24 Wochen Kurzzeitbewitterung. Nunmehr korrelieren sowohl die PMDI- als auch die MUPF-Harz-gebundenen MDF straff und erlauben Rückschlüsse zwischen den Quellwerten nach Frei- und Kurzzeitbewitterung. Gleiches gilt (wenn auch deutlich weniger zwingend) für die MUF-Varianten mit einem Bestimmtheitsmaß von 0,58, während das für die PF-Harz-Varianten ermittelte Bestimmtheitsmaß mit 0,29 keine gesicherten Aussagen zulässt. Das ist insofern bemerkenswert, als das gerade diese Versuchsvariante nach Kurzzeitbewitterung die besten Korrelationen aufwies.

Eine gute Übereinstimmung zwischen Dickenquellungsergebnissen von PF-Harz-gebundenen MDF nach technischer Kurzzeitalterung und nach Freibewitterung stellte auch *River /1994/* fest. Nach *Deppe und Schmidt* konnten für die Dickenquellung und die Wasseraufnahme gleichsinnige Verläufe nach 12 Wochen Kurzzeitbewitterung und 3 Jahren Freibewitterung ermittelt und daraus straffe Abhängigkeiten abgeleitet werden */Deppe, Schmidt 1982; 1983/*.

Bestätigend zu den bisherigen Erkenntnissen ergeben sich bei *aufschlussabhängiger* Betrachtung i. d. R. keine sicheren statischen Zusammenhänge. Bezüglich der Querkzugfestigkeit nach Freibewitterung versus Kurzzeitbewitterung wiesen die 16 bar-MDF-Varianten gute Korrelationen auf. Bestimmtheitsmaße von 0,76 nach *KZB 8* sowie 0,51 nach *KZB 24* lassen zumindest tendenziell Abhängigkeiten zwischen der Querkzugfestigkeit nach technischer und natürlicher Alterung erwarten (Abbildung 93).

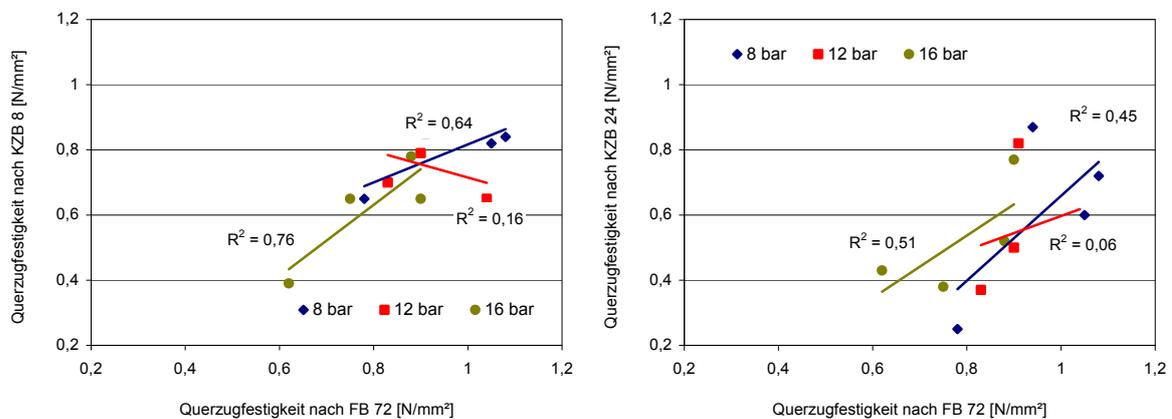


Abbildung 93 Aufschlussabhängiger Zusammenhang zwischen der Querkzugfestigkeit nach 8 bzw. 24 Wochen KZB und der Querkzugfestigkeit nach 72 Wochen FB von Labor-MDF (Aufschlusszeit einheitlich 4 min, unterschiedliche Bindemitteltypen (Anteil konstant 16 %) zusammengefasst)

Die Aussagen bestätigen die Ergebnisse der *aufschlussabhängigen* Zusammenhänge zwischen der Querkzugfestigkeit nach Bewitterung bzw. nach 2 h Kochen. Auch dort ergaben sich ausschließlich für Platten aus 16 bar-Faserstoff reale Korrelationen.

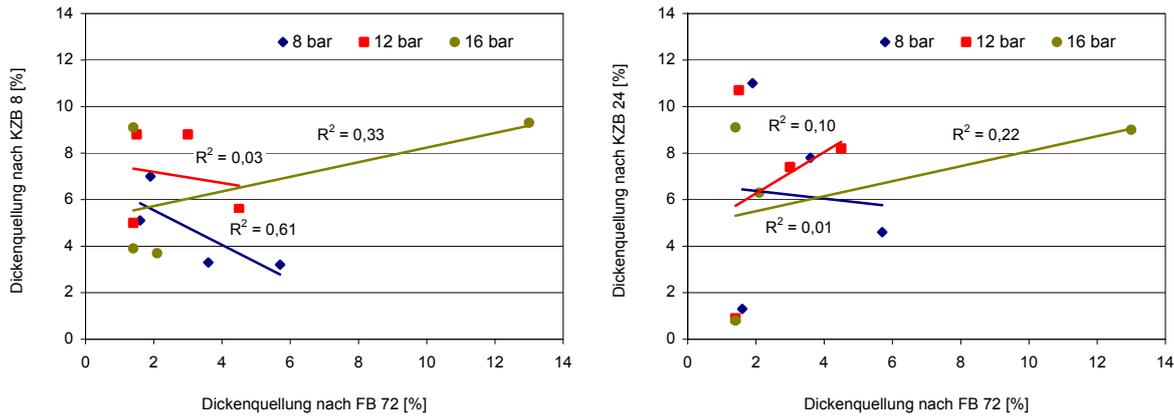


Abbildung 94 Aufschlussabhängiger Zusammenhang zwischen der Dickenquellung (24 h WL) nach 8 bzw. 24 Wochen KZB und der Dickenquellung (24 h WL) nach 72 Wochen FB von Labor-MDF (Aufschlusszeit einheitlich 4 min, unterschiedliche Bindemitteltypen (Anteil konstant 16 %) zusammengefasst)

Bezüglich der Dickenquellung besteht einzig bei der MDF aus 8 bar-Faserstoff zwischen *KZB 8* versus *FB 72* ein statistischer Zusammenhang. Allerdings verhindert der negative Anstieg trotz Bestimmtheitsmaß von 0,61 eine Diskussion von Zusammenhängen zwischen Kurzzeit- und Freibewitterung. So steht bei dieser Versuchsreihe dem niedrigsten Quellungswert nach *FB 72* (1,9 %) der höchste Wert nach *KZB 8* (7 %) gegenüber und gleichzeitig gehört zum niedrigsten Wert nach 8 Wochen Kurzzeitbewitterung (3,2 %) der höchste Wert nach 72 Wochen Freibewitterung.

Zusammenfassend wird eingeschätzt, dass insbesondere die *bindemittelabhängigen* Untersuchungen bezüglich der Querzugfestigkeit gute Korrelationen zwischen einer technischen Bewitterung im Xenotest-Gerät und einer natürlichen Alterung im Freien ergeben. Besonders straff sind die Abhängigkeiten für MDF aus bei 16 bar abgeschlossenem Extremfaserstoff.

Für die Dickenquellung gilt, dass ausschließlich bei *bindemittelabhängiger* Betrachtung Zusammenhänge bestehen. Dabei ergaben sich für PF-gebundene Faserplatten gute Abhängigkeiten für die Dickenquellung nach *KZB 8* und nach *FB 72*, währenddessen für PMDI-, MUPF- und auch MUF-gebundene MDF statistische Zusammenhänge zwischen 24 Wochen Kurzzeitbewitterung und 72 Wochen Freibewitterung nachgewiesen wurden.

6 Diskussion

Die Untersuchungen erfolgten mit 6 Kiefernholzfaserstoff-Varianten, die labortechnisch bei Drücken von 8, 12 und 16 bar über 4 bzw. 8 min thermo-mechanisch aufgeschlossen wurden. Vergleichend kam ein Industriefasernstoff zur Anwendung, der gleichfalls bei 8 bar über 4 min hergestellt wurde. Nach einer umfassenden Fasernstoffcharakterisierung wurden aus diesen Fasernstoffen sowohl leimfreie Faserplatten als auch MDF mit UF-, MUF-, PF-, MUPF-Harz- sowie PMDI-Bindung hergestellt. An den Platten durchgeführte Untersuchungen dienten der Bestimmung chemischer und physikalischer Eigenschaften, einer Abschätzung der Feuchtebeständigkeit der Verklebung und der Witterungsbeständigkeit. Vergleichend in die Bewertung einbezogen wurden Industriefasernstoff mit vom Hersteller ausgewiesener Eignung zur Verwendung im Feucht- und Außenbereich.

Als Fazit der Untersuchungen zur morphologischen Charakterisierung der Fasernstoffe bleibt festzuhalten, dass insbesondere die Siebanalysen mittels Luftstrahlsieb eine deutliche Differenzierbarkeit der bei längerer Kochzeit aufgeschlossenen Fasernstoffe in Abhängigkeit vom Aufschlussdruck zeigten. Neben den Kenngrößen der Korngrößenverteilung bestätigen auch die Siebkennlinien, dass höhere Drücke zu einer feineren Fasernstoff-Struktur und zu kürzeren Faserlängen führen. Der vergleichend geprüfte Industriefasernstoff lag bezüglich seiner Korngrößenparameter im Bereich der 8 bar-Laborfasernstoffvarianten, was als ein wesentliches Indiz für industrieadäquaten Einstellungen beim labortechnischen Aufschluss zu werten ist.

Als in Bezug auf die Summenhäufigkeitsverteilung von Faserlänge und Faserbreite (Faserdicke) gleichfalls geeignet erwiesen sich Fasernstoffanalysen mit dem optischen Partikelanalyse-System QualScan. Dabei wurden speziell für die Faserlänge deutliche Unterschiede zwischen den Fasernstoffen festgestellt, während die Ergebnisse zur Verteilung der Faserbreite relativ eng beieinander lagen. Der Schlankheitsgrad als Maß für das Verhältnis von mittlerer Partikellänge zu mittlerer Partikelbreite folgte diesem Trend, was damit begründet wird, dass die Faserlänge überproportional von der Aufschlussintensität beeinflusst wird. Den kleinsten Schlankheitsgrad und die größte Feinheit (analog zur Trockensiebanalyse) wies der bei 16 bar über 8 min am intensivsten aufgeschlossene Fasernstoff auf. Bestätigend zur Luftstrahlsiebanalyse entsprach der Industriefasernstoff auch hier den 8 bar-Laborvarianten. Mit einem Aufschluss unter industrieeüblichen Drücken von 8 bar und einer Erhöhung der Verweilzeit auf 8 min wurde die größte mittlere Faserlänge erzeugt. Möglicherweise ist dieser Effekt auf die durch die längere Dämpfzeit intensivere Hackschnitzelerweichung und die damit sehr homogene Zerfaserung zurückzuführen. Dieser Umstand bedingt sicherlich auch den bei dieser Versuchsvariante höchsten gemessenen Schlankheitsgrad.

Vor dem Hintergrund einer Übertragung der Versuchsergebnisse vom Labor- in den Industriemaßstab ist den Ergebnissen zur Schüttdichte und damit dem in Abhängigkeit von der Aufschlussintensität veränderten Streu- und Verdichtungsverhalten der Faservliese eine wesentliche Bedeutung beizumessen. Die intensiver aufgeschlossenen Fasernstoffe wiesen nach der Faservliesbildung und Vorverdichtung aufgrund gravierend höherer Schüttdichten deutlich reduzierte Stauhöhen auf, was neben nachteiligen Effekten (u. a. schlechtere Entgasung) durchaus auch positive Auswirkungen auf die folgenden Prozessstufen haben dürfte (u. a. geringere Energieaufwendungen für Vor- und Heißpressen, reduzierte maximale Pressdrücke). Im Falle einer industriellen Umsetzung könnten sich auf Grundlage dieser Ergebnisse erhebliche wirtschaftliche Effekte, z. B.

durch den Einsatz „leichterer“ Vorpress- und Heißpressanlagen mit geringeren notwendigen spezifischen Pressdrücken, ergeben.

Die lichtmikroskopischen Untersuchungen bestätigten, dass höhere Aufschlussdrücke und auch längere Dämpfzeiten zu einer feineren Faserstoff-Struktur mit kürzeren Faserlängen führten. Zudem bedingt eine zunehmende Aufschlussintensität dunkelbraune Fasern, was vornehmlich auf das bei hohen Aufschlussstemperaturen in den Holzfasern verbleibende Lignin bei gleichzeitig herausgelösten Hemicellulosen zurückzuführen ist /Groom et al. 2004/. In seiner Arbeit begründet Schiegl /2004/ die Verfärbung der Fasern damit, dass Ligninpolymere als Folge der thermohydrolytischen Beanspruchung oxidativ gespalten bzw. chromophore Gruppen durch Oxidation zerstört werden und die entstehenden Ligninfragmente durch ihre photochemischen Eigenschaften rascher dunkeln.

Im Unterschied zu den vorstehend diskutierten Ergebnissen lassen die Rasterelektronenmikroskop (REM)-Aufnahmen nur eingeschränkte Aussagen zur Fasermorphologie zu. Als wesentliches Ergebnis wies der bei 16 bar über 8 min extrem hergestellte Faserstoff eine erhöhte Anzahl nicht vollständig aufgeschlossener sehr kurzer Faserbündel (Splitter) sowie „bucklige“ Faseroberflächen und eine größere Rauigkeit auf. Die Splitter sind ggf. darauf zurückzuführen, dass die Faserbündel durch die hohe Beanspruchung im Kocher bereits vor der Zerkleinerung im Refiner verkürzt werden, wohingegen sie bei weniger intensiven Aufschlussbedingungen im Verbund verbleiben. An diesen Fasern war zudem der flächenbezogene Anteil der Faseroberflächendeformation größer und bis zur Freilegung der Mikrofibrillen erkennbar. Diese Aussagen stehen in Übereinstimmung mit den Ergebnissen von /Groom et al. 2000/, wonach ein zunehmender Aufschlussdruck zu einer größeren Faseroberflächenrauheit führt. Auffällig war zudem, dass ein industrieüblicher Aufschluss bei 8 bar mit einer weniger intensiven hydrothermischen Belastung des Holzes zu einem größerem Anteil langer Einzelfasern und sehr wenigen Splintern führte. Dahingegen wies der industriell bei vergleichbaren Einstellungen aufgeschlossene Faserstoff relativ hohe Splitteranteile auf, was mit großen Feinanteilen im Hackschnitzelausgangsmaterial im Zusammenhang stehen kann.

Bezüglich der chemischen Faserstoffeigenschaften ist festzustellen, dass eine Intensivierung der Aufschlussbedingungen sinkende pH-Werte für die kaltwässrigen Extrakte aus den thermo-mechanisch aufgeschlossenen Faserstoffen ergab. Andererseits nahmen bei Verschärfung der Aufschlussbedingungen sowohl der Gehalt an wasserlöslichen Stoffen bei Heißwasserextraktion als auch der Extraktstoffgehalt in Ethanol-Cyclohexan sowie die Pufferkapazität mit Natronlauge bis zum Erreichen des Neutralpunktes signifikant zu. Die Erhöhung der wasserlöslichen Anteile ist dabei u. a. auf das „Löslichwerden“ der Hemicellulose zurückzuführen, das insbesondere bei Temperaturen > 180 °C und - unter dem Einfluss thermisch abgespaltener Anteile an Ameisen- und Essigsäure - durch den Abbau von langen Polysaccharidketten begünstigt wird. Mit diesen Untersuchungen konnten aus der Literatur bekannte Ergebnisse /u. a. Jensen, Kehr 1971; Hsu et al. 1988 und Groom et al. 2000/ bestätigt und um Werte bisher nicht untersuchter Aufschlussbedingungen vervollständigt werden.

Zu Formaldehydgehalt und Formaldehydabgabe ergaben sich für die Extremvariante (Aufschluss bei 16 bar und 8 min Dämpfzeit) die höchsten Werte. Die festgestellten Formaldehydeigenschaften stimmen mit bisherigen Untersuchungen /u. a. Schneider 1999/ überein und ergänzen den Stand des Wissens. Die von Hasch und Grunwald ermittelten Perforatorwerte an industriell erzeugten Faserstoffen bestätigen die Ergebnisse des Industriefaserstoffs /Hasch, Grunwald 2006/.

Um den Einfluss steigender Aufschlussbedingungen auf die Hemicellulosegehalte näher zu untersuchen, erfolgte exemplarisch die Bestimmung der Pentosangehalte. Dabei zog sowohl eine Erhöhung des Aufschlussdrucks als auch die Verlängerung der Dämpfzeit abnehmende Pentosangehalte nach sich, was die Ergebnisse der Arbeiten von *Schneider /1999/* bestätigte. Übereinstimmend dazu stellten *Groom et al. /2000/* fest, dass eine Intensivierung des Aufschlussdruckes auf bis zu 12 bar eine signifikante Abnahme des Hemicellulosegehalts ergab.

Die Untersuchungen an nass gebildeten Prüfblättern zeigten erwartungsgemäß für die am intensivsten bei 16 bar aufgeschlossenen Faserstoffe die höchsten Mahlgrade SR. Dieser Effekt ist nach den Ergebnissen der morphologischen Fasercharakterisierung mit dem vergleichsweise hohen Feinst- und Feinanteil der Extremvarianten aufgrund der höheren thermomechanischen Belastung während der Zerkleinerung zu erklären. Übereinstimmend mit den Aussagen der REM-Aufnahmen zeigten die 16 bar-Faserstoffe zudem eine relativ spröde, wenig homogene Oberflächenbeschaffenheit. Die mit der Erhöhung des Aufschlussdruckes einhergehende Abnahme des Hemicellulosegehalts bei gleichzeitiger Zunahme des Extraktstoffgehaltes lässt zudem ein hydrophoberes Verhalten der Faserstoffe und daraus resultierend eine Quellungsbehinderung (unmittelbar nach Suspendierung) erwarten.

Die Ergebnisse zum Mahlgrad wurden durch die Resultate zur Reißlänge, Falzfestigkeit und Berstfestigkeit an den nass gebildeten, vor der Prüfung jeweils getrockneten Prüfblättern bestätigt, wobei sich der Industriefaserstoff jeweils im Bereich der im Labor hergestellten 8 bar-Faserstoffe einordnete. In Analogie zu den lichtmikroskopischen Untersuchungen ergab sich aus einer Intensivierung der Aufschlussbedingungen u. a. durch thermohydrolytische Veränderungen der Holzbestandteile (signifikante Abnahme des Hemicelluloseanteils, photochemische Lignineigenschaften) eine Abnahme des Weißgrades der Prüfblätter.

Die Prüfblätter wiesen zudem in Abhängigkeit von den Aufschlussbedingungen deutliche Unterschiede in ihrem Benetzungsverhalten auf. Längere Benetzungszeiten kennzeichnen dabei einen besser hydrophobierten Faserstoff. Erwartungsgemäß ließen sich die Prüfblätter, die bei 16 bar aufgeschlossene Faserstoffe enthielten, am schwersten benetzen. Als Ursache für die signifikant längere Benetzungsdauer der 16 bar-Faserstoffe wird die mit der Erhöhung des Aufschlussdruckes einhergehende Abnahme des Hemicellulosegehalts bei gleichzeitiger Zunahme des Extraktstoffgehaltes und die daraus resultierend reduzierte Wasseraufnahmefähigkeit angesehen. Bei Prüfblättern aus 8 und 16 bar-Faserstoffen ergaben größere Verweilzeiten im Kocher gleichfalls längere Benetzungszeiten, bei 12 bar-Faserstoff wurde diese Tendenz nicht festgestellt.

Grundsätzlich führten erhöhte Aufschlussdrücke zu verlängerten Benetzungszeiten und damit zu besser hydrophobierten Prüfblättern. Der bisherige Stand des Wissens /u. a. *Schneider 1999, Roffael et al. 2002/* konnte bestätigt und um bisher nicht untersuchte Aufschlussbedingungen erweitert werden.

Die vorstehenden Aussagen belegen die 1. Arbeitshypothese, nach der „die thermomechanische Aufschlussintensivierung bei der Faserstoffherstellung wesentliche morphologische und chemische Faserstoffeigenschaften beeinflusst“.

Quintessenz der Ausführungen zum Energiebedarf bei der Faserstoffherstellung ist, dass die höheren Energieaufwendungen zur Erzeugung hoher Drücke sowie zur Verlängerung der Dämpfzeit aufgrund des durch den zunehmenden Plastifizierungsgrad der Hackschnitzel deutlich gesenkten thermischen Energieaufwands zur Zerkleinerung

mehr als kompensiert werden, was nach der 2. Arbeitshypothese vermutet, nicht aber in dem festgestellten Maße erwartet wurde.

So verringerte sich die Zerfaserungsenergiemenge beim Faserstoffaufschluss mit maximalem Aufschlussdruck von 16 bar und 8 min Dämpfzeit auf etwa ein Drittel gegenüber der industrieüblichen Zerfaserungsvariante mit 8 bar und 4 min. Im Unterschied zu den 70 Jahre alten Erfahrungen von *Asplund /1939/* (Kernaussage: „Kraftbedarf für Nadelholzerfaserung sinkt insbesondere bei Aufschlussstemperaturen von 160 °C“) wurde festgestellt, dass das größte Energieeinsparpotential im Temperaturbereich von 180 bis 200 °C liegt (die *Asplund*-Untersuchungen endeten seinerzeit bei ~185 °C). Es ist jedoch ebenfalls festzustellen, dass die bei Aufschlussdrucksteigerung deutlich höheren Energieaufwendungen zur Dampferzeugung nur bedingt über die Reduzierung der Zerfaserungsenergie ausgeglichen werden können.

Erwartungsgemäß und übereinstimmend zur 3. Arbeitshypothese („Die erzielbare Faserstoffausbeute sinkt mit zunehmender Aufschlussverschärfung maßgeblich.“) resultierten aus intensivierten Aufschlussbedingungen reduzierte Faserstoffausbeuten. Dabei ergab sich durch die Verlängerung der Kochzeit von 4 auf 8 min bei den 8 bar-Laborvarianten ein um 0,3 % geringfügig höherer Verlust. Mit 2,8 bzw. 3,1 % wurden dabei Ausbeuteeinbußen bestimmt, die relativ gut mit industriellen Erfahrungen bei ähnlichen Aufschlusseinstellungen übereinstimmen */Kleiner 2008, Wolf 2008/*.

Überraschenderweise lag der Verlust bei den 16 bar-Faserstoffen mit 10,1 bzw. 13,0 % für den Aufschluss im niedrigen 2stelligen Prozentbereich. Hier waren nach den bislang vorliegenden Erkenntnissen von *Asplund* deutlich höhere Verluste erwartet worden. Dessen Versuche bei der Zerfaserung von Kiefernholzhackschnitzeln ergaben bei 10 bar Dampfdruck und einer Erhitzungszeit von 4 min Gewichtsverluste von etwa 8 % */Asplund 1949/*. Bei gleichem Dampfdruck und einer Erhitzungszeit von 8 min lag der Verlust dann bereits bei 13 %. Die weitere Erhöhung des Dampfdrucks auf 24 bar führte dann bei 4 min Erhitzungszeit zu Materialverlusten von über 20 %.

Ein Faserstoffmasseverlust im Bereich von 6 %, die bereits angeführte Elektroenergieeinsparung bei der Zerfaserung sowie die mit der Verwendung derart „quellungsvergüteter“ Faserstoffe realistische Bindemittel- und Hydrophobierungsmittel-Ersparnis ermöglichen eine wirtschaftliche Herstellung von Faserplatten aus unter 12 bar aufgeschlossenen Faserstoffen.

Die Untersuchungen an Industrie-MDF zeigten, dass unerwarteterweise ausschließlich die PMDI-gebundene MDF des Herstellers C den normativen Anforderungen an MDF zur Verwendung im Feucht- oder Außenbereich genügte. Diese Platte wies grundsätzlich sowohl die höchsten Querkzugfestigkeitswerte als auch die niedrigsten Dickenquellungswerte und – aufgrund der PMDI-Bindung – den geringsten Formaldehydgehalt auf. Dahingegen verfehlten die beiden von den Herstellern ausdrücklich als V 313-MDF-Typ deklarierten PF- bzw. MUF-Harz-gebundenen Varianten die Anforderungen an Querkzugfestigkeit und Dickenquellung nach Zyklustest.

Zur Witterungsbeständigkeit wird eingeschätzt, dass sich sowohl eine technische Bewitterung nach dem BAM-Kurzzeitbewitterungstest als auch eine natürliche Freibewitterung zur Herausarbeitung materialspezifischer Besonderheiten eignen. Gute Plattenqualitäten bezüglich der im Ausgangszustand ermittelten physikalisch-mechanischen Werkstoffeigenschaften versprechen dabei größtenteils auch bessere Witterungsbeständigkeiten. Insbesondere erlauben dabei Quellungsergebnisse nach Zyklustest oder

das Maß der Querkzugfestigkeit nach Kochprüfung bzw. Zyklustest Rückschlüsse auf die spätere Witterungsbeständigkeit, währenddessen die Biegefestigkeit nicht zur Beurteilung einer möglichen Witterungsbeständigkeit geeignet war. Die besten Materialeigenschaften im Ausgangszustand und nach Bewitterung der prinzipiell unbeschichteten Industrie-MDF wiesen erwartungsgemäß die Platten mit PMDI-Bindung auf.

Fazit der Untersuchungen zur Fertigung von Platten ohne Klebstoffzusatz war, dass gerade mit der Herstellung bindemittelfreier Faserplatten das enorme Potential einer möglichen Quellungsvergütung durch eine Aufschlussintensivierung bei der Faserstoffherstellung deutlich herausgearbeitet werden konnte. So reduzierte sich für MDF aus 16 bar-Faserstoff die Dickenquellung nach 24 h Wasserlagerung auf Werte unter 10 %. Im Gegensatz dazu wiesen Platten aus industriell üblich bei 8 bar aufgeschlossenen Fasern Quellwerte im Bereich von ~ 50 % auf. Ein Aufschluss bei 12 bar ergab Dickenquellungen im Bereich von 15 % /Krug 2001/. Bestätigend dazu reduzierten sich unabhängig von der Presszeit die Quellwerte von hochdichten Faserplatten aus verschärft bei 12 bzw. 16 bar aufgeschlossenem Faserstoff auf ein Viertel bis ein Fünftel gegenüber HDF aus industriell üblich bei 8 bar aufgeschlossenem Faserstoff /Krug 2005/.

Im Hinblick auf das Erreichen definierter Plattenqualitäten und einer wirtschaftlichen MDF-Herstellung wird auch in Zukunft sicherlich nicht auf Bindemittel verzichtet werden können. In Kombination mit einer Aufschlussintensivierung sollte es aber möglich sein, mit reduziertem Bindemittelleinsatz bzw. durch Verwendung geeigneter Additive Faserplatten mit hoher Wirtschaftlichkeit herzustellen. Vor dem Hintergrund der angesprochenen Formaldehydproblematik ergeben sich durch eine Bindemittelreduktion sicher auch ökologisch interessante Aspekte.

Als Vorzugsvariante ist ein Aufschluss bei 12 bar anzusehen, der eine quasi „ausgeglichene“ Energiebilanz aufweist. Der höhere Energie-Bedarf für die Dampferzeugung wird durch die Elektroenergieersparnis bei der Zerkleinerung (etwa 2/3 gegenüber Aufschluss bei 8 bar und 4 min) nahezu ausgeglichen und der bei Aufschlussdrücken von 12 bar (entspricht Temperaturen von 187 °C) durch das Herauslösen von Holzbestandteilen festgestellte Faserstoffmasseverlust fällt mit ~ 6 % verhältnismäßig moderat aus.

Zu den labortechnisch hergestellten Faserplatten mit UF-Harz-Bindung ist festzuhalten, dass der Einfluss intensivierter Aufschlussbedingungen auch bei der Herstellung von MDF mit UF-Harz-Bindemittelzusatz deutlich wurde.

Erwartungsgemäß und in Übereinstimmung mit den Aussagen zu leimfreien Platten ergaben sich hier mit zunehmender Aufschlussverschärfung ungünstigere Biegeeigenschaften. Für die Querkzugfestigkeit wurden geringere Werte ermittelt, was im Widerspruch zu den bisherigen Ergebnissen an bindemittelfreien Platten steht. Als Ursache dafür wird die – im Vergleich zu den leimfreien Faserplatten – deutlich verkürzte Presszeit angesehen, die offensichtlich nicht ausreicht, um die infolge eines verschärften Faserstoffaufschlusses erhöhten Anteile aktivierbarer Holzbestandteile tatsächlich zur Bindung zu bringen. Alle Varianten wiesen sehr niedrige Quellwerte nach Wasserlagerung auf, was die Aussagen zu den leimfreien Platten bestätigt.

Der Formaldehydgehalt lag unbeeinflusst von der Aufschlussintensität auf einem sicheren E1-Niveau. Das Phänomen abnehmender Formaldehydhalte trotz zunehmender UF-Festharzanteile der Kondensationsharze wird auf eine verstärkte intermolekulare Wechselwirkung zwischen den höheren Harnstoff- und Formaldehydanteilen unter Abspaltung von Spaltprodukten, z. B. Wasser, bei der Kondensation zurückgeführt. Dem-

entsprechend vernetzen die Klebstoffe intensiver, das Auftreten freier Methylolgruppen wird gemindert und das Formaldehyd wird beständiger im Netzwerk eingebaut /Hoferichter 1996; Hoferichter, Kehr 1996/. Da bei der Formaldehydprüfung nach EN 120 (Perforator) über die Extraktion mit Toluol größtenteils nur freies Formaldehyd bestimmbar ist, nimmt der Formaldehydgehalt folgerichtig bei zunehmendem Festharzanteil ab. Im Unterschied zur Extraktion mit Toluol wäre bei einem Totalaufschluss z. B. mit konzentrierter Schwefelsäure (Hydrolyse/Destillation als Gegenreaktion zur Kondensation) auch das gebundene Formaldehyd nachweisbar.

Erfahrungen aus der industriellen Span- und Faserplatten- bzw. Spanformteilherstellung bestätigen diesen Effekt /u. a. Dietz 2003; Hof 2004; Kantner 2002; Prantz 2007; Steindl 2010; Wolf 2004; Wolf 2010; Zeissig 2009/. Zudem zeigten Untersuchungen zur Herstellung von MDF unter Anwendung einer in den Vorpressprozess integrierten Hochfrequenzvorerwärmung, dass bei Anwendung von vier unterschiedlichen, industrieüblichen UF-Harzen der Formaldehydgehalt mit zunehmenden Festharzanteil (Stufung 5, 7 und 11 %) signifikant sank /Krug, Mäbert 2010/.

Quintessenz der Untersuchungen an Labor-MDF mit MUF-, PF-, MUPF- Harz- sowie PMDI-Bindung ist, dass durch die Herstellung von „vergüteten“ Faserstoffen mit höheren Aufschlussdrücken und längeren Aufschlusszeiten unter Anwendung geeigneter, hochdosierter synthetischer Klebstoffe eine signifikante Quellungsverbesserung der MDF erreicht wurde.

Für die Beurteilung der Quellungsmodifizierung von MDF mit Bindemittelzusatz erwiesen sich neben der Dickenquellung nach Wasserlagerung insbesondere die Dickenquellung nach Zyklustest sowie die Querkzugfestigkeit nach Kochprüfung als maßgebend. Bezüglich der Dickenquellung nach 24 h Wasserlagerung wurde mit allen Bindemitteln ein sehr niedriges Quellungs-niveau erreicht. Diese Aussagen wurden durch die Resultate der Dickenquellung nach Zyklustest unterstützt, wonach höhere Drücke und/oder längere Zeiten beim Faserstoffaufschluss zu deutlich günstigeren Quellwerten führten. Die niedrigsten Dickenquellungen zeigten die PF-gebundenen Faserplatten mit zum Teil „negativen“ Werten. Dieses Phänomen ist von der PF-Harz-Aushärtung bekannt. Im Unterschied zu den MUF-Varianten wiesen die MDF mit PF-Harz-Bindung nach der Zyklusbelastung einen absolut rissfreien Probenquerschnitt auf.

Die Bewertung der Eigenschaften bei Biegung zeigte erwartungsgemäß, dass höhere Aufschlussdrücke und/oder längere Aufschlusszeiten, insbesondere durch die kürzeren Faserlängen, eine deutliche Abnahme des Elastizitätsmoduls und der Festigkeit nach sich zogen. Optimistisch stimmen die Ergebnisse zum Formaldehydgehalt speziell der MUF-Harz-gebundenen MDF, nach denen höhere Drücke und längere Verweilzeiten beim Aufschluss zur Abnahme des Formaldehydgehalts der MDF führten. Beispielsweise ergaben MDF aus 8 bar-Faserstoff einen Formaldehydgehalt von 14,0 mg/100 g, währenddessen Platten aus 16 bar-Faserstoff 7,6 mg/100 g Formaldehyd enthielten.

Mit diesen Ergebnissen wurden die Annahmen der 4. Arbeitshypothese („Der Grad der Aufschlussintensivierung (Aufschlussgrad) beeinflusst signifikant die Eigenschaften von MDF mit und ohne Bindemittel. Thermomechanisch induzierte höhere Aufschlussgrade führen zu Faserstoffen, aus denen Faserplatten mit verminderter Neigung zur Quellung, besserer Dimensionsstabilität, ungünstigeren Biegeelastizitäten und geringen Formaldehydemissionen hergestellt werden können.“) umfassend bestätigt.

Eine Intensivierung des Aufschlussdruckes ergab dabei sowohl für Faserplatten mit MUPF- als auch für MDF mit PMDI-Bindung signifikant reduzierte Dickenänderungswerte.

te bei Änderung der relativen Luftfeuchte. Die geringsten Dickenänderungen wiesen Platten aus 16 bar-Faserstoff auf. Dieser Effekt und der Zusammenhang der Querkzugfestigkeit mit der durch die *Aufschlussverschärfung einhergehenden Reduzierung des Quell-/Schwindverhaltens* der Faserstoffe und der *daraus resultierenden geringen Querkdruck- und Querkzugbelastungen der Klebstoffbrücken* erklärt sich durch die *Verbesserung des inneren Werkstoffverbundes (Faser-zu-Faser-Bindung)* und steht in *Übereinstimmung mit der 5. Arbeitshypothese*.

Die Veränderung des Aufschlussgrades bei der Faserstoffherstellung wirkte sich speziell bei Platten mit PMDI-Bindung signifikant auf das Verdichtungsverhalten der Faserwolle beim Pressen und damit auf den entstehenden Rohdichteverlauf senkrecht zur Plattenebene aus. Intensivere Aufschlussbedingungen ergaben homogenere Rohdichteprofile. Ein Vergleich der Rohdichteprofile von Industrie- zu Labor-MDF bestätigte, dass die labortechnisch hergestellten Faserplatten bezüglich des Rohdichteprofiles senkrecht zur Plattenebene industriell gefertigten MDF entsprachen.

Aus der Herstellung von mit höheren Aufschlussdrücken und längeren Aufschlusszeiten „vergüteten“ Faserstoffen resultierte eine signifikante Quellungsvergütung und damit auch eine größere Witterungsbeständigkeit der MDF sowohl nach technischer Kurzzeitbewitterung (KZB) als auch nach Freibewitterung (FB). Die mit modifizierten Fasern hergestellten MUF- und PF-Harz gebundenen Labor-MDF wiesen sowohl im unbewitterten als auch im bewitterten Zustand bessere absolute Querkzug- und Dickenquellungs-Eigenschaften im Vergleich zu den Industrieplatten auf. Sie zeigten gleichfalls die höhere Witterungsbeständigkeit (Restquerkzugfestigkeit nach *KZB 8* bzw. *KZB 24* und *FB 72*). Mit Bezug auf die Restquellung nach Bewitterung wurde von PF-Harz- und PMDI-gebundenen Laborplatten mit mittleren Aufschlussgraden (bis 12 bar, 4 min) die bessere Witterungsbeständigkeit gegenüber den Industrieplatten erreicht.

Ein intensiverer Aufschluss führte, insbesondere bei den PMDI-Platten, zu einer Quellungsvergütung nach Bewitterung. Die Steigerung des Aufschlussdruckes wirkte sich generell stärker auf die erreichbare Quellungsvergütung aus als eine Verlängerung der Aufschlusszeit.

Die Aussagen sind als Beleg für die 6. Arbeitshypothese anzusehen, nach der der „Aufschlussgrad sowie Art und Anteil des eingesetzten Bindemittels die MDF-Eigenschaften sowohl vor als auch nach der Bewitterung beeinflussen“.

Übereinstimmend zu den Untersuchungen von *River /1994/* nahmen die Biegeeigenschaften insbesondere im ersten Bewitterungsjahr ab. Das bestätigen auch die für ausgewählte Labor- und Industrie-MDF-Varianten vorliegende Ergebnisse nach dreijähriger Freibewitterung (*FB 160*), wonach sich die Biegeeigenschaften zwischen einer Prüfung nach *FB 48* und *FB 160* um nochmals maximal 20 % reduzierten. Im Gegensatz zu den Aussagen von *River* ergaben sich aber keine signifikanten Abhängigkeiten zwischen einer technischen Alterung und einer Freibewitterung.

Grundsätzlich sind für die Ergebnisse zur Querkzugfestigkeit und teilweise der Dickenquellung (nur MUPF und PMDI) nach *KZB 8* und *FB 72* relativ gute, aufschlussgradunabhängige Übereinstimmungen festzustellen. Schlussfolgernd kann mit einer 8-wöchigen technischen Alterung im Xenotest-Gerät eine 72-wöchige natürliche Alterung simuliert werden, was *die Annahmen der 8. Arbeitshypothese („Die Platteneigenschaften nach technischer Alterung im Xenotest-Gerät ermöglichen Prognosen über eine*

spätere Witterungsbeständigkeit und korrelieren mit den tatsächlich bestimmten Eigenschaften nach natürlicher Alterung im Freien“) zumindest teilweise bestätigt.

Diese Erkenntnisse stehen im Kontext zu den zahlreichen Erfahrungen von *Deppe* und *Schmidt* zur Bewitterung von Spanplatten. Im Unterschied zu den Ergebnissen vorgenannter Autoren, die mit einer 12-wöchigen KZB eine dreijährige *FB* simulierten, wird eine Bewitterungszeit von 8 Wochen *KZB* als ausreichend eingeschätzt.

Die 7. Arbeitshypothese hatte zum Inhalt, dass „die physikalischen Eigenschaften der MDF im Ausgangszustand (Kurzzeiteigenschaften) Rückschlüsse auf eine spätere Feuchte- und/oder Witterungsbeständigkeit des Werkstoffs erlauben.“

Bezüglich der bindemittelabhängigen Korrelationen (Aufschlussvariationen zusammengefasst) ist einzuschätzen, dass sich die Querkzugfestigkeit nach Kochprüfung insbesondere für PMDI-gebundene Platten zur Vorhersage langfristiger Verklebungsqualitäten und einer damit ausreichenden Witterungsbeständigkeit eignet.

Hohe Werte für die Querkzugfestigkeit nach Zyklustest garantierten für MDF mit PF-, MUF- oder MUPF-Harz-Bindung auch hohe Werte für die Querkzugfestigkeit nach *KZB* oder *FB* und bestätigen die Eignung dieser Prüfung zur Vorhersage von Feuchte- und Witterungsbeständigkeit. Diese Aussagen stehen im Widerspruch zu bisherigen Erfahrungen zum Zusammenhang zwischen der Querkzugfestigkeit nach 2 h Kochen bzw. Zyklustest mit den Ergebnissen der Bestimmung der Querkzugfestigkeit nach technischer oder natürlicher Bewitterung. Sowohl für die technische Alterung als auch für die natürliche Bewitterung hatten *Gressel /1997/* sowie *BRE /1996/* seinerzeit keine gesicherten Abhängigkeiten gefunden.

Weiterhin bleibt festzuhalten, dass sich sowohl die Dickenquellung nach Zyklustest als auch die Dickenquellung nach 24 h Wasserlagerung zur Prognose einer Feuchte- und Witterungsbeständigkeit MUF-, MUPF- und PMDI-gebundener Platten eignen. Diese Ergebnisse bestätigen die Aussagen des Building Research Establishment (BRE), wonach die Werte für die Dickenquellung von MDF nach Freibewitterung mit den Ergebnissen nach 24 h Kaltwasserlagerung übereinstimmen und gute Korrelationen zwischen der Dickenquellung nach Zyklustest und der Dickenquellung nach Freibewitterung ermittelt wurden */BRE 1996/*.

Übereinstimmend zu den Ergebnissen zur Querkzugfestigkeit nach Kochprüfung weisen speziell die Faserplatten mit PMDI-Bindung eine hohe Witterungsbeständigkeit auf. Bestätigend zu den Erfahrungen nach den Kurzzeitprüfungen zeigten insbesondere MDF aus besonders intensiv aufgeschlossenem Faserstoff die besten Festigkeits- und Quellungsresultate.

Nach den *bindemittelabhängigen* Zusammenhängen wurde unter Zusammenschluss der verschiedenen Bindemitteltypen untersucht, ob *aufschlussabhängige* Korrelationen bestehen. Dabei zeigten sich überraschenderweise ausschließlich für MDF aus 16 bar-Faserstoffen lineare Korrelationen zwischen der Querkzugfestigkeit nach Kochprüfung und der Querkzugfestigkeit nach *KZB 8* bzw. nach *FB 72*. Den statistisch sichersten Zusammenhang zwischen der Querkzugfestigkeit nach Zyklustest und der Querkzugfestigkeit nach Bewitterung wiesen MDF aus 12 bar-Faserstoff nach 8 Wochen Kurzzeitbewitterung auf. Von den absoluten Werten her betrachtet stimmten die nach diesen beiden Vorbehandlungen ermittelten Werte (auf die verschiedenen Bindemittel bezogen) nahezu vollständig überein.

Die Ergebnisse bestätigen daher nur teilweise die Erfahrungen von *Gressel /1997/*, der in Ringversuchen zur Bewertung der Feuchtebeständigkeit von MDF (unter Einbeziehung des BAM-Kurzzeitbewitterungstest) sehr unsichere Zusammenhänge zwischen der Querkzugfestigkeit nach Bewitterung und Kochprüfung gefunden hatte. Übereinstimmend dazu hatten auch die Untersuchungen des Building Research Establishment (BRE) keine charakteristischen Abhängigkeiten zwischen der Querkzugfestigkeit nach Kochprüfung oder Zyklustest und der Querkzugfestigkeit nach Freibewitterung ergeben */BRE 1996/*.

Im Unterschied zu den *bindemittelabhängigen* Zusammenhängen, nach denen sich sowohl die Dickenquellung nach Zyklustest als auch die Dickenquellung nach 24 h Wasserlagerung prinzipiell zur Vorhersage einer Feuchte- und Witterungsbeständigkeit eignen, ermöglichen bei *aufschlussabhängiger* Betrachtung einzig die Zusammenhänge zwischen den Quellwerten nach Zyklustest und nach 8 Wochen Kurzzeitbewitterung bzw. zwischen der Dickenquellung nach 24 h Wasserlagerung und nach *FB 72* Aussagen zur dauerhaften Quellungsverbesserung.

Zusammenfassend und wiederholt übereinstimmend mit der *8. Arbeitshypothese* wird eingeschätzt, dass bezüglich der Querkzugfestigkeit sichere Korrelationen zwischen einer technischen Bewitterung im Xenotest-Gerät und einer natürlichen Alterung im Freien bestehen. Besonders straff sind die Abhängigkeiten für MDF aus bei 16 bar aufgeschlossenem Faserstoff. Für die Dickenquellung gilt, dass ausschließlich bei *bindemittelabhängiger* Betrachtung Zusammenhänge bestehen. Dabei zeigen PF-gebundene Faserplatten eine gute Korrelation für die Dickenquellung nach *KZB 8* und nach *FB 72*, währenddessen für PMDI-, MUPF- und auch MUF-gebundene MDF statistisch gesicherte Abhängigkeiten zwischen 24 Wochen Kurzzeitbewitterung und 72 Wochen Freibewitterung nachgewiesen wurden.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Auf Grund des weltweit hohen Entwicklungstempos der MDF-Produktion ist der Ausweitung der Anwendungsgebiete dieses Holzwerkstoffes hohe Bedeutung beizumessen. MDF sind dabei als „Produkt mit Perspektive“ anzusehen, die erreichbaren Produkteigenschaften bieten eine Fülle weiterer Einsatzmöglichkeiten.

Ziel der vorliegenden Arbeit war es, den Einfluss bislang nicht überprüfter Faserstoff-Aufschlussbedingungen (Prozessparameter Dampfdruck und Verweilzeit im Kocher unmittelbar vor Zerkleinerung) und des Bindemittels auf die Eigenschaften von MDF für eine Verwendung im Feucht- und Außenbereich zu untersuchen. Mit den angestrebten Forschungsergebnissen können Impulse zur notwendigen Produktdiversifikation von MDF gegeben werden. Derartige MDF sollen sich bei erfolgreichem Nachweis einer langfristigen Feuchtebeständigkeit des gesamten Werkstoffes unter Ausnutzung der materialspezifischen Vorteile für vielfältige neue Anwendungen im nichttragenden Außenbereich, z. B. als Fassadenelemente, Ladenfronten und Werbeflächen, eignen.

Schlussfolgernd aus dem Lösungsweg zur Arbeit erfolgten die Aufschlussuntersuchungen grundsätzlich unter Verwendung von Kiefernholz, was sich insbesondere dadurch begründet, dass Kiefer Hauptholzart der europäischen MDF-Industrie ist. Als Bindemittel fanden neben PMDI vor allem MUF-, MUPF- und PF-Harze in jeweils hohen Dosierungen Verwendung, die eine gute Feuchte- und Hydrolysebeständigkeit der Verklebung erwarten ließen.

Grundlage für die Herstellung „quellungsmodifizierter“ MDF bildete die Verwendung spezieller Holzfasern, die unter intensivierten Aufschlussbedingungen mit gezieltem Überschreiten industriüblicher Zerkleinerungsparameter hergestellt wurden. Durch Dampfdrücke im Kocher bis 16 bar ($\sim 200\text{ }^{\circ}\text{C}$) und eine Verlängerung der Verweilzeit bis 8 min wurde eine intensivere hydrothermische Hackschnitzelvorbereitung vor der Faserstoff-Herstellung angestrebt, aus der in Folge einer besseren Aufschichtung der Mittellamelle eine homogenere Faserqualität resultieren und die naturgegebenen mechanischen Fasereigenschaften besser in den Holzfasernwerkstoff übertragen werden sollten.

Die Ergebnisse der umfangreichen morphologischen Faserstoffanalysen zeigten, dass höhere Drücke zu einer feineren Faserstoff-Struktur und zu kürzeren Faserlängen führten. Für den Schlankheitsgrad als Maß für das Verhältnis von mittlerer Partikellänge zu mittlerer Partikelbreite ergab sich eine überproportionale Beeinflussung der Faserlänge von der Aufschlussintensität. Den kleinsten Schlankheitsgrad und die größte Feinheit wies der bei 16 bar über 8 min am intensivsten aufgeschlossene Faserstoff auf. Aus einem Aufschluss bei industriüblichen Drücken von 8 bar und einer Verweilzeit von 8 min resultierte die größte mittlere Faserlänge, was auf die durch die längere Dämpfzeit intensivere Hackschnitzelerweichung und homogenere Zerkleinerung zurückgeführt werden konnte.

Die mikroskopischen Untersuchungen bestätigten, dass höhere Aufschlussdrücke und auch längere Dämpfzeiten zu einer feineren Faserstoff-Struktur führten. Zudem resultierten aus einer zunehmenden Aufschlussintensität dunkelbraune Fasern, was zum Einen auf das bei hohen Aufschlusstemperaturen in den Holzfasern verbleibende Lignin bei gleichzeitig herausgelösten Hemicellulosen zurückgeführt wurde. Zum Anderen wurden die Ligninpolymere als Folge der thermohydrolytischen Beanspruchung oxidativ

gespalten bzw. die chromophore Gruppen durch Oxidation zerstört und die entstehenden Ligninfragmente dunkelten durch ihre photochemischen Eigenschaften rascher nach.

Intensiver aufgeschlossene Faserstoffe wiesen nach der Faservliesbildung und Vorverdichtung infolge gravierend höherer Schüttdichten deutlich reduzierte Strehöhen auf. Damit verbundene nachteilige Effekte (u. a. schlechtere Entgasung) werden durch die überaus positiven Auswirkungen auf die folgenden Prozessstufen (u. a. geringere Energieaufwendungen für Vor- und Heißpressen, reduzierte maximale Pressdrücke) mehr als kompensiert. Im Falle einer industriellen Umsetzung können sich auf Grundlage dieser Ergebnisse erhebliche wirtschaftliche Effekte, z. B. durch den Einsatz „leichterer“ Vorpress- und Heißpressanlagen mit geringeren notwendigen spezifischen Pressdrücken, ergeben.

Als Resümee zu den chemischen Faserstoffeigenschaften ist festzustellen, dass eine Intensivierung der Aufschlussbedingungen zu sinkenden pH-Werten für die kaltwässrigen Extrakte aus den thermo-mechanisch aufgeschlossenen Faserstoffen führte. Andererseits nahmen bei Verschärfung der Aufschlussbedingungen sowohl der Gehalt an wasserlöslichen Stoffen bei Heißwasserextraktion als auch der Extraktstoffgehalt in Ethanol-Cyclohexan sowie die Pufferkapazität mit Natronlauge bis zum Erreichen des Neutralpunktes signifikant zu. Die Zunahme der wasserlöslichen Anteile ist auf das „Löslichwerden“ der Hemicellulose zurückzuführen, das insbesondere bei Temperaturen $> 180\text{ °C}$ und - unter dem Einfluss thermisch abgespaltener Anteile an Ameisen- und Essigsäure - durch den Abbau von langen Polysaccharidketten begünstigt wird. Zu Formaldehydgehalt und Formaldehydabgabe ergaben sich für die Extremvariante (Aufschluss bei 16 bar und 8 min Dämpfzeit) die höchsten Werte.

Grundsätzlich führten höhere Aufschlussdrücke zu längeren Benetzungszeiten und damit zu besser hydrophobierten Prüfblättern. Als Ursache der signifikant längeren Benetzungsdauer der 16 bar-Faserstoffe wird die mit der Erhöhung des Aufschlussdrucks einhergehende Abnahme des Hemicellulosegehalts bei gleichzeitiger Zunahme des Extraktstoffgehaltes und die daraus resultierend reduzierte Wasseraufnahmefähigkeit angesehen.

Untersuchungen zur Energiebilanz zeigten, dass das größte Energieeinsparpotential im Temperaturbereich von 180 bis 200 °C lag. Vorzugsvariante war ein Aufschluss bei 12 bar, der eine quasi „ausgeglichene“ Energiebilanz aufwies. Der höhere Energiebedarf für die Dampferzeugung wurde durch die Elektroenergieersparnis bei der Zerfaserung (etwa 2/3 gegenüber Aufschluss bei 8 bar und 4 min) nahezu ausgeglichen. Der bei Aufschlussdrücken von 12 bar ($\sim 187\text{ °C}$) durch das Herauslösen von Holzbestandteilen festgestellte Faserstoffmasseverlust fiel mit $\sim 6\%$ verhältnismäßig moderat aus.

Mit der Herstellung von MDF ohne Klebstoffzusatz wurde das enorme Potential einer möglichen Quellungsvergütung durch eine Aufschlussintensivierung bei der Faserstoffherstellung besonders deutlich. So reduzierte sich für MDF aus 16 bar-Faserstoff die Dickenquellung nach 24 h Wasserlagerung auf Werte unter 10 %. Im Gegensatz dazu wiesen Platten aus industriell üblich bei 8 bar aufgeschlossenen Fasern Quellwerte im Bereich von 50 % auf. Ein Aufschluss bei 12 bar ergab Dickenquellungen im Bereich

von 15 %. Bestätigend dazu reduzierten sich unabhängig von der Presszeit die Quellwerte von hochdichten Faserplatten aus 12- bzw. 16 bar-Faserstoff auf ein Viertel bis ein Fünftel gegenüber HDF aus industrieüblich bei 8 bar aufgeschlossenem Faserstoff.

Im Hinblick auf das Erreichen definierter Plattenqualitäten und einer wirtschaftlichen MDF-Herstellung wird auch in Zukunft (trotz des enormen Potentials der durch die Aufschlussverschärfung erreichten Faservergütung) sicherlich nicht auf Bindemittel verzichtet werden können. In Kombination mit einer Aufschlussintensivierung sollte es aber möglich sein, mit reduziertem Bindemiteleinsatz bzw. durch Verwendung geeigneter Additive Faserplatten mit hoher Wirtschaftlichkeit herzustellen. Vor dem Hintergrund der angesprochenen Formaldehydproblematik resultieren aus Bindemiteleinsparungen auch ökologisch interessante Aspekte. Optimistisch stimmt in diesem Zusammenhang gleichfalls, dass intensivere Aufschlussbedingungen zu einer ausgeprägten Abnahme des Formaldehydgehalts speziell von MUF-Harz-gebundenen MDF führten.

Insbesondere für MDF aus unter verschärften Aufschlussbedingungen bei Drücken bis 12 bar aufgeschlossenem Faserstoff wurde bei Verwendung geeigneter Bindemittel (z. B. PMDI, PF oder MUF) eine erhöhte Feuchte- wie auch Witterungsbeständigkeit der Verklebung nachgewiesen, die einen Einsatz derartiger Platten im Feucht- oder Außenbereich ermöglicht. Die Steigerung des Aufschlussdruckes wirkte sich generell stärker auf die erreichbare Quellungsmodifizierung aus als eine Verlängerung der Aufschlusszeit. Erste Ergebnisse zur Herstellung hochdichter Faserplatten lassen erwarten, dass diese Aussagen auch auf HDF übertragbar sind.

Versuche mit industrieüblich aufgeschlossenen Faserstoffen bestätigten die Erkenntnisse an den labortechnisch unter vergleichbaren Einstellungen aufgeschlossenen Faserstoffen und stellen eine direkte Übertragbarkeit wesentlicher Zusammenhänge beim up-scaling in den Pilotanlagen- bzw. den Industrie-Maßstab in Aussicht.

Eine Intensivierung des Aufschlussdruckes führte dabei sowohl für Faserplatten mit MUPF- als auch mit PMDI-Bindung zu auffällig reduzierten Dickenänderungswerten bei Änderung der relativen Luftfeuchte. Die geringsten Dickenänderungen wiesen Platten aus 16 bar-Faserstoffen auf. Dieser Effekt kann mit einer der Aufschlussverschärfung einhergehenden Reduzierung des Quell-/Schwindverhaltens der Faserstoffe und den daraus resultierenden geringen Querdruck- und Querkzugbelastungen der Klebstoffbrücken erklärt werden und führt zu einer Verbesserung des inneren Werkstoffverbundes (Faser-zu-Faser-Bindung).

Als besonders geeignet zur Vorhersage einer langfristigen Feuchte- und Witterungsbeständigkeit zeigten sich zum Einen die Querkzugfestigkeit nach Kochprüfung bzw. nach Zyklustest, zum Anderen die Dickenquellung nach Zyklustest sowie nach Wasserlagerung. Abhängig vom gewählten Bindemittelsystem und von der Aufschlussintensität bestehen unterschiedlich straffe Korrelationen zwischen Kurz- und Langzeiteigenschaften. Gesicherte Zusammenhänge zwischen einer technischen Bewitterung im Xenotest-Gerät und einer natürlichen Alterung im Freien wurden insbesondere für MDF aus bei 16 bar aufgeschlossenem Faserstoff bestimmt.

Bewitterungsversuche im Freien über einen Zeitraum von 8 Jahren an labortechnisch hergestellten, unbeschichteten MDF aus bei 12 bar über 4 min aufgeschlossenen Faserstoffen mit PMDI-Bindung (Feststoffanteil 8 %) bestätigten die Eignung derartiger

Platten für eine erfolgreiche Außenverwendung. Dabei wiesen die aus modifizierten Fasern hergestellten Labor-MDF im bewitterten Zustand neben grundsätzlich hervorragend niedrigen absoluten Quell- auch überraschend hohe absolute Querkzugfestigkeitswerte auf. So lag die Dickenquellung nach 8 Jahren natürlicher Alterung bei 3,2 % (Ausgangszustand 2,7 %) und die Querkzugfestigkeit bei 0,6 N/mm² (Ausgangszustand auf 0,7 N/mm²).

Gespräche mit MDF-Herstellern zum Thema „thermische Energie für die Dampferzeugung“ zeigten, dass in den Industrieanlagen Dampfenergie prozesstechnisch bedingt (u. a. durch eigene Energieerzeugung) i. d. R. in ausreichendem Maße und „quasi“ kostenfrei vorhanden ist. Von entscheidender Bedeutung für die Ökonomie des Herstellungsprozesses ist dagegen die Elektroenergie für die Zerkleinerung beim thermomechanischen Holzaufschluss. Von daher ist der Faserstoffaufschluss bei 12 bar als „Vorzugsvariante“ anzusehen, da dieser Prozess, wie schon weiter vorn erklärt, eine quasi ausgeglichene Energiebilanz aufweist (Kompensation der höheren Dampfmenen durch deutlich gesenkten Elektroenergiebedarf) und relativ verlustarm abläuft. Das in den Untersuchungen nachgewiesene Einsparpotential bietet daher das Potential, Faserplatten nach dem Trockenverfahren wesentlich energieeffizienter und damit wirtschaftlicher herzustellen.

Erfahrungen aus Industrierversuchen mit Druckbereichen von 11 bar bestätigten das immense Energieeinsparpotential gegenüber den üblicherweise realisierten 8 bis 9 bar */Wolf 2009/*. Es konnte nachgewiesen werden, dass eine Verlängerung der Dämpfzeit von 3 auf 6 min nur unwesentlich höhere Energieaufwendungen für die Dampferzeugung nach sich zog. Ein Großteil der in dieser Arbeit vorgestellten Ergebnisse wurde durch Industrierversuche validiert und ist daher direkt übertragbar. Die Industrie setzt mittlerweile höhere Aufschlussbedingungen ein (vorrangiges Ziel: Energieeinsparung, die Quellungsmodifizierung ist eher nachrangig).

Eine Zielstellung der Untersuchungen war die Überarbeitung der normativen Anforderungen an MDF mit erhöhter Feuchtebeständigkeit, die dazu beitragen sollte, MDF-Herstellern realistische Materialkennwerte zu liefern und MDF-Verarbeitern Lösungen für das Einsatzgebiet „witterungsbeständige MDF“ im Außeneinsatz anzubieten. Vor dem Hintergrund bereits erfolgter, unsachgemäßer Außenanwendung von MDF ist diesem Aspekt besondere Bedeutung beizumessen, um Schadensfällen und dem damit einhergehenden Imageverlust für den Werkstoff MDF vorzubeugen.

Falls keine Beschichtung oder nur ein lasierender Anstrich vorgesehen ist, sollte ein witterungsbeständiger Trägerwerkstoff beim Außeneinsatz gegenüber MDF.H bzw. HLS deutlich bessere Materialkennwerte aufweisen. Nach Auswertung der Ergebnisse zur Bewitterung der Labor-MDF im Vergleich zu Industrie-MDF werden folgende Veränderungen der Anforderungswerte (jeweils bezogen auf MDF.HLS nach DIN EN 622-5 in den entsprechenden Nenndickenbereichen) vorgeschlagen:

- Erhöhung der Biegefestigkeit auf mindestens 135 %,
- Erhöhung des Biege-Elastizitätsmoduls auf mindestens 135 %,
- Erhöhung der Querkzugfestigkeit auf mindestens 135 %,
- Erhöhung der Querkzugfestigkeit nach Kochprüfung auf mindestens 170 %,
- Erhöhung der Querkzugfestigkeit nach Zyklustest auf mindestens 200 %,

- Reduzierung der Dickenquellung nach 24 h WL auf maximal 35 %,
- Reduzierung der Dickenquellung nach Zyklustest auf maximal 30 %.

Thermomechanisch induzierte höhere Aufschlussgrade führen zu Faserstoffen, aus denen Faserplatten mit verminderter Neigung zur Quellung, besserer Dimensionsstabilität aber auch ungünstigeren Biegefestigkeiten und Biegeelastizitäten hergestellt werden können. Die Annahme, dass aus einer Aufschlussintensivierung homogener zusammengesetzte Faserstoffe mit großen Einzelfaserlängen und guter Beleimbarkeit resultieren, wurde damit nicht bestätigt.

Zukünftige Forschungsarbeiten sollten deshalb u. a. klären, bis zu welchem Aufschlussdruck die Homogenität und Zusammensetzung der Faserstoffe positiv beeinflusst wird und was die Ursachen der verhältnismäßig schlechten Biegeeigenschaften bei Aufschlussdrücken über 12 bar sind. Besondere Bedeutung werden in diesem Zusammenhang auch elektronenmikroskopischen Untersuchungen der Biegebruchflächen und Untersuchungen zum Einfluss des Mahlscheibenabstandes beigemessen.

Gleichfalls von sehr großem Interesse im Hinblick auf den angestrebten Einsatz von hochfeuchtebeständigen Faserplatten im Außenbereich könnte im Hinblick auf tragende Verwendungen das Kriechverhalten und die Dauerstandfestigkeit (auch Zeitstandfestigkeit) sein. Da zum Verhalten von MDF aus intensiver aufgeschlossenen Faserstoffen bisher keine Erkenntnisse vorliegen, wären wissenschaftlich fundierte Untersuchungen zum festigkeits- und/oder anwendungsbezogenem Kriechverhalten von MDF aus Extremfaserstoff lohnenswertes Ziel zukünftiger Forschungsarbeiten. Gleichzeitig hätten derartige Untersuchungen eine hohe Praxisrelevanz.

Wesentliche Ergebnisse dieser Arbeit wurden vom Autor bereits in entsprechenden Medien veröffentlicht, sie sind Bestandteil des folgenden Quellenverzeichnisses. Zu den Untersuchungen wurde zudem ein Patent angemeldet /DE 10160316/.

8 Quellenverzeichnis

8.1 Literatur

- Alteheld, R. 2007: Glunz AG Nettgau, persönliche Informationen vom 13.12.2007
- Alteheld, R. 2007: Standpunkt der Holzwerkstoffindustrie zur Rohstoffsituation. Vortrag 7. IHD-Holzwerkstoffkolloquium 13.12.2007
- Andritz 2007: Internetseite der Andritz AG, Graz, Österreich: <http://www.andritz.com>
- Asplund, A. 1939: Teknisk Tidskrift, Bd. 69, Kemi, S. 81-85, 89-94; auch in Wochenblatt für Papierfabrikation, Bd. 71 (1940), S. 590
- Asplund, A. 1949: Wallboardindustriens bakvattenfråga. Svensk Papperstidning, Stockholm 52, S. 79-86
- Augustin, H. 1988: Holz-Lexikon – Nachschlagewerk für die Holz- und Forstwirtschaft, 3. Auflage, bearbeitet von Rudolf Mombächer, DRW-Verlag, Leinfelden-Echterdingen
- Autorenkollektiv 2008: Taschenbuch der Holztechnik. Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag, München, ISBN 978-3-446-22852-8
- Ayrlimis, N.; Laufenberg, T. L.; Winandy, J. E. 2009: Dimensional Stability and Creep Behaviour of Heat-Treated Exterior Medium Density Fibreboard. Holz Roh- Werkstoff 67, S. 287-295
- Back, E. 2000: Emission of volatile compounds in pitch control, wood resin and deresination. Ernst Back, Lawrence H. Allen: S. 37-381
- Becker, W.; Braun, D. 1988: Kunststoff-Handbuch, Teil 10: Duroplaste. Hanser-Verlag München, Wien; 2. Aufl., 1988
- Bemmann, A.; Gerold, D. 2007: Rohstoff Holz – Perspektiven für die Forst- und Holzwirtschaft Mitteldeutschlands. Vortrag 7. IHD- Holzwerkstoffkolloquium 13.12.2007
- Blechschildt, J.; Blosfeld, O.; Bäurich, C.; Engert, P.; Graf, M.; Wurdinger, S. 1988: Eigenschaften von CTMP aus einheimischen Holzarten (Teil II). Zellstoff und Papier, 37, (2), S. 43-46
- Bluthardt, G.; Mohr, R. 2000: Am Anfang war die Rollenkette. Valmet Panelboard stellt heute die dritte Kraft im MDF-Kontipressenbau dar. MDF-Magazin, Supplement von Holz-Zbl. und HK, S. 24-28
- Boehme, C. 1991: Hydrolysebeständigkeit von formaldehydarmen bzw. formaldehydfrei verleimten Spanplatten. Holz Roh-Werkstoff 49, S. 261-269
- Boehme, C. 1993: Optimierung des Eigenschaftsprofiles von MDF. Holz Roh-Werkstoff 51, S. 240-246
- Boehme, C. 2002: Tannin-Testat. MDF-Magazin, Supplement von Holz-Zbl. und HK, S. 32-36
- Boehme, C.; Meyer, B.; Roffael, E. 2004: Die Formaldehydemission von Kiefern-Massivholz in Abhängigkeit von der Jahrringlage. Holz Roh-Werkstoff 62, S. 149-150
- Boku 2002: Modifiziertes Holz - Eigenschaften und Märkte. Institut für Holzforschung der Universität für Bodenkultur Wien, Band 3
- Börste G. 2008: New ways of energy savings in the wet fiber preparations process (Andritz). 6th European Wood-Based Panel Symposium. 8-10 Octobre 2008, Hanover
- Brecht, W.; Prydz, A. 1941: Einflüsse des Frostes auf Halbstoffe und Papier. Der Papierfabrikant 39, S. 201-216
- Brockhaus 2000: © 2000 Bibliographisches Institut & F. A. Brockhaus AG

- Buchholzer, P. 1995: MDF aus unterschiedlichen Laub- bzw. Nadelhölzern und Bindemitteln, Holz-Zbl. 121, S. 593, 600-601
- Buchholzer, P. 1999: Leimverlusten auf der Spur. WKI entwickelt Alternative zur Blow-Line-Beleimung für MDF. MDF-Magazin. Supplement von Holz-Zbl. und HK, S. 22-24
- Buchholzer, P. 2002: Bindemittel einsparen. HK Holz u. Kunststoffverarb. 37, S. 64-67
- Building Research Establishment (BRE) 1996: An assessment of exterior medium density fibre board (MDF). Information paper of BRE, BRE News, ISBN 1 86081 080 2
- Burmester, A. 1970: Formbeständigkeit von Holz gegenüber Feuchtigkeit – Grundlagen und Vergütungsverfahren. BAM-Bericht Nr. 4, Bundesanstalt für Materialprüfung, Berlin
- Burmester, A. 1973: Einfluß einer Wärme-Druck-Behandlung halbtrockenen Holzes auf seine Formbeständigkeit. Holz Roh-Werkstoff 31, S. 237-243
- Cheng, X.; Siqun, W.; Pharr, G. M.; Groom, L. H. 2008: Effect of thermo-mechanical refining pressure on the properties of wood fibres as measured by nanoindentation and atomic force microscope. Holzforschung, 62, (2), S. 230-236
- Clad, W.; Schmidt-Hellerau, C. 1977: Particleboards for Building Industrie: Performance and Suitability Test. Proceedings 11th W. S. U. Symp. Particleboard, Pullman, USA, S. 33-61
- Del Menezzi, C. H. S.; Tomaselli, I.; Okino, E. Y. A.; Teixeira, D. E.; Santana, M. A. E. 2009: Thermal modification of consolidated oriented strandboards: Effects on dimensional stability, mechanical properties, chemical composition and surface colour. Holz Roh-Werkstoff 67, online April 2009
- Deppe, H.-J. 1983: Zur Hydrolysebeständigkeit von Aminoplastmischharzverleimungen in Holzspanplatten. Adhäsion 27 (10), S. 16-19
- Deppe, H.-J.; Ernst, K. 1996: MDF – Mitteldichte Faserplatten. DRW-Verlag, Leinfelden-Echterdingen
- Deppe, H.-J.; Ernst, K. 2000: Taschenbuch der Spanplattentechnik. 4. überarbeitete und erweiterte Auflage, DRW-Verlag, Leinfelden-Echterdingen
- Deppe, H.-J.; Schmidt, K. 1979: Vergleichende Lang- und Kurzzeit-Bewitterungsprüfungen an Holzwerkstoffen. Holz Roh-Werkstoff 37, S. 287-294
- Deppe, H.-J.; Schmidt, K. 1982; 1983: Zur Beurteilung von Holzwerkstoffen im Kurzzeit-Bewitterungsversuch, Teil 1. Holz Roh-Werkstoff 40, S. 471-473; Teil 2. Holz Roh-Werkstoff 41, S. 13-19
- Deppe, H.-J.; Schmidt, K. 1989: Untersuchungen zur Freibewitterung von Holzwerkstoffen. Holz Roh-Werkstoff 47, S. 397-404
- Deppe, H.J.; Schmidt, K. 2001: Langfristige Freibewitterungen an Holzspanplatten. Holz-Zbl. 127, S. 910-911
- Deppe, H.J.; Schmidt, K. 2009: Schnellere Prüfverfahren für Holzwerkstoffe. Stärkere Einbeziehung des Biege-E-Moduls. Holz-Zbl. 135, S. 916
- Deppe, H.-J.; Stolzenburg, R., 1975: Untersuchungen zur Prüfung der Beständigkeit beschichteter Holzwerkstoffe. Holz-Zbl. 101: S. 1084-1087, 1675-1678
- Dieffenbacher 2005: Messeprospekt zur LIGNA 2005, Hannover
- Dietz, M. 2003: Werzalit Oberstenfeld, persönliche Informationen vom 16.05.2003
- Domanský, R.; Rendoš, F. 1962: Zum Studium der Pyrolyse des Holzes und seiner Komponenten. Holz Roh-Werkstoff 20, S. 473, 476
- Dube, H.; Kehr, E. 1995a: Einsatz von Altpapier bei der MDF-Herstellung – Einfluß des Altpapieranteils. Holz Roh-Werkstoff 53, S. 20
- Dube, H.; Kehr, E. 1995b: Einsatz von Altpapier bei der MDF-Herstellung – Einfluß der Faserstoffaufbereitung. Holz Roh-Werkstoff 53, S. 92

- Dube, H.; Kehr, E. 1996: Dauerstandverhalten von MDF – Einfluß des Hydrophobierungsmittels MUPF-Harz-gebundener Platten. Holz Roh-Werkstoff 54, S. 387-388
- Dunky, M.; Niemz, P. 2002: Holzwerkstoffe und Leime. Technologie und Einflussfaktoren. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York, ISBN 3-540-42980-8
- Dünisch, O. 2008: Buche im Außenbereich – Hitzebehandlung macht's möglich. BM Bau- und Möbelschreiner, Heft 6, S. 54-57
- Eisner, K. 1978: Technologie der Herstellung großflächiger Konstruktionswerkstoffe, Teil II: Technologie agglomerierter Materialien. Skript der Hochschule für Forstwirtschaft und Holzindustrie Zvolen
- Erbreich, M. 2004: Die Aufbereitung und Wiederverwendung von Altholz zur Herstellung von Mitteldichten Faserplatten (MDF). Uni Hamburg, Fakultät für Mathematik, Informatik und Naturwissenschaften, Department Biologie, Diss.
- Ernst, K. 1997: Entwicklungsmöglichkeiten von MDF. Holz Roh-Werkstoff 55, S. 3-8
- European Panel Federation (EPF) 2002: ANNUAL REPORT 2001 – 2002. Brüssel, Juni 2002, 224 S., EPF-Jahres-Sitzung am 27.06.2002 in Naples/Italien
- European Panel Federation (EPF) 2003: ANNUAL REPORT 2002 – 2003. Brüssel, Juni 2003, 252 S., EPF-Jahres-Sitzung am 27.06.2003 in Stockholm/Schweden
- European Panel Federation (EPF) 2004: ANNUAL REPORT 2003 – 2004. Brüssel, Juni 2004, 257 S., EPF-Jahres-Sitzung am 23.06.2004 in Prag/Tschechische Republik
- European Panel Federation (EPF) 2005: ANNUAL REPORT 2004 – 2005. Brüssel, Juni 2005, 275 S., EPF-Jahres-Sitzung am 29.06.2005 in Riga/Lettland
- European Panel Federation (EPF) 2006: ANNUAL REPORT 2005 – 2006. Brüssel, Juni 2006, 300 S., EPF-Jahres-Sitzung am 14.06.2006 in Helsinki/Finnland
- European Panel Federation (EPF) 2007: ANNUAL REPORT 2006 – 2007. Brüssel, Juni 2007, 317 S., EPF-Jahres-Sitzung am 28.06.2007 in Stresa/Italien
- European Panel Federation (EPF) 2008: ANNUAL REPORT 2007 – 2008. Brüssel, Juni 2008, 312 S., EPF-Jahres-Sitzung am 10.07.2008 in Wien/Österreich
- European Panel Federation (EPF) 2009: ANNUAL REPORT 2008 – 2009. Brüssel, Juni 2009, 342 S., EPF-Jahres-Sitzung am 25.06.2009 in Santiago de Compostela/Spanien
- EUWID 2004: IARC stuft Formaldehyd als krebserregend ein. www.euwid-holz.de 16.07.2004
- Fantoni 1994: Firmenprospekt von Fantoni Osoppo (Italien) zu MDF plaxil 100 Exterior
- Fantoni, P. 1997: Die Zukunft der MDF-Platte liegt in der Diversifikation. MDF Magazin. Supplement von Holz-Zbl. und HK, S. 20-23
- Finsa 1998: Firmenprospekt von FINSA Padrón-La Coruña (Spanien) zu MDF FIBERPAN Exterior
- FPL 1999: Wood Handbook – Wood as an engineering material. United States Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory (FPL), Madison, WI, U.S.A.
- Festel, G.; Proß, A.; Stepanski, H.; Blankenhain, H.; Witkowski, R. 1997: PUR-Klebstoffe - Zusammenhalt in Vielfalt. kleben & dichten Adhäsion 41, S.16, 18-20
- Frühwald, A. 2001: Verdrängen Substitutionsprodukte Holzwerkstoffe? HK Holz u. Kunststoffverarb. 36, Heft 7-8, S. 55-57
- Frühwald, A. 2007: Aktuelle Rohstoffsituation in Deutschland und Europa – Rohholzaufkommen und Aktivierung. Vortrag 7. IHD- Holzwerkstoffkolloquium 13.12.2007

- Frühwald, A.; Humphrey, P. E.; Heinemann, C. 1999: Mechanische Charakterisierung der Aushärtung von Klebharzen während der Heißpressung von Holzwerkstoffplatten. BFH Nachrichten, Hamburg, S. 17-18
- Frühwald, A.; Heinemann, C.; Humphrey, P. E.; Thömen, H. 2002: Mechanische Charakterisierung der Aushärtung von Klebharzen während der Heißpressung von Holzwerkstoffplatten. BFH Nachrichten, Hamburg, S. 13-14
- Frühwald, A.; Thömen, H. 2008: In-situ Untersuchungen zum Verdichtungsverhalten von Holzwerkstoffmatten – insbesondere MDF-Matten – im Hinblick auf die Ausbildung des Rohdichteprofils und die Feuchtebewegung in der Matte während des Heißpressvorgangs. DGfH aktuell 102, S. 17-18
- Frühwald, A.; Gruchot, M. 2002: Mattenvorerwärmung. Vortrag zum Holzwerkstoff-Workshop, Hamburg, 2002
- Gehrmann, S. 2007: Wissenschaftler geben Entwarnung für Formaldehyd. Deutliche Kritik an IRAC-Einstufung. Holz-Zbl. 133, S. 1293
- Giebler, E. 1983: Dimensionsstabilisierung von Holz durch eine Feuchte/Wärme/Druck-Behandlung. Holz Roh-Werkstoff 41, S. 87-94
- Giertz, H.W. 1974: Neue Holzstoff-Varianten. Das Papier, 28, (10a), S. 137-144
- Ginzel, W. 1971: Zum chemisch-hydrolytischen Abbau von Harnstoff-Formaldehydharz in Spanplatten nach dreijähriger Bewitterung. Holz Roh-Werkstoff 29, S. 301-305
- Goring, D.A.I. 1963: Thermal Softening of Lignin, Hemicellulose and Cellulose. Pulp. Pap. Mag. Can., 64, (12), S. 517-527
- Gothsmann, V.; Roffael, E. 2004: Blender versus Blowline in MDF Gluing. Proceedings 38th W. S. U. Particleboard/Composite Materials Symp., Pullmann, USA, S. 123-130
- Gran, G.; Bystedt I. 1973: Latest developments in pressurized-refining with Defibrator equipment. Proceedings 7th W. S. U. Symp. Particleboard, Pullman, USA, S. 105-163
- Gressel, P. 1968: Untersuchungen an freibewitterten Holzspanplatten. Holz Roh-Werkstoff 26, S. 140-148
- Gressel, P. et al. 1997: Entwicklung von Eigenschaftstests zur Bestimmung der Feuchtebeständigkeit von Spanplatten, Faserplatten und OSB-Platten. AIR-Projekt 1-CT 92-0291, Abschlußbericht
- Greten, T. 2005: Trocken ist Trumpf. Trockenbeileimung der 2. Generation für die MDF-Fertigung. MDF-Magazin, Supplement von Holz-Zbl. und HK, S. 85-86
- Grigoriou, A., 1983: Das Verhalten von Holzwerkstoffen beim Klimawechsel unter besonderer Berücksichtigung der Dimensionsänderungen. Holzforschung und Holzverwertung 35, S. 6-9
- Groom, L. H.; Rials, T.; Snell, R. 2000: Effect of varying refiner pressure on the mechanical properties of loblolly pine fibres. 4th European Panel Products Symposium. 11-13 October 2000 Llandudno, Wales, UK, Proceedings, S. 81-94, ISBN: 1 84220 0100
- Groom, L. H.; So, C.-L.; Rials, T.; Neese, J.; Alexander, J. 2002: Relationships between wood quality, refiner pressure, and resin distribution and their influence on MDF panel properties. 6th European Panel Products Symposium. 9-11 October 2002, Llandudno, Wales, UK, Proceedings, S. 23-37, ISBN: 1 84220 0402
- Groom, L. H.; So, C.-L.; S.; Elder, T.; Pesacreta, T.; Rials, T. 2004: Effect of refining pressure and resin viscosity on resin flow, distribution, and penetration of MDF fibers. 7th Pacific Rim Bio-Based Composites Symposium. 31 October – 2 November 2004, Nanjing, China, Proceedings, S. 227-239

- Großmann, C. M. 2002: Marktchancen für hitzebehandeltes Holz in Deutschland: Eigenschaften, Einsatzmöglichkeiten, Verfügbarkeit und Marketing. Abschlussbericht des Instituts für Forstpolitik der Universität Freiburg, November 2002
- Halse, O. M. 1926: Bestimmung von Zellstoff und Holzstoff im Papier. Papier-Journalen 14, (10), S. 121-123
- Hasch, J.; Grunwald, D. 2006: Formaldehydabgabe industriell hergestellter Holzpartikel. Holz-Zbl. 132, S. 819
- Haunan, S.; Høydahl, H.E.; Lorås, V.; Bøhmer, E. 1975: Die Entwicklung von thermomechanischem Holzstoff. Das Papier, 29, (7), S. 269-274
- Hayashi, T.; Miyatake, A.; Fu, F.; Kato, H.; Karube, M.; Harada, M. 2005: Outdoor exposure tests of structural laminated lumber (II): Evaluation of the strength properties after nine years. J. Wood Sci. 51, S. 486-491
- Hennecke, U. 2005: Beiträge zur Feuchtebeständigkeit und Hydrolyseresistenz von mitteldichten Faserplatten (MDF). Diss. forest, Göttingen 2005
- Hennecke, U.; Roffael, E.; Schneider, T. 2005: Alternativ-Aufschluss; MDF aus Buchenholz – Einfluss von Feuchte und Beleimung, MDF-Magazin, Supplement von Holz-Zbl. und HK S. 80–84
- Hinselmann, D.; Jentsch, S.; Drechsler, W. 1964: Versuche zur Herstellung von mitteldichten Faserplatten nach dem Trockenverfahren. Holztechnologie 5, S. 219-224
- Hiziroglu, S.; Bauchongkol, P.; Fueangvivat, V.; Soontonbura, W.; Jarusombuti, S. 2007: Selected properties of medium density fibreboards (MDF) panels made from bamboo and rice straw. Forest Products Journal, 57, (6), S. 47-50
- Hof, H. 2007: Kronospan Sanem, persönliche Information vom 22.10.2007
- Hoferichter, E. 1996: Untersuchung des Aushärtungsprozesses von Spanformteilen mit speziellen Prüfmethode unter Berücksichtigung der Wechselwirkung zwischen Bindemittel – Härter – System und den erzielbaren Werkstoffeigenschaften zur Optimierung des Prozesses. ihd-Forschungsbericht, Dresden, 60 S.
- Hoferichter, E.; Kehr, E. 1996: Formaldehydgehalt und physikalisch-mechanische Eigenschaften von MUF-Harz-gebundenen Spanwerkstoffen. Holz-Zbl. 122, S. 2074
- Hsu, W. E.; Schwald, W.; Schwald, J.; Shields, J. A. 1988: Chemical and physical changes required for producing dimensionally stable woodbased composites. Part 1: Steam pre-treatment. Wood Sci. Technol. 22, No. 3, S. 281-289
- Hüttermann, A.; Kharazipour, A. 1993: Die pflanzliche Zellwand als Vorbild für Holzwerkstoffe: Naturorientierte Herstellung von Spanplatten und Faserplatten – Stand der Technik und Perspektiven. Frankfurt/M. Sauerländer Verlag, 100 S., 58 Abb., 6 Tab.
- IARC 2004: IARC classifies Formaldehyde as carcinogenic to humans. International Agency for Research on Cancer. Press release nr. 153, 15.06.2004
- Jaako Pöyry 2001: Struktur und Marktanalyse der Holzverbrauchenden Industrie in NRW – 1. Absatzstufe. www.wald-und-holz.nrw.de/45Wald_und_Holz/10_Cluster_Forst_Holz/6_1_Absatzstufe.pdf
- Jayme, G., 1958: Properties of Wood Celluloses. II. Determination and Significance of Water Retention Value, Tappi, vol. 41, p. 180A-182A
- Jayme, G.; Büttel, H 1968: Vergleich verschiedener Verfahren zur Pentosanbestimmung einschließlich einer neuen ISO-Methode. Das Papier, 22, (5), S. 249-253
- Jensen, U.; Kehr, E. 1999: Hygroskopisches Verhalten von MDF und Spanplatten. Holz-Zbl. 125, S. 350-352

- Jokerst, R. W. 1989: Weather ability of xylitol-modified phenolic-bonded flakeboard. *Forest Products Journal*, 39, (10), S. 35-38
- Josefsson, T.; Lennholm, H.; Gellerstedt, G. 2002: Steam explosion of aspen wood. Characterisation of reaction products. *Holzforschung* 56, S. 289-297
- Kantner, W. 2002: Dynea Krems, persönliche Informationen vom 28.09.2002
- Kharazipour, A.; Hüttermann, A.; Luedemann, H.D. 1997: Enzymatic activation of wood fibres as a means for the production of wood composites. *J. Adhesion Sci. Technol.* Vol. 11. No. 3. S. 419-427
- Kehr, E. (Federführung) et al. 1975: *Werkstoffe aus Holz und andere Werkstoffe der Holzindustrie*, Fachbuchverlag, Leipzig
- Kehr, E. 1977: Verfahren zur Herstellung von Faserplatten mittlerer Dichte - MdF. *Holztechnologie* 18, S. 67-76
- Kehr, E. 1990: *Lexikon der Holztechnik* (Autorenkollektiv). Fachbuchverlag, Leipzig
- Kehr, E. 1993: Beitrag zur Kurzzeitfestigkeit und zum Dauerstandverhalten von MDF der ersten Generation. *Holz Roh-Werkstoff* 51, S. 229-234
- Kehr, E. 1995: Zur Verwendung schnellwachsender Holzarten für die Herstellung von MDF und Spanplatten am Beispiel von Pappel und Baumweide. *Holz-Zbl.* 121, Teil 1, S. 1010-1013; Teil 2, S. 1064-1066
- Kehr, E.; Jensen, U. 1971: Verfahrenstechnologie Mitteldichte Faserplatte. Einfluß der Faserstoffqualität in Deck- und Mittelschicht. Unveröff. F/E-Bericht, Institut für Holztechnologie, Dresden
- Kehr, E.; Jensen, U. 1996: MDF - ein Werkstoff des Möbelbaus. DGfH-Tagungsband zur Fachtagung „Industrielle Möbelfertigung“, Dresden, 17./18.06.1996, S. 63-80
- Kehr, E.; Tobisch, S. 2002: Holzwerkstoffe – Entwicklungen in Dresden. *Holzwerkstoffe und Werkstofftechnologie im Institut für Holztechnologie Dresden*. *Holz-Zbl.* 128, Teil 1: S. 986-987, Teil 2: S. 1106, Teil 3: S. 1315, 1318; Teil 4: S. 1555-1556
- Kehr, E. 2006: Faserplatten – Entwicklungen am IHD Dresden. Überblick zu Forschungsschwerpunkten im Bereich der Faserplattentechnologie (Nass- und Trockenverfahren) – Teil 1, *Holz-Zbl.* 132, S. 1027-1026, Überblick zu Forschungsarbeiten auf dem Gebiet der MDF-Herstellung – Teil 2, *Holz-Zbl.* 132, S. 1459-1460
- Kleiner, J. 2008: Kronospan Lampertswalde, persönliche Informationen vom 19.03.2008
- Kleinert, T. N. 1964: Coalescence Versus Condensation of the Lignin in Wood in Sulphite Pulp-
ing. *Holzforschung*, 18, (5), S. 139-142
- Kleinert, T. N.; Marraccini, L. M. 1964: Thermal Coalescence of the Lignin Phase in Wood. *Tap-
pi*, 47, (10), S. 605-609
- Knauf, M.; Frühwald, A. 2004: *Trendanalyse Zukunft Holz*, Delphistudie zur Entwicklung der deutschen Holzindustrie. Bielefeld: Knauf Consulting Gbr., 113 S.; 63 Abb., 18 Lit.
- Knauf, H.; Knauf, M.; Frühwald, A. 2009: *Trendanalyse Zukunft Holz II*, Delphistudie zur Entwicklung der deutschen Holzwirtschaft. Grundausswertung und Auswertung des Längs-
schnitts. Studie von Knauf Consulting im Auftrag des Holzabsatzfonds (HAF), Bielefeld, 80 S.
- Knust, C.; Haller, P.; Krug, D.; Tobisch, S. 2008: Einsatzmöglichkeiten von Plantagenholz. *Schweiz Z Forstw* 159, Heft 6, S. 146-151
- Korte, H. 2006: Aus einem Guss; Technologien zur Herstellung von Holz-Kunststoff-Verbund-
werkstoffen. *HK, Holz-Kunststoffverarb.* 41, Heft 4, S. 24-29

- Kramer, J. 1993: PUR-gebundene Holzwerkstoffplatten. HK, Holz-Möbelindustrie 28, S. 1276, 1277
- Krug, D. 1999: IHD Dresden, Fotos vom 13.-14.04.1999
- Krug, D. 2001a: Modification of Swelling in MDF. 3rd European Wood-Based Panel Symposium. 12-14 September 2001, Hanover, Proceedings, 15 S.
- Krug, D. 2001b: Industrierversuche zur Kombinationsbeileimung bei Kronospan Lampertswalde, unveröff. Untersuchungsberichte des IHD, Juli 2001
- Krug, D. 2002: Improvement of moisture resistance by higher pulping pressures and/or longer pulping times at the fibre-fabrication process. International Symposium on Wood Based Materials, Wood Composites and Chemistry, COST Action E13 "Wood Adhesion and Glued Products" 19-20 September 2002, Vienna, Austria, Proceedings, p. 337-340
- Krug, D. 2005: Kleb-Stoff. Bindemittelfreie Faserplatten im Focus der IHD-Forschung. MDF-Magazin, Supplement aus Holz-Zbl. und HK, S. 20-25
- Krug, D. 2007: Bindemittel auf Naturstoffbasis für die Holzindustrie – Derzeitiger Stand der Technik und künftige Entwicklungsmöglichkeiten, Symposium Holz Innovativ – Innovative Holzwerkstoffe für neue Anwendungen, Rosenheim, 18./19. April 2007, Tagungsband
- Krug, D.; Kehr, E. 2000: Quellungsvergütung – ihd untersucht MDF-Aufschlussbedingungen. MDF-Magazin. Supplement von Holz-Zbl. und HK, S. 18-23
- Krug, D.; Kehr, E. 2001: Einfluss des Aufschlussdruckes bei der Faserstoffherstellung auf die Quellungsvergütung von MDF. Holz Roh-Werkstoff 59, S. 342-343
- Krug, D.; Mäbert, M. 2007: MDF-Basisarbeit. Laubholz als Rohstoffalternative für Faserplatten im IHD-Test. MDF&Co-Magazin, Supplement aus Holz-Zbl. und HK, S. 80-85
- Krug, D.; Mäbert, M. 2010: Optimierung von Pressparametern und Holzwerkstoffeigenschaften durch die Anwendung der IVHF-Technologie. unveröff. IHD Forschungsbericht, Dresden
- Krug, D.; Roffael, E.; Dix, B.; Schneider, T.; Stephani, B. 2004: Comparative Studies on the Influence of Gluing in the Blowline and Blender on the Physical-Mechanical Properties of MDF and Its Dimensional Stability. 4th European Wood-Based Panel Symposium. 15-17 September 2004, Hanover, Proceedings, 10 p.
- Krug, D.; Stephani, B.; Roffael, E.; Dix, B. 2006b: Zur Feuchtebeständigkeit und Hydrolyseresistenz von mitteldichten Faserplatten. Teil 4: Verhalten von MDF bei Bewitterung. holz-technologie 47, Heft 5, S. 12-19
- Krug, D.; Tobisch, S. 2001: Der Witterbericht – ihd untersucht Witterungsbeständigkeit quellungsvergüteter MDF. MDF-Magazin. Supplement von Holz-Zbl. und HK, S. 38-42
- Krug, D.; Tobisch, S. 2002: Influence of the Fibre Pulping Conditions and the Resin Type of the Weathering Resistance of MDF in Exterior Use. 6th European Panel Products Symposium. 9-11 October 2002, Llandudno, Wales, UK, Proceedings, S. 38-50, ISBN 1 84220 0402
- Krug, D.; Tobisch, S. 2006: Holzfaseraufschluss bei hohen Temperaturen und Drücken – Einfluss auf die Eigenschaften von MDF. Forstwissenschaftliche Tagung, Tharandt – Dresden, 20.-22.09.2006, Tagungsband, S. 94, ISBN 3-86005-541-0
- Krug, D.; Tobisch, S.; Heep, W. 2006: New low-emitting resins for moisture-resistant-bonded wood-based panels. 5th European Wood-Based Panel Symposium. 4-6 October 2006, Hanover, Proceedings, 10 S.
- Körner, S.; Kühne, G.; Pecina, H. 1992: Biologisch-ökologisch-orientierte Holzwerkstoffherstellung. Energieeinsparung und Bindemittelreduzierung bei der Faserplattenherstellung sind wesentliche Ziele. HK 9, S. 1004-1007

- Kühne, G.; Dittler, B. 1999: Enzymatische Modifizierung nachwachsender lignocellulöser Rohstoffe für die Herstellung bindemittelfreier Faserwerkstoffe. Holz Roh-Werkstoff 57, S. 264
- Kollman, F. 1951: Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe. Springer-Verlag Berlin Göttingen Heidelberg, Band 1
- Kollman, F. 1955: Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe. Springer-Verlag Berlin Göttingen Heidelberg, Band 2
- Kollmann, F.; Fengel, D. 1965: Änderungen der chemischen Zusammensetzung von Holz durch thermische Behandlung. Holz Roh-Werkstoff 23, S. 461-468
- Kollmann, F.; Schneider, A. 1963: Über das Sorptionsverhalten wärmebehandelter Hölzer. Holz Roh-Werkstoff 21, S. 77-85
- Koran, Z.; Kokta, B.V.; Valade, J.L. Law, K.N. 1978: Fibre characteristics of masonite pulp. Pulp & Paper Canada, Vancouver, 79, (3), S. 75-81
- Lampert, H. 1960: Die Herstellung von Faserplatten aus Rapsstroh. Holztechnologie 1, S. 15-22
- Lampert, H. 1967: Faserplatten. Rohstoffe, Herstellungsverfahren, Eigenschaften. Fachbuchverlag Leipzig
- Lehmann, W., 1977: Durability of composition board products. Proceedings 11th W. S. U. Symp. Particleboard, Pullman, USA, S. 351-382
- Lehnen, R.; Wolff, St.; Patt, R. 2000: Aktivierung fasereigener Bindekräfte mit Ozon. BFH-Nachrichten, Heft 4, S. 28-29
- Lehnen, R.; Janzon, R. 2005: Aushärtungsverhalten und Hydrolysebeständigkeit von Lignin-MUF-Klebstoffen. BFH-Nachrichten, Hamburg 43, 4, S. 29-30
- Lilie, B.; Krug, D.; Mäbert, M.; Mraz, P. 2006: MDF-Heimspiel. Dresden macht Dampf – neuer Andritz-Refiner im IHD installiert. MDF-Magazin, Supplement aus Holz-Zbl. und HK, S. 68-72
- Lilie, B.; Krug, D. 2008: Laborversuche zum Einfluss der Aufschlussintensität bei der Faserstoffherstellung auf den Energieaufwand für die Zerfaserung, unveröff. Untersuchungsbericht des IHD, April 2008
- Lundgren, G. 1994: Trends in modern MDF production. Proceedings 28th W. S. U. Symp. Particleboard/Composite Materials, Pullman, USA, S. 125-139
- Maloney, T. M. 1977: Modern particleboard & dry-process fiberboard manufacturing. San Francisco: Miller Freeman Publ. Inc. 1977, 672 S.
- Mannström, B. 1972: Charakterisierung des Refiner-Holzstoffes. Das Papier, Darmstadt 26, (10a), S. 657-664
- Mantau, U.; Wierling, R.; Weimar, H. 2003: Holzwerkstoffindustrie in Deutschland. Umfassende Studie der Universität Hamburg zu regionalen Produktionskapazitäten und Rohstoffeinsatz. Holz-Zbl. 129, S. 231, 234
- Mantau, U. 2008: Holzrohstoffbilanz Deutschland, Szenarien des Holzaufkommens und der Holzverwendung bis 2012. Hamburg, 2008, 79 S.
- Mantau, U. 2009: Holzmobilisierung beleibt ein strategisches ziel; Szenarien der Holzmarkt- und Holzrohstoffentwicklung 2008 bis 2112 – Vorrat stieg auch 2005 bis 2007 weiter an. Holz-Zbl. 135, S. 819-820
- Marcinko, J. J.; Newman, W. H.; Phanopoulos, C. ; Sander, M. A. 1995: The nature of the MDI/WOOD bond. Proceedings 29th W. S. U. Symp. Particleboard/Composite Materials, Pullman, S. 175-183

- Marutzky, R. 2001: Holzwerkstoffindustrie im Jahr 2020. HK Holz u. Kunststoffverarb. 36, Heft 7-8, S. 52-54
- Marutzky, R. 2006: Adhesives: Ecological and Technological Developments and their Influence on the European Wood-based Panel Industry. 5th European Wood-Based Panel Symposium. 4-6 October 2006, Hanover, Proceedings, 13 S.
- Marutzky, R. 2009: Innovative Holzwerkstoffe – Zukunftsweisende Lösungen und Anwendungen. Einführung/Herausforderungen und Frage der Emissionen. Symposium Holz Innovativ, Rosenheim, 01./02. April 2009, Tagungsband und Vortrag
- Marutzky, R.; Roffael, E. 1977: Über die Abspaltung von Formaldehyd bei der thermischen Behandlung von Holzspänen. Teil 1: Modellversuche. Holzforschung 32, (1), S. 8-12
- Marutzky, R.; Thole, V. 2003: Eminente Bedeutung, Stand der Technik und aktuelle Entwicklungen bei Holzwerkstoffen. HK Holz u. Kunststoffverarb. 38, Heft 5, S. 34-36
- Mason, W. H. 1927: Pulp and board from Steam Exploded Wood. Paper Trade J., S. 131
DRP 493061, 496360, 661793
- May, W.D. 1974: The measurement of temperature in a chip refiner. Svensk Papperstidning, Stockholm 77, (13), S. 470-479
- May, H.-A., 1976: Zur Feuchtebeständigkeit verschiedener Spanplattenleime. Holz-Zbl. 96, S. 1298-1299
- Mattson, A. 2006: Latest Developments in Refiner Technology – Introduction of the EVO-Defibrator. 5th European Wood-Based Panel Symposium. 4-6 Octobre 2006, Hanover
- Mäbert, M.; Krug, D. 2009: Tangential versus Radial. IHD prüft Einfluss der Mahlgutabführung auf die Faserqualität. MDF & Co-Magazin, Supplement aus Holz-Zbl. und HK, S. 64-67
- Mc Millin, C.W. 1969: Wood chemical composition as related to properties of hand sheets made from loblolly pine refiner ground wood. Wood Science and Technology, New York Vol. 3, S. 232-238
- MDF Industry Update 2001: Metso Panelboard. www.metsopanelboard.com
- Medite 1999: Firmenprospekt von Willamete Europe (Irland) zu MDF MEDITE Exterior (Medex)
- Mehlhorn, L. 1987: Die Wechselbeziehung von Bauteilverhalten und zeitgeraffter Wettersimulation. Holz Roh-Werkstoff 45, S. 105-109
- Metso Panelboard 2007: persönliche Information zur LIGNA 2007, Hannover, 15.05.2007
- Metso 2007: The Defibrator revolution rolls on. Messeprospekt zur LIGNA 2007, Metso Panelboard Oy, Nastola, Finnland
- Meyer, B. Boehme, C. 1994: Formaldehydabgabe von natürlich gewachsenem Holz. Holz-Zbl. 120, S. 1965, 1971-1972
- Meyerhöfer, C. 2010: Deutsche Pelletproduktion steigt auf 1,6 Mio. t; Verband prognostiziert leichte Zunahme von Produktion und Kapazität in 2010. Holz-Zbl. 136, S. 30
- Michanickl, A.; Boehme, C. 1997: Recycling von MDF und daraus hergestellten Produkten. MDF-Magazin, Supplement aus Holz-Zbl. und HK, S. 52-59
- Militz, H. 2000: Alternative Schutz- und Behandlungsverfahren. 22. Holzschutztagung der DGfH, Bad Kissingen, 17./18.10.2000
- Mirako 2009: Mitteramskogler GmbH. www.mirako.at Stand: 24.06.2009
- Mohebbi, B.; Ilbeighi, F.; Kazami-Najafi, S. 2008: Influence of hydrothermal modification of fibers on some physical and mechanical properties of medium density fiberboard (MDF). Holz Roh-Werkstoff 66, S. 213-218
- Mohr, R. 2004: Metso Panelboard Pfungstadt, persönliche Informationen vom 10.03.2004

- Mratz, P. 2006: Andritz Wien, persönliche Informationen vom 03.10.2006
- Myers, G.E. 1982: Hydrolytic Stability of Cured Urea-Formaldehyde Resins. *Wood Science*, 15, S. 127-138
- Myers, G.E.; Koutsky, J.A. 1987: Procedure for measuring formaldehyde liberation from formaldehyde-based resins. *Forest Products Journal*, 37, (9), S. 56-60
- Nagy, V. 1964: Erkenntnisse und Erfahrungen auf dem Gebiet zweiseitig glatter Faserplatten nach dem Trockenverfahren ohne zusätzliche Bindemittel in der ČSSR. *Holztechnologie* 5, S. 147-151
- Nagy, V. 1969: Zum Einfluss verschiedener Faktoren auf Technologie, Herstellung und Qualität von nach dem Trockenverfahren hergestellten Faserplatten. Dissertation, Košice
- Nelson, N.D. 1973: Effect of wood and pulp properties on medium-density, dry-formed hardboard. *Forest Products Journal*, 23, (9), S. 58-64
- Neusser, H. 1969: Freilandversuche mit Span- und Faserplatten. *Holzforschung, Holzverwertung* 21, S. 3-8
- Neußer, H. 1971: Die Bedeutung der genormten und der nicht genormten Eigenschaften von Holzwerkstoffen vor allem für ihre Anwendung im Bauwesen. *Holzforschung, Holzverwertung* 23, S. 119-126
- Nicholls, G.A. 1970: An interpretative view of refiner pulping. *Wood Science and Technology*, New York Vol. 4, S. 292-300
- Niemz, P. 2008: Verfahren bekannt, aber wenig genutzt. *Holz-Zbl.* 134, S. 312
- Nikitin, N. 1955: Die Chemie des Holzes. Springer-Verlag Berlin Göttingen Heidelberg
- Norita, H.; Kojima, Y.; Suzuki, S. 2008: The aging effect of water immersion treatment in wet-bending for standardized of wood panels. *J. Wood Sci.* 54 (2), S. 121-127
- N. N. 1997: Eukalyptusträger mit 0 % Formaldehyd. *B + H*, Nr. 2, S. 15
- N. N. 1998: Intensive Fasersichtung. *MDF-Magazin. Supplement von Holz-Zbl. und HK*, S. 88-89
- N. N. 2000: Einblicke ins Europawerk. *MDF-Produktion läuft auf hohem Niveau rund um die Uhr. MDF-Magazin. Supplement von Holz-Zbl. und HK*, S. 30-36
- N. N. 2001: Sparkonzept. Innovative Siempelkamp-Technik steigert Wirtschaftlichkeit bei der MDF-Erzeugung. *MDF-Magazin. Supplement von Holz-Zbl. und HK*, S. 58-62
- N. N. 2003a: Auch bei Laubindustrieholz zeichnen sich weitere Preissteigerungen ab. *Holzwerkstoffindustrie verstärkt ihren Laubholzeinsatz. EUWID Holz*, Nr. 40, S. 7
- N. N. 2003c: Rohstoffe: Bedarf steigend. *MDF Magazin, Supplement von Holz-Zbl. und HK*, S. 8
- N. N. 2003d: Zuwächse für MDF in schwierigem Umfeld. *MDF Magazin, Supplement von Holz-Zbl. und HK*, S. 8-10
- N. N. 2004b: Zellstoffwerk Stendal hat wie geplant Ende Juli mit Probetrieb begonnen. *EUWID Holz*, Nr. 34, S. 1, 10
- N. N. 2004d: VHI fordert: Keine Ausweitung des EEG. Holzwerkstoffindustrie befürchtet weitere Bevorzugung der energetischen Verwertung werkstofflich nutzbarer Holzsortimente. *Holz-Zbl.* 130, S. 143
- N. N. 2005: Ökospanplatten erobern Außenbereich. Stabil und feuchtebeständig dank Tanninen. www.fnr.de, 19.01.2005
- N. N. 2006b: Agrarpolitischer Bericht der Bundesregierung 2006. Berlin 22.02.2006
- N. N. 2006c: Produktionskürzungen finden bereits statt. *Holz-Zbl.* 132, S. 1083

- N. N. 2006d: Fast lane. The new generation of high-speed thin fibreboard lines. MDF-Magazin , Supplement von Holz-Zbl. und HK, S. 52-53
- N. N. 2006e: BfR empfiehlt neue Einstufung von Formaldehyd. Nr. 23, S. 9
- N. N. 2007a: Was ist der "ökologische Waldumbau"? www.zukunftswald.de
- N. N. 2007b: Niedersächsische Landesforsten ziehen Zwischenbilanz nach 15 Jahren LÖWE. LÖWE prägt den Landeswald. Was ist der "ökologische Waldumbau" ? www.infoholz.de 04.10.07
- N.N. 2007c: Holzwerkstoffindustrie will Diskussion über Emissionswerte bald abschließen. Neue Formaldehyd-Emissionsklasse soll noch 2007 festgelegt werden. Nr. 30, S. 1, 14
- N. N. 2008a: Ikea und „Große 5“ einigen sich bei Formaldehyd. Schweden kaufen ab September nur noch Platten mit halbiertem E1-Wert. Holz-Zbl. 134, S. 116
- N. N. 2008b: Gegendarstellung: Pfeleiderer zu Formaldehydwerten. Holz-Zbl. 134, S. 165
- N. N. 2008c: Pelletbranche prognostiziert stärkeres Wachstum. Produktionskapazität für Pellets hat sich im Jahr 2007 gegenüber 2005 vervierfacht – Auslastung liegt nur bei 50 %. Holz-Zbl. 134, S. 290
- N. N. 2008d: Laminatbodenexport aus China hat sich erstmals rückläufig entwickelt. Wettbewerbsdruck auf dem chinesischen Markt hat zugenommen. EUWID Holz, Nr. 12, S. 1, 12
- N. N. 2008e: Sunds MDF Technologies erhält drei Evo Jet-Aufträge. EUWID Holz, Nr. 14, S. 18
- N. N. 2008f: Innovatives auf der Xylexpo. Zerkleinerungstechnik. Pallmann-Refiner „Eco Advanced“, Holz-Zbl. 134, S. 547
- N. N. 2008g: Ikea hat Spezifikationen IoS-MAT-0003 in einer aktualisierten Fassung vorgelegt. Neue Formaldehydgrenzwerte sollen ab dem 1. September 2008 gelten. EUWID Holz, Nr. 20 S. 1, 9
- N. N. 2008h: Mit der Platte direkt auf die Mauer. Außenwanddämmung mit der Inthermo-Holzfaserdämmplatte „HFD-Exterior Massiv“, Holz-Zbl. 134, S. 315
- N. N. 2008j: Glunz produziert ab 2009 nach EPF-S-Standard. Egger ab Januar mit EPF-S-Platten am Markt. Holz-Zbl. 134, S. 1097
- N. N. 2008k: Reinheitsgebot. Scheuch-Luft- und Umwelttechnologie bei FBB in der Praxis. MDF & Co-Magazin, Supplement aus Holz-Zbl. und HK, S. 38-45
- N. N. 2009a: Weltweit wurden 353 Anlagen nach CARB zertifiziert. EUWID Holz, Nr. 10, S. 13
- N. N. 2009b: IKEA will in der nächsten IoS-MAT auf Perforator-Grenzwerte verzichten. EUWID Holz, Nr. 10, S. 1, 12
- N. N. 2009c: Zur Zeit sind in Deutschland rund 235 Holz-Biomassekraftwerke in Betrieb. EUWID Holz, Nr. 10, S. 11
- N. N. 2009d: Laminatbodenhersteller rechnen auch 2009 mit weiteren Absatzrückgängen. EUWID Holz, Nr. 4, S. 1
- N. N. 2009e: Holzwerkstoffe im Minus. Deutsche Holzwerkstoffbranche meldet Produktionsrückgänge. Holz-Zbl. 135, S. 525-526
- N. N. 2009f: Verhandlungen von Accsys und Medite abgeschlossen. EUWID Holz, Nr. 29, S. 14
- Okuda, N.; Horie, K.; Sato, M. 2006: Chemical changes of kenaf core binderless boards during hot pressing. Part I: influence of the pressing temperature condition. Part 2: effects on the Binderless board properties. J. Wood Sci. 52 (3), S. 244-248, 249-254
- Okuda, N.; Sato, M. 2007: Bond durability of kenaf core binderless boards; Part I: Two-cycle accelerated aging boil test. J. Wood Sci. 53 (2), S. 139-142

- Okuda, N.; Sato, M. 2008: Bond durability of kenaf core binderless boards; Part II: Outdoor exposure test. *J. Wood Sci.* 54 (1), S. 36-44
- Ohlmeyer, M.; Leithoff, H.; Paul, W.; Fallahi, R. 2003: Eigenschaftsoptimierung von Holzwerkstoffen in der Außenanwendung. *BFH Nachrichten* 41/4, S. 28
- Ohlmeyer, M.; Hasener, J.; Schmid, H. 2006: New methods to determine fibre quality for MDF-production. 10th European Panel Products Symposium. 11-13 October 2006, Llandudno, Wales, UK, Proceedings, S. 221-231, ISBN: 184220 0941
- Onisko, W. 1972: Untersuchung des Holzrohstoffes und des Prozesses der mechanischen Defibrrierung von Holz. *Rozprawy Naukowe*, Warszawa
- Onnuseit, H. 2007: Requirements on modern adhesives – how can renewable resources help? 6. internationales Symposium „Werkstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen“ naro.tech, 06. – 07.09.2007, Erfurt, Tagungsband
- Opitz, G. 2007: Kronochem Lampertswalde, persönliche Informationen vom 12.01.2007
- Park, B. S.; Furono, T.; Uehara, T. 1996: Histochemical changes of wood surfaces irradiated with ultraviolet light. *Jpn. Wood Res. Soc.* 42, 1, S. 1-9
- Paul, W.; Ohlmeyer, M.; Leithoff, H.; Boonstra, M. J.; Pizzi, A. 2006: Optimising the properties of OSB by a one-step heat pre-treatment process. *Holz Roh-Werkstoff* 64, S. 227-234
- Pecina, H. 1979: Einige Gedanken über die Oberflächenaktivierung zur klebstofflosen Faser-Faser-Bindung bei der Holzwerkstoffherstellung. *Wissenschaftliche Zeitung der TU Dresden*, 28, (6), S. 1499-1502
- Pecina, H. 1980: Der Einfluß einiger technologischer Parameter auf die Bindung lignocellulosehaltiger Fasern untereinander. *Holztechnologie* 21, S. 147-153
- Pecina, H. 1981a: Eigenschaftsänderung durch chemische Einflussnahme auf die Grundbestandteile des Holzes, Teil I: Auswirkungen auf die Faserbindungen im Vollholz, *Holztechnologie* 22, S. 45-51; Teil II: Veränderte Eigenschaften bindemittelfreier Faserplatten aus chemisch behandeltem Faserstoff, *Holztechnologie* 22, S. 148-154
- Pecina, H. 1981b: Zum Einfluß der thermischen Vorgeschichte des Holzes auf die Bindefähigkeit von Faserverbänden. *Holztechnologie* 22, S. 221-227
- Pecina, H.; Krauss, A. 1987: Untersuchungen zur Defibrierbarkeit von mit Gammastrahlern behandeltem Holz. *Holzforsch. Holzverwertung* 39, Heft 3, S. 66-69
- Polley, H.; Kroiher, F. 2006: Entwicklung des potenziellen Rohholzaufkommens; *Holz-Zbl.* 132, S. 979-980
- Prantz, E. 2007: Kronochem Lampertswalde, persönliche Informationen vom 06.07.2007
- Prescher, E. 1960: Halbmechanischer Versuchszersetzungsstand – Veränderung und Erprobung des Versuchsdefibrators (0-85/8), unveröff. Bericht des IHF Dresden, November 1960
- Rhodes, G. 1996: Historical Development of Euro MDF Board. Vortrag bei der 10. Generalversammlung Euro MDF Board, Venedig, 13.06.1996
- Risi, W. 2002: Verhalten von bewitterten Dreischichtplatten. Feuchteschützende Oberflächenbehandlung, absperrender Plattenaufbau sowie Kantenschutz für Standdauer entscheidend. *Holz-Zbl.* 128, S. 1444
- River, B. H. 1994: Outdoor aging of wood-based panels and correlation with laboratory aging. *Forest Products Journal*, 44, (11/12), S. 55-64
- Roffael, E. 1987: Einfluss der Trocknungsbedingungen auf Kiefernspäne und ihre Verleimbarkeit mit UF-Harzen. *Holz Roh-Werkstoff* 45: 449-456
- Roffael, E. 1989 a: Zur Bildung von flüchtigen organischen Säuren aus Holzspänen und Holzspanplatten. *Holz-Zbl.* 115: 112, 114-115

- Roffael, E. 1989 b: Abgabe von flüchtigen organischen Säuren aus Holzspänen und Holzspanplatten. Holz Roh-Werkstoff 47, S. 447-452
- Roffael, E. 1992: Einfluß des Einfrierens von Wasser in Zellstoffen auf ihren WRV-Wert, DP-Wert und Röntgen-Kristallinitätsindex (KI). Holz Roh-Werkstoff 45, S. 261
- Roffael, E.; Dix, B.; Bär, G.; Bayer, R. 1994, 1995: 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 Roh-Werkstoff 52, S. 239-246; Teil 2: Eigenschaften von MDF aus Buchen-Faserstoff. Holz Roh-Werkstoff 52, S. 293-298; Teil 3: Eigenschaften von aus Kiefern-Faserstoff hergestellten MDF. Holz Roh-Werkstoff 53, S. 8-11
- Roffael, E. ; Dix, B.; Krug, D. 2003: Schlussbericht zum AiF-Forschungsvorhaben 12423: Untersuchungen zum Einfluss der Aufschluss- und Beileimungsbedingungen bei der Herstellung von thermomechanischen Holzstoffen aus Nadel- und Laubholz auf die Gebrauchseigenschaften, insbesondere die Formstabilität und das Dauerstandverhalten von mitteldichten Faserplatten. Göttingen, Braunschweig, Dresden, 31.03.2003
- Roffael, E.; Dix, B.; Hennecke, U.; Krug, D.; Stephani, B. 2006a: CTMP versus TMP in moisture resistant bonded MDF. 10th European Panel Products Symposium. 11-13 October 2006, Llandudno, Wales, UK, Proceedings, S. 33-46, ISBN: 184220 0941
- Roffael, E.; Dix, B.; Krug, D.; Stephani, B.; Hennecke, U. 2006b: Zur Feuchtebeständigkeit und Hydrolyseresistenz von mitteldichten Faserplatten. Teil 2: Einfluss des Aufschlussverfahrens und des Bindemittels auf die Hydrolysebeständigkeit von MDF. holztechnologie 47, Heft 3, S. 25-31
- Roffael, E.; Dix, B.; Schneider, T. 2001: Zur Feuchtebeständigkeit von Verleimungen mit polyphenolischen Extraktstoffen verschiedener Herkunft. 4. IHD-Holzwerkstoffkolloquium „Feuchtebeständigkeit von Holzwerkstoffen“, 06.-07.12.2001, Dresden, Tagungsband
- Roffael, E.; Dix, B.; Schneider, T. 2002: Methode zur Erfassung der Benetzung von Holzfasern. Holz Roh-Werkstoff 60, S. 347-348
- Roffael, E.; Dix, B.; Schneider, T. 2007: Influence of pulping process on the emission of formaldehyde and volatile organic acids from pulps and medium density fibreboards (MDF). Holz Roh-Werkstoff 65, S. 145-148
- Roffael, E.; Hennecke, U.; Dix, B.; Stephani, B.; Krug, D. 2006c: Zur Feuchtebeständigkeit und Hydrolyseresistenz von mitteldichten Faserplatten. Teil 5: Vakuumvorbehandlung bei Zyklustest (V313-Test) und Kochtest (V100-Test). holztechnologie 47, Heft 6, S. 26-30
- Roffael, E.; Schneider, T.; Dix, B.; Buchholz, T. 2005a: Zur Hydrophobierung von mitteldichten Faserplatten (MDF) mit Paraffinen. Teil 1: Einfluss der chemischen Zusammensetzung des Paraffins und des Emulgatortyps auf die Hydrophobierung von MDF. Holz Roh-Werkstoff 63, S. 192-203
- Roffael, E.; Schneider, T.; Dix, B. 2005b: 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 Roh-Werkstoff 63, S. 272-277
- Roffael, E.; Schneider, T.; Dix, B.; Bär, G. 2005c: Zur Hydrophobierung von mitteldichten Faserplatten (MDF) mit Paraffinen. Teil 3: Methoden zur Erfassung der Hydrophobierung von Faserstoffen durch Paraffine. Holz Roh-Werkstoff 63, S. 278-284
- Roll, H. 2008: Refiner Layout, Dimensioning, practical Experience (Pallmann). 6th European Wood-Based Panel Symposium. 8-10 Octobre 2008, Hanover

- Roll, H. 2010: Optimierung des Faseraufschlusses im Refiner. Energierrelevante Aspekte der Refinerscheibentechnologie bei der MDF-Herstellung unter Berücksichtigung der Faserqualität. Holz-Zbl. 136, S. 423-424, 443-444
- Roux, M. L., Wozniak, E., Miller, E. R., Boxall, J., Böttcher, P., Kropf, F.; Sell, J. 1988: Natural Weathering of various surface coatings on five species at four European sites. Holz Roh-Werkstoff 46, S. 165-170
- Röhricht, Ch. 1998: Potential an land- und forstwirtschaftlicher Biomasse zur stofflich/energetischen Nutzung im Freistaat Sachsen. Tagungsbeitrag aus der 5. Internationalen Tagung „Stoffliche Nutzung nachwachsender Rohstoffe“, Chemnitz, 28.-29.10.1998
- Runkel, R. O. H. 1951: Zur Kenntnis des thermoplastischen Verhaltens von Holz. Holz Roh-Werkstoff 9, S. 41-53
- Salvadó, J.; Velásquez, J. A.; Ferrando, F. 2003: Binderless fiberboard from steam exploded *Miscanthus sinensis* L.: Optimization of pressing and pre-treatment conditions. Wood Sci. Technol. 37, S. 279-286
- Sandermann, W.; Augustin, H. 1963: Chemische Untersuchungen über die thermische Zersetzung von Holz. Erste Mitteilung. Stand der Forschung. Holz Roh-Werkstoff 21, S. 256-265
- Sandermann, W.; Augustin, H. 1964: Chemische Untersuchungen über die thermische Zersetzung von Holz. Dritte Mitteilung. Chemische Untersuchung des Zersetzungsablaufs. Holz Roh-Werkstoff 22, S. 377-386
- Sauerwein, P. 2007: Stoffliche versus energetische Nutzung von Holz – grundlegende Gedanken aus Sicht der Industrie. Vortrag 7. IHD- Holzwerkstoffkolloquium 13.12.2007
- Scheidung, W. 1999: Dämmstoffe aus Extruderfaserstoff – Stand und Perspektiven. 3. ihd-Holzwerkstoffkolloquium, Dresden, 09.12.1999, Tagungsband
- Scheidung, W. 2005: Derzeitiges und künftiges Laubholzaufkommen bei Wald-Industrieholz. Studie im Rahmen des IHD-Forschungsvorhabens „Verwendung von Laubholz als Rohstoffalternative zur Herstellung von MDF“, 12.10.2005, 10 S.
- Scheidung, W.; Krug, D. 2002: Verstärkter Einsatz von Laubholz? Hersteller signalisieren akuten Forschungsbedarf. HK, Holz u. Kunststoffverarb. 37, Heft 5, S. 52 –53
- Schiegl, C. 2004: Quantifizierung von Lignin aus Papierabwässern mittels Py-GC/MS und UV/VIS. Dissertation, München 2004
- Schletz, K.-P.; Wöstheinrich, A. 2000: Heißdampf für die kontinuierliche Plattenproduktion. Holz-Zbl. 120, S. 1632
- Schmidt, K.; Deppe, H.-J. 1996: Kurzzeitalterungen bei plattenförmigen Holzwerkstoffen. Holz Roh-Werkstoff 54, S. 403-406
- Schmidt, K. 1995: Beurteilungsschema der BAM für Holzwerkstoffe und andere plattenförmige Werkstoffe. BAM-Mitteilungen, Berlin
- Schneider, A. 1971: Untersuchungen über den Einfluss von Wärmebehandlungen im Temperaturbereich 100-200 °C auf Elastizitätsmodul, Druckfestigkeit und Bruchschlagarbeit von Kiefernspint und Buchenholz. Holz Roh-Werkstoff 29, S. 431-440
- Schneider, T. 1999: Untersuchungen über den Einfluss von Aufschlussbedingungen des Holzes und der Faserstofftrocknung auf die Eigenschaften von mitteldichten Faserplatten (MDF). Diss. forest, Göttingen 1999
- Schneider, T.; Roffael, E.; Dix, B. 2000: Einfluß von Holzaufschlussverfahren (TMP-, CTMP-Verfahren) und Aufschlussbedingungen auf die physikalisch-technologischen Eigenschaften von mitteldichten Faserplatten (MDF). Holz Roh-Werkstoff 58, S. 123-124

- Schneider, T.; Roffael, E.; Windeisen, E.; Wegener, G. 2004: Einfluss der Aufschlusstemperatur auf lösliche Kohlenhydrate bei der TMP-Herstellung. Holz Roh-Werkstoff 62, S. 321-322
- Schneider, T.; Dix, B., Roffael, E.; Erbreich, M. 2007: Zum Einfluss des Holzes sowie des Holzaufschlussverfahrens auf das Benetzungsverhalten von Kiefern- und Fichten-Fasern. Holz Roh-Werkstoff 65, S. 29-33
- Schulz, T. 2006: Strohbeimischung bei der Herstellung von MDF. Teilersatz von Holzfasern – Normwerte auch mit UF-Harz erfüllbar. Holz-Zbl. 132, S. 1179-1180
- Schäfer, M.; Roffael, E. 2000: On the formaldehyde release of wood. Holz Roh-Werkstoff 58, S. 259-264
- Siempelkamp 2005: Messeprospekt zur LIGNA 2005, Hannover
- Siempelkamp 2008: Wood-Fiber Insulation Board – Siempelkamp dry process.
www.siempelkamp.de/fileadmin/media/downloads_de/woodfiber.pdf
- Šisler, Z.; Kéda, M. 1962: Chemische Veränderungen des Holzes bei der Herstellung von Holzfasern im Trockenverfahren. Drevársky Výskum, Bratislava 7, (2), S. 159-174
- Soiné, H. 2001: Hartholz-MDF. Dieffenbacher stattet Frati-Standort in Rumänien aus. MDF-Magazin, Supplement von Holz-Zbl. und HK, S. 28-36
- Sörgel, C.; Mantau, U. 2006: Standorte der Holzwirtschaft – Holzwerkstoffindustrie - Abschlussbericht. Universität Hamburg, Zentrum Holzwirtschaft. Arbeitsbereich Ökonomie der Holz- und Forstwirtschaft. Hamburg, 2006
- Stamm, A. J.; Burr, H. K.; Kline, A. A. 1946: Heat stabilized wood (staywood). Rep. Nr. R. 1621. Forest Prod. Lab.
- Staudinger, H.; Reinecke, F. 1939: Über makromolekulare Verbindungen. 221. Mitteilung. Über den Polymerisationsgrad verschiedener Zellstoffe. Holz Roh-Werkstoff 2, S. 321-323
- Stähli; R. 1992: Holzkunde. Wald, Baum, Holz, Furnier. Eigenverlag: Richard Stähli, CH-8425 Oberembach, ISBN 3-9520274
- Steckel, V. 2008: Formaldehyd und seine Grenzwerte global betrachtet. Weltweiter Überblick und aktueller Stand der Diskussionen – „Technical Formaldehyde Conference“ in Braunschweig. Holz-Zbl. 134, S. 410-411
- Steckel, V. 2009: Formaldehydemissionen und ihre Regulierung. Holz-Zbl. 135, S. 307-308
- Stephani, B. 2006: IHD Dresden, Fotos vom 15.05.2006
- Steindl, H. 2010: Dynea Krems, persönliche Informationen vom 07.04.2010
- Suchsland, O.; Woodson, G.E.; Mc Millin, C.W. 1983: Effects of hardboards variables on fiberbonding. Forest Products Journal, 33, (4), S. 58-64
- Suchsland, O.; Woodson, G. E.; McMillin, Ch. W. 1986: Pressing of three-layer, dry-formed MDF with binderless hardboard faces. Forest Products Journal, 36, (1), S. 33-36
- Sundholm, Jan 1999: Papermaking Science and Technology. Book 5: Mechanical Pulping. Fapet Oy-Verlag, Helsinki, Finnland, ISBN 952-5216-05-5
- Šwidorski, J. 1963: Trockenverfahren zur Herstellung von Holzfasern ohne zusätzliche Klebstoffe. Holzindustrie 16, Heft 9, S. 271-274
- Thole, V. 2005: Stroh & Co. Einjahrespflanzen als Rohstoff für MDF – aktueller Stand. MDF-Magazin, Supplement aus Holz-Zbl. und HK, S.33-43
- Thömen, H.; Klueppel, A. 2008: An investigation on the permeability of different wood furnish materials. Holzforschung, 62, S. 215-222
- Tobisch, S. 2007: IHD Dresden, persönliche Informationen und Fotos vom 15.06.2007

- Unbehaun, H.; König, S.; Kerns, G.; Wagenführ, A. 2005: Entwicklung von bindemittelfreien MDF und Türformdecks unter Einsatz hydrolytischer Enzyme. Holztechnologie 46, S. 9-15
- Velásquez, J. A.; Ferrando, F.; Farriol, X.; Salvadó, J. 2003: Binderless fiberboard from steam exploded *Miscanthus sinensis* L.. Wood Sci. Technol. 37, S. 269-278
- Voith, J. M. 1943: Anlagen und Maschinen für Holzfaserplattenherstellung, Prospekt 314, Heidenheim
- Vorher, W.; Kibat, K.-D. 2007: Stoffliche und energetische Holznutzung können sich sinnvoll ergänzen. Holz-Zbl. 133, S. 803-804
- Wadsworth, J. 2005: Focus on MDF - Part 1: New investment returns to the western MDF industry. Wood Based International. Sevenoaks 25, (3), S. 13-19, - Part 2: China slows – rest of the world grows. Wood Based International. Sevenoaks 25, (4), S. 12-24
- Wadsworth, J. 2006: Focus on MDF - Part 1: Old mills, new owners – a sign of the time. Wood Based International. Sevenoaks 26, (3), S. 11-17
- Wagenführ, R. 1999: Anatomie des Holzes. DRW-Verlag
- Wessbladh, A. Mohr, R. 1999: Faserfeinheiten. Moderne Analysenmethoden liefern Online-Qualitätsindizes. MDF-Magazin. Supplement von Holz-Zbl. und HK, S. 44-46
- Widsten, P.; Tuominen, S.; Qvintus-Leino, P.; Laine, J. E. 2004: The influence of high defibration temperature on the properties of medium-density fiberboard (MDF) made from laccase-treated-softwood fibers. Wood Sci. Technol. 38, S. 521-528
- Willemse, P. 2001: Spezialist für MDF-Spezialitäten: MDF-Magazin, Supplement von Holz-Zbl. und HK, S. 64-68
- Williams, W. 1995: MDF erobert die Welt. MDF-Magazin, Supplement von Holz-Zbl. und HK, S. 20-27
- Wolf, F. 2004: BASF Ludwigshafen, persönliche Informationen vom 06.05.2004
- Wolf, H. 2003: Kunz Faserplattenwerk Baruth, persönliche Informationen vom 17.03.2003
- Wolf, H. 2009: Pfeleiderer Baruth, persönliche Informationen vom 13.01.2009
- Wolf, H. 2010: Pfeleiderer Baruth, persönliche Informationen vom 05.05.2010
- Wolf, F.; Schmidt-Hellerau, C. 1997: Spanplatten in ungeschützter Außenanwendung. HK Holz-Kunststoffverarbeitung 32, Heft 7-8, S. 54-56
- Xing, C.; Deng, J.; Zhang, S.Y.; Riedl, B.; Cloutier, A. 2006: Properties of MDF from black spruce tops as affected by thermomechanical refining conditions. Holz Roh-Werkstoff 64, S. 507-512
- Xu, J.; Widyorini, R.; Yamauchi, H. Kawai, S. 2006: Development of binderless fiberboard from kenaf core. J. Wood Sci. 52 (3), S. 236-243
- Ye, L.; Tröger, F.; Wegener, G. 2008: China: größter MDF-Produzent weltweit. Teil 1 der Studie „Analyse des Markts für MDF-Platten und Value-Added-Produkte (Laminatfußboden) in China. Holz-Zbl. 134, S. 197-198
- Ye, L.; Tröger, F.; Wegener, G. 2009: Wachstum für Laminatfußboden in China hält an. Gesamtmarkt für Holzböden soll 2010 ein Volumen von 600 Mio. m² erreichen – Teil II der marktstudie. Holz-Zbl. 135, S. 58-59
- Zeissig, S. 2009: Claassen Baruth, Baruth, persönliche Informationen vom 15.02.2009
- Zscheile, M.; Krug, D.; Tobisch, S. 2000: Leichte MDF: Ein Holzwerkstoff auf dem Vormarsch – Markt, Entwicklung, Eigenschaften, Normung, Herstellung und Anwendung. HK, Holz- und Kunststoffverarbeitung 35, Heft 2, S. 38-42

- Z-9.1-234: Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung vom 22.05.2002: Mitteldichte Faserplatte (MDF) „Kronogen spezial FO“, Plattendicke 10 – 25 mm, Holzwerkstoffklasse 100, Verleimung mit Tannin-Formaldehydharz „Bondite 345“, Mindestrohddichte 740 kg/m³, Hersteller Kronospan Sandebeck
- Z-9.1-382: Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung vom 21.04.1998: Holzfaserplatten „Agepan DWD“, Plattendicke 16 – 20 mm, Nadelholz, Verleimung mit PMDI, Rohddichte 540 bis 590 kg/m³, Hersteller Glunz Meppen
- Z-9.1-442: Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung vom 31.05.1999: Holzfaserplatten „KRONO-TEC WP 50 und DP 50“, Plattendicke 12 – 18 mm, Nadelholz, Verleimung mit PMDI, Rohddichte 510 bis 550 kg/m³, Hersteller Kronotex Heiligengrabe
- Z-9.1-443: Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung vom 31.05.1999: Holzfaserplatten „Hornitex Masterwood D+W“, Plattendicke 12 – 18 mm, Nadelholz, Verleimung mit PF-Harz, Rohddichte 570 bis 630 kg/m³, Hersteller Pfeleiderer Nidda
- Z-9.1-454: Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung vom 30.11.1999: Holzfaserplatten „FORMline DHF“, Plattendicke 12 – 20 mm, Nadelholz, Verleimung mit PMDI, Rohddichte 600 bis 650 kg/m³, Hersteller Egger Wismar

8.2 Normen

- DIN 52145-1:2000: Prüfung von Papier und Pappe – Messgrundlagen zur Bestimmung des Reflexionsfaktors – Teil 1: Messung an nicht fluoreszierenden Proben
- DIN EN 120:1992: Holzwerkstoffe – Bestimmung des Formaldehydgehaltes. Extraktionsverfahren genannt Perforatormethode
- DIN EN 310:1993: Holzwerkstoffe; Bestimmung des Biege-Elastizitätsmoduls und der Biegefestigkeit
- DIN EN 312:2003: Spanplatten – Anforderungen
- DIN EN 316:2009: Holzfaserplatten – Definition, Klassifizierung und Kurzzeichen
- DIN EN 317:1993: Spanplatten und Faserplatten; Bestimmung der Dickenquellung nach Wasserlagerung
- DIN EN 318:1993: Holzwerkstoffe. Bestimmung von Maßänderungen in Verbindung mit Änderungen der relativen Luftfeuchte
- DIN EN 318:2002: Holzwerkstoffe. Bestimmung von Maßänderungen in Verbindung mit Änderungen der relativen Luftfeuchte
- DIN EN 319:1993: Spanplatten und Faserplatten; Bestimmung der Zugfestigkeit senkrecht zur Plattenebene
- DIN EN 321:2001: Holzwerkstoffe – Bestimmung der Feuchtebeständigkeit durch Zyklustest
- DIN EN 322:1993: Holzwerkstoffe; Bestimmung des Feuchtegehaltes
- DIN EN 323:1993: Holzwerkstoffe; Bestimmung der Rohdichte
- DIN EN 326-1:1994: Holzwerkstoffe - Probenahme, Zuschnitt und Überwachung - Teil 1: Probenahme und Zuschnitt der Prüfkörper sowie Angabe der Prüfergebnisse
- DIN EN 326-2:2000: Holzwerkstoffe - Probenahme, Zuschnitt und Überwachung - Teil 2: Qualitätskontrolle in der Fertigung
- DIN EN 622-1:2003: Faserplatten – Anforderungen – Teil 1: Allgemeine Anforderungen
- DIN EN 622-5:1997: Faserplatten – Anforderungen – Teil 5: Anforderungen an Platten nach dem Trockenverfahren (MDF)
- DIN EN 622-5:2006: Faserplatten – Anforderungen – Teil 5: Anforderungen an Platten nach dem Trockenverfahren (MDF)
- DIN 717-1:2005: Holzwerkstoffe – Bestimmung der Formaldehydabgabe – Teil 1: Formaldehydabgabe nach der Prüfkammer-Methode
- DIN 717-3: 1996: Holzwerkstoffe – Bestimmung der Formaldehydabgabe – Teil 3: Formaldehydabgabe nach der Flaschen-Methode
- DIN EN 923:2005: Klebstoffe – Benennungen und Definitionen
- DIN EN 927-3:2005: Beschichtungsstoffe – Beschichtungsstoffe und Beschichtungssysteme für Holz im Außenbereich – Teil 3: Freibewitterung
- DIN EN 1087-1:1995: Spanplatten – Bestimmung Feuchtebeständigkeit – Teil 1: Kochprüfung
- DIN EN 12369-1:2001: Holzwerkstoffe – Charakteristische Werte für die Berechnung und Bemessung von Holzbauwerken – Teil 1: OSB, Spanplatten und Faserplatten
- DIN EN 13329:2009: Laminatböden – Elemente mit einer Deckschicht auf Basis aminoplastischer, wärmehärtbarer Harze – Spezifikationen, Anforderungen und Prüfverfahren, Anhang G: Bestimmung der Dickenquellung (Kantenquellung)
- DIN EN 13354:2009: Massivholzplatten – Qualität der Verklebung – Prüfverfahren

- DIN EN 13986:2005: Holzwerkstoffe zur Verwendung im Bauwesen – Eigenschaften, Bewertung der Konformität und Kennzeichnung
- DIN EN ISO 1924-2:2007(E): Papier und Pappe – Bestimmung von Eigenschaften bei Zugbeanspruchung – Teil 2: Verfahren mit konstanter Dehngeschwindigkeit (20 mm/min)
- DIN EN ISO 2758:2003: Papier – Bestimmung der Berstfestigkeit
- DIN EN ISO 5267-1:2000: Faserstoffe – Bestimmung des Entwässerungsverhaltens – Schopper-Riegler-Verfahren
- DIN EN ISO 5269-2:2005: Faserstoffe – Laborblattbildner für physikalische Prüfungen – Rapid-Köthen-Verfahren
- DIN EN ISO 11341:2004: Beschichtungsstoffe – Künstliches Bewittern und künstliches Bestrahlen – Beanspruchung durch gefilterte Xenonbogenstrahlung
- EN 335-3:1995: Dauerhaftigkeit von Holz und Holzprodukten. Definition der Gefährdungsklassen für einen biologischen Befall. Teil 3: Anwendungen bei Holzwerkstoffen
- EN 1995-1-1:2004: Eurocode 5: Entwurf, Berechnung und Bemessung von Holzbauwerken. Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln, Bemessungsregel für den Hochbau
- EMB (= Euro MDF Board) MDF Industrienorm Teil 1 (Allgemeines) und (Anforderungen an Platten für allgemeine Zwecke): Dritte Ausgabe 1995, einschl. Korrekturen 1996 und 1997
- EMB MDF Industrienorm Teil 3 (Anforderungen an Platten für tragende Zwecke): Dritte Ausgabe 1995, einschl. Korrekturen 1996 und 1997
- EMB MDF Produktnorm (Anforderungen an HDF für Laminatböden und Furnierparkett): Erste Ausgabe 1997
- EMB MDF Produktnorm (Anforderungen an Leicht-MDF und Ultraleicht-MDF): Erste Ausgabe 1998
- Final Draft prEN 316:2008: Wood fibre boards – Definition, classification and symbols.
- ISO 17064:2004(E): Wood-based panels – Fibreboard, particleboard and oriented strand board (OSB) – Vocabulary
- ISO 20585:2005: Wood-based panels – Determination of wet bending strength after immersion in water at 70 °C or 100 °C (boiling temperature)
- ISO/DIS 16895-1:2007(E): Wood-based panels – Dry-process fibreboards – Part 1: Classifications
- ISO/DIS 16895-2:2007(E): Wood-based panels – Dry-process fibreboards – Part 2: Requirements
- JIS A 5905: 2003: Fibreboards
- Werkstandard FHIS 164: 1982: Prüfung von Faserstoff aus Holz. Trockene Siebfraktionierung.
- Werkstandard FHIS 175: 1982: Prüfung von Holzwerkstoffen, Faserstoffen und Spangemischen. Bestimmung der wasserlöslichen Anteile.
- Werkstandard FHIS 176: 1985: Elektrometrische Bestimmung des pH-Wertes in wässrigen Lösungen und Suspensionen.
- Werkstandard WIHS 74: 1985: Spanplatten aus Holz. Siebfraktionieren von Spänen.
- Werkstandard WIHS 281: 1982: Prüfung von Spänen und Faserstoff. Bestimmung der Schüttdichte.
- Werkstandard WIHS 303: 1985: Prüfung von Holzwerkstoffen, Faserstoffen und Spangemischen. Bestimmung des Pufferungsvermögens.
- Werkstandard ihd-W 401:1997: Bestimmung des Rohdichteprofiles senkrecht zur Plattenebene

8.3 Patente (chronologisch)

- US 2303345 (1942): Process of making predominantly plastic material and tough products thereof from lignocellulose. Anmelder Masonite Corporation, Laurel, Miss. (USA), Erfinder: Mason, W. H.; Boehm, R. M.
- EP 092699 (1983): Blow line addition of isocyanate binder in fiberboard manufacture. Anmelder: Celotex Corporation Tampa Florida (USA), Erfinder: Betzner, W.; Holtmann, R.; Hill, A.
- DD 242193 (1985): Verfahren zur Erzeugung von Holzwerkstoffen. Anmelder: Technische Universität Dresden (DE), Erfinder: Blechschmidt, J.
- DE 4122842 (1991): Verfahren zur Herstellung von Faserplatten mit erhöhter Feuchtebeständigkeit nach dem Trockenverfahren. Anmelder: Glunz AG Hamm (DE), Erfinder: Oldemeyer, W., Sanders, W.; Teuber, G.
- US 5017319 (1991): Method of making composite products from lignocellulosic materials. Anmelder: Shen, Kuo C. (USA), Erfinder: Shen, Kuo C.
- WO 93/25358 (1992): Manufacture of board. Anmelder: Sunds Defibrator Sundsvall (SE), Erfinder: Säftström, C.; Mikalsson, A.; Lindström, L.-A.; Olofsson, T.
- DE 4327774 (1993): Verfahren zur Herstellung von mitteldichten Holzfaserplatten (MDF). Anmelder: Fraunhofer Gesellschaft München (DE), Erfinder: Roffael, E.; Dix, B.; Bär, G.; Bayer, R.
- EP 0639434 (1994): Verfahren zur Herstellung von mitteldichten Holzfaserplatten (MDF). Anmelder: Fraunhofer Gesellschaft München, Erfinder: Dix, B.; Bayer, R.
- EP 0646057 (1994): Verfahren zur Herstellung von Faserplatten. Anmelder: Glunz AG Hamm (DE), Erfinder: Hofmann, M.; Kramer, J.; Ludäscher, C.; Schenk H.; Teuber, G.
- WO 95/33170 (1995): Vacuum drier for sawn timber and wood-drying method. Anmelder: Opel, A. (DE), Erfinder: Opel, A.
- EP 0759137 (1995): Verfahren zur Bearbeitung von Holz bei erhöhten Temperaturen. Anmelder: Valtion Teknillinen Tutkimuskeskus, Espoo (FI), Erfinder: Viitaniemi, R., Ranta-Maunus, A. Jämsä, S.
- DE 19858079 (1998): Verfahren zur Herstellung von mitteldichten Holzfaserplatten (MDF) mit niedriger Dickenquellung und Wasseraufnahme. Anmelder: Roffael, E., Braunschweig (DE), Erfinder: Roffael, E.; Dix, B.; Schneider, T.
- EP 0922918 (1998): Verfahren zur Wärmebehandlung von Holz. Anmelder: Stellac Oy (FI), Erfinder: Lallukka, T.
- AT 409184 (2000): Verfahren und Vorrichtung zur Holz Trocknung. Anmelder: Mühlböck, K.; Fillafer, F. (AT), Erfinder: Ohnesorg, W.; Mühlböck, K.; Fillafer, F.
- DE 10160316 (2001): Verfahren zur Herstellung von Faserplatten mit erhöhter Feuchtebeständigkeit nach dem Trockenverfahren. Anmelder: IHD Dresden (DE), Erfinder: Krug, D.; Kehr, E.; Zindler, S.
- EP 1323509 (2002): Verfahren zur kontinuierlichen Herstellung von Holzwerkstoffplatten. Anmelder: Dieffenbacher GmbH & Co. Eppingen (DE), Erfinder: von Haas, G.; Melzer, G.
- DE 10226820 (2002): Verfahren und Vorrichtung zum Beleimen von zur Herstellung von Faserplatten vorgesehenen, getrockneten Fasern. Anmelder: Flakeboard Company Limited (CA), Erfinder: Schneider, F.
- WO 03/092972 (2003): Method of making dimensionally stable composite products from lignocellulosic material. Anmelder: K. C. Shen International Limited (USA), Kronospan Technical Co. Limited (CY), Erfinder: Shen, Kuo C.; Shen, Kenneth C.

9 Anhang

Prüfprotokolle Luftstrahlsieb

Faserstoffanalyse Var. 1 bis 7

Prüfprotokoll QualScan – Länge

Faserstoffanalyse Var. 1 bis 7

Prüfprotokoll QualScan – Breite

Faserstoffanalyse Var. 1 bis 7

Tabelle A1-1 bis A1-4

Versuchsreihe I: Eigenschaften von Industrie-MDF
(Ausgangszustand und nach Bewitterung)

Tabelle A2

Versuchsreihe II: Eigenschaften von bindemittelfreien Labor-MDF
(Ausgangszustand)

Tabelle A3

Versuchsreihe III: Eigenschaften von bindemittelfreien Labor-HDF
(Ausgangszustand)

Tabelle A4-1 bis A4-2

Versuchsreihe IV: Eigenschaften von Labor-MDF mit UF-Harz-Bindung
(Ausgangszustand)

Tabelle A5-1-1 bis A5-4-3

Versuchsreihe V: Eigenschaften von Labor-MDF mit MUF-, PF-, MUPF-Harz-
sowie PMDI-Bindung mit konstantem Bindemittelanteil
(Ausgangszustand und nach Bewitterung)

Tabelle A6-1-1 bis A6-4-3

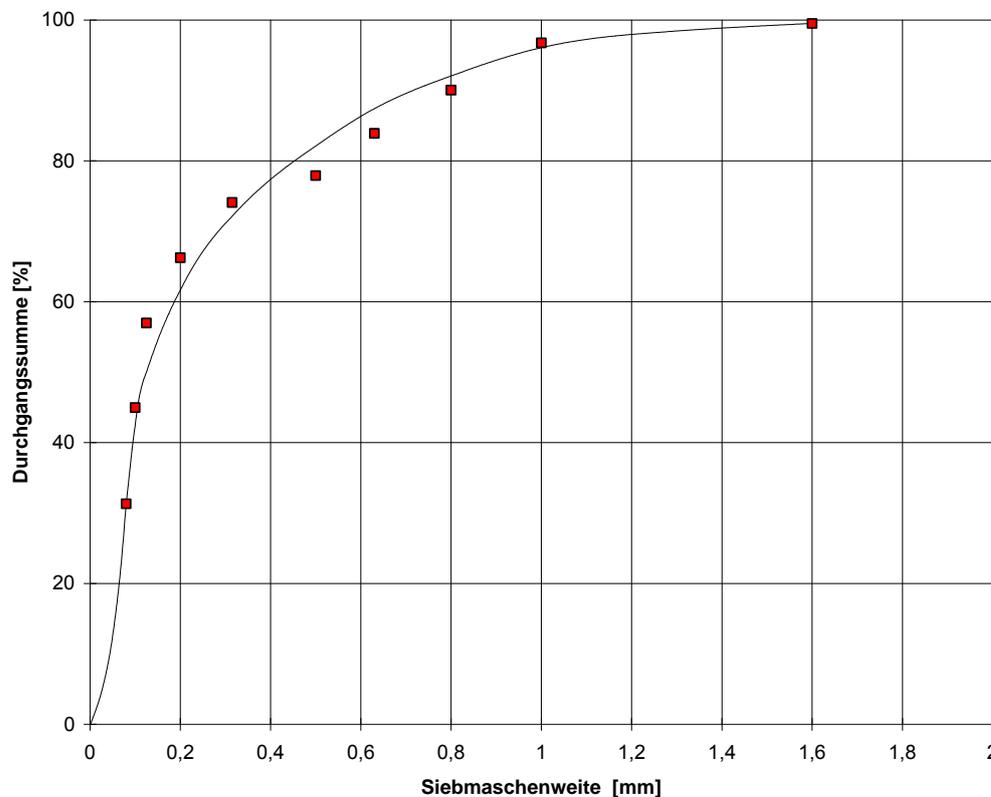
Versuchsreihe VI: Eigenschaften von Labor-MDF mit MUF-, PF-, MUPF-Harz-
sowie PMDI-Bindung mit variiertem Bindemittelanteil
(Ausgangszustand und nach Bewitterung)

Anhang – Prüfprotokoll Luftstrahlsieb – Var. 6: Aufschluss bei 8 bar über 4 min

	<p>Prüfprotokoll</p> <p>Fraktionierung - Luftstrahlsieb</p>	 <p>ihd Institut für Holztechnologie Dresden gGmbH</p>
--	---	--

Rohstoffart:	Kiefer	Mittlere Korngröße (KG):	K _m = 0,24 mm	Auftrags - Nr.:	130 370
Partikelart:	Faserstoff	KG-Intervall:	Δ K = 0,49 mm	Auftraggeber:	
	Variante 6			Bearbeitung:	Krug
Aufschluss:	8 bar/4 min	Feinstanteil:	D 0,315 = 74,09 %	Durchführung:	Stephani
Aufbereitung:	Sunds Defibrator	Feinanteil:	D 1,0 = 96,75 %	Datum:	01.08.2000

Siebsatz Maschenw [mm]	Einwaage [g]								Summe der Durchgangs- fraktionen		Summenhäufigkeit der Durchgangs- fraktionen [%]	für Siebkennlinie benutzte Werte	
	1. Frakt.		2. Frakt.		3. Frakt.		4. Frakt.		D [g]	[%]		xs	ys
	M1 [g] = 12,9	M2 [g] = 11,7	M3 [g] = 0,0	M4 [g] = 0,0	MR1 [g]	MD1[g]	MR2 [g]	MD2[g]			MR3 [g]		
0,08	9,12	3,82	7,79	3,89					7,71	31,32	31,32	0,00	0,00
0,1	7,75	1,37	5,80	1,99					3,36	13,65	44,96	0,10	42,40
0,125	5,68	2,07	4,91	0,89					2,96	12,02	56,99	0,13	50,01
0,2	4,39	1,29	3,92	0,99					2,28	9,26	66,25	0,20	61,62
0,315	3,40	0,99	2,98	0,94					1,93	7,84	74,09	0,32	72,14
0,5	2,46	0,94							0,94	3,82	77,90	0,50	82,10
0,63			1,50	1,48					1,48	6,01	83,92	0,63	87,42
0,8	0,95	1,51							1,51	6,13	90,05	0,80	92,05
1	0,39	0,56	0,41	1,09					1,65	6,70	96,75	1,00	96,08
												1,25	98,20
1,6	0,05	0,34	0,07	0,34					0,68	2,76	99,51	1,60	99,51
Rest		0,05	0,07			0,00		0,00	0,12	0,49	100,00		
	Summe								24,62	100,00			

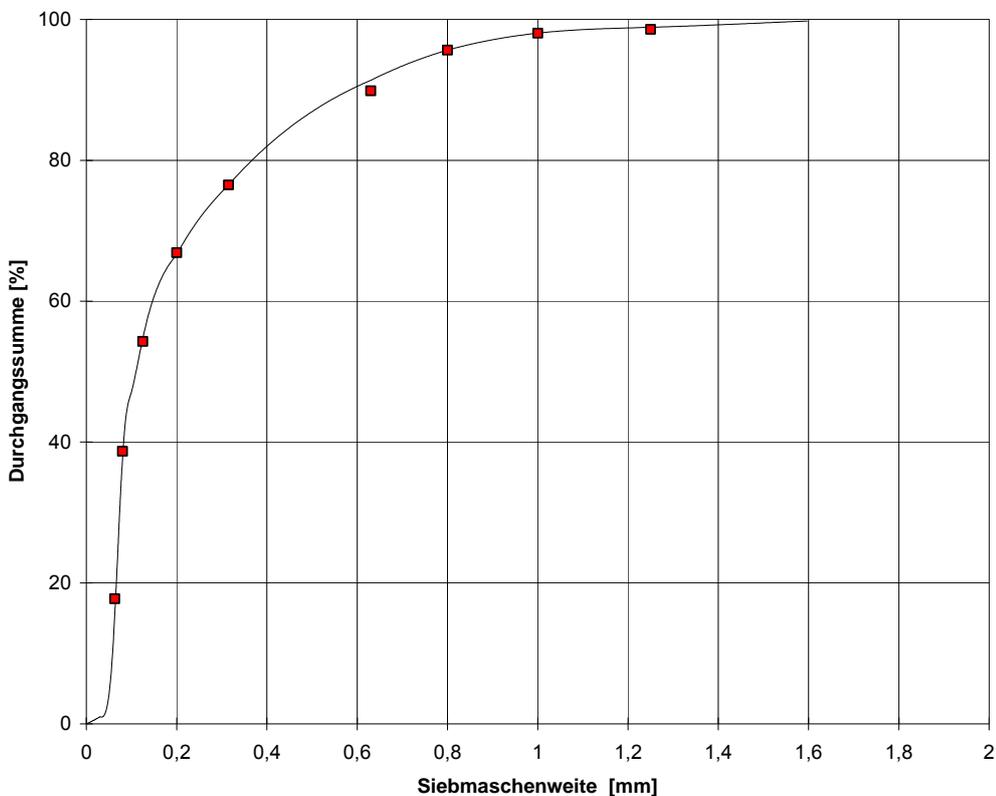


Anhang – Prüfprotokoll Luftstrahlsieb – Var. 5: Aufschluss bei 12 bar über 4 min

<p>Prüfprotokoll</p> <p>Fraktionierung - Luftstrahlsieb</p>	 <p>ihd Institut für Holztechnologie Dresden gGmbH</p>
---	--

Rohstoffart: Kiefer	Mittlere Korngröße (KG): $K_m = 0,24 \text{ mm}$	Auftrags - Nr.: 130 370
Partikelart: Faserstoff	KG-Intervall: $\Delta K = 0,41 \text{ mm}$	Auftraggeber:
Variante 5	Feinstanteil: $D_{0,315} = 76,51 \%$	Bearbeitung: Krug
Aufschluss: 12 bar/4 min	Feinstanteil: $D_{1,0} = 98,05 \%$	Durchführung: Stephani
Aufbereitung: Sunds Defibrator		Datum: 01.08.2000

Siebsatz Maschenw [mm]	Einwaage [g]								Summe der Durchgangs- fraktionen		Summenhäufigkeit der Durchgangs- fraktionen [%]	für Siebkennlinie benutzte Werte		
	1. Frakt.		2. Frakt.		3. Frakt.		4. Frakt.		D [g]	[%]		xs	ys	
	M1 [g] = 18,0	M2 [g] = 18,8	M3 [g] = 19,2	M4 [g] = 0,0	MR1 [g]	MD1[g]	MR2 [g]	MD2[g]			MR3 [g]			MD3[g]
0,05													0,00	0,01
0,063	13,08	4,95	13,80	5,00					9,95	17,76	17,76	0,06	15,76	
0,08	10,32	2,76	11,07	2,73	12,95	6,25			11,74	20,95	38,71	0,08	37,41	
0,1												0,10	47,10	
0,125	7,72	2,60	8,26	2,81	9,63	3,32			8,73	15,58	54,29	0,13	54,70	
0,2	5,60	2,12	6,09	2,17	6,86	2,77			7,06	12,60	66,89	0,20	66,60	
0,315	3,88	1,72	4,47	1,62	4,81	2,05			5,39	9,62	76,51	0,32	76,51	
0,63	1,53	2,35	1,93	2,54	2,21	2,60			7,49	13,37	89,88	0,63	91,36	
0,8	0,75	0,78	0,83	1,10	0,85	1,36			3,24	5,78	95,66	0,80	95,66	
1	0,30	0,45	0,43	0,40	0,36	0,49			1,34	2,39	98,05	1,00	98,05	
1,25	0,00	0,30							0,30	0,53	98,59	1,25	98,88	
1,6												1,60	99,80	
Rest		0,00	0,43		0,01		0,00	0,44	0,79	100,00				
	Summe								56,03	100,00				

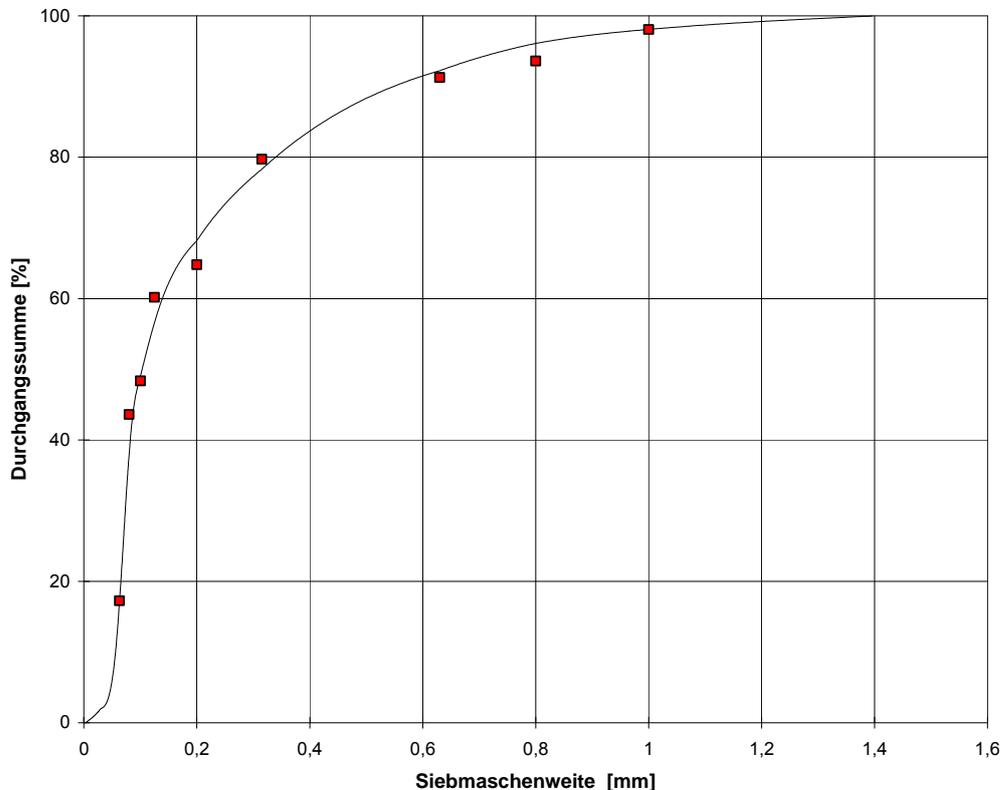


Anhang – Prüfprotokoll Luftstrahlsieb – Var. 4: Aufschluss bei 16 bar über 4 min

	<p>Prüfprotokoll</p> <p>Fraktionierung - Luftstrahlsieb</p>	 <p>ihd Institut für Holztechnologie Dresden gGmbH</p>
--	---	--

Rohstoffart:	Kiefer	Mittlere Korngröße (KG):	K _m = 0,19 mm	Auftrags - Nr.:	130370
Partikelart:	Faserstoff	gröÙe (KG):	Δ K = 0,30 mm	Auftraggeber:	
	Variante 4	KG-Intervall:	D 0,315 = 79,73 %	Bearbeitung:	Krug
Aufschluss:	16 bar/4 min	Feinstanteil:	D 1,0 = 98,08 %	Durchführung:	Stephani
Aufbereitung:	Sunds Defibrator			Datum:	01.08.2000

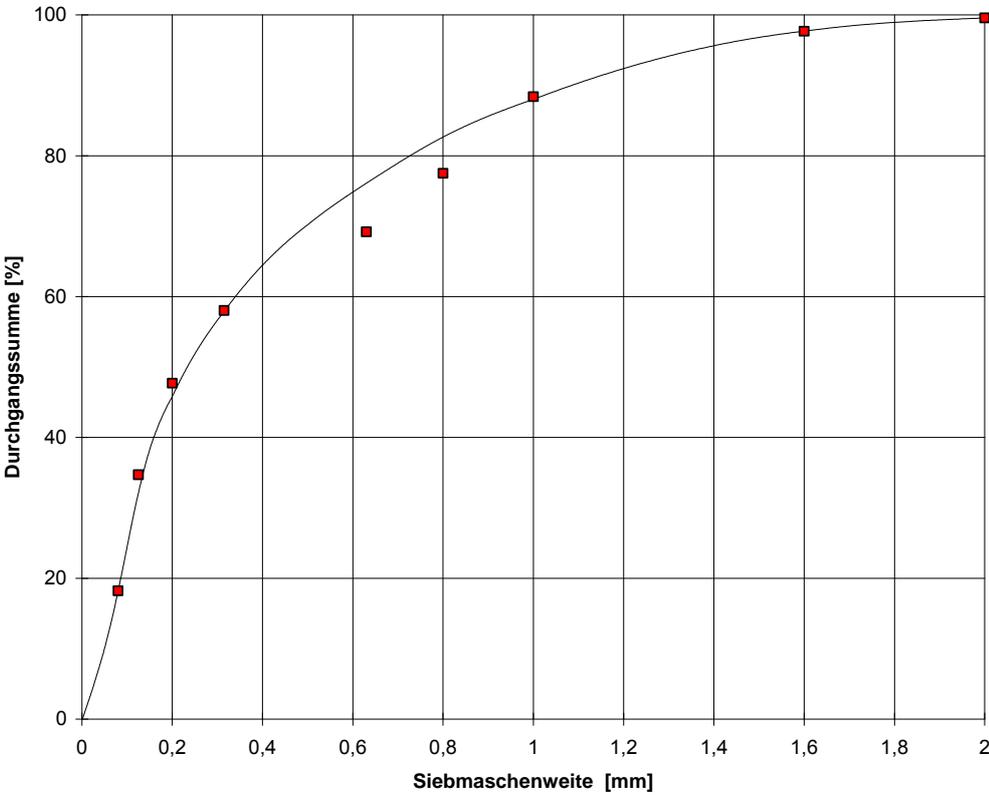
Siebsatz Maschenw [mm]	Einwaage [g]								Summe der Durchgangs- fraktionen		Summenhäufigkeit der Durchgangs- fraktionen [%]	für Siebkennlinie benutzte Werte	
	1. Frakt.		2. Frakt.		3. Frakt.		4. Frakt.		D [g]	[%]		xs	ys
	M1 [g] = 22,1 MR1 [g]	MD1 [g]	M2 [g] = 22,3 MR2 [g]	MD2 [g]	M3 [g] = MR3 [g]	MD3 [g]	M4 [g] = MR4 [g]	MD4 [g]					
0	22,05	0,00	22,25	0,00								0,00	0,00
0,063			14,61	7,64					7,64	17,25	17,25	0,06	17,25
0,08	12,83	9,22	12,15	2,46					11,68	26,37	43,61	0,08	37,80
0,1			10,04	2,11					2,11	4,76	48,37	0,10	49,00
0,125	9,25	3,58	8,39	1,65					5,23	11,81	60,18	0,13	56,60
0,2			6,34	2,05					2,05	4,63	64,81	0,20	68,20
0,315	4,52	4,73	4,46	1,88					6,61	14,92	79,73	0,32	78,30
0,63	1,75	2,77	2,11	2,35					5,12	11,56	91,29	0,63	92,24
0,8	0,72	1,03							1,03	2,33	93,61	0,80	96,10
1	0,19	0,53	0,66	1,45					1,98	4,47	98,08	1,00	98,08
1,6												1,40	99,99
Rest		0,19	0,66		0,00		0,00	0,85	1,92	100,00			
	Summe								88,60	100,00			



Anhang – Prüfprotokoll Luftstrahlsieb – Var. 3: Aufschluss bei 8 bar über 8 min

Prüfprotokoll						ihd			
Fraktionierung - Luftstrahlsieb						Institut für Holztechnologie Dresden gGmbH			
Rohstoffart: Kiefer		Mittlere Korngröße (KG): $K_m = 0,35 \text{ mm}$		Auftrags - Nr.: 130 370					
Partikelart: Faserstoff		Variante 3		KG-Intervall: $\Delta K = 0,67 \text{ mm}$		Auftraggeber:			
Aufschluss: 8 bar/8 min		Feinstanteil: D 0,315 = 58,03 %		Bearbeitung: Krug					
Aufbereitung: Sunds Defibrator		Feinstanteil: D 1,0 = 88,39 %		Durchführung: Stephani					
				Datum: 01.08.2000					

Siebsatz Maschenw [mm]	Einwaage [g]								Summe der Durchgangs- fraktionen		Summenhäufigkeit der Durchgangs- fraktionen [%]	für Siebkennlinie benutzte Werte	
	1. Frakt.		2. Frakt.		3. Frakt.		4. Frakt.		D [g]	[%]		xs	ys
	M1 [g] = 20,2	M2 [g] = 16,4	M3 [g] = 0,0	M4 [g] = 0,0	MR1 [g]	MD1[g]	MR2 [g]	MD2[g]					
0,08	17,56	2,61	12,37	4,06					6,67	18,22	18,22	0,08	18,22
0,125	13,40	4,16	10,50	1,87					6,03	16,48	34,70	0,13	32,08
0,2	10,89	2,51	8,25	2,25					4,76	13,01	47,70	0,20	45,80
0,315	9,35	1,54	6,01	2,24					3,78	10,33	58,03	0,32	57,90
0,5												0,50	70,20
0,63	6,67	2,68	4,60	1,41					4,09	11,17	69,21	0,63	76,10
0,8	5,04	1,63	3,19	1,41					3,04	8,31	77,51	0,80	82,65
1	3,32	1,72	0,93	2,26					3,98	10,87	88,39	1,00	88,00
1,6	0,70	2,62	0,15	0,78					3,40	9,29	97,68	1,60	97,68
2	0,01	0,69	0,00						0,69	1,89	99,56	2,00	99,56
Rest		0,01	0,15		0,00		0,00	0,16	0,44	100,00			
	Summe								36,60	100,00			



The graph plots the cumulative percentage of material passing through sieves of various mesh sizes. The x-axis represents the sieve mesh size in millimeters, ranging from 0 to 2. The y-axis represents the cumulative percentage of material passing, ranging from 0 to 100. Red square markers indicate the data points for each sieve size, and a smooth curve is drawn through these points to show the overall distribution of the material.

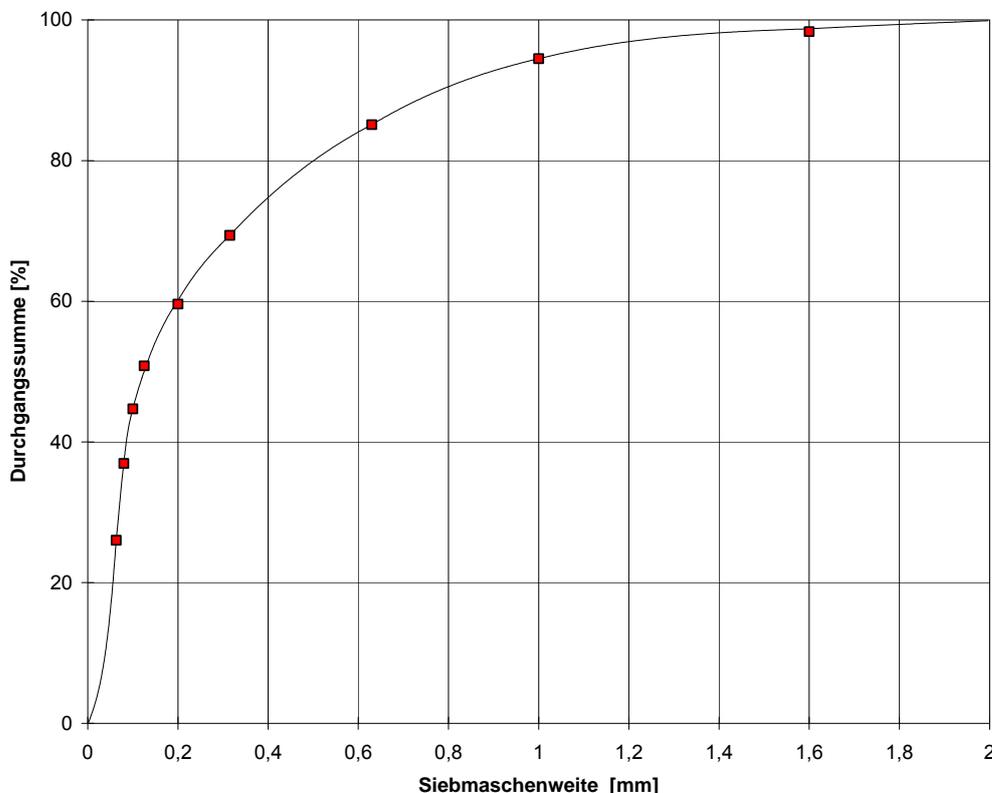
Siebmaschenweite [mm]	Durchgangssumme [%]
0,08	18,22
0,125	32,08
0,2	45,80
0,315	57,90
0,5	70,20
0,63	76,10
0,8	82,65
1	88,00
1,6	97,68
2	99,56

Anhang – Prüfprotokoll Luftstrahlsieb – Var. 2: Aufschluss bei 12 bar über 8 min

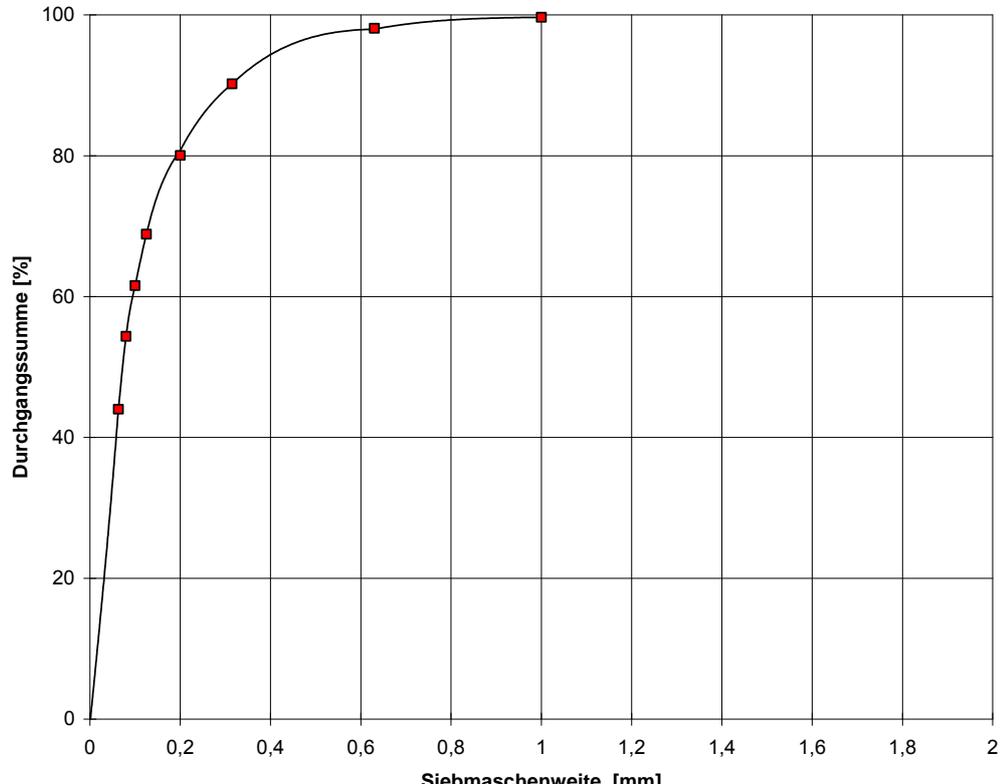
	<p>Prüfprotokoll</p> <p>Fraktionierung - Luftstrahlsieb</p>	 <p>ihd</p> <p>Institut für Holztechnologie Dresden gGmbH</p>
--	---	---

Rohstoffart:	Kiefer	Mittlere Korngröße (KG):	K _m = 0,25 mm	Auftrags - Nr.:	130 370
Partikelart:	Faserstoff	KG-Intervall:	Δ K = 0,50 mm	Auftraggeber:	
	Variante 2	Feinstanteil:	D 0,315 = 69,37 %	Bearbeitung:	Krug
Aufschluss:	12 bar/8 min	Feinanteil:	D 1,0 = 94,50 %	Durchführung:	Stephani
Aufbereitung:	Sunds Defibrator			Datum:	01.08.2000

Siebsatz Maschenw [mm]	Einwaage [g]								Summe der Durchgangs- fraktionen		Summenhäufigkeit der Durchgangs- fraktionen [%]	für Siebkennlinie benutzte Werte			
	1. Frakt.		2. Frakt.		3. Frakt.		4. Frakt.		D [g]	[%]		xs	ys		
	M1 [g] = 27,3	MR1 [g]	M2 [g] = 29,1	MD1[g]	M3 [g] = 24,6	MR3 [g]	MD3[g]	M4 [g] = 0,0			MR4 [g]			MD4[g]	
0,063	20,61	6,70	21,59	7,51	17,74	6,87					21,08	26,02	26,02	0,06	26,02
0,08	17,82	2,79	18,20	3,39	15,08	2,66					8,84	10,91	36,93	0,08	36,93
0,1	15,92	1,90	15,76	2,44	13,12	1,96					6,30	7,78	44,71	0,10	44,71
0,125	14,29	1,63	13,92	1,84	11,64	1,48					4,95	6,11	50,81	0,13	50,01
0,2	11,92	2,37	11,39	2,53	9,42	2,22					7,12	8,79	59,60	0,20	60,10
0,315	9,08	2,84	8,64	2,75	7,10	2,32					7,91	9,76	69,37	0,32	69,37
0,5															
0,63	4,35	4,73	4,32	4,32	3,39	3,71					12,76	15,75	85,11	0,63	85,11
0,8															
1	1,58	2,77	1,57	2,75	1,31	2,08					7,60	9,38	94,50	1,00	94,50
1,6	0,02	1,56	0,01	1,56	0,00						3,12	3,85	98,35	1,60	98,74
5														2,00	99,90
6															
Rest		0,02		0,01		1,31					0,00	1,34	1,65	100,00	
											Summe	81,02	100,00		



Anhang – Prüfprotokoll Luftstrahlsieb – Var. 1: Aufschluss bei 16 bar über 8 min

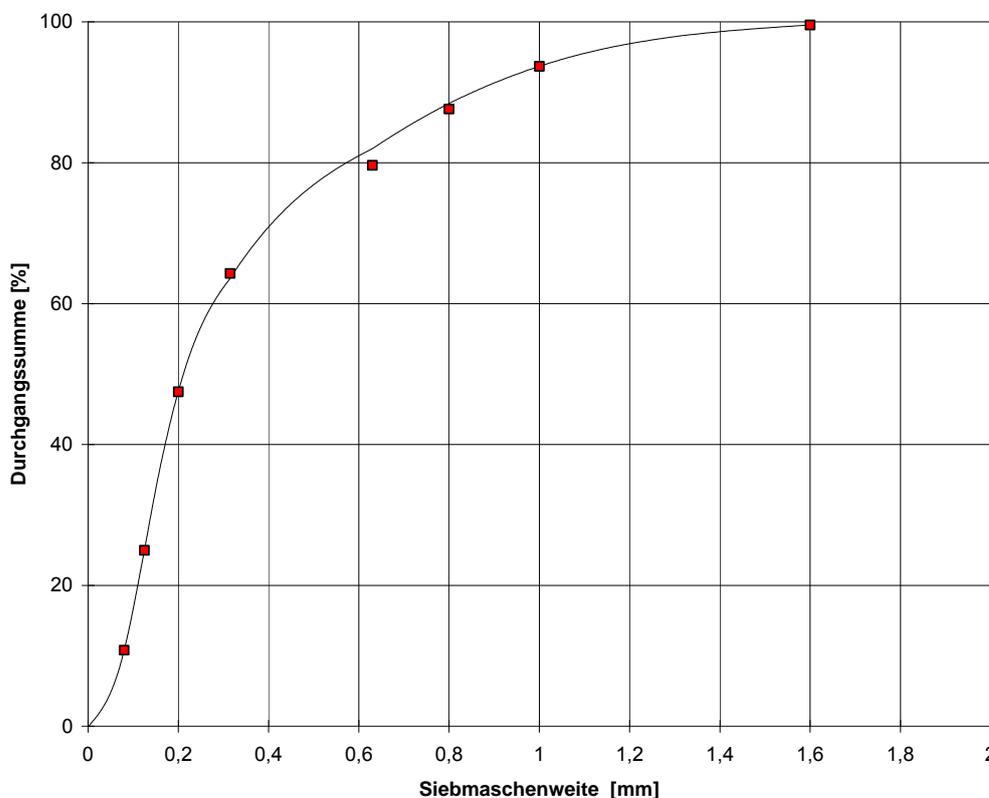
	<p>Prüfprotokoll</p> <p>Fraktionierung - Luftstrahlsieb</p>	 <p>ihd Institut für Holztechnologie Dresden gGmbH</p>																																																																																																																																																																																																																													
<p>Rohstoffart: Kiefer</p> <p>Partikelart: Faserstoff Variante 1</p> <p>Aufschluss: 16 bar/8 min</p> <p>Aufbereitung: Sunds Defibrator</p>	<p>Mittlere Korngröße (KG): $K_m = 0,11 \text{ mm}$</p> <p>KG-Intervall: $\Delta K = 0,20 \text{ mm}$</p> <p>Feinstanteil(FS): $D_{0,1} = 61,75 \%$</p> <p>Feinstanteil(FS): $D_{0,5} = 96,96 \%$</p>	<p>Auftrags - Nr.: 130 370</p> <p>Auftraggeber:</p> <p>Bearbeitung: Krug</p> <p>Durchführung: Stephani</p> <p>Datum: 01.08.2000</p>																																																																																																																																																																																																																													
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th rowspan="2">Siebsatz Maschenw [mm]</th> <th colspan="8">Einwaage [g]</th> <th colspan="2">Summe der Durchgangs- fraktionen</th> <th rowspan="2">Summenhäufigkeit der Durchgangs- fraktionen [%]</th> <th colspan="2">für Siebkennlinie benutzte Werte</th> </tr> <tr> <th colspan="2">1. Frakt. M1 [g] = 54,7</th> <th colspan="2">2. Frakt. M2 [g] = 48,9</th> <th colspan="2">3. Frakt. M3 [g] = 49,7</th> <th colspan="2">4. Frakt. M4 [g] = 52,0</th> <th>D [g]</th> <th>%</th> <th>xs</th> <th>ys</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td></td> <td>MR1 [g]</td> <td>MD1[g]</td> <td>MR2 [g]</td> <td>MD2[g]</td> <td>MR3 [g]</td> <td>MD3[g]</td> <td>MR4 [g]</td> <td>MD4[g]</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>0,063</td> <td>28,37</td> <td>26,35</td> <td>25,80</td> <td>23,11</td> <td>28,05</td> <td>21,62</td> <td>32,70</td> <td>19,25</td> <td>90,33</td> <td>44,01</td> <td>44,01</td> <td>0,06</td> <td>44,01</td> </tr> <tr> <td>0,08</td> <td>22,89</td> <td>5,48</td> <td>21,08</td> <td>4,72</td> <td>22,25</td> <td>5,80</td> <td>27,46</td> <td>5,24</td> <td>21,24</td> <td>10,35</td> <td>54,36</td> <td>0,08</td> <td>54,36</td> </tr> <tr> <td>0,1</td> <td>19,00</td> <td>3,89</td> <td>17,78</td> <td>3,30</td> <td>19,09</td> <td>3,16</td> <td>23,01</td> <td>4,45</td> <td>14,80</td> <td>7,21</td> <td>61,57</td> <td>0,10</td> <td>61,57</td> </tr> <tr> <td>0,125</td> <td>15,57</td> <td>3,43</td> <td>14,16</td> <td>3,62</td> <td>15,03</td> <td>4,06</td> <td>19,15</td> <td>3,86</td> <td>14,97</td> <td>7,29</td> <td>68,86</td> <td>0,13</td> <td>68,86</td> </tr> <tr> <td>0,2</td> <td>9,27</td> <td>6,30</td> <td>9,32</td> <td>4,84</td> <td>9,15</td> <td>5,88</td> <td>13,21</td> <td>5,94</td> <td>22,96</td> <td>11,19</td> <td>80,05</td> <td>0,20</td> <td>80,75</td> </tr> <tr> <td>0,315</td> <td>4,20</td> <td>5,07</td> <td>4,55</td> <td>4,77</td> <td>4,40</td> <td>4,75</td> <td>6,94</td> <td>6,27</td> <td>20,86</td> <td>10,16</td> <td>90,21</td> <td>0,32</td> <td>90,21</td> </tr> <tr> <td>0,5</td> <td></td> </tr> <tr> <td>0,63</td> <td>0,84</td> <td>3,36</td> <td>0,95</td> <td>3,60</td> <td>0,70</td> <td>3,70</td> <td>1,40</td> <td>5,54</td> <td>16,20</td> <td>7,89</td> <td>98,10</td> <td>0,63</td> <td>97,97</td> </tr> <tr> <td>0,8</td> <td></td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>0,20</td> <td>0,64</td> <td>0,18</td> <td>0,77</td> <td>0,10</td> <td>0,60</td> <td>0,22</td> <td>1,18</td> <td>3,19</td> <td>1,55</td> <td>99,66</td> <td>1,00</td> <td>99,66</td> </tr> <tr> <td>4</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Rest</td> <td></td> <td>0,20</td> <td></td> <td>0,18</td> <td></td> <td>0,10</td> <td></td> <td>0,22</td> <td>0,70</td> <td>0,34</td> <td>100,00</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td colspan="8" style="text-align: center;">Summe</td> <td>205,3</td> <td>100,00</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>	Siebsatz Maschenw [mm]	Einwaage [g]								Summe der Durchgangs- fraktionen		Summenhäufigkeit der Durchgangs- fraktionen [%]	für Siebkennlinie benutzte Werte		1. Frakt. M1 [g] = 54,7		2. Frakt. M2 [g] = 48,9		3. Frakt. M3 [g] = 49,7		4. Frakt. M4 [g] = 52,0		D [g]	%	xs	ys		MR1 [g]	MD1[g]	MR2 [g]	MD2[g]	MR3 [g]	MD3[g]	MR4 [g]	MD4[g]						0,063	28,37	26,35	25,80	23,11	28,05	21,62	32,70	19,25	90,33	44,01	44,01	0,06	44,01	0,08	22,89	5,48	21,08	4,72	22,25	5,80	27,46	5,24	21,24	10,35	54,36	0,08	54,36	0,1	19,00	3,89	17,78	3,30	19,09	3,16	23,01	4,45	14,80	7,21	61,57	0,10	61,57	0,125	15,57	3,43	14,16	3,62	15,03	4,06	19,15	3,86	14,97	7,29	68,86	0,13	68,86	0,2	9,27	6,30	9,32	4,84	9,15	5,88	13,21	5,94	22,96	11,19	80,05	0,20	80,75	0,315	4,20	5,07	4,55	4,77	4,40	4,75	6,94	6,27	20,86	10,16	90,21	0,32	90,21	0,5														0,63	0,84	3,36	0,95	3,60	0,70	3,70	1,40	5,54	16,20	7,89	98,10	0,63	97,97	0,8														1	0,20	0,64	0,18	0,77	0,10	0,60	0,22	1,18	3,19	1,55	99,66	1,00	99,66	4														Rest		0,20		0,18		0,10		0,22	0,70	0,34	100,00				Summe								205,3	100,00				
Siebsatz Maschenw [mm]		Einwaage [g]								Summe der Durchgangs- fraktionen			Summenhäufigkeit der Durchgangs- fraktionen [%]	für Siebkennlinie benutzte Werte																																																																																																																																																																																																																	
	1. Frakt. M1 [g] = 54,7		2. Frakt. M2 [g] = 48,9		3. Frakt. M3 [g] = 49,7		4. Frakt. M4 [g] = 52,0		D [g]	%	xs	ys																																																																																																																																																																																																																			
	MR1 [g]	MD1[g]	MR2 [g]	MD2[g]	MR3 [g]	MD3[g]	MR4 [g]	MD4[g]																																																																																																																																																																																																																							
0,063	28,37	26,35	25,80	23,11	28,05	21,62	32,70	19,25	90,33	44,01	44,01	0,06	44,01																																																																																																																																																																																																																		
0,08	22,89	5,48	21,08	4,72	22,25	5,80	27,46	5,24	21,24	10,35	54,36	0,08	54,36																																																																																																																																																																																																																		
0,1	19,00	3,89	17,78	3,30	19,09	3,16	23,01	4,45	14,80	7,21	61,57	0,10	61,57																																																																																																																																																																																																																		
0,125	15,57	3,43	14,16	3,62	15,03	4,06	19,15	3,86	14,97	7,29	68,86	0,13	68,86																																																																																																																																																																																																																		
0,2	9,27	6,30	9,32	4,84	9,15	5,88	13,21	5,94	22,96	11,19	80,05	0,20	80,75																																																																																																																																																																																																																		
0,315	4,20	5,07	4,55	4,77	4,40	4,75	6,94	6,27	20,86	10,16	90,21	0,32	90,21																																																																																																																																																																																																																		
0,5																																																																																																																																																																																																																															
0,63	0,84	3,36	0,95	3,60	0,70	3,70	1,40	5,54	16,20	7,89	98,10	0,63	97,97																																																																																																																																																																																																																		
0,8																																																																																																																																																																																																																															
1	0,20	0,64	0,18	0,77	0,10	0,60	0,22	1,18	3,19	1,55	99,66	1,00	99,66																																																																																																																																																																																																																		
4																																																																																																																																																																																																																															
Rest		0,20		0,18		0,10		0,22	0,70	0,34	100,00																																																																																																																																																																																																																				
	Summe								205,3	100,00																																																																																																																																																																																																																					
 <p style="text-align: center;">Durchgangssumme [%]</p> <p style="text-align: center;">Siebmaschenweite [mm]</p>																																																																																																																																																																																																																															

Anhang – Prüfprotokoll Luftstrahlsieb – Var. 7: Aufschluss bei 8 bar über 4 min

	<p>Prüfprotokoll</p> <p>Fraktionierung - Luftstrahlsieb</p>	 <p>ihd Institut für Holztechnologie Dresden gGmbH</p>
--	---	--

Rohstoffart: Kiefer	Mittlere Korngröße (KG): $K_m = 0,33 \text{ mm}$	Auftrags - Nr.: 130 370	
Partikelart: Faserstoff	KG-Intervall: $\Delta K = 0,58 \text{ mm}$	Auftraggeber:	
	Feinstanteil: $D_{0,315} = 64,29 \%$	Bearbeitung: Krug	
Aufschluss: 8 bar/4 min	Feinanteil: $D_{1,0} = 93,70 \%$	Durchführung: Stephani	
Aufbereitung: Industrie		Datum: 01.08.2000	

Siebsatz Maschenw [mm]	Einwaage [g]								Summe der Durchgangsfraktionen		Summenhäufigkeit der Durchgangsfraktionen [%]	für Siebkennlinie benutzte Werte	
	1. Frakt.		2. Frakt.		3. Frakt.		4. Frakt.		D [g]	[%]		xs	ys
	M1 [g] = 23,3	MR1 [g]	MD1 [g]	MR2 [g]	MD2 [g]	MR3 [g]	MD3 [g]	MR4 [g]			MD4 [g]		
	23,34	0,00	22,50	0,00								0,00	0,00
0,08	21,24	2,10	19,65	2,85					4,95	10,80	10,80	0,08	10,80
0,125	18,41	2,83	15,98	3,67					6,50	14,18	24,98	0,13	24,98
0,2	13,25	5,16	10,82	5,16					10,32	22,51	47,49	0,20	47,49
0,315	8,56	4,69	7,81	3,01					7,70	16,80	64,29	0,32	63,60
0,5													
0,63	4,81	3,75	4,52	3,29					7,04	15,36	79,65	0,63	82,00
0,8	3,05	1,76	2,62	1,90					3,66	7,98	87,63	0,80	88,43
1	1,52	1,53	1,37	1,25					2,78	6,06	93,70	1,00	93,70
1,6	0,07	1,45	0,13	1,24					2,69	5,87	99,56	1,60	99,56
Rest									0,20	0,44	100,00		
	Summe								45,84	100,00			

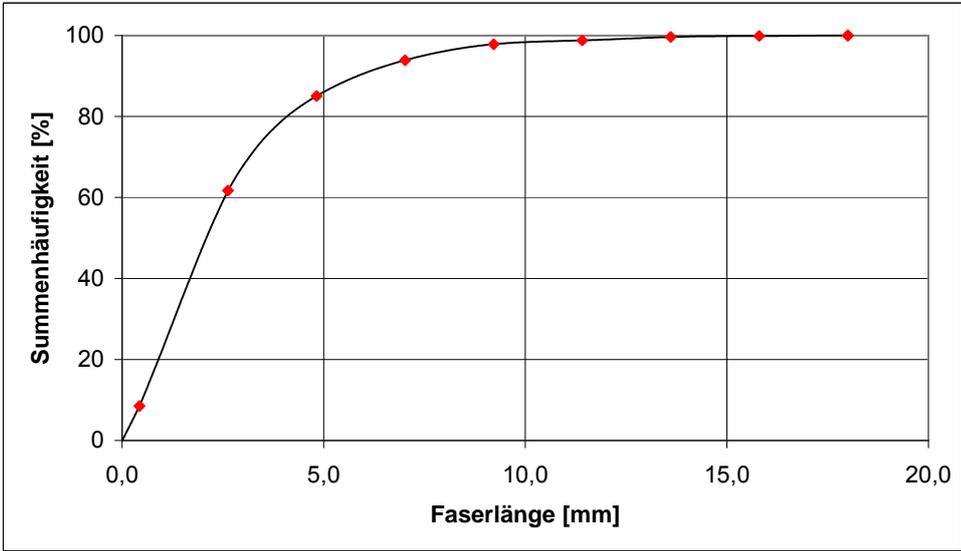


Anhang – Prüfprotokoll QualScan – Länge – Var. 6: Aufschluss bei 8 bar über 4 min

	<p>Prüfprotokoll Länge</p> <p>Partikelanalyse - QualScan</p>	 <p>ihd Institut für Holztechnologie Dresden gGmbH</p>
--	--	--

ihd-Codierung: F_10_04 Bezeichnung-Auftraggeber: Sunds 6 Auftrags.-Nr.: 130370 Bearbeiter: Mäbert Prüfdatum: 31.03.2004	Schlankeitsgrad: 3,24 Mittlere Korngröße (Km): 2,49 mm Korngrößen-Intervall (DK): 3,91 mm Staubanteil: 1,0 22,57 % Feinstanteil: 5,0 86,04 % Feinanteil: 10,0 98,35 % Grobanteil: 15,0 99,83 %	
Rohstoffart: Kiefer Partikelart: Faserstoff		

BIN-Range [mm]	Fasern					Summe der gemessenen Fasern			Werte für die Kennlinie	
	1. Probe ID 1	2. Probe ID 2	3. Probe ID 3	4. Probe ID 4	5. Probe ID 5	absolut A	relativ A [%]	kumulativ [%]	xs	ys
0,430	183,4	236,5	219,2	189,6	168,2	996,9	8,53	8,53	0,00	0,00
2,626	1310,3	1381,3	1311,9	1195,8	1015,1	6214,4	53,18	61,72	0,43	8,53
4,823	569,6	565,6	573,8	511,6	504,1	2724,7	23,32	85,04	2,63	61,72
7,019	210,0	223,8	231,0	174,6	194,2	1033,6	8,85	93,89	4,82	85,04
9,215	63,2	138,0	102,3	84,5	72,7	460,8	3,95	97,84	7,02	93,89
11,411	10,0	11,2	60,0	19,1	9,4	109,8	0,94	98,78	9,22	97,84
13,608	12,8	0,0	35,9	0,0	49,3	98,0	0,84	99,62	11,41	98,78
15,804	0,0	0,0	14,5	15,0	0,0	29,5	0,26	99,87	13,61	99,62
18,000	0,0	0,0	16,0	0,0	0,0	16,0	0,14	100,01	15,80	99,87
18,000	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,00	100,01	18,00	100,01
Summe	2359,3796	2556,3595	2564,8205	2190,2322	2012,9948	11683,8	100,01			



Anhang – Prüfprotokoll QualScan – Breite – Var. 6: Aufschluss bei 8 bar über 4 min

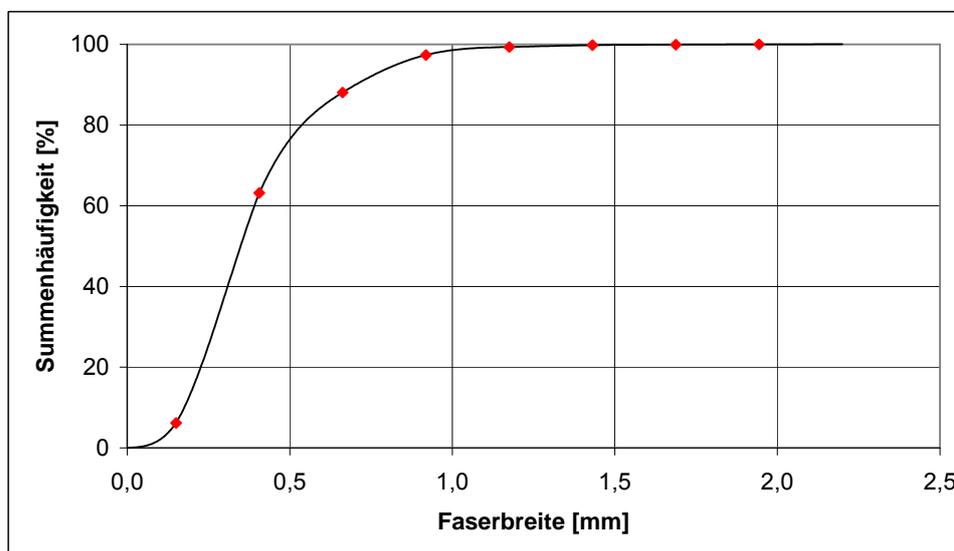
	<p>Prüfprotokoll Breite</p> <p>Partikelanalyse - QualScan</p>	 <p>ihd Institut für Holztechnologie Dresden gGmbH</p>
--	---	--

ihd-Codierung: F_10_04
 Bezeichnung-Auftraggeber: Sunds 6
 8 bar/4 min
 Auftrags.-Nr.: 130370
 Bearbeiter: Mäbert
 Prüfdatum: 31.03.2004

Rohstoffart: Kiefer
 Partikelart: Faserstoff

Schlankheitsgrad: 3,24
 Mittlere Korngröße (Km): 0,38 mm
 Korngrößen-Intervall (DK): 0,38 mm
 Staubanteil: 0,1 2,01 %
 Feinstanteil: 0,315 41,54 %
 Feinanteil: 0,5 76,42 %
 Grobanteil: 1,0 98,55 %

BIN-Range [mm]	Fasern					Summe der gemessenen Fasern			Werte für die Kennlinie	
	1. Probe ID 1	2. Probe ID 2	3. Probe ID 3	4. Probe ID 4	5. Probe ID 5	absolut A	relativ A [%]	kumulativ [%]	xs	ys
0,150	46,4	53,3	45,6	40,1	36,6	221,9	6,15	6,15	0,00	0,00
0,406	391,2	473,3	461,1	401,7	328,9	2056,2	56,99	63,14	0,15	6,15
0,663	189,9	184,9	189,2	165,7	169,1	898,9	24,92	88,06	0,41	63,14
0,919	85,4	60,6	60,2	67,7	61,2	335,2	9,29	97,34	0,66	88,06
1,175	12,1	15,0	13,3	12,4	18,8	71,6	2,00	99,34	0,92	97,34
1,431	0,0	2,5	5,4	6,4	1,4	15,6	0,44	99,78	1,17	99,34
1,688	0,0	1,5	3,0	0,0	0,0	4,6	0,14	99,92	1,43	99,78
1,944	0,0	0,0	0,0	0,0	1,7	1,7	0,06	99,98	1,69	99,92
2,200	2,1	0,0	0,0	0,0	0,0	2,1	0,06	100,03	1,94	99,98
2,200	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,00	100,03	2,20	100,03
Summe	726,95584	791,200004	777,82594	694,0421	617,76389	3607,8	100,03			

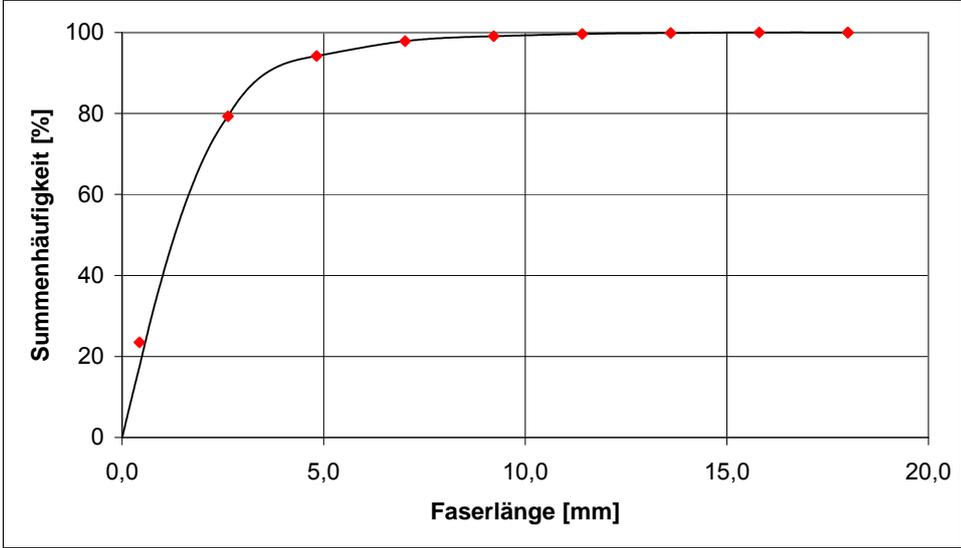


Anhang – Prüfprotokoll QualScan – Länge – Var. 5: Aufschluss bei 12 bar über 4 min

	<p>Prüfprotokoll Länge</p> <p>Partikelanalyse - QualScan</p>	 <p>ihd Institut für Holztechnologie Dresden gGmbH</p>
--	--	--

ihd-Codierung: F_9_04 Bezeichnung-Auftraggeber: Sunds 5 Auftrags.-Nr.: 130370 Bearbeiter: Mäbert Prüfdatum: 31.03.2004	Schlankeitsgrad: 1,84 Mittlere Korngröße (Km): 1,59 mm Korngrößen-Intervall (DK): 2,55 mm Staubanteil: 1,0 39,84 % Feinstanteil: 5,0 94,51 % Feinanteil: 10,0 99,29 % Grobanteil: 15,0 99,96 %	
Rohstoffart: Kiefer Partikelart: Faserstoff		

BIN-Range [mm]	Fasern					Summe der gemessenen Fasern			Werte für die Kennlinie	
	1. Probe ID 1	2. Probe ID 2	3. Probe ID 3	4. Probe ID 4	5. Probe ID 5	absolut A	relativ A [%]	kumulativ [%]	xs	ys
0,430	1363,3	431,0	270,2	267,2	248,8	2580,5	23,50	23,50	0,00	0,00
2,626	2610,5	1417,7	759,1	698,3	641,4	6126,9	55,81	79,31	0,43	17,50
4,823	778,0	344,2	167,2	183,8	160,9	1634,1	14,88	94,19	2,63	79,31
7,019	223,1	90,3	16,0	38,5	34,7	402,6	3,67	97,86	4,82	94,19
9,215	62,5	47,9	14,8	0,0	7,4	132,7	1,21	99,07	7,02	97,86
11,411	51,1	10,8	0,0	0,0	0,0	61,9	0,56	99,64	9,22	99,07
13,608	24,9	0,0	0,0	0,0	0,0	24,9	0,23	99,86	11,41	99,64
15,804	0,0	0,0	0,0	0,0	15,2	15,2	0,14	100,00	13,61	99,86
18,000	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,00	100,00	15,80	100,00
18,000	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,00	100,00	18,00	100,00
Summe	5113,3127	2341,93793	1227,3761	1187,8169	1108,4757	10978,9	100,00			



Anhang – Prüfprotokoll QualScan – Breite – Var. 5: Aufschluss bei 12 bar über 4 min

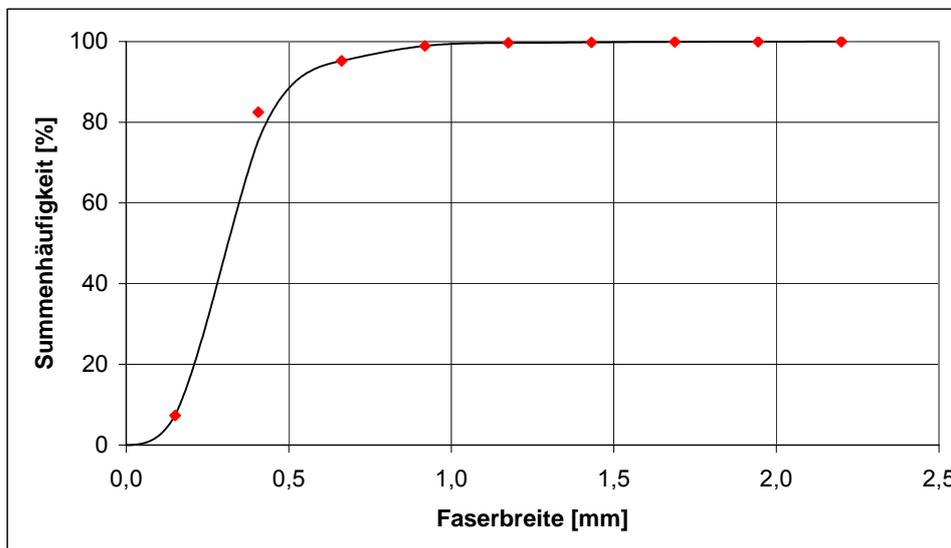
	<p>Prüfprotokoll Breite</p> <p>Partikelanalyse - QualScan</p>	 <p>ihd Institut für Holztechnologie Dresden gGmbH</p>
--	---	--

ihd-Codierung: F_9_04
 Bezeichnung-Auftraggeber: Sunds 5
 12 bar /4 min
 Auftrags.-Nr.: 130370
 Bearbeiter: Mäbert
 Prüfdatum: 31.03.2004

Rohstoffart: Kiefer
 Partikelart: Faserstoff

Schlankeitsgrad: 1,84
 Mittlere Korngröße (Km): 0,34 mm
 Korngrößen-Intervall (DK): 0,27 mm
 Staubanteil: 0,1 2,34 %
 Feinstanteil: 0,315 50,59 %
 Feinanteil: 0,5 88,44 %
 Grobanteil: 1,0 99,42 %

BIN-Range [mm]	Fasern					Summe der gemessenen Fasern			Werte für die Kennlinie	
	1. Probe ID 1	2. Probe ID 2	3. Probe ID 3	4. Probe ID 4	5. Probe ID 5	absolut A	relativ A [%]	kumulativ [%]	xs	ys
0,150	204,0	75,8	52,4	53,9	52,1	438,2	7,35	7,35	0,00	0,00
0,406	2299,6	749,2	466,4	487,9	472,6	4475,7	75,15	82,51	0,15	7,35
0,663	324,9	180,3	97,6	84,4	70,3	757,5	12,71	95,22	0,41	75,51
0,919	108,9	60,1	22,0	13,0	16,9	221,0	3,71	98,93	0,66	95,22
1,175	20,8	14,6	4,1	2,9	1,9	44,3	0,74	99,67	0,92	98,93
1,431	2,5	3,8	0,0	0,0	1,3	7,6	0,13	99,80	1,17	99,67
1,688	7,9	0,0	0,0	0,0	0,0	7,9	0,13	99,94	1,43	99,80
1,944	1,8	0,0	0,0	0,0	0,0	1,8	0,03	99,97	1,69	99,94
2,200	2,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,0	0,03	100,00	1,94	99,97
2,200	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,00	100,00	2,20	100,00
Summe	2972,3833	1083,8951	642,46818	642,02173	615,09898	5955,9	100,00			

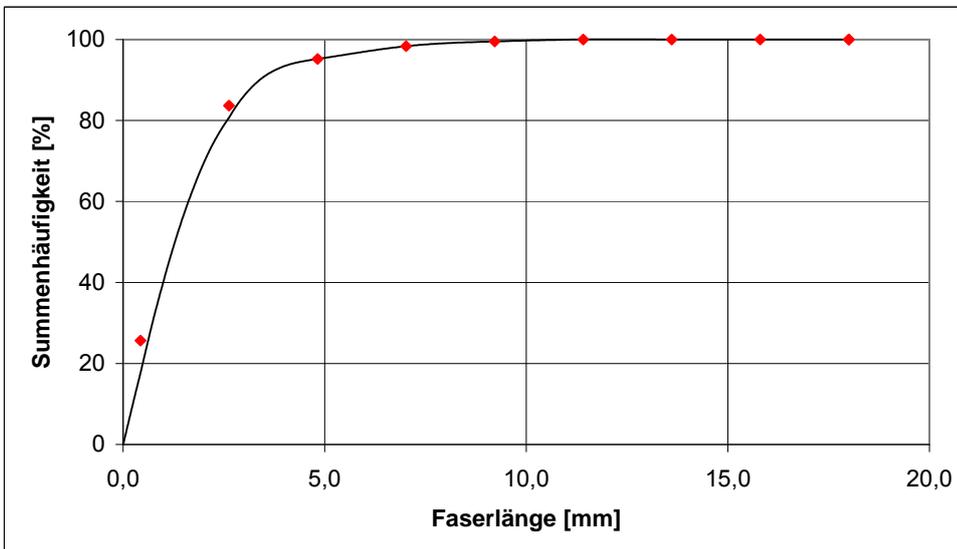


Anhang – Prüfprotokoll QualScan – Länge – Var. 4: Aufschluss bei 16 bar über 4 min

	<p>Prüfprotokoll Länge</p> <p>Partikelanalyse - QualScan</p>	 <p>ihd Institut für Holztechnologie Dresden gGmbH</p>
--	--	---

ihd-Codierung: F_8_04 Bezeichnung-Auftraggeber: Sunds 4 Auftrags.-Nr.: 130370 Bearbeiter: Mäbert Prüfdatum: 31.03.2004 Rohstoffart: Kiefer Partikelart: Faserstoff	Schlankheitsgrad: 1,77 Mittlere Korngröße (Km): 1,48 mm Korngrößen-Intervall (DK): 2,45 mm Staubanteil: 1,0 40,34 % Feinstanteil: 5,0 95,45 % Feinanteil: 10,0 99,72 % Grobanteil: 15,0 99,99 %
--	---

BIN-Range [mm]	Fasern					Summe der gemessenen Fasern			Werte für die Kennlinie	
	1. Probe ID 1	2. Probe ID 2	3. Probe ID 3	4. Probe ID 4	5. Probe ID 5	absolut A	relativ A [%]	kumulativ [%]	xs	ys
0,430	864,1	220,6	273,0	362,2	359,7	2079,6	25,65	25,65	0,00	0,00
2,626	1899,7	506,7	634,7	883,3	780,8	4705,2	58,02	83,67	0,43	17,65
4,823	442,9	86,2	152,1	95,8	155,9	932,9	11,51	95,18	2,63	80,67
7,019	149,3	9,9	33,0	26,2	37,2	255,7	3,16	98,34	4,82	95,18
9,215	56,9	7,9	8,2	14,5	7,9	95,4	1,17	99,51	7,02	98,34
11,411	40,2	0,0	0,0	0,0	0,0	40,2	0,49	100,00	9,22	99,51
13,608	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,00	100,00	11,41	100,00
15,804	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,00	100,00	13,61	100,00
18,000	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,00	100,00	15,80	100,00
18,000	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,00	100,00	18,00	100,00
Summe	3453,2339	831,264003	1100,9053	1382,0506	1341,4523	8108,9	100,00			



Anhang – Prüfprotokoll QualScan – Breite – Var. 4: Aufschluss bei 16 bar über 4 min

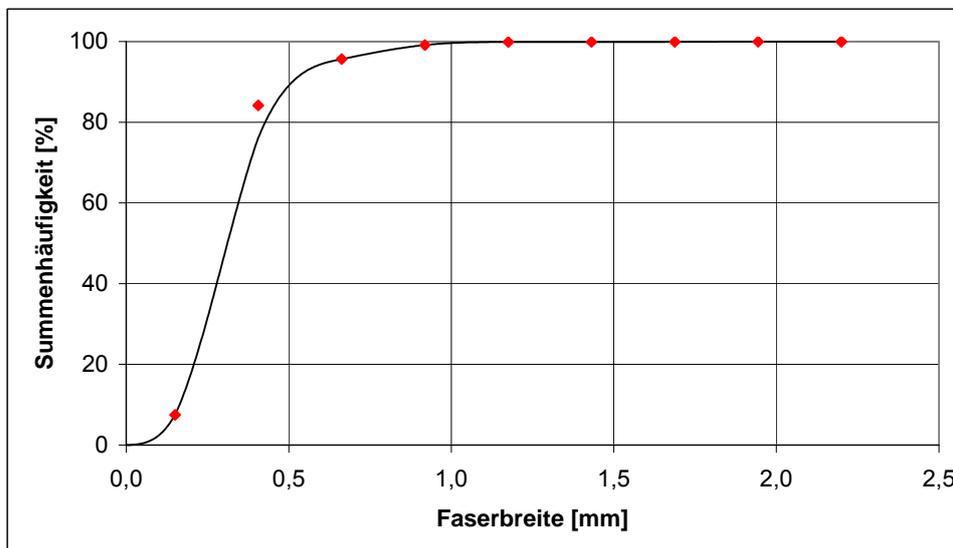
	<p>Prüfprotokoll Breite</p> <p>Partikelanalyse - QualScan</p>	 <p>ihd Institut für Holztechnologie Dresden gGmbH</p>
--	---	--

ihd-Codierung: F_8_04
 Bezeichnung-Auftraggeber: Sunds 4
 16 bar/4 min
 Auftrags.-Nr.: 130370
 Bearbeiter: Mäbert
 Prüfdatum: 31.03.2004

Rohstoffart: Kiefer
 Partikelart: Faserstoff

Schlankeitsgrad: 1,77
 Mittlere Korngröße (Km): 0,32 mm
 Korngrößen-Intervall (DK): 0,26 mm
 Staubanteil: 0,1 2,41 %
 Feinstanteil: 0,315 51,12 %
 Feinanteil: 0,5 89,10 %
 Grobanteil: 1,0 99,63 %

BIN-Range [mm]	Fasern					Summe der gemessenen Fasern			Werte für die Kennlinie	
	1. Probe ID 1	2. Probe ID 2	3. Probe ID 3	4. Probe ID 4	5. Probe ID 5	absolut A	relativ A [%]	kumulativ [%]	xs	ys
0,150	130,2	45,2	48,1	65,7	54,2	343,4	7,49	7,49	0,00	0,00
0,406	1606,3	320,2	403,5	582,9	599,3	3512,1	76,70	84,19	0,15	7,49
0,663	229,6	58,6	74,8	84,1	78,3	525,5	11,47	95,65	0,41	76,19
0,919	88,3	9,8	21,8	18,0	22,2	160,1	3,49	99,15	0,66	95,65
1,175	24,4	0,0	3,0	3,1	3,0	33,6	0,74	99,89	0,92	99,15
1,431	1,3	0,0	0,0	0,0	0,0	1,3	0,02	99,91	1,17	99,89
1,688	1,5	0,0	0,0	0,0	0,0	1,5	0,02	99,93	1,43	99,91
1,944	1,7	0,0	0,0	0,0	0,0	1,7	0,04	99,98	1,69	99,93
2,200	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,00	99,98	1,94	99,98
2,200	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,00	99,98	2,20	99,98
Summe	2083,3528	433,722409	551,23986	753,82115	757,00367	4579,1	99,98			



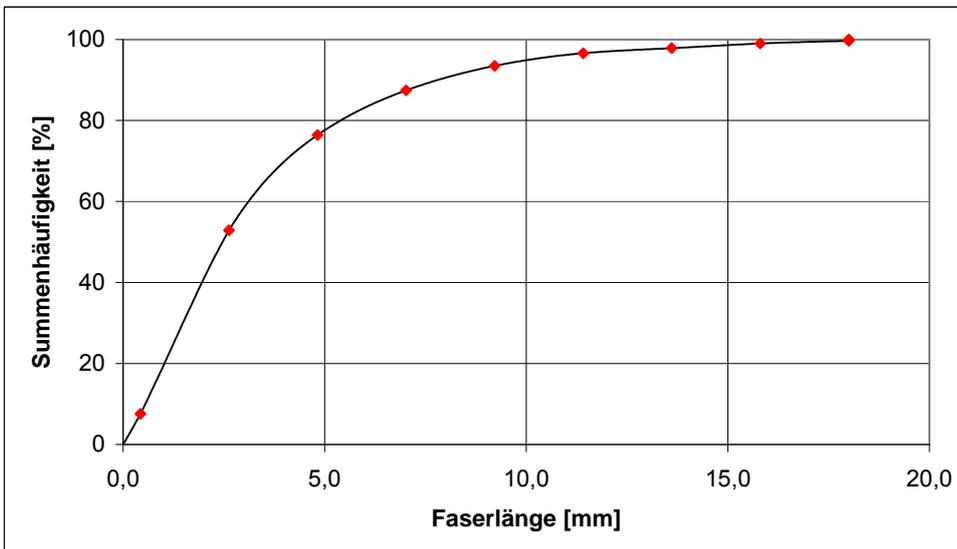
Anhang – Prüfprotokoll QualScan – Länge – Var. 3: Aufschluss bei 8 bar über 8 min

	<p>Prüfprotokoll Länge</p> <p>Partikelanalyse - QualScan</p>	 <p>ihd Institut für Holztechnologie Dresden gGmbH</p>
--	--	---

ihd-Codierung: F_7_04 Bezeichnung-Auftraggeber: Sunds 3 Auftrags.-Nr.: 130370 Bearbeiter: Mäbert Prüfdatum: 30.03.2004	Schlankeitsgrad: 3,51 Mittlere Korngröße (Km): 3,16 mm Korngrößen-Intervall (DK): 5,34 mm Staubanteil: 1,0 19,53 % Feinstanteil: 5,0 77,60 % Feinanteil: 10,0 94,88 % Grobanteil: 15,0 98,60 %	
--	--	--

Rohstoffart: Kiefer Partikelart: Faserstoff		
--	--	--

BIN-Range [mm]	Fasern					Summe der gemessenen Fasern			Werte für die Kennlinie	
	1. Probe ID 2	2. Probe ID 3	3. Probe ID 4	4. Probe ID 5	5. Probe ID 6	absolut A	relativ A [%]	kumulativ [%]	xs	ys
0,430	156,0	126,8	131,5	212,9	347,9	975,2	7,57	7,57	0,00	0,00
2,626	1302,6	1106,8	956,8	1103,1	1370,0	5839,4	45,34	52,91	0,43	7,57
4,823	607,8	555,7	508,3	598,2	756,7	3026,7	23,50	76,41	2,63	52,91
7,019	330,5	249,2	318,6	242,4	278,3	1419,0	11,02	87,43	4,82	76,41
9,215	142,7	167,2	152,8	170,4	144,7	777,9	6,04	93,47	7,02	87,43
11,411	79,0	121,8	71,1	69,8	60,8	402,6	3,13	96,60	9,22	93,47
13,608	49,6	23,9	49,5	24,4	12,5	159,9	1,24	97,85	11,41	96,60
15,804	15,3	14,9	44,3	43,7	30,7	148,9	1,16	99,00	13,61	97,85
18,000	0,0	0,0	0,0	50,1	33,0	83,1	0,64	99,65	15,80	99,00
18,000	18,6	0,0	0,0	27,2	0,0	45,8	0,36	100,00	18,00	99,65
Summe	2702,1276	2366,4305	2232,9829	2542,2576	3034,6332	12878,4	100,00			



The graph plots cumulative frequency [%] on the y-axis (0 to 100) against fiber length [mm] on the x-axis (0,0 to 20,0). Red diamond markers represent data points, and a smooth curve is drawn through them. The data points correspond to the cumulative percentages in the table above.

Anhang – Prüfprotokoll QualScan – Breite – Var. 3: Aufschluss bei 8 bar über 8 min

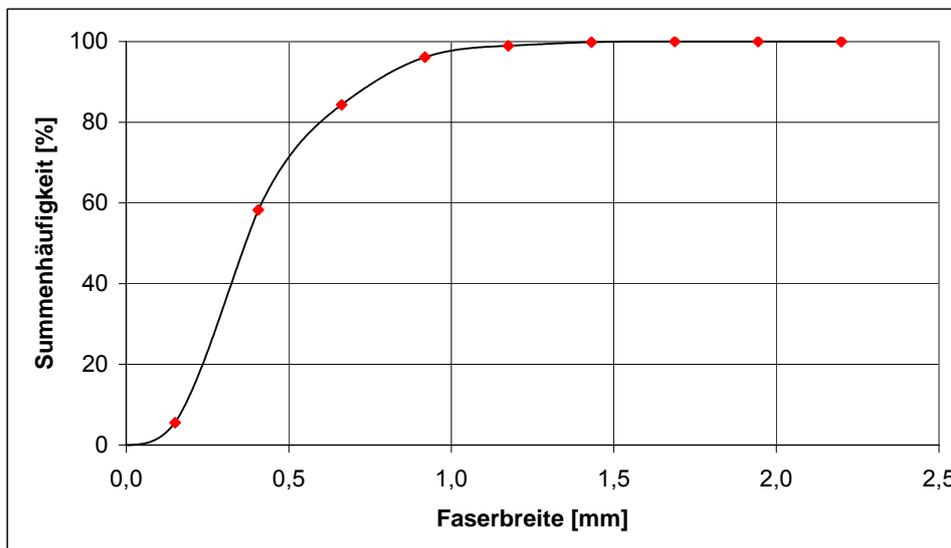
	<p>Prüfprotokoll Breite</p> <p>Partikelanalyse - QualScan</p>	 <p>ihd Institut für Holztechnologie Dresden gGmbH</p>
--	---	--

ihd-Codierung: F_7_04
 Bezeichnung-Auftraggeber: Sunds 3
 8 bar/8 min
 Auftrags.-Nr.: 130370
 Bearbeiter: Mäbert
 Prüfdatum: 30.03.2004

Rohstoffart: Kiefer
 Partikelart: Faserstoff

Schlankeitsgrad: 3,51
 Mittlere Korngröße (Km): 0,41 mm
 Korngrößen-Intervall (DK): 0,44 mm
 Staubanteil: 0,1 1,79 %
 Feinstanteil: 0,315 38,03 %
 Feinanteil: 0,5 71,38 %
 Grobanteil: 1,0 97,74 %

BIN-Range [mm]	Fasern					Summe der gemessenen Fasern			Werte für die Kennlinie	
	1. Probe ID 2	2. Probe ID 3	3. Probe ID 4	4. Probe ID 5	5. Probe ID 6	absolut A	relativ A [%]	kumulativ [%]	xs	ys
0,150	40,2	30,8	34,0	42,2	57,1	204,4	5,57	5,57	0,00	0,00
0,406	322,1	290,6	288,9	408,0	622,8	1932,5	52,71	58,28	0,15	5,57
0,663	209,1	188,2	158,0	179,6	220,1	954,9	26,06	84,34	0,41	58,28
0,919	101,6	69,1	74,0	90,0	96,8	431,5	11,79	96,12	0,66	84,34
1,175	23,1	13,6	18,9	23,9	24,2	103,8	2,84	98,96	0,92	96,12
1,431	7,8	4,9	6,6	7,6	6,5	33,4	0,90	99,86	1,17	98,96
1,688	0,0	1,5	1,5	1,6	0,0	4,6	0,14	100,00	1,43	99,86
1,944	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,00	100,00	1,69	100,00
2,200	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,00	100,00	1,94	100,00
2,200	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,00	100,00	2,20	100,00
Summe	704,00874	598,543651	581,99634	753,01097	1027,5255	3665,1	100,00			

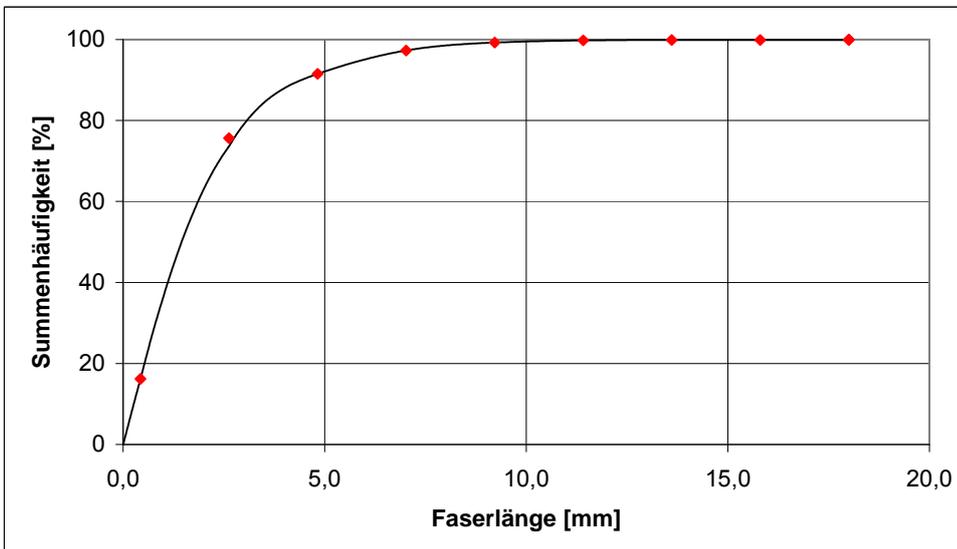


Anhang – Prüfprotokoll QualScan – Länge – Var. 2: Aufschluss bei 12 bar über 8 min

	<p>Prüfprotokoll Länge</p> <p>Partikelanalyse - QualScan</p>	 <p>ihd Institut für Holztechnologie Dresden gGmbH</p>
--	--	---

ihd-Codierung: F_6_04 Bezeichnung-Auftraggeber: Sunds 2 Auftrags.-Nr.: 130370 Bearbeiter: Mäbert Prüfdatum: 31.03.2004	Schlankeitsgrad: 2,09 Mittlere Korngröße (Km): 1,77 mm Korngrößen-Intervall (DK): 3,02 mm Staubanteil: 1,0 36,63 % Feinstanteil: 5,0 92,10 % Feinanteil: 10,0 99,50 % Grobanteil: 15,0 99,86 %	
Rohstoffart: Kiefer Partikelart: Faserstoff		

BIN-Range [mm]	Fasern					Summe der gemessenen Fasern			Werte für die Kennlinie	
	1. Probe ID 1	2. Probe ID 2	3. Probe ID 3	4. Probe ID 4	5. Probe ID 5	absolut A	relativ A [%]	kumulativ [%]	xs	ys
0,430	398,3	445,8	566,2	273,3	259,0	1942,6	16,18	16,18	0,00	0,00
2,626	1511,9	1342,0	1894,1	1308,8	1081,7	7138,5	59,44	75,61	0,43	16,18
4,823	359,2	406,9	419,0	414,5	307,3	1907,0	15,88	91,49	2,63	73,61
7,019	131,5	75,4	212,6	146,8	128,3	694,6	5,79	97,28	4,82	91,49
9,215	38,7	69,0	48,9	45,3	32,8	234,8	1,96	99,24	7,02	97,28
11,411	20,8	30,5	0,0	0,0	11,3	62,6	0,52	99,76	9,22	99,24
13,608	0,0	0,0	11,6	0,0	0,0	11,6	0,10	99,86	11,41	99,76
15,804	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,00	99,86	13,61	99,86
18,000	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,00	99,86	15,80	99,86
18,000	0,0	0,0	0,0	18,1	0,0	18,1	0,15	100,01	18,00	99,86
Summe	2460,5415	2369,62193	3152,346	2206,7833	1820,3197	12009,6	100,01			



The graph plots cumulative frequency [%] on the y-axis (0 to 100) against fiber length [mm] on the x-axis (0,0 to 20,0). Red diamond markers are placed at the top of each column in the table above, showing a smooth curve that reaches 100% cumulative frequency at approximately 18 mm.

Anhang – Prüfprotokoll QualScan – Breite – Var. 2: Aufschluss bei 12 bar über 8 min

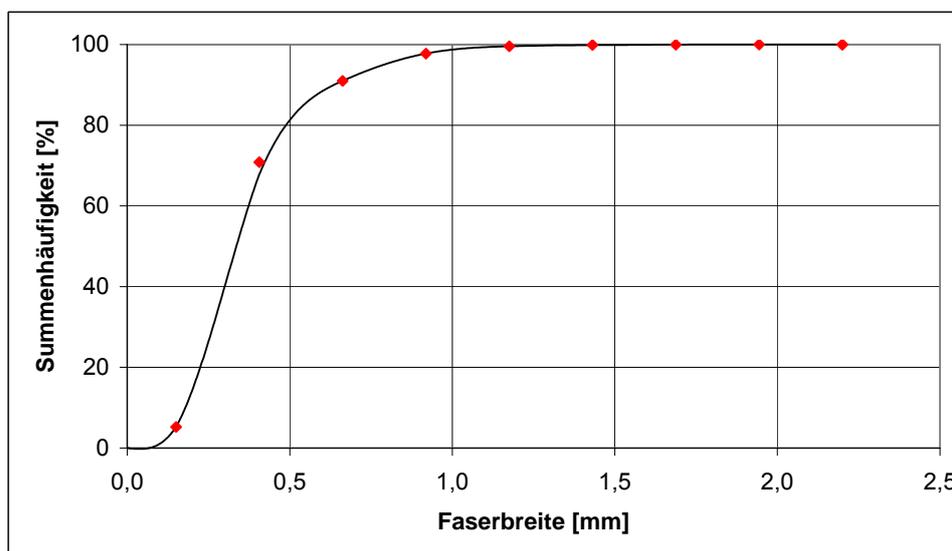
	<p>Prüfprotokoll Breite</p> <p>Partikelanalyse - QualScan</p>	 <p>ihd Institut für Holztechnologie Dresden gGmbH</p>
--	---	--

ihd-Codierung: F_6_04
 Bezeichnung-Auftraggeber: Sunds 2
 12 bar/8 min
 Auftrags.-Nr.: 130370
 Bearbeiter: Mäbert
 Prüfdatum: 31.03.2004

Rohstoffart: Kiefer
 Partikelart: Faserstoff

Schlankeitsgrad: 2,09
 Mittlere Korngröße (Km): 0,36 mm
 Korngrößen-Intervall (DK): 0,32 mm
 Staubanteil: 0,1 1,07 %
 Feinstanteil: 0,315 44,28 %
 Feinanteil: 0,5 81,29 %
 Grobanteil: 1,0 98,75 %

BIN-Range [mm]	Fasern					Summe der gemessenen Fasern			Werte für die Kennlinie	
	1. Probe ID 1	2. Probe ID 2	3. Probe ID 3	4. Probe ID 4	5. Probe ID 5	absolut A	relativ A [%]	kumulativ [%]	xs	ys
0,150	55,6	54,3	103,1	46,8	41,4	301,2	5,24	5,24	0,00	0,00
0,406	776,4	877,0	1045,7	556,4	514,6	3770,1	65,62	70,86	0,15	5,24
0,663	249,6	222,1	282,8	219,5	183,8	1157,8	20,16	91,01	0,41	67,86
0,919	64,2	62,4	129,7	80,5	51,1	388,0	6,75	97,77	0,66	91,01
1,175	24,2	15,3	34,8	22,3	7,0	103,5	1,81	99,58	0,92	97,77
1,431	5,1	1,3	6,5	2,5	1,3	16,8	0,30	99,87	1,17	99,58
1,688	4,6	0,0	1,6	0,0	0,0	6,2	0,10	99,98	1,43	99,87
1,944	0,0	0,0	1,7	0,0	0,0	1,7	0,03	100,01	1,69	99,98
2,200	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,00	100,01	1,94	100,01
2,200	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,00	100,01	2,20	100,01
Summe	1179,7795	1232,33647	1606,0342	928,02848	799,13838	5745,3	100,01			

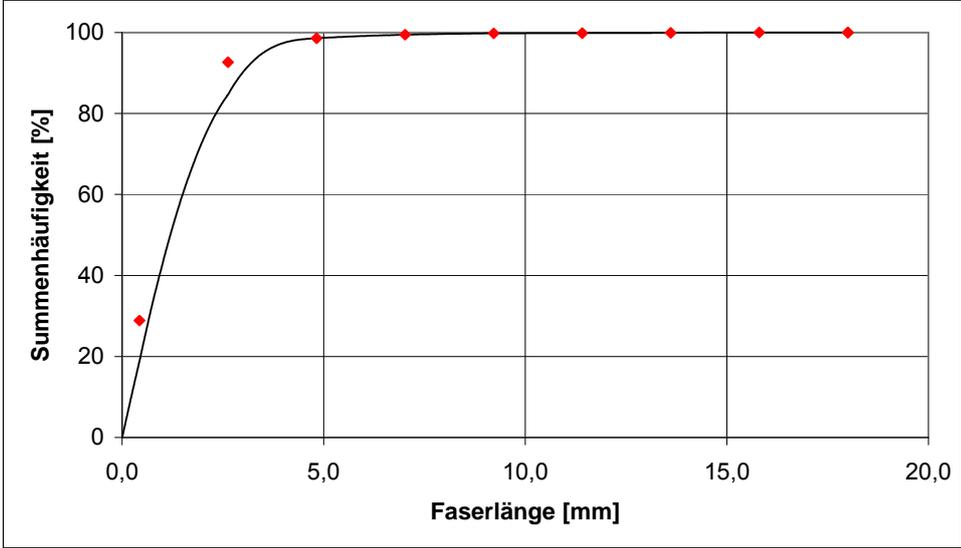


Anhang – Prüfprotokoll QualScan – Länge – Var. 1: Aufschluss bei 16 bar über 8 min

	<p>Prüfprotokoll Länge</p> <p>Partikelanalyse - QualScan</p>	 <p>ihd Institut für Holztechnologie Dresden gGmbH</p>
--	--	--

ihd-Codierung: F_5_04 Bezeichnung-Auftraggeber: Sunds 1 Auftrags.-Nr.: 130370 Bearbeiter: Mäbert Prüfdatum: 31.03.2004	Schlankeitsgrad: 1,53 Mittlere Korngröße (Km): 1,38 mm Korngrößen-Intervall (DK): 2,22 mm Staubanteil: 1,0 42,91 % Feinstanteil: 5,0 98,68 % Feinanteil: 10,0 99,81 % Grobanteil: 15,0 99,98 %	
Rohstoffart: Kiefer Partikelart: Faserstoff		

BIN-Range [mm]	Fasern					Summe der gemessenen Fasern			Werte für die Kennlinie	
	1. Probe ID 2	2. Probe ID 3	3. Probe ID 4	4. Probe ID 5	5. Probe ID 6	absolut A	relativ A [%]	kumulativ [%]	xs	ys
0,430	876,2	1342,1	1092,7	1244,0	158,6	4713,6	28,87	28,87	0,00	0,00
2,626	2255,5	2895,2	2451,7	2159,3	651,5	10413,1	63,78	92,66	0,43	18,87
4,823	245,0	279,4	191,0	179,7	71,6	966,7	5,92	98,58	2,63	84,66
7,019	56,9	49,7	27,6	6,5	0,0	140,6	0,86	99,44	4,82	98,58
9,215	30,9	7,8	7,6	7,5	0,0	53,8	0,33	99,77	7,02	99,44
11,411	0,0	11,1	0,0	0,0	0,0	11,1	0,07	99,84	9,22	99,77
13,608	0,0	13,4	0,0	0,0	0,0	13,4	0,08	99,92	11,41	99,84
15,804	0,0	13,7	0,0	0,0	0,0	13,7	0,09	100,01	13,61	99,92
18,000	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,00	100,01	15,80	100,01
18,000	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,00	100,01	18,00	100,01
Summe	3464,5897	4612,32772	3770,5244	3596,9239	881,73361	16326,1	100,01			



Anhang – Prüfprotokoll QualScan – Breite – Var. 1: Aufschluss bei 16 bar über 8 min

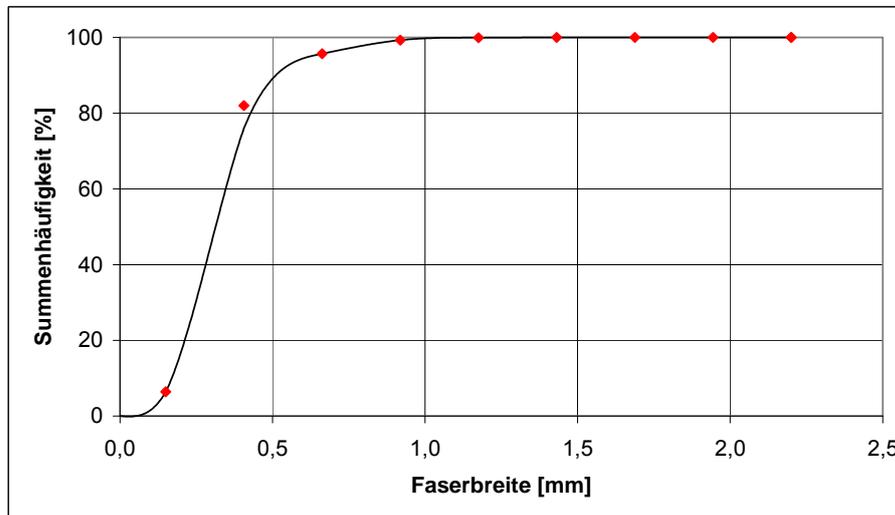
	<p>Prüfprotokoll Breite</p> <p>Partikelanalyse - QualScan</p>	 <p>ihd Institut für Holztechnologie Dresden gGmbH</p>
--	---	--

ihd-Codierung: F_5_04
 Bezeichnung-Auftraggeber: Sunds 1
 16 bar/8 min
 Auftrags.-Nr.: 130370
 Bearbeiter: Mäbert
 Prüfdatum: 31.03.2004

Schlankeitsgrad: 1,53
 Mittlere Korngröße (Km): 0,32 mm
 Korngrößen-Intervall (DK): 0,26 mm
 Staubanteil: 0,1 1,57 %
 Feinstanteil: 0,315 50,45 %
 Feinanteil: 0,5 89,09 %
 Grobanteil: 1,0 99,74 %

Rohstoffart: Kiefer
 Partikelart: Faserstoff

BIN-Range [mm]	Fasern					Summe der gemessenen Fasern			Werte für die Kennlinie	
	1. Probe ID 2	2. Probe ID 3	3. Probe ID 4	4. Probe ID 5	5. Probe ID 6	absolut A	relativ A [%]	kumulativ [%]	xs	ys
0,150	129,1	198,6	162,7	167,7	27,3	685,4	6,41	6,41	0,00	0,00
0,406	1501,7	2266,8	1893,8	2078,8	341,0	8082,1	75,59	82,00	0,15	6,41
0,663	338,4	399,6	322,7	287,5	114,8	1463,1	13,68	95,68	0,41	76,00
0,919	92,8	106,5	92,9	65,6	26,1	383,8	3,59	99,27	0,66	95,68
1,175	17,7	15,4	19,1	15,9	1,9	70,0	0,65	99,93	0,92	99,27
1,431	4,9	1,2	1,3	0,0	0,0	7,4	0,07	99,99	1,17	99,93
1,688	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,00	99,99	1,43	99,99
1,944	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,00	99,99	1,69	99,99
2,200	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,00	99,99	1,94	99,99
2,200	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,00	99,99	2,20	99,99
Summe	2084,6503	2988,13643	2492,416	2615,5625	511,07283	10691,8	99,99			

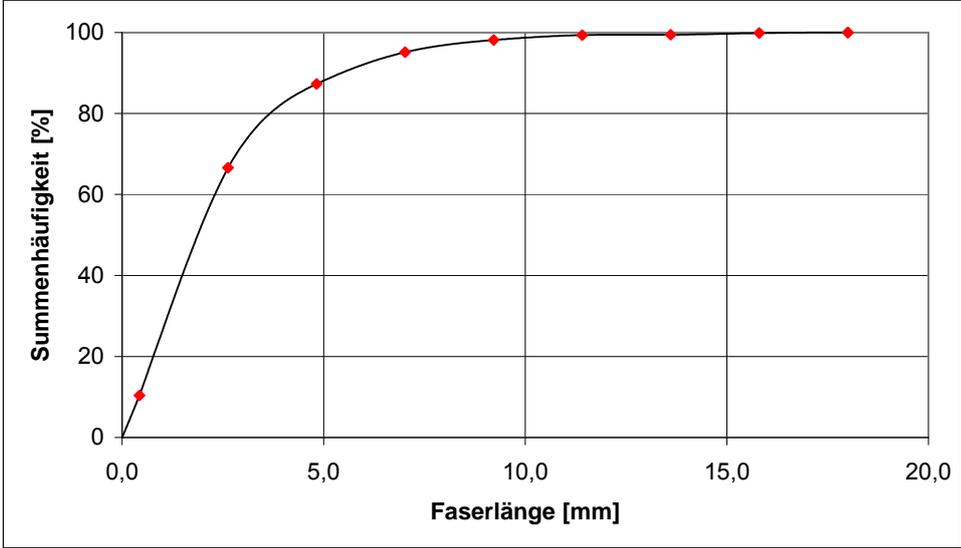


Anhang – Prüfprotokoll QualScan – Länge – Var. 7: Aufschluss bei 8 bar über 4 min

	<p>Prüfprotokoll Länge</p> <p>Partikelanalyse - QualScan</p>	 <p>ihd Institut für Holztechnologie Dresden gGmbH</p>
--	--	--

ihd-Codierung: F_11_04 Bezeichnung-Auftraggeber: Industrie 7 Auftrags.-Nr.: 130370 Bearbeiter: Mäbert Prüfdatum: 31.03.2004	Schlankeitsgrad: 2,84 Mittlere Korngröße (Km): 2,24 mm Korngrößen-Intervall (DK): 3,57 mm Staubanteil: 1,0 26,44 % Feinstanteil: 5,0 88,10 % Feinanteil: 10,0 98,70 % Grobanteil: 15,0 99,68 %	
Rohstoffart: Kiefer Partikelart: Faserstoff		

BIN-Range [mm]	Fasern					Summe der gemessenen Fasern			Werte für die Kennlinie	
	1. Probe ID 1	2. Probe ID 2	3. Probe ID 3	4. Probe ID 4	5. Probe ID 5	absolut A	relativ A [%]	kumulativ [%]	xs	ys
0,430	215,1	225,0	232,8	170,1	324,0	1167,0	10,39	10,39	0,00	0,00
2,626	1402,0	1205,4	1276,5	954,7	1470,8	6309,4	56,19	66,59	0,43	10,39
4,823	557,6	427,7	459,3	334,8	543,5	2323,0	20,69	87,28	2,63	66,59
7,019	232,3	171,5	187,8	101,0	188,7	881,4	7,85	95,12	4,82	87,28
9,215	94,9	33,4	77,8	55,6	76,6	338,3	3,01	98,13	7,02	95,12
11,411	9,4	18,9	19,4	48,2	40,1	136,1	1,21	99,34	9,22	98,13
13,608	0,0	0,0	11,4	0,0	0,0	11,4	0,10	99,44	11,41	99,34
15,804	14,6	0,0	0,0	0,0	30,5	45,1	0,40	99,84	13,61	99,44
18,000	15,9	0,0	0,0	0,0	0,0	15,9	0,14	99,98	15,80	99,84
18,000	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,00	99,98	18,00	99,98
Summe	2541,8865	2082,01939	2265,1202	1664,4577	2674,2208	11227,7	99,98			



Anhang – Prüfprotokoll QualScan – Breite – Var. 7: Aufschluss bei 8 bar über 4 min

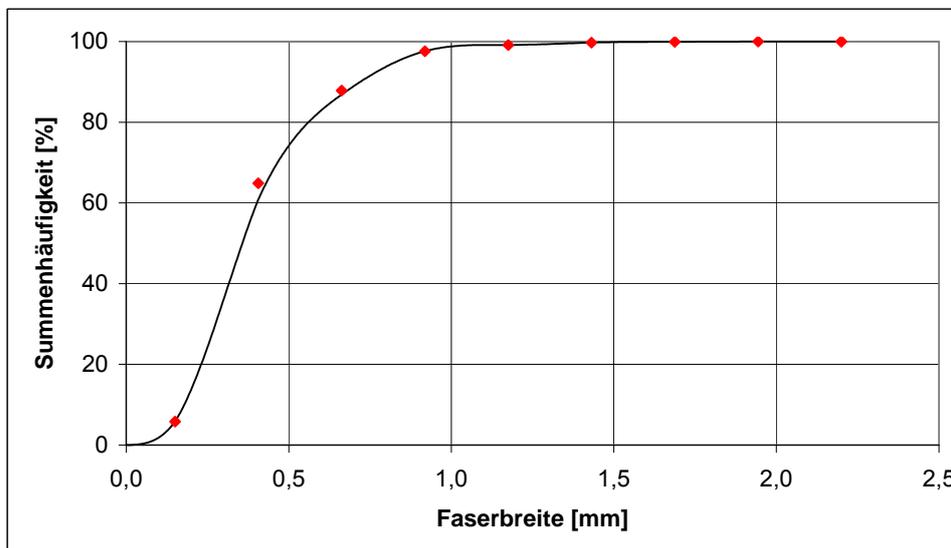
	<p>Prüfprotokoll Breite</p> <p>Partikelanalyse - QualScan</p>	 <p>ihd Institut für Holztechnologie Dresden gGmbH</p>
--	---	--

ihd-Codierung: F_11_04
 Bezeichnung-Auftraggeber: Industrie 7
 8 bar/4 min
 Auftrags.-Nr.: 130370
 Bearbeiter: Mäbert
 Prüfdatum: 31.03.2004

Rohstoffart: Kiefer
 Partikelart: Faserstoff

Schlankeitsgrad: 2,84
 Mittlere Korngröße (Km): 0,39 mm
 Korngrößen-Intervall (DK): 0,40 mm
 Staubanteil: 0,1 1,87 %
 Feinstanteil: 0,315 39,83 %
 Feinanteil: 0,5 74,22 %
 Grobanteil: 1,0 98,79 %

BIN-Range [mm]	Fasern					Summe der gemessenen Fasern			Werte für die Kennlinie	
	1. Probe ID 1	2. Probe ID 2	3. Probe ID 3	4. Probe ID 4	5. Probe ID 5	absolut A	relativ A [%]	kumulativ [%]	xs	ys
0,150	42,6	39,3	48,6	34,1	65,7	230,3	5,82	5,82	0,00	0,00
0,406	456,2	447,2	468,1	342,4	618,2	2332,1	59,05	64,87	0,15	5,82
0,663	203,7	179,0	178,9	135,3	211,2	908,1	22,99	87,87	0,41	60,87
0,919	89,0	76,3	72,8	57,1	89,6	384,8	9,75	97,61	0,66	86,87
1,175	17,1	9,4	10,0	9,7	15,1	61,3	1,54	99,16	0,92	97,61
1,431	6,4	1,2	4,0	3,8	7,5	23,0	0,58	99,74	1,17	99,16
1,688	0,0	1,6	0,0	4,7	1,7	7,9	0,20	99,94	1,43	99,74
1,944	1,8	0,0	0,0	0,0	0,0	1,8	0,05	99,99	1,69	99,94
2,200	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,00	99,99	1,94	99,99
2,200	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,00	99,99	2,20	99,99
Summe	816,77055	753,945839	782,44245	587,08796	1008,9682	3949,2	99,99			



Anhang – Tabelle A1-1

Versuchsreihe I: Physikalische und chemische Eigenschaften von **Industrie-MDF** mit von den Herstellern ausgewiesener erhöhter Feuchtebeständigkeit der Verklebung in Abhängigkeit vom Bindemitteltyp

MDF-Eigenschaften												
Hersteller	CSC	Finsa	Medite	Medite	Willamete	Willamete	Finsa	CSC	Willamete	Plaxil	Plaxil	
MDF-Typ	k. A. ⁶⁰	k. A.	HLS V100	HLS V100	HLS V313	HLS V313	HLS V313	HLS V313	HLS V100	H V313	H V100	
Bindemittel	MUF	PF	PMDI	PMDI	PF	k. A.	MUF	MUF	PMDI	PMDI	PMDI	
IHD-Code	121	122	267	268	269	270	274	275	276	283	284	
Plattendicke (geschliffen) [mm], n = 18	\bar{x} 16,08 s 0,03 v 0,2	16,25 0,04 0,2	15,14 0,03 0,2	22,41 0,03 0,1	15,18 0,04 0,3	21,98 0,04 0,2	18,38 0,03 0,1	18,34 0,05 0,3	18,29 0,03 0,1	19,18 0,05 0,3	18,41 0,04 0,2	
Rohdichte [kg/m ³], n = 18	\bar{x} 727 s 19 v 2,6	749 8 1,1	811 28 3,5	728 9 1,2	753 16 2,2	743 10 1,3	709 11 1,5	752 11 1,4	776 22 2,8	795 31 3,8	768 12 1,6	
Querzugfestigkeit (trocken) [N/mm ²], n = 18	\bar{x} 1,45 s 0,04 v 2,7	1,28 0,07 5,4	2,03 0,14 6,9	1,39 0,10 7,4	1,02 0,09 9,2	0,93 0,13 14,0	1,11 0,11 10,2	1,21 0,07 6,0	1,66 0,23 14,1	1,49 0,30 20,3	1,81 0,12 6,8	
Querzugfestigkeit nach 2 h Kochen [N/mm ²], n = 18	\bar{x} 0,03 s 0,01 v 33,3	0	0,46 0,20 43,7	0,15 0,03 18,1	0,01 0,01 34,7	0	0,01 0,01 17,2	0,04 0,01 22,8	0,42 0,09 20,8	0,20 0,05 27,4	0,35 0,08 22,2	
Querzugfestigkeit nach Zyklus-test [N/mm ²], n = 18	\bar{x} 0,77 s 0,091 v 11,6	0,16 0,03 18,8	1,01 0,08 7,7	0,74 0,11 15,0	0,09 0,03 29,1	0,05 0,02 38,7	0,14 0,06 39,8	0,28 0,06 22,1	1,30 0,12 9,6	0,27 ⁵ 0,06 22,8	0,56 0,14 24,1	
Biegefestigkeit II zur Herstellungsrichtung [N/mm ²], n = 12	\bar{x} 45,0 s 2,5 v 5,5	35,8 1,3 3,6	43,4 3,2 7,3	39,4 1,5 3,7	46,3 2,4 5,2	35,1 2,4 6,7	37,4 1,2 3,3	42,0 2,1 5,0	42,3 3,5 8,3	35,3 2,9 8,3	37,4 2,2 5,9	
Biegefestigkeit \perp zur Herstellungsrichtung [N/mm ²], n = 12	\bar{x} 43,7 s 3,0 v 6,7	34,5 1,1 3,2	45,3 2,8 6,2	40,3 1,5 3,7	48,8 2,1 4,2	37,3 1,8 4,8	35,3 1,4 4,0	44,1 1,3 3,0	44,9 2,4 5,4	35,7 2,7 7,5	37,9 1,6 4,3	
Biegefestigkeit gesamt [N/mm ²], n = 24	\bar{x} 44,3 s 2,7 v 6,1	35,1 1,4 4,0	44,4 3,1 7,0	39,8 1,5 3,8	47,6 2,5 5,3	36,2 2,3 6,4	36,3 1,7 4,7	43,1 2,0 4,7	43,6 3,3 7,4	35,5 2,8 7,8	37,6 1,9 5,1	
Biege-E-Modul II zur Herstellungsrichtung [N/mm ²], n = 12	\bar{x} 3700 s 190 v 5,1	3440 80 2,3	3770 270 7,3	3650 110 2,9	4310 170 4,0	3580 160 4,3	3400 60 1,8	3970 170 4,3	3630 280 7,6	3330 270 8,1	3290 135 4,1	
Biege-E-Modul \perp zur Herstellungsrichtung [N/mm ²], n = 12	\bar{x} 3790 s 230 v 6,1	3250 110 3,4	3940 250 6,3	3780 100 2,7	4680 170 3,7	3940 120 3,1	3190 80 2,4	3880 140 3,5	3910 210 5,4	3320 260 7,8	3390 150 4,3	
Biege-E-Modul gesamt [N/mm ²], n = 24	\bar{x} 3740 s 210 v 5,6	3330 140 4,2	3860 270 7,0	3710 120 3,3	4500 260 6,0	3760 230 6,1	3300 130 3,9	3920 160 4,0	3770 280 7,4	3325 260 7,8	3340 150 4,4	
Dickenquellung nach 2 h WL [%], n = 18	\bar{x} 0,9 s 0,1 v 11,1	1,8 0,1 5,6	0,8 0 6,2	0,6 0 5,1	0,7 0,1 14,8	0,5 0,1 10,2	0,7 0,1 11,7	0,7 0,1 8,9	0,7 0,1 9,5	0,8 0,1 6,9	0,6 0,1 11,8	
Dickenquellung nach 24 h WL [%], n = 18	\bar{x} 3,9 s 0,4 v 10,3	8,2 0,7 8,5	3,3 0,2 5,2	3,1 0,1 2,7	4,6 0,2 4,7	3,4 0,1 3,6	4,4 0,3 6,2	3,4 0,2 4,7	2,9 0,2 8,2	3,1 0,2 5,5	2,8 0,2 6,3	
Dickenquellung nach Zyklus-test [%], n = 18	\bar{x} 8,3 s 0,8 v 9,6	25,3 1,6 6,3	5,6 0,6 10,7	8,1 0,2 2,7	27,1 3,8 14,0	26,7 4,3 15,9	23,5 2,4 10,4	22,8 4,9 21,4	9,0 1,3 14,1	4,5 0,3 7,7	3,5 0,5 13,3	
Feuchtegehalt bei Prüfung [%], n = 12	\bar{x} 8,5 s 0,2 v 2,3	8,0 0,2 2,5	9,2 0,1 0,9	8,6 0,1 0,6	7,7 0,1 1,8	8,7 0,1 0,9	8,0 0,2 1,9	8,3 0,2 2,1	8,9 0,1 1,1	8,5 0,2 2,9	9,1 0,3 3,0	
Formaldehydgehalt, [mg HCHO/100 g Platte _{atro}], n = 2	A-Wert B-Wert	nicht bestimmt		0,21 0,20	0,38 0,38	6,04 6,38	5,70 5,42	4,89 5,00	3,47 3,55	0,45 0,48	0,26 0,30	0,31 0,18
pH-Wert, n = 2	\bar{x}	nicht bestimmt		5,08	4,95	5,37	5,24	4,98	5,21	4,93	5,38	4,82

⁶⁰ keine Angabe des Herstellers

Anhang – Tabelle A1-2

Versuchsreihe I: Plattendicke, Rohdichte und Feuchtegehalt von **Industrie-MDF nach technischer Bewitterung** (Kurzzeitbewitterung = KZB, Entnahme nach 8, 16 und 24 Wochen) sowie nach natürlicher Bewitterung (Freibewitterung = FB, Entnahme nach 24, 48, 72, 98, 120 und 160 Wochen) im Vergleich zum Ausgangszustand

MDF-Eigenschaften												
Hersteller	CSC	FIN-SA	Medite	Medite	Willamete	Willamete	FIN-SA	CSC	Willamete	Plaxil	Plaxil	
MDF-Typ	k. A. ⁶¹	k. A.	HLS V100	HLS V100	HLS V313	HLS V313	HLS V313	HLS V313	HLS V100	H V313	H V100	
Bindemittel	MUF	PF	PMDI	PMDI	PF	k. A.	MUF	MUF	PMDI	PMDI	PMDI	
IHD-Code	121	122	267	268	269	270	274	275	276	283	284	
Plattendicke [mm]												
- Ausgangszustand, n = 18	\bar{x}	16,08	16,25	15,14	22,41	15,18	21,98	18,38	18,34	18,29	19,18	18,41
	s	0,03	0,04	0,03	0,03	0,04	0,04	0,03	0,05	0,03	0,05	0,04
	v	0,2	0,2	0,2	0,1	0,3	0,2	0,1	0,3	0,1	0,3	0,2
- nach 8 Wochen KZB, n = 8	\bar{x}	17,37	20,05	15,88	23,93	18,24	26,55	21,12	21,21	19,34	20,00	19,06
	s	0,06	0,24	0,02	0,09	0,09	0,32	0,23	0,12	0,13	0,22	0,05
- nach 16 Wochen KZB, n = 8	\bar{x}	18,01	21,47	16,28	24,73	19,59	28,56	21,93	22,52	19,95	20,39	19,39
	s	0,10	0,43	0,05	0,14	0,44	0,35	0,10	0,22	0,06	0,02	0,052
- nach 24 Wochen KZB, n = 8	\bar{x}	n. m. ⁶²	25,98	16,48	24,61	21,24	31,11	23,25	23,12	20,18	20,76	19,53
	s	p.	0,66	0,07	0,08	0,661	0,6	0,65	0,73	0,06	0,19	0,06
- nach 24 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	16,30	16,90	15,23	22,60	15,56	22,30	18,73	18,70	18,43	19,55	18,63
- nach 48 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	16,47	17,38	15,48	22,94	16,14	23,72	19,02	19,05	18,74	19,44	18,55
- nach 72 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	16,64	17,55	15,40	22,77	16,73	24,38	18,92	19,22	18,56	19,50	18,62
- nach 96 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	16,58	17,81	15,53	23,12	17,32	25,86	19,49	19,06	18,78	19,62	18,66
- nach 120 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	16,96	18,19	15,42	23,07	17,90	27,14	19,33	19,14	18,69	19,66	18,72
- nach 160 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	16,70	19,16	15,58	23,33	18,75	28,10	20,06	19,90	18,86	19,75	18,81
Rohdichte [kg/m³]												
- Ausgangszustand, n = 18	\bar{x}	727	749	811	728	753	743	709	752	776	795	768
	s	19	8	28	9	16	10	11	11	22	31	12
	v	2,6	1,1	3,5	1,2	2,2	1,3	1,5	1,4	2,8	3,8	1,6
- nach 8 Wochen KZB, n = 8	\bar{x}	674	576	779	694	610	606	603	666	747	740	749
	s	8	16	16	5	16	3	13	9	15	2	17
- nach 16 Wochen KZB, n = 8	\bar{x}	640	515	746	678	548	548	574	600	730	724	731
	s	12	14	6	6	15	19	11	6	7	11	22
- nach 24 Wochen KZB, n = 8	\bar{x}	n. m. ⁶²	413	744	667	498	484	521	574	702	721	716
	s	p.	12	5	8	18	10	31	25	16	8	13
- nach 24 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	743	695	782	719	726	724	709	741	776	798	762
- nach 48 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	719	701	781	716	716	686	679	735	777	788	762
- nach 72 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	727	665	783	724	685	663	690	717	785	775	751
- nach 96 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	732	682	767	725	669	637	687	738	772	791	752
- nach 120 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	711	646	786	724	641	590	677	725	778	796	753
- nach 160 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	715	586	777	712	609	573	655	695	767	792	749
Feuchtegehalt bei Prüfung [%]												
- Ausgangszustand, n = 18	\bar{x}	8,5	8,0	9,2	8,6	7,7	8,7	8,0	8,3	8,9	8,5	9,1
	s	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,1	0,2	0,3
	v	2,3	2,5	0,9	0,6	1,8	0,9	1,9	2,1	1,1	2,9	3,0
- nach 8 Wochen KZB, n = 4	\bar{x}	14,6	14,8	12,4	13,1	14,2	15,0	14,3	14,9	12,5	13,0	12,6
- nach 16 Wochen KZB, n = 4	\bar{x}	14,8	14,8	13,6	15,0	14,6	15,0	14,8	15,4	13,6	14,0	13,4
- nach 24 Wochen KZB, n = 4	\bar{x}	n. m. ⁶²	15,2	14,2	14,4	14,9	15,2	15,1	15,2	14,1	13,9	13,4
	s	p.										
- nach 24 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	8,6	8,4	9,4	9,0	8,3	8,7	8,1	8,4	8,8	10,4	10,2
- nach 48 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	9,4	9,7	10,2	9,9	10,1	10,6	10,7	10,8	10,5	10,4	10,3
- nach 96 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	10,7	10,4	10,2	9,9	11,4	11,2	10,0	10,2	9,9	10,6	10,5
- nach 120 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	10,7	10,4	10,2	9,9	11,4	11,2	10,0	10,2	9,9	10,7	10,5
- nach 160 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	9,8	9,9	10,1	10,0	10,5	10,6	9,1	9,3	9,9	9,9	9,8
- nach 72 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	11,0	11,6	11,2	11,4	12,2	12,1	11,0	11,3	10,9	10,5	10,4

⁶¹ keine Angabe des Herstellers

⁶² nicht mehr prüfbar, Proben zerfallen

Anhang – Tabelle A1-3

Versuchsreihe I: Querzugfestigkeit, Biege-Elastizitätsmodul und Biegefestigkeit von **Industrie-MDF nach technischer Bewitterung** (Kurzzeitbewitterung = KZB, Entnahme nach 8, 16 und 24 Wochen) sowie nach natürlicher Bewitterung (Freibewitterung = FB, Entnahme nach 24, 48, 72, 98, 120 und 160 Wochen) im Vergleich zum Ausgangszustand

MDF-Eigenschaften												
Hersteller	CSC	FIN-SA	Medi-te	Medi-te	Willamete	Willamete	FIN-SA	CSC	Willamete	Plaxil	Plaxil	
MDF-Typ	k. A. ⁶³	k. A.	HLS V100	HLS V100	HLS V313	HLS V313	HLS V313	HLS V313	HLS V100	H V313	H V100	
Bindemittel	MUF	PF	PMDI	PMDI	PF	k. A.	MUF	MUF	PMDI	PMDI	PMDI	
IHD-Code	121	122	267	268	269	270	274	275	276	283	284	
Querzugfestigkeit [N/mm²]												
- Ausgangszustand, n = 18	\bar{x} s v	1,45 0,04 2,7	1,28 0,07 5,4	2,03 0,14 6,9	1,39 0,10 7,4	1,02 0,09 9,2	0,93 0,13 14,0	1,11 0,11 10,2	1,21 0,07 6,0	1,66 0,23 14,1	1,49 0,30 20,3	1,81 0,12 6,8
- nach 8 Wochen KZB, n = 8	\bar{x} s	0,31 0,09	0,09 0,02	1,41 0,16	0,76 0,07	0,1 0,01	0,03 0,01	0,24 0,08	0,17 0,07	1,24 0,19	0,51 0,11	0,96 0,10
- nach 16 Wochen KZB, n = 8	\bar{x} s	0,15 0,04	0,01 0,01	0,92 0,11	0,53 0,07	0,03 0,01	0,01 0	0,07 0,03	0,08 0,02	0,87 0,20	0,69 0,21	1,14 0,31
- nach 24 Wochen KZB, n = 8	\bar{x} s	n. m. ⁶⁴ p.	n. m. p.	0,87 0,21	0,51 0,04	0,01 0	n. m. p.	0,03 0,01	0,07 0,03	0,82 0,09	0,40 0,25	0,64 0,22
- nach 24 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	1,27	0,45	1,67	1,38	0,30	0,25	0,84	0,95	1,21	1,31	1,62
- nach 48 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	1,01	0,41	1,56	1,15	0,25	0,11	0,59	0,68	1,37	1,45	2,01
- nach 72 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	0,76	0,34	1,38	1,3	0,12	0,08	0,83	0,62	1,59	1,58	1,99
- nach 96 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	0,57	0,21	1,47	0,84	0,11	0,05	0,35	0,38	1,19	0,78	1,35
- nach 120 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	0,42	0,11	1,41	0,64	0,07	0,02	0,37	0,47	1,34	0,96	1,22
- nach 160 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	0,39	0,10	1,20	0,87	0,11	0,11	0,38	0,31	1,21	0,93	1,08
Biege-Elastizitätsmodul [N/mm²]												
- Ausgangszustand, n = 24	\bar{x} s v	3740 210 5,6	3330 140 4,2	3860 270 7,0	3710 120 3,3	4500 260 6,0	3760 230 6,1	3300 130 3,9	3920 160 4,0	3770 280 7,4	3325 260 7,8	3340 150 4,4
- nach 8 Wochen KZB, n = 4	\bar{x}	1180	440	1770	1030	700	250	770	790	1740	1440	1830
- nach 16 Wochen KZB, n = 4	\bar{x}	826	207	1608	739	280	109	409	381	1413	1107	1496
- nach 24 Wochen KZB, n = 4	\bar{x}	n. m. p.	50	1385	780	110	50	205	260	1095	985	1335
- nach 24 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	2570	1760	2680	1980	2590	1640	1880	2160	2540	2222	2343
- nach 48 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	2145	1385	2550	1685	1875	830	1495	1795	2215	2055	2335
- nach 72 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	2115	1515	2640	1905	1590	735	1565	1545	2560	2155	2305
- nach 96 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	2080	1105	2460	1595	1020	590	1453	1805	2355	1930	2195
- nach 120 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	1654	1069	2546	1726	822	286	1387	1521	2350	1992	2156
- nach 160 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	1814	751	2352	1442	567	300	1090	1176	2260	2001	2120
Biegefestigkeit [N/mm²]												
- Ausgangszustand, n = 24	\bar{x} s v	44,3 2,7 6,1	35,1 1,4 4,0	44,4 3,1 7,0	39,8 1,5 3,8	47,6 2,5 5,3	36,2 2,3 6,4	36,3 1,7 4,7	43,1 2,0 4,7	43,6 3,3 7,4	35,5 2,8 7,8	37,6 1,9 5,1
- nach 8 Wochen KZB, n = 4	\bar{x}	18,8	9,3	31,9	23,6	12,5	8,3	13,4	14,2	29,7	23,1	30,4
- nach 16 Wochen KZB, n = 4	\bar{x}	13,0	5,3	26,4	18,3	6,7	5,6	9,6	7,8	25,8	18,4	27,6
- nach 24 Wochen KZB, n = 4	\bar{x}	n. m. p.	2,7	25,4	19,6	4,0	3,7	6,0	5,9	21,6	14,2	24,3
- nach 24 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	44,7	26,9	39,6	36,9	35,8	28,7	33,2	37,9	41,0	33,1	37,7
- nach 48 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	37,3	22,5	38,8	32,8	29,1	20,6	26,6	34,0	37,8	29,6	37,5
- nach 72 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	37,0	25,4	39,7	36,9	26,4	20,0	29,1	31,1	42,7	23,5	37,9
- nach 96 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	33,7	17,8	35,6	32,6	18,8	18,6	27,5	36,0	40,1	30,1	34,9
- nach 120 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	31,0	18,4	40,3	34,9	17,5	12,3	26,8	31,8	40,8	31,2	34,8
- nach 160 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	32,7	15,5	36,2	30,0	12,7	12,0	21,4	23,4	39,0	31,1	33,6

⁶³ keine Angabe des Herstellers

⁶⁴ nicht mehr prüfbar, Proben zerfallen

Anhang – Tabelle A1-4

Versuchsreihe I: Dickenquellung nach 2 und 24 h Wasserlagerung von **Industrie-MDF nach technischer Bewitterung** (Kurzzeitbewitterung = KZB, Entnahme nach 8, 16 und 24 Wochen) sowie nach natürlicher Bewitterung (Freibewitterung = FB, Entnahme nach 24, 48, 72, 98, 120 und 160 Wochen) im Vergleich zum Ausgangszustand

MDF-Eigenschaften												
Hersteller	CSC	FIN-SA	Medite	Medite	Willamete	Willamete	FIN-SA	CSC	Willamete	Plaxil	Plaxil	
MDF-Typ	k. A. ⁶⁵	k. A.	HLS V100	HLS V100	HLS V313	HLS V313	HLS V313	HLS V313	HLS V100	H V313	H V100	
Bindemittel	MUF	PF	PMDI	PMDI	PF	k. A.	MUF	MUF	PMDI	PMDI	PMDI	
IHD-Code	121	122	267	268	269	270	274	275	276	283	284	
Dickenquellung nach 2 h WL [%]												
- Ausgangszustand, n = 18	\bar{x}	0,9	1,8	0,8	0,6	0,7	0,5	0,7	0,7	0,7	0,8	0,6
	s	0,1	0,1	0	0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
	v	11,1	5,6	6,2	5,1	14,8	10,2	11,7	8,9	9,5	6,9	11,8
- nach 8 Wochen KZB, n = 8	\bar{x}	9,2	8,5	1,6	2,9	16,0	14,4	5,3	9,2	2,2	1,7	1,3
	s	4,1	1,5	0,4	0,5	3,3	2,4	2,3	4,3	0,4	0,2	0,1
- nach 16 Wochen KZB, n = 8	\bar{x}	19,7	17,8	4,8	5,4	21,6	7,4	21,0	8,3	23,1	5,8	2,0
	s	2,4	0,9	1,5	0,3	1,9	0,9	3,1	2,3	0,2	0,8	0,4
- nach 24 Wochen KZB, n = 8	\bar{x}	n. m.	22,3	9,5	13,8	28,6	23,8	16,4	24,6	12,1	10,3	4,8
	s	p. ⁶⁶	1,8	2,1	1,2	1,0	0,6	2,8	1,5	1,5	1,4	0,5
- nach 24 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	0,9	1,4	0,7	0,6	1,3	1,1	0,8	0,7	0,6	0,5	0,5
- nach 48 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	0,8	1,8	0,8	0,9	3,8	5,6	0,9	1,3	0,3	0,5	0,5
- nach 72 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	1,3	2,0	0,7	0,6	2,2	3,5	0,8	0,9	0,5	0,3	0,2
- nach 96 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	1,1	2,5	0,7	1,5	6,4	6,2	1,3	1,0	0,4	0,7	0,6
- nach 120 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	2,0	2,1	0,7	1,4	6,4	10,8	1,3	3,2	0,8	0,6	0,5
- nach 160 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	3,5	7,3	1,2	2,2	9,4	6,8	2,2	1,7	1,1	0,8	0,7
Dickenquellung nach 24 h WL [%]												
- Ausgangszustand, n = 18	\bar{x}	3,9	8,2	3,3	3,1	4,6	3,4	4,4	3,4	2,9	3,1	2,8
	s	0,4	0,7	0,2	0,1	0,2	0,1	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2
	v	10,3	8,5	5,2	2,7	4,7	3,6	6,2	4,7	8,2	5,5	6,3
- nach 8 Wochen KZB, n = 8	\bar{x}	21,9	19,7	5,3	6,9	25,3	23,3	13,0	21,9	6,5	5,3	4,2
	s	0,4	1,5	0,8	1,1	0,2	0,3	3,5	0,7	0,2	1,4	0,4
- nach 16 Wochen KZB, n = 8	\bar{x}	24,8	23,3	11,0	11,3	28,4	15,9	25,8	12,8	27,5	9,6	5,3
	s	0,1	0,9	2,0	1,7	1,2	2,7	0,7	1,7	0,3	0,5	0,7
- nach 24 Wochen KZB, n = 8	\bar{x}	n. m.	23,5	13,3	15,1	30,6	26,8	19,3	26,9	14,5	11,5	7,8
	s	p.	1,2	1,5	0,5	1,2	0,2	1,8	1,3	1,0	0,9	0,9
- nach 24 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	4,1	5,6	2,7	2,6	5,2	4,0	4,0	3,4	2,8	2,1	2,1
- nach 48 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	3,2	6,3	2,9	3,0	8,3	9,8	4,8	5,0	1,6	2,4	2,2
- nach 72 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	4,3	6,6	3,0	2,7	5,6	6,4	4,5	5,1	2,6	1,8	1,6
- nach 96 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	4,7	9,6	3,2	4,5	10,5	10,5	5,7	4,5	2,1	2,9	2,9
- nach 120 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	5,3	5,2	2,8	4,4	9,7	14,5	4,5	5,4	2,8	2,1	2,0
- nach 160 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	7,3	11,3	3,4	4,7	13,3	9,6	5,9	5,1	2,5	2,3	2,2

⁶⁵ keine Angabe des Herstellers

⁶⁶ nicht mehr prüfbar, Proben zerfallen

Anhang – Tabelle A2

Versuchsreihe II: Physikalische und chemische Eigenschaften **bindemittelfreier Labor-MDF** in Abhängigkeit von den Aufschlussbedingungen bei der labortechnischen Herstellung von Kiefernholzfasern (im Vergleich zu Industriefaserstoff),

Plattennenddicke 10 mm, Heizplattentemperatur 220 °C, Presszeitfaktor 60 s/mm_{Plattendicke}, ohne Hydrophobierungsmittel

MDF-Eigenschaften	IHD-Code	Aufschlussbedingungen: Druck, Temperatur, Zeit						
		8 bar 170 °C 4 min	12 bar 187 °C 4 min	16 bar 200 °C 4 min	8 bar 170 °C 8 min	12 bar 187 °C 8 min	16 bar 200 °C 8 min	8 bar 170 °C 4 min Industrie
		2746	2745	2744	2743	2742	2741	2747
Feuchtegehalt vor Heißpresse [%], n = 2	\bar{x}	8,2	8,0	8,2	8,2	8,0	7,5	8,0
Plattendicke (geschliffen) [mm], n = 6	\bar{x}	10,10	10,05	9,92	10,09	10,00	9,88	10,12
	s	0,02	0,03	0,04	0,04	0,03	0,04	0,05
	v	0,2	0,2	0,4	0,4	0,3	0,5	0,5
Rohdichte [kg/m ³], n = 6	\bar{x}	798	774	763	799	763	754	790
	s	25,3	27,6	23,4	23,9	28,3	32,6	23,8
	v	3,2	3,6	3,1	3,0	3,7	4,3	3,0
Querzugfestigkeit (trocken) [N/mm ²], n = 6	\bar{x}	0,15	0,18	0,25	0,18	0,20	0,34	0,17
	s	0,05	0,05	0,05	0,05	0,06	0,13	0,07
	v	33,2	27,1	20,2	26,9	30,1	37,5	43,6
Biegefestigkeit [N/mm ²], n = 3	\bar{x}	18,90	17,15	13,12	15,68	11,67	7,38	17,46
	s	1,76	1,60	1,09	1,23	1,20	1,03	1,37
	v	9,2	9,3	8,3	7,8	10,3	14,0	7,8
Biege-E-Modul [N/mm ²], n = 3	\bar{x}	2870	2870	2440	2810	2510	1780	3040
	s	181	203	173	201	138	297	109
	v	6,3	7,1	7,1	7,2	5,5	16,7	3,6
Dickenquellung nach 2 h WL [%], n = 6	\bar{x}	38,61	9,57	8,87	25,90	11,86	6,46	17,15
	s	2,09	3,04	0,16	1,32	0,22	0,09	5,01
	v	5,41	31,71	1,77	5,11	1,82	1,39	29,22
Dickenquellung nach 24 h WL [%], n = 6	\bar{x}	46,15	14,85	9,61	30,24	13,06	7,01	28,15
	s	1,81	1,09	0,13	1,08	0,30	0,10	1,51
	v	3,91	7,37	1,39	3,56	2,28	1,48	5,38
Dickenquellung nach 48 h WL [%], n = 6	\bar{x}	48,16	15,54	9,78	31,43	13,40	7,20	29,50
	s	1,81	0,77	0,16	1,01	0,29	0,11	1,41
	v	3,75	4,94	1,61	3,2	2,13	1,50	4,79
Wasseraufnahme nach 24 h WL [%], n = 6	\bar{x}	108,83	72,43	65,72	85,83	69,05	65,89	86,26
	s	7,48	8,93	3,99	5,42	4,12	5,62	5,26
	v	6,87	12,33	6,06	6,32	5,97	8,54	6,10
Wasseraufnahme nach 48 h WL [%], n = 6	\bar{x}	111,84	73,99	66,32	88,32	70,36	66,77	88,50
	s	7,38	7,99	4,00	5,03	4,22	5,63	4,90
	v	6,60	10,80	6,03	5,70	6,00	8,42	5,54
Feuchtegehalt bei Prüfung [%], n = 4	\bar{x}	6,9	5,3	4,6	6,2	5,1	4,3	6,2
Formaldehydgehalt, [mg HCHO/100 g Plat- te _{atro}], n = 2	A-Wert	0,96	0,77	0,76	0,81	0,89	0,78	0,85
	B-Wert	1,50	1,23	1,22	1,30	1,43	1,26	1,33
pH-Wert, [], n = 2	\bar{x}	4,3	4,3	4,1	4,2	4,1	4,0	4,1

Anhang – Tabelle A3

Versuchsreihe III: Physikalische und chemische Eigenschaften **bindemittelfreier Labor-HDF** in Abhängigkeit vom Presszeitfaktor bei der Plattenherstellung und von den Aufschlussbedingungen bei der labor-technischen Herstellung von Kiefernholzfasern, Plattenenddicke 6 mm, Feuchtegehalt vor dem Heißpressen 8 %, Heizplattentemperatur 220 °C, ohne Hydrophobierungsmittel

HDF-Eigenschaften		Presszeitfaktor [s/mm ^{Plattendicke}]					
		60			40		
		Aufschlussbedingungen: Druck, Temperatur, Zeit					
		8 bar 170 °C 4 min	12 bar 187 °C 4 min	16 bar 200 °C 4 min	8 bar 170 °C 4 min	12 bar 187 °C 4 min	16 bar 200 °C 4 min
IHD-Code		3090	3091	3094	3095	3097	3098
Plattendicke (geschliffen) [mm], n = 12	\bar{x}	6,47	6,48	6,46	6,49	6,52	6,51
	s	0,04	0,04	0,03	0,04	0,05	0,03
	v	0,6	0,6	0,5	0,7	0,8	0,4
Rohdichte [kg/m ³], n = 12	\bar{x}	924	903	865	908	905	859
	s	20,2	35,9	52,4	24,5	37,3	52,9
	v	2,2	3,1	6,1	2,7	4,1	6,2
Querzugfestigkeit (trocken) [N/mm ²], n = 18	\bar{x}	0,19	0,30	0,35	0,20	0,49	0,41
	s	0,05	0,16	0,15	0,15	0,19	0,15
	v	26,9	51,9	42,7	72,3	38,8	35,6
Biegefestigkeit [N/mm ²], n = 6	\bar{x}	35,67	28,50	23,42	38,70	24,30	30,79
	s	6,7	7,16	2,07	4,13	1,98	4,13
	v	18,8	25,1	8,8	10,7	7,8	13,4
Biege-E-Modul [N/mm ²], n = 6	\bar{x}	4975	4981	4024	4842	4626	4345
	s	217	197	323	379	135	436
	v	4,4	3,9	8,0	7,8	2,9	10,0
Dickenquellung nach 2 h WL [%], n = 12	\bar{x}	132,6	37,2	20,9	166,6	34,7	31,0
	s	17,2	7,7	2,1	25,5	15,6	4,2
	v	13,0	20,7	10,1	15,3	44,9	13,4
Dickenquellung nach 24 h WL [%], n = 12	\bar{x}	159,5	56,6	26,0	201,2	61,1	41,5
	s	15,5	3,3	2,6	30,2	5,3	3,7
	v	9,7	5,8	9,9	15,0	8,7	8,9
Dickenquellung nach 48 h WL [%], n = 12	\bar{x}	163,9	57,9	26,5	208,5	62,8	42,6
	s	15,1	2,9	2,6	31,3	5,1	3,7
	v	9,2	5,0	9,7	15,0	8,1	8,8
Wasseraufnahme nach 2 h WL [%], n = 12	\bar{x}	166,8	83,2	60,8	216,2	69,9	73,7
	s	23,7	8,0	8,8	37,2	27,7	12,3
	v	14,2	9,7	14,4	17,2	39,7	16,6
Wasseraufnahme nach 24 h WL [%], n = 12	\bar{x}	200,5	97,6	67,6	263,1	99,9	86,9
	s	23,0	7,6	8,2	45,2	11,5	10,7
	v	11,4	7,8	12,2	17,2	11,5	12,3
Wasseraufnahme nach 48 h WL [%], n = 12	\bar{x}	206,2	99,4	68,5	272,0	102,8	87,4
	s	23,0	7,2	8,3	46,7	11,2	10,7
	v	11,2	7,2	12,1	17,2	10,9	12,3
Kantenquellung nach 24 h WL [%], n = 12	\bar{x}	151,6	71,9	22,2	195,0	55,9	40,6
	s	25,0	12,2	0,2	14,8	1,8	0,8
	v	16,5	17,0	0,8	7,6	3,1	2,0
Feuchtegehalt bei Prüfung [%], n = 4	\bar{x}	5,4	4,6	4,7	5,7	4,9	4,7
	s	0,2	0	0,3	0,2	0	0,1
	v	3,7	0,7	6,0	3,0	0,6	3,0
Formaldehydgehalt, [mg HCHO/100 g Plat- te _{atro}], n = 2	A-Wert	0,44	0,41	0,35	nicht bestimmt		
	B-Wert	0,75	0,72	0,62			
pH-Wert, [], n = 2	\bar{x}	4,55	4,23	4,26	4,43	4,31	4,24

Anhang – Tabelle A4-1

Versuchsreihe IV-1: Physikalische und chemische Eigenschaften von **Labor-MDF mit 10 % UF-Harz** (Festanteil bezogen auf Faserstoff_{atro}) in Abhängigkeit von den Aufschlussbedingungen bei der labortechnischen Herstellung von Kiefernholzfasern, Plattennendicke 16 mm, Heizplattentemperatur 190 °C, Presszeitfaktor 18 s/mm_{Plattendicke}, mit 1,2 % Hydrophobierungsmittel (Festanteil bezogen auf Faserstoff_{atro})

MDF-Eigenschaften		Aufschlussbedingungen: Druck, Temperatur, Zeit					
		8 bar 170 °C 4 min	12 bar 187 °C 4 min	16 bar 200 °C 4 min	8 bar 170 °C 8 min	12 bar 187 °C 8 min	16 bar 200 °C 8 min
IHD-Code		2588	2587	2586	2585	2584	2583
Feuchtegehalt vor Heiß- presse [%], n = 2	\bar{x}	9,6	9,1	8,7	9,1	9,8	9,5
Plattendicke (geschliffen) [mm], n = 10	\bar{x}	16,07	16,05	16,02	16,08	16,08	15,79
	s	0,06	0,04	0,08	0,05	0,04	0,07
	v	0,4	0,2	0,5	0,3	0,3	0,4
Rohdichte [kg/m ³], n = 10	\bar{x}	724	720	707	745	726	737
	s	14	15	22	19	31	17
	v	1,9	2,1	3,0	2,5	4,2	2,3
Querzugfestigkeit (tro- cken) [N/mm ²], n = 10	\bar{x}	0,93	0,71	0,38	0,90	0,38	0,40
	s	0,06	0,06	0,03	0,05	0,08	0,09
	v	6,3	8,2	7,4	5,4	20,5	22,4
Biegefestigkeit [N/mm ²], n = 8	\bar{x}	30,33	20,56	10,10	22,68	8,51	3,34
	s	1,46	1,5	0,99	1,32	0,95	0,37
	v	4,8	7,3	9,8	5,8	11,1	11,0
Biege-E-Modul [N/mm ²], n = 8	\bar{x}	3240	2850	2070	3060	1880	940
	s	135	105	142	56	151	172
	v	4,2	3,7	6,8	1,8	8,0	18,3
Dickenquellung nach 2 h WL [%], n = 10	\bar{x}	0,9	0,7	0,5	0,8	0,5	0,6
	s	0	0	0	0,1	0,1	0
	v	4,0	5,0	7,0	7,5	28,3	0,2
Dickenquellung nach 24 h WL [%], n = 120	\bar{x}	5,0	4,6	4,2	4,6	3,5	2,6
	s	0,2	0,1	0,1	0,1	0,6	0,2
	v	3,7	1,4	2,0	1,9	18,8	6,6
Wasseraufnahme nach 24 h WL [%], n = 10	\bar{x}	18,7	18,3	25,8	18,5	19,5	35,0
	s	0,8	0,3	1,8	0,7	2,0	5,4
	v	4,0	1,4	7,0	4,0	10,1	15,5
Feuchtegehalt bei Pr- fung [%], n = 6	\bar{x}	7,6	7,1	7,0	7,2	7,7	8,0
	s	0,3	0,2	0,2	0,1	0,1	0,2
	v	4,2	3,1	2,8	1,4	1,3	2,8
Formaldehydgehalt, [mg HCHO/100 g Plat- te _{atro}], n = 2	A-Wert	7,20	6,77	6,3	5,85	6,81	6,83
	B-Wert	8,15	7,97	8,03	7,09	8,16	8,55
pH-Wert, [], n = 2	\bar{x}	4,8	4,8	4,7	4,8	4,8	4,6

Anhang – Tabelle A4-2

Versuchsreihe IV-2: Physikalische und chemische Eigenschaften von **Labor-MDF mit 14 % UF-Harz** (Festanteil bezogen auf Faserstoff_{atro}) in Abhängigkeit von den Aufschlussbedingungen bei der labortech-nischen Herstellung von Kiefernholzfaserstoffen, Plattennendicke 16 mm, Heizplattentemperatur 190 °C, Presszeitfaktor 18 s/mm_{Plattendicke}, mit 1,2 % Hydrophobierungsmittel (Festanteil bezogen auf Faserstoff_{atro})

MDF-Eigenschaften		Aufschlussbedingungen: Druck, Temperatur, Zeit					
		8 bar 170 °C 4 min	12 bar 187 °C 4 min	16 bar 200 °C 4 min	8 bar 170 °C 8 min	12 bar 187 °C 8 min	16 bar 200 °C 8 min
IHD-Code		2594	2593	2592	2591	2590	2589
Feuchtegehalt vor Heiß- presse [%], n = 2	\bar{x}	9,5	9,2	9,1	9,3	9,0	8,9
Plattendicke (geschliffen) [mm], n = 10	\bar{x}	15,84	15,77	15,78	15,80	15,77	15,72
	s	0,03	0,03	0,06	0,04	0,04	0,04
	v	0,2	0,2	0,4	0,2	0,3	0,2
Rohdichte [kg/m ³], n = 10	\bar{x}	744	736	731	754	744	745
	s	14	18	29	18,0	28	33
	v	1,8	2,4	3,9	2,4	3,7	4,5
Querzugfestigkeit (tro- cken) [N/mm ²], n = 10	\bar{x}	1,17	1,02	0,77	1,04	0,81	0,62
	s	0,04	0,08	0,15	0,05	0,08	0,13
	v	3,5	8,3	19,1	4,4	9,8	20,8
Biegefestigkeit [N/mm ²], n = 8	\bar{x}	32,59	21,84	11,25	24,46	13,04	4,89
	s	1,50	1,10	1,78	1,82	0,73	0,71
	v	4,6	5,1	15,8	7,5	5,6	14,5
Biege-E-Modul [N/mm ²], n = 8	\bar{x}	3520	3060	2220	3210	2490	1430
	s	82	102	268	73	151	199
	v	2,3	3,3	12,1	2,3	6,0	13,9
Dickenquellung nach 2 h WL [%], n = 10	\bar{x}	0,7	0,4	0,4	0,6	0,4	0,4
	s	0,1	0,1	0,1	0	0,1	0
	v	11,1	23,0	14,1	0,3	14,3	10,2
Dickenquellung nach 24 h WL [%], n = 120	\bar{x}	4,3	3,7	3,6	3,7	3,5	2,4
	s	0,4	0,1	0,5	0,1	0,3	0,2
	v	8,4	1,9	13,1	2,0	8,5	6,7
Wasseraufnahme nach 24 h WL [%], n = 10	\bar{x}	16,6	18,4	18,2	15,3	16,1	25,5
	s	1,6	1,0	2,7	0,8	0,4	5,5
	v	9,7	5,7	14,9	5,1	2,4	21,5
Feuchtegehalt bei Pr- fung [%], n = 6	\bar{x}	6,5	5,8	6,8	6,6	6,8	6,8
	s	0,2	0,1	0,5	0,1	0,3	0
	v	3,5	2,0	7,3	1,2	3,9	0,6
Formaldehydgehalt, [mg HCHO/100 g Plat- te _{atro}], n = 2	A-Wert	5,43	5,09	5,66	5,36	4,28	5,30
	B-Wert	5,91	6,11	6,60	6,62	5,38	6,91
pH-Wert, [], n = 2	\bar{x}	5,0	4,9	4,7	4,9	4,9	4,7

Anhang – Tabelle A5-1-1

Versuchsreihe V-1: Physikalische und chemische Eigenschaften von **Labor-MDF mit 16 % MUF-Harz** (Festanteil bezogen auf Faserstoff_{atro}) in Abhängigkeit von den Aufschlussbedingungen bei der labortechnischen Herstellung von Kiefernholzfasern (im Vergleich zu Industriefaserstoff), Plattennendicke 16 mm, Heizplattentemperatur 190 °C, Presszeitfaktor 18 s/mm_{Plattendicke}, mit 1,2 % Hydrophobierungsmittel (Festanteil bezogen auf Faserstoff_{atro})

MDF-Eigenschaften	IHD-Code	Aufschlussbedingungen: Druck, Temperatur, Zeit						
		8 bar 170 °C 4 min	12 bar 187 °C 4 min	16 bar 200 °C 4 min	8 bar 170 °C 8 min	12 bar 187 °C 8 min	16 bar 200 °C 8 min	8 bar 170 °C 4 min Industrie
		2558	2556	2554	2552	2550	2548	2560
Feuchtegehalt vor Heiß- presse [%], n = 2	\bar{x}	9,0	8,8	9,1	9,2	8,9	9,0	9,2
Plattendicke (geschliffen) [mm], n = 16	\bar{x}	15,91	16,00	15,97	16,02	15,86	15,82	15,94
	s	0,14	0,05	0,05	0,05	0,13	0,16	0,09
	v	0,86	0,30	0,34	0,31	0,82	0,99	0,5
Rohdichte [kg/m ³], n = 16	\bar{x}	786	786	767	778	774	782	782
	s	29	22	46	23	39	50	34
	v	3,7	2,8	6,0	3,0	5,1	6,4	4,3
Querzugfestigkeit (tro- cken) [N/mm ²], n = 16	\bar{x}	1,39	1,39	1,06	1,33	1,25	1,35	1,33
	s	0,15	0,17	0,09	0,08	0,09	0,09	0,09
	v	10,52	12,17	8,29	5,96	7,43	7,01	6,47
Querzugfestigkeit nach 2 h Kochen [N/mm ²], n = 16	\bar{x}	0,16	0,17	0,17	0,21	0,18	0,22	0,19
	s	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,04	0,03
	v	17,05	16,49	16,91	14,48	19,22	16,93	14,82
Querzugfestigkeit nach Zyklustest [N/mm ²], n = 16	\bar{x}	0,73	0,78	0,34	0,82	0,42	0,37	0,78
	s	0,15	0,18	0,11	0,06	0,11	0,08	0,16
	v	20,98	22,76	32,15	7,84	26,52	21,97	20,32
Biegefestigkeit [N/mm ²], n = 12	\bar{x}	45,4	38,4	25,0	33,7	25,1	11,4	42,2
	s	4,1	2,3	4,1	2,7	3,6	1,2	5,4
	v	9,1	6,0	16,3	8,0	14,3	10,2	12,8
Biege-E-Modul [N/mm ²], n = 12	\bar{x}	4500	4450	3720	4030	3620	2760	4430
	s	270	175	420	80	415	255	340
	v	5,9	3,9	11,3	1,9	11,4	9,2	7,7
Dickenquellung nach 2 h WL [%], n = 12	\bar{x}	0,4	0,3	0,2	0,4	0,2	0,1	0,4
	s	0,1	0,1	0,1	0,1	0	0,1	0,1
	v	19,3	29,9	35,2	25,3	21,4	42,8	13,8
Dickenquellung nach 24 h WL [%], n = 12	\bar{x}	2,1	1,8	1,7	2,1	1,4	1,2	2,1
	s	0,1	0,2	0,2	0,3	0,2	0,3	0,1
	v	4,7	10,0	12,1	12,2	15,7	23,4	7,0
Dickenquellung nach Zyklustest [%], n = 16	\bar{x}	6,7	5,3	4,4	6,9	5,4	0,5	6,1
	s	0,8	0,6	0,5	0,5	0,4	0,3	0,5
	v	12,7	11,5	11,4	7,1	8,1	57,4	8,7
Feuchtegehalt bei Pr- fung [%], n = 10	\bar{x}	7,2	6,6	6,0	5,8	5,1	5,4	8,1
	s	0,4	0,1	0,4	0,1	0,2	0,2	0,2
	v	5,5	1,5	6,6	2,5	3,5	3,1	2,2
Formaldehydgehalt, [mg HCHO/100 g Plat- te _{atro}], n = 2	A-Wert	13,14	10,65	7,96	8,80	7,72	6,18	12,26
	B-Wert	14,47	12,66	8,81	9,88	9,28	7,74	15,27
pH-Wert, [], n = 2	\bar{x}	5,15	5,23	4,92	5,26	5,11	4,68	5,16

Anhang – Tabelle A5-1-2

Versuchsreihe V-1: Plattendicke, Rohdichte und Feuchtegehalt von **Labor-MDF mit 16 % MUF-Harz** (Festanteil bezogen auf Faserstoff_{atro}) **nach technischer Bewitterung** (Kurzzeitbewitterung = KZB, Entnahme nach 8, 16 und 24 Wochen) sowie nach natürlicher Bewitterung (Freibewitterung = FB, Entnahme nach 24, 48, 72 und 96 Wochen) im Vergleich zum Ausgangszustand

MDF-Eigenschaften		Aufschlussbedingungen: Druck, Temperatur, Zeit						
		8 bar 170 °C 4 min	12 bar 187 °C 4 min	16 bar 200 °C 4 min	8 bar 170 °C 8 min	12 bar 187 °C 8 min	16 bar 200 °C 8 min	8 bar 170 °C 4 min Industrie
IHD-Code		2558	2556	2554	2552	2550	2548	2560
Plattendicke [mm]								
- Ausgangszustand, n = 16	\bar{x}	15,91	16,00	15,97	16,02	15,86	15,82	15,94
	s	0,14	0,05	0,05	0,05	0,13	0,16	0,09
	v	0,86	0,30	0,34	0,31	0,82	0,99	0,5
- nach 8 Wochen KZB, n = 8	\bar{x}	16,60	16,20	15,40	16,54	15,51	15,29	16,49
	s	0,1	0,14	0,07	0,11	0,06	0,09	0,16
- nach 16 Wochen KZB, n = 8	\bar{x}	16,58	15,93	15,50	16,54	15,60	15,49	16,50
	s	0,04	0,06	0,02	0,11	0,04	0,04	0,08
- nach 24 Wochen KZB, n = 8	\bar{x}	16,66	16,09	15,50	16,44	15,43	15,27	16,30
	s	0,12	0,06	0,09	0,12	0,03	0,13	0,10
- nach 24 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	n. b. ⁶⁷	16,22	16,17	16,31	16,20	16,01	n. b.
- nach 48 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	16,32	16,23	16,16	16,24	16,18	16,03	16,17
- nach 72 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	16,11	16,21	16,07	16,21	15,94	15,84	16,26
- nach 96 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	16,12	16,16	16,15	16,29	15,98	15,83	16,13
Rohdichte [kg/m³]								
- Ausgangszustand, n = 16	\bar{x}	786	786	767	778	774	782	782
	s	29	22	46	23	39	50	34
	v	3,7	2,8	6,0	3,0	5,1	6,4	4,3
- nach 8 Wochen KZB, n = 8	\bar{x}	776	741	689	762	710	717	775
	s	10	24	18	15	15	21	17
- nach 16 Wochen KZB, n = 8	\bar{x}	710	718	707	722	700	730	705
	s	10	19	8	8	27	25	19
- nach 24 Wochen KZB, n = 8	\bar{x}	743	721	703	726	684	694	718
	s	35	13	12	10	25	13	25
- nach 24 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	n. b.	762	790	763	803	768	n. b.
- nach 48 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	755	773	774	759	793	798	738
- nach 72 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	789	801	757	791	787	814	798
- nach 96 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	802	799	810	768	766	796	807
Feuchtegehalt bei Prüfung [%]								
- Ausgangszustand, n = 10	\bar{x}	7,2	6,6	6,0	5,8	5,1	5,4	8,1
	s	0,4	0,1	0,4	0,1	0,2	0,2	0,2
	v	5,5	1,5	6,6	2,5	3,5	3,1	2,2
- nach 8 Wochen KZB, n = 4	\bar{x}	12,7	12,2	11,5	12,7	11,7	11,6	12,6
- nach 16 Wochen KZB, n = 4	\bar{x}	13,1	12,5	11,8	13,2	12,1	12,1	12,9
- nach 24 Wochen KZB, n = 4	\bar{x}	13,3	13,3	11,9	13,0	12,9	11,6	12,7
- nach 24 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	n. b.	8,4	6,2	7,5	6,7	6,1	n. b.
- nach 48 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	9,3	8,1	7,6	8,4	7,9	7,8	9,0
- nach 72 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	8,3	7,2	6,8	7,6	6,9	6,5	8,0
- nach 96 Wochen FB, n = 4	\bar{x}				n. b.			

⁶⁷ nicht bestimmt

Anhang – Tabelle A5-1-3

Versuchsreihe V-1: Querzugfestigkeit, Biege-Elastizitätsmodul und Biegefestigkeit von **Labor-MDF mit 16 % MUF-Harz** (Festanteil bezogen auf Faserstoff_{atro}) **nach technischer Bewitterung** (Kurzzeitbewitterung = KZB, Entnahme nach 8, 16 und 24 Wochen) sowie nach natürlicher Bewitterung (Freibewitterung = FB, Entnahme nach 24, 48, 72 und 96 Wochen) im Vergleich zum Ausgangszustand

MDF-Eigenschaften		Aufschlussbedingungen: Druck, Temperatur, Zeit						
		8 bar 170 °C 4 min	12 bar 187 °C 4 min	16 bar 200 °C 4 min	8 bar 170 °C 8 min	12 bar 187 °C 8 min	16 bar 200 °C 8 min	8 bar 170 °C 4 min Industrie
IHD-Code		2558	2556	2554	2552	2550	2548	2560
Querzugfestigkeit [N/mm²]								
- Ausgangszustand, n = 16	\bar{x}	1,39	1,39	1,06	1,33	1,25	1,35	1,33
	s	0,15	0,17	0,09	0,08	0,09	0,09	0,09
	v	10,52	12,17	8,29	5,96	7,43	7,01	6,47
- nach 8 Wochen KZB, n = 8	\bar{x}	0,84	0,65	0,39	0,79	0,49	0,51	0,71
	s	0,13	0,19	0,08	0,11	0,05	0,05	0,17
- nach 16 Wochen KZB, n = 8	\bar{x}	0,76	0,65	0,43	0,77	0,55	0,56	0,68
	s	0,06	0,13	0,06	0,09	0,10	0,07	0,07
- nach 24 Wochen KZB, n = 8	\bar{x}	0,72	0,53	0,43	0,81	0,44	0,34	0,55
	s	0,10	0,05	0,06	0,09	0,13	0,07	0,06
- nach 24 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	n. b. ⁶⁸	1,31	1,04	1,21	1,32	1,06	n. b.
- nach 48 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	1,30	1,27	0,89	1,35	1,12	0,98	1,11
- nach 72 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	1,08	1,04	0,62	1,24	0,83	0,43	1,10
- nach 96 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	0,99	1,07	1,05	1,10	0,86	0,66	1,22
Biege-Elastizitätsmodul [N/mm²]								
- Ausgangszustand, n = 12	\bar{x}	4500	4450	3720	4030	3620	2760	4430
	s	270	175	420	80	415	255	340
	v	5,9	3,9	11,3	1,9	11,4	9,2	7,7
- nach 8 Wochen KZB, n = 4	\bar{x}	2070	1785	1420	1770	1475	910	1930
- nach 16 Wochen KZB, n = 4	\bar{x}	1560	1530	1470	1570	1215	800	1560
- nach 24 Wochen KZB, n = 4	\bar{x}	1545	1435	1235	1530	1155	600	1465
- nach 24 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	n. b.	2875	3000	2830	3175	1940	n. b.
- nach 48 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	2920	3065	2640	2785	2815	1785	2760
- nach 72 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	3000	3110	2280	2625	2365	1320	2995
- nach 96 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	2940	2850	2780	2395	2225	1315	2960
Biegefestigkeit [N/mm²]								
- Ausgangszustand, n = 12	\bar{x}	45,4	38,4	25,0	33,7	25,1	11,4	42,2
	s	4,1	2,3	4,1	2,7	3,6	1,2	5,4
	v	9,1	6,0	16,3	8,0	14,3	10,2	12,8
- nach 8 Wochen KZB, n = 4	\bar{x}	31,8	21,9	15,6	24,4	17,8	8,4	30,1
- nach 16 Wochen KZB, n = 4	\bar{x}	25,8	21,6	19,3	23,7	14,8	7,0	22,8
- nach 24 Wochen KZB, n = 4	\bar{x}	24,3	21,0	14,7	22,6	14,0	6,3	22,4
- nach 24 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	n. b.	33,2	27,7	33,5	32,1	11,4	n. b.
- nach 48 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	41,6	37,4	26,8	34,4	29,4	11,5	39,2
- nach 72 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	45,6	39,7	23,1	33,7	22,1	9,1	45,2
- nach 96 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	44,5	36,7	27,4	30,1	23,1	9,2	42,0

⁶⁸ nicht bestimmt

Anhang – Tabelle A5-1-4

Versuchsreihe V-1: Dickenquellung nach 2 und 24 h Wasserlagerung von **Labor-MDF mit 16 % MUF-Harz** (Festanteil bezogen auf Faserstoff_{atro}) **nach** technischer **Bewitterung** (Kurzzeitbewitterung = KZB, Entnahme nach 8, 16 und 24 Wochen) sowie nach natürlicher Bewitterung (Freibewitterung = FB, Entnahme nach 24, 48, 72 und 96 Wochen) im Vergleich zum Ausgangszustand

MDF-Eigenschaften	Aufschlussbedingungen: Druck, Temperatur, Zeit							
	8 bar 170 °C 4 min	12 bar 187 °C 4 min	16 bar 200 °C 4 min	8 bar 170 °C 8 min	12 bar 187 °C 8 min	16 bar 200 °C 8 min	8 bar 170 °C 4 min Industrie	
IHD-Code	2558	2556	2554	2552	2550	2548	2560	
Dickenquellung nach 2 h WL [%]								
- Ausgangszustand, n = 12	\bar{x} s v	0,4 0,1 19,3	0,3 0,1 29,9	0,2 0,1 35,2	0,4 0,1 25,3	0,2 0 21,4	0,1 0,1 42,8	0,4 0,1 13,8
- nach 8 Wochen KZB, n = 8	\bar{x} s	0,9 0,3	2,2 1,2	1,7 0,8	0,5 0,2	6,0 2,7	1,4 0,4	0,8 0,2
- nach 16 Wochen KZB, n = 8	\bar{x} s	1,6 0,7	3,3 2,8	3,4 2,9	2,2 0,6	4,7 2,8	1,7 0,8	1,9 1,1
- nach 24 Wochen KZB, n = 8	\bar{x} s	2,2 0,7	5,3 1,9	1,2 0,5	1,9 1,0	9,9 0,9	2,3 0,7	2,3 1,2
- nach 24 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	n. b. ⁶⁹	0,3	0,2	0,4	0,2	0,2	n. b.
- nach 48 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	0,4	0,3	0,2	0,3	0,3	0,2	0,4
- nach 72 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	0,4	0,4	0,2	0,4	0,4	0,4	0,4
- nach 96 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	0,5	0,2	0,2	0,3	0,2	0,2	0,4
Dickenquellung nach 24 h WL [%]								
- Ausgangszustand, n = 12	\bar{x} s v	2,1 0,1 4,7	1,8 0,2 10,0	1,7 0,2 12,1	2,1 0,3 12,2	1,4 0,2 15,7	1,2 0,3 23,4	2,1 0,1 7,0
- nach 8 Wochen KZB, n = 8	\bar{x} s	7,0 4,2	8,8 1,1	9,1 0,4	2,8 0,7	9,2 0,7	4,6 0,9	5,9 1,7
- nach 16 Wochen KZB, n = 8	\bar{x} s	11,6 0,6	10,1 1,4	9,8 0,5	9,0 0,8	9,2 0,9	5,6 0,6	12,2 0,6
- nach 24 Wochen KZB, n = 8	\bar{x} s	11,0 2,2	10,7 0,6	8,0 0,8	10,5 0,2	10,5 1,4	5,4 0,4	11,9 1,4
- nach 24 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	n. b.	1,6	1,0	1,6	1,2	1,6	n. b.
- nach 48 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	1,4	1,2	1,1	1,2	1,2	1,4	1,5
- nach 72 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	1,9	1,5	2,0	1,9	1,9	1,9	1,7
- nach 96 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	1,6	1,3	1,3	1,3	1,4	1,4	1,5

⁶⁹ nicht bestimmt

Anhang – Tabelle A5-2-1

Versuchsreihe V-2: Physikalische und chemische Eigenschaften von **Labor-MDF mit 16 % PF-Harz** (Festanteil bezogen auf Faserstoff_{atro}) in Abhängigkeit von den Aufschlussbedingungen bei der labortechnischen Herstellung von Kiefernholzfasern (im Vergleich zu Industriefaserstoff), Plattennendicke 16 mm, Heizplattentemperatur 190 °C, Presszeitfaktor 18 s/mm_{Plattendicke}, mit 1,2 % Hydrophobierungsmittel (Festanteil bezogen auf Faserstoff_{atro})

MDF-Eigenschaften		Aufschlussbedingungen: Druck, Temperatur, Zeit					
		8 bar 170 °C 4 min	12 bar 187 °C 4 min	16 bar 200 °C 4 min	8 bar 170 °C 8 min	12 bar 187 °C 8 min	16 bar 200 °C 8 min
IHD-Code		2578	2577	2576	2575	2574	2573
Feuchtegehalt vor Heiß- presse [%], n = 2	\bar{x}	11,2	11,1	11,0	11,5	11,1	11,0
Plattendicke (geschliffen) [mm], n = 12	\bar{x}	16,27	16,28	16,24	16,26	16,23	16,18
	s	0,07	0,08	0,06	0,07	0,06	0,04
	v	0,4	0,5	0,4	0,5	0,4	0,3
Rohdichte [kg/m ³], n = 12	\bar{x}	754	753	752	755	761	767
	s	17	13	27	18	21	34
	v	2,2	1,7	3,5	2,4	2,7	4,4
Querzugfestigkeit (tro- cken) [N/mm ²], n = 12	\bar{x}	1,07	0,91	0,90	0,88	0,85	0,72
	s	0,16	0,09	0,14	0,05	0,08	0,12
	v	15,1	10,4	15,6	5,9	9,8	17,0
Querzugfestigkeit nach 2 h Kochen [N/mm ²], n = 12	\bar{x}	0,19	0,23	0,27	0,19	0,24	0,27
	s	0,04	0,02	0,05	0,02	0,05	0,05
	v	20,6	9,6	16,9	12,5	19,6	16,4
Querzugfestigkeit nach Zyklustest [N/mm ²], n = 16	\bar{x}	0,86	0,8	0,82	0,72	0,74	0,64
	s	0,10	0,07	0,09	0,05	0,08	0,08
	v	12,0	8,8	11,5	7,2	10,8	13,1
Biegefestigkeit [N/mm ²], n = 9	\bar{x}	28,66	20,51	13,72	19,98	12,10	7,6
	s	1,82	1,43	1,18	0,97	1,17	1,18
	v	6,4	7,0	8,6	4,9	9,7	15,4
Biege-E-Modul [N/mm ²], n = 9	\bar{x}	2810	2320	1880	2350	1770	1370
	s	160	90	160	90	165	185
	v	5,6	4,0	8,6	3,9	9,2	13,5
Dickenquellung nach 2 h WL [%], n = 12	\bar{x}	1,0	0,4	0,2	0,7	0,2	0,2
	s	0,4	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
	v	39,7	19,4	26,2	19,7	27,4	28,0
Dickenquellung nach 24 h WL [%], n = 12	\bar{x}	4,3	2,0	0,8	3,0	0,9	0,6
	s	0,7	0,4	0,1	0,3	0,2	0,1
	v	16,2	17,8	14,9	10,6	26,0	14,3
Dickenquellung nach Zyklustest [%], n = 16	\bar{x}	3,7	0,3	-2,7	2,2	-2,1	-4,8
	s	0,4	0,2	0,6	0,5	0,7	1,1
	v	11,2	59,7	-21,9	23,1	-35,4	-22,2
Feuchtegehalt bei Pr- fung [%], n = 6	\bar{x}	10,3	10,4	11,0	10,6	11,8	12,5
	s	0,2	0,3	0,4	0,2	0,4	0,3
	v	1,9	3,1	3,7	1,5	3,6	2,2
Formaldehydgehalt, [mg HCHO/100 g Plat- te _{atro}], n = 2	A-Wert	1,0	1,5	1,1	1,5	1,9	1,6
	B-Wert	1,0	1,5	1,1	1,6	1,9	1,5
pH-Wert, [], n = 2	\bar{x}	8,38	7,71	7,29	8,32	7,73	7,08

Anhang – Tabelle A5-2-2

Versuchsreihe V-2: Plattendicke, Rohdichte, Querzugfestigkeit und Feuchtegehalt von **Labor-MDF mit 16 % PF-Harz** (Festanteil bezogen auf Faserstoff_{atro}) **nach technischer Bewitterung** (Kurzzeitbewitterung = KZB, Entnahme nach 8, 16 und 24 Wochen) sowie nach natürlicher Bewitterung (Freibewitterung = FB, Entnahme nach 24, 48 und 72 Wochen) im Vergleich zum Ausgangszustand

MDF-Eigenschaften		Aufschlussbedingungen: Druck, Temperatur, Zeit					
		8 bar 170 °C 4 min	12 bar 187 °C 4 min	16 bar 200 °C 4 min	8 bar 170 °C 8 min	12 bar 187 °C 8 min	16 bar 200 °C 8 min
IHD-Code		2578	2577	2576	2575	2574	2573
Plattendicke [mm]							
- Ausgangszustand, n = 12	\bar{x}	16,27	16,28	16,24	16,26	16,23	16,18
	s	0,07	0,08	0,06	0,07	0,06	0,04
	v	0,4	0,5	0,4	0,5	0,4	0,3
- nach 8 Wochen KZB, n = 6	\bar{x}	16,25	15,61	15,27	15,96	15,38	15,04
	s	0,17	0,05	0,04	0,05	0,11	0,04
- nach 16 Wochen KZB, n = 6	\bar{x}	16,23	15,54	15,07	15,87	15,14	14,92
	s	0,04	0,04	0,03	0,09	0,04	0,02
- nach 24 Wochen KZB, n = 6	\bar{x}	16,59	15,63	15,20	15,93	15,30	15,52
	s	0,56	0,09	0,04	0,13	0,08	0,50
- nach 24 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	16,15	15,74	15,80	15,99	16,23	15,90
- nach 48 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	16,17	15,91	15,88	16,16	15,42	15,41
- nach 72 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	16,35	16,00	15,74	16,04	15,57	15,84
Rohdichte [kg/m³]							
- Ausgangszustand, n = 12	\bar{x}	754	753	752	755	761	767
	s	17	13	27	18	21	34
	v	2,2	1,7	3,5	2,4	2,7	4,4
- nach 8 Wochen KZB, n = 6	\bar{x}	704	693	638	681	665	653
	s	21	9	28	9	19	51
- nach 16 Wochen KZB, n = 6	\bar{x}	717	694	686	696	690	677
	s	23	21	18	9	11	24
- nach 24 Wochen KZB, n = 6	\bar{x}	703	702	686	684	676	655
	s	10	19	40	17	25	31
- nach 24 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	718	721	700	747	720	768
- nach 48 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	718	747	736	739	676	671
- nach 72 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	720	725	655	686	651	655
Querzugfestigkeit [N/mm²]							
- Ausgangszustand, n = 12	\bar{x}	1,07	0,91	0,90	0,88	0,85	0,72
	s	0,16	0,09	0,14	0,05	0,08	0,12
	v	15,1	10,4	15,6	5,9	9,8	17,0
- nach 8 Wochen KZB, n = 6	\bar{x}	0,87	0,85	0,65	0,73	0,72	0,51
	s	0,20	0,08	0,20	0,04	0,14	0,29
- nach 16 Wochen KZB, n = 6	\bar{x}	0,99	0,87	0,93	0,70	0,85	0,91
	s	0,12	0,10	0,19	0,05	0,06	0,18
- nach 24 Wochen KZB, n = 6	\bar{x}	0,87	0,82	0,77	0,68	0,73	0,46
	s	0,09	0,09	0,15	0,08	0,15	0,24
- nach 24 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	0,91	0,78	1,04	0,79	0,61	0,59
- nach 48 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	0,68	0,71	0,52	0,80	0,45	0,09
- nach 72 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	0,94	0,91	0,24	0,59	0,33	0,30
Feuchtegehalt bei Prüfung [%]							
- Ausgangszustand, n = 6	\bar{x}	10,3	10,4	11,0	10,6	11,8	12,5
	s	0,2	0,3	0,4	0,2	0,4	0,3
	v	1,9	3,1	3,7	1,5	3,6	2,2
- nach 8 Wochen KZB, n = 4	\bar{x}	12,6	11,6	10,8	12,1	11,0	10,7
- nach 16 Wochen KZB, n = 4	\bar{x}	12,9	11,7	11,3	12,6	11,5	11,1
- nach 24 Wochen KZB, n = 4	\bar{x}	15,3	11,5	10,9	11,8	11,0	11,2
- nach 24 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	11,2	10,4	11,7	10,7	11,5	11,2
- nach 48 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	12,5	11,6	11,5	12,0	11,2	10,5
- nach 72 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	12,9	11,6	11,4	12,2	11,9	10,3

Anhang – Tabelle A5-2-3

Versuchsreihe V-2: Biege-Elastizitätsmodul und Biegefestigkeit sowie Dickenquellung nach 2 und 24 h Wasserlagerung von **Labor-MDF mit 16 % PF-Harz** (Festanteil bezogen auf Faserstoff_{atro}) **nach** technischer **Bewitterung** (Kurzzeitbewitterung = KZB, Entnahme nach 8, 16 und 24 Wochen) sowie nach natürlicher Bewitterung (Freibewitterung = FB, Entnahme nach 24, 48 und 72 Wochen) im Vergleich zum Ausgangszustand

MDF-Eigenschaften		Aufschlussbedingungen: Druck, Temperatur, Zeit					
		8 bar 170 °C 4 min	12 bar 187 °C 4 min	16 bar 200 °C 4 min	8 bar 170 °C 8 min	12 bar 187 °C 8 min	16 bar 200 °C 8 min
IHD-Code		2578	2577	2576	2575	2574	2573
Biege-Elastizitätsmodul [N/mm²]							
- Ausgangszustand, n = 9	\bar{x}	2810	2320	1880	2350	1770	1370
	s	160	90	160	90	165	185
	v	5,6	4,0	8,6	3,9	9,2	13,5
- nach 8 Wochen KZB, n = 4	\bar{x}	1625	1480	1200	1385	1180	945
- nach 16 Wochen KZB, n = 4	\bar{x}	1760	1445	1330	1485	1220	785
- nach 24 Wochen KZB, n = 4	\bar{x}	1290	1375	1205	1370	1070	990
- nach 24 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	1790	1590	1400	1505	1280	1010
- nach 48 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	1490	1505	1220	1325	1205	1240
- nach 72 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	1675	1510	1170	1265	1050	650
Biegefestigkeit [N/mm²]							
- Ausgangszustand, n = 9	\bar{x}	28,66	20,51	13,72	19,98	12,10	7,6
	s	1,82	1,43	1,18	0,97	1,17	1,18
	v	6,4	7,0	8,6	4,9	9,7	15,4
- nach 8 Wochen KZB, n = 4	\bar{x}	24,3	19,2	13,3	18,7	12,5	9,3
- nach 16 Wochen KZB, n = 4	\bar{x}	26,2	19,0	14,8	19,7	12,9	6,5
- nach 24 Wochen KZB, n = 4	\bar{x}	19,8	19,5	14,8	18,8	13,1	12,7
- nach 24 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	29,6	20,9	12,5	22,9	11,6	6,9
- nach 48 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	27,4	22,3	15,9	19,8	13,3	13,0
- nach 72 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	30,4	23,4	14,4	19,8	13,2	7,9
Dickenquellung nach 2 h WL [%]							
- Ausgangszustand, n = 12	\bar{x}	1,0	0,4	0,2	0,7	0,2	0,2
	s	0,4	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
	v	39,7	19,4	26,2	19,7	27,4	28,0
- nach 8 Wochen KZB, n = 4	\bar{x}	0,7	1,0	4,3	0,8	2,1	7,4
- nach 16 Wochen KZB, n = 4	\bar{x}	0,6	0,8	5,1	0,7	4,6	7,0
- nach 24 Wochen KZB, n = 4	\bar{x}	0,9	2,3	8,4	1,6	8,1	7,2
- nach 24 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	0,5	0,4	0,2	0,5	0,3	0,8
- nach 48 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	0,8	0,9	5,2	0,6	5,5	7,2
- nach 72 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	0,9	1,1	8,6	3,4	8,5	7,0
Dickenquellung nach 24 h WL [%]							
- Ausgangszustand, n = 12	\bar{x}	4,3	2,0	0,8	3,0	0,9	0,6
	s	0,7	0,4	0,1	0,3	0,2	0,1
	v	16,2	17,8	14,9	10,6	26,0	14,3
- nach 8 Wochen KZB, n = 4	\bar{x}	3,2	5,6	9,3	7,0	8,1	9,5
- nach 16 Wochen KZB, n = 4	\bar{x}	2,3	5,5	8,8	7,2	8,7	9,0
- nach 24 Wochen KZB, n = 4	\bar{x}	4,6	8,2	9,0	9,8	8,6	8,4
- nach 24 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	2,4	2,8	1,1	2,8	1,4	1,6
- nach 48 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	3,8	4,1	6,0	3,3	7,5	8,1
- nach 72 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	5,7	4,5	11,9	8,1	9,6	7,9

Anhang – Tabelle A5-3-1

Versuchsreihe V-3: Physikalische und chemische Eigenschaften von **Labor-MDF mit 16 % MUPF-Harz** (Festanteil bezogen auf Faserstoff_{atro}) in Abhängigkeit von den Aufschlussbedingungen bei der labortech-nischen Herstellung von Kiefernholzfaserstoffen (im Vergleich zu Industriefaserstoff), Plattennendicke 16 mm, Heizplattentemperatur 190 °C, Presszeitfaktor 18 s/mm_{Plattendicke}, mit 1,2 % Hydrophobierungsmittel (Festanteil bezogen auf Faserstoff_{atro})

MDF-Eigenschaften		Aufschlussbedingungen:		
		Druck, Temperatur, Zeit		
		8 bar 170 °C 4 min	12 bar 187 °C 4 min	16 bar 200 °C 4 min
IHD-Code		2671	2670	2669
Feuchtegehalt vor Heißpresse [%], n = 2	\bar{x}	9,6	9,4	9,0
Plattendicke (geschliffen) [mm], n = 9	\bar{x}	16,16	16,11	16,06
	s	0,03	0,02	0,03
	v	0,2	0,1	0,2
Rohdichte [kg/m ³], n = 9	\bar{x}	768	770	762
	s	8,7	16,6	13,7
	v	1,1	2,2	1,8
Querzugfestigkeit (trocken) [N/mm ²], n = 9	\bar{x}	1,30	1,37	1,28
	s	0,22	0,22	0,12
	v	17,1	16,0	9,7
Querzugfestigkeit nach 2 h Ko- chen [N/mm ²], n = 9	\bar{x}	0,17	0,22	0,25
	s	0,04	0,07	0,03
	v	21,0	33,2	13,8
Querzugfestigkeit nach Zyklus- test [N/mm ²], n = 9	\bar{x}	0,70	0,75	0,34
	s	0,09	0,08	0,09
	v	13,4	10,6	26,5
Biegefestigkeit [N/mm ²], n = 6	\bar{x}	49,11	37,96	24,01
	s	2,50	3,77	2,25
	v	5,1	9,9	9,4
Biege-E-Modul [N/mm ²], n = 6	\bar{x}	4520	4230	3560
	s	84	248	180
	v	1,9	5,9	5,1
Dickenquellung nach 2 h WL [%], n = 9	\bar{x}	0,3	0,1	0,1
	s	0	0,0	0
	v	13,5	24,8	0
Dickenquellung nach 24 h WL [%], n = 9	\bar{x}	1,8	1,6	1,5
	s	0,1	0,2	0
	v	4,0	11,1	2,3
Dickenquellung nach Zyklustest [%], n = 9	\bar{x}	7,3	4,8	3,4
	s	0,5	0,6	0,4
	v	6,7	12,4	12,7
Wasseraufnahme nach 24 h WL [%], n = 9	\bar{x}	12,2	10,4	11,1
	s	1,0	0,3	0,3
	v	8,5	2,7	3,0
Längenänderung IL 65 – 85 DL 65 – 35 [%], n = 6	\bar{x}	0,20	0,30	0,41
	\bar{x}	-0,09	-0,10	-0,11
Dickenänderung IT 65 – 85 DT 65 – 35 [%], n = 6	\bar{x}	3,7	3,3	3,1
	\bar{x}	-0,6	-0,5	-0,4
Feuchtegehalt bei Prüfung [%], n = 6	\bar{x}	7,3	6,5	6,3
	s	0,1	0,1	0,1
	v	1,7	1,9	1,7
Formaldehydgehalt, [mg HCHO/100 g Platte _{atro}], n = 2	A-Wert	12,48	9,64	9,76
	B-Wert	13,90	11,61	12,60
pH-Wert, [], n = 2	\bar{x}	5,4	5,4	5,1

Anhang – Tabelle A5-3-2

Versuchsreihe V-3: Plattendicke, Rohdichte, Querkzugfestigkeit und Feuchtegehalt von **Labor-MDF mit 16 % MUPF-Harz** (Festanteil bezogen auf Faserstoff_{atro}) **nach technischer Bewitterung** (Kurzzeitbewitterung = KZB, Entnahme nach 8, 16 und 24 Wochen) sowie nach natürlicher Bewitterung (Freibewitterung = FB, Entnahme nach 24, 48 und 72 Wochen) im Vergleich zum Ausgangszustand

MDF-Eigenschaften		Aufschlussbedingungen:		
		Druck, Temperatur, Zeit		
		8 bar 170 °C 4 min	12 bar 187 °C 4 min	16 bar 200 °C 4 min
IHD-Code		2671	2670	2669
Plattendicke [mm]				
- Ausgangszustand, n = 9	\bar{x}	16,16	16,11	16,06
	s	0,03	0,02	0,03
	v	0,2	0,1	0,2
- nach 8 Wochen KZB, n = 6	\bar{x}	17,00	16,76	16,22
	s	0,04	0,04	0,11
- nach 16 Wochen KZB, n = 6	\bar{x}	17,26	16,20	15,59
	s	0,1	0,04	0,04
- nach 24 Wochen KZB, n = 6	\bar{x}	17,09	16,09	15,52
	s	0,12	0,03	0,08
- nach 24 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	16,50	16,34	16,30
- nach 48 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	16,32	16,38	16,56
- nach 72 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	16,62	16,42	16,32
Rohdichte [kg/m³]				
- Ausgangszustand, n = 9	\bar{x}	768	770	762
	s	8,7	16,6	13,7
	v	1,1	2,2	1,8
- nach 8 Wochen KZB, n = 6	\bar{x}	732	751	754
	s	6,6	23,1	17,0
- nach 16 Wochen KZB, n = 6	\bar{x}	717	725	727
	s	4,5	22,9	22,4
- nach 24 Wochen KZB, n = 6	\bar{x}	705	695	689
	s	7,1	19,5	13,5
- nach 24 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	754	768	767
- nach 48 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	767	774	748
- nach 72 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	748	724	749
Querkzugfestigkeit [N/mm²]				
- Ausgangszustand, n = 9	\bar{x}	1,30	1,37	1,28
	s	0,22	0,22	0,12
	v	17,1	16,0	9,7
- nach 8 Wochen KZB, n = 6	\bar{x}	0,79	0,82	0,65
	s	0,05	0,09	0,10
- nach 16 Wochen KZB, n = 6	\bar{x}	0,65	0,61	0,59
	s	0,08	0,16	0,12
- nach 24 Wochen KZB, n = 6	\bar{x}	0,60	0,50	0,38
	s	0,04	0,25	0,09
- nach 24 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	1,25	1,35	1,05
- nach 48 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	1,31	1,50	0,92
- nach 72 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	1,05	0,90	0,75
Feuchtegehalt bei Prüfung [%]				
- Ausgangszustand, n = 6	\bar{x}	7,3	6,5	6,3
	s	0,1	0,1	0,1
	v	1,7	1,9	1,7
- nach 8 Wochen KZB, n = 4	\bar{x}	13,5	11,3	11,3
- nach 16 Wochen KZB, n = 4	\bar{x}	14,6	11,9	11,3
- nach 24 Wochen KZB, n = 4	\bar{x}	14,3	12,7	12,0
- nach 24 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	9,6	8,4	8,5
- nach 48 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	9,5	8,4	8,4
- nach 72 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	10,1	9,0	8,8

Anhang – Tabelle A5-3-3

Versuchsreihe V-3: Biege-Elastizitätsmodul und Biegefestigkeit sowie Dickenquellung nach 2 und 24 h Wasserlagerung von **Labor-MDF mit 16 % MUPF-Harz** (Festanteil bezogen auf Faserstoff_{atro}) **nach** technischer **Bewitterung** (Kurzzeitbewitterung = KZB, Entnahme nach 8, 16 und 24 Wochen) sowie nach natürlicher Bewitterung (Freibewitterung = FB, Entnahme nach 24, 48 und 72 Wochen) im Vergleich zum Ausgangszustand

MDF-Eigenschaften	Aufschlussbedingungen:			
	8 bar 170 °C 4 min	12 bar 187 °C 4 min	16 bar 200 °C 4 min	
IHD-Code	2671	2670	2669	
Biege-Elastizitätsmodul [N/mm²]				
- Ausgangszustand, n = 6	\bar{x} s v	4520 84 1,9	4230 248 5,9	3560 180 5,1
- nach 8 Wochen KZB, n = 4	\bar{x}	2040	1299	1298
- nach 16 Wochen KZB, n = 4	\bar{x}	1606	1715	1475
- nach 24 Wochen KZB, n = 4	\bar{x}	1570	1556	1211
- nach 24 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	3116	3338	2817
- nach 48 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	3106	3274	2355
- nach 72 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	2633	2534	2138
Biege-Elastizitätsmodul [N/mm²]				
- Ausgangszustand, n = 6	\bar{x} s v	49,11 2,50 5,1	37,96 3,77 9,9	24,01 2,25 9,4
- nach 8 Wochen KZB, n = 4	\bar{x}	34,91	20,58	17,17
- nach 16 Wochen KZB, n = 4	\bar{x}	27,22	24,92	16,71
- nach 24 Wochen KZB, n = 4	\bar{x}	27,68	23,66	15,05
- nach 24 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	40,99	39,35	24,77
- nach 48 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	52,59	40,00	19,88
- nach 72 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	44,63	33,92	20,69
Dickenquellung nach 2 h WL [%]				
- Ausgangszustand, n = 9	\bar{x} s v	0,3 0 13,5	0,1 0,0 24,8	0,1 0 0
- nach 8 Wochen KZB, n = 4	\bar{x}	0,7	2,3	0,7
- nach 16 Wochen KZB, n = 4	\bar{x}	0,9	1,4	1,2
- nach 24 Wochen KZB, n = 4	\bar{x}	1,3	0,9	0,8
- nach 24 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	0,3	0,3	0,2
- nach 48 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	0,2	0,2	0,1
- nach 72 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	0,4	0,4	0,3
Dickenquellung nach 24 h WL [%]				
- Ausgangszustand, n = 9	\bar{x} s v	1,8 0,1 4,0	1,6 0,2 11,1	1,5 0 2,3
- nach 8 Wochen KZB, n = 4	\bar{x}	5,1	5,0	3,9
- nach 16 Wochen KZB, n = 4	\bar{x}	10,0	8,5	6,1
- nach 24 Wochen KZB, n = 4	\bar{x}	11,7	9,0	6,0
- nach 24 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	1,3	1,0	1,0
- nach 48 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	1,1	0,9	0,9
- nach 72 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	1,6	1,4	1,4

Anhang – Tabelle A5-4-1

Versuchsreihe V-4: Physikalische und chemische Eigenschaften von **Labor-MDF mit 16 % PMDI** (Festanteil bezogen auf Faserstoff_{atro}) in Abhängigkeit von den Aufschlussbedingungen bei der labortechnischen Herstellung von Kiefernholzfasern (im Vergleich zu Industriefaserstoff), Plattennendicke 16 mm, Heizplattentemperatur 190 °C, Presszeitfaktor 18 s/mm_{Plattendicke}, mit 1,2 % Hydrophobierungsmittel (Festanteil bezogen auf Faserstoff_{atro})

MDF-Eigenschaften		Aufschlussbedingungen: Druck, Temperatur, Zeit		
		8 bar 170 °C 4 min	12 bar 187 °C 4 min	16 bar 200 °C 4 min
IHD-Code		2668	2667	2666
Feuchtegehalt vor Heißpresse [%], n = 2	\bar{x}	9,2	8,7	7,7
Plattendicke (geschliffen) [mm], n = 9	\bar{x}	16,48	16,41	16,37
	s	0,02	0,04	0,02
	v	0,1	0,3	0,1
Rohdichte [kg/m ³], n = 9	\bar{x}	739	734	732
	s	11	9	13
	v	1,5	1,2	1,8
Querzugfestigkeit (trocken) [N/mm ²], n = 9	\bar{x}	1,10	1,22	1,29
	s	0,12	0,08	0,09
	v	10,5	6,5	6,8
Querzugfestigkeit nach 2 h Kochen [N/mm ²], n = 9	\bar{x}	0,21	0,23	0,42
	s	0,02	0,02	0,07
	v	12,0	9,1	16,0
Querzugfestigkeit nach Zyklus-test [N/mm ²], n = 9	\bar{x}	0,74	0,44	0,60
	s	0,07	0,08	0,09
	v	9,0	18,4	16,3
Biegefestigkeit [N/mm ²], n = 6	\bar{x}	43,85	30,27	21,53
	s	3,69	2,36	2,18
	v	8,4	7,8	10,1
Biege-E-Modul [N/mm ²], n = 6	\bar{x}	3900	3330	2530
	s	178	136	194
	v	4,6	4,1	7,7
Dickenquellung nach 2 h WL [%], n = 10	\bar{x}	0,5	0,4	0,3
	s	0	0	0
	v	0,2	8,8	10,3
Dickenquellung nach 24 h WL [%], n = 10	\bar{x}	2,6	2,3	1,7
	s	0	0,2	0
	v	1,1	6,5	1,9
Dickenquellung nach Zyklustest [%], n = 9	\bar{x}	4,0	3,0	1,6
	s	0,2	0,3	0,3
	v	5,1	8,9	18,8
Wasseraufnahme nach 24 h WL [%], n = 10	\bar{x}	9,9	11,0	10,3
	s	0,1	1,1	0,3
	v	1,1	9,7	3,2
Längenänderung IL 65 – 85 DL 65 – 35 [%], n = 6	\bar{x}	0,25	0,31	0,31
	\bar{x}	-0,14	-0,14	-0,17
Dickenänderung IT 65 – 85 DT 65 – 35 [%], n = 6	\bar{x}	4,7	3,8	2,3
	\bar{x}	-0,9	-0,7	-0,8
Feuchtegehalt bei Prüfung [%], n = 6	\bar{x}	6,9	5,8	6,8
	s	0	0,1	1,5
	v	0,7	1,4	21,7
Formaldehydgehalt, [mg HCHO/100 g Platte _{atro}], n = 2	A-Wert	0,10	0,20	0,24
	B-Wert	0,12	0,34	0,34
pH-Wert, [], n = 2	\bar{x}	4,5	4,4	4,4

Anhang – Tabelle A5-4-2

Versuchsreihe V-4: Plattendicke, Rohdichte, Querzugfestigkeit und Feuchtegehalt von **Labor-MDF mit 16 % PMDI** (Festanteil bezogen auf Faserstoff_{atro}) **nach technischer Bewitterung** (Kurzzeitbewitterung = KZB, Entnahme nach 8, 16 und 24 Wochen) sowie nach natürlicher Bewitterung (Freibewitterung = FB, Entnahme nach 24, 48 und 72 Wochen) im Vergleich zum Ausgangszustand

MDF-Eigenschaften	IHD-Code	Aufschlussbedingungen: Druck, Temperatur, Zeit		
		8 bar 170 °C 4 min	12 bar 187 °C 4 min	16 bar 200 °C 4 min
		2668	2667	2666
Plattendicke [mm]				
- Ausgangszustand, n = 9	\bar{x}	16,48	16,41	16,37
	s	0,02	0,04	0,02
	v	0,1	0,3	0,1
- nach 8 Wochen KZB, n = 6	\bar{x}	17,60	16,97	16,46
	s	0,01	0,01	0,08
- nach 16 Wochen KZB, n = 6	\bar{x}	17,29	16,65	16,19
	s	0,06	0,08	0,1
- nach 24 Wochen KZB, n = 6	\bar{x}	17,41	16,64	16,05
	s	0,05	0,12	0,08
- nach 24 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	16,87	16,68	16,40
- nach 48 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	16,86	16,76	16,42
- nach 72 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	16,98	16,62	16,34
Rohdichte [kg/m³]				
- Ausgangszustand, n = 9	\bar{x}	739	734	732
	s	11	9	13
	v	1,5	1,2	1,8
- nach 8 Wochen KZB, n = 6	\bar{x}	743	713	703
	s	8,6	7,7	10,1
- nach 16 Wochen KZB, n = 6	\bar{x}	722	716	723
	s	4,9	7,7	12,4
- nach 24 Wochen KZB, n = 6	\bar{x}	702	689	680
	s	6,2	9,4	13,5
- nach 24 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	728	752	721
- nach 48 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	741	737	735
- nach 72 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	717	738	736
Querzugfestigkeit [N/mm²]				
- Ausgangszustand, n = 9	\bar{x}	1,10	1,22	1,29
	s	0,12	0,08	0,09
	v	10,5	6,5	6,8
- nach 8 Wochen KZB, n = 6	\bar{x}	0,65	0,70	0,78
	s	0,09	0,11	0,11
- nach 16 Wochen KZB, n = 6	\bar{x}	0,61	0,52	0,75
	s	0,03	0,10	0,13
- nach 24 Wochen KZB, n = 6	\bar{x}	0,47	0,37	0,52
	s	0,08	0,08	0,12
- nach 24 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	0,99	1,01	1,04
- nach 48 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	1,07	1,10	1,11
- nach 72 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	1,06	0,86	1,01
Feuchtegehalt bei Prüfung [%]				
- Ausgangszustand, n = 6	\bar{x}	6,9	5,8	6,8
	s	0	0,1	1,5
	v	0,7	1,4	21,7
- nach 8 Wochen KZB, n = 4	\bar{x}	11,3	9,5	8,9
- nach 16 Wochen KZB, n = 4	\bar{x}	11,3	9,5	8,9
- nach 24 Wochen KZB, n = 4	\bar{x}	11,9	10,3	9,7
- nach 24 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	9,9	8,5	8,2
- nach 48 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	10,2	8,6	8,1
- nach 72 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	10,3	8,8	8,4

Anhang – Tabelle A5-4-3

Versuchsreihe V-4: Biege-Elastizitätsmodul und Biegefestigkeit sowie Dickenquellung nach 2 und 24 h Wasserlagerung von **Labor-MDF mit 16 % PMDI** (Festanteil bezogen auf Faserstoff_{atro}) **nach** technischer **Bewitterung** (Kurzzeitbewitterung = KZB, Entnahme nach 8, 16 und 24 Wochen) sowie nach natürlicher Bewitterung (Freibewitterung = FB, Entnahme nach 24, 48 und 72 Wochen) im Vergleich zum Ausgangszustand

MDF-Eigenschaften	Aufschlussbedingungen: Druck, Temperatur, Zeit			
	8 bar 170 °C 4 min	12 bar 187 °C 4 min	16 bar 200 °C 4 min	
IHD-Code	2668	2667	2666	
Biege-Elastizitätsmodul [N/mm²]				
- Ausgangszustand, n = 6	\bar{x} s v	3900 178 4,6	3330 136 4,1	2530 194 7,7
- nach 8 Wochen KZB, n = 4	\bar{x}	1437	1279	1199
- nach 16 Wochen KZB, n = 4	\bar{x}	1630	1510	1490
- nach 24 Wochen KZB, n = 4	\bar{x}	1367	1267	1251
- nach 24 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	2605	2266	1685
- nach 48 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	2632	2135	1860
- nach 72 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	2137	1892	1673
Biege-Elastizitätsmodul [N/mm²]				
- Ausgangszustand, n = 6	\bar{x} s v	43,85 3,69 8,4	30,27 2,36 7,8	21,53 2,18 10,1
- nach 8 Wochen KZB, n = 4	\bar{x}	24,83	18,83	15,51
- nach 16 Wochen KZB, n = 4	\bar{x}	26,93	20,79	18,48
- nach 24 Wochen KZB, n = 4	\bar{x}	23,67	19,17	15,60
- nach 24 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	38,82	27,97	18,60
- nach 48 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	40,43	25,03	18,68
- nach 72 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	33,39	26,04	18,68
Dickenquellung nach 2 h WL [%]				
- Ausgangszustand, n = 9	\bar{x} s v	0,5 0 0,2	0,4 0 8,8	0,3 0 10,3
- nach 8 Wochen KZB, n = 4	\bar{x}	1,1	0,7	0,9
- nach 16 Wochen KZB, n = 4	\bar{x}	1,4	1,4	1,3
- nach 24 Wochen KZB, n = 4	\bar{x}	2,4	5,0	5,6
- nach 24 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	0,5	0,4	0,3
- nach 48 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	0,4	0,3	0,2
- nach 72 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	1,1	0,8	0,8
Dickenquellung nach 24 h WL [%]				
- Ausgangszustand, n = 9	\bar{x} s v	2,6 0 1,1	2,3 0,2 6,5	1,7 0 1,9
- nach 8 Wochen KZB, n = 4	\bar{x}	3,3	3,2	3,7
- nach 16 Wochen KZB, n = 4	\bar{x}	4,4	5,6	4,4
- nach 24 Wochen KZB, n = 4	\bar{x}	7,8	7,4	6,3
- nach 24 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	2,0	1,7	1,4
- nach 48 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	2,0	1,4	1,2
- nach 72 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	3,1	2,3	2,0

Anhang – Tabelle A6-1-1

Versuchsreihe VI-1: Physikalische und chemische Eigenschaften von **Labor-MDF mit 20 % MUF-Harz** (Festanteil bezogen auf Faserstoff_{atro}) in Abhängigkeit von den Aufschlussbedingungen bei der labortech-nischen Herstellung von Kiefernholzfasern (im Vergleich zu Industriefaserstoff),
Plattennenddicke 16 mm, Heizplattentemperatur 190 °C, Presszeitfaktor 18 s/mm_{Plattendicke},
mit 1,2 % Hydrophobierungsmittel (Festanteil bezogen auf Faserstoff_{atro})

MDF-Eigenschaften	IHD-Code	Aufschlussbedingungen: Druck, Temperatur, Zeit						
		8 bar 170 °C 4 min	12 bar 187 °C 4 min	16 bar 200 °C 4 min	8 bar 170 °C 8 min	12 bar 187 °C 8 min	16 bar 200 °C 8 min	8 bar 170 °C 4 min Industrie
		2559	2557	2555	2553	2551	2549	2561
Feuchtegehalt vor Hei- presse [%], n = 2	\bar{x}	9,3	8,3	9,1	9,0	8,8	8,5	9,0
Plattendicke (geschliffen) [mm], n = 16	\bar{x}	15,95	15,88	15,85	15,86	15,84	15,71	15,90
	s	0,08	0,09	0,09	0,08	0,07	0,05	0,08
	v	0,49	0,56	0,54	0,50	0,44	0,3	0,5
Rohdichte [kg/m ³], n = 16	\bar{x}	781	772	769	778	773	779	773
	s	22	21	31	23	42	52	29
	v	3	3	4	3	6	7	4
Querzugfestigkeit (tro- cken) [N/mm ²], n = 16	\bar{x}	1,57	1,52	1,14	1,38	1,31	1,55	1,47
	s	0,12	0,11	0,09	0,11	0,22	0,10	0,09
	v	7,71	7,16	8,09	7,97	16,51	6,49	6,21
Querzugfestigkeit nach 2 h Kochen [N/mm ²], n = 16	\bar{x}	0,22	0,26	0,19	0,27	0,24	0,29	0,20
	s	0,04	0,03	0,03	0,04	0,04	0,05	0,03
	v	17,27	13,22	14,39	13,78	17,90	16,72	14,37
Querzugfestigkeit nach Zyklustest [N/mm ²], n = 16	\bar{x}	1,04	0,78	0,33 ⁴	0,95	0,61 ⁴	0,29 ⁴	0,93
	s	0,10	0,14	0,09	0,15	0,21	0,09	0,08
	v	9,47	17,50	27,64	16,05	33,59	31,25	8,86
Biegefestigkeit [N/mm ²], n = 12	\bar{x}	45,7	34,8	25,1	33,7	25,5	12,8	40,4
	s	3,6	2,4	2,7	4,9	2,0	2,0	2,3
	v	7,9	7,0	10,8	14,6	7,9	15,2	5,6
Biege-E-Modul [N/mm ²], n = 12	\bar{x}	4750	4350	3810	4190	3830	3040	4430
	s	220	210	315	290	365	390	250
	v	4,6	4,9	8,3	6,9	9,6	12,8	5,6
Dickenquellung nach 2 h WL [%], n = 12	\bar{x}	0,3	0,2	0,2	0,3	0,1	0,1	0,3
	s	0	0	0,1	0,1	0,1	0	0,1
	v	17,7	20,9	34,7	24,6	47,8	43,2	26,3
Dickenquellung nach 24 h WL [%], n = 12	\bar{x}	1,6	1,5	1,6	1,5	1,5	1,0	1,7
	s	0,1	0,3	0,2	0,2	0,4	0,2	0,2
	v	5,7	20,2	12,0	11,1	24,1	20,3	10,5
Dickenquellung nach Zyklustest [%], n = 16	\bar{x}	5,5	4,5	3,6	5,4	4,1	0,6	5,2
	s	0,4	0,4	0,3	0,4	0,3	0,4	0,3
	v	7,4	8,5	9,3	8,3	8,5	65,3	4,9
Feuchtegehalt bei Prü- fung [%], n = 8	\bar{x}	7,1	6,4	6,3	5,9	5,0	4,8	7,7
	s	0,2	0,3	0,4	0,2	0,3	0,1	0,1
	v	2,4	5,3	5,6	3,4	5,4	2,4	1,8
Formaldehydgehalt, [mg HCHO/100 g Plat- te _{atro}], n = 2	A-Wert	11,13	9,41	7,55	7,97	8,02	5,75	10,82
	B-Wert	13,58	11,51	9,45	9,13	9,54	7,41	13,04
pH-Wert, [], n = 2	\bar{x}	5,32	5,32	5,13	5,39	5,12	4,69	5,38

Anhang – Tabelle A6-1-2

Versuchsreihe VI-1: Plattendicke, Rohdichte, Querzugfestigkeit und Feuchtegehalt von **Labor-MDF mit 20 % MUF-Harz** (Festanteil bezogen auf Faserstoff_{atro}) **nach** technischer **Bewitterung** (Kurzzeitbewitterung = KZB, Entnahme nach 8, 16 und 24 Wochen) sowie nach natürlicher Bewitterung (Freibewitterung = FB, Entnahme nach 24, 48, 72 und 96 Wochen) im Vergleich zum Ausgangszustand

MDF-Eigenschaften		Aufschlussbedingungen: Druck, Temperatur, Zeit						
		8 bar 170 °C 4 min	12 bar 187 °C 4 min	16 bar 200 °C 4 min	8 bar 170 °C 8 min	12 bar 187 °C 8 min	16 bar 200 °C 8 min	8 bar 170 °C 4 min Industrie
IHD-Code		2559	2557	2555	2553	2551	2549	2561
Plattendicke [mm]								
- Ausgangszustand, n = 16	\bar{x}	15,95	15,88	15,85	15,86	15,84	15,71	15,90
	s	0,08	0,09	0,09	0,08	0,07	0,05	0,08
	v	0,49	0,56	0,54	0,50	0,44	0,3	0,5
- nach 8 Wochen KZB, n = 8	\bar{x}	16,47	15,73	15,38	16,19	15,47	15,43	16,24
	s	0,13	0,09	0,23	0,16	0,09	0,09	0,07
- nach 16 Wochen KZB, n = 8	\bar{x}	16,47	15,53	15,37	16,36	15,51	15,20	16,26
	s	0,06	0,08	0,11	0,07	0,07	0,09	0,09
- nach 24 Wochen KZB, n = 8	\bar{x}	16,57	15,59	15,30	16,02	15,22	15,09	16,05
	s	0,06	0,15	0,12	0,20	0,03	0,11	0,06
- nach 24 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	n. b. ⁷⁰	n. b.	16,05	16,15	16,01	15,73	n. b.
- nach 48 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	16,20	16,12	16,02	16,13	16,00	15,78	16,20
- nach 72 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	16,20	15,96	15,90	16,00	15,99	15,87	16,03
- nach 96 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	16,06	16,01	15,94	16,01	15,98	15,93	16,08
Rohdichte [kg/m³]								
- Ausgangszustand, n = 16	\bar{x}	781	772	769	778	773	779	773
	s	22	21	31	23	42	52	29
	v	3	3	4	3	6	7	4
- nach 8 Wochen KZB, n = 8	\bar{x}	769	734	721	743	728	740	765
	s	12	11	13	12	14	20	20
- nach 16 Wochen KZB, n = 8	\bar{x}	734	722	710	746	728	721	711
	s	8	24	16	13	40	26	14
- nach 24 Wochen KZB, n = 8	\bar{x}	756	733	707	731	707	732	729
	s	17	9	27	19	20	24	24
- nach 24 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	n. b.	n. b.	802	784	765	793	n. b.
- nach 48 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	761	763	781	731	809	803	765
- nach 72 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	800	771	765	794	740	755	805
- nach 96 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	780	774	762	790	750	816	787
Feuchtegehalt bei Prüfung [%]								
- Ausgangszustand, n = 10	\bar{x}	7,1	6,4	6,3	5,9	5,0	4,8	7,7
	s	0,2	0,3	0,4	0,2	0,3	0,1	0,1
	v	2,4	5,3	5,6	3,4	5,4	2,4	1,8
- nach 8 Wochen KZB, n = 4	\bar{x}	13,0	12,3	11,2	12,7	12,0	11,8	12,9
- nach 16 Wochen KZB, n = 4	\bar{x}	13,2	12,6	12,0	13,5	12,4	12,2	13,0
- nach 24 Wochen KZB, n = 4	\bar{x}	13,6	12,2	12,2	13,2	11,9	12,0	12,7
- nach 24 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	n. b.	n. b.	6,3	7,3	6,0	5,7	n. b.
- nach 48 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	8,9	7,9	7,7	8,3	7,4	7,7	8,7
- nach 72 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	7,9	7,2	6,5	7,4	7,0	6,3	7,8
- nach 96 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	n. b.						

⁷⁰ nicht bestimmt

Anhang – Tabelle A6-1-3

Versuchsreihe VI-1: Querzugfestigkeit, Biege-Elastizitätsmodul und Biegefestigkeit von **Labor-MDF mit 20 % MUF-Harz** (Festanteil bezogen auf Faserstoff_{atro}) **nach** technischer **Bewitterung** (Kurzzeitbewitterung = KZB, Entnahme nach 8, 16 und 24 Wochen) sowie nach natürlicher Bewitterung (Freibewitterung = FB, Entnahme nach 24, 48, 72 und 96 Wochen) im Vergleich zum Ausgangszustand

MDF-Eigenschaften		Aufschlussbedingungen: Druck, Temperatur, Zeit						
		8 bar 170 °C 4 min	12 bar 187 °C 4 min	16 bar 200 °C 4 min	8 bar 170 °C 8 min	12 bar 187 °C 8 min	16 bar 200 °C 8 min	8 bar 170 °C 4 min Industrie
IHD-Code		2559	2557	2555	2553	2551	2549	2561
Querzugfestigkeit [N/mm²]								
- Ausgangszustand, n = 16	\bar{x}	1,57	1,52	1,14	1,38	1,31	1,55	1,47
	s	0,12	0,11	0,09	0,11	0,22	0,10	0,09
	v	7,71	7,16	8,09	7,97	16,51	6,49	6,21
- nach 8 Wochen KZB, n = 8	\bar{x}	0,97	0,73	0,47	0,78	0,68	0,67	0,83
	s	0,16	0,04	0,10	0,09	0,04	0,22	0,09
- nach 16 Wochen KZB, n = 8	\bar{x}	0,94	0,75	0,52	0,90	0,67	0,57	0,75
	s	0,05	0,16	0,11	0,10	0,17	0,28	0,07
- nach 24 Wochen KZB, n = 8	\bar{x}	0,89	0,71	0,49	0,84	0,51	0,69	0,66
	s	0,12	0,16	0,11	0,12	0,10	0,20	0,08
- nach 24 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	n. b. ⁷¹	n. b.	1,26	1,59	1,23	1,30	n. b.
- nach 48 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	1,47	1,26	1,09	1,27	1,19	1,07	1,18
- nach 72 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	1,47	1,18	0,50	1,43	0,69	0,72	1,38
- nach 96 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	1,47	1,28	0,87	1,28	1,05	1,24	1,35
Biege-Elastizitätsmodul [N/mm²]								
- Ausgangszustand, n = 12	\bar{x}	4750	4350	3810	4190	3830	3040	4430
	s	220	210	315	290	365	390	250
	v	4,6	4,9	8,3	6,9	9,6	12,8	5,6
- nach 8 Wochen KZB, n = 4	\bar{x}	2240	1995	1770	1820	1680	1220	2190
- nach 16 Wochen KZB, n = 4	\bar{x}	1840	1880	1550	1910	1425	840	1700
- nach 24 Wochen KZB, n = 4	\bar{x}	1935	1605	1355	1700	1385	980	1695
- nach 24 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	n. b.	n. b.	3280	3170	3030	2560	n. b.
- nach 48 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	3310	3300	2940	3010	3380	2245	3205
- nach 72 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	3665	2985	2385	2780	2570	1415	3290
- nach 96 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	3265	2765	2590	2890	2490	2025	3085
Biegefestigkeit [N/mm²]								
- Ausgangszustand, n = 12	\bar{x}	45,7	34,8	25,1	33,7	25,5	12,8	40,4
	s	3,6	2,4	2,7	4,9	2,0	2,0	2,3
	v	7,9	7,0	10,8	14,6	7,9	15,2	5,6
- nach 8 Wochen KZB, n = 4	\bar{x}	34,9	25,0	19,4	24,3	19,1	9,9	30,2
- nach 16 Wochen KZB, n = 4	\bar{x}	29,6	26,1	17,0	28,0	15,3	6,9	24,9
- nach 24 Wochen KZB, n = 4	\bar{x}	31,4	20,9	15,2	23,4	15,3	9,1	25,1
- nach 24 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	n. b.	n. b.	27,9	41,3	26,2	14,5	n. b.
- nach 48 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	45,8	39,3	25,2	38,4	31,3	14,2	43,0
- nach 72 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	54,3	34,8	21,7	33,2	27,5	9,7	42,2
- nach 96 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	47,6	29,6	25,1	30,9	25,8	10,6	44,5

⁷¹ nicht bestimmt

Anhang – Tabelle A6-1-4

Versuchsreihe VI-1: Dickenquellung nach 2 und 24 h Wasserlagerung von **Labor-MDF mit 20 % MUF-Harz** (Festanteil bezogen auf Faserstoff_{atro}) **nach** technischer **Bewitterung** (Kurzzeitbewitterung = KZB, Entnahme nach 8, 16 und 24 Wochen) sowie nach natürlicher Bewitterung (Freibewitterung = FB, Entnahme nach 24, 48, 72 und 96 Wochen) im Vergleich zum Ausgangszustand

MDF-Eigenschaften	Aufschlussbedingungen: Druck, Temperatur, Zeit							
	8 bar 170 °C 4 min	12 bar 187 °C 4 min	16 bar 200 °C 4 min	8 bar 170 °C 8 min	12 bar 187 °C 8 min	16 bar 200 °C 8 min	8 bar 170 °C 4 min Industrie	
IHD-Code	2559	2557	2555	2553	2551	2549	2561	
Dickenquellung nach 2 h WL [%]								
- Ausgangszustand, n = 12	\bar{x}	0,3	0,2	0,2	0,3	0,1	0,1	0,3
	s	0	0	0,1	0,1	0,1	0	0,1
	v	17,7	20,9	34,7	24,6	47,8	43,2	26,3
- nach 8 Wochen KZB, n = 8	\bar{x}	0,9	0,6	0,8	0,7	0,6	1,2	0,6
	s	0,4	0,1	0,2	0,2	0,1	0,7	0,1
- nach 16 Wochen KZB, n = 8	\bar{x}	0,8	0,6	1,4	1,0	1,0	1,6	1,1
	s	0,1	0,2	0,9	0,3	0,2	1,2	0,2
- nach 24 Wochen KZB, n = 8	\bar{x}	2,7	0,8	2,8	1,2	1,8	0,8	1,1
	s	2,9	0,2	1,5	0,1	0,4	0,2	0,2
- nach 24 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	n. b. ⁷²	0,3	0,1	0,2	0,2	0,2	n. b.
- nach 48 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	0,3	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,3
- nach 72 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	0,3	0,3	0,3	0,3	0,4	0,3	0,3
- nach 96 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	0,2	0,2	0,2	0,2	0,1	0,2	0,2
Dickenquellung nach 24 h WL [%]								
- Ausgangszustand, n = 12	\bar{x}	1,6	1,5	1,6	1,5	1,5	1,0	1,7
	s	0,1	0,3	0,2	0,2	0,4	0,2	0,2
	v	5,7	20,2	12,0	11,1	24,1	20,3	10,5
- nach 8 Wochen KZB, n = 8	\bar{x}	7,6	3,3	6,5	3,8	5,9	4,6	2,8
	s	1,2	0,6	2,3	1,9	0,7	0,3	0,2
- nach 16 Wochen KZB, n = 8	\bar{x}	9,4	9,6	8,7	8,6	6,8	5,7	11,0
	s	1,4	3,1	0,9	0,3	0,9	0,8	0,4
- nach 24 Wochen KZB, n = 8	\bar{x}	10,0	7,9	8,6	9,0	8,4	5,6	10,2
	s	1,9	1,1	0,7	0,4	0,7	0,7	1,7
- nach 24 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	n. b.	1,1	0,8	1,1	1,1	1,2	n. b.
- nach 48 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	1,1	1,0	0,9	1,0	0,7	1,0	1,1
- nach 72 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	1,4	1,4	1,6	1,5	2,2	1,9	1,3
- nach 96 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	1,1	1,1	1,1	0,9	1,1	1,0	1,1

⁷² nicht bestimmt

Anhang – Tabelle A6-2-1

Versuchsreihe VI-2: Physikalische und chemische Eigenschaften von **Labor-MDF mit 16 % PF-Harz** (Festanteil bezogen auf Faserstoff_{atro}) in Abhängigkeit von den Aufschlussbedingungen bei der labortech-nischen Herstellung von Kiefernholzfaserstoffen (im Vergleich zu Industriefaserstoff), Plattennendicke 16 mm, Heizplattentemperatur 190 °C, Presszeitfaktor 18 s/mm_{Plattendicke}, mit 1,2 % Hydrophobierungsmittel (Festanteil bezogen auf Faserstoff_{atro})

MDF-Eigenschaften		Aufschlussbedingungen: Druck, Temperatur, Zeit					
		8 bar 170 °C 4 min	12 bar 187 °C 4 min	16 bar 200 °C 4 min	8 bar 170 °C 8 min	12 bar 187 °C 8 min	16 bar 200 °C 8 min
	IHD-Code	2578	2577	2576	2575	2574	2573
Feuchtegehalt vor Heiß- presse [%], n = 2	\bar{x}	11,2	11,1	11,0	11,5	11,1	11,0
Plattendicke (geschliffen) [mm], n = 12	\bar{x}	16,27	16,28	16,24	16,26	16,23	16,18
	s	0,07	0,08	0,06	0,07	0,06	0,04
	v	0,4	0,5	0,4	0,5	0,4	0,3
Rohdichte [kg/m ³], n = 12	\bar{x}	754	753	752	755	761	767
	s	17	13	27	18	21	34
	v	2,2	1,7	3,5	2,4	2,7	4,4
Querzugfestigkeit (tro- cken) [N/mm ²], n = 12	\bar{x}	1,07	0,91	0,9	0,88	0,85	0,72
	s	0,16	0,09	0,14	0,05	0,08	0,12
	v	15,1	10,4	15,6	5,9	9,8	17,0
Querzugfestigkeit nach 2 h Kochen [N/mm ²], n = 12	\bar{x}	0,19	0,23	0,27	0,19	0,24	0,27
	s	0,04	0,02	0,05	0,02	0,05	0,05
	v	20,6	9,6	16,9	12,5	19,6	16,4
Querzugfestigkeit nach Zyklustest [N/mm ²], n = 16	\bar{x}	0,86	0,8	0,82	0,72	0,74	0,64
	s	0,10	0,07	0,09	0,05	0,08	0,08
	v	12,0	8,8	11,5	7,2	10,8	13,1
Biegefestigkeit [N/mm ²], n = 9	\bar{x}	28,66	20,51	13,72	19,98	12,10	7,6
	s	1,82	1,43	1,18	0,97	1,17	1,18
	v	6,4	7,0	8,6	4,9	9,7	15,4
Biege-E-Modul [N/mm ²], n = 9	\bar{x}	2810	2320	1880	2350	1770	1370
	s	160	90	160	90	165	185
	v	5,6	4,0	8,6	3,9	9,2	13,5
Dickenquellung nach 2 h WL [%], n = 12	\bar{x}	1,0	0,4	0,2	0,7	0,2	0,2
	s	0,4	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
	v	39,7	19,4	26,2	19,7	27,4	28,0
Dickenquellung nach 24 h WL [%], n = 12	\bar{x}	4,3	2,0	0,8	3,0	0,9	0,6
	s	0,7	0,4	0,1	0,3	0,2	0,1
	v	16,2	17,8	14,9	10,6	26,0	14,3
Dickenquellung nach Zyklustest [%], n = 16	\bar{x}	3,7	0,3	-2,7	2,2	-2,1	-4,8
	s	0,4	0,2	0,6	0,5	0,7	1,1
	v	11,2	59,7	-21,9	23,1	-35,4	-22,2
Feuchtegehalt bei Pr- fung [%], n = 6	\bar{x}	10,3	10,4	11,0	10,6	11,8	12,5
	s	0,2	0,3	0,4	0,2	0,4	0,3
	v	1,9	3,1	3,7	1,5	3,6	2,2
Formaldehydgehalt, [mg HCHO/100 g Plat- te _{atro}], n = 2	A-Wert	1,0	1,5	1,1	1,5	1,9	1,6
	B-Wert	1,0	1,5	1,1	1,6	1,9	1,5
pH-Wert, [], n = 2	\bar{x}	8,38	7,71	7,29	8,32	7,73	7,08

Anhang – Tabelle A6-2-2

Versuchsreihe VI-2: Plattendicke, Rohdichte, Querzugfestigkeit und Feuchtegehalt von **Labor-MDF mit 16 % PF-Harz** (Festanteil bezogen auf Faserstoff_{atro}) **nach technischer Bewitterung** (Kurzzeitbewitterung = KZB, Entnahme nach 8, 16 und 24 Wochen) sowie nach natürlicher Bewitterung (Freibewitterung = FB, Entnahme nach 24, 48 und 72 Wochen) im Vergleich zum Ausgangszustand

MDF-Eigenschaften		Aufschlussbedingungen: Druck, Temperatur, Zeit					
		8 bar 170 °C 4 min	12 bar 187 °C 4 min	16 bar 200 °C 4 min	8 bar 170 °C 8 min	12 bar 187 °C 8 min	16 bar 200 °C 8 min
IHD-Code		2578	2577	2576	2575	2574	2573
Plattendicke [mm]							
- Ausgangszustand, n = 12	\bar{x}	16,27	16,28	16,24	16,26	16,23	16,18
	s	0,07	0,08	0,06	0,07	0,06	0,04
	v	0,4	0,5	0,4	0,5	0,4	0,3
- nach 8 Wochen KZB, n = 6	\bar{x}	16,25	15,61	15,27	15,96	15,38	15,04
	s	0,17	0,05	0,04	0,05	0,11	0,04
- nach 16 Wochen KZB, n = 6	\bar{x}	16,23	15,54	15,07	15,87	15,14	14,92
	s	0,04	0,04	0,03	0,09	0,04	0,02
- nach 24 Wochen KZB, n = 6	\bar{x}	16,59	15,63	15,20	15,93	15,30	15,52
	s	0,56	0,09	0,04	0,13	0,08	0,50
- nach 24 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	16,15	15,74	15,80	15,99	16,23	15,90
- nach 48 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	16,17	15,91	15,88	16,16	15,42	15,41
- nach 72 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	16,35	16,00	15,74	16,04	15,57	15,84
Rohdichte [kg/m³]							
- Ausgangszustand, n = 12	\bar{x}	754	753	752	755	761	767
	s	17	13	27	18	21	34
	v	2,2	1,7	3,5	2,4	2,7	4,4
- nach 8 Wochen KZB, n = 6	\bar{x}	704	693	638	681	665	653
	s	21	9	28	9	19	51
- nach 16 Wochen KZB, n = 6	\bar{x}	717	694	686	696	690	677
	s	23	21	18	9	11	24
- nach 24 Wochen KZB, n = 6	\bar{x}	703	702	686	684	676	655
	s	10	19	40	17	25	31
- nach 24 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	718	721	700	747	720	768
- nach 48 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	718	747	736	739	676	671
- nach 72 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	720	725	655	686	651	655
Querzugfestigkeit [N/mm²]							
- Ausgangszustand, n = 12	\bar{x}	1,07	0,91	0,90	0,88	0,85	0,72
	s	0,16	0,09	0,14	0,05	0,08	0,12
	v	15,1	10,4	15,6	5,9	9,8	17,0
- nach 8 Wochen KZB, n = 6	\bar{x}	0,87	0,85	0,65	0,73	0,72	0,51
	s	0,20	0,08	0,20	0,04	0,14	0,29
- nach 16 Wochen KZB, n = 6	\bar{x}	0,99	0,87	0,93	0,70	0,85	0,91
	s	0,12	0,10	0,19	0,05	0,06	0,18
- nach 24 Wochen KZB, n = 6	\bar{x}	0,87	0,82	0,77	0,68	0,73	0,46
	s	0,09	0,09	0,15	0,08	0,15	0,24
- nach 24 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	0,91	0,78	1,04	0,79	0,61	0,59
- nach 48 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	0,68	0,71	0,52	0,80	0,45	0,09
- nach 72 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	0,94	0,91	0,24	0,59	0,33	0,30
Feuchtegehalt bei Prüfung [%]							
- Ausgangszustand, n = 6	\bar{x}	10,3	10,4	11,0	10,6	11,8	12,5
	s	0,2	0,3	0,4	0,2	0,4	0,3
	v	1,9	3,1	3,7	1,5	3,6	2,2
- nach 8 Wochen KZB, n = 4	\bar{x}	12,6	11,6	10,8	12,1	11,0	10,7
- nach 16 Wochen KZB, n = 4	\bar{x}	12,9	11,7	11,3	12,6	11,5	11,1
- nach 24 Wochen KZB, n = 4	\bar{x}	15,3	11,5	10,9	11,8	11,0	11,2
- nach 24 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	11,2	10,4	11,7	10,7	11,5	11,2
- nach 48 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	12,5	11,6	11,5	12,0	11,2	10,5
- nach 72 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	12,9	11,6	11,4	12,2	11,9	10,3

Anhang – Tabelle A6-2-3

Versuchsreihe VI-2: Biege-Elastizitätsmodul und Biegefestigkeit sowie Dickenquellung nach 2 und 24 h Wasserlagerung von **Labor-MDF mit 16 % PF-Harz** (Festanteil bezogen auf Faserstoff_{atro}) **nach** technischer **Bewitterung** (Kurzzeitbewitterung = KZB, Entnahme nach 8, 16 und 24 Wochen) sowie nach natürlicher Bewitterung (Freibewitterung = FB, Entnahme nach 24, 48 und 72 Wochen) im Vergleich zum Ausgangszustand

MDF-Eigenschaften	IHD-Code	Aufschlussbedingungen: Druck, Temperatur, Zeit					
		8 bar 170 °C 4 min	12 bar 187 °C 4 min	16 bar 200 °C 4 min	8 bar 170 °C 8 min	12 bar 187 °C 8 min	16 bar 200 °C 8 min
		2578	2577	2576	2575	2574	2573
Biege-Elastizitätsmodul [N/mm²]							
- Ausgangszustand, n = 9	\bar{x}	2810	2320	1880	2350	1770	1370
	s	160	90	160	90	165	185
	v	5,6	4,0	8,6	3,9	9,2	13,5
- nach 8 Wochen KZB, n = 4	\bar{x}	1625	1480	1200	1385	1180	945
- nach 16 Wochen KZB, n = 4	\bar{x}	1760	1445	1330	1485	1220	785
- nach 24 Wochen KZB, n = 4	\bar{x}	1290	1375	1205	1370	1070	990
- nach 24 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	1790	1590	1400	1505	1280	1010
- nach 48 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	1490	1505	1220	1325	1205	1240
- nach 72 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	1675	1510	1170	1265	1050	650
Biegefestigkeit [N/mm²]							
- Ausgangszustand, n = 9	\bar{x}	28,66	20,51	13,72	19,98	12,10	7,6
	s	1,82	1,43	1,18	0,97	1,17	1,18
	v	6,4	7,0	8,6	4,9	9,7	15,4
- nach 8 Wochen KZB, n = 4	\bar{x}	24,3	19,2	13,3	18,7	12,5	9,3
- nach 16 Wochen KZB, n = 4	\bar{x}	26,2	19,0	14,8	19,7	12,9	6,5
- nach 24 Wochen KZB, n = 4	\bar{x}	19,8	19,5	14,8	18,8	13,1	12,7
- nach 24 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	29,6	20,9	12,5	22,9	11,6	6,9
- nach 48 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	27,4	22,3	15,9	19,8	13,3	13,0
- nach 72 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	30,4	23,4	14,4	19,8	13,2	7,9
Dickenquellung nach 2 h WL [%]							
- Ausgangszustand, n = 12	\bar{x}	1,0	0,4	0,2	0,7	0,2	0,2
	s	0,4	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
	v	39,7	19,4	26,2	19,7	27,4	28,0
- nach 8 Wochen KZB, n = 4	\bar{x}	0,7	1,0	4,3	0,8	2,1	7,4
- nach 16 Wochen KZB, n = 4	\bar{x}	0,6	0,8	5,1	0,7	4,6	7,0
- nach 24 Wochen KZB, n = 4	\bar{x}	0,9	2,3	8,4	1,6	8,1	7,2
- nach 24 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	0,5	0,4	0,2	0,5	0,3	0,8
- nach 48 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	0,8	0,9	5,2	0,6	5,5	7,2
- nach 72 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	0,9	1,1	8,6	3,4	8,5	7,0
Dickenquellung nach 24 h WL [%]							
- Ausgangszustand, n = 12	\bar{x}	4,3	2,0	0,8	3,0	0,9	0,6
	s	0,7	0,4	0,1	0,3	0,2	0,1
	v	16,2	17,8	14,9	10,6	26,0	14,3
- nach 8 Wochen KZB, n = 4	\bar{x}	3,2	5,6	9,3	7,0	8,1	9,5
- nach 16 Wochen KZB, n = 4	\bar{x}	2,3	5,5	8,8	7,2	8,7	9,0
- nach 24 Wochen KZB, n = 4	\bar{x}	4,6	8,2	9,0	9,8	8,6	8,4
- nach 24 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	2,4	2,8	1,1	2,8	1,4	1,6
- nach 48 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	3,8	4,1	6,0	3,3	7,5	8,1
- nach 72 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	5,7	4,5	11,9	8,1	9,6	7,9

Anhang – Tabelle A6-3-1

Versuchsreihe VI-3: Physikalische und chemische Eigenschaften von **Labor-MDF mit 16 % MUPF-Harz** (Festanteil bezogen auf Faserstoff_{atro}) in Abhängigkeit von den Aufschlussbedingungen bei der labortechnischen Herstellung von Kiefernholzfasern (im Vergleich zu Industriefaserstoff), Plattennendicke 16 mm, Heizplattentemperatur 190 °C, Presszeitfaktor 18 s/mm_{Plattendicke}, mit 1,2 % Hydrophobierungsmittel (Festanteil bezogen auf Faserstoff_{atro})

MDF-Eigenschaften		Aufschlussbedingungen: Druck, Temperatur, Zeit		
		8 bar 170 °C 4 min	12 bar 187 °C 4 min	16 bar 200 °C 4 min
IHD-Code		2671	2670	2669
Feuchtegehalt vor Heißpresse [%], n = 2	\bar{x}	9,6	9,4	9,0
Plattendicke (geschliffen) [mm], n = 9	\bar{x}	16,16	16,11	16,06
	s	0,03	0,02	0,03
	v	0,2	0,1	0,2
Rohdichte [kg/m ³], n = 9	\bar{x}	768	770	762
	s	8,7	16,6	13,7
	v	1,1	2,2	1,8
Querzugfestigkeit (trocken) [N/mm ²], n = 9	\bar{x}	1,30	1,37	1,28
	s	0,22	0,22	0,12
	v	17,1	16,0	9,7
Querzugfestigkeit nach 2 h Kochen [N/mm ²], n = 9	\bar{x}	0,17	0,22	0,25
	s	0,04	0,07	0,03
	v	21,0	33,2	13,8
Querzugfestigkeit nach Zyklus- test [N/mm ²], n = 9	\bar{x}	0,70	0,75	0,34
	s	0,09	0,08	0,09
	v	13,4	10,6	26,5
Biegefestigkeit [N/mm ²], n = 6	\bar{x}	49,11	37,96	24,01
	s	2,50	3,77	2,25
	v	5,1	9,9	9,4
Biege-E-Modul [N/mm ²], n = 6	\bar{x}	4520	4230	3560
	s	84	248	180
	v	1,9	5,9	5,1
Dickenquellung nach 2 h WL [%], n = 9	\bar{x}	0,3	0,1	0,1
	s	0	0,0	0
	v	13,5	24,8	0
Dickenquellung nach 24 h WL [%], n = 9	\bar{x}	1,8	1,6	1,5
	s	0,1	0,2	0
	v	4,0	11,1	2,3
Dickenquellung nach Zyklustest [%], n = 9	\bar{x}	7,3	4,8	3,4
	s	0,5	0,6	0,4
	v	6,7	12,4	12,7
Wasseraufnahme nach 24 h WL [%], n = 9	\bar{x}	12,2	10,4	11,1
	s	1,0	0,3	0,3
	v	8,5	2,7	3,0
Längenänderung IL 65 – 85 DL 65 – 35 [%], n = 6	\bar{x}	0,20	0,30	0,41
	\bar{x}	-0,09	-0,10	-0,11
Dickenänderung IT 65 – 85 DT 65 – 35 [%], n = 6	\bar{x}	3,7	3,3	3,1
	\bar{x}	-0,6	-0,5	-0,4
Feuchtegehalt bei Prüfung [%], n = 6	\bar{x}	7,3	6,5	6,3
	s	0,1	0,1	0,1
	v	1,7	1,9	1,7
Formaldehydgehalt, [mg HCHO/100 g Platte _{atro}], n = 2	A-Wert	12,48	9,64	9,76
	B-Wert	13,90	11,61	12,60
pH-Wert, [], n = 2	\bar{x}	5,4	5,4	5,1

Anhang – Tabelle A6-3-2

Versuchsreihe VI-3: Plattendicke, Rohdichte, Querzugfestigkeit und Feuchtegehalt von **Labor-MDF mit 16 % MUPF-Harz** (Festanteil bezogen auf Faserstoff_{atro}) **nach** technischer **Bewitterung** (Kurzzeitbewitterung = KZB, Entnahme nach 8, 16 und 24 Wochen) sowie nach natürlicher Bewitterung (Freibewitterung = FB, Entnahme nach 24, 48 und 72 Wochen) im Vergleich zum Ausgangszustand

MDF-Eigenschaften		Aufschlussbedingungen:		
		Druck, Temperatur, Zeit	12 bar	16 bar
		8 bar 170 °C 4 min	187 °C 4 min	200 °C 4 min
IHD-Code		2671	2670	2669
Plattendicke [mm]				
- Ausgangszustand, n = 9	\bar{x}	16,16	16,11	16,06
	s	0,03	0,02	0,03
	v	0,2	0,1	0,2
- nach 8 Wochen KZB, n = 6	\bar{x}	17,00	16,76	16,22
	s	0,04	0,04	0,11
- nach 16 Wochen KZB, n = 6	\bar{x}	17,26	16,20	15,59
	s	0,1	0,04	0,04
- nach 24 Wochen KZB, n = 6	\bar{x}	17,09	16,09	15,52
	s	0,12	0,03	0,08
- nach 24 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	16,50	16,34	16,30
- nach 48 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	16,32	16,38	16,56
- nach 72 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	16,62	16,42	16,32
Rohdichte [kg/m³]				
- Ausgangszustand, n = 9	\bar{x}	768	770	762
	s	8,7	16,6	13,7
	v	1,1	2,2	1,8
- nach 8 Wochen KZB, n = 6	\bar{x}	732	751	754
	s	6,6	23,1	17,0
- nach 16 Wochen KZB, n = 6	\bar{x}	717	725	727
	s	4,5	22,9	22,4
- nach 24 Wochen KZB, n = 6	\bar{x}	705	695	689
	s	7,1	19,5	13,5
- nach 24 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	754	768	767
- nach 48 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	767	774	748
- nach 72 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	748	724	749
Querzugfestigkeit [N/mm²]				
- Ausgangszustand, n = 9	\bar{x}	1,30	1,37	1,28
	s	0,22	0,22	0,12
	v	17,1	16,0	9,7
- nach 8 Wochen KZB, n = 6	\bar{x}	0,79	0,82	0,65
	s	0,05	0,09	0,10
- nach 16 Wochen KZB, n = 6	\bar{x}	0,65	0,61	0,59
	s	0,08	0,16	0,12
- nach 24 Wochen KZB, n = 6	\bar{x}	0,60	0,50	0,38
	s	0,04	0,25	0,09
- nach 24 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	1,25	1,35	1,05
- nach 48 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	1,31	1,50	0,92
- nach 72 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	1,05	0,90	0,75
Feuchtegehalt bei Prüfung [%]				
- Ausgangszustand, n = 6	\bar{x}	7,3	6,5	6,3
	s	0,1	0,1	0,1
	v	1,7	1,9	1,7
- nach 8 Wochen KZB, n = 4	\bar{x}	13,5	11,3	11,3
- nach 16 Wochen KZB, n = 4	\bar{x}	14,6	11,9	11,3
- nach 24 Wochen KZB, n = 4	\bar{x}	14,3	12,7	12,0
- nach 24 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	9,6	8,4	8,5
- nach 48 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	9,5	8,4	8,4
- nach 72 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	10,1	9,0	8,8

Anhang – Tabelle A6-3-3

Versuchsreihe VI-3: Biege-Elastizitätsmodul und Biegefestigkeit sowie Dickenquellung nach 2 und 24 h Wasserlagerung von **Labor-MDF mit 16 % MUPF-Harz** (Festanteil bezogen auf Faserstoff_{atro}) **nach** technischer **Bewitterung** (Kurzzeitbewitterung = KZB, Entnahme nach 8, 16 und 24 Wochen) sowie nach natürlicher Bewitterung (Freibewitterung = FB, Entnahme nach 24, 48 und 72 Wochen) im Vergleich zum Ausgangszustand

MDF-Eigenschaften	Aufschlussbedingungen:			
	Druck, Temperatur, Zeit	8 bar 170 °C 4 min	12 bar 187 °C 4 min	16 bar 200 °C 4 min
IHD-Code	2671	2670	2669	
Biege-Elastizitätsmodul [N/mm²]				
- Ausgangszustand, n = 6	\bar{x}	4520	4230	3560
	s	84	248	180
	v	1,9	5,9	5,1
- nach 8 Wochen KZB, n = 4	\bar{x}	2040	1299	1298
- nach 16 Wochen KZB, n = 4	\bar{x}	1606	1715	1475
- nach 24 Wochen KZB, n = 4	\bar{x}	1570	1556	1211
- nach 24 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	3116	3338	2817
- nach 48 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	3106	3274	2355
- nach 72 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	2633	2534	2138
Biege-Elastizitätsmodul [N/mm²]				
- Ausgangszustand, n = 6	\bar{x}	49,11	37,96	24,01
	s	2,50	3,77	2,25
	v	5,1	9,9	9,4
- nach 8 Wochen KZB, n = 4	\bar{x}	34,91	20,58	17,17
- nach 16 Wochen KZB, n = 4	\bar{x}	27,22	24,92	16,71
- nach 24 Wochen KZB, n = 4	\bar{x}	27,68	23,66	15,05
- nach 24 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	40,99	39,35	24,77
- nach 48 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	52,59	40,00	19,88
- nach 72 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	44,63	33,92	20,69
Dickenquellung nach 2 h WL [%]				
- Ausgangszustand, n = 9	\bar{x}	0,3	0,1	0,1
	s	0	0,0	0
	v	13,5	24,8	0
- nach 8 Wochen KZB, n = 4	\bar{x}	0,7	2,3	0,7
- nach 16 Wochen KZB, n = 4	\bar{x}	0,9	1,4	1,2
- nach 24 Wochen KZB, n = 4	\bar{x}	1,3	0,9	0,8
- nach 24 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	0,3	0,3	0,2
- nach 48 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	0,2	0,2	0,1
- nach 72 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	0,4	0,4	0,3
Dickenquellung nach 24 h WL [%]				
- Ausgangszustand, n = 9	\bar{x}	1,8	1,6	1,5
	s	0,1	0,2	0
	v	4,0	11,1	2,3
- nach 8 Wochen KZB, n = 4	\bar{x}	5,1	5,0	3,9
- nach 16 Wochen KZB, n = 4	\bar{x}	10,0	8,5	6,1
- nach 24 Wochen KZB, n = 4	\bar{x}	11,7	9,0	6,0
- nach 24 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	1,3	1,0	1,0
- nach 48 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	1,1	0,9	0,9
- nach 72 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	1,6	1,4	1,4

Anhang – Tabelle A6-4-1

Versuchsreihe VI-4: Physikalische und chemische Eigenschaften von **Labor-MDF mit 8 % PMDI** (Festanteil bezogen auf Faserstoff_{atro}) in Abhängigkeit von den Aufschlussbedingungen bei der labortechnischen Herstellung von Kiefernholzfaserstoffen (im Vergleich zu Industriefaserstoff), Plattennendicke 16 mm, Heizplattentemperatur 190 °C, Presszeitfaktor 18 s/mm_{Plattendicke}, mit 1,2 % Hydrophobierungsmittel (Festanteil bezogen auf Faserstoff_{atro})

MDF-Eigenschaften		Aufschlussbedingungen: Druck, Temperatur, Zeit		
		8 bar 170 °C 4 min	12 bar 187 °C 4 min	16 bar 200 °C 4 min
IHD-Code		2665	2664	2663
Feuchtegehalt vor Heißpresse [%], n = 2	\bar{x}	8,2	8,0	7,3
Plattendicke (geschliffen) [mm], n = 9	\bar{x}	16,46	16,35	16,34
	s	0,03	0,02	0,05
	v	0,2	0,2	0,3
Rohdichte [kg/m ³], n = 9	\bar{x}	752	737	737
	s	12	15	25
	v	1,6	2,0	3,4
Querzugfestigkeit (trocken) [N/mm ²], n = 9	\bar{x}	0,97	0,69	0,73
	s	0,05	0,09	0,12
	v	4,9	13,2	16,4
Querzugfestigkeit nach 2 h Kochen [N/mm ²], n = 9	\bar{x}	0,12	0,09	0,14
	s	0,02	0,02	0,02
	v	13,6	23,1	17,2
Querzugfestigkeit nach Zyklus-test [N/mm ²], n = 9	\bar{x}	0,38	0,26	0,24
	s	0,04	0,05	0,05
	v	11,2	21,1	19,1
Biegefestigkeit [N/mm ²], n = 6	\bar{x}	40,30	24,13	20,24
	s	4,15	3,47	2,56
	v	10,3	14,4	12,6
Biege-E-Modul [N/mm ²], n = 6	\bar{x}	3910	3150	2720
	s	223	295	321
	v	5,7	9,4	11,8
Dickenquellung nach 2 h WL [%], n = 10	\bar{x}	0,8	0,5	0,3
	s	0,1	0,1	0
	v	11,6	13,4	12,7
Dickenquellung nach 24 h WL [%], n = 10	\bar{x}	3,7	2,7	1,9
	s	0	0,2	0
	v	0,8	5,9	2,2
Dickenquellung nach Zyklustest [%], n = 9	\bar{x}	7,8	4,1	3,1
	s	0,7	0,4	0,4
	v	8,7	10,2	12,1
Wasseraufnahme nach 24 h WL [%], n = 10	\bar{x}	12,4	11,8	10,6
	s	0,3	0,5	0,3
	v	2,2	3,9	2,4
Längenänderung IL 65 – 85 DL 65 – 35 [%], n = 6	\bar{x}	0,23	0,29	0,28
	\bar{x}	-0,13	-0,14	-0,16
Dickenänderung IT 65 – 85 DT 65 – 35 [%], n = 6	\bar{x}	5,8	4,0	2,8
	\bar{x}	-1,1	-0,8	-0,8
Feuchtegehalt bei Prüfung [%], n = 6	\bar{x}	7,4	6,3	5,5
	s	0,1	0,2	0,4
	v	0,8	2,5	8,2
Formaldehydgehalt, [mg HCHO/100 g Platte _{atro}], n = 2	A-Wert	0,34	0,18	0,30
	B-Wert	0,40	0,23	0,41
pH-Wert, [], n = 2	\bar{x}	4,4	4,3	4,3

Anhang – Tabelle A6-4-2

Versuchsreihe VI-4: Plattendicke, Rohdichte, Querzugfestigkeit und Feuchtegehalt von **Labor-MDF mit 8 % PMDI** (Festanteil bezogen auf Faserstoff_{atro}) **nach** technischer **Bewitterung** (Kurzzeitbewitterung = KZB, Entnahme nach 8, 16 und 24 Wochen) sowie nach natürlicher Bewitterung (Freibewitterung = FB, Entnahme nach 24, 48 und 72 Wochen) im Vergleich zum Ausgangszustand

MDF-Eigenschaften		Aufschlussbedingungen:		
		Druck, Temperatur, Zeit		
		8 bar 170 °C 4 min	12 bar 187 °C 4 min	16 bar 200 °C 4 min
IHD-Code		2665	2664	2663
Plattendicke [mm]				
- Ausgangszustand, n = 9	\bar{x}	16,46	16,35	16,34
	s	0,03	0,02	0,05
	v	0,2	0,2	0,3
- nach 8 Wochen KZB, n = 6	\bar{x}	18,10	16,35	16,57
	s	0,06	0,02	0,01
- nach 16 Wochen KZB, n = 6	\bar{x}	17,86	16,66	16,18
	s	0,08	0,13	0,14
- nach 24 Wochen KZB, n = 6	\bar{x}	18,10	16,60	16,17
	s	0,09	0,07	0,04
- nach 24 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	17,00	16,58	16,50
- nach 48 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	17,02	16,56	16,42
- nach 72 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	17,33	16,65	16,49
Rohdichte [kg/m³]				
- Ausgangszustand, n = 9	\bar{x}	752	737	737
	s	12	15	25
	v	1,6	2,0	3,4
- nach 8 Wochen KZB, n = 6	\bar{x}	721	705	712
	s	9,0	4,5	1,8
- nach 16 Wochen KZB, n = 6	\bar{x}	689	694	672
	s	12,7	12,0	11,8
- nach 24 Wochen KZB, n = 6	\bar{x}	664	665	665
	s	12,2	14,3	18,4
- nach 24 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	742	757	748
- nach 48 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	732	743	723
- nach 72 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	716	723	745
Querzugfestigkeit [N/mm²]				
- Ausgangszustand, n = 9	\bar{x}	0,97	0,69	0,73
	s	0,05	0,09	0,12
	v	4,9	13,2	16,4
- nach 8 Wochen KZB, n = 6	\bar{x}	0,40	0,30	0,34
	s	0,06	0,07	0,05
- nach 16 Wochen KZB, n = 6	\bar{x}	0,31	0,22	0,29
	s	0,03	0,04	0,04
- nach 24 Wochen KZB, n = 6	\bar{x}	0,26	0,25	0,20
	s	0,02	0,04	0,04
- nach 24 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	0,71	0,51	0,60
- nach 48 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	0,59	0,45	0,52
- nach 72 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	0,47	0,52	0,61
Feuchtegehalt bei Prüfung [%]				
- Ausgangszustand, n = 6	\bar{x}	7,4	6,3	5,5
	s	0,1	0,2	0,4
	v	0,8	2,5	8,2
- nach 8 Wochen KZB, n = 4	\bar{x}	11,7	9,9	9,2
- nach 16 Wochen KZB, n = 4	\bar{x}	11,7	9,9	9,2
- nach 24 Wochen KZB, n = 4	\bar{x}	12,6	10,7	10,0
- nach 24 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	10,4	8,9	8,3
- nach 48 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	10,4	9,0	8,2
- nach 72 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	10,6	9,0	8,5

Anhang – Tabelle A6-4-3

Versuchsreihe VI-4: Biege-Elastizitätsmodul und Biegefestigkeit sowie Dickenquellung nach 2 und 24 h Wasserlagerung von **Labor-MDF mit 8 % PMDI** (Festanteil bezogen auf Faserstoff_{atro}) **nach** technischer **Bewitterung** (Kurzzeitbewitterung = KZB, Entnahme nach 8, 16 und 24 Wochen) sowie nach natürlicher Bewitterung (Freibewitterung = FB, Entnahme nach 24, 48 und 72 Wochen) im Vergleich zum Ausgangszustand

MDF-Eigenschaften	Aufschlussbedingungen:			
	8 bar 170 °C 4 min	12 bar 187 °C 4 min	16 bar 200 °C 4 min	
IHD-Code	2665	2664	2663	
Biege-Elastizitätsmodul [N/mm²]				
- Ausgangszustand, n = 6	\bar{x} s v	3910 223 5,7	3150 295 9,4	2720 321 11,8
- nach 8 Wochen KZB, n = 4	\bar{x}	1057	996	1041
- nach 16 Wochen KZB, n = 4	\bar{x}	1200	1230	1235
- nach 24 Wochen KZB, n = 4	\bar{x}	886	888	1022
- nach 24 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	2507	2125	1851
- nach 48 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	2289	2021	1664
- nach 72 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	1940	1714	1617
Biege-Elastizitätsmodul [N/mm²]				
- Ausgangszustand, n = 6	\bar{x} s v	40,30 4,15 10,3	24,13 3,47 14,4	20,24 2,56 12,6
- nach 8 Wochen KZB, n = 4	\bar{x}	16,39	13,56	12,34
- nach 16 Wochen KZB, n = 4	\bar{x}	19,64	14,65	14,96
- nach 24 Wochen KZB, n = 4	\bar{x}	14,43	12,53	14,17
- nach 24 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	35,34	24,09	19,83
- nach 48 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	33,20	20,03	17,05
- nach 72 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	27,83	20,42	20,10
Dickenquellung nach 2 h WL [%]				
- Ausgangszustand, n = 10	\bar{x} s v	0,8 0,1 11,6	0,5 0,1 13,4	0,3 0 12,7
- nach 8 Wochen KZB, n = 4	\bar{x}	1,7	2,2	1,8
- nach 16 Wochen KZB, n = 4	\bar{x}	3,3	2,1	2,5
- nach 24 Wochen KZB, n = 4	\bar{x}	6,0	3,6	4,6
- nach 24 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	0,7	0,5	0,4
- nach 48 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	0,5	0,5	0,5
- nach 72 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	1,4	1,0	0,8
Dickenquellung nach 24 h WL [%]				
- Ausgangszustand, n = 10	\bar{x} s v	3,7 0 0,8	2,7 0,2 5,9	1,9 0 2,2
- nach 8 Wochen KZB, n = 4	\bar{x}	5,5	5,1	4,1
- nach 16 Wochen KZB, n = 4	\bar{x}	8,4	6,5	6,1
- nach 24 Wochen KZB, n = 4	\bar{x}	12,2	7,4	6,9
- nach 24 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	2,9	1,7	1,3
- nach 48 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	2,9	1,9	1,5
- nach 72 Wochen FB, n = 4	\bar{x}	4,1	2,4	2,1