

Die Aufbereitung und Wiederverwendung von Altholz zur Herstellung von Mitteldichten Faserplatten (MDF)

Dissertation

zur Erlangung des Doktorgrades
an der Universität Hamburg
Fachbereich Biologie

vorgelegt von
Markus Erbreich
aus Hamburg

Hamburg 2004

Genehmigt vom
Fachbereich Biologie der
Universität Hamburg
auf Antrag von Herrn Professor Dr. J. B. RESSEL
Weitere Gutachter der Dissertation:
Herr Professor Dr. R. MARUTZKY

Tag der Disputation: 14. Mai 2004

Hamburg, den 28. April 2004



Professor Dr. Arno Frühwald
Dekan

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand am Fraunhofer-Institut für Holzforschung, Wilhelm-Klauditz-Institut (WKI), Braunschweig, in der Zeit von August 2000 bis April 2004.

An dieser Stelle möchte ich mich für das Zustandekommen dieser Dissertation bei den nachstehenden Personen bedanken.

Insbesondere bei Herrn Prof. Dr. J. R. Ressel, der mir die Durchführung dieser Dissertation ermöglicht hat und bei Herrn Prof. Dr. R. Patt für seine Unterstützung.

Bei Herrn Prof. Dr. R. Marutzky dafür, dass er mir das Thema dieser Arbeit zur weitgehend selbständigen Bearbeitung überlassen hat.

Mein herzlicher Dank gilt Herrn Dr. C. Boehme für seine Betreuung, ständige Diskussionsbereitschaft und förderliches Interesse.

Mitgewirkt haben auch die Mitarbeiter des WKI, insbesondere Frau Dr. M. Uhde und Frau A. Schulze. Herr Dr. D. Lukowsky der sich für die intensive Betreuung am Mikroskop viel Zeit nahm.

Frau A. Probst zeigte eine ständige Hilfsbereitschaft und Frau G. Flammersberger, Frau U. Schliephake, Frau B. Meyer, Frau N. Siwinski und Frau K. Nastaly unterstützten mich im experimentellen Bereich. Bei Frau K. Zunk und Herrn H. Peters für die Herstellung der Laborfasertplatten.

Des Weiteren danke ich meiner Frau Christina für das Verständnis, dass sie während dieser Zeit für mich aufbrachte.

Teile dieser Arbeit wurden über den Verein für Technische Holzfragen e.V. mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft (BMWi) über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen (AiF) gefördert.

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	
Abbildungsverzeichnis	
Tabellenverzeichnis	

Einleitung und Zielsetzung

1.1 Einführung in das Thema	1
1.2 Zielsetzung	3
1.3 Aufbau der Arbeit	4

Allgemeiner Teil

2 Altholz, Aufkommen und Einsatz

2.1 Abfalleigenschaften handelsüblicher Holzsortimente und deren gesetzliche Verwertungsregelung	5
2.2 Altholzaufkommen in der Bundesrepublik Deutschland	8
2.3 Möglichkeiten zur Verwertung von Altholz	12
2.3.1 Zweitnutzung von Altholz	13
2.3.2 Deponierung von Altholz	13
2.3.3 Exporte von Altholz	13
2.3.4 Energetische Verwertung von Altholz	14
2.3.5 Stoffliche Verwertung von Altholz	15
2.3.6 Aufbereitung von Altholz durch Aufschlussverfahren	16
2.4 Schadstoff-Schnellerkennungsmöglichkeiten beim Sortieren von behandeltem Holz	19
2.5 Gebrauchtholz als Rohstoff für die MDF-Herstellung	23
2.6 Zukünftige MDF-Entwicklung und damit verbundene Auswirkungen auf den Rohholzmarkt	25

3 Einflussfaktoren auf die Faserherstellung

3.1 Allgemeine Einflussfaktoren	27
3.2 Biologische und morphologische Einflussfaktoren auf die Faserstoffherstellung	27
3.2.1 Pilzschädigung am lebenden Baum und an verbautem Holz	27
3.2.2 Lagerungseinflüsse bei Holz und Hackspänen	30
3.3 Einfluss von Feuchtigkeit und Temperatur auf Holz	33
3.3.1 Sorption	33
3.3.2 Chemisch-physikalische Veränderungen bei der Holz Trocknung	34
3.3.3 Irreversibilität bzw. Reversibilität von Faserstoffen	36
3.4 Mechanische Eigenschaftsänderungen bei Holz	39
3.4.1 Mechanische Einflussfaktoren auf Holz und Gebrauchtholz	39
3.4.2 Einflussfaktoren des Herstellungsprozesses auf die spätere Holzwerkstoffplatte	40

4 Aufbereitung von Altholzsortimenten

4.1 Allgemeines zur Aufbereitung von Altholzsortimenten	42
4.2 Störstofferkennung mittels Thermografiekamera.....	44
4.3 Störstofferkennung mittels Magnetabscheidern	47
4.4 Störstofferkennung in der Holzwerkstoffindustrie	48

Untersuchungen - Ergebnisse - Diskussion

5 Material und Methoden

5.1 Untersuchungsmaterial für die Herstellung von Mitteldichten Laborfaserplatten	50
5.2 Vorbehandlung des Untersuchungsmaterials.....	52
5.3 Beleimung des Faserstoffes	52
5.4 Herstellung von Laborfaserplatten aus Alt- und Frischholz	53
5.5 Zuschnitt der Laborfaserplatten	54
5.6 Chemische Untersuchungen am Ausgangsmaterial.....	56
5.6.1 Formaldehydgehalt nach der Perforatormethode.....	56
5.6.2 Bestimmung der Schwermetalle	56
5.6.3 Bestimmung von Chlorid und Fluorid	57
5.6.4 Bestimmung von Pentachlorphenol (PCP) und Lindan	57
5.6.5 Ermittlung des pH-Wertes	58
5.6.6 Bestimmung des Extraktstoffgehaltes in Heißwasser.....	58
5.6.7 Bestimmung der Pufferkapazität	58
5.6.8 Abgabe und Gehalt an flüchtigen Säuren	59
5.6.9 Vorbehandlung der Hackspäne mit Na ₂ SO ₃	60
5.6.10 Bestimmung des Sandgehaltes.....	60
5.7 Untersuchungen an Faserstoffen	61
5.7.1 Bestimmung des Wasserrückhaltevermögens (WRV-Wert) von MDF-Fasern	61
5.7.2 Benetzbarkeit von Prüfblättern	61
5.7.3 Faserlängenmessung mit rechnergestützter Mikroskop-Bildverarbeitung	62
5.7.4 Bestimmung des Defibrator-Wertes.....	63
5.7.5 Mikroskopische Aufnahmen von Alt- und Frischholz- hackspänen und dem daraus hergestellten Faserstoff.....	64
5.7.6 Faserfraktionierung nach Bauer-McNett	64
5.8 Bestimmung der technologischen Eigenschaften der Faserplatten.....	66
5.8.1 Physikalische und mechanisch-technologische Eigenschaften	66
5.8.2 Rohdichteprofilmessung.....	66
5.8.3 Bestimmung des Fremdstoffanteils im Untersuchungsmaterial.....	67
5.9 Chemische Analyse des Abwassers aus der Reinigung der Altholzhackspäne	68

6 Ergebnisse / Diskussion

6.1 Untersuchungsprogramm	69
6.2 Untersuchungen am gelieferten Altholzmaterial.....	70
6.2.1 Zielsetzung	70
6.2.2 Fraktionierung des Untersuchungsmaterials.....	71

6.2.3	Fremdstoffanteile im Untersuchungsmaterial	73
6.2.4	Chemische Analysen	75
6.2.4.1	Analyse auf Holzschutzmittel	75
6.2.4.2	Bestimmung des Sandgehaltes	77
6.2.4.3	Formaldehydgehalt nach der Perforatormethode	80
6.2.4.4	Schwermetalle im Prozesswasser	83
6.2.5	Zusammenfassung	84
6.3	Charakterisierung von Faserstoffen	86
6.3.1	Zielsetzung	86
6.3.2	Untersuchungsprogramm	86
6.3.3	Bestimmung der Faserlängenverteilung verschiedener Faserstoffe	88
6.3.4	Messung der Faserlängenverteilung von Faserstoff mittels Trockensiebung	92
6.3.5	Faserlängenbestimmung an Alt- und Frischholz durch Mikroskop-Bildverarbeitung	96
6.3.6	Faserstofffraktionen	102
6.3.7	Lichtmikroskopische Untersuchungen an Alt- und Frischholz	105
6.3.7.1	Allgemeine Befunde	105
6.3.7.2	Makroskopische Aufnahmen von Alt- und Frischholzfaserstoffen	108
6.3.7.3	Mikroskopischer Nachweis von Pilzhypen	111
6.3.7.4	Strukturänderungen in überbeanspruchtem Holz	115
6.3.7.5	Eigenschaftsänderungen des Untersuchungsmaterials durch biologische und mechanische Einflüsse	120
6.3.8	pH-Wert, Pufferkapazität und Wasserrückhaltevermögen von Faserstoffen	122
6.3.9	Chemische Eigenschaften von Altholzfasern im Vergleich zu Frischholzfasern	126
6.3.10	Zusammenfassung	129
6.4	Einfluss variierender Aufschlussbedingungen auf die Eigenschaften von Alt- und Frischholzfasern	131
6.4.1	Zielsetzung	131
6.4.2	Untersuchungsprogramm	131
6.4.3	Beziehung zwischen der Faserlängenverteilung von Faserstoffen und den mechanisch-technologischen Eigenschaften daraus hergestellter Platten	132
6.4.4	Einfluss einer Wasserlagerung der Hackspäne auf die Faserqualität	139
6.4.5	Einfluss von unterschiedlichen Dämpfzeiten auf die Faserqualität	141
6.4.6	Feuchtigkeitsgehalt	144
6.4.7	Dickenquellung der aus Altholz hergestellten MDF	145
6.4.8	Zusammenfassung	148
6.5	Auswirkungen unterschiedlicher Holzfeuchten auf die Qualität von Alt- und Frischholzfasern zur MDF-Herstellung	149
6.5.1	Zielsetzung	149
6.5.2	Untersuchungsprogramm	149
6.5.3	Mechanisch-technologische Eigenschaften der Laborfaserplatten	151
6.5.3.1	Altholzhackspäne mit unterschiedlicher Holzfeuchte	151
6.5.3.2	Altholzhackspäne mit unterschiedlicher Holzfeuchte bei verschiedenen Zerfaserungsbedingungen	155
6.5.4	Zusammenfassung	160

6.6 Untersuchungen an Mitteldichten Laborfaserplatten aus Alt- und Frischholz ohne und mit einer Reinigung der Hackspäne	161
6.6.1 Zielsetzung	161
6.6.2 Untersuchungsprogramm	161
6.6.3 Mechanisch-technologische Eigenschaften der Laborfaserplatten	163
6.6.4 Dickenquellung der aus Altholz hergestellten MDF	167
6.6.5 Wasseraufnahme der aus Altholz hergestellten MDF	169
6.6.6 Benetzbarkeit von Prüfblättern	172
6.6.7 Zusammenfassung	174
6.7 Mischung von Alt- und Frischholz zur Herstellung von Mitteldichten Faserplatten	175
6.7.1 Zielsetzung	175
6.7.2 Untersuchungsprogramm	175
6.7.3 Ergebnisse der mechanisch-technologischen Untersuchungen der Laborfaserplatten	176
6.7.4 Zusammenfassung	180
6.8 Chemische Vorbehandlung von Alt- und Frischholzhackspänen für die MDF-Herstellung	181
6.8.1 Zielsetzung	181
6.8.2 Untersuchungsprogramm	181
6.8.3 Technologische Eigenschaften von Platten aus chemisch vorbehandelten Hackspänen	182
6.8.4 Formaldehydgehalt nach der Perforatormethode.....	185
6.8.5 Dickenquellung von Laborfaserplatten aus chemisch vorbehandelten Spänen	185
6.8.6 Zusammenfassung	187
6.9 Bindemittleinfluss auf die technologischen Eigenschaften von MDF aus Alt- und Frischholz	188
6.9.1 Zielsetzung	188
6.9.2 Untersuchungsprogramm	188
6.9.3 Technologische Platteneigenschaften	189
6.9.4 Dickenquellung von Platten, die mit unterschiedlichen Bindemitteln hergestellt wurden.....	191
6.9.5 Zusammenfassung	192
7 Zusammenfassung	193
8 Literaturverzeichnis	199
9 Anhang	215
9.1 Freeness Scale Interconversion Tabelle	215
9.2 Einfluss variierender Aufschlussbedingungen auf die Eigenschaften von Alt- und Frischholzfäsern.....	216
9.3 Auswirkung unterschiedlicher Holzfeuchten auf die Qualität von Alt- und Frischholzfäsern zur MDF-Herstellung	221
9.4 Untersuchungen an Mitteldichten Laborfaserplatten aus Alt- und Frischholz ohne und mit einer Reinigung der Hackspäne	226
9.5 Mischung von Alt- und Frischholz zur Herstellung von Mitteldichten Faserplatten	230
9.6 Chemische Vorbehandlung von Alt- und Frischholzhackspänen für die MDF-Herstellung	232
9.7 Bindemittleinfluss auf die technologischen Eigenschaften von MDF aus Alt- und Frischholzfäsern.....	234

Abkürzungsverzeichnis

AAS	Atomabsorptionsspektrometrie
AbwAG	Abwasserabgabengesetz
AES	Atomemissionspektrometrie
AH	Altholz
AltholzV	Altholzverordnung
atro	absolut trocken
BDE	Bundesverband der deutschen Entsorgungswirtschaft
BImSchV	Bundesimmissionsschutzverordnung
°C	Grad Celsius
CTMP	chemo thermo mechanical pulp (engl.)
DIN	Deutsche Industrie-Norm(en)
DP	durchschnittlicher Polymerisationsgrad
EEG	Erneuerbare-Energien-Gesetz
EN	Euro-Norm(en)
EPF	European Panel Federation
FH	Frischholz
Gew.-%	Gewichts-Prozente
ICP	induktiv gekoppeltes Hochfrequenzplasma
IMS	Ionenmobilitätsspektrometrie
IR	Infrarot
ISO	International Organization for Standardization
MDF	medium density fibreboard (engl.) = Mitteldichte Faserplatte(n)
MF	Melamin-Formaldehyd
Mod.	Modell
MW	Maschenweite
n. n.	nicht nachweisbar
NAW	Normausschuss Wasserwesen
NE	nicht Eisen
NIR	Nah-Infrarot
NWG	Nachweisgrenze
OSB	Oriented Strand Board
PF	Phenol-Formaldehyd
PMDI-Harz	Polymere auf Basis von Diphenylmethandiisocyanat (PMDI-Klebstoffe)
PCP	Pentachlorphenol
q ₂	durchschnittliche Dickenquellung in Prozent nach 2 Stunden Lagerungsdauer unter Wasser
q ₂₄	durchschnittliche Dickenquellung in Prozent nach 24 Stunden Lagerungsdauer unter Wasser
REM	Röntgen-Elektronen-Mikroskop

RFA	Röntgen-Fluoreszenz-Analytikgerät
SCR	Selektives katalytisches Reduktionsverfahren
°SR	Schopper-Riegler
SNCR	Selektives nicht-katalytisches Reduktionsverfahren
Std. abw.	Standardabweichung
TASi	Technische Anleitung Siedlungsabfall
TMP	thermo mechanical pulp (engl.)
UF	Harnstoff-Formaldehyd
Vario. koef.	Variationskoeffizient
VHI	Verband der Deutschen Holzwerkstoffindustrie
VOC	Volatile Organic Compounds (engl.)
WKI	Wilhelm-Klauditz-Institut –Fraunhofer-Institut für Holzforschung in Braunschweig
WRV	Wasserrückhaltevermögen

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1: Perspektivische Entwicklung der Verwertungs- und Entsorgungsmengen für Altholz von 1998-2005 (aus SUNDERMANN 1999, S. 271, Abb.: 3)	10
Abbildung 2.2: Unsortiertes Altholz bei einem Entsorgungsbetrieb, bevor es aufbereitet wird	12
Abbildung 2.3: Übliche Sortierpraxis bei der Aufbereitung von Holzabfällen	19
Abbildung 4.1: Schematische Darstellung der Altholzaufbereitung	43
Abbildung 4.2: Schematische Darstellung einer möglichen Thermographieanlage zur Erkennung von Fremdkörpern in einem Stoffstrom	44
Abbildung 4.3: Photographische Darstellung von Altholzspänen mit Fremdstoffen (Metallschrauben, Kunststoffpartikel, kaschierte Spanplatte)	46
Abbildung 4.4: Thermographische Darstellung von Altholzspänen mit Fremdstoffen (Metallschrauben, Kunststoffpartikel, kaschierte Spanplatte)	46
Abbildung 4.5: Funktionsprinzip des Metallseparators Mod. MAG 4100 (S+S Metallsuchgeräte und Recyclingtechnik GmbH)	47
Abbildung 5.1 – 5.3: Bei den Altholzverwertern angeliefertes Altholz (Firmen A, B und C)	51
Abbildung 5.4: Druckverlauf von 16 mm dicken Laborfaserplatten, hergestellt mit einer Vier-Kolben-Heißpresse von Siempelkamp	53
Abbildung 5.5: Benetzungsarten von Flüssigkeiten auf Holzoberflächen	62
Abbildung 5.6: Prinzipieller Aufbau einer Fraktioniereinrichtung nach Bauer McNett	65
Abbildung 6.1: Summenhäufigkeitsverteilung der Altholzspäne	71
Abbildung 6.2: Typische Störstoffe einer Altholzcharge	73
Abbildung 6.3: Durchschnittlicher Formaldehydgehalt (mg/100g atro Platte) von Laborfaserplatten, deren Hackspäne ohne und mit einer Reinigung hergestellt wurden	80
Abbildung 6.4: Durchschnittlicher Formaldehydgehalt von Laborfaserplatten, deren Altholzhackspäne mit Frischholzhackspänen gemischt wurden	81
Abbildung 6.5: Angeliefertes Altholzmaterial	87
Abbildung 6.6: 40- bis 60-jähriges Kiefernfrischholz	87
Abbildung 6.7: Vergleich der Faserlängenverteilung von Faserstoffen, ermittelt nach dem Bauer McNett-Verfahren, die mit und ohne Wasserlagerung bei identischen Aufschlussparametern (3 min/150°C) hergestellt wurden ...	89
Abbildung 6.8: Vergleich der Faserlängenverteilung von Faserstoffen, ermittelt nach dem Bauer McNett-Verfahren, die mit unterschiedlichen Aufschlussparametern hergestellt wurden	90
Abbildung 6.9: Vergleich der Faserlängenverteilung bei der Trockensiebung von Faserstoffen aus Hackspänen, die mit und ohne eine Wasserlagerung bei 3 min/150°C hergestellt wurden (Ermittlung durch Trockensiebung)	93
Abbildung 6.10: Vergleich der Faserlängenverteilung bei der Trockensiebung von Faserstoff aus Hackspänen, die mit unterschiedlichen Aufschlussparametern hergestellt wurden (Ermittlung durch Trockensiebung)	94
Abbildung 6.11: Summenhäufigkeit von Kiefernaltholz- und Kiefernfrischholzfaserstoffen, die mit unterschiedlichen Aufschlussparametern hergestellt wurden. Vergleich von Trockensiebung und Nassverfahren (Bauer McNett)	95
Abbildung 6.12: Repräsentative, angefärbte Frischholzeinzelfasern (3 min/150°C)	97
Abbildung 6.13: Repräsentative, angefärbte Altholzeinzelfasern (3 min/150°C)	97

Abbildung 6.14: Messung der Faserlängenverteilung mit der Bildanalyse von Kiefernfrischholzfasern, die bei 3 Minuten Vordämpfung und 150°C Aufschlusstemperatur hergestellt wurden.....	99
Abbildung 6.15: Messung der Faserlängenverteilung mit der Bildanalyse von Kiefernaltholzfasern, die bei 3 Minuten Vordämpfung und 150°C Aufschlusstemperatur hergestellt wurden.....	99
Abbildung 6.16: Messung der Faserlängenverteilung mit der Bildanalyse von Kiefernfrischholzfasern, die bei 3 Minuten Vordämpfung und 180°C Aufschlusstemperatur hergestellt wurden.....	100
Abbildung 6.17: Messung der Faserlängenverteilung mit der Bildanalyse von Kiefernaltholzfasern, die bei 3 Minuten Vordämpfung und 180°C Aufschlusstemperatur hergestellt wurden.....	100
Abbildung 6.18: Makroskopische Aufnahme eines Nagelloches mit umliegender Eisenreaktion (Vergrößerung 2,5-fach, Auflicht)	106
Abbildung 6.19: Stauchung an einer Altholzoberfläche, verursacht durch ein Verpackungsstahlband (Vergrößerung 2,5-fach, Auflicht).....	106
Abbildung 6.20: Mit Fraßspuren durchzogener Altholzhackspan (Vergrößerung 2,5-fach, Auflicht).....	107
Abbildung 6.21: Makroskopische Aufnahme eines Spanendes mit umliegender Eisenreaktion und Pilzhypen (Vergrößerung 2,5-fach, Auflicht)	107
Abbildung 6.22: Kiefernfasernstoff, gewonnen bei 150°C mit einer Vordämpfzeit von 5 min; Aufnahme einer repräsentativen Probe (Vergrößerung 6,3-fach)	109
Abbildung 6.23: Kiefernfasernstoff, gewonnen bei 150°C mit einer Vordämpfzeit von 5 min; Aufnahme einer repräsentativen Probe (Vergrößerung 10-fach, Färbung: Jod-Jodkalium).....	109
Abbildung 6.24: Kiefernfasernstoff, gewonnen bei 180°C mit einer Vordämpfzeit von 5 min; Aufnahme einer repräsentativen Probe (Vergrößerung 6,3-fach)	110
Abbildung 6.25: Kiefernfasernstoff, gewonnen bei 180°C mit einer Vordämpfzeit von 5 min; Aufnahme einer repräsentativen Probe (Vergrößerung 10-fach, Färbung: Jod-Jodkalium).....	110
Abbildung 6.26: Altholzfaserstoff, gewonnen bei 150°C mit einer Vordämpfzeit von 5 min; Aufnahme einer repräsentativen Probe (Vergrößerung 6,3-fach)	110
Abbildung 6.27: Altholzfaserstoff, gewonnen bei 150°C mit einer Vordämpfzeit von 5 min; Aufnahme einer repräsentativen Probe (Vergrößerung 10-fach, Färbung: Jod-Jodkalium).....	110
Abbildung 6.28: Altholzfaserstoff, gewonnen bei 180°C mit einer Vordämpfzeit von 5 min; Aufnahme einer repräsentativen Probe (Vergrößerung 6,3-fach)	111
Abbildung 6.29: Altholzfaserstoff, gewonnen bei 180°C mit einer Vordämpfzeit von 5 min; Aufnahme einer repräsentativen Probe (Vergrößerung 10-fach, Färbung Jod-Jodkalium).....	111
Abbildung 6.30: Hyphe eines Bläuepilzes, der die verholzte Zellwand durchbohrt (Transpressorien) (Tangentialschnitt, Vergrößerung 40-fach, Durchlicht, Polfilter)	112
Abbildung 6.31: Anhäufungen von Bläuehyphen in den Tracheiden eines Hackspanes (Tangentialschnitt, Vergrößerung 40-fach, Durchlicht, Polfilter)	113
Abbildung 6.32: Durchdringen von Pilzhypen durch einen Tüpfel (Tangentialschnitt, Vergrößerung 100-fach mit Ölemulsion, Durchlicht, Färbung: Anilinblau und Safranin)	113

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1: Altholzkategorien nach der Verordnung für die Entsorgung von Altholz (nach HÜTTEL, 2003).....	5
Tabelle 2.2: Holzabfallsortimente, differenziert nach der Herkunft und Holzart (aus Kreislaufwirtschaft in der Praxis Nr. 9, S.7, Tab.:2-1, BDE, 2000)	6
Tabelle 2.3: Maximale Störstoffanteile als Qualitätsanforderung des Rohstoffmaterials (aus VHI: Allgemeine Qualitätsanforderungen an das Holz-Rohstoffmaterial für den stofflichen Einsatz in der Holzwerkstoffindustrie, 1998).....	8
Tabelle 2.4: Versuch einer Systematisierung der Begriffe „Rest-“ und „Altholz“ nach LAWS-Umwelttechnik Berlin (1996)	9
Tabelle 2.5: Erhebung des Altholzaufkommens in der Bundesrepublik Deutschland durch verschiedene Autoren (im Zeitraum von 1994 bis 1999) [Angaben in Mio. t/Jahr]	11
Tabelle 2.6: Vergleich der Grenzwerte für die stoffliche Verwertung von Gebrauchtholz in der Holzwerkstoffindustrie anhand verschiedener Grenzwertsysteme	20
Tabelle 5.1: Anlagenkonfiguration der einzelnen Altholzverwerter	50
Tabelle 5.2: Feuchten des entnommenen Probenmaterials	51
Tabelle 5.3: Pressbedingungen der Laborfaserplatten.....	54
Tabelle 5.4: Prüfplan zur Ermittlung der mechanisch-technologischen Eigenschaften mit Aufteilungsschema der hergestellten Laborfaserplatten	55
Tabelle 5.5: Eingesetzte Siebe, definiert nach int. Standard ISO 3310/1 – 1982, Nebenreihe R 40/3	65
Tabelle 6.1: Versuchsdurchführung der einzelnen Versuchsserien	70
Tabelle 6.2: Fraktioniertes Untersuchungsmaterial der Altholzverwerter [Angaben in %]	72
Tabelle 6.3: Störstoffe der einzelnen Altholzverwerter nach Störstoffgruppen der Fraktionen >1.25 bis 5.0 MW [Angaben in Gew.-%]	74
Tabelle 6.4: Chemische Holzschutzanalyse des entnommenen Altholzmaterials.....	76
Tabelle 6.5: Asche- und Sandgehalte von Altholzfraktionen der Altholzverwerter A bis D	77
Tabelle 6.6: Asche- und Sandgehalte von Altholzfaserplatten (Fa. A bis D) im Vergleich zu einer MDF-Frischholzfaserplatte (Ref. F)	78
Tabelle 6.7: Asche- und Sandgehalte von Altholzfaserplatten (Fa. C und D) mit Frischholzanteilen im Vergleich zu einer MDF-Frischholzfaserplatte (Ref. F)	79
Tabelle 6.8: Konzentrationen der Schwermetalle im Prozesswasser der Altholzhackspäne, die ohne und mit einer Hackspänevorbereitung zu MDF verarbeitet wurden.....	83
Tabelle 6.9: Aufschlussparameter des Kiefernaltholzes und der Referenzkiefer zur Charakterisierung der Fasern.....	88
Tabelle 6.10: Gegenüberstellung der Längen und Breiten bei unterschiedlichen Dämpfbedingungen von gewonnenen Fasern	96
Tabelle 6.11: Ermittelte Faserlängen, Defibrator-Werte und Bauer McNett-Fraktionierung von unterschiedlich aufgeschlossenem Faserstoff aus Alt- und Frischholz	103
Tabelle 6.12: Durchschnittliche pH-Werte, Pufferkapazitäten und WRV-Werte von unbeleimten Fasern aus Altholz, ohne und mit einer Hackspänerreinigung des Ausgangsmaterials	122

Tabelle 6.13: Durchschnittlicher pH-Wert, Pufferkapazität und das Wasserrückhaltevermögen von hergestellten, unbeleimten Laborfasern aus Altholz unter Zugabe von Frischholz	125
Tabelle 6.14: Durchschnittlich chemische Eigenschaften von Frisch- und Altholzfasern	127
Tabelle 6.15: Mittelwerte (Biege-E-Modul und Biegefestigkeiten n = 12; Rohdichte n = 10; Querzug- und Abhebefestigkeiten n = 20) von 16 mm dicken Labor-MDF, deren Fasern aus reinem Kiefernaltholz mit unterschiedlichen Aufschlussparametern hergestellt wurden (mit Pflugscharmischer trocken beleimt).....	133
Tabelle 6.16: Mittelwerte (Biege-E-Modul und Biegefestigkeiten n = 12; Rohdichte n = 10; Querzug- und Abhebefestigkeiten n = 20) von 16 mm dicken Labor-MDF, deren Fasern aus reinem Kiefernfrischholz mit unterschiedlichen Aufschlussparametern hergestellt wurden (mit Pflugscharmischer trocken beleimt).....	134
Tabelle 6.17: Durchschnittliche Ausgleichsfeuchten von UF-gebundenen MDF aus Kiefernalt- und Kiefernfrischholz in Abhängigkeit von den Aufschlussbedingungen	144
Tabelle 6.18: Durchschnittliche Ausgleichsfeuchten von UF-gebundenen MDF aus wassergelagertem Kiefernalt- und Kiefernfrischholz in Abhängigkeit von den Aufschlussbedingungen	145
Tabelle 6.19: Aufschlussparameter des Untersuchungsmaterials mit unterschiedlichen Holzfeuchten.....	150
Tabelle 6.20: Mittelwerte (Biege-E-Modul und Biegefestigkeiten n = 12; Rohdichte n = 10; Querzug- und Abhebefestigkeiten n = 20) von 16 mm dicken Labor-MDF, deren Fasern aus Altholzhackspänen mit unterschiedlichen Holzfeuchten hergestellt wurden (Blow-Line Beleimung)	152
Tabelle 6.21: Mittelwerte (Biege-E-Modul und Biegefestigkeiten n = 12; Rohdichte n = 10; Querzug- und Abhebefestigkeiten n = 20) von 16 mm dicken Labor-MDF, deren Fasern aus befeuchteten Altholzhackspänen mit einer 3-minütigen Vordämpfung hergestellt wurden (Bd)	156
Tabelle 6.22: Mittelwerte (Biege-E-Modul und Biegefestigkeiten n = 12; Rohdichte n = 10; Querzug- und Abhebefestigkeiten n = 20) von 16 mm dicken Labor-MDF, deren Fasern aus befeuchteten Altholzhackspänen mit einer 8-minütigen Vordämpfung hergestellt wurden (Bf)	157
Tabelle 6.23: Aufschlussparameter von Altholzhackspänen ohne eine vorherige Reinigung der Hackspäne.....	162
Tabelle 6.24: Aufschlussparameter von Altholzhackspänen mit einer vorherigen Reinigung der Hackspäne.....	162
Tabelle 6.25: Mittelwerte (Biege-E-Modul und Biegefestigkeiten n = 12; Rohdichte n = 10; Querzug- und Abhebefestigkeiten n = 20) der mechanisch-technologischen Eigenschaften von 16 mm Labor-MDF, die aus ungereinigten Altholzhackspänen hergestellt wurden (Blow-Line Beleimung)	165
Tabelle 6.26: Mittelwerte (Biege-E-Modul und Biegefestigkeiten n = 12; Rohdichte n = 10; Querzug- und Abhebefestigkeiten n = 20) der mechanisch-technologischen Eigenschaften von 16 mm Labor-MDF, die aus gereinigten Altholzhackspänen hergestellt wurden (Blow-Line Beleimung)	166
Tabelle 6.27: Mittelwerte (n = 20) der Dickenquellung nach 2 Std. und 24 Std. von 16 mm dicken Labor-MDF, die aus ungereinigten Altholzhackspänen hergestellt wurden	167

Tabelle 6.28: Mittelwerte (n = 20) der Dickenquellung nach 2 Std. und 24 Std. von 16 mm dicken Labor-MDF, die aus gereinigten Altholzhackspänen hergestellt wurden	167
Tabelle 6.29: Mittelwerte (n = 20) der Wasseraufnahme nach 2 Std. und 24 Std. von 16 mm dicken Labor-MDF, die aus ungereinigten Altholzhackspänen hergestellt wurden	169
Tabelle 6.30: Mittelwerte (n = 20) der Wasseraufnahme nach 2 Std. und 24 Std. von 16 mm dicken Labor-MDF, die aus gereinigten Altholzhackspänen hergestellt wurden	170
Tabelle 6.31: Benetzbarkeit von Prüfblättern, hergestellt aus Altholzfasern (Fa. A-D) und aus Frischholzfasern (Referenzmaterial) [Angaben in sek.].....	172
Tabelle 6.32: Holzfeuchte des Untersuchungsmaterials vor dem Aufschlussprozess in %	176
Tabelle 6.33: Mittelwerte (Biege-E-Modul und Biegefestigkeiten n = 12; Rohdichte n = 10; Querkzug- und Abhebefestigkeiten n = 20) von 16 mm dicken Labor-MDF, deren Fasern aus Altholzhackspänen unter Zugabe von Frischholzhackspäneanteilen hergestellt wurden (Blow-Line Beleimung)	177
Tabelle 6.34: Mittelwerte (Biege-E-Modul und Biegefestigkeiten n = 12; Rohdichte n = 10; Querkzug- und Abhebefestigkeiten n = 20) von 16 mm dicken Alt- und Frischholzfaserplatten, deren Fasern bei 3 min/180°C aus nicht chemisch und chemisch vorbehandelten Hackspänen hergestellt wurden	183
Tabelle 6.35: Durchschnittlicher Formaldehydgehalt von Alt- und Frischholzfaserplatten, deren Hackspäne chemisch und nicht chemisch vorbehandelt wurden	185
Tabelle 6.36: Herstellungsparameter von Alt- und Frischholzfaserplatten, die mit unterschiedlichen Bindemitteln hergestellt wurden	188
Tabelle 6.37: Technologische Eigenschaften von 16 mm dicken Alt- und Frischholzfaserplatten, die mit unterschiedlichen Bindemitteln ohne Hydrophobierungsmittel hergestellt wurden (Biege-E-Modul und Biegefestigkeiten n = 12; Rohdichte n = 10; Querkzug- und Abhebefestigkeiten n = 20)	190

Einleitung und Zielsetzung

1.1 Einführung in das Thema

Holzwerkstoffe aus Span- oder Fasermaterial werden in der Bau-, Möbel- und Einrichtungsbranche eingesetzt. Gerade im Möbelbereich unterliegen Inneneinrichtungen aus Holzwerkstoffen Farb- und Designtrends und durchlaufen somit einen immer kürzer werdenden Lebenszyklus. Dieser Verlauf spiegelt sich gegenwärtig auch in den Produktionsmengen wieder. Mit einer Produktionsmenge von etwa 9,3 Mio. m³ Spanplatten und 2,3 Mio. m³ MDF im Jahre 2000 war die Bundesrepublik Deutschland an der europäischen Holzwerkstoffproduktion beteiligt. In Europa nimmt Deutschland mit einem Anteil von 24,8% am gesamten europäischen MDF-Verbrauch eine Spitzenposition ein, gefolgt von Großbritannien (12,4%), Italien (9,9%) und Spanien mit 8,9% (ANONYMUS, 2001 a). Für eine zurzeit stark expandierende Holzwerkstoffindustrie ist eine Sicherstellung des Rohstoffbedarfes von größter Wichtigkeit. Sorge bereitet vor allem das von der europäischen Union verabschiedete *White Paper*, das die Absicht bekundet, bis in das Jahr 2010 den Anteil erneuerbarer Energie zu verdoppeln (ANONYMUS, 2001 b). Eine aktuelle EPF-Studie belegt, dass dadurch eine zusätzliche Nachfrage von 163 Mio. m³ Holz pro Jahr entstehen würde. Um dieser Entwicklung und den daraus resultierenden Folgen entgegenzuwirken, aber auch im Hinblick auf die am 01.03.2003 in Kraft getretene Altholzverordnung, die bereits die Deponierung von Altholz verbietet, wird die Nutzung alternativer Rohstoffquellen immer wichtiger.

Die Verordnung über die Entsorgung von Altholz (AltholzV) definiert Altholz als Industrierestholz und Gebrauchtholz. Industrierestholz fällt in den Betrieben der Holzbe- und -verarbeitung als Holzreste und in Betrieben der Holzwerkstoffindustrie als Holzwerkstoffreste an. Erzeugnisse, die aus Massivholz, Holzwerkstoffen oder aus Verbundstoffen mit einem überwiegenden Holzanteil bestehen, werden unter dem Begriff Gebrauchtholz zusammengefasst. Die gesetzliche Grundlage für die Entsorgung von Gebrauchtholz bildet einerseits die Technische Anleitung Siedlungsabfall (TASi), wonach ab 2005 keine Abfälle, die mehr als 5% organischen Kohlenstoff enthalten, einer Deponierung zugeführt werden dürfen und andererseits das Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz (KrW-/AbfG), welches der Verwendung von Abfällen einen Vorrang gegenüber der Beseitigung einräumt. Bezüglich der zukünftigen Entwicklung ist daher mit einer deutlichen Trendwende bei der bisherigen Entsorgungspraxis zu rechnen, wobei eine Prognose bezüglich der zum Einsatz kommenden Mengen an Recyclingholz für die stoffliche Verwertung zurzeit noch nicht gegeben werden kann.

Neben Altholz aus Gebäudeabbrüchen fällt dieses in großen Mengen u. a. bei Verpackungen und Transportmitteln sowie in Altmöbeln an (FISCHER, 1991; BOCKELMANN, MARUTZKY und STRECKER, 1993; BOEHME, 1993; DEPPE, 1994). Die Verwertung von Altholz wird sich aufgrund der Schadstoffgehalte der behandelten Hölzer aus Rückbau- und Sanierungsmaßnahmen vorwiegend auf die energetische Verwertung von Altholz konzentrieren (ca. 62%), während die stoffliche Verwertung den unbehandelten bzw. unbelasteten Altholzmengen vorbehalten bleiben dürfte (ca. 38%). Angaben hinsichtlich der anfallenden Mengen schwanken jedoch (EISELE, 1996; ROFFAEL und HÜSTER, 1996). Von Fachleuten wird das jährliche Altholzaufkommen in Deutschland auf ca. 7 bis 10 Mio. t geschätzt.

Unabhängig von den Handelswegen ist der Abnehmer für Restholz, Säge-Nebenprodukte und ähnliche naturnahe Holzabfälle die Span- und Faserplattenindustrie. Von ihnen wurde 2002 eine Menge von 8,3 Mio. m³ zur stofflichen Verwertung abgenommen. Der größte Anteil des Altholzaufkommens, welcher für die stoffliche Verwertung geeignet ist, wird zurzeit in der Spanplattenindustrie eingesetzt (MARUTZKY, 1995; MARUTZKY, 2003). Dabei werden während der Spanplattenproduktion ca. 20% bis 25% und mehr Recyclingspäne, gewonnen aus Altholz, dem Fertigungsprozess zugeführt. In der MDF-Industrie sieht dies hingegen momentan noch anders aus. Zum einen ist die Skepsis gegenüber den Störstoffen, die dem Altholz anhaften, recht groß und zum anderen bedarf es einer weiteren Aufbereitung des Altholzes für diese Plattenproduktion. Es lässt sich aber auch zum Teil dadurch erklären, dass die geeigneten Sortimente im anfallenden Altholz bisher weitgehend von der Spanplattenindustrie aufgenommen werden konnten. Der Druck des Gesetzgebers und der Öffentlichkeit, Stoffkreisläufe zu schließen, hat die relativ junge MDF-Industrie bisher kaum berührt.

In Ländern wie Italien, wo die Versorgung mit Frischholz häufig problematisch ist, wird schon seit Jahren MDF aus fast 100% Altholz hergestellt. Altholzsortimente sind in Italien in größeren Mengen vorhanden, benötigen aber für die Herstellung von MDF hochwertige Aufbereitungsanlagen zur Reinigung des Materials (PALADIN, 2002).

Bei einem technologischen Konzept für die Wiederverwendung von Altholz zur Herstellung von Mitteldichten Faserplatten könnte aus dem vorhandenen Altholzvolumen eine reine Altholzfaserverplatte hergestellt werden, ohne Engpässe in der Altholzversorgung befürchten zu müssen. Basierend auf einer Auswahl verschiedener Altholzsortimente wurden in der vorliegenden Arbeit Möglichkeiten zur Aufbereitung und Dekontamination von Altholz und holzhaltigen Reststoffen zur Herstellung von Mitteldichten Faserplatten (MDF) untersucht.

1.2 Zielsetzung

Durch ein entstehendes neues Zellstoffwerk in Deutschland und dem stark expandierenden Holzwerkstoffmarkt wird sich die Wettbewerbssituation bezüglich Schwach-, Durchforstungs- und Sägeresthölzern noch verstärken. Die Verknappung des Rohstoffes zwingt die Holzwerkstoffindustrie, sich nach neuen Rohstoffquellen und nach preisgünstigeren Altholzsortimenten umzusehen. Die Verwertung von Altholz, trotz seiner vielschichtigen Problematik, ist ein wichtiger Wirtschaftsfaktor geworden.

Bei der Gewinnung von Faserstoff aus Hackspänen beeinflussen eine Reihe von Faktoren nicht nur die strukturellen Eigenschaften des jeweils erzeugten Faserstoffs, sondern auch seine chemischen und physikalischen Eigenschaften. Zu den wichtigsten Einflussfaktoren gehören unter anderem:

- die Vorbehandlung der Hackspäne,
- die Dämpfbedingungen,
- die Zerfaserungsbedingungen
- sowie der Einsatz von Chemikalien.

Im Zuge der Herstellung erfährt das Holz durch das Pressen zu MDF weitere chemische und physikalische Veränderungen.

In dieser Arbeit soll untersucht werden, ob durch thermo-mechanische oder chemo-thermo-mechanische Aufschlüsse von verschiedenen Alt- und Abfallholzsortimenten ein hochwertiger Faserstoff für die Herstellung von MDF gewonnen werden kann. Das besondere Interesse gilt hierbei der Analyse der morphologischen und technologischen Eigenschaften des aus gereinigtem Altholz- und Frischholzmaterial hergestellten Faserstoffs. Mineralische, metallische oder sonstige unerwünschte Begleitstoffe wurden so weit wie möglich vor dem Zerfaserungsprozess durch geeignete Verfahren entfernt. Die Fasern sollen in Bezug auf ihre Zusammensetzung, ihre Qualität und den Anteil an Fremdstoffen analysiert und mit Frischfasern verglichen werden. Mit denen aus Alt- und Frischholz gewonnenen Fasern sollen MDF hergestellt werden. Zur Ermittlung optimaler Einsatzmengen sollen Alt- und Frischholzhackspäne gemischt und zu Platten verarbeitet werden. Dabei wurden Probleme berücksichtigt, die sich bei der technischen Herstellung des Faserstoffes aus den relativ trockenen Altholzhackschnitzeln ergeben.

Für die Untersuchungen wurden repräsentative Altholzsortimente der Kategorie AI und All ausgewählt. Durch die hier gewonnenen Erkenntnisse sollen Möglichkeiten und Wege aufgezeigt werden, wie die MDF-Industrie einen verstärkten Anteil an Alt- und Gebrauchtholz einsetzen kann.

1.3 Aufbau der Arbeit

Den ersten Teil der Arbeit bildet der Grundlagenteil. Hierin werden neben den gesetzlichen Rahmenbedingungen für die Altholzverwertung auch deren Verwertungswege (Abschnitt 2) aufgeführt. Darüber hinaus werden die Einflussfaktoren auf die Faserherstellung (Abschnitt 3) hinsichtlich ihrer biologischen, chemischen und mechanischen Eigenschaftsveränderung betrachtet.

Der zweite Teil der Arbeit gliedert sich in den Bereich Material und Methoden sowie den Untersuchungsteil mit der Ergebnisdarstellung, der sich in folgende Abschnitte aufteilt:

- Analyse des eingesetzten Altholzmaterials,
- Charakterisierung von gewonnenen Faserstoffen aus Alt- und Frischholz,
- Einfluss variierender Aufschlussbedingungen auf die Eigenschaften von Alt- und Frischholzfasern,
- Auswirkungen unterschiedlicher Holzfeuchten auf die Qualität von Alt- und Frischholzfasern zur MDF-Herstellung,
- Reinigung der Hackspäne vor dem Zerfaserungsprozess,
- Mischung von Alt- und Frischholz zur Herstellung von Mitteldichten Faserplatten,
- Einfluss verschiedener Parameter auf die Plattenqualität.

Aufgrund der Vielzahl von Einzeluntersuchungen bildet eine Diskussion den Abschluss eines jeden Abschnittes. Eine Zusammenfassung ist im Abschnitt 7 wiedergegeben.

Allgemeiner Teil

2 Altholz, Aufkommen und Einsatz

2.1 Abfalleigenschaften handelsüblicher Holzsortimente und deren gesetzliche Verwertungsregelung

Unter dem Begriff Holzabfall werden Abfälle verstanden, die in der Holzbe- und Holzverarbeitenden Industrie anfallen. Hierunter fallen auch Produkte, die bereits einer Nutzung unterworfen waren. Die Altholzverordnung beschreibt, wie Holzabfälle getrennt nach Sortimenten erfasst werden. Dabei werden die Holzabfallsortimente gemäß § 2 in die Altholzkategorien AI bis AIV und PCB-Altholz unterteilt (Tab. 2.1).

Tab. 2.1: Altholzkategorien nach der Verordnung für die Entsorgung von Altholz (nach HÜTTEL, 2003)

Altholzkategorien	
AI	Naturbelassenes oder lediglich mechanisch bearbeitetes Altholz, das bei seiner Verwendung nicht mehr als unerheblich mit holzfremden Stoffen verunreinigt wurde.
AII	Verleimtes, gestrichenes, beschichtetes, lackiertes oder anderweitig behandeltes Altholz ohne halogenorganische Verbindungen in der Beschichtung und ohne Holzschutzmittel.
AIII	Altholz mit halogenorganischen Verbindungen in der Beschichtung ohne Holzschutzmittel.
AIV	Mit Holzschutzmitteln behandeltes Altholz wie Bahnschwellen, Leitungsmasten, Hopfenstangen, Rebpfählen sowie sonstiges Altholz, das aufgrund seiner Schadstoffbelastung nicht den Altholzkategorien AI, AII oder AIII zugeordnet werden kann, ausgenommen PCB-Altholz.
PCB-Altholz	Altholz, das mit PCB im Sinne der PCB/PCT-Abfallverordnung belastet und nach deren Vorschriften zu entsorgen ist, insbesondere Dämm- und Schallschutzplatten, die mit Mitteln behandelt wurden, die polychlorierte Biphenyle enthalten.

Typische Holzabfallsortimente (Tab. 2.2) sind z.B. Holzabfälle aus der Holzbe- und -verarbeitung, Verpackungshölzer, Baustellenhölzer (Bauholz und Abbruchholz), Möbelhölzer, Holz aus Sperrmüll und Hölzer aus dem Außenbereich.

Tab. 2.2: Holzabfallsortimente, differenziert nach deren Herkunft und Holzart (aus Kreislaufwirtschaft in der Praxis Nr.9, S.7, Tab.: 2-1, BDE, 2000)

Holzabfallsortimente		
Holzabfälle aus der Holzbe- und -verarbeitung		Verschnitt, Abschnitte, Späne von naturbelassenem Vollholz Verschnitt, Abschnitte, Späne von Holzwerkstoffen und sonstigem behandeltem Holz (ohne schädliche Verunreinigungen)
Verpackungsholz		Paletten Transportkisten Obstkisten Kabeltrommeln
Baustellenhölzer	Bauholz Abbruchholz	Balken, Bretter und sonstiges Vollholz (naturbelassen) Holzwerkstoffe, Schalhälzer, behandeltes Vollholz Mischsortimente Hölzer aus dem Innenausbau Hölzer aus dem Außenausbau (Fenster, Türen) Konstruktionshälzer Mischsortimente
Möbelholz		Möbel, Küchen und sonstige Inneneinrichtungen aus weitgehend naturbelassenem Vollholz Möbel, Küchen, Holzwerkstoffe und sonstige Inneneinrichtungen mit Anteilen an holzfremden Stoffen
Holz aus Sperrmüll		
Hölzer aus dem Außenbereich		Bahnschwellen Leitungsmasten Hölzer aus dem Garten- und Landschaftsbau Hölzer aus der Landwirtschaft

Das Material kann einer stofflichen oder energetischen Verwertung zugeführt werden. Der Handlungsdruck in Bezug auf die Verwertung steigt jedoch noch erheblich an, da

- das Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz (KrW- / AbfG) die Abfallverwertung fordert,
- die am 01.03.2003 in Kraft getretene Altholzverordnung eine Deponierung von Altholz verbietet und
- zusätzlich durch verstärkte Getrennsammlung die Mengen ansteigen, vor allem im Baustellen- und Sperrmüllbereich.

Entscheidend neue Komponenten des bundesdeutschen Abfallrechts sind seit Inkrafttreten des Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetzes die Ressourcenschonung und die verstärkte Verlagerung der Verantwortung auf den/die Verursacher (Verursacherprinzip) und/oder Abfallbesitzer.

Es wird eine Rangfolge aufgestellt, wobei die

- **Abfallvermeidung** Vorrang vor der
- **Abfallverwertung** und diese wiederum Vorrang vor der
- **Abfallbeseitigung** hat.

Die Abfalleigenschaft besteht grundsätzlich bis die Grundpflichten nach §§5 bis 9 KrW- / AbfG erfüllt sind. Damit endet die Abfalleigenschaft erst, wenn eine Verwertung ordnungsgemäß und schadlos erfolgt ist, d.h. wenn die Vorschriften des KrW- / AbfG und anderer Rechtsvorschriften eingehalten werden. Im §4 KrW- / AbfG wird zwischen einer stofflichen und einer energetischen Verwertung unterschieden. Dabei sind beide Verfahren gleichrangig zu behandeln, wobei die umweltverträglichere Verwertung, die durch Verordnung festzulegen ist, den Vorrang hat. Nachdem die endgültige Fassung der Altholzverordnung der Bundesregierung den Bundesrat durchlaufen hat, können für eine stoffliche Verwertung uneingeschränkt die Klassen AI und AII verwendet werden. Die stoffliche Verwertung der Altholzkategorien AIII ist nur dann möglich, wenn durch entsprechende Aufbereitungsmaßnahmen Störstoffe entfernt werden können. Hierbei können die engen Grenzwerte für Blei und Chlor limitierend wirken (HÜTTEL, 2002). §8 der AltholzV fordert, dass Altholz, welches nicht stofflich verwendet wird, zum Zwecke der Beseitigung thermisch zu behandeln ist. Bei einer energetischen Verwertung endet die Abfalleigenschaft nicht mit der Herstellung eines Ersatzbrennstoffes, sondern umfasst auch dessen Einsatz. Die Abfalleigenschaft endet hingegen bei einer stofflichen Nutzung schon mit der Nutzung als Sekundärrohstoff.

Für die Herstellung von Span- und Faserplatten werden seit Anfang der 90er Jahre in zunehmendem Maß Gebrauchthölzer als Rohstoff eingesetzt. Ausgelöst wurde dies vornehmlich durch die Verpackungsverordnung von 1993, welche bei der Entsorgung von Holzpackmitteln eine stoffliche Nutzung forderte. Für viele Span- und Faserplattenhersteller ist, auch aus wettbewerbsbedingten Gesichtspunkten, das Recyclingholz heute zu einem unverzichtbaren Rohstoffsortiment geworden.

Wegen der steigenden Qualitätsanforderungen seit Mitte der 90er Jahre richtete sich das Augenmerk verstärkt auf die Belastung des Holzes mit schädlichen Verunreinigungen. Als Richtlinie hierzu wurde vom Verband der Deutschen Holzwerkstoffindustrie e.V. (VHI) in den Qualitätsanforderungen von Gebrauchtholz ein Störstoffanteil von 0,5% bis 2% je nach Holz-Rohstoffmaterial festgelegt (Tab. 2.3).

Nach der Altholzverordnung handelt es sich bei den Störstoffen um alle anorganischen oder organischen holzfremden Stoffe wie Bodenmaterial, Steine, Beton, Metallteile, Papier, Pappe, Textilien, Kunststoffe oder Folien die dem Altholz anhaften oder beigemischt sind bzw. die mit diesen verbunden sind. Grundsätzlich sind alle Nichtholzbestandteile (Störstoffe) als Verunreinigungen im Altholz anzusehen.

Tab. 2.3: Maximale Störstoffanteile als Qualitätsanforderung des Rohstoffmaterials (aus VHI: Allgemeine Qualitätsanforderungen an das Holz-Rohstoffmaterial für den stofflichen Einsatz in der Holzwerkstoffindustrie, 1998]

Qualitätsanforderungen für Holz-Rohstoff-Materialien	Rundholz; ungebrochenes bzw. stückiges Holz	Vorgebrochene Hölzer / Holzwerkstoffe	Hackschnitzel	Holzspäne
Störstoffanteile Max. Anteil an Störstoffen (Summe) in %	2	2	1	0,5
Max. Anteil an Störstoffen pro t in kg	20	20	10	5
Max. Anteil an Störstoffen pro 500 g Mischprobe in g	10	10	5	2,5

Neben der reinen Klassifizierung des Altholzes nach Schadklassen kommt daher der Analytik bei der Qualitätssicherung von Recyclingholz eine entscheidende Bedeutung zu (vergl. Abschnitt 2.4).

2.2 Altholzaufkommen in der Bundesrepublik Deutschland

Der Begriff Restholz, welcher bei Be- und Verarbeitungsprozessen nach EU-Definition als „Abfall“ anfällt und der Begriff Altholz werden unter dem Oberbegriff Industrierestholz zusammengefasst. Eine Trennung zwischen den Begriffen ist recht schwierig und wurde von der LAWS-Umwelttechnik, Berlin, in einem schematischen Überblick wiedergeben (Tab. 2.4). Durch diese Tabelle wird die gesamte Problematik, angefangen bei der Gruppierung der Sortimente bis hin zum mit Holzschutzmittel belastetem Holz, die sich in Verbindung mit Altholz ergibt, gut erkennbar.

Tab. 2.4: Versuch einer Systematisierung der Begriffe „Rest-“ und „Altholz“ nach LAWS-Umwelttechnik Berlin (1996)

Sortiment-gruppe	Altholz				Restholz	
	Bauschutt	Baustellenabfälle	Altmöbel	Verpackungen	Massivholzreste	Plattenwerkstoffe
Sortimente	Dachstuhl, Rohbau, Fassaden, Innenwände, Decken, Böden, Türzargen, Türen, Fenster, Treppen, Einbaumöbel	Verschalungshölzer, Gerüsthölzer, Transportverpackungen, Altholz aus Gebäudeinnenteilen: Decken, Böden, Türen; Türzargen, Einbaumöbel	Tische, Sitzmöbel, Schränke, Gestelle, Wohnwände, Schulmöbel, Büromöbel, Werkbänke, Holzwaren: Haushaltsgeräte, Werkzeuge, Spielwaren, Sportgeräte	Körbe, Paletten (Ein- und Mehrweg), Holzkisten, Gemüsekisten, Umverpackungen, Fässer, Kabeltrommeln, Transportkisten	Kappscheiben, Schwarten, Spreiße, Restrollen, Klipp- und Besäumreste, Anschäler	MDF, Tischlerplatten, Multiplex, Sperrholz, Spanplatten
Herkunft	Bauwesen, Abbruch von Wohn- und Fabrikgebäuden	Bauwesen, Neubau und Renovierungs-, Sanierungsmaßnahmen	alle Branchen, insbes. Dienstleistungsbereich und Möbelhandel	Alle Branchen, insbes. Handel-Nahrung und produzierendes Gewerbe	Holzbearbeitung, Holzverarbeitung	Holzbearbeitung, Holzverarbeitung
Beschaffenheit	volumenintensiv, großstückig: Kanthölzer, Rundhölzer, Balken, Sparren, Bretter	volumenintensiv, großflächig: Schaltafeln, Rundhölzer, Kanthölzer	volumenintensiv	volumenintensiv, teilweise verdichtet	kleinstückig, Späne, Stäube	kleinstückig, Späne, Stäube
Störstoffe	Holzschutzmittel, PVC, Beschichtungen, Verleimungen	Holzschutzmittel, PVC, Beschichtungen, Verleimungen	PVC, Beschichtungen, Verleimungen	Holzschutzmittel, Verleimungen		Beschichtungen, Verleimungen, Lackierungen
Anhaftungen	mineralische Verunreinigungen, Metallverbindungen (NE, FE) Kunststoffanhaftungen, Glas, Kittreste	mineralische Verunreinigungen, Metallverbindungen (NE, FE) Kunststoffanhaftungen, Glas, Kittreste	Metallverbindungen (NE, FE) Kunststoffanhaftungen, Glas, Kittreste, Textilien, Schaum- und Füllstoffe	Organische Anhaftungen, Metallverbindungen (NE, FE), Papier- und Pappeanhaftungen, Farb-beschriftungen, Styropor		

Der Holzverbrauch in der Bundesrepublik Deutschland, teilweise berechnet als Rohholzäquivalente, stieg von 1980 mit 65,8 Mio. m³ (r) auf 71,5 Mio. m³ (r) im Jahre 1989 und zeigte 1999 einen Gesamtverbrauch von 94,5 Mio. m³ (r). Er setzte sich 1980 aus dem Holzeinschlag, dem Altpapier als Recycleprodukt und der Einfuhr von Holz und Holzprodukten zusammen. Erst in den Jahren 1989/1990 wurde Altholz mit 0,1 Mio. m³ (r) in die Aufkommenseite der Gesamtverbrauchsbilanz mit eingerechnet.

Diese Menge stieg lt. OLLMANN (2000) 1999 auf 2,9 Mio. m³ (r). Diese Tendenz wird sich auch in Zukunft weiter fortsetzen und zeigt, welche große Bedeutung dem Altholz am Markt beigemessen wird. Die perspektivische Entwicklung des Altholzaufkommens wird in Abbildung 2.1 verdeutlicht.

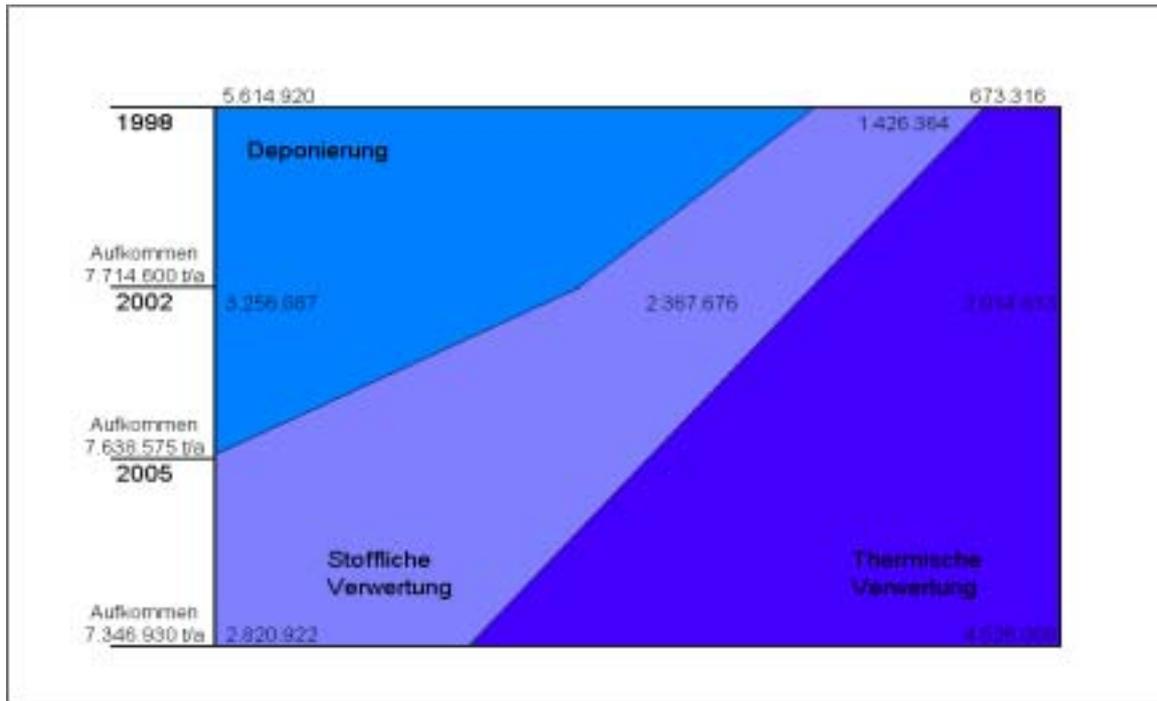


Abb. 2.1: Perspektivische Entwicklung der Verwertungs- und Entsorgungsmengen für Altholz von 1998-2005 (aus SUNDERMANN 1999, S. 271, Abb.: 3)

MARUTZKY (1996) bezeichnet einen Anfall von ca. 100 kg Altholz je Einwohner und Jahr als realistisch. Die konsequenterweise forcierte Verwertung von Altholz wird sich aufgrund der Schadstoffgehalte der behandelten Hölzer aus Rückbau- und Sanierungsmaßnahmen sowie aus Möbeln vorwiegend auf die energetische Verwertung von Altholz konzentrieren (ca. 62%), während die stoffliche Verwertung den unbehandelten bzw. unbelasteten Altholzmengen vorbehalten bleiben dürfte (ca. 38%). Von den im Jahr 2005 anfallenden ca. 7,3 Mio. t Altholz werden also voraussichtlich ca. 4,5 Mio. t energetisch verwertet, während für die stoffliche Verwertung im Rahmen einer konservativen Abschätzung im Höchstfall ca. 2,8 Mio. t verwendet werden (SUNDERMANN et al., 1999).

In der MDF Industrie lagen die Kapazitäten Ende 1999 europaweit bei 9,69 Millionen m³ und sollen Ende 2002 bis auf 12,67 Millionen m³ ansteigen – das entspricht einer Steigerung von 31%. Durch die stark expandierende Holzwerkstoffindustrie sind im Jahr 2001 mehr als eine Million Kubikmeter an neuen Kapazitäten und ca. 200.000 m³ durch Modifizierungen und Verbesserungen an bestehenden Anlagen europaweit dazugekommen. Allein in Deutschland beträgt die Produktion an Mitteldichten Faserplatten (MDF) pro Jahr annähernd 2,3 Millionen m³. Das entspricht einem Anteil von 27% an der europäischen Kapazität und wird in den nächsten zwei Jahren auf 30% ansteigen (ANONYMUS, 2001 c).

Bei der Betrachtung aller holzwirtschaftlichen Produktzweige ist mit dieser Kapazitätsausweitung eine Steigerung des Rohholzbedarfs verbunden. Von 1999 bis 2002 stieg dieser Bedarf von 34,6 Mio. m³ auf 42,5 Mio. m³ (+ 7,9 Mio. m³). Dabei entfällt auf die Holzwerkstoffindustrie ein Plus von 1,9 Mio. m³, auf die Sägeindustrie ein Plus von 4,5 Mio. m³ und auf die Zellstoff- und Papierindustrie ein Plus von 1,5 Mio. m³ (ANONYMUS d, 2001). Dazu kommt noch eine nicht zu unterschätzende Rohholzmenge für die energetische Verwertung, die z.Z. aber noch nicht zu beziffern ist.

Für derartige Kapazitäten bedarf es einer mengenmäßig und qualitativ ausreichenden Rohstoffbeschaffung. Eine Verwendung von Gebrauchtholz oder Einjahrespflanzen ist dabei unumgänglich. Durch gesetzliche Regelungen von Stoffkreisläufen entsteht hier mit Gebrauchtholz ein Rohstoffpotential, welches auch für die Herstellung von MDF genutzt werden könnte.

In Tabelle 2.5 werden die Erhebungen des Altholzaufkommens verschiedener Autoren gegenübergestellt. Die Abschätzungen ergaben eine Altholzmenge von ca. 7,5 – 8 Mio. t/a in der Bundesrepublik.

Tab. 2.5: Erhebung des Altholzaufkommens in der Bundesrepublik Deutschland durch verschiedene Autoren (im Zeitraum von 1994 bis 1999) [Angaben in Mio. t/Jahr]

Deutschland	n. Seeger 1994	Umweltzentrum Dortmund. 1994	n. Marutzky 1997	n. Sundermann 1999	n. Herbell et. al., k.A.
Holzbe- und -verarbeitung	0,45 * ³	-	0,3	-	-
Verpackungsholz	0,9	0,8 - 1,6	1,0	1,19	0,8 - 1,6
Baustellenhölzer	0,9	2,4 - 5,92 * ²	3,2	4,95 * ²	1,7 - 5,9 * ²
Möbelholz	1,5	0,8 - 3,92 *	2,8	1,56 *	0,8 - 3,9 *
Hölzer aus dem Außenbereich	4,1 * ²	-	0,7	-	-

* Möbel u. sonstiges Holz

*² hier Bau-u. Abbruchholz

*³ hier naturbelassenes Holz aus Baumschnitt usw.

2.3 Möglichkeiten zur Verwertung von Altholz

Holzprodukte werden nach Gebrauch zu Altholz, das als Wirtschaftsgut anzusehen ist. Aufgrund seiner Struktur und in Abhängigkeit von seinem Verunreinigungsgrad ist es mehr oder weniger geeignet, aufgearbeitet zu werden, um es einer weiteren Verwendung zuzuführen (Abb. 2.2). Der Anfall an zu verwertenden Althölzern wird sich voraussichtlich als Folge der vom Gesetzgeber erlassenen Verordnungen weiter erhöhen (DEPPE und ERNST, 2000; MARUTZKY, 2000).



Abb. 2.2: Unsortiertes Altholz bei einem Entsorgungsbetrieb, bevor es aufbereitet wird

Die Ressourcenverknappung und die Verringerung der konventionellen Entsorgungskapazitäten macht es dringend erforderlich, nach weiteren Möglichkeiten für die Lösung des Altholzproblems zu suchen. Dabei enthält das Altholz oft nutzbare Rohstoffe in guter Qualität, die im Stoffkreislauf verwendet werden könnten, wenn sie entsprechend aufgearbeitet würden (MARUTZKY et al., 1993).

Altholz und Altholzmöbel können folgender Weiter- bzw. Wiederverwertung zugeführt werden:

- Zweitnutzung,
- keine Nutzung,
- energetische Verwertung,
- stoffliche Verwertung.

2.3.1 Zweitnutzung von Altholz

Eine Zweitnutzung von Möbeln oder Altholz scheint nur dann sinnvoll zu sein, wenn es sich um gestalterisch wertvolle oder antiquarische Möbel oder Bauteile, z.B. Holzbalken aus historischen Fachwerkgebäuden, handelt, die im guten Zustand mit voller Funktionstüchtigkeit sind oder evtl. durch kleine Reparaturen mit geringem Aufwand weiter nutzbar sind. Die Erfassung, Aufarbeitung bzw. Reparatur und Vermarktung von Altmöbeln könnten Recyclinghöfe oder ähnliche Einrichtungen übernehmen. Dies wird jedoch nur verschwindend gering umgesetzt (ENGELMANN, 1993). Funktionstüchtige und wertvolle Möbelstücke werden meist aus Tradition oder ihrer Schönheit und ihres Wertes wegen von Generation zu Generation vererbt.

2.3.2 Deponierung von Altholz

Die Deponierung von Holz und Holzwerkstoffen stellte noch Anfang der 90er Jahre die am häufigsten verbreitete Praxis dar, ist aber für Altholz eine wenig sinnvolle Lösung. Die Ablagerung von Altholz blockiert große Volumina der Deponie und nutzt den stofflichen oder energetischen Wert von Altholz in keiner Weise (MARUTZKY und STRECKER, 1994). Bei der Entsorgung auf einer Deponie besteht die Gefahr, dass aus Althölzern ausgewaschene oder andersartig freigesetzte Holzschutzmittelbestandteile in unkontrollierter Form Luft, Boden und Grundwasser belasten. Die TA Siedlungsabfall untersagt daher ab dem Jahre 2005 zu Recht die Entsorgung von organischen Altstoffen durch Deponierung.

2.3.3 Exporte von Altholz

Wenn von einer Verwertung von Altholz gesprochen wird, dann zählen nicht unbedingt Exporte dazu. Sie sollen aber in diesem Zusammenhang mit angesprochen werden, da auch sie eine spezielle Art der Verwertung darstellen. PRECHEL (1999) spricht von Exportmengen in Höhe von 2 Mio. t Altholz/a, die von Deutschland nach Italien befördert werden. Die Altholzsortimente, die nach Italien zur Verwertung gehen, sind vielfach in Deutschland nicht verwertbar, da dort höhere Schadstoffmengen toleriert werden als in Deutschland (FORTER, 2001). Hinzu kommen noch weitere 800.000 t Altholz, die in den skandinavischen Raum für die thermische Verwertung exportiert werden und für die stoffliche Verwertung wegen ihres Schadstoffgehaltes nicht in Frage

kommen. Dieser „Altholz-Tourismus“ deutet vor allem darauf hin, dass die Ursachen der hohen Exporte auch am Fehlen inländischer Verwertungsmöglichkeiten liegen. Hier ist die heimische Industrie aufgerufen, dieses Potential intensiver zu nutzen.

2.3.4 Energetische Verwertung von Altholz

Von den in Deutschland anfallenden Altholzmengen werden ca. 30% der energetischen Verwertung zugeführt (MARUTZKY und STRECKER, 1998). Zum einen kann damit eine wesentliche Verminderung des Abfallvolumens erreicht werden und zum anderen stellt Holz aufgrund seines hohen Heizwertes eine Alternative für fossile Energieträger dar. Dies wird beim Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG), welches 2000 von der Bundesregierung erlassen wurde, sehr deutlich (MARUTZKY und SEEGER, 1999). Ziel dieses Gesetzes ist die Förderung des Ausbaus der erneuerbaren Energien zur Stromerzeugung als zentrales Element für den Klima- und Umweltschutz. Der Heizwert von trockenem Holz liegt bei ca. 18 MJ/kg, was etwa dem von Braunkohlebriketts entspricht. Eine Tonne Heizöl kann durch ca. 2.400 kg Holz ersetzt werden (SALINGER, 1989). Bei der Verbrennung von Holz wird CO₂ freigesetzt und in den natürlichen Kreislauf zurückgeführt, welches bei dessen Wachstum durch die Photosynthese gebunden wurde.

Eine negative Begleiterscheinung ist jedoch, dass Altholz einen höheren Stickstoffgehalt besitzen kann als Öl, der zur verstärkten Bildung von NO_x führt. Holzwerkstoffe, die stickstoffhaltige Bindemittel enthalten, erreichen bei der Verbrennung sogar 2 bis 4-mal höhere NO_x-Emissionswerte im Vergleich zur Verbrennung von Gas. Die NO_x-Menge kann durch primäre Maßnahmen wie Temperaturabsenkung und Rauchgaszirkulation verringert werden. Sofern der Einsatz von Primärmaßnahmen nicht möglich oder die erreichbare NO_x-Minderung nicht ausreichend ist, kommen als Sekundärmaßnahmen das selektive nicht-katalytische sowie das selektive katalytische Reduktionsverfahren (SNCR oder SCR-Technik) zum Einsatz (NUSSBAUMER, 1997). Während des Verbrennungsprozesses entweicht Asche als feinkörniger Staubanteil ins Rauchgas. Eine Reinigung ist durch aufwendige Filtersysteme möglich, wobei allerdings damit ein neues Entsorgungsproblem auftritt. Die Verbrennungsrückstände werden nach wie vor auf geeigneten Deponien abgelagert, da sie meist mit toxischen Substanzen belastet sind. Daher können nur wenige Aschen als Düngemittel eingesetzt werden (SALINGER, 1989).

Derzeit werden alle nach EEG gebauten Feuerungsanlagen für die energetische Verwertung von belasteten Althölzern nach der 17. BImSchV genehmigt.

In Zementwerken hingegen könnten die organischen Verunreinigungen im Altholz bei Temperaturen von bis zu 2000°C vollständig abgebrannt werden, während anorganische Begleitstoffe mit niedrigen Siedepunkten in den Zementklinker eingebunden werden (RUTSCHMANN, 1991). Durchgesetzt hat sich dieses Verfahren jedoch nicht und wird aufgrund der technischen und rechtlichen Entwicklungen nicht mehr angewandt.

Im Rahmen eines ökologischen Vergleichs wurden von SPECKELS (2001) mit der Methode der Ökobilanzierung die gängigen Verwertungs- bzw. Entsorgungsprozesse für Altholz verglichen. Unter Einbeziehung verschiedener Wirkungskategorien favorisierte der Autor die energetische Verwertung des Altholzes. Demgegenüber stehen auch wirtschaftliche Überlegungen, die Altholz für die stoffliche Nutzung als weitere Rohstoffquelle ansehen.

2.3.5 Stoffliche Verwertung von Altholz

Durch eine Kombination von optischen, magnetischen und mechanischen Separierverfahren wird inzwischen aus bestimmten Altholzsortimenten ein Recyclingholz von hoher Güte gewonnen. Der stofflichen Verwertung wird bis 2005 ein Anteil von knapp 40% vorausgesagt (MANTAU, 1999). Damit würde sich die stoffliche Verwertung von Altholz in den kommenden Jahren verdoppeln und somit Konkurrenzdruck auf Industrierestholz-Sortimente ausüben.

Die stoffliche Verwertung von Holzresten aus der Möbelindustrie bereitet, hervorgerufen durch unerwünschte Begleitstoffe, wie Beschichtungen, Scharniere und andere Störstoffe, oftmals Schwierigkeiten. Altmöbel sind meist lackiert, beschichtet oder furniert und ergeben bei der Zerspannung nur Späne minderer Qualität (kompakte Form, hoher Staubanteil). Damit lassen sich Holzwerkstoffe in Möbeln nur in begrenztem Umfang durch die Span- und Faserplattenindustrie verwerten (MARUTZKY, 1993).

Die mechanische Aufbereitung von Produktionsresten und des Ausschusses in Spanplattenwerken beträgt bei Normalbetrieb nicht mehr als 10% der Produktion. In der Spanplattenindustrie wird dieses Material dem Fertigungsprozess wieder zugeführt und vornehmlich in der Mittelschicht der Spanplatte eingesetzt oder energetisch genutzt.

Eine Alternative zur klassischen Verwertung von Altholzspanplatten zeigen Untersuchungen, bei denen brandgeschützte B1-Spanplatten aus dem Innenraumbereich für die Kompostierung verwendet wurden (SPRINGER, 1999).

Wichtig für eine gute stoffliche Verwertung ist ein verbessertes Aufbereitungsrastrer und eindeutige Qualitätskriterien. Voraussetzung für die Festlegung derartiger Kriterien ist dabei eine Betrachtung der Eigenschaften von Altholz und der erforderlichen Qualitäten von Recyclingholz.

2.3.6 Aufbereitung von Altholz durch Aufschlussverfahren

Erzeugnisse aus Holzwerkstoffen, wie Möbel und Paneele, enthalten in der Regel Spanplatten und MDF als tragenden Kern. Für Beschichtungen und Kantenmaterialien werden Kunststoffe verwendet, während Metalle überwiegend für Griffe und Verbindungselemente eingesetzt werden.

Durch die Neuentwicklung und Weiterentwicklung von Werkstoffen mit der zunehmenden Industrialisierung der Möbelindustrie in den vergangenen vierzig Jahren, tritt eine zusätzliche Vielfalt eingesetzter Materialien auf. Neue Holzwerkstoffe, wie MDF und OSB (Oriented Strand Board), wurden entwickelt. Strangpressplatten wurden teilweise durch Flachpressplatten verdrängt, dekorative Folien und Lamine verdrängten Furniere. Das Trennen dieser Materialien in die Ausgangsmaterialien ist aufgrund der Vielzahl der verarbeiteten Materialien und deren Zusammensetzung jedoch schwierig.

Eine stoffliche Verwertung von Holzspanplatten wurde schon 1963 vom schwedischen Erfinder Sandberg vorgeschlagen (SANDBERG, 1965; FRIEDRICH und NAKE, 1990). Bei diesem Verfahren wurde die Holz-Leim-Bindung durch Hydrolyse des Leimes in wasserdampfgesättigter Atmosphäre aufgebrochen. Schon vor der Erfindung von Sandberg war bekannt, dass Spanplatten, die mit Harnstoffharzen verleimt waren, eine geringe Hydrolysebeständigkeit haben (KLAUDITZ, 1955) und diese daher durch Kochen wieder in Späne zerlegt werden konnten.

SCHLIPPHAK (1965) konnte durch Untersuchungen belegen, dass das Spanmaterial aufgrund der hohen Temperaturen beim Aufschlussprozess nur in einer Größenordnung von bis zu 30% der Gesamtspanmenge wieder beigegeben werden konnte, ohne dass die technischen Eigenschaften der daraus später hergestellten Platten beeinträchtigt werden. Er führte die Braunfärbung der Späne auf ihre thermische Schädigung während des Aufschlussprozesses zurück. Das unvollständig aufgeschlossene Material musste nach der thermischen Behandlung eine Nachzerkleinerung durchlaufen.

In späteren Jahren wurde die Dampfbehandlung als Methode für das Recycling von Altspanplatten von der Fa. Pfeleiderer (Holzwerkstoffproduzent) und dem Wilhelm-Klauditz-Institut wieder aufgegriffen. Aufbauend auf das Sandberg-Verfahren wurde durch das Pfeleiderer-Verfahren die angewendete Technik verfeinert. Bei dem bei der Firma Pfeleiderer entwickelte Verfahren zum Recycling von Holzwerkstoffen wird die Verweildauer des Aufschlussgutes auf 2 min gesenkt und die Temperatur auf 180°C gesteigert (KIRCHNER, 2002). Die Fa. Pfeleiderer macht sich bei ihrem Prozess einen wesentlich höheren Dampfdruck zu Nutze, um so das Spangefüge aufzubrechen. Der später für die Herstellung der neuen Platten verwendete Leim wird in seinem Molverhältnisse von Formaldehyd zu Harnstoff (F:U) den recycelten Spänen derart angepasst, dass der den Spänen anhaftende Restharnstoff durch eine höher dosierte Formaldehydmenge genutzt werden kann. Im Gegensatz zum WKI-Verfahren wird hier grundsätzlich ohne Imprägnierlösung gearbeitet.

Am WKI wurde ein Verfahren zum Recycling von Spanplatten aus Altmöbeln entwickelt, das die stoffliche Verwertung dieser Holzwerkstoffe grundsätzlich ermöglicht (MICHANICKL und BOEHME, 1996). Zuerst werden die Altmöbel oder Produktionsrückstände zerkleinert. Danach werden sie bei Unterdruck wahlweise mit einer Imprägnierlösung versetzt, um so das Holzgefüge zum Aufquellen zu bringen. Anschließend wird mit Wasserdampf das Material erwärmt, damit die Leimbindungen hydrolytisch zerstört werden können. Die zurückgewonnenen Holzspäne werden als Rohmaterial für neue Spanplatten eingesetzt. Das Verfahren ist patentrechtlich geschützt.

Ein weiteres Verfahren zur Herstellung von Holzspan- und Faserplatten unter Verwendung von Altplatten wurde von ROFFAEL (1994) an der Universität Göttingen entwickelt und patentiert. Die Holzspanplatten werden in Späne zerlegt und anschließend mit einem Bindemittel behandelt, das gegenüber dem Formaldehyd reaktiv ist (ROFFAEL, 1997). Hierdurch können recycelte Späne aus alten Spanplatten dem frischen Spangut beigemischt werden. Der Vorteil dieses Verfahrens liegt darin, dass die Späne aus Altspanplatten nicht getrocknet werden müssen. Dies führt zu einer positiveren Energiebilanz bei der Trocknung.

Das sogenannte „Reholz-Verfahren“ ist ein Trockenverfahren zum Recyceln von Holzwerkstoffen, welches von MÖLLER und HERRLICH (1994) entwickelt wurde. Hierbei wurden mittels einer Stanze oder rotierenden Walzen die alten Platten durch einen Schneid-Brech-Vorgang in bis zu 8 mm dicke Streifen zerlegt, die schon während des Abtrennens in kleine Stücke zerfallen oder zu spanförmigen Elementen nachzerkleinert werden. Die Streifen werden anschließend ohne Trocknung mit Phenol-Formaldehydharzen verleimt und heiß verpresst.

Es wurden dabei ausschließlich Platten aus 100% Recyclingmaterial hergestellt, wobei der Bindemitteltyp der alten Holzwerkstoffe keine Rolle spielt. Da dieses jedoch Platten sind, in denen Leime mit hohem Formaldehydanteil verwendet wurden, wird eine 35%ige Harnstofflösung als Formaldehydfänger eingesetzt. Die Platten fanden im Verpackungs- und Verschalungsbereich, in Fertighausteilen und in Designermöbeln ihren Einsatz.

2.4 Schadstoff-Schnellerkennungsmöglichkeiten beim Sortieren von behandeltem Holz

Die Entsorgung von Altholz wird – sofern es nicht mit anderen Abfällen einer thermischen Verwertung zugeführt werden kann, nach der AltholzV, welche eine Sortierung und eine Getrennhaltungspflicht der Kategorien AI bis AIV, mindestens aber der Kategorie AIV vorschreibt – über Aufbereitungsbetriebe fraktioniert (Abb.2.3). Sie stellen die üblichen Verwertungswege dar.

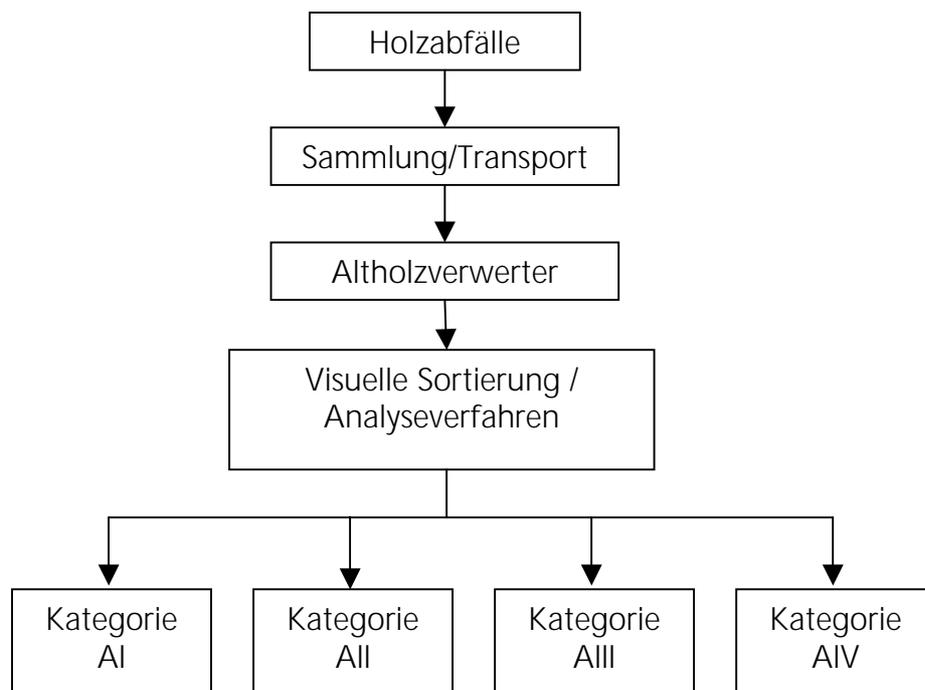


Abb. 2.3: Übliche Sortierpraxis bei der Aufbereitung von Holzabfällen

Stichprobenuntersuchungen der Praxis zeigen jedoch, dass holzschutzbehandeltes Material trotz Sortierung immer wieder mit unbehandeltem Material vermischt wird. PCP-Altholz ist stets zu separieren und einer Beseitigung zuzuführen. Daher wurden die vorgeschriebenen Grenzwerte für Holzschutzmittel im Altholz in den letzten Jahren kontinuierlich nach unten korrigiert, um unbelastete Sortimente für die stoffliche Verwertung eindeutig abzugrenzen (MARUTZKY, 2000).

Verschiedene Grenzwertssysteme, die sich zum Teil deutlich voneinander unterscheiden, sind in Tabelle 2.6 gegenübergestellt. Alle aufgeführten Grenzwerte beziehen sich auf die stoffliche Verwertung von Altholz in der Holzwerkstoffindustrie. Als Grundlage diente der Entwurf der Altholzverordnung in der Fassung vom 15.08.2002, das Gütezeichen RAL-GZ 428 für Recyclingprodukte aus Gebrauchtholz von 1997 sowie die Industrienorm der European Panel Federation (EPF) aus dem Jahr 2000.

Tab. 2.6: Vergleich der Grenzwerte für die stoffliche Verwertung von Gebrauchtholz in der Holzwerkstoffindustrie anhand verschiedener Grenzwertsysteme

Element/Verbindung	AltholzV [mg/kg Trocken- masse]	RAL-GZ 428 [mg/kg Trocken- masse]	EPF Norm [mg/kg Trocken- masse]
Arsen (As)	2	2	25
Kupfer (Cu)	20	20	40
Quecksilber (Hg)	0,4	0,4	25
Blei (Pb)	30	30	90
Cadmium (Cd)	2	-	50
Chrom (Cr)	30	30	25
Chlor (Cl)	600	600	1000
Fluor (F)	100	-	-
Pentachlorphenol (PCP)	3	5	5
Polychlorierte Biphenyle (PCB)	5 ¹⁾	-	-
Teeröle	-	0,5	-

1) Gem. Anhang II zu § 3 Abs. 1 AltholzV

Grundlagen hierfür wurden am Wilhelm-Klauditz-Institut durch STRECKER und MARUTZKY (1993) und später durch BOCKELMANN (1996) durch umfangreiche Altholzanalysen erarbeitet.

Eine Qualitätssicherung hinsichtlich der Schadstoffgrenzwerte für eine Altholzverwertung stützt sich derzeit im Wesentlichen auf die Laboranalytik. Sehr genaue Analyseergebnisse liefern derzeit der Gaschromatograph (GC) und das Massenspektrometer (MS). Die meisten Elemente und Verbindungen lassen sich auch bei niedrigen Konzentrationen erfassen. Demgegenüber stehen jedoch eine zeitintensive Probenentnahme und –vorbereitung sowie eine oftmals kostenintensive Ausstattung. Für den Einsatz auf dem Altholzplatz als Analysegeräte für die schnelle Erfassung von Holzschutzmitteln sind GC/MS weniger geeignet. Unsicherheiten der Schadstoffanalytik sind – mit Ausnahme des PCP – vor allem auf Fragen der repräsentativen Probenentnahme und der Materialhomogenität zurückzuführen (MARUTZKY, 2000).

Dies war Anlass, praxisgerechte Geräte als „online“ Analyseverfahren zur „Schnellerkennung“ von Holzschutzmitteln im Altholz zu entwickeln (MEIER, 1994; VOSS und WILLEITNER, 1994; HORN und MARUTZKY, 1994; HOFF, 1994; BOCKELMANN, 1996; FINK, 1996; PEYLO, 1998). Im Vordergrund standen dabei eine kurze Probenaufbereitung und Analysezeit. Im Folgenden werden die relevanten Analyseverfahren kurz beschrieben.

Die NIR-Spektroskopie beruht darauf, dass durch eine Lichtquelle Molekülschwingungen angeregt werden, die Wellenlängen im Übergangsbereich vom sichtbaren in den IR-Bereich emittieren. Die von den Holzproben reflektierten Wellenlängen werden spektral zerlegt und ihre Intensität im Spektrometer gemessen. Die erhaltenen IR-Spektren ermöglichen Rückschlüsse auf die Struktur und Zusammensetzung der Probe. Es bedarf aber einer Interpretation mit Hilfe von Vergleichsmustern. An homogenem Probenmaterial sind Holzschutzmittel genau nachweisbar. Neben Schwermetallen und einigen organischen Wirkstoffen kann zusätzlich die Holzartenerkennung aufgrund chemischer Unterschiede bzw. spezieller Holzbegleitstoffe vorgenommen werden (TSUCHIKAWA et al., 1992; MEIER, 1994; BRUNNER et al., 1996; NAULT und MANVILLE; 1997). Mit dieser Methode sind auch submikroskopische Veränderungen der Zellwand erkennbar. Bei nicht standardisierten Messungen, z.B. bei Holzfeuchteunterschieden, kann es zu Fehlmessungen kommen, da die Farbgebung des feuchten Holzes intensiver erscheint. Somit kann diese als imprägnierte Probe klassifiziert werden (FAIX und MOLTRAN, 1996). Hier liegt die Schwäche der Methode, wodurch sie für die Analyse von Altholzproben nicht eingesetzt werden kann.

Sowohl für die anorganischen Schadstoffe (Röntgen-Fluoreszenz-Analytik, Laser-Plasma-Spektrometrie) als auch für Pentachlorphenol (Ionenmobilitätsspektrometrie) stehen gegenwärtig leistungsfähige Methoden zur Verfügung. Im Folgenden sollen einige Analysegeräte beschrieben und beurteilt werden, ob sie in der Lage sind, Holzkontaminationen, zum Beispiel aus Holzschutzmitteln, zuverlässig zu detektieren.

Bei den energie dispersiven Röntgen-Fluoreszenz-Analytikgeräten (RFA) wird zum quantitativen Elementnachweis im Ordnungszahlbereich zwischen $Z=11$ (Natrium) und $Z=92$ (Uran) eingesetzt. Durch die Röntgenstrahlung werden die von der Holzprobe absorbierten Elektronen auf ein höheres Energieniveau gehoben. Unter Energieabgabe in Form von Photonenemission fallen die Elektronen wieder in den Grundzustand zurück. Die verschiedenen Elemente weisen charakteristische Energieniveaus auf, die spektroskopisch ausgewertet werden. Mit dieser Methode können anorganische Kontaminationen (z.B. durch Schwermetalle) und Chlor im Gebrauchtholz in kurzer Zeit bestimmt werden. Neben qualitativen Messungen sind auch quantitative Bestimmungen möglich (HOMAN und MILITZ, 1994; VOGT et al., 2003). Durch längere Messzeiten (10 bis 15 min.) können Bestimmungsgrenzen erreicht werden, die unterhalb der derzeit diskutierten Grenzwerte liegen (VOGT und KEHRBUSCH, 2000). Die Röntgenfluoreszenz hat sich neben der Qualitätskontrolle von frisch imprägnierter Ware in den USA als auch als Analysemethode für Altholz in Zementwerken erfolgreich bewährt (VOGT, 2000).

Mit der Laser-Plasma-Spektrometrie liegt ein schnelles Analyseverfahren vor, welches mit Hilfe eines fokussierten Laserstrahls kleinste Materialmengen an der Holzoberfläche in ein Plasma überführt (Flächendurchmesser ca. 300 µm), das Energie in Form von Licht emittiert. Anhand dieser emittierten, für bestimmte Stoffe charakteristischen Linienstrahlung, ist eine Spektralanalyse der im Plasma enthaltenen freien Atome und Ionen möglich. Hierbei werden innerhalb weniger Sekunden Elemente wie Arsen, Kupfer, Chrom und Quecksilber erfasst, die Rückschlüsse auf anorganische Holzschutzmittel erlauben.

Bei der Ionenmobilitätsspektrometrie (IMS) handelt es sich um eine Gasanalysemethode, welche darauf beruht, dass Ionen, die bei Atmosphärendruck in einem Gas erzeugt werden, in einem elektrischen Feld gegen einen Strom dieses Gases wandern. Die nachzuweisenden Gaskomponenten gelangen durch ein Einlasssystem in den Reaktionsraum, wo sie ionisiert werden und gelangen anschließend in den Driftraum. Die mit unterschiedlicher Masse und/oder Struktur ausgestatteten Ionen werden am anliegenden elektrischen Feld entlang des Driftraumes geführt und treffen nach verschiedenen Zeiten auf eine Faradayplatte eines Detektors. Ein aufgezeichnetes Ionenmobilitätsspektrum enthält Signale mit unterschiedlichen Driftzeiten und Intensitäten (SCHUMANN, 2000). Bei einer Analysenzeit von ungefähr 10 Minuten können Pentachlorphenolgehalte von 2 bis 5 mg/kg Holz sicher detektiert werden.

Eine Analyse der Altholzproben kann mit allen beschriebenen Geräten nach vergleichsweise einfacher Probenvorbereitung erfolgen, wobei aber einzelne Analysemethoden nicht die gesamte Bandbreite der üblicherweise eingesetzten Holzschutzmittel abdecken können. Um eine hohe Nachweissicherheit zu erreichen, sollte z.B. die Ionenmobilitätsspektrometrie mit dem Röntgen-Fluoreszenz-Analytikgerät kombiniert werden, wobei aber Fluor nicht mit analysiert werden kann. Auch bei einer Kombination der Ionenmobilitätsspektrometrie und der Laser-Plasma-Spektrometrie fehlt es an der Analysefähigkeit für Fluor und Chlor. Die ursprüngliche Zielsetzung einer „Online-Analytik“, mit der Altholzsortimentsmengen von mehreren Tonnen pro Stunde relativ lückenlos überwacht werden könnten, ist nach heutigem Kenntnisstand noch nicht realisierbar. Gegenwärtig besteht die Forderung, Schnellerkennungsmethoden für Fluor zu entwickeln. Ohne gesicherte Analytik bei der Anlieferung von Altholz würde das meiste Material nach der Altholzverordnung der energetischen Verwertung und der Beseitigung durch zugelassene thermische Behandlungsanlagen zugeführt werden müssen und stünde nicht der stofflichen Verwertung zur Verfügung.

2.5 Gebrauchtholz als Rohstoff für die MDF-Herstellung

Derzeit bilden Holz und Einjahrespflanzen weltweit die wichtigsten Rohmaterialien für die MDF-Produktion (DEPPE und ERNST, 2000). Aufgrund ihrer Eigenschaften werden hauptsächlich Nadelhölzer der Gattungen *Picea* (50 Arten), *Abies* (40 Arten), *Pinus* (90 Arten) und vereinzelt *Pseudotsuga* (5-6 Arten) verarbeitet. Daneben werden in zunehmendem Maß Laubhölzer wie *Fagus* oder *Populus* sowie Einjahrespflanzen für besondere Plattenanforderungen eingesetzt (SOINÉ, 2001; HIMMELREICH, 2002).

Neben Stammholz werden vielfach auch Sortimente wie Industrierestholz und Schwachholz aus der Durchforstung in der Holzwerkstoffindustrie eingesetzt. Daneben wären auch Sekundärrohstoffe, zu denen nicht kontaminierte Althölzer oder Altpapiere gehören, für die MDF-Herstellung einsetzbar. Durch die in Deutschland ansässigen Altholzverwerter werden heute große Mengen an Altholz sortiert, die bei entsprechender Aufbereitung und Dekontamination in der Produktion von MDF oder Hartfaserplatten Verwendung finden könnten (OSTWALD, 1993).

Neben der Spanplattenindustrie, die derzeit der größte Abnehmer für Altholz ist, gibt es derzeit keine nennenswerten Abnehmer für Altholz (DEPPE und ERNST, 1991; BOCKELMANN und MARUTZKY, 1993). Der Einsatz von Altholz in weiteren Anwendungsbereichen, wie z.B. zur Zellstoffgewinnung, wurde eingehend von BORGARDS, KORDSACHIA und PATT (1995) untersucht, wird aber bisher nicht praktiziert.

Die Verwendbarkeit von qualitativ relativ minderwertigem Holz, wie Waldhackschnitzel oder Holz aus durch Insektenbefall abgestorbenen Bäumen sowie von Holzresten, wie z.B. Schwarten und Spreißeln, Hobelspänen und Furnierresten, wurde von verschiedenen Autoren untersucht und ist in Nordamerika teilweise schon Stand der Technik (DICKERHOOF, 1975; KEHR, 1977 und 1980; KELLY et al., 1982; HAUPT und BAUMANN, 1983; CHOW und ZHAO, 1992). Der Vorteil bei der Verwendung dieses mehr oder weniger stark getrockneten Holzes besteht darin, dass es nicht weiter mit Störstoffen, wie Lacken und Metallen, verunreinigt ist. Hervorzuheben ist, dass für die Herstellung von Fasern üblicherweise bessere Holzsortimente verwendet werden müssen als dies für die Herstellung von Spänen für die Spanplattenproduktion erforderlich ist. Bei der Herstellung von MDF handelt sich also um die Verarbeitung einer aufwendiger herstellbaren, aber kleineren morphologischen Einheit (ERNST, 1995; EMB, 1996). Der durch den Alterungsprozess von Altholz bedingte Abbau von Holzinhaltstoffen könnte bei der MDF-Herstellung sogar von Vorteil sein. So sind z.B. geringere VOC-Emissionen am Faser Trockner und auch ein geringerer Anteil an durch Harze verursachte Faserbündel zu erwarten.

Als Rohstoffbasis für die MDF-Herstellung verwenden Länder der Tropen und Subtropen oftmals Einjahrespflanzen bzw. Rückstände von Einjahrespflanzen (Stroh, Hanf, Flachs, Bagasse usw.) (DEPPE, 1996). Eine weitere Möglichkeit zur Herstellung von MDF bieten Ölpalmenhölzer, welche in Plantagen in ausreichendem Maß vorhanden sind (THOLE, 2001). Die Monokotyledonen (einkeimblättrige Pflanzen, z.B. Gräser) weisen in der Regel eine Netzervatur auf, bei der die vom Procambium gebildeten primären Leitbündel über den Querschnitt zerstreut angeordnet sind. Die Leitbündel sind geschlossen und dienen sowohl der Wasser- als auch der Assimilatleitung. Das „Holz“ der Monokotylen ist gekennzeichnet durch:

- einen hohen Faseranteil,
- ungleichmäßige Verteilung der Leitbündel im Grundgewebe und damit verbundene Rohdichteschwankungen,
- keine radial verlaufenden Gewebe, wie Holzstrahlen und
- einen Abschluss zum Stammäußeren durch eine durchgehende Epidermis.

In der Epidermisschicht sind häufig Wachse als wasserabweisende Schichten eingelagert, die sich bei der Beleimung meist als störend erweisen. Der Unterschied bei einem derartigen Materialeinsatz im Gegensatz zum Rohstoff Holz besteht darin, dass sich durch den hohen Silikatanteil dieser Pflanzen die Mahlscheibenabnutzung während des Zerfaserungsprozesses wesentlich erhöht. Durch kürzere Kochzeiten erhöht sich der Staubanteil, wobei bei längeren Kochzeiten mehr Anteile an wasserlöslichen Inhaltsstoffen in das Abwasser gelangen.

Aber auch Einjahrespflanzen können für die Herstellung von Faser- und Spanplatten in Betracht gezogen werden. Als Rohstoffe kommen landwirtschaftliche Reststoffe wie verschiedene Strohartarten, Flachs-, Hanf- und Rapsschäben in Betracht. In tropischen Ländern sind dies vor allem Zuckerrohr, Bagasse und Baumwollstauden. Daneben werden Einjahrespflanzen häufig auch zu Zellstoffgewinnung verwendet. Die jährlich schwankende Verfügbarkeit, der hohe Kieselsäuregehalt und die häufig schlechtere Faserqualität im Gegensatz zur Holzfaser bilden für diesen Rohstoff den limitierenden Faktor. Industriell werden diese Faserplatten gegenwärtig noch in einem geringen Umfang hergestellt.

Mit der Rohstoffauswahl, die je nach Standort und Region variiert, ergibt sich somit eine Vorentscheidung hinsichtlich der späteren Produktqualität.

2.6 Zukünftige MDF-Entwicklung und damit verbundene Auswirkungen auf den Rohholzmarkt

Die Mitteldichte Faserplatte (MDF) ist im Vergleich zu anderen Holzwerkstoffen eine relativ junge technologische Produktentwicklung aus den USA. Nach MALONEY (1977) entstand die erste Anlage 1965 bei der Fa. Allied Chemical in Deposit, NY, USA. Anders als bei der Spanplatte, wo das Holz „einfach“ zu Partikeln zerkleinert wird, erfolgt der Holzaufschluss bei MDF – ähnlich wie bei der Refinerholzstoffherstellung – über den Zerfaserungsprozess mit Dampfeinsatz. Durch diesen Prozess entsteht ein Produkt mit sehr guter Homogenität, das dem Möbel- und Innenausbau neue Gestaltungs- und Einsatzmöglichkeiten bringt. MDF stellt sowohl ein Substitutionsprodukt als auch ein Ergänzungsprodukt zur Spanplatte dar (DEPPE, 1989).

Geeignete Sortimente des anfallenden Altholzes wurden bisher weitgehend von der Spanplattenindustrie aufgenommen. Dies erklärt auch, dass bei der Produktion von MDF kein Altholz und nur wenig Restholz eingesetzt wurde. Aufgrund der zurzeit bestehenden und außerdem geplanten MDF-Kapazitäten bzw. Kapazitätserweiterungen wird es durch den Konkurrenzdruck und die erhöhte Nachfrage nach geeigneten Rohholzsortimenten notwendig sein, nach neuen, bisher nicht genutzten Rohstoffquellen zu suchen. Gleichzeitig können dadurch Rohstoffkosten gespart werden. Durch den geplanten Bau neuer Spanplatten- und Zellstoffwerke in Deutschland sowie im grenznahen Ausland wird es zu einer erhöhten Nachfrage auf dem inländischen Industrieholzmarkt kommen. Der Holzbedarf wird bisher zum größten Teil aus deutscher Holzproduktion gedeckt und bringt damit die deutsche Holzwerkstoffindustrie zusätzlich unter Druck (ALBERT, 1995). Die deutsche MDF-Industrie wird daher in Zukunft verstärkt auch auf andere Rohstoffe angewiesen sein, wenn sie auf dem Weltmarkt und besonders gegenüber Produzenten im nahen Ausland konkurrenzfähig bleiben will. Eine Steigerung der stofflich oder energetisch verwertbaren Altholzmenge ist daher in volkswirtschaftlichem und ökologischem Interesse. Durch eine sinnvolle Holznutzung wird somit auch ein Beitrag zum Umweltschutz geleistet (WEGENER und FRÜHWALD, 1994 a und b).

Da Altholz nur in begrenztem Umfang zur Verfügung steht, hat sich der Brennstoffmarkt beim Altholz bereits jetzt schon vom Angebots- zum Nachfragemarkt entwickelt. Wenn sich dieses Verhalten auch auf die stoffliche Verwertung von Altholz übertragen ließe, könnten trotz zusätzlicher Analyseverfahren des Altholzes aufgrund gesetzlicher Rahmenbedingungen in Zukunft höhere Preise für die Tonne Altholz erzielt werden. Diese Markttendenzen sind zwar spekulativ, aber durchaus denkbar.

Politische Rahmenbedingungen, wie es z. Z. bei der thermischen Verwertung durch Förderprogramme bei der Stromeinspeisung zu sehen ist, sind für eine stoffliche Altholzverwertung sicherlich nicht förderlich. In diesem Zusammenhang sei zu erwähnen, dass unter ökologischen Gesichtspunkten das Altholz bei einer stofflichen Verwertung das CO₂ weiterhin gebunden bleibt und nicht wie bei der thermischen Verwertung an den CO₂-Kreislauf wieder abgibt.

3 Einflussfaktoren auf die Faserherstellung

3.1 Allgemeine Einflussfaktoren

Weltweit stehen für die Faserherstellung Frischholz (Rund- und Industrierestholz) und in geringen Mengen Altholz als Ausgangsrohstoff zur Verfügung. Zum Einsatz kommen dabei vornehmlich Nadelhölzer und Laubhölzer, die sich vor allem durch verschiedene Gewebeelemente unterscheiden.

Mit der Zerkleinerung entsteht ein Faserstoffgemisch, welches sich aus einer Faserstoff- und einer Feinstofffraktion zusammensetzt. Darüber hinaus befinden sich im Faserstoff Anteile an Faserbündeln, Splintern und Staubstoffen.

Welche Holzart und damit auch welches Altholzsortiment sich zur Herstellung von Faserstoff eignet, ist vorrangig von dem anatomischen Aufbau der Holzart und der Morphologie der Fasern abhängig. Die chemische Zusammensetzung des Ausgangsmaterials ist dabei zweitrangig (ANNERGRÉN et al., 1963; DINWOODIE, 1965; SINKEY, 1983; HARTLER, 1985). Dies wird im Folgenden erläutert.

3.2 Biologische und morphologische Einflussfaktoren auf die Faserstoffherstellung

3.2.1 Pilzschädigung am lebenden Baum und an verbaulichem Holz

Holzverfärbungen an lebenden Bäumen und Rund- und Schnittholz treten durch biotische und abiotische Faktoren auf. Die Holzverfärbenden Schimmel- und Bläupilze leben von den Nährstoffen, die in den Parenchymzellen des Splintholzes gespeichert sind. Diese Pilze verursachen keinen bzw. lediglich einen geringen Zellwandabbau, wobei die Festigkeitseigenschaften nicht merklich beeinträchtigt werden. Neben den technischen Eigenschaften, wie z.B. die Verleimbarkeit von Holz, werden, gerade auch im Hinblick auf Altholz, hygienische Ansprüche durch pilzbefallenes Holz beeinträchtigt (SCHMIDT, 1994). Schimmelpilze verfügen über eine große Anpassungsfähigkeit (Temperatur, pH-Wert, Feuchtigkeit) und sind dadurch in der Lage verschiedenste Materialien zu besiedeln. Aus dem Bereich der Lignocellulosen können stehende Bäume (SCHMIDT, 1985), lagerndes und verbaulich Holz (WOLF und LIESE, 1977), Hackschnitzel der

Zellstoffindustrie (HAJNY, 1966), lagernde Einjahrespflanzen (SCHMIDT und WALTER, 1978) und Zellstoff und Papier (REIß, 1986) Schimmelpilzwachstum aufweisen. Die Pilze ernähren sich von Zellinhaltsstoffen (Zucker, Stärke, Eiweiß) und die Hyphen dringen nur wenige Millimeter in das Holz ein. Von einigen Arten werden Pektine, Hemicellulosen und Cellulosen abgebaut, aber nicht die verholzten Zellwände, so dass die Holzfestigkeit unbeeinflusst bleibt.

Bei optimalen Bedingungen (Luftfeuchte >95%, Wärme, geringer Luftwechsel) können Althölzer leicht von Schimmelpilzen befallen werden. Ein fließender Übergang vom Verschimmeln über Verblauen hin zu einer mäßigen Moderfäuleaktivität kann holzartenabhängig vorkommen (KÄÄRIK, 1975; SEEHANN et al., 1975) und äußert sich auf den Altholzplätzen durch eine markante, typische Geruchsentwicklung.

Die blauschwarzen Hyphen der Bläuepilze, die zu den Asco- und Deuteromyceten zählen, durchbohren mit mechanischem Druck den Torus der Hoftüpfel, aber auch die verholzte Zellwand, wobei jedoch die Holzfestigkeit kaum beeinflusst wird (SCHMIDT und LIESE, 1966).

Ein Befall durch die Stammholzbläue (primäre Bläue) bei Kiefernstammholz kann nach dem Holzeinschlag im Wald auftreten. Die Schnittholzbläue (sekundäre Bläue), die u. a. durch Arten der Gattung *Cladosporium* verursacht werden kann, stellt sich erst nach dem Einschneiden des Holzes ein, wenn dies noch nicht lufttrocken ist. Im Gegensatz dazu handelt es sich bei der Anstrichbläue (tertiäre Bläue), die häufig durch *Aureobasidium pulluans* an verarbeitetem und angestrichenem Holz, wie Fenstern und Türen, während der Gebrauchsphase oder bei lagerndem Altholz entsteht, um eine Neuinfektion (BUTIN, 1996). Durch Lackschäden kann Feuchtigkeit aufgenommen werden, die zuerst zum Abblättern des Lackfilmes und später zur Fäulnis und damit zur Schädigung des Holzes führen kann (SELL, 1968; SUTTER, 1986; WEBER, 1986).

Eine erhebliche Wertminderung von Holz erfolgt durch den pilzlichen Abbau (z. B. Basidiomyceten) von Zellwandkomponenten und den damit verbundenen strukturellen Veränderungen. Diese wiederum führen zu einer Reduzierung der Festigkeit (u. a. GROSSER, 1985; SUTTER, 1986).

Der chemische bzw. enzymatische Abbau der Holzbestandteile erfolgt in einer für die Ernährung des Pilzes geeigneten Form und führt somit zu einer vollständigen Destrukturierung. Ein zusammenfassender Wissenstand zum enzymatischen Holzabbau wurde von ERIKSSON et al. (1990) dargestellt (FENGEL und WEGENER, 1989; SCHMIDT und KERNER-GANG, 1986; SCHOEMAKER et al., 1991).

Das aus den drei aromatischen Komponenten P-Cumarylalkohol, Coniferylalkohol und Sinapinalkohol vom Typ des Phenylpropan bestehende Lignin, kann durch sehr unterschiedliche Bindungen vielfältig miteinander verknüpft sein. Durch seine komplexen Strukturen und insbesondere seiner großen Vielfalt an Bindungen (Arylether- und C-C-Bindungen) ist diese inkrustierende Substanz für die meisten Mikroorganismen kaum angreifbar. Die Arbeiten von CRAWFORD (1981) und CRESTINI (1996) zeigen, dass zuerst eine Depolymerisierung des Ligninmoleküls unter Freisetzung von monomeren und dimeren Ligninfragmenten stattfindet. In einem weiteren Reaktionsschritt erfolgt die Demethylierung, Hydroxylierung der aromatischen Ringe sowie die Ringspaltung. Bei der Depolymerisierung wird den Phenoloxidasen eine wichtige Rolle zugeschrieben. Monomere Ligninfragmente können mit Hilfe von Enzymen bzw. Enzymsystemen bis zu aliphatischen Bestandteilen gespalten werden. Vorhandene Seitenketten können durch Oxidation zur Carboxylgruppe abgebaut werden. An den so entstandenen aromatischen Dihydroxyverbindungen wird der Ring durch Dioxigenasen zwischen beiden benachbarten OH-Gruppen (ortho-Spaltung) geöffnet.

Durch Veratmung der C-Atome aus dem aromatischen Ring wird ein intensiver Ligninabbau durch Weißfäulepilze erreicht (z.B. *Phanerochaete chrysosporium*). Unterschieden wird zwischen der „Simultanfäule“ und der „sukzessiven Weißfäule“. Bei der Simultanfäule werden Kohlenhydrate und Lignin, in Abhängigkeit von der Pilzart und dem Zersetzungsgrad, annähernd gleichzeitig und mit gleichen Raten abgebaut. Eine an der Hyphe durch Enzyme umgebende Schleimschicht ist in der Lage die Sekundärwand intensiver als die Tertiärwand und die Mittellamelle/Primärwand abzubauen. Im Gegensatz dazu verläuft der Ligninabbau bei der sukzessiven Weißfäule mit Beginn der Zersetzung schneller, so dass sich Cellulose zunächst relativ anreichert. Durch den Abbau des stark lignifizierten Mittellamelle/Primärwandbereiches kommt es zu einer Auflösung des Gewebeverbandes.

Braunfäuleerreger depolymerisieren durch Hydrolasen überwiegend Cellulose und Hemicellulose und sind in der Lage die Phenolringe des Lignins zu öffnen. Die glykosidischen Bindungen werden unter Einbau von Wasser gespalten. Durch eine Fermentierung von Hackschnitzeln mit Braunfäulepilzen ist es nach Untersuchungen von KÜHNE (1993) möglich, die Zerfaserung zu erleichtern. Zusätzlich kann die Dickenquellung der aus dem Faserstoff hergestellten Platten um 60% bis 70% gesenkt und eine Steigerung der Bindefestigkeit auf das 3,7-fache erreicht werden. Grundlagen zur Vorbehandlung des aufzuschließenden Holzes liegen hierzu u.a. von WAGENFÜHR (1988) und KÖRNER et al. (1991) im Rahmen von Laboruntersuchungen vor.

Alle ligninabbauenden Pilze sind auf das Vorhandensein von Kohlenhydraten (Cellulose, Hemicellulose, monomere Zucker) als zusätzliche Energiequelle angewiesen (ERIKSSON et al., 1990).

3.2.2 Lagerungseinflüsse bei Holz und Hackspänen

Rundholz sollte für alle Produktionszweige der Holzverarbeitung ohne Qualitätseinbußen verarbeitet werden (HARTLER, 1986). Diese können, wie erwähnt, durch holzerstörende Organismen hervorgerufen werden. Ist ein zügiger Abtransport des Rundholzes nach dem Einschlag nicht möglich, muss das Holz durch eine Trocken- oder eine Nasskonservierung vor biologischen Abbau geschützt werden. Mit einem neuen Konservierungsverfahren, bei dem das Rundholz luftdicht mit Folie verpackt wird, um möglichst in einer sauerstoffarmen Atmosphäre zu lagern, kann eine Lagerung ohne Qualitätseinbußen erreicht werden (MAHLER et al., 1999). Bei Rundhölzern, die nicht im Holzpolter durch Konservierungsmaßnahmen geschützt werden, ist längerfristig ein Abbau des Holzes durch Pilzbefall, der die Festigkeitseigenschaften reduziert, nicht zu verhindern (JACKSON, 1988).

Die chemischen und mikrobiologischen Vorgänge bei der Hackspänelagerung nehmen einen starken Einfluss auf die Veränderung der chemisch-physikalischen Holzeigenschaften. Nach Ergebnissen von FEIST et al. (1973) steigen die wasserlöslichen Extraktstoffe nach einer dreimonatigen Lagerdauer der Hackspäne an. Dabei zeichnen sich Abbauerscheinungen ab, die zu einem Helligkeitsverlust des Holzes führen. Die initiale Wärmeentwicklung im Hackspänehaufen beruht zum größten Teil auf den Stoffwechselfvorgängen von Mikroorganismen in den lebenden Parenchymzellen, wobei Stärke und andere Reservestoffe oxidativ abgebaut werden. Durch den Temperaturanstieg im Inneren des Hackspänehaufens kommt es zu Veränderungen im Extraktstoffgehalt und in der Extraktstoffzusammensetzung (HAJNY, 1966; ASSARSSON et al.; 1970).

Zu den primären Extraktstoffen gehören die freien Kohlenhydrate, Fette und Eiweiße. Sie sind die wichtigsten Speicherstoffe des Holzes und werden hauptsächlich in den Parenchymzellen des Splintholzes gelagert. Dabei handelt es sich meist um Ester des Glycerins mit langkettigen Fettsäuren. Diese sind meist ungesättigte C₁₈-Fettsäuren, wie z.B. die ungesättigte Ölsäure (C₁₈H₃₄O₂) und die Linolsäure (C₁₈H₃₂O₂).

Die Harze, z.B. von Birke und Kiefer, besitzen einen besonders hohen Gehalt an Fettsäure; vor allem befindet sich in der Kiefer die gesättigte C₁₆-Palmitinsäure. Fettsäuren liegen zusammen

mit Harzsäuren im Rohfallöl vor und werden über das Acetyl-CoA aus D-Glucose gebildet. Durch β -Oxidation können diese zu Essigsäure abgebaut werden.

Die Hydrolyse der Fette ist unabhängig vom Pilzbefall und stellt die wichtigste Änderung der oleophilen Holzbestandteile dar, d.h. der Fettsäureglyceride und die entsprechende Hydrolyse der Sterolester. Solange der Stamm nicht ausgetrocknet ist, schreitet die enzymatische Spaltung der Fettsäureester fort (FLAMM, 1963). Es zeigt sich, dass zu Beginn der Lagerung vor allem der Abbau der Kohlenhydrate dominiert. Fette werden erst später enzymatisch hydrolysiert, wobei der Gehalt an freien Fettsäuren vorerst zunimmt (ASSARSSON et al., 1963). Der prozentuale Anteil freier Fettsäuren im Harz nimmt während einer weiter fortschreitenden Lagerung ab, was auf Oxidationen unter Beteiligung von Luftsauerstoff zurückzuführen ist. Dies ist zu beachten, da freie Fettsäuren Harzabscheidungen in Verarbeitungsprozessen zu initiieren vermögen (CROON, 1965; BACK et al., 1987).

In ihren umfangreichen Untersuchungen konnte SCHÄFER (1996) die Lagerungseinflüsse auf Kiefernhackspäne und daraus hergestellte Spanplatten und MDF ermitteln. Nach 5-wöchiger Lagerung zeigte sich eine Abnahme der Dickenquellungswerte an UF-gebundenen MDF. Längere Zeitintervalle hatten keine weiteren Auswirkungen auf die Quellungseigenschaften. Die geringen Einflüsse der Hackspänelagerung auf die hergestellten MDF wirkten sich nicht so deutlich aus, wie auf die Eigenschaften der entsprechenden Spanplatten und sind für die Praxis bei der MDF-Herstellung unbedeutender. Die sich während der Lagerung verändernden Extraktstoffe des Holzes prägen die verleimungsrelevanten Eigenschaften der Späne. Beim TMP-Aufschluss gehen diese teilweise oder ganz in Lösung und wirken somit nicht mehr verleimungsbeeinflussend.

Inwieweit sich die Lagerungsbedingungen von Hackschnitzeln auf die spätere Spanplattenqualität auswirken können, wurde von verschiedenen Autoren eingehend untersucht (PAULITSCH, 1976; CHEN und PAULITSCH, 1976). Durch eine längere Lagerdauer von Hackspänen aus im Frühjahr bzw. Herbst eingeschlagenem Kiefern- und Buchenholz stellten MARUTZKY und KESERÜ (1982) an dreischichtigen Spanplatten fest, dass sich die Biegefestigkeit und das Biege-E-Modul verschlechterte. Bei der Dickenquellung konnte mit zunehmender Lagerungsdauer der Hackspäne bei den unterschiedlichen Herstellungsvarianten der Platten keine eindeutige Tendenz ermittelt werden.

Wenngleich über den Einfluss der Hackspänelagerung auf die späteren Spanplatten zahlreiche Arbeiten existieren (u. a. PAULITSCH, 1976; CHEN und PAULITSCH, 1976; MARUTZKY und KESERÜ, 1982; SCHÄFER, 1996), liegen keine Angaben über die Veränderung durch Abbaumechanismen bei Althölzern, über das Verhalten der Hackschnitzel im Altholzhaufen, über die Bedeutung von Umwelteinwirkungen auf das Holz und über die Veränderung von gelagertem Altholz in stückiger Form vor. Auch mögliche Auswirkungen der Spanqualität auf die physikalisch-technischen Eigenschaften von Platten liegen nach dem Wissen des Verfassers bisher nicht vor. Hier besteht noch weiterer Forschungsbedarf.

3.3 Einfluss von Feuchtigkeit und Temperatur auf Holz

3.3.1 Sorption

Als Hygroskopizität wird die Eigenschaft eines Stoffes bezeichnet, Wasserdampf aus feuchter Luft oder anderen feuchten Gasen aufzunehmen und sorptiv zu binden. Im Allgemeinen wird die Bindung kondensierbarer Gase an einen festen oder flüssigen Stoff als Sorption bezeichnet. Dieser Sorption liegen bei Holz, in Abhängigkeit vom Holzfeuchtebereich, verschiedene Ursachen zugrunde: Die Chemisorption, dem Langmuir-Bereich, läuft im Holzfeuchtebereich von 0 – 6% ab. Hierbei werden in den amorphen Bereichen der Cellulose über Wasserstoffbrücken zu den Nebervalenzen freier OH-Gruppen Wassermoleküle angelagert (van der Waals-Kräfte). Diese Anlagerung erfolgt lediglich in einer monomolekularen Schicht auf der inneren Oberfläche des Holzes. Der zweite Bereich bildet die polymolekulare Adsorption (BET-Bereich). Die Anlagerung der gasförmigen oder flüssigen Stoffe erfolgt meist an der Oberfläche eines festen Stoffes (Adsorbens). Die Anlagerung ergibt sich aus der Wirkung von Oberflächenkräften, weshalb das Adsorptionsvermögen eines Stoffes von der Größe seiner inneren Oberfläche abhängt. Die BET-Adsorption läuft im Holzfeuchtebereich von 6-15% ab. Im Holzfeuchtebereich zwischen 15% und Fasersättigung kommt es zur Kapillarkondensation. In diesem Bereich erfolgt die Sorption durch die Aufnahme von Wasser in die Kapillar-Hohlräume der Zellwände (BRUNNAUER; EMMERT und TELLER, 1938). Die Aufnahme (Adsorption) bzw. die Abgabe (Desorption) von Molekülen durch den Festkörper führt bei holzhaltigen Werkstoffen zur Quellung und Schwindung. Durch Wasseraufnahme und Wasserabgabe werden zwei Sorptionskurven gebildet, die zusammen eine Hystereseschleife bilden (KOLLMANN, 1963).

Eine Veränderung der Sorptionseigenschaften von Holz kann durch das Erwärmen erreicht werden. KOLLMANN und SCHNEIDER (1963) berichteten, dass mit zunehmender Temperatur und Einwirkungsdauer die Gleichgewichtsfeuchte bei einem definierten Klima stärker herabgesetzt wird. Für die Sorptionseigenschaft machten die Autoren den Abbau von Hemicellulose und Cellulose verantwortlich. Das Sorptionsverhalten von Holzwerkstoffen wird daher unter anderem von der Art des eingesetzten Bindemittels und der eingesetzten Pressparameter bestimmt. Bei der Faserplattenherstellung kommt es durch die hohen Presstemperaturen von 180° bis 200°C zu einer Sorptionsvergütung; die Gleichgewichtsfeuchte der Platten ist gegenüber Holz erniedrigt. Eine intensive Hitzeeinwirkung hat eine Verminderung der Wassersorption zur Folge und führt weiterhin zu einer thermischen Degradation der Holzbestandteile, die mit einer Festigkeitsabnahme der Holzwerkstoffe einhergeht.

Durch verschiedene Maßnahmen, wie mechanische Stabilisierungen durch Absperren, Oberflächenüberzüge, Einlagerungen von Stoffen in die Zellwand (Salze, Wachse) und eine Herabsetzung der Hygroskopizität (Hitzevergütung, chem. Behandlung), lässt sich eine Sorptionsvergütung des Holzes erreichen (KLAUDITZ und STEGMANN, 1951; PATZELT und STINGL, 2001; TJEERDSMA et al., 2002; LUKOWSKY et al. 2002). Durch Veränderung des Feuchtegleichgewichtes wird die Hygroskopizität und die Anzahl der sorptionsaktiven Stellen im Holz vermindert. Während der Gebrauchsphase des Holzes können diese Maßnahmen als positiv angesehen werden; sie können sich bei der Aufbereitung von Altholz im Hinblick auf die Quellungseigenschaften auch fortsetzen.

3.3.2 Chemisch-physikalische Veränderungen bei der Holz Trocknung

Cellulose ist die wichtigste Gerüstsubstanz der pflanzlichen Zellwand. Sie macht durchschnittlich 50% der Trockensubstanz des Holzes aus. Mit mindestens 99% ist die Cellulose, als hochpolymeres Polysaccharid, ausschließlich aus β -D-Glucoseeinheiten aufgebaut. Sie besitzt einen durchschnittlichen Polymerisationsgrad DP von 6000 bis 12000 (FENGEL und WEGENER, 1989).

Bei den Hemicellulosen oder Polyosen handelt es sich um polymere Kohlenhydrate, die ähnlich wie Cellulose aus Zuckern aufgebaut sind, aber leichter von Alkalien angegriffen werden können. Es handelt sich um kurzkettige Polysaccharide, deren DP-Werte zwischen 100 und 200 liegen.

Als Bestandteil der Zellwand bildet Lignin die dritte Gerüstsubstanz, durch dessen Anwesenheit und Wirkung das Zellgewebe erst zum Holz wird. Im Gegensatz zur Cellulose ist Lignin ein amorphes (glasartig) dreidimensional vernetztes Polymer. Kennzeichnend sind der hohe Kohlenstoff- und Methoxylgehalt, die leichte Oxidierbarkeit, die mangelnde Hydrolysierbarkeit sowie die Löslichkeit in sauren Sulfiten (TRENDELENBURG, 1955). Die Erweichungstemperatur (Glastemperatur) des Lignins setzt in Abhängigkeit vom Feuchtegehalt des Holzes bei ca. 95°C ein (GORING, 1963). Das Lignin erfährt in diesem Temperaturbereich reversible Strukturänderungen und geht von einem amorphen in einen gummielastischen Zustand über. Die Erweichungstemperatur des Lignins wird beim thermo-mechanischen Holzaufschluss neben der Aufschlusstemperatur im Druckbehälter auch durch die Zerfaserungsbedingungen im Refiner entscheidend beeinflusst.

Die molekulare und submikroskopische Struktur der Gerüstsubstanzen der einzelnen Holzzellen, deren Wand aus mehreren, unterschiedlich strukturierten Schichten aufgebaut ist, sind als Ursache der Anisotropie bei hygri-schen Einflüssen zu sehen. In der Zellwand entstehen beim Schwinden primäre (innere) Spannungen und Schiebungen, die sich als Formänderungen der Einzelzelle auf die Nachbarzelle als sekundäre (äußere) Spannungen übertragen. Die sekundären Schwindspannungen zwischen den Zellen werden auch noch von anderen Einflüssen wie Lignin-Verteilung, Jahrringaufbau, Plastifizierung durch höhere Temperatur und Trocknungsgeschwindigkeit mitbestimmt. Die tertiäre Schwindspannung entsteht im Holzquerschnitt durch Holzfeuchtigkeitsunterschiede im Brettquerschnitt. Daher schwindet eine Holzprobe selbst dann, wenn unter sehr schonenden Temperaturen getrocknet wird (KEYLWERTH, 1966).

Für die Verwendung von Holz im Innenbereich muss dieses durch eine Trocknung auf eine Holzfeuchte zwischen 6% - 18% gebracht werden. Dabei wird dem Holz auf verschiedene Weise durch Konvektions-, Kontakt-, Hochfrequenz-, Elektrowiderstands- und Strahlungstrocknung die Feuchtigkeit entzogen. Dadurch lassen sich das Transportgewicht, die Anfälligkeit gegen Holzschädlinge, die elastischen und mechanischen Eigenschaften, die thermischen und elektrischen Eigenschaften beeinflussen.

Temperaturen bei der Holztrocknung von über 75°C, mehr noch von über 100°C, verringern die Hygroskopizität des Holzes und damit sekundär seine Neigung zum Quellen und Schwinden (EGNER, 1937). KOLLMANN und FENGEL (1965) konnten an Hölzern, die einer Wärmebehandlung bis 100°C unterzogen wurden, keinen oder nur einen geringen Verlust an Cellulose und Hemicellulose feststellen. Bei Kiefernholz wurde bereits eine Abnahme des Alphacellulosegehaltes nach einer Behandlung bei 100°C bis 130°C festgestellt und zeigt, dass sich der Substanzverlust der Alphacellulose nicht mit dem Abbau von Cellulose begleitenden Hemicellulosen erklären lässt, sondern, dass ein thermischer Abbau der Cellulose eintritt.

SANDERMANN und AUGUSTIN (1963, 1964) wiesen in ihren Untersuchungen darauf hin, dass bei der thermischen Zersetzung des Holzes, in Anwesenheit von Sauerstoff bei 180°C, zuerst die Hemicellulosen angegriffen werden, gefolgt von der wesentlich stabileren Cellulose und dem Lignin. Nach Untersuchungen von STAMM (1956) konnte bei einer thermischen Zersetzung von Douglasienholz dieser Verlauf bestätigt werden. Die Hemicellulosen wurden dabei viermal so schnell abgebaut wie die Alphacellulose und das Lignin nur einhalbmals so schnell. Arbeiten von MANTANIS et al. (1994, 1995) belegen, dass der Hauptanteil der Quellung von der Cellulose getragen wird. Nach Untersuchungen von BURMESTER (1974) führt der Abbau der Hemicellulose und Cellulose nicht direkt zu einer Dimensionsstabilisierung. Erst durch die Bildung von Bindun-

gen zwischen den Makromolekülen (v.a. Halbacetale) kann es zu einer Verminderung von Quellung und Schwindung kommen.

Verfärbungen des Holzes werden bei Nadelhölzern ab Temperaturen um 60°C und bei Laubhölzern ab 90°C durch die Trocknung begünstigt (KOLLMANN et al. 1951). Die Verfärbung obliegt den chemischen Veränderungen der Hemicellulose, welche durch die Temperaturbedingungen hydrolytisch abgebaut werden. (KOLLMANN et al. 1951; WEGENER und FENGEL, 1988). Besonders bei Eichenholz nimmt die Intensität der Farbveränderung im Holz durch steigende Temperaturen zu (FORTUIN et al., 1988). Bei hellen Laubhölzern begünstigt die Luftfeuchtigkeit die Holzverfärbung (KOLLMANN et al. 1951) und wird technisch bei der Buchendämpfung angewendet.

3.3.3 Irreversibilität bzw. Reversibilität von Faserstoffen

Als thermische Reaktionen sind die Plastifizierung des Holzes und seine Dimensionsstabilisierung technisch wichtig (RUNKEL, 1951; RUNKEL und WITT, 1953). Die Plastifizierung der Mittelschichtsubstanzen der Zellwände wird bei Temperaturerhöhung zur Faserstoffgewinnung ausgenutzt.

Bei der Trocknung von Holz wird eine Veränderung in der Feinstruktur, im morphologischen Aufbau und in der inneren Oberfläche (Kapillargefüge) der Zellwand hervorgerufen. Diese Veränderungen sind unter dem Sammelbegriff „Verhornung“ bekannt und lassen sich mit Hilfe des Wasserrückhaltevermögens (WRV-Wert) gemäß der von JAYME und ROFFAEL (1970) ausgearbeiteten Methode erfassen. JAYME (1944) hat in seiner Veröffentlichung die bei der Trocknung von initialfeuchten (niemals getrockneten) Zellstoffen stattfindenden Veränderungen durch Bestimmung des Wasserrückhaltevermögens nachgewiesen und zahlenmäßig erfasst (ROFFAEL, 1979). JAYME und FENGEL (1963) konnten mit ihren Untersuchungen belegen, dass mit der Trocknung von Zellstoffen eine Zellwandschrumpfung einhergeht. Erklären lässt sich dies dadurch, dass in der Zellwand eine teilweise Inaktivierung der OH-Gruppen innerhalb der Fibrillen stattfindet, wodurch einmal die Festigkeit im Inneren der Zellwand nachlässt und zum anderen nur noch wenig Wasser in der Faserwand festgehalten werden kann. Danach tritt beim Trocknen von Zellstoffen eine „irreversible Verhornung“ ein, d.h. eine Abnahme des Wasserrückhaltevermögens, die auch nach längerem Kontakt mit Wasser nicht völlig aufzuheben ist (JAYME, 1944). Der Verlust an Quellungsvermögen rührt einerseits vom Verlust an größeren

Poren durch Kollabieren her (STONE et al., 1968) bzw. von einer Verminderung des Fasersättigungspunktes. Andererseits wird von KRÄSSIG (1984) die Aggregation von Mikrofibrillen als Ursache der Verhornung angesehen. Die Verhornung eines Zellstoffes ist vorwiegend vom Trocknungsgrad abhängig und umso größer, je niedriger der Feuchtigkeitsgehalt nach der Trocknung war. Die Faser verliert durch Verdichtung ihrer inneren Struktur an Flexibilität.

WIESE und PANLAPURO (1996) konnten mittels Einzelaufnahmen an Fasern zeigen, dass bei ihrer Schrumpfung zuerst eine Faserquerschnittsveränderung auftritt. Anschließend entwickeln sich Falten an der Faseroberfläche, die durch eine schnelle Faserschrumpfung fortgesetzt werden. Dass die Faserverformungen durch die Schrumpfungsbehinderung bei der Trocknung einen zusätzlichen verhornenden Effekt mit sich ziehen, konnten LUNDBERG und de RUVO (1978) durch ihre Arbeit belegen.

Bis zum Erreichen des so genannten kritischen Trockengehaltes zeigen sich keine irreversiblen Veränderungen der Fasern durch die Verminderung des Wassergehaltes (de RUVO und HTUN, 1981). Das entfernte Wasser aus den Faserzwischenräumen oder den größeren Faserporen kann sich bis zu diesem kritischen Punkt durch erneute Befeuchtung immer wieder reversibel füllen. Jenseits des kritischen Trockengehaltes werden die Poren durch die Trocknung sukzessiv geschlossen. Damit einhergehend findet eine Verhornung statt, die irreversibel ist.

Die Verhornungseigenschaften von Faserstoffen können daher u. U. ein limitierender Faktor für den Einsatz von Altholz sein. Eine Reaktivierung der verhornten und somit spröden Faser ist demnach nur bedingt möglich. Entgegen der Faseranalytik bei Altholz oder auch bei Frischholz, sind in der Papier- und Zellstoffindustrie Ansatzmöglichkeiten zur Reaktivierung von Fasern erarbeitet worden. Dabei sind die chemischen Modifikationen von Faserstoffen zur Verminderung der Verhornung von Bedeutung. An Zellstoffen können durch Umsetzungen mit Acrylnitril und Veresterungen Spacer-Gruppen in die Struktureinheiten der Cellulose eingefügt werden. Diese führen dazu, dass sich keine größeren Bereiche mit Wasserstoffbrücken ausbilden, die beim Wiederbefeuchten nicht mehr quellen. HIGGINS und McKENZIE (1963) zeigten, dass bei einem Stoffüberschuss von Saccharose oder Glycerin vor der Trocknung von Zellstoffen die Verhornung unterbunden werden kann. Die Derivatisierung von Zellstoffen mit Acrylnitril führt zu guten dielektrischen Eigenschaften, die für Kondensatorenpapiere eingesetzt werden. Eine weitere technische Umsetzung des Acrylnitrils wird wegen seiner schlechten Wasserlöslichkeit nicht genutzt.

GRUBER und WEIGERT (1998) befassten sich in ihren Untersuchungen mit der Umsetzung von Zellstoffen mit reaktiven ungesättigten Verbindungen. Zur Behandlung von Zellstoffen wurden für die Derivatisierung die Monomere Acrylamid und N,N-Dimethylacrylamid verwendet. Durch die Derivatisierung konnte die Verhornungstendenz von gebleichten Zellstoffen positiv beeinflusst werden, d. h. so derivatisierte Zellstoffe verhornen weniger als nicht derivatisierte. Weitere Versuche haben gezeigt, dass das Wasserrückhaltevermögen von getrockneten Zellstoffen durch eine Derivatisierung angehoben werden kann.

Bei der Papier- und Zellstoffindustrie treten durch den Einsatz von Altpapieren Festigkeitseinbußen auf, die im Wesentlichen auf den Effekt der Verhornung durch die Trocknung zurückzuführen sind. Durch Zugabe von Frischholzlangfasern kann dies kompensiert werden.

Die Holzfaser behält nach ihrer Lösung aus dem Holzverband durch die Defibrierung aufgrund der versteifenden Wirkung des Lignins im Wesentlichen ihre Form. Das Lignin in den Fasern setzt nicht nur das Bindevermögen und die Flexibilität herab, sondern ist die Ursache für das Vergilben. Für die Papierherstellung wird durch einen chemischen Aufschlussprozess und einer anschließenden Bleiche das Lignin weitgehend aus der Faser entfernt. Dabei wird die Einzelfaser zwar geschwächt, aber durch die Entfernung des hydrophoben Lignins vergrößert sich das Oberflächenbindungspotential (PATT et al., 1992). Die Blattoberfläche wird in erster Linie von den Berührungstellen der jetzt vorliegenden einzelnen, flexiblen Fasern bestimmt. Die Reaktivität der Fasern ist durch die für den Bindeprozess zur Verfügung stehenden Wasserstoffbrückenbindungen gekennzeichnet (PECINA, 1993).

Bei der MDF-Herstellung können durch die Dampfbehandlung verschiedene Effekte wie die Plastifizierung des Lignins und Kondensationsreaktionen im Lignin erzielt werden, die zu einer Verdunkelung des Faserstoffes führen können. Durch eine starke Ligninerweichung bei hohen Temperaturen werden bei der Defibrierung die einzelnen Gewebekomponenten im Bereich der Mittellamelle getrennt, wodurch intakte Fasern mit einer Ligninumhüllung erhalten werden. Dabei sind Zwischenfaserbindungen über Wasserstoffbrücken eingeschränkt.

In der Literatur sind gegenwärtig hinsichtlich der Fasercharakterisierung von Altholzfasern kaum Informationen zu finden. Dies mag zum einen daran liegen, dass Altholz erst seit dem letzten Jahrzehnt vermehrt als Rohstoffquelle genutzt wurde und zum anderen weniger Altholz für die stoffliche als für die thermische Verwertung eingesetzt wurde. Ein direkter Vergleich der Fasereigenschaften zwischen Fasern aus wieder aufgeschlossenem Altholz und Frischholz ist nur bedingt möglich.

3.4 Mechanische Eigenschaftsveränderungen bei Holz

3.4.1 Mechanische Einflussfaktoren auf Holz und Gebrauchtholz

Holz unterliegt bei seiner Nutzung mechanischen Belastungen, die zu einer Formänderung führen können. Die nach einer Entlastung zurückbleibende plastische Verformung wird als Hysterese bezeichnet (KOLLMANN, 1982).

Das Ende der plastischen Verformung ist durch den Bruch des Holzes gekennzeichnet, da die zunehmende mechanische Belastung nicht mehr durch eine weitere Verformung aufgenommen werden kann. Dieses Versagen kann durch Druckbelastung bei Wind, Sturm oder Schneelast, verbunden mit einer Faserstauchung, ausgelöst werden (BUES, 2000; VOLKMER et. al., 2002). Des Weiteren kann ein Bruch oder feinstrukturelles Versagen durch einen Zellwandbruch während der Imprägnierung mit Holzschutzmitteln oder auch durch Schädigungen bei der Hack-schnitzelherstellung (GILLWALD, 1965; FRANKE und ROFFAEL, 1998) hervorgerufen werden. Dabei ist eine Betrachtung sowohl der makroskopischen Schwachstellen im Gewebebau als auch der feinstrukturellen Schwachstellen innerhalb der Zellen und der Zellwand notwendig (GRÜLL, 1999).

Bei mechanischen Beanspruchungen und Bewitterungen treten Schwachstellen auf, die von KUCERA und SELL (1987) als Grenzfläche zwischen Axialgewebe und Strahlgewebe beschrieben werden. Unter Druckbelastungen, speziell in radialer Richtung, kommt es zu einem strukturellen Versagen von Frühholzzellen, die nahe der Jahrringgrenze liegen (BODIG und JAYNE, 1982).

Bei einer lang andauernden elastischen Belastung zeigt Holz eine stark elastische Nachwirkung. Die Eigenschaft erklärt sich aus dem rheologischen Verhalten von Holz. GRESSEL (1986) beschreibt, dass schon unter Eigenlast eine Verformung durch Kriechen entsteht. Das Kriechen ist abhängig von der Belastung und von der Luftfeuchtigkeit, die großen Einfluss auf die Verformung ausübt (BOEHME, 1984).

RUG und SEEMANN (1988) ermittelten an Frischholz- und an Altholzbohrkernproben die Druckfestigkeit parallel zur Faser. Ein erwarteter Festigkeitsabfall des verbauten Holzes (Altholz) konnte nicht beobachtet werden.

3.4.2 Einflussfaktoren des Faserherstellungsprozesses auf die spätere Holzwerkstoffplatte

Die Fasereigenschaften werden entscheidend durch das Aufschlussverfahren in Abhängigkeit von der Temperatur beeinflusst. Bei einem thermo-mechanischen Aufschluss wird die Faserwandung mehr oder weniger mechanisch aufgerissen. Das Freilegen der cellulosehaltigen Sekundärwand hängt von der Temperatur ab. Bei einer chemischen Vorbehandlung der Hackspäne erfolgt die Trennung während des Zerkleinerungsprozesses der einzelnen Fasern vorwiegend an der Mittellamelle. Die erzeugten Fasern sind an der Oberfläche der Primärwand mit Lignin bedeckt (ROFFAEL et al., 1994 a und b).

Auch können hydrophobe Verbindungen wie Wachse und Fette die Holz- und Faseroberfläche bedecken und unter Umständen eine einwandfreie Benetzung des Holzes mit dem Bindemittel erschweren (HAMEED und ROFFAEL, 1999). Durch die Trocknung von Holz werden Wachse und Fette nicht entfernt und sind auch als Einflussgröße beim Altholz vorhanden. Verbessert werden kann die Benetzung mit einer Alkalibehandlung durch Heißwasser- und Lösungsmittel-Extraktionen, während eine Acetylierung die Benetzbarkeit verschlechtert (PECINA und PAPRZYCKI, 1990).

Untersuchungen an Spanplatten von SCHNEIDER, ROFFAEL und MAY (1982) über den Einfluss von Rohdichte, Bindemittelaufwand und Spänebeschaffenheit auf das Sorptionsverhalten und die Dickenquellung zeigten, dass sowohl die Rohdichte als auch der Bindemittelgehalt das Ausmaß der Dickenquellung in Wasser beeinflusste. Die Deformation der Holzzellen während des Pressvorganges verursachten Spannungen im Gefüge der Spanplatten, die sich auf deren Quellung, insbesondere die Dickenquellung, auswirken. Das Ausmaß der Dickenquellung wird weit mehr durch die Rückstellung der deformierten Holzstruktur in den Spänen einer Spanplatte als von der Quellung der Holzsubstanz bestimmt.

Welche Einflüsse sich durch die Aufschlussbedingungen von TMP (thermo-mechanischer Prozess) und CTMP (chemo-thermo-mechanischer Prozess) bei Holzstoffen aus Frischholzmaterial ergeben, wurden von SCHNEIDER (2000, 2001) untersucht. Er stellte mit Fasern aus einem Aufschluss bei 180°C MDF her, die eine um etwa 100% niedrigere Dickenquellung aufwiesen als die entsprechenden MDF aus Fasern, die bei 140°C oder bei 160°C aufgeschlossen wurden.

Neben den äußeren Einflüssen beim Aufschlussprozess sind vor allem bei Spanplatten (FLEMMING et al., 1960, DIX und ROFFAEL, 1994) und bei MDF (SCHNEIDER et al., 2001), die aus Kern- und Splinthölzern hergestellt wurden, signifikante Unterschiede vorhanden. Dabei zeichnen sich Platten aus Kernholz durch niedrigere Dickenquellungen aus gegenüber den aus Splintholz hergestellten Platten. Dies ist auf die in den Zellwänden des Kiefernholzes eingelagerten Extraktstoffe zurückzuführen, die durch ihre hydrophoben Eigenschaften eine Quellungsvergütung bewirken.

4 Aufbereitung von Altholzsortimenten

4.1 Allgemeines zur Aufbereitung von Altholzsortimenten

Wiederverwertbare Produktionsreste bzw. –abfälle treten heutzutage in unterschiedlichster Materialzusammensetzung auf. Bei der Aufbereitung und Sortierung von Altholz konnten in der Spanplattenindustrie bereits umfangreiche Erfahrungen gesammelt werden (DEPPE, 1989; SOINÉ, 1994; STELZER, 1994). Die Erzeugung von Spänen für die Spanplattenproduktion kann im trockenen Bereich mit Maschinen erfolgen, die gegenüber metallischen oder mineralischen Anhaftungen und Einschlüssen unempfindlich sind, wie z.B. Mühlen. Dies hat den Vorteil, dass aus dem durch Zerkleinerung erzeugten Material aufgrund homogener Korngrößen, aber unterschiedlicher Dichte von Holz und Metall- bzw. Mineralbestandteilen durch Fliehkraftsysteme, Vibrorinnen oder Windsichter, eine saubere Trennung von Holz und Nichtholzpartikeln erfolgen kann. Die gewonnenen Holzpartikel sind aber für die MDF-Faserherstellung aufgrund ihrer Geometrie nicht optimal geeignet.

Die Abtrennung von organischen Störstoffen bei der Aufbereitung von Altholz zur Herstellung von Fasern muss möglichst schon am unzerkleinerten Altholzstück beginnen und vor dem zu mahlenden Hackschnitzel oder Grobspan abgeschlossen sein. Die sorgfältige Abtrennung und Ausschleusung solcher Störstoffe hat für den Produktionsprozess von Faserplatten grundlegende Bedeutung. Ein Produktionsablauf für eine Altholzverwertung nach heutigem Stand der Technik zeigt die Abbildung 4.1 und wird im Folgenden kurz beschrieben.

Für Rest- und Altholz sowie Rinden werden Aufbereitungsanlagen mit unterschiedlicher Maschinenausstattung eingesetzt. Der Großvorbrecher wird mit einem Radlader oder Greifer mit der Altholzcharge beschickt. Im großvolumigen Brecher werden jede Art von Alt- und Resthölzern durch große Zerkleinerungswellen auf Stücke mit einer Länge von 100 – 500 mm vorzerkleinert. Das vorzerkleinerte Material wird anschließend durch einen Grobmetallabscheider von metallischen Bestandteilen gereinigt, um so die Standzeit der Zerkleinerungsmesser in den nachfolgenden Maschinen zu erhöhen.

In einer Sortierkabine erfolgt durch einen Mitarbeiter eine manuelle Abtrennung von Fremdstoffen, wie Plastikfolien, Textilien und Grobmaterialien. Oftmals ist hier ein weiterer Metalldetektor in das Sortierband integriert. Dieser Metalldetektor ist in seiner Empfindlichkeit auf die Erfassung von Nichteisenmetallen (NE-Abscheidung) eingestellt.

Das vorgebrochene Altholz gelangt über ein Förderband zu einem Schlagrotor, der als Feinzerkleinerer für das gewünschte Spanmaterial dient. Das vorgebrochene Gebrauchtholzmaterial wird auf eine Partikelgröße von 30 – 50 – 80 mm Länge, je nach

Maschinenauslegung und Anforderung des Kunden, zerkleinert.

Bevor das Gebrauchtholz die Spänesiebung erreicht, durchläuft es die Feineisen – Abscheidung, die zur Separation von kleinen Eisenteilen aus dem Spänestrom (Scharniere, Klammern, Nägel etc.) mittels Überbandmagnet dient. Mit der Spänesiebung wird das Material durch ein Kreisschwingsieb von Störstoffen gereinigt und die Partikel in Feianteile und Grobgut separiert (STELZER, 1994).

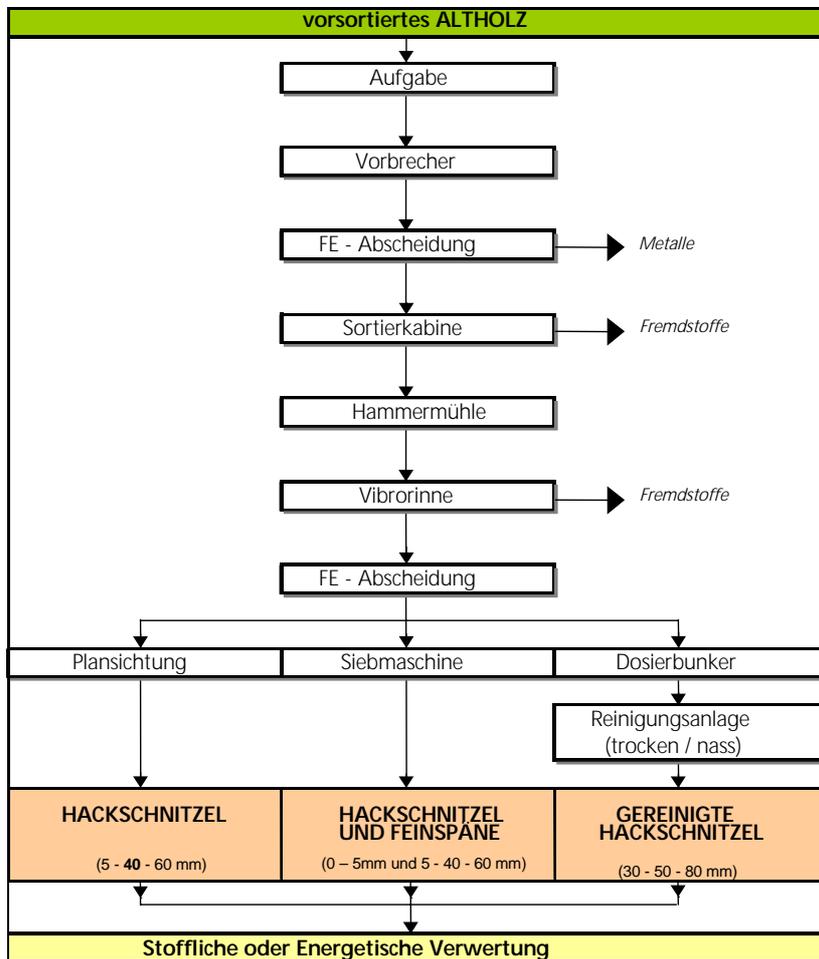


Abb. 4.1: Schematische Darstellung der Altholzaufbereitung

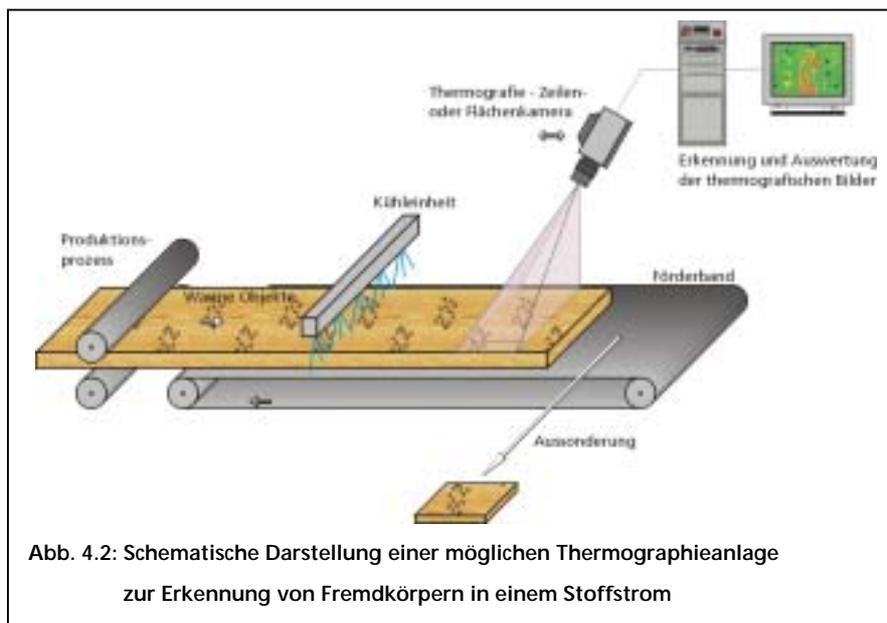
Das Grobgut kann danach zu einer weiteren Zerkleinerung zum Schlagrotor zurückgeführt werden. Das gewonnene Spanmaterial kann nun zu Platten verarbeitet werden oder je nach Anlagentyp und geforderter Spanqualität weiteren Zerkleinerungsmaschinen oder einer Partikelreinigungsanlage zugeführt werden.

4.2 Störstofferkennung mittels Thermographiekamera

Fremdkörper werden in einem Hackschnitzelstrom im Wesentlichen durch mechanische (VAUCK, 1994) und optische Methoden (HAMEY, 1998) sowie mit Hilfe der Ultraschalltechnik detektiert und anschließend aus dem weiteren Verarbeitungsprozess entfernt. Diese Techniken erkennen einen großen Teil der Fremdkörper aufgrund ihrer unterschiedlichen Größe und Masse (mechanische Siebung), Farbe (optische Sichtung) und Oberflächendichte (Ultraschall-Detektion). Einige Metalle können wegen ihrer elektro-magnetischen Eigenschaften mit einem Metalldetektor (BUTLER, 1991) detektiert werden. Aber trotz dieser vielen verschiedenen Detektions-Verfahren wird ein bedeutender Teil der Fremdkörper nicht erkannt.

Dabei handelt es sich hauptsächlich um Fremdkörper, die sich aufgrund der oben genannten physikalischen Eigenschaften (Größe / Masse, Farbe und Dichte) nicht vom übrigen Hackschnitzelstrom unterscheiden.

Um auch die Verschiedenartigkeit der Störstoffe und Fremdkörper zu erfassen, beschäftigen sich neueste Forschungen am Fraunhofer-Institut für Holzforschung (WKL) zurzeit mit der thermographischen Erfassung von Fremdkörpern. Methoden der Röntgentechnik sind wegen ihrer Strahlenbelastung nicht erwünscht, aus sicherheitstechnischen Erwägungen schwer in einen Fertigungsprozess zu integrieren bzw. mit den anfallenden Kosten von mehr als 250.000 €/Detektor zu teuer. Im Bereich der optischen Sortiertechnik ist die gleichzeitige Sortierung nach Form und Farbe mit schnellen Zeilen-Farbkameras der momentane Stand der Technik.



Dabei unterscheiden sich die auf dem Markt befindlichen Systeme nur insoweit, als dass sie unterschiedliche Beleuchtungs- und Kamerasysteme einsetzen bzw. die dabei anfallenden Informationen unterschiedlich effizient auswerten.

Bei den Beleuchtungssystemen reicht die Technik von den herkömmlichen Neon- und Halogenlampen bis zu den modernsten Halbleiterlasern. Große Unterschiede gibt es auch bei der Beleuchtungsgeometrie (z.B. glasfasergeführte Strahlengänge) und den genutzten Wellenlängenbereichen, die vom ultravioletten- bis in den nahen Infrarot-Bereich reichen.

Da die Röntgentechnik zurzeit auf dem Markt keine befriedigende Lösung darstellt, wurden erste orientierende thermographische Versuche im WKI initiiert (Abb. 4.2). Diese in der Holzindustrie bereits verschiedentlich zur Erkennung von Verleimungsfehlern in der Oberfläche (z.B. furnierte Platten) oder zur Erkennung von Schadstellen, wie Asteinschlüsse, eingesetzte Technik erwies sich als viel versprechend für die Auffindung von Fremdkörpern in einem Hackschnitzelstrom.

Bei den Voruntersuchungen handelte es sich um einzelne, präparierte Fremdkörper, die lose nicht sehr tief in den Hackschnitzelstrom gelegt wurden. Nach allgemeinen Erfahrungswerten kann eine thermographische Detektion von Fremdkörpern nicht viel tiefer in das Material hineinreichen als seine Größe ist. So kann ein 1 cm großer Fremdkörper bis ca. 1 cm unter der Oberfläche noch lokalisiert werden. Die genaue Tiefenreichweite hängt jedoch von den physikalischen Eigenschaften der einzelnen Materialien ab und muss für jeden Fremdkörper im Einzelfall getestet werden. Damit die Messeinrichtung den Stoffstrom, der aus mehreren Tonnen Material pro Stunde besteht, erfassen und detektieren kann, müsste dieser in eine dünnere Materiallage überführt werden. Für die Praxis würde das einen geringeren Durchsatz bedeuten, sofern nicht mehrere Zeilenkameras installiert würden.

Nachfolgende Probeaufnahmen dokumentieren (Abb. 4.3 und 4.4), für welche Zwecke sich die Thermographiekamera-Technik eignen kann. Abbildung 4.3 zeigt ein typisches Gemisch von Altholzspänen. Es ist visuell nur schwer möglich, die schwarzen Kunststoffpartikel von einer kaschierten Spanplatte zu unterscheiden. Die beiden Schrauben fallen dabei durch ihren metallischen Effekt schon eher auf.

Die Untersuchungen lassen vermuten, dass die beiden Komponenten eindeutig durch ihre unterschiedliche Wärmeleitfähigkeit im infraroten Wellenlängenbereich von 3-5 μm (Abb. 4.4) zu unterscheiden sind. So erscheint es möglich, Kunststoffpartikel von einer kaschierten Spanplatte und von Metallteilen zu unterscheiden und zu separieren.

Mit Hilfe einer elektronischen Datenverarbeitung könnten die physikalischen Eigenschaften der Störstoffmaterialien ermittelt werden. Bei Erkennung von Störstoffen im Stoffstrom könnten diese dann durch ein Vergleichen der erfassten Daten separiert werden. Um über die rein visuelle Erkennung von Fremdkörpern auch eine automatische Detektion unter Produktionsbedingungen zu erzielen, bedarf es noch weiterer Untersuchungen.

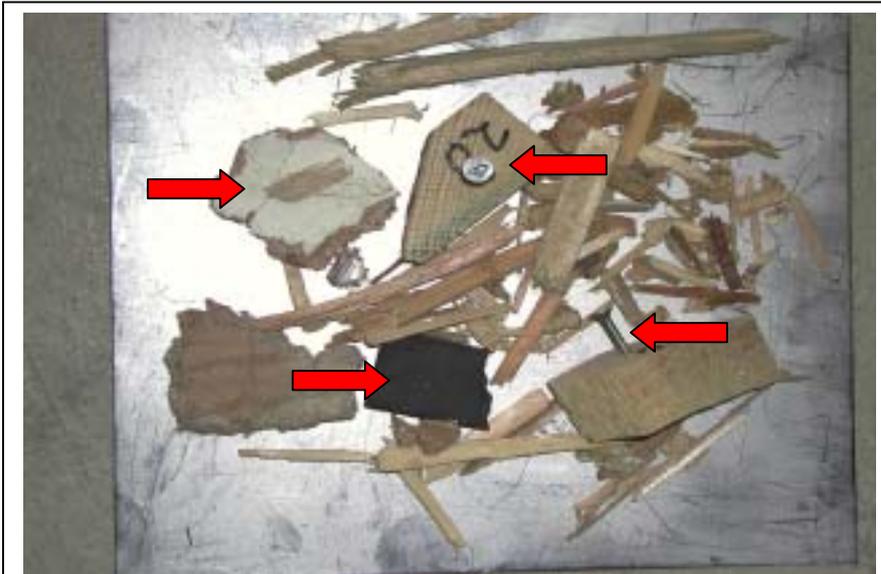


Abb. 4.3: Photographische Darstellung von Altholzspänen mit Fremdstoffen
(Metallschrauben, Kunststoffpartikel, kaschierte Spanplatte)

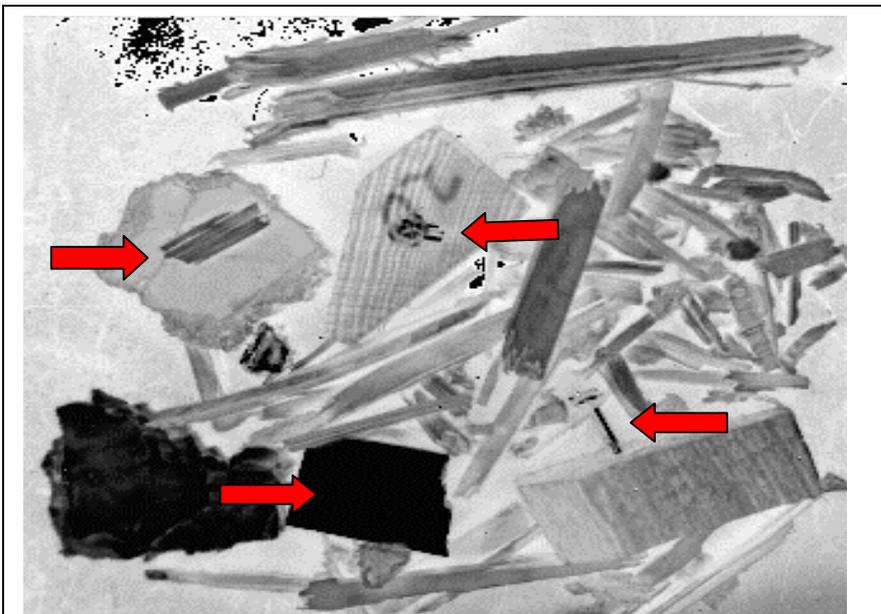


Abb. 4.4: Thermographische Darstellung von Altholzspänen mit Fremdstoffen
(Metallschrauben, Kunststoffpartikel, kaschierte Spanplatte)

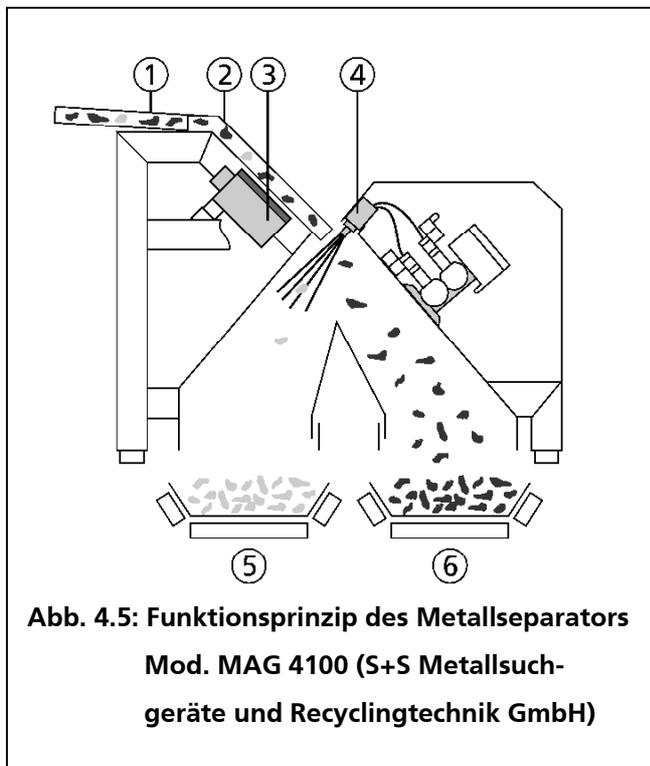
Industriell zeichnen sich erste Anwendungsbereiche ab, wie die Identifizierung und Abtrennung von Steinen, Metallen, Kunststoffen und Glas. Auch in der Nahrungsmittelindustrie sind diese ersten Versuche, z.B. zur Separierung von Schalenresten aus Mandel- und Haselnussprodukten, bereits auf reges Interesse gestoßen (MEINLSCHMIDT und MÄRGNER, 2002).

4.3 Störstofferkennung mittels Magnetabscheidern

Für die Wirtschaftlichkeit bei der MDF Herstellung spielt in der Aufbereitung und Verarbeitung von Hackschnitzeln und Spänen die zuverlässige und vollautomatische Separation aller Metallverunreinigungen eine herausragende Rolle. Nur wirklich metallfreie Hackschnitzel mindern das Risiko bezüglich des Maschinenverschleißes und bilden einen wirksamen Schutz vor Brandschäden, da auch durch kleinste Metallverunreinigungen Funken entstehen können.

Üblicherweise werden in der Holzwerkstoffindustrie vor allem Überhangmagnete zur Entfernung von Eisenmetallen und NE-Metallabscheider verwendet (HELLER, 1995). Beim ausschließlichen Einsatz von Frischholz in der Produktion ist dies sicher ausreichend. Verarbeiten Firmen neben Althölzern auch Frischholz, das gelegentlich aus Bundeswehrübungsgebieten bezogen wird, so

bedarf es einer genaueren und effizienteren Metalldetektion. Eine sehr effiziente und gute Entfernung aller Eisen- und Nichteisenmetalle aus dem Spänestrom bietet die Firma S+S mit ihrem Allmetallseparator MAG 4200 an, der hier beispielhaft genannt werden soll. Durch Gespräche mit der Holzwerkstoffindustrie konnte diese Einschätzung bestätigt werden. Das Funktionsprinzip ist in Abbildung 4.5 dargestellt und basiert darauf, dass der Spänestrom (1) gleichmäßig verteilt (wie bei der Thermographie) über eine Rutsche geführt (2) wird.



Unter dieser Rutsche befindet sich eine hochfrequente Multikanal-Detektionsspule (3), die in einzelne Segmente unterteilt ist. Passiert ein Metallteil die Spule, so ermittelt die Auswerteelektronik die exakte Position der Verunreinigung und aktiviert die richtigen Ausblasdüsen (4). Das Metallteil (5) wird dadurch sicher und mit geringstem Verlust an Holzpartikeln ausgeblasen. Die separierten Hackschnitzel (6) können mittels Förderband der Produktion, einer thermischen Verwertung oder einer weiteren Metaldetektion zugeführt werden.

4.4 Störstofferkennung in der Holzwerkstoffindustrie

Für die Sicherstellung des Produktionsablaufes durchläuft das angelieferte Rohstoffmaterial, bevor es weiter verarbeitet wird, verschiedene Sichtungen und Siebungen. An dieser Stelle soll auf eine Aufzählung und Beschreibung der technischen Möglichkeiten verzichtet und daher nur auf die einschlägige Literatur hingewiesen werden (DEPPE und ERNST, 2000; KEHR, 1977; LAMPERT, 1966). In diesem Abschnitt soll vielmehr auf die Probleme, die bei der Sichtung von Störstoffen entstehen können, eingegangen werden.

Mit unterschiedlichen Siebdecks können die Störstoffe vom übrigen Materialfluss ohne größeren Aufwand herausgeschleust werden. Dabei werden Fremdkörper aufgrund ihrer unterschiedlichen Größe und Masse entfernt.

Beim Einsatz von Frisch- und Gebrauchtholz können Eisen- und NE-Metalle nach heutigem Stand der Technik mittels Überhangmagneten oder durch Metallseparatoren, wie im Abschnitt 4.3 beschriebenen, mühelos separiert werden. Die Hersteller von Aufbereitungsanlagen bieten hierzu komplette Konzepte an. Störstoffe wie Gummi, Styropor, Teerpappen oder PVC, die dem Altholz anhaften, stellen z.Z. ein großes Problem bei der Aufbereitung dar. Einen neuen, momentan noch theoretischen Lösungsansatz stellt die Thermographie dar (Abschnitt 4.2). In der Industrie werden zur Trennung von Fremdstoffen die Zentrifuge und der Wirbelstromsichter eingesetzt. Durch die Zentrifugalkraft wird die Beschleunigung der Teilchen genutzt, um somit schwerere von leichteren Substanzen zu trennen (VAUCK, 2000). In Zyklonen wird der Stoffstrom mit Luft verwirbelt wobei sich, durch ihr spezifisches Gewicht bedingt, die schweren von den leichteren Störstoffen absetzen. Mit dieser Methode wird in der Industrie ein recht hoher Reinigungsgrad erreicht. Sehr feine Störstoffe (Größe < 0,3 mm) sind aber auch mit diesen Systemen schwer zu erfassen und bilden somit einen Problembereich. Eine weitere

Aufbereitung bzw. Klassierung dieser Störstoffe würde zu teuer und uneffektiv. Eine vernünftige Verwertung für dieses Material stellt, sofern vorhanden, die thermische Nutzung dar.

Durch die hier angesprochenen Aufbereitungsmöglichkeiten können im industriellen Maßstab die meisten Störstoffe entfernt werden. Lediglich Feianteile (geringe Korngröße), Kunststoffe, Styropor und vor allem Gummi, aber auch die mit dem Holz fest verbundenen Störstoffe, stellen die Holzwerkstoffindustrie beim Einsatz von Alt- und Gebrauchthölzern vor Probleme.

5 Material und Methoden

5.1 Untersuchungsmaterial für die Herstellung von Mitteldichten Laborfaserplatten

Von vier verschiedenen in Deutschland tätigen Altholzverwertern (Fa. A bis C und E) sowie von einem Holzwerkstoffproduzenten (Fa. D), der Primärhackschnitzel verarbeitet, wurden für die Untersuchungen Proben entnommen. Das Material der Fa. D wird einer ständigen Eingangskontrolle im Werk unterworfen und wurde aus diesem Grund als Referenz für die chemischen Analysen mit in den Untersuchungsrahmen einbezogen. Die Fa. D verfügt über keine Altholzaufbereitungsgeräte, sondern bezieht von regionalen Altholzverwertern das Hackspangut.

Grundsätzlich handelt es sich bei den Proben um grob gehacktes Material der in der Altholzverordnung vom 28.02.2001 unter §2 Abs. 4 beschriebenen Altholzkategorie AI. Dieses Holz soll naturbelassen oder lediglich mechanisch bearbeitet und bei seiner Verwendung nur unerheblich mit holzfremden Stoffen verunreinigt sein.

Tab. 5.1: Anlagenkonfiguration der einzelnen Altholzverwerter

Altholzverwerter und deren Anlagenkonfigurationen für das Untersuchungsmaterial				
	Fa. A	Fa. B	Fa. C	Fa. E
Bundesland	Nordrhein- Westfalen	Niedersachsen	Schleswig- Holstein	Braunschweig
Durchsatz in t/a	69.000	12.000	78.000	9.000
Anlagenkonfiguration				
Greifersortierung	x		x	x
Radladersortierung		x		
Grobbrecher	x	x	x	
Magnetabscheider I	x	x	x	
Nachzerkleinerung I			x	x
manuelle Sortierung	x		x	x
Vibrorinne	x		x	
Nachzerkleinerung II	x			
Magnetabscheider II	x		x	

Die einzelnen Firmen, deren Altholzabsatz für die stoffliche und thermische Verwertung bestimmt war, verfügen über unterschiedliche Aufbereitungsanlagen (Tab. 5.1) zur Herstellung von Hackschnitzeln. Das Altholzmaterial bestand zu einem Großteil aus Verpackungsmaterial, Kabeltrommeln, Einwegpaletten, Bauholz, Span- und Sperrholz sowie Obstkisten (Abb. 5.1 bis 5.3), welche aus den jeweiligen Regionen angeliefert wurden. Die Sortimente variierten jedoch hinsichtlich ihrer Zusammensetzung von Standort zu Standort.

Für die ersten orientierenden Versuche (Abschnitt 6.3) wurde von der Firma E reines Kiefernalt-
holz entnommen, welches lediglich auf seine Holzschutzmittelbelastung (Unterabschnitt 6.2.4.1)
hin untersucht wurde. Das Untersuchungsmaterial des Altholzverwerfers der Firma E wurde für
die erste Versuchsreihe entnommen und wird im Abschnitt 6.3 genauer beschrieben.

Von den Altholzverwerfern (Fa. A bis C) und dem Holzwerkstoffproduzenten (D) wurden jeweils
ca. 160 kg Altholz entnommen, welches analysiert und erfasst werden sollte.



Abb. 5.2 bis 5.3: Bei den Altholzverwerfern angeliefertes Altholz (Firma A, B und C)

Die Eingangsfeuchte der Hackschnitzel wurde ermittelt. Bedingt durch die Freilandlagerung wies
das Material eine durchschnittliche Eingangsfeuchte von 25% auf (Tab. 5.2), die in der üblichen
Toleranz zwischen 10% bis 30%, max. 40% lag. Für eine längere Lagerdauer des Unter-
suchungsmaterials wurde dieses schonend bei ca. 40°C bis 60°C in einem Heizofen auf eine
Holzfeuchte von ca. 4% bis 6% atro getrocknet, um ein Verschimmeln der feuchten Hack-
schnittzel zu vermeiden. Eine dadurch mögliche Veränderung der Holzeigenschaft durch
„Verhornung“ konnte dabei nicht ausgeschlossen werden. Gelagert wurden die Altholzhack-
schnittzel in PE-Säcken. Dies war nötig, da einige Untersuchungen erst zu einem späteren Zeit-
raum durchgeführt werden konnten.

Tab 5.2: Feuchten des entnommenen Probenmaterials

Mittlere Feuchte des Altholzes bei Probeentnahme [%]	
Fa. A	19,1
Fa. B	26,3
Fa. C	22,1
Fa. D	35,7
Fa. E	23,1

5.2 Vorbehandlung des Untersuchungsmaterials

Bedingt durch die unterschiedlichen Maschinenausstattungen der Altholzverwerter wurden für die Untersuchungen Späne entnommen, die von unterschiedlicher Länge und Geometrie waren und somit nur eingeschränkt für die MDF Herstellung verwendet werden konnten. Für die Überprüfung der Größenverteilung des Spangutes wurde die gesamte Menge des entnommenen Untersuchungsmaterials zuerst mit einer Allgaier Taumelsiebmaschine, Typ TSM 1200, mit vier Siebdecks in fünf Fraktionen gesichtet. Zu große Hackschnitzel wurden für die Verarbeitung zu Fasermaterial mit einer Klöckner Holzzerkleinerungsmaschine (Hacker), Typ HZM 120 x 400 H-2, zu einheitlichen Hackschnitzeln nachzerspant. Dies war nötig, da die meisten Altholzverwerter ihre Hackschnitzel zwar an die Holzverarbeitende Industrie liefern, diese aber eine weitere Sichtung und Zerkleinerung des angelieferten Materials ihrerseits durchführen.

Zum Vergleich der Untersuchungen an Altholz wurden von ca. 40 – 60 Jahre alten entrindeten Kiefernstämmen (*Pinus sylvestris*) aus dem Querumer Forst Hackschnitzel hergestellt. Für jede Versuchsserie wurden aus diesen Hackschnitzeln Referenzplatten hergestellt.

Das Ausgangsmaterial für die durchgeführten Versuche wird in den jeweiligen Abschnitten noch ausführlich beschrieben.

5.3 Beleimung des Faserstoffes

Als Bindemittel wurde für alle Laborfaserplatten ein handelsübliches Harnstoff-Formaldehydharz verwendet, das in der Industrie zur Herstellung von z.B. Möbelplatten Verwendung findet. Beleimt wurde der Faserstoff in der Blowline mit Kaurit® 407 der Firma BASF, welcher auf 50% verdünnt wurde, um nach der Beleimung 12% Festharz bezogen auf trockene Fasern zu erhalten. Lediglich in der Versuchsserie im Abschnitt 6.8 wurden unterschiedliche Bindemittel eingesetzt, die im Ergebnisteil genauer beschrieben werden.

Die Feuchte des beleimten Faserstoffes betrug 8,5%. Soweit nicht anders erwähnt, wurde auf den Einsatz eines Hydrophobierungsmittels verzichtet.

5.4 Herstellung von Laborfaserplatten aus Alt- und Frischholz

Die von Metallteilen befreiten aber z.T. mit Störstoffen behafteten Hackschnitzel wurden im Technikum des WKI unter thermo-mechanischen Bedingungen (TMP) bei einer Temperatur von ca. 150°C mit 5 bar und einer Verweildauer von 5 Minuten in einem 85 Liter großem Vorwärmer mit einem 12" –Drucklaborrefiner (Fa. Andritz Sprout-Bauer) zu Faserstoff verarbeitet. Davon abweichende Zerkleinerungsbedingungen werden in den jeweiligen Ergebnisteilen dargestellt. Nach dem Passieren des Vorwärmers, werden die Hackspäne über eine Dosierschnecke den Mahlscheiben des Refiners zugeführt. Der Mahlscheibenabstand betrug 0,1 mm, sofern im Ergebnisteil nicht anders erwähnt. Die Fasern wurden anschließend im Rohrtrockner der Blowline-Anlage beleimt und auf ca. 8% getrocknet.

Mit einer Schlagkreuzmühle wurde der gewonnene Faserstoff aufgeflufft, bevor dieser zum Faserkuchen gestreut wurde. Der Faserkuchen wurde von Hand in einen Streukasten auf ein ca. fünf Millimeter dickes Stahlblech gestreut. Mit einer hydraulischen Vorpresse erfolgte die Vorverdichtung des Faserkuchens bei einem spezifischen Pressdruck von 0,15 N/cm². Danach wurde dieser mit einem weiteren Stahlblech gleicher Dicke abgedeckt und so in die Heißpresse eingefahren. Die von der Firma Siempelkamp gebaute Heißpresse wird elektronisch gesteuert, besitzt vier Kolben, eine Ölhydraulik und eine Thermoölbeheizung. Die 16 mm dicken Laborfaserplatten wurden mit einem maximalen Pressdruck von 115 bar, das entspricht lt. Kolben-Drucktabelle der Siempelkamp-Pressen ungefähr 7 N/mm², bei einer Presstemperatur von 200°C hergestellt. Die Presszeit betrug 15 s/mm. Der Druckverlauf und die Pressdistanz sind für die Laborfaserplatten in Abbildung 5.4 exemplarisch dargestellt.

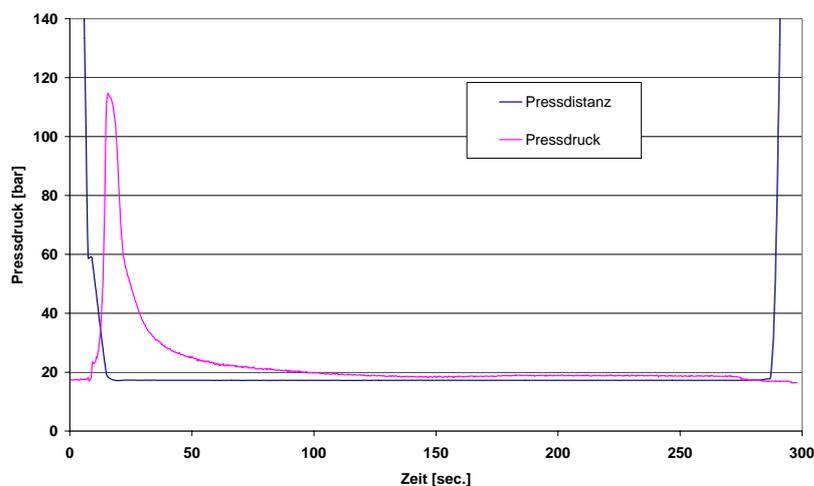


Abb. 5.4: Druckverlauf von 16 mm dicken Laborfaserplatten, hergestellt mit einer Vier-Kolben-Heißpresse von Siempelkamp

Alle hergestellten Laborfaserplatten wurden nach dem Trockenverfahren hergestellt und hatten ein Sollmaß von 510 x 510 x 16 mm³ bei einer Sollrohddichte von ca. 700 kg/m³. Die vorgegebenen Sollmaße konnten zum Teil nicht eingehalten werden. Dies lag in erster Linie daran, dass das Fasermaterial aufgrund seiner Geometrie unterschiedlich stark beim Entspannen des Faserkuchens zurückfederte.

Je Aufschlussparameter wurden zwei Platten hergestellt. In Tabelle 5.3 werden die Pressbedingungen noch einmal zusammenfassend dargestellt.

Tab. 5.3: Pressbedingungen der Laborfaserplatten

Plattenformat:	510 x 510 mm ²
Plattendicke (roh):	17 mm
(geschliffen):	16 mm
Beleimung:	UF, 12 %. BASF Kaurit [®] 407 flüssig
Plattenaufbau:	einschichtig
Streuung:	Handstreuung
Rohdichte (Soll):	700 kg/m ³
Presszeitfaktor:	15 s/mm
Pressentemperatur:	200°C
Feuchte des beleimten Faserstoffes:	8,5 %

5.5 Zuschnitt der Laborfaserplatten

Nach dem Abkühlen der gefertigten 16 mm dicken MDF-Platten wurden diese zunächst besäumt und mit einer Breitbandschleifmaschine beidseitig geschliffen.

Der Zuschnitt der Prüfkörper erfolgte nach einem definierten Zuschnittplan an einer Altendorf-Kreissäge Typ TKR-45 mit elektronischer Schnittbreitenanzeige und ist in Tabelle 5.4 dargestellt. Für alle Untersuchungsabschnitte wurde dieses Aufteilungsschema verwendet.

Tab. 5.4: Prüfplan zur Ermittlung der mechanisch-technologischen Eigenschaften mit Aufteilungsschema der hergestellten Laborfaserplatten

Prüfung	Norm	Probe
Biegefestigkeit m. E-Modul senkrecht	EN 310	1 - 2
Biegefestigkeit m. E-Modul parallel	EN 310	3 - 6
Querzugfestigkeiten	EN 319	7, 10, 13, 16, 19, 22, 25, 28, 31, 34
Abhebefestigkeit	EN 311	8, 11, 14, 17, 20, 23, 26, 29, 32, 35
Dickenquellung	EN 317	9, 12, 15, 18, 21, 24, 27, 30, 33, 36

1	3							14
	7	8	9	10	11	12	13	Rest 1
	15	16	17	18	19	20	21	Rest 2
	4							2
	Rest für Perforator *							
	5							
	22	23	24	Rest 3	25	26	27	
	29	30	31	Rest 4	32	33	34	35
	36	6						

Die zugeschnittenen Prüfkörper wurden bis zur Gewichtskonstanten im Normklima bei 20°C/65% rel. Luftfeuchte (DIN 50 014) ca. zwei Wochen gelagert, bevor sie auf ihre technologischen Eigenschaften hin überprüft wurden.

5.6 Chemische Untersuchungen am Ausgangsmaterial

5.6.1 Formaldehydgehalt nach der Perforatormethode

Der Formaldehydgehalt wird durch das Extraktionsverfahren nach DIN EN 120 (Ausgabe 1992) als Doppelbestimmung durchgeführt. Die Perforatorwerte (A- und B-Wert) wurden nicht am Fasermaterial, sondern an den aus der gefertigten Platte entnommenen Prüfkörpern mit einer Größe von 25 mm x 25 mm x Dicke ermittelt. Die zugeschnittenen Probekörper wurden auf ca. 110 g ± 0,1 g genau abgewogen und in einer Perforatorapparatur mit siedendem Toluol unter Rückfluss über zwei Stunden extrahiert. Das abgegebene Formaldehyd wurde in einer Vorlage der Gasabsorptionseinheit gesammelt und anschließend fluorimetrisch unter Einsatz der Acetylaceton-Methode bestimmt. Der Perforatorwert bezieht sich auf das Trockengewicht des Materials (mg HCHO/100 g atro Platte).

5.6.2 Bestimmung der Schwermetalle

Die gemahlene Altholzprobe wurde nach Zugabe konzentrierter Salpetersäure und Wasserstoffperoxid einem mikrowellenunterstützten Druckaufschluss unterzogen. Dies führt zu einer kompletten Auflösung der Probe. Die so erhaltene Lösung wurde in einem induktiv gekoppelten Plasma (ICP) atomisiert und mit Atomemissionsspektrometrie (AES) gegen externe Standards analysiert. Hierbei werden die gängigen Schwermetalle mit Ausnahme des Quecksilbers (Hg) bestimmt. Mittels Kaltdampftechnik und Atomabsorptionsspektrometrie (AAS) erfolgte die Analyse auf Quecksilber nach DIN EN 1483 an den gleichen Aufschlusslösungen. Diese Norm ist Bestandteil der Deutschen Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlammuntersuchung, Kationen (Gruppe E).

5.6.3 Bestimmung von Chlorid und Fluorid

Die gemahlene Holzprobe wurde einem Wickbold-Aufschluss unterzogen. Dazu wurden pro Ansatz 2 g Holzprobe eingesetzt und die Lösung anschließend auf 200 ml aufgefüllt.

Zur Bestimmung des Chlorids wurde die Lösung im Ionenchromatographen (DIN EN ISO 10304, Teil 1) mit anorganischer Säule, Firma Metrohm, Schweiz, gegen externe Standards vermessen. Die Fluorid-Bestimmung erfolgte mit ionenselektiver Lanthanfluoridelektrode, Firma Metrohm, gegen externe Standards (DIN 38405, Teil 4).

Die Ergebnisse stellen Mittelwerte von mindestens Doppelansätzen dar.

5.6.4 Bestimmung von Pentachlorphenol (PCP) und Lindan

Die Bestimmung von Pentachlorphenol (PCP) und γ -Hexachlorcyclohexan (Lindan) in Holz und Holzprodukten erfolgte mit einer akkreditierten Standardmethode des WKI mit der Bezeichnung PA-C-12. Für die Analyse von PCP und Lindan in Holz muss die zu untersuchende Holzprobe in einer Kreuzschlagmühle zu 1 bis 2 mm langen Holzspänen zerkleinert, die Substanzen aus der Holzmatrix extrahiert, im Fall des Pentachlorphenols derivatisiert und anschließend gaschromatographisch bestimmt werden.

Etwa 2 g der Späne wurden in einen 100 ml Jodzahlkolben mit Glasstopfen eingewogen. Anschließend wurden 30 ml Toluol und 0,5 ml einer 1-molaren Schwefelsäure zugegeben. Die Probe wurde dann 45 min im Ultraschallbad und im direkten Anschluss 15 h auf einem Schüttler extrahiert. Die Extrakte werden, ebenso wie die externen Standards, mit internem Standard (Tribromphenol/ α -Hexachlorcyclohexan-Lösung in Toluol) versetzt und mit Essigsäureanhydrid zu Pentachlorphenol-Acetat derivatisiert.

Pentachlorphenol-Acetat und Lindan werden in einem Gaschromatographen mit Kaltaufgabesystem und Doppelsäulentechnik mit zwei Kapillarsäulen unterschiedlicher Polarität und entsprechend zwei Elektroneneinfangdetektoren (GC/ECDs) nachgewiesen. Die internen Standards werden zur leichteren Identifizierung der Retentionszeit des PCP-Acetats bzw. des Lindans eingesetzt. Da sich der vorgegebene Grenzwert für PCP auf trockenes Material bezieht, ist zusätzlich eine Ermittlung der Holzfeuchte notwendig.

5.6.5 Ermittlung des pH-Wertes

An den Faserstoffen wurde der pH-Wert der wässrigen Auszüge wie folgt bestimmt:

Mit 60 ml Wasser wurden 2 g atro des Faserstoffes versetzt. Anschließend wurde die Suspension bei 20°C Raumtemperatur für 24 h geschüttelt. Durch Filtrieren der Suspension konnte das Filtrat erhalten werden. Mit einem pH-Meter, Firma Knick, wurde der pH-Wert des Extraktes ermittelt.

5.6.6 Bestimmung des Extraktstoffgehaltes in Heißwasser

In einem 250 ml Rundkolben mit 100 ml entionisiertem Wasser wurden 2 g atro Fasermaterial zugegeben und für 2 h unter Rückflusskühlung gekocht. Danach wurde das Probenmaterial durch getrocknete Filtertiegel abfiltriert, mit heißem Wasser gewaschen und über Nacht bei 103°C getrocknet. Der Gehalt an Heißwasserextraktion stellt die Gewichtsabnahme der Fasern dar. Der Extraktstoffgehalt in Heißwasser wurde als Doppelbestimmung an den Fasern bestimmt.

5.6.7 Bestimmung der Pufferkapazität

Für die Bestimmung der Pufferkapazität wurden 20 ml des bei der kalt- und heißwässrigen Extraktion der Fasern gewonnenen Filtrats mit 0,01 mol/l NaOH-Lösung bis zum Neutralpunkt titriert. Für die Titration wurde ein Titriersystem der Firma Schott, bestehend aus einer Kolbenbürette (Modell T 110), einem Titration Controller (Modell 1200) und einem Wechselaufsatz (Modell TA 20), verwendet. Aufgrund folgender Beziehung läßt sich die Pufferkapazität für die kalt- und heißwässrigen Extrakte berechnen:

Kaltwasserextrakte: 1 ml verbrauchte 0,01 mol/l NaOH-Lösung entspricht
1,5 mmol NaOH / 100 g atro Fasern

Heißwasserextrakte: 1 ml verbrauchte 0,01 mol/l NaOH-Lösung entspricht
2,5 mmol NaOH / 100 g atro Fasern

5.6.8 Abgabe und Gehalt an flüchtigen Säuren

Die Bestimmung der Abgabe flüchtiger Säuren aus den Faserstoffen erfolgte durch Gewinnung der Absorptionsflüssigkeit und wurde nach der WKI-Flaschen-Methode (ROFFAEL, 1975 und 1989) durchgeführt. Hierzu wurden etwa 2 g atro Fasern in einem Teefilter eingewogen und in eine 500 ml fassende Polyethylenflasche (WKI-Flasche), die 50 ml entionisiertes Wasser enthält, befestigt. Die dicht verschlossenen Polyethylenflaschen wurden für einen Zeitraum von 24 h bei 40°C gelagert, wobei sich eine relative Luftfeuchte von 100% einstellen konnte. Nachdem die WKI-Flaschen abgekühlt waren, wurde die emittierte Ameisen- und Essigsäure in der Absorptionslösung ionenchromatographisch bestimmt.

Außerdem wurden die bei der kaltwässrigen Extraktion der Faserstoffe gewonnenen Filtrate auf ihren Gehalt an Formiat- und Acetationen untersucht. Die in den Filtraten vorhandenen Gehalte an Formiat- und Acetationen wurden ionenchromatographisch bestimmt (Ionenchromatograph Fa. Dionex, Mod. DX-100). Für die Untersuchungen wurden je Aufschluss 5 g atro Fasermenge in einem 500 ml Jodzahlkolben mit Normschliff mit 150 ml entionisiertem Wasser versetzt. Der anschließend verschlossene Kolben wurde mit der Fasersuspension bei 20°C für 24 h geschüttelt.

Die abgegebenen flüchtigen Säuremengen (Doppelbestimmung) wurden wie folgt berechnet:

$$y = \frac{c_{(Absorption\text{Lösung})} \cdot 50 \cdot 100}{1000 \cdot m_{(Fasern)}}$$

Dabei ist:

y	Abgegebene Menge an flüchtiger Ameisensäure bzw. Essigsäure, berechnet als Formiat- und Acetationen in mg/100 g atro Fasern
$c_{(Absorption\text{Lösung})}$	Konzentration (ppm) in der Absorptionslösung
$m_{(Fasern)}$	Masse (g) der atro Fasern

5.6.9 Vorbehandlung der Hackspäne mit Na_2SO_3

Bei der industriellen Herstellung von CTMP-Holzstoffen werden vorrangig Na_2SO_3 -Lösungen (Natriumsulfit) eingesetzt. Daher wurden in einer abschließenden Versuchsreihe in Anlehnung an die Herstellung von Halbzellstoffen und Zellstoffen vor dem Zerfaserungsprozess, die Alt- und Frischholzhackspäne mit einer Natriumsulfitlösung vorbehandelt.

Dem zu verarbeitenden Material wurde mit einem Flottenverhältnis von 1:2 (1 Teil Material und 2 Teile Lösung) eine 5%ige Na_2SO_3 -Lösung, bezogen auf atro Holz, zugegeben. Nach einer 24-stündigen Lagerung der Hackspäne in einer Wanne stellte sich die Holzfeuchte von ca. 140% ein.

Aus diesen vorbehandelten Hackspänen wurden in der Laborrefineranlage bei 180°C Aufschlusstemperatur und einer 3-minütigen Verweildauer im Vordämpfer Faserstoff hergestellt.

5.6.10 Bestimmung des Sandgehaltes

Der Sandgehalt wurde als Dreifachbestimmung an unbeschichteten MDF vorgenommen. Hierzu wurden einzelne Proben herausgeschnitten und zur Veraschung in ca. 6 mm breite Stücke zerkleinert. Etwa 50 g (atro) je Plattenprobe wurden auf 0,01 g genau eingewogen und in Platintiegel auf einem Schnellverascher vorverascht. Zur Trocknung wurden die Platintiegel zuvor in einem Muffelofen bei 550°C für eine halbe Stunde gestellt und anschließend gewogen. Die Plattenstücke im Platintiegel wurden senkrecht in den Tiegel gestellt, um so die Luftzufuhr und die Verbrennungsgasabfuhr zu verbessern. Nach Beendigung der Rauchentwicklung, wurden die Proben für zwei Stunden bei 550°C in den Muffelofen gestellt. Danach wurde die Asche ausgewogen und mit 20 ml halbkonzentrierter Salzsäure versetzt und anschließend aufgekocht. Nach Erkalten wurde die Lösung vorsichtig dekantiert, ohne den Bodensatz mit auszugießen.

Anschließend wurden die Tiegel noch dreimal mit destilliertem Wasser gefüllt und jeweils nach einer Ruhepause von 10 min dekantiert, um alle löslichen Bestandteile zu entfernen. Für die Bestimmung des Sandgehaltes werden dann die Proben noch einmal für 10 min im Trockenschrank bei 120°C vorgetrocknet und anschließend im Muffelofen bei 550°C getrocknet. Die Bestimmung der Sandgehalte an Hackschnitzeln etc. erfolgte analog.

5.7 Untersuchungen an Faserstoffen

5.7.1 Bestimmung des Wasserrückhaltevermögens (WRV-Wert) von MDF-Fasern

Die Bestimmung des Wasserrückhaltevermögens (WRV), basiert auf dem Prinzip, dass Faserstoff mit einem Überschuss an Wasser (Quellmittel) bei einer festgesetzten Lagerungszeit versetzt und danach mit Hilfe einer Zentrifuge abgeschleudert wird. Hierbei bleibt hauptsächlich das Quellwasser in der Zellwand zurück. Die Methode erlaubt es, auf einfache Weise und in kurzer Zeit Quellungsänderungen an Zell- und Faserstoffen quantitativ zu erfassen. Die Bestimmung des Wasserrückhaltevermögens erfolgte in Anlehnung an das Merkblatt IV/33/57 vom Verein der Zellstoff- und Papier-Chemiker und -ingenieure (vgl. HÖPNER et al., 1955).

Pro Versuch wurden 8 Parallelbestimmungen durchgeführt. Die Berechnung des Wasserrückhaltevermögens (WRV-Wert) erfolgt nach folgender Gleichung:

$$\text{WRV – Wert (\%)} = \frac{m_{(\text{nass})} - m_{(\text{atro})} \cdot 100}{m_{(\text{atro})}}$$

Dabei ist:

WRV-Wert = Wasserrückhaltevermögen des Faserstoffes in %

m (nass) = Masse der feuchten Fasern in g

m (atro) = Masse der atro Fasern in g

5.7.2 Benetzbarkeit von Prüfblättern

Eine wichtige Voraussetzung für die Herstellung von Holzwerkstoffen ist eine ausreichende Benetzung der Holzoberfläche mit Bindemittel bzw. dem Klebstoff. Eine Charakterisierung der Benetzung ist aufgrund der vielen Ungleichmäßigkeiten der Holzoberfläche schwierig.

Für die Charakterisierung der Fasern aus Kiefernfrischholz und aus reinem Kiefernaltholz wurden Prüfblätter im Papierlabor des WKI hergestellt, um die Benetzbarkeit der Fasern zu bestimmen. Bindemittel mit allzu hoher Viskosität benetzen schneller als solche mit niedriger Viskosität. Abbildung 5.5 zeigt modellhaft das Benetzungsverhalten von hoch- und niedrigviskosen Bindemitteln. Die Prüfblätter wurden zu 50 Gew.-% aus dem jeweilig zu prüfenden Faserstoff und zu 50 Gew.-% eines Sulfatzellstoffes hergestellt, da sich aus den Altholzfaser allein kein Blatt herstellen ließ. Für die Bestimmung der Benetzbarkeit wurden jeweils 25 µl einer wässrigen, 0,1%igen Anilinblau-Lösung auf die Oberfläche der Prüfblätter gegeben. Es wurde immer die „rauhe“ Prüfblattseite benetzt, d.h. die dem Sieb zugewandte Seite. Das Prüfblatt wurde während der Prüfung in der Weise gelagert, dass die zu benetzende Fläche keinen direkten Kontakt zur Unterlage hatte (waagrecht unterbaut). Gemessen wurde das Zeitintervall von der Aufgabe des Anilinblautropfens bis zu seinem vollständigen Eindringen in das Prüfblatt (kurze Zeiten = bessere Benetzbarkeit). Aus jeweils 10 Einzelmesswerten wurde der arithmetische Mittelwert (in Sekunden) gebildet.

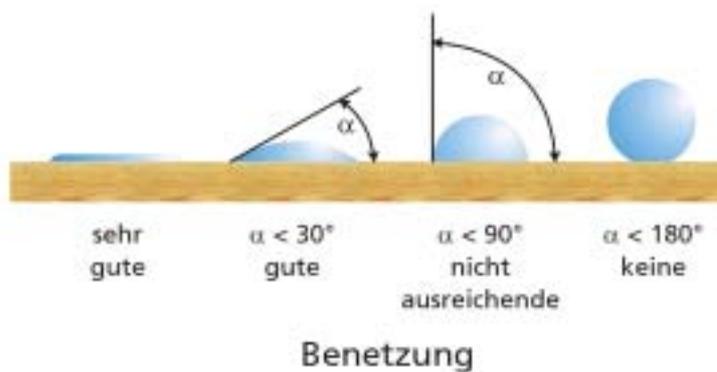


Abb. 5.5: Benetzungsarten von Flüssigkeiten auf Holzoberflächen

5.7.3 Faserlängenmessung mit rechnergestützter Mikroskop-Bildverarbeitung

Für eine vergleichende Charakterisierung der Fasern aus Frisch- und Altholz wurden Kiefernfrischholzhackschnitzel und Kiefernaltholzhackschnitzel verwendet. Die Herstellung der Fasern aus den genannten Hackschnitzelsortimenten erfolgte in der Laborrefineranlage des WKI. Die Projektion und Vermessung der Fasern wurde wie folgt durchgeführt:

Für die Analyse wurden repräsentative Faserstoffproben mit 0,2% Basacrylbrillantrot in Ethanol angefärbt. Über einen Glasfaserrundfilter wurde anschließend die überschüssige Farbe mit destilliertem Wasser ausgespült. Aus dem eingefärbten Faserstoff wurden jeweils einige Fasern auf einen Objektträger gelegt und mit einem Deckgläschen abgedeckt. Zwischen Objektträger und Deckgläschen wurden einige Tropfen Glycerin eingegossen. Das Bildfeld des Zeiss Axioplan Durchlichtmikroskops (Größe etwa 5 mm x 4 mm) wurde mit einer Videokamera zu 736 x 574 Pixel großen Bildern digitalisiert, was einer Längenauflösung von etwa 7 µm pro Pixel entspricht. Die Faserlängen wurden bestimmt, indem die einzelnen Fasern am Bildschirm mit der Maus jeweils durch den Polygonzug approximiert und dessen Länge in eine beschreibende Statistik übernommen wurde. Dazu wurde die Bildanalysesoftware der Firma Matrox Inspektor eingesetzt. Im Grundsatz entspricht die Arbeitsweise der üblichen Vorgehensweise eines Linienverfolgungsalgorithmus bei einer automatischen Bildanalyse von lang gestreckten konkaven Objekten. Die automatische Linienverfolgung versagt jedoch bei nicht ausreichend vereinzelt Fasern oft an Kreuzungen und Verzweigungen. Daher wurde die manuelle Vorgehensweise gewählt.

5.7.4 Bestimmung des Defibrator-Wertes

Die Defibrator-Werte wurden an der Universität Hamburg mit dem Gerät MFG No. 1202 ermittelt. Dazu wurden pro Messung 128 g Faserstoff eingewogen und mit 10 l Wasser versetzt. Die so aufgeschlagene Suspension wurde in die Füllkammer geleitet und konnte durch Lösen des Sperrhahnes abfließen. Das Fasermaterial wird durch ein am Boden befindliches Sieb gesammelt, während das Wasser abfließen kann. Nach Öffnung des Sperrhahnes wird der Durchlauf des Wassers in Sekunden gemessen. Die Dauer der Messung richtet sich nach der Faserbeschaffenheit und -zusammensetzung.

5.7.5 Mikroskopische Aufnahmen von Alt- und Frischholzhackspänen und dem daraus hergestellten Faserstoff

Zur morphologischen Charakterisierung der Alt- und Frischholzhackspäne sowie des daraus hergestellten Fasermaterials aus unterschiedlichen Aufschlussverfahren, wurden von ausgewähltem repräsentativen Probenmaterial makroskopische und mikroskopische Aufnahmen angefertigt. Die Proben wurden auflichtmikroskopisch mit einem Zeiss Axioplan Mikroskop im Hell- und im Dunkelfeld untersucht und mit einer Digitalkamera Progress C14 aufgenommen. Zur Auswertung der Bilder stand das analySiS[®] PC-Programm der Firma Soft Imaging System GmbH zur Verfügung. Teilweise wurde die Funktion EFI verwendet, mit der bis zu 10 Bilder aus verschiedenen Bildebenen ineinander gerechnet werden, um die Tiefenschärfe der Bilder zu erhöhen.

5.7.6 Faserfraktionierung nach Bauer-McNett

Holzwerkstoffe, wie MDF und verwandte Produkte (Papier, Karton), die mit Hilfe mechanischer Zerfaserungsverfahren aus Holz gewonnen werden, bestehen aus einem Gemisch unterschiedlich strukturierter Faserbestandteile. Neben unterschiedlicher Länge der Fasern erhalten sie, durch bestimmte Faserlängenverteilung gekennzeichnet, häufig nicht ausreichend zerfaserte Bestandteile, wie Faserbündel oder Staub und Feinanteile.

Eine Charakterisierung der Fasern eines Holzwerkstoffes kann dadurch vorgenommen werden, dass der Faserstoff in Suspension mit Hilfe von Sieben in Fraktionen aufgeteilt und anschließend deren Massenanteile bestimmt werden.

Die Bestimmung der Faserfraktionen erfolgte mit einem Bauer-McNett Gerät der Firma Lorentzen & Wettre mit unterschiedlichen Siebeinsätzen (Tab. 5.5). Hierzu wurden genau 11 g atro Faserstoff eingewogen und in Wasser eingerührt. Bei einer Fraktionierzeit von 20 Minuten wurde die Fasersuspension über die einzelnen Kaskaden geleitet.

Tab 5.5: Eingesetzte Siebe, definiert nach int. Standard ISO 3310/1 – 1982, Nebenreihe R 40/3

Lichte Maschenweite (Sollwert) mm	Drahtdurchmesser (Empf. Wert) mm	mesh
1,180	0,630	16
0,600	0,400	30
0,150	0,100	100
0,075	0,050	200

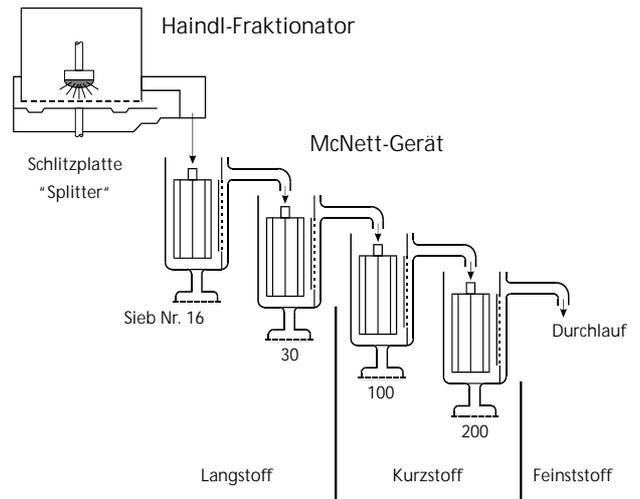


Abb. 5.6: Prinzipieller Aufbau einer Fraktionier-einrichtung nach Bauer McNett

Das Messprinzip basiert auf den Siebrückständen der einzelnen Fraktionierzellen (Abb. 5.6). Das an den einzelnen Sieben zurückgebliebene Fasermaterial wurde abgespült und anschließend in Fritten überführt. Danach wurden die Fraktionen bis zur Gewichtskonstanten getrocknet und deren Massenteile gravimetrisch bestimmt. Daraus lassen sich die prozentualen Verteilungen der einzelnen Fraktionen errechnen (GÖTTSCHING, 1986).

5.8 Bestimmung der technologischen Eigenschaften der Faserplatten

5.8.1 Physikalische und mechanisch-technologische Eigenschaften

Für die Bestimmung der physikalisch-technologischen Eigenschaften wurden aus jeweils zwei Laborplatten nach einer Klimatisierung bei 20°C/65% rel. Luftfeuchte folgende Platteneigenschaften ermittelt:

Rohdichte DIN 52 361 bzw. EN 323

Biegefestigkeit EN 310

Biege-E-Modul EN 310

Querzugfestigkeit EN 319

Abhebefestigkeit in Anlehnung an EN 311

Feuchte EN 322

Dickenquellung DIN 52 364 und EN 317

Wasseraufnahme in Anlehnung an DIN 52 351

5.8.2 Rohdichteprofilmessung

Zur Messung der Rohdichteprofile wurde das 1975 im Fraunhofer-Institut für Holzforschung, Braunschweig (WKL), in Zusammenarbeit mit dem Institut für Strahlenbotanik, Hannover, entwickelte Dichteprofilmessgerät verwendet (MAY et al., 1976; RANTA und MAY, 1978). Das Gerät, welches aus einer automatischen Messeinrichtung besteht, arbeitet mittels Gammastrahlen und besitzt gegenüber vorher angewandten Bestimmungsmethoden (KEYLWERTH, 1958; PLATH, 1971; PLATH und SCHNITZLER, 1974) vor allem die Vorteile des höheren Auflösungsvermögens, der größeren Genauigkeit und des geringeren manuellen Aufwandes.

Beim Zerfall von Atomkernen entstehen γ -Strahlen, die sich als elektromagnetische Wellen mit Wellenlängen kürzer als die der Röntgenstrahlen ausbreiten. Für die untersuchten Laborfaserplatten wurde das Radionuklid Americium (^{241}Am) mit einer Gammaenergie von 60 keV als Strahlenquelle und ein NaJ (Tl)-Scintillationszähler als Detektor benutzt. Hält man in den Strahlengang einen Stoff, so registriert der Detektor eine Schwächung der Impulse. Die Probe wird mit einem Schlitten am Strahlengang in Schritten von je 0,1 mm vorbeigeführt.

Durch eine vorgegebene Messzeit von 2 sec. je Schritt wurde die Impulsrate ermittelt. Die Industrie setzt seit vielen Jahren Anlagen mit höheren Messkapazitäten ein (BOEHME, 1992).

5.8.3 Bestimmung des Fremdstoffanteils im Untersuchungsmaterial

Bei den hier durchgeführten Untersuchungen wurde das Altholzmaterial für eine genaue Ermittlung von Span- und Störstofffraktionen quantifiziert. Es galt somit zu überprüfen, ob die Entsorger die Qualitätsanforderung A1 einhalten.

Zur Fraktionierung der Altholzspäne wurden diese über ein Allgaier Taumelsieb, Typ TSM 1200, in folgende Fraktionen fraktioniert:

Altholzspanfraktion < 0,6 mm

Altholzspanfraktion \geq 0,6 bis 1,25 mm

Altholzspanfraktion \geq 1,25 bis 3,15 mm

Altholzspanfraktion \geq 3,15 bis 5,0 mm

Altholzspanfraktion > 5,0 mm

Es wurde die gesamte angelieferte Altholzmenge (je Firma ca. 150 kg) fraktioniert.

Die Störstoffe der Gesamtmenge des entnommenen Materials jeder einzelnen Firma wurden aus den Altholzspanfraktionen \geq 1,25 bis 3,15 mm, \geq 3,15 bis 5,0 mm, > 5,0 mm händisch herausgesucht oder durch weitere Siebungen abgetrennt. Nachteilig erwiesen sich die feinen und kleinen Störstoffpartikel, die trotz manueller Sichtung nicht vollständig erfasst werden konnten. Die Gesamtstörstoffmenge wurde in einzelne Fraktionen wie Glas, Kunststoff, Gummi, Beschichtungsmaterial usw., untergliedert. Die Mengenanteile wurden prozentual zueinander in Beziehung gesetzt.

5.9 Chemische Analyse des Abwassers aus der Reinigung der Altholzhackspäne

Die Bestimmung der Schwermetalle in den Prozesswässern erfolgte mit der Atomemissionsspektrometrie, die mittels induktiv gekoppeltem Hochfrequenzplasma arbeitet (ICP/AES). Folgende Elemente wurden analysiert: Barium, Blei, Cadmium, Chrom, Cobalt, Kupfer, Nickel und Zink. Zu Beginn der Untersuchungen wurden die Prozesswässer über Spritzenfilter mit der Porengröße 45 µm filtriert. Zur Quantifizierung wurden Standardlösungen der betreffenden Elemente mit Konzentrationen zwischen 25 und 500 µg/l hergestellt und ebenso wie die Proben vermessen. Nachweis- und Bestimmungsgrenzen der einzelnen Elemente wurden mittels Kalibriergeraden-Methode nach DIN 32 645 ermittelt.

6 Ergebnisse / Diskussion

6.1 Untersuchungsprogramm

In der vorliegenden Arbeit soll an systematischen Untersuchungen aufgezeigt werden, ob und inwieweit sich verschiedene Altholzchargen zur MDF-Herstellung eignen. Hierzu war eine Vielzahl von Detailuntersuchungen für ein umfassendes Bild von Struktur, Aufbau und technologischen Eigenschaften des Altholzes im Vergleich zum Frischholz notwendig. Daher wurden, entgegen der üblichen Vorgehensweise, die Beschreibung der durchgeführten Untersuchungen, die Ermittlung der Ergebnisse und die Diskussion im jeweiligen Abschnitt zusammengefasst.

In den nachfolgenden Abschnitten werden grundsätzliche Eigenschaften des eingesetzten Altholzmaterials beschrieben. Durch geeignete Verfahren wurden die Störstoffe der Altholzfraktionen entfernt und anschließend hinsichtlich ihrer Zusammensetzung, Qualität und ihres Fremdstoffanteils im Vergleich zum Frischholz analysiert. Die in den darauf folgenden Kapiteln beschriebenen Untersuchungen sollen Aufschluss über die Zusammensetzung und Beschaffenheit des aus Altholz gewonnenen Faserstoffes geben.

Abschließend wurden in der Laborrefineranlage des WKI die aus dem Altholz hergestellten Hackspäne mit unterschiedlichen Dämpfbedingungen zu Faserstoff aufgeschlossen und zu Laborfaserplatten verarbeitet. Dabei wurde der Einfluss der unterschiedlichen Altholzsortimente auf die Eigenschaften der hergestellten MDF untersucht. Für die Charakterisierung der Einflussgrößen wurden unterschiedliche Zielsetzungen und Versuchsdurchführungen gewählt, die in nachfolgender Tabelle 6.1 wiedergegeben sind.

Tab. 6.1: Versuchsdurchführung der einzelnen Versuchsserien

	Versuchsdurchführung	Ziel der Untersuchung
Abschnitt 6.2	Untersuchungen am verwendeten Altholz	Ermittlung der Belastung des Altholzmaterials mit holzfremden Stoffen
Abschnitt 6.3	Herstellung von Fasermaterial aus reinem Kiefernalt- und Kiefernfrischholz	Charakterisierung des Faserstoffes bei unterschiedlichen Aufschlussparametern
Abschnitt 6.4	Für die Herstellung von Faserplatten wurden verschiedene Zerfaserungsparameter gewählt	Optimale Zerfaserungsbedingungen für Frisch- und Altholzproben
Abschnitt 6.5	Auswirkung unterschiedlicher Holzfeuchte auf die Alt- und Frischholzfasern bei MDF	Einfluss der Holzfeuchte beim Aufschlussprozess
Abschnitt 6.6	Altholzhackspäne verschiedener Altholzverwerter wurden ohne eine Hackschnitzelwäsche zu MDF verarbeitet	Unterschiede zwischen den verschiedenen Altholzchargen
	Altholzhackspäne verschiedener Altholzverwerter wurden mit einer Hackschnitzelwäsche zu MDF verarbeitet	Analyse der Auswirkung einer Reinigungsstufe
Abschnitt 6.7	Aufbereitetes Altholz wurde mit Frischholz für die Herstellung von MDF vermischt	Ermittlung der optimalen Mischung von Frisch- und Altholzhackspänen
Abschnitt 6.8	Herstellung von MDF aus Frisch- und Altholzfasern, deren Hackspäne chemisch vorbehandelt wurden	Kenntnis über technologische Eigenschaften von MDF aus chemisch vorbehandelten Hackspänen
Abschnitt 6.9	Einsatz von verschiedenen Bindemitteln zur Herstellung von MDF	Auswirkungen der Bindemittel auf die Eigenschaften der MDF

6.2 Untersuchungen am gelieferten Altholzmaterial

6.2.1 Zielsetzung

Altholzmaterial der Kategorie AI und AII, welches der stofflichen Verwertung zugeführt wird, unterliegt gewissen Qualitätsanforderungen (Abschnitt 2.1), die die Grundlage für die Qualitätssicherung von Recyclingholz bilden. Es galt folgende Fragen zu analysieren:

- Wie homogen ist das einzusetzende Hackspangut?
- Mit welchem Fremdstoffanteil muss beim Einsatz von handelsüblichem Altholz gerechnet werden?
- Welche Belastung weist das Altholz dieser Kategorien hinsichtlich der Holzschutzmittel auf?
- Wie hoch sind die Sandgehalte?
- Verbessert sich der Formaldehydgehalt durch Einsatz von Altholz?
- Mit welchen Belastungen muss beim Prozesswasser gerechnet werden?

6.2.2 Fraktionierung des Untersuchungsmaterials

Die Homogenität des Hackspangutes ist für den Zerfaserungsprozess von großer Bedeutung. Bei den hier durchgeführten Untersuchungen wurde das angelieferte Material der vier Altholzverwerter, wie unter 5.1.2 beschrieben, zuerst über eine Taumelsiebmaschine geführt, bevor eine eventuelle Nachzerspannung der groben Späne erfolgte. Je Hersteller wurden 140 kg bis 180 kg gesiebt. In Abhängigkeit der Maschenweite wurde das Material in Fraktionen von <0.6 , $\leq 0.6 - 1.25$, $\leq 1.25 - 3.15$, $\leq 3.15 - 5.0$ und >5.0 mm getrennt und fraktionsweise gewogen. Die Häufigkeitsverteilung der Hackspäne (Abb. 6.1) wird durch die Spangröße bzw. durch die Maschenweite der Siebe bestimmt.

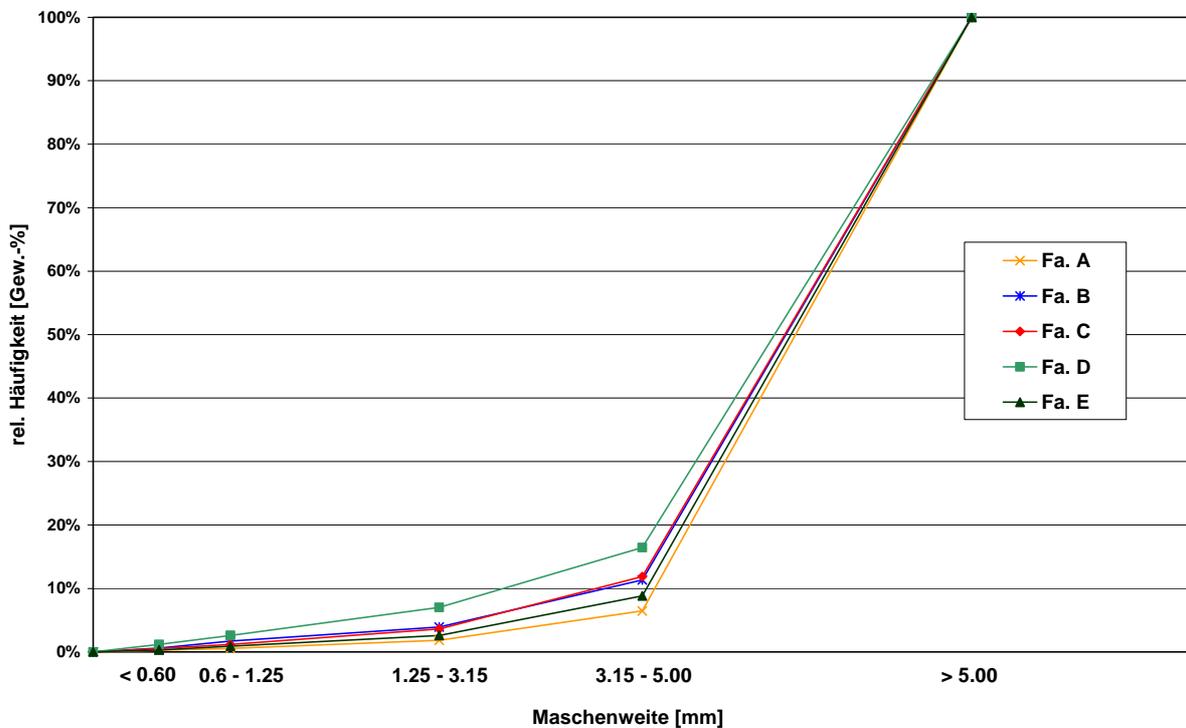


Abb. 6.3: Summenhäufigkeitsverteilung der Altholzspäne

Wie Tabelle 6.2 zeigt, gibt es zwischen den verschiedenen Herstellern Unterschiede in der Fraktion des Probenmaterials. Die mit Abstand größten Mengen blieben bei allen Lieferanten auf dem Sieb > 5 mm liegen. Die Firma A wies hier einen Anteil von 94% bezogen auf die Gesamtmenge auf, während dieser Anteil bei der Firma D 84% betrug. Entsprechend höher sind bei der Firma D die Fraktionsanteile der nachfolgenden feineren Siebfraktion. Auffallend ist der hohe Feinanteil ($< 0,6$ mm) der Firma D, der mit 2,6% deutlich höher ist als der der Firma A (0,6%) bzw. als bei der Firma E mit 0,9%. Die relativ niedrigen Feinanteile der Firmen A, C und E sind

darauf zurückzuführen, dass diese Firmen für die Hackspanaufbereitung nur Paletten und Verpackungsholz einsetzen. Die Fraktionen der Hackspäne der Firmen B und C weisen praktisch keine Unterschiede auf.

Die Hackspäne werden durch die Taumelbewegung des Siebes so gegeneinander bewegt, dass sich der anhaftende Sand und Feinanteil (kleines Spanmaterial) auf dem untersten Einsatz (<0,6 mm) ansammeln kann. Wie auch in der Holzwerkstoffindustrie wurde dieser ausgesiebte Feinanteil nicht für die Herstellung der Laborfaserplatten verwendet.

Das Gewicht der Altholzspanfraktionen ist in Prozent des Gesamtgewichtes dargestellt (Tab. 6.2) und zeigt einen auffallenden Unterschied zwischen den einzelnen Altholzsortimenten.

Tab. 6.2: Fraktioniertes Untersuchungsmaterial der Altholzverwerter [Angaben in %]

Hersteller	A	B	C	D	E
Siebfraktion > 5,0 mm ¹⁾	93,54	88,66	88,13	83,54	91,17
Siebfraktion > 3,15 mm ¹⁾	4,62	7,41	8,22	9,45	6,24
Siebfraktion > 1,25 mm ¹⁾	1,27	2,19	2,45	4,41	1,69
Feinanteil < 0,6 mm ¹⁾	0,57	1,74	1,20	2,60	0,90

1) Anteile in Massen-% bezogen auf die Gesamtmenge (atro)

Der Vorteil der Siebung von getrocknetem Material liegt darin, dass sich auch kleinere Kunststoff- und Metallteile abtrennen lassen, die sonst nur über eine Windsichtung separiert werden könnten. Unter großtechnischen Bedingungen werden heutzutage Magnetabscheider mit integrierter Bildanalyse für die Separierung von Kunststoffen und sonstigen Störstoffen eingesetzt (vergl. Abschnitt 4.3). Eine derartige Anlage stand für die geringen Altholzmengen nicht zur Verfügung. Die Störstoffe wurden daher, wie in Abschnitt 6.2.3 beschrieben, per Hand entfernt.

Die Wirkung unterschiedlicher Sortierverfahren auf die Spanqualität wurde von verschiedenen Autoren untersucht (RACKWITZ und OBERMEIER, 1962; RACKWITZ, 1963 und 1964; MAY und STEGMANN, 1966; MAY und KESERÜ, 1982) und führte dazu, dass auf größere Mengen Rest- und Altholz zurückgegriffen werden konnte, weil die von den Herstellern geforderten Spandimensionen zur Verfügung gestellt wurden. Im Gegensatz zur Aufbereitung von Frischholz ist bei der Altholzspäneaufbereitung immer mit einer höheren Staubbelastung zu rechnen, die meist durch anhaftende mineralische Stoffe sowie durch die Trockenheit des Materials hervorgerufen wird. Darüber hinaus wirkt sich die Beschaffenheit des Altholzlagerplatzes ebenfalls auf die Höhe des Sandgehaltes aus (vergl. Unterabschnitt 6.2.4.2).

6.2.3 Fremdstoffanteile im Untersuchungsmaterial

Eine Störstoffanalyse aus den im Abschnitt 6.2.2 fraktionierten Hackspänen wurde aus jeder Charge des jeweiligen Altholzverwerterers durchgeführt (Abb. 6.2). Aus den Fraktionen >5.0 mm, >3.15 mm und >1.25 mm konnten die einzelnen Störstoffe aus dem Hackschnitzelmaterial entfernt werden, während dies bei den Fraktionen ($>0.6 - 1.25$ und <0.6 mm) aufgrund der Feinheit der einzelnen Störstoffe nicht mehr möglich war. Als Störstoffe wurden Steine, Metall, Styropor, Teerpappe, Papier/Pappe, Folie, Kunststoffe, Glas, lackiertes Holz, kaschierte Platten und sonstige Störstoffe definiert. Insgesamt waren dies 11 Störstoffarten (Tab. 6.3). Eine Störstoffanalyse am Altholzmaterial der Firma E entfiel, da es sich bei diesem Material um selektiv entnommenes Kiefernaltholz handelte. Das Kiefernaltholz war lediglich mit 1,76 kg Metallanteilen verunreinigt.



Abb. 6.4: Typische Störstoffe einer Altholzcharge

Die ermittelten Störstoffanteile sind in Tabelle 6.3 zusammengestellt und zeigen die prozentualen Mengen der einzelnen Störstoffarten. Bei den Firmen A und C (eng gefasstes Altholzsortiment) konnte ein Störstoffanteil von 1,3 Gew.-% bzw. 1,7 Gew.-% ermittelt werden. Diese beiden Chargen wiesen jedoch einen sehr hohen Metallanteil (Nägel, Schrauben) auf, der bei 90,3% (Fa. A) bzw. 69,8% (Fa. C) lag. Für die Verarbeitung können diese Verunreinigungen mittels Magnetabscheider aus dem Hackspanmaterial entfernt werden.

Eine durchgeführte Metallabscheidung würde den Gesamtstörstoffanteil auf 0,1% (Fa. A) bzw. 0,6% (Fa. C) verringern. Der Metallanteil der beiden anderen Altholzverwerter war hingegen sehr niedrig und betrug bei Fa. B 5,6% und bei Fa. D 1,7%. Hierbei wirkt sich neben der Zusammensetzung des Ausgangsmaterials auch die Maschinenkonfiguration des Altholzverwerter aus. Bei der Firma D, die keine Altholzaufbereitungsanlagen besitzt, ist daher eine Wareneingangskontrolle erforderlich, um so für den Verarbeitungsprozess eine gleichmäßige Hackspanqualität zu gewährleisten.

Bei der Betrachtung der Störstoffgruppen „lackiertes Holz“ und „kaschierte Platte“ wies die Firma D mit insgesamt 86,9% den größten Anteil auf. Bei der Firma B wurde ein Anteil dieser Störstoffgruppe von 74,4% ermittelt, während dieser bei Firma A mit 9,2% gering ausfiel. Das Mittelfeld dieser Verunreinigungskategorie bildete die Firma C mit 24,5%. Hierbei darf aber nicht außer Acht gelassen werden, dass die Verunreinigungen durch beschichtete Spanplatten z. T. einen wesentlich höheren Anteil am Gewicht ausmachten als z.B. Metalle. Dies resultiert daraus, dass die Trägerplatte (meist Spanplatten aus dem Möbelbereich) mit der Beschichtung als vorgebrochene „Hackspäne“ vorlagen und komplett mit gewogen wurden. Als Ergebnis käme daher nur die Beschichtung selbst als Störstoff in Betracht. Eine vorherige Trennung der Beschichtung von der Trägerplatte wurde nicht vorgenommen. In Bezug auf die spätere Verarbeitung zu Holzwerkstoffen wurden Problemstoffe wie Styropor, Teerpappe und Folien in verschwindend kleinen Mengen ermittelt.

Tab. 6.3: Störstoffanteile der einzelnen Altholzverwerter nach Störstoffgruppen der Fraktionen >1.25 bis 5.0 MW* [Angaben in Gew.-%]

Firma	A	B	C	D
Steine	0,0	9,2	0,1	4,3
Metall	90,3	5,6	69,8	1,7
Styropor	0,0	0,0	0,0	0,1
Teerpappe	0,0	0,0	0,1	0,5
Pappe/Papier	0,5	1,8	3,6	1,6
Folie	0,0	0,1	0,3	0,5
Kunststoffe	0,1	2,7	1,2	3,1
Glas	0,0	1,8	0,0	0,8
Lackiertes Holz	7,4	39,5	9,2	23,9
Kaschierte Platten	1,8	34,9	15,3	63,0
Sonstige Störstoffe	0,0	4,3	0,3	0,4
Störstoffgewicht aller Fraktionen [g]	1731,1	1365,0	2710,2	6271,1
Altholzgesamtgewicht [g]	139100	144600	158000	181000
Gesamtstörstoffanteile	1,3	0,9	1,7	3,5

* MW = Maschenweite der Siebe

Für die Gesamtstörstoffanteile von vorgebrochenen Hölzern und Holzwerkstoffen gibt der Verband der Deutschen Holzwerkstoffindustrie e. V. (VHI) in seiner Richtlinie für die „Allgemeinen Qualitätsanforderungen an das Holz-Rohstoffmaterial für den stofflichen Einsatz in der Holzwerkstoffindustrie“ einen max. Anteil von 2% an.

Mit Ausnahme der Firma D (3,5 Gew.%) wurden von allen anderen Altholzverwertern die geforderten Grenzwerte eingehalten. Würde bei der Störstoffgruppe „kaschierte Platte“ die Trägerplatte vom Schichtstoff entfernt werden, würde sich der hohe Anteil von 63% (Fa. D) dieser Störstoffgruppe und damit auch der Gesamtstörstoffanteil verringern.

6.2.4 Chemische Analysen

6.2.4.1 Analyse auf Holzschutzmittel

Bei der Bestimmung der Holzschutzmittel am Untersuchungsmaterial wurde darauf geachtet, dass es sich um eine repräsentative Probenentnahme und die damit verbundene Probenaufbereitung handelt (MARUTZKY, 2000). Der Gesamtchlorgehalt der Gebrauchtholzproben wurde nach dem Wickbold-Aufschluss bestimmt.

Die Ergebnisse der Holzschutzmittelbelastung des für die Untersuchungen zur Verfügung gestellten Altholzes sind in Tabelle 6.4. zusammengefasst. Die Chlorwerte lagen für die entnommenen Sortimente deutlich unter dem RAL-Zuordnungswert von 600 mg/kg Trockensubstanz. Auch bei den Problemstoffen wie Fluor und Quecksilber konnten die Grenzwerte eingehalten werden. Zusätzlich wurden Bor und Lindan analysiert, die nach heutiger AltholzV (ab 1.3.2003) nicht mehr Gegenstand der Untersuchungen für Altholzchargen sind. Vor allem bei älteren Gebrauchthölzern könnten diese Wirkstoffe durch Holzschutzmittel eingebracht worden sein. Alle Hackspänesortimente der verschiedenen Firmen hatten bei Cadmium, Kupfer und Lindan Werte, die unterhalb der Nachweisgrenze lagen. Lediglich das stark mit Störstoffen behaftete Material der Firma D wies für Blei und Chrom leicht erhöhte Analysewerte auf. Dabei kann es sich aufgrund der entnommenen Probenzusammensetzung oftmals um ein einzelnes, behandeltes Holzstück handeln.

Die qualitative Ergebnisbetrachtung zeigte bei allen ermittelten Parametern, dass eine gewisse Schwankungsbreite innerhalb des Untersuchungsmaterials zu verzeichnen war. Eine vom Bundesverband der Deutschen Entsorgungswirtschaft e.V. (BDE, 2000) in Auftrag gegebene Studie konnte dies ebenfalls belegen.

Tab. 6.4: Chemische Holzschutzanalyse des entnommenen Altholzmaterials

Bestimmung	Einheit	Grenzwerte gem. AltholzV vom 15.08.02 (mg/kg Trockenmasse)	Fa. A	Fa. B	Fa. C	Fa. D	Fa. E
Prüffeuchte	%		19.0	6.3	9.0	6.6	5,5
Arsen (As)	mg / kg	2	0.4	5.5	<NWG	< NWG	0,0
Kupfer (Cu)	mg / kg	20	3.7	10.2	3.6	7.5	1,5
Quecksilber (Hg)	mg / kg	0.4	<NWG	<NWG	<NWG	< NWG	0,1
Blei (Pb)	mg / kg	30	3.1	10.8	5.6	33.5	0,4
Cadmium (Cd)	mg / kg	2	<NWG	1.2	<NWG	< NWG	0,2
Chrom (Cr)	mg / kg	30	2.0	19.4	<NWG	34.7	1,1
Chlor (Cl)	mg / kg	600	169	378	129	179	8
Fluor (F)	mg / kg	100	3	11	2	15	0
Pentachlorphenol (PCP)	mg / kg	3	0.22	0.33	0.17	1,48	0,02
Bor (B)	mg / kg	-	<NWG	2.8	1.8	10.6	6,2
Lindan	mg / kg	-	<NWG	< NWG	< NWG	0.13	0,11

< NWG = kleiner Nachweisgrenze

Bei der reinen Kiefernaltholzcharge der Firma E fielen die Ergebnisanalysen der Schadstoffkonzentrationen gegenüber dem übrigen Altholzmaterial sehr gering aus. Die Ergebnisse der Bestimmung von Chlor waren mit 8 mg/kg sehr niedrig. Auch die Elemente Blei, Chrom und Kupfer wiesen Konzentrationen auf, die sich weit unterhalb der erlaubten Grenzwerte befanden.

Ein weiteres Verschleppen eventueller Schadstoffkonzentrationen in die aus Altholz hergestellten Laborfaserplatten ist aufgrund der vorliegenden Ergebnisse nicht gegeben. Verschiedene Aufbereitungsstufen wie Reinigung der Hackspäne, Zugabe von Frischholz zum Altholz oder hohe Aufschlusstemperaturen wirken eher konzentrationsmindernd auf die Schadstoffbelastung der Platte. Untersuchungen von verschiedenen Autoren über die Wiederverwendung von Altholz zeigen, dass unterschiedliche Verwertungswege möglich sind, aber die Problematik der Schadstoffe nicht außer Acht gelassen werden darf (VOß und BRINGEZU, 1993; WILLEITNER und BUCKI, 1994; MARUTZKY und STRECKER, 1998; VÖLKER, 2000).

6.2.4.2 Bestimmung des Sandgehaltes

Von den Hackspänefraktionen der einzelnen Altholzverwerter wurden von den gesiebten Fraktionen <0.6 und >0.6 bis 1.25 mm Maschenweite (vergl. Unterabschnitt 6.2.2) repräsentative Stichproben entnommen, an denen der Sandanteil bestimmt wurde. Ausschlaggebend für diese Fraktionen war es, dass der durch die Siebung erhaltene Feinanteil, bestehend aus Störstoffen, Holz- und Sandpartikeln, hinsichtlich der Sandgehalte quantifiziert werden konnte. Der an den Altholzspänen anhaftende Sandgehalt der Fraktionen >5.0, >3.15 und >1.25 ist erfahrungsgemäß deutlich geringer und wurde im Rahmen dieser Untersuchungen erst später an der hergestellten Platte ermittelt. Lediglich an dem selektiv entnommenen und sofort verarbeiteten Kiefernaltholz der Firma E wurde kein Sandgehalt bestimmt.

Beim industriellen Einsatz von Altholz für die Produktion wird bei der Spanplattenaufbereitung ein Anteil von 10 bis 12% (inkl. Feingut und Rindenanteil) der eingesetzten Menge ausgesiebt (MARTINI, 2003). Die ermittelten Asche- und Sandgehalte der Hackspänefraktionen (Tabelle 6.5) verdeutlichen, dass bei stark verschmutztem Material (Fa. B und D) durch eine erste Siebung ein Sandgehalt von bis zu 26,5% aus dem Feinanteil entfernt werden kann. Althölzer, die sich aus Monochargen zusammensetzen, weisen Sandanteile auf, die sich mit denen der Industrieangaben decken.

Tab. 6.5: Asche- und Sandgehalte von Altholzfraktionen der Altholzverwerter A bis D

Fa.	Aschegehalt [%]	Sandgehalt [%]
A	5,97	2,79
B	33,19	26,54
C	15,28	11,75
D	28,29	20,04
E	*	*

* wurde nicht bestimmt

Die unter gleichen Zerkleinerungsbedingungen, aber mit unterschiedlichen Vorbehandlungen hergestellten Altholzfaserplatten wiesen im Vergleich zu den abgesiebten Fraktionen geringere Asche- und Sandgehalte auf. Tabelle 6.6 zeigt, dass Altholzfaserplatten, die aus dem verwendeten Material der Altholzverwerter A bis C mit einer Hackspänewäsche hergestellt wurden, einen um durchschnittlich 37% geringeren Sandgehalt aufwiesen als diejenigen Platten, die ohne eine Hackspänewäsche hergestellt wurden. Die Referenzfaserplatte wies einen üblichen Sandgehalt auf, der sich auch durch die Hackspänewäsche nicht veränderte.

Tab. 6.6: Asche- und Sandgehalte von Altholzfaserplatten (Fa. A bis D) im Vergleich zu einer MDF-Frischholzfaserplatte (Ref. F)

Fa.	Aschegehalt ohne Hackspänewäsche [%]	Sandgehalt ohne Hackspänewäsche [%]	Aschegehalt mit Hackspänewäsche [%]	Sandgehalt mit Hackspänewäsche [%]
A	0,53	0,04	0,47	0,03
B	0,88	0,20	0,77	0,13
C	0,57	0,08	0,49	0,04
D	0,95	0,17	1,00	0,21
E	*	*	*	*
Ref. F	0,28	0,01	0,28	0,01

* wurde nicht bestimmt

Bei den Altholzchargen der Firmen B und D, die mit einem hohen Fremdstoffanteil vermischt waren, konnten die Anforderungen an den Sandgehalt der EN 622-2 von 0,05% trotz Reinigungsstufe nicht erreicht werden. Stark verschmutzte Altholzchargen müssen vor dem Verarbeitungsprozess wesentlich intensiver gereinigt und sortiert werden als Altholz-Monochargen, die z.B. nur aus Palettenhölzern bestehen.

Durch die Einführung einer Hackspänewäsche verringern sich nicht nur die Sandgehalte, sondern auch die Aschegehalte der hergestellten Altholzfaserplatten. Der Gehalt an anorganischen Bestandteilen kann durch Veraschung ermittelt werden und weist für Hölzer der gemäßigten Zonen einen Aschegehalt von durchschnittlich 0,2 bis 0,8% auf. Die Reinigungsstufe führte bei den Firmen A bis C zu einer Verbesserung der Aschegehalte von durchschnittlich 13% gegenüber denjenigen Platten, die ohne eine Hackspänewäsche hergestellt wurden. Die ermittelten Aschegehalte des Altholzverwerterers D, wie auch die an dieser Altholzcharge ermittelten Sandgehalte, stiegen leicht an.

Aus zeitlichen und prüftechnischen Gegebenheiten bestand bei der Aufbereitung der Hackspäne zur Herstellung von Altholzfaserplatten ohne und mit einer Hackspänewäsche eine Zeitspanne von einigen Wochen. Es kann daher angenommen werden, dass die Materialentnahme stark unterschiedlich war, was sich bei der Bestimmung des Asche- und Sandgehaltes der Firma D durch einen leicht erhöhten Wert widerspiegelte.

Eine weitere Analyse sollte den Einfluss einer Beimischung von Frischholzhackspänen zu den Altholzhackspänen vor dem Verarbeitungsprozess im Hinblick auf die Sandgehalte der daraus hergestellten Altholzfaserplatten verdeutlichen.

Der Sandgehalt einer aus 100% Altholz hergestellten MDF-Platte aus Altholzmaterial der Firma C verringert sich durch Beimischen von nur 10% Frischholz zum Altholz um 37,5%, beim Materialeinsatz der Firma D um 30% (Tabelle 6.7). Eine weitere Senkung der Sandgehalte durch einen noch höheren Frischholzanteil konnte nicht erreicht werden (vergl. Abschnitt 6.6). Bei stark verschmutzten Altholzchargen (Altholzverwerter D) sollten nur maximal 25%, besser noch weniger Altholz dem Frischholz zugegeben werden. Dies würde, neben wirtschaftlichen und produktionstechnischen Überlegungen, auch den Einsatz von ca. 20% Altholz in der Spanplattenindustrie erklären. Durch Arbeiten von BOEHME (1982, 1996) und SCHRIEVER (1984) konnte gezeigt werden, wie sich der Sandgehalt in Holzwerkstoffen auf den Schneidverschleiß beim Fräsen auswirkt. Ebenso wie die Sandgehalte, führen auch Ablagerungen im Zelllumina oder der Zellwand u. a. von Kristallen, Silikaten, Phosphaten und Kieselsäuren zur erschwerten Bearbeitung des Holzes. Dies begründet auch die Skepsis gegenüber einem Altholzeinsatz in der MDF-Industrie und könnte in Zukunft ein limitierender Faktor sein, sofern keine intensiven Reinigungsstufen eingesetzt werden.

Tab. 6.7: Asche- und Sandgehalte von Altholzfaserplatten (Fa. C und D) mit Frischholzanteilen im Vergleich zu einer MDF-Frischholzfaserplatte (Ref. F)

Firma	Aschegehalt Mittelwert [%]	Sandgehalt Mittelwert [%]
C mit 100%AH	0,57	0,08
C mit 10% FH	0,54	0,05
C mit 25% FH	0,51	0,04
C mit 50% FH	0,47	0,05
C mit 75% FH	0,41	0,05
D mit 100%AH	0,95	0,17
D mit 10% FH	1,13	0,12
D mit 25% FH	1,03	0,13
D mit 50% FH	0,81	0,11
D mit 75% FH	0,59	0,11
Ref. F *	0,35	0,04

* Referenzplatte F aus Kiefernfrischholz

Neben den Sandgehalten sind in der Tabelle 6.7 die Aschegehalte aufgeführt. Ausgangsmaterial, welches mit einem höheren Verschmutzungsgrad behaftet war (Firma D), wies neben einem höheren Sandgehalt ebenfalls einen höheren Aschegehalt auf. Verschmutzungspartikel wie Kunststoffe, Steine, Glas, Folien usw. tragen hier zu diesen erhöhten Werten bei. Dies zeigt für die Praxis, wie wichtig sauberes bzw. gut gereinigtes Altholzmaterial für die Herstellung von MDF aus Altholzhackschnitzeln ist.

6.2.4.3 Formaldehydgehalt nach der Perforatormethode

Um den Einfluss des Altholzes in Bezug auf die Formaldehydabgabe der gefertigten Platten zu erfassen, wurde an den hergestellten Laborplatten einiger Versuchsserien der Formaldehyd-gehalt gemäß der Perforator-Methode nach DIN EN 120 (August 1992) als Doppelbestimmung ermittelt.

In Abbildung 6.3 sind die Ergebnisse der Formaldehydanalysen von Altholzfaserplatten am Beispiel der ohne und mit einer Reinigung verarbeiteten Alt- und Frischholzspäne aufgezeigt.

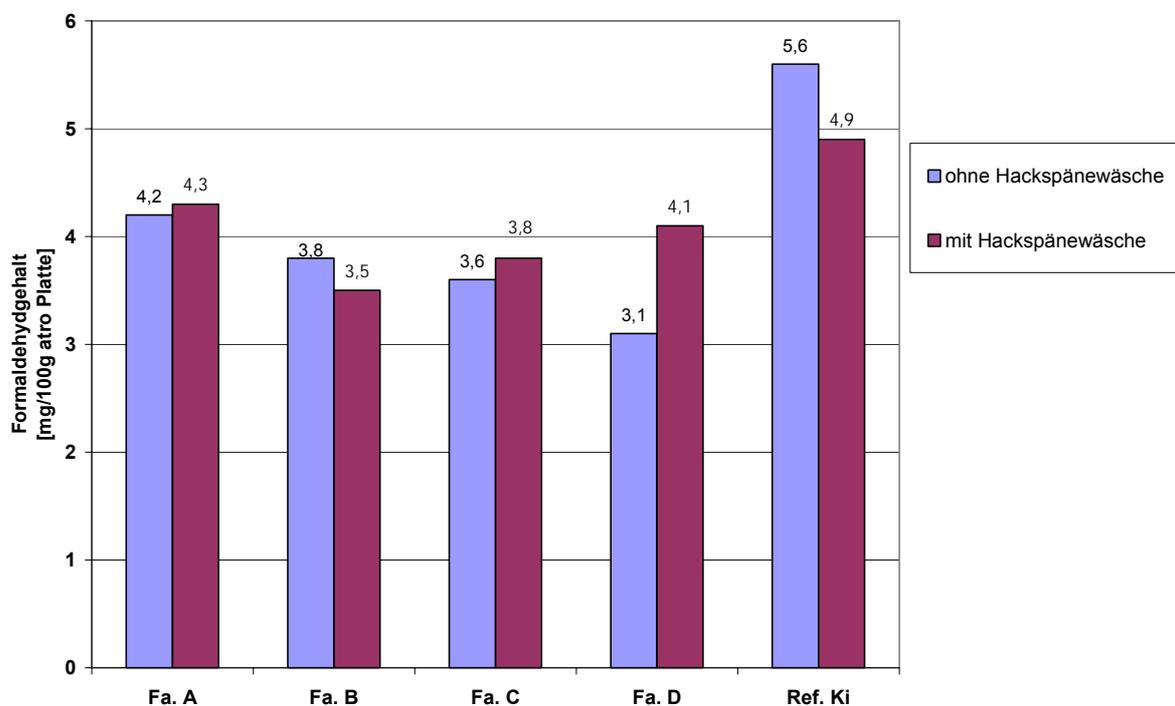


Abb. 6.3: Durchschnittlicher Formaldehydgehalt (mg/100g atmo Platte) von Laborfaserplatten, deren Hackspäne ohne und mit einer Reinigung hergestellt wurden

Deutlich erkennbar ist, dass aus Altholz hergestellte Faserplatten einen niedrigeren Gehalt an Formaldehyd aufweisen als die vergleichbaren Frischholzfaserplatten. Die Altholzfaserplatten, bei denen die Altholzspäne keine Hackspänewäsche vor dem Zerfaserungsprozess erhielten, wiesen zudem einen noch geringeren Formaldehydgehalt auf als die Altholzfaserplatten, die aus gereinigtem Material hergestellt wurden.

Wie im Abschnitt 6.7 eingehend beschrieben, wurden Altholz- und Frischholzhackschnitzel vor dem Zerfaserungsprozess gemischt. Die Abbildung 6.4 gibt die Formaldehydwerte wieder, die durch die Veränderung der Mischverhältnisse zwischen Alt- und Frischholz abgegeben wurden.

Unabhängig vom Verschmutzungsgrad und anderen Einflussfaktoren des Altholzmaterials wiesen Altholzplatten mit einem Frischholzanteil von 10% einen Formaldehydgehalt bei dem A-Wert von nur 3,3 (Fa. C) bzw. 2,7 (Fa. D) mg/100g atro Platte auf. Ein höherer Frischholzanteil von 75% führt zur Zunahme des Formaldehydpotentials auf 4,8 (Fa. C) bzw. 4,1 (Fa. D) mg/100g atro Platte. Obwohl das Material der Firma C einen geringeren Verschmutzungsgrad aufwies, zeigte es immer einen leicht höheren Formaldehydwert auf als die Proben der Firma D. Eine Zugabe von Frischholzanteilen war bei allen hergestellten Alt- und Frischholzplatten mit einem steigenden Formaldehydwert verbunden. Insgesamt lag der Formaldehydgehalt der aus Alt- und Frischholz bestehenden Faserplatten immer noch deutlich unter dem Formaldehydgehalt der reinen Frischholzplatte.

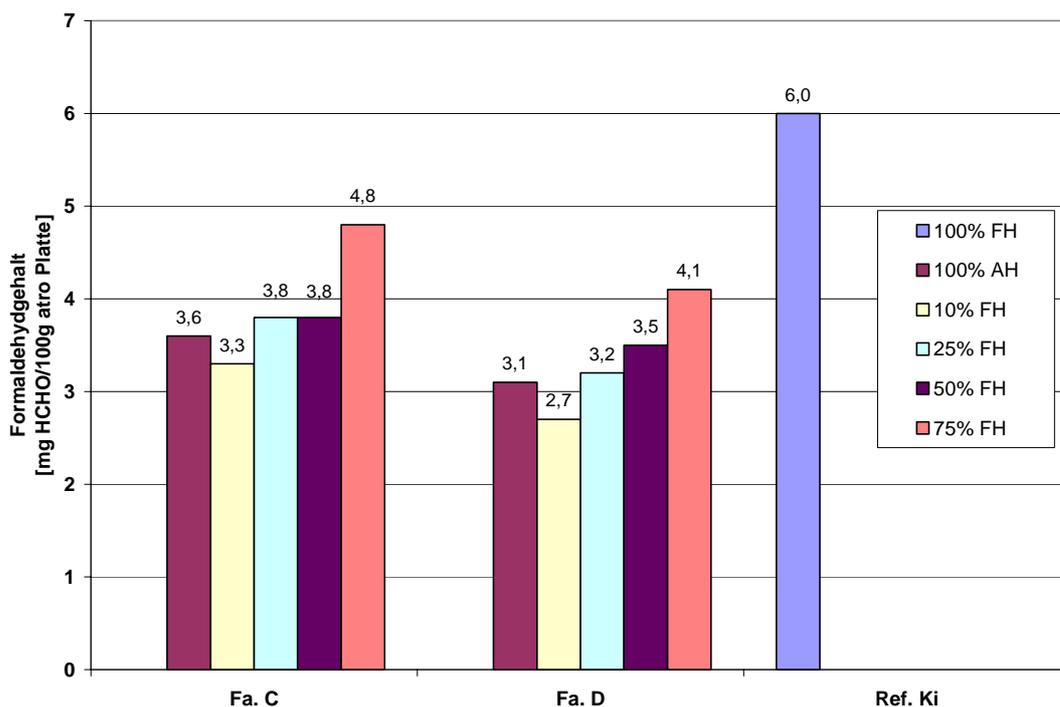


Abb. 6.4: Durchschnittlicher Formaldehydgehalt von Laborfaserplatten, deren Altholzhackspäne mit Frischholzhackspänen gemischt wurden

An phenolharzgebundenen Faserplatten, gewonnen aus Altholzspanplatten, konnte durch Untersuchungen von CONG und KÜHNE (1995) gezeigt werden, dass auch diese Faserplatten einen Perforatorwert von weniger als 5 mg/100g aufweisen.

Formaldehyd ist ein in der Natur allgegenwärtiges Stoffwechselprodukt und kann im Wesentlichen aus den Kohlenhydraten und dem Lignin entstehen (MARUTZKY und ROFFAEL, 1977; ROFFAEL, 1982). Das höhere Formaldehydabgabepotential bei den Frischholzplatten kann neben dem Lignin auch durch bestimmte Holzextraktstoffe hervorgerufen werden (SCHÄFER und ROFFAEL, 2000), welche sich durch den Lagerungsprozess und die Gebrauchsdauer des Holzes im Laufe der Zeit verringerten. Aus dem Schrifttum ist bekannt, dass sich bei thermischen Behandlungen Formaldehyd abspaltet und somit zu einer Reduzierung der Formaldehydemission beiträgt.

Durch die Lagerung von Spanplatten, die mit formaldehydreichen Harzen gebunden wurden, nimmt die Formaldehydabgabe im Vergleich zu Platten, die mit formaldehydärmeren Harzen hergestellt wurden, verhältnismäßig schnell ab. Die Abgabe verringert sich umso mehr, je länger die Platten gelagert wurden, wobei sich nach bestimmten Lagerungszeiten ein Stillstand einstellt (ROFFAEL, 1978).

Nach Untersuchungen von ÇOLAKOGLU und ROFFAEL (1992) erreichten Spanplatten über einen Lagerzeitraum von 40 Jahren ein Formaldehydniveau von E1 Spanplatten. Nach ihren Erkenntnissen haben die verwendeten Holzarten keine signifikanten Einflüsse auf die Formaldehyd-gehalte.

Die hier angesprochenen Erkenntnisse lassen sich mit den vorliegenden Ergebnissen im Hinblick auf die niedrigen Formaldehydgehalte der Altholzplatten in Beziehung setzen.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass sich Altholz mit einem geringen Verschmutzungsgrad in seinem Formaldehydabgabeverhalten ähnlich wie Frischholz verhält. Die absoluten Formaldehydwerte von Altholz liegen dabei aber deutlich unterhalb denen von Frischholz.

6.2.4.4 Schwermetalle im Prozesswasser

Neben der Holzschutzmittelbelastung können schwermetallhaltige Pigmente, die durch Beschichtungen und Lacke in Gebrauchthölzer gelangen, zu Umweltbelastungen führen. Diese Stoffe müssen quantifiziert und, sofern eine Gesundheitsgefährdung für den Menschen besteht, entfernt werden. Im Rahmen dieser Untersuchungen wurde neben der reinen Holzschutzmittelanalyse (vergl. Unterabschnitt 6.2.4.1) ergänzend die Konzentration der Schwermetalle im Prozesswasser der Altholzhackspäne, die ohne und mit einer Hackspänereinigung verarbeitet wurden, analysiert (vergl. Abschnitt 6.6). In der ersten Versuchsserie (Abschnitt 6.3) wurde das Material der Firma E verarbeitet. Von diesem Zerfaserungsprozess wurde kein Prozesswasser für die Analyse entnommen. Mit welchen Schwermetallkonzentrationen das Prozesswasser der übrigen Zerfaserungsprozesse belastet war, verdeutlicht Tabelle 6.8.

Tab. 6.8: Konzentrationen der Schwermetalle im Prozesswasser der Altholzhackspäne, die ohne und mit einer Hackspänenvorbehandlung zu MDF verarbeitet wurden

Elemente:	Co [µg/l]	Cr [µg/l]	Zn [µg/l]	Pb [µg/l]	Cu [µg/l]	As [µg/l]	Ni [µg/l]	Cd [µg/l]	Ba [µg/l]
ohne Vorbehandlung									
Fa. A	<10	<10	307	<10	<10	<10	11	<10	14,9
Fa. B	<10	13,5	283	<10	<10	14,5	<10	<10	30
Fa. C	<10	<10	76,9	<10	<10	11,6	<10	<10	<10
Fa. D	<10	11,2	101	23,5	<10	<10	<10	<10	<10
mit Vorbehandlung									
Fa. A	<10	14,1	<10	19,6	<10	12	106	<10	80,2
Fa. B	<10	10,3	<10	<10	<10	12,4	56,1	<10	55,7
Fa. C	<10	<10	<10	15,5	<10	10,5	35,6	<10	35,1
Fa. D	<10	<10	<10	<10	<101	10,9	<10	<10	<10
Ref. F	<10	28,1	<10	<10	<10	<10	61,1	<10	105

< 10 = kleiner als Nachweisgrenze

Die Bestimmung der Schwermetalle erfolgte mittels induktiv gekoppeltem Plasma/Atomemissionsspektrometer (ICP/AES), wie im Unterabschnitt 5.6.2 beschrieben und beinhaltete folgende Elemente: Cobalt, Chrom, Zink, Blei, Kupfer, Arsen, Nickel, Cadmium und Barium. Es wurde jede entnommene Probe des anfallenden Quetschwassers mit einer Doppelbestimmung analysiert. Erwartungsgemäß waren die Analysewerte vor der durchgeführten Hackspänewäsche höher als danach. Die Sortimente der einzelnen Firmen, die ohne eine Hackspänenvorbehandlung verarbeitet wurden, wiesen Zinkwerte zwischen 77 µg/l (Firma C) bis 307 µg/l (Firma A) auf.

Durch die eingeführte Hackschnitzelwäsche konnte diese Belastung entfernt werden und lag danach unterhalb der Nachweisgrenze. Die Schwermetalle Nickel und Barium waren auch ohne Vorbehandlung nicht nachzuweisen. Erst durch die Vorbehandlung stiegen die Werte an, blieben aber unterhalb des Frischholzaufschlusswertes.

Die vorliegenden Ergebnisse der einzelnen Schwermetallkonzentrationen sind hinsichtlich ihrer Konzentration sehr gering. Dies lässt sich auf die Tatsache zurückführen, dass für die Untersuchungen ausschließlich Altholzmaterial der Kategorie A1 verwendet wurde.

Unter bestimmten Voraussetzungen (Anlagenkonfigurationen) ist es möglich, Kesselspeisewasser oder Brauchwasser für andere Verwendungen zur Verfügung zu stellen. Dieser Aspekt ist bei solchen MDF-Werken von besonderem Vorteil, die in einem Werksverbund mit OSB- oder Spanplatten- bzw. Sägewerken errichtet werden. Es ergeben sich dadurch kostensparende Synergieeffekte.

Im Gegensatz zur Spanplattenherstellung fallen bei der MDF-Produktion Quetschwasser aus der Fasererzeugung und Abwasser aus dem Dampferzeuger an, die nicht oder nur zu sehr hohen Kosten über die öffentliche Kanalisation entsorgt werden können, da für das Abwasserabgabengesetz (AbwAG) das Verursacherprinzip in der Praxis zur Anwendung gebracht wird.

6.2.5 Zusammenfassung

- Bei der Hackspanaufbereitung zeigen die fraktionierten Chargen einen geringen prozentualen Feinanteil (Fa. A, C und E), deren Material sich hauptsächlich aus Paletten und Verpackungshölzern zusammensetzte.
- Bei starken Mischfraktionen (Fa. B und D) ist der Feinanteil stärker ausgeprägt.
- Bei der Ermittlung der Störstoffanteile zeigte sich, dass der Metallanteil die Hauptursache für die Verunreinigungen war. Bei stark gemischten Fraktionen (Fa. B und D) war der Anteil an beschichtetem Material wesentlich höher als bei den übrigen Sortimenten.
- Die qualitative Ergebnisbetrachtung der Holzschutzmittelkonzentration zeigte bei allen Parametern, dass eine gewisse Schwankungsbreite innerhalb des Untersuchungsmaterials zu verzeichnen war. Die Grenzwerte der Altholzverordnung wurden, bis auf kleine Überschreitungen, von allen Firmen eingehalten.

- Die Bestimmung der Sandgehalte ergab, dass diese bei stark verunreinigtem Altholzmaterial erwartungsgemäß über denen in der Industrie üblichen Mengen lagen (Fa. B und D).
- Im Allgemeinen hat Frischholz einen sehr geringen Sandanteil. Durch Zugabe von 25% Altholz zum Frischholz wird der höhere Sandanteil des Altholzes so verteilt, dass sich der Gesamtanteil auf ein Maß verringert, das als industriell üblich bezeichnet werden kann.
- Das höhere Formaldehydabgabepotential der Frischholzplatten gegenüber den Altholzplatten kann neben dem Lignin auch durch bestimmte Holzextraktstoffe hervorgerufen werden, welche sich durch den Lagerungsprozess und die Gebrauchsdauer des Holzes im Laufe der Zeit verringert.
- Bedingt durch den Materialeinsatz wiesen die vorliegenden Ergebnisse der einzelnen Schwermetallanalysen im Prozesswasser verhältnismäßig geringe Konzentrationen auf. Bei anderen Altholzkategorien müsste mit anderen Belastungen gerechnet werden.

6.3 Charakterisierung von Faserstoffen

6.3.1 Zielsetzung

Der folgende Abschnitt umfasst die Charakterisierung von Alt- und Frischholzfaser und beinhaltet folgende Fragestellungen:

- Welche Faserlängenverteilung erhält man von verschiedenen aufgeschlossenen Faserstoffen?
- Wie wirken sich die unterschiedlichen Dämpfbedingungen auf den Faserstoff aus?
- Wie unterscheiden sich die Faserlängen (-breiten) von Alt- und Frischholz bei ansonsten gleichen Aufschlussbedingungen?
- Gibt es morphologische Unterschiede zwischen Alt- und Frischholz?
- Welchen Einfluss hat die Vorschädigung des Altholzes während seiner Gebrauchsdauer auf die erzeugte Faser?
- Welche Aussagen lassen chemische Analysen zu?

Diese Versuchsreihe wurde bei Dämpfbedingungen von 3 min und 8 min mit 150°C und 180°C durchgeführt (Tabelle 6.9, S. 88).

6.3.2 Untersuchungsprogramm

Die ersten Untersuchungen an Faserstoffen dienten der Charakterisierung von Alt- und Frischholz. Dazu wurde eine vom Altholzverwerter E gelieferte reine Kiefernaltholzcharge (Abb. 6.5), die sich vorwiegend aus Obstkisten und Palettenhölzern zusammensetzte, stichprobenartig visuell und mikroskopisch auf Kiefernholz überprüft. Aus diesem Material konnte ein Metallanteil von 2,57 kg ($\pm 1,7\%$ der Gesamtmasse) separiert werden. Nach KEAYS und LEASK (1973) wird der beste Refinerholzstoff aus Hölzern mit hohem Spätholzanteil, wenigen Extraktstoffen und langen, schlanken, dickwandigen Tracheiden erzielt. Ob sich auch Altholzfraktionen für den Zerfaserungsprozess eignen, soll in den nachfolgenden Kapiteln erläutert werden. Die durch mechanische Behandlung (Mahlung) erzeugten Faserstoffe sollen hinsichtlich ihrer Parameter beschrieben (HEIKKURINEN et al., 1991) werden:

- Größenverteilung (Faserlänge, Faserbreite),
- Form (spezifische Oberfläche, Krümmung (Curl)),
- Quellvermögen, Flexibilität (Faserelastizität),
- Chemische Eigenschaften.



Abb. 6.5: Angeliefertes Altholzmaterial



Abb. 6.6: 40- bis 60-jähriges Kiefernfrischholz

Durch den Einsatz der reinen Kiefernaltholzcharge sollten höhere Verschmutzungsanteile, unterschiedliche Altholzkomponenten, verschiedene Holzarten und die damit verbundenen Strukturunterschiede weitgehend ausgeschlossen werden. Für die Herstellung des Referenzmaterials wurden aus dem Querumer Forst bei Braunschweig 40- bis 60-jährige Kiefernfrischholzabschnitte mit einem etwa 10-jährigen Kernholzanteil entnommen (Abb. 6.6). Der gewonnene Faserstoff soll als Referenzfaserstoff dienen.

Ein Teil der für die Untersuchung hergestellten Hackspäne aus Alt- und Frischholz wurde 24-Stunden in Wasser eingelagert, bevor sie dem weiteren Verarbeitungsprozess zugeführt wurden. Dabei sollten die Auswirkungen von vorgeweichten Hackspänen auf den Zerfaserungsprozess und die Zerfaserungsqualität festgestellt werden.

In der Laborrefineranlage wurde das Untersuchungsmaterial mit Aufschlusszeiten von 3, 5 und 8 Minuten bei Aufschlusstemperaturen von 150°C bzw. 180°C zu Faserstoff verarbeitet (Tab. 6.9). Der hergestellte unbeleimte Faserstoff wurde erst zu einem späteren Zeitpunkt zu Laborfaserplatten verarbeitet (vergl. Abschnitt 6.6). Die Fasern wurden getrocknet und in luftdichten „PE-Säcken“ aufbewahrt. Die einzelnen Aufschlussbedingungen sind nachfolgend wiedergegeben:

Tab. 6.9: Aufschlussparameter des Kiefernaltholzes und der Referenzkiefer zur Charakterisierung der Fasern

Frisch eingeschlagene Kiefer (Referenzprobe)			
Hackschnitzel:	Holzfeuchte vor Verarbeitung	Aufschlussstemperatur	Aufschlussdauer
ohne Wasserlagerung	85,2 %	150 °C	3 und 8 min
	85,2 %	180 °C	3 und 8 min
mit Wasserlagerung	119,5 %	150 °C	3 min
	119,5 %	180 °C	8 min
Kiefernaltholz			
Hackschnitzel:	Holzfeuchte vor Verarbeitung	Aufschlussstemperatur	Aufschlussdauer
ohne Wasserlagerung	23,1 %	150 °C	3 und 8 min
	23,1 %	180 °C	3 und 8 min
mit Wasserlagerung	147,7 %	150 °C	3 min
	147,7 %	180 °C	8 min

6.3.3 Bestimmung der Faserlängenverteilung verschiedener Faserstoffe

Die Masse der gewogenen Faserlängenverteilungen der unter verschiedenen Parametern gewonnenen Faserstoffe wurden mit dem Bauer McNett-Verfahren ermittelt. Dadurch sollte festgestellt werden, unter welchen Aufschlussbedingungen ein aus Altholz hergestellter Faserstoff die gleichen Qualitätsmerkmale aufweist wie Faserstoff, der aus Frischholz gewonnen wird.

Die prozentualen Massenanteile von Faserstoffen, die aus sortenreinen Kiefernaltholz- und Kiefernfrischholzhackspänen bei einer Aufschlussstemperatur von 150°C mit einer Dämpfzeit von 3 Minuten hergestellt wurden, sind in der Abbildung 6.7 dargestellt. Ein Teil der Hackspäne wurde nach einer vorherigen 24-stündigen Wasserlagerung bei sonst identischen Parametern aufgeschlossen.

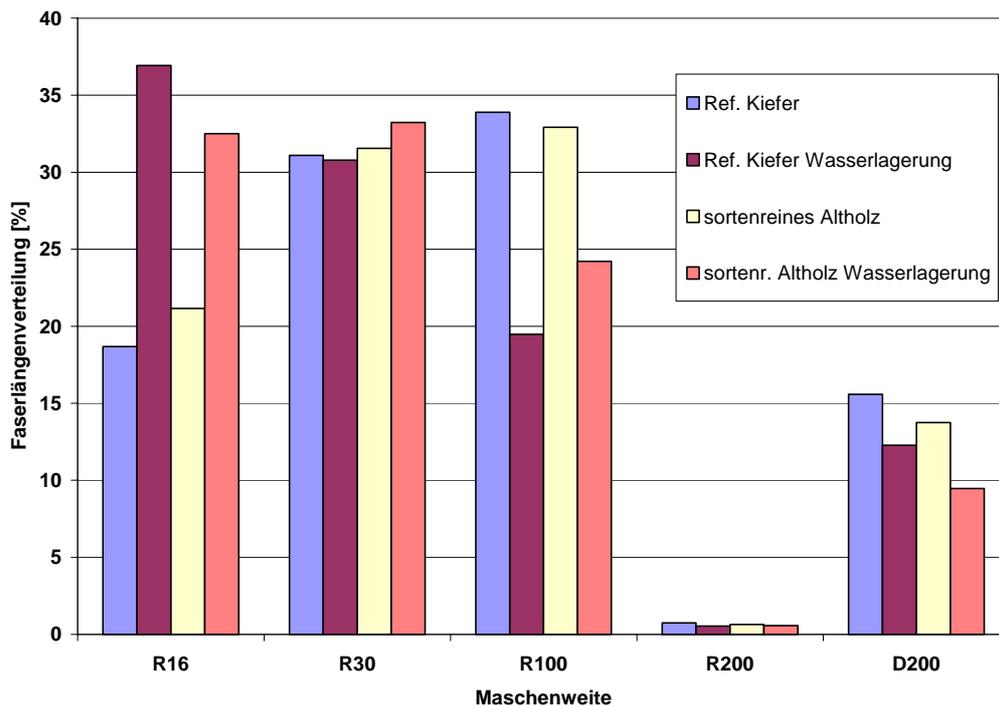


Abb. 6.7: Vergleich der Faserlängenverteilung von Faserstoffen, ermittelt nach dem Bauer McNett-Verfahren, die mit und ohne Wasserlagerung bei identischen Aufschlussparametern (3 min/150°C) hergestellt wurden

Die lichte Maschenweite der eingesetzten Siebe ist in mesh angegeben, wobei R16 einer lichten Maschenweite von 1,180 mm und R200 von 0,075 mm entspricht. Der ermittelte Feinanteil ist mit D200 angegeben. Dieser wird als rechnerische Größe aus der Differenz zwischen der Einsatzmenge und dem Material, welches an den einzelnen Sieben zurückgehalten wurde, ermittelt (TASMAN, 1972) und repräsentiert die Menge, die das Sieb R200 mesh passierte. Anzu-merken ist, dass es sich bei der Bezeichnung R um den Siebrückstand, d. h. das Material handelt, welches größer ist als die Maschenweite. Beim Durchgang D handelt es sich um die Menge, die kleiner als die angegebene Maschenweite ist.

Die Gegenüberstellung der Ergebnisse (Abb. 6.7) verdeutlicht, dass aus Hackspänen, die vor dem Zerfaserungsprozess durch eine Wasserlagerung vorbehandelt waren, wesentlich längere Fasern erzeugt werden können als aus Hackspänen, die diese Wasserlagerung nicht erfuhren. Durch die Wasserlagerung konnte der Langfaseranteil des Frischholzes, der nicht das R16 Sieb passierte, um 49% verbessert werden. Dem gegenüber ergab Altholz mit Wasserlagerung einen um 35% höheren Faserlängenanteil als Fasern aus Altholz ohne Wasserlagerung.

Der Einfluss der Hackspänelagerung im Wasser ist an den technologischen Eigenschaften der UF-Harz-gebundenen MDF zu erkennen (vergl. Abschnitt 6.4). Hier wirken sich die Faserlängenverteilungen entscheidend auf die Plattenqualität aus, gerade im Hinblick auf die Biegeeigenschaften. Für die industrielle Umsetzung sind diese Maßnahmen ohne größere Investitionen umsetzbar. Um einen entsprechend höheren Faserlängenanteil zu erreichen, könnte das Material nach der Hackspänewäsche in wasserbefüllten Silos zwischengelagert werden, bevor es dem Zerfaserungsprozess zugeführt wird. Durch einen kontinuierlichen Produktionsprozess wirkt sich die Aufbereitung bzw. Entsorgung des Abwassers als zusätzlicher Kostenfaktor aus (Unterabschnitt 6.2.4.4).

Im Hinblick auf eine Verkürzung der Produktionszeit durch Wegfall der Wasserlagerung stellte sich die Frage, wie sich eine Erhöhung der Aufschlussstemperatur und der Dämpfzeit auf die Qualität der hergestellten Fasern auswirken würde. Dazu wurde das Untersuchungsmaterial in der Labor-Refineranlage des WKI bei einer Verweilzeit von 3 bzw. 8 Minuten im Vordämpfer mit einer Aufschlussstemperatur von 150°C bzw. 180°C zu Faserstoff aufgeschlossen.

Die bei dem Kiefernalt- und dem Kiefernfrischholz ermittelten Faserlängen sind der Abbildung 6.8 zu entnehmen. Die ersten drei Balken jeder Maschenweite zeigen die prozentualen Massenanteile des Kiefernfasersstoffes. Die sich daran anschließenden drei weiteren Balken der Graphik geben die prozentualen Faserstoffanteile des sortenreinen Altholzes wieder.

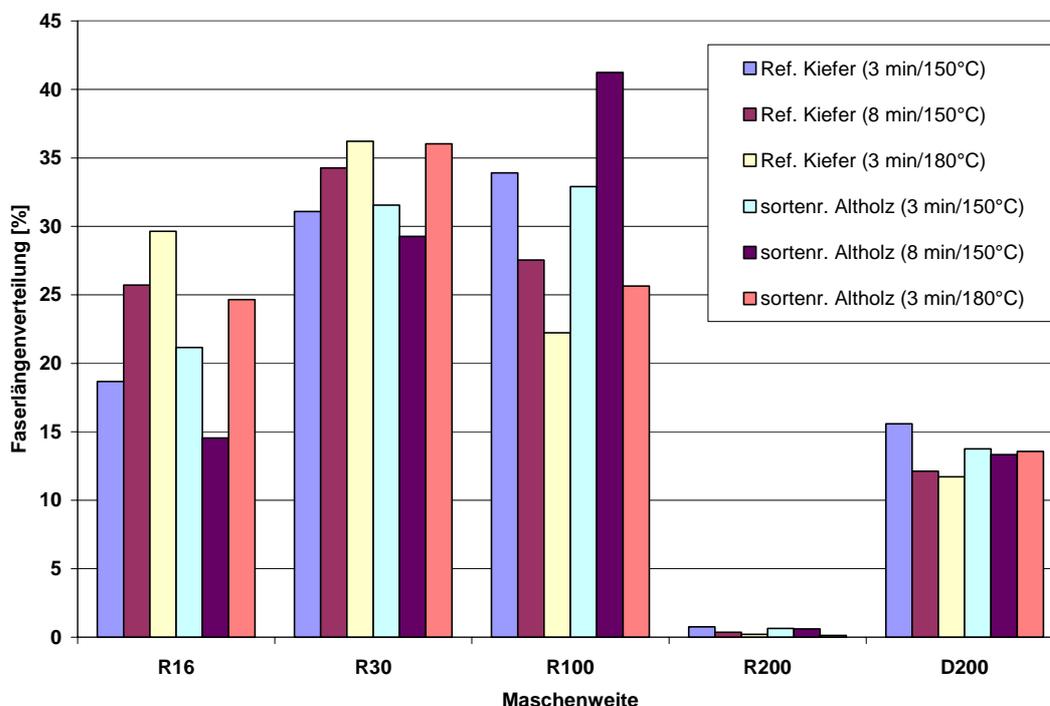


Abb. 6.8: Vergleich der Faserlängenverteilung von Faserstoffen, ermittelt nach dem Bauer McNett-Verfahren, die mit unterschiedlichen Aufschlussparametern hergestellt wurden

Mit den Aufschlussparametern von 3 min/150°C verschieben sich die Massenanteile der Alt- und Frischholzfaser von langen Fasern hin zu einem höheren Feinfaseranteil (hoher Massenanteil bei R100) und damit zu kürzeren Faserlängen.

Wird die Verweilzeit im Vordämpfer auf 8 min/150°C erhöht, kann aus dem Kiefernfrischholz ein deutlich längerer Faserstoff erzeugt werden. Der Anteil an kürzeren Fasern (R100, R200) ist dabei geringer als bei kürzeren Verweilzeiten. Die Dampfbehandlung der Altholzhackspäne bei 8 min/150°C zeigt gegenüber der Aufschlussbedingung 3 min/180°C eine deutliche Abnahme der Langfaserfraktion. Das bei 8 min/150°C aufgeschlossene Altholz hat mit über 40% Massenanteil bei der Maschenweite R100 den mit Abstand höchsten Wert.

Im Gegensatz dazu wurden bei intensiverer Aufschlusstemperatur der Hackspäne von 180°C und 3 min Dämpfzeit deutlich höhere Massenanteile an langen Fasern bei Alt- und Frischholz gegenüber der Aufschlusstemperatur von 150°C ermittelt. Das Altholz liegt bei der Maschenweite R16 mit fast 25 Massenprozenten noch unterhalb der Massenanteile von Frischholz (ca. 30%), aber deutlich über den Massenanteilen, die bei 150°C Aufschlusstemperatur erzielt wurden. Im mittleren Faserlängenbereich (R30) besitzt die Altholzfaser sogar fast den gleichen Massenanteil wie die Frischholzfaser.

Eine negative Auswirkung auf die technologischen Eigenschaften der hergestellten Laborfaserplatten konnte nicht festgestellt werden. Dieser Umstand kann eher bei Aufschlussverfahren für Späne beobachtet werden (MICHANICKL und BOEHME, 1996). Dabei wirkt sich gerade bei einem höheren Feinanteil in den Deckschichten die Zusammensetzung der Ausgangsmöbelplatten auf die später hergestellte Platte aus.

Das Herauslösen der Fasern aus dem Faserverband erfolgt durch Druckwechselbeanspruchungen (Druck- und Scherkräfte) und Plastifizierung der Mittellamelle. Bei einer Dämpfung der Hackspäne mit einer Temperatur von 120°C bis 130°C wird ein hoher Prozentsatz an unbeschädigten Fasern aus dem Holz herausgelöst. Bei der Zerfaserung treten noch genügend Scherkräfte auf, um die sekundären Zellwände aufzureißen, zu defibrillieren und um zusätzliche Oberflächen sowie Bindefähigkeiten zu produzieren. Im Gegensatz dazu führen weit höhere Temperaturen von 150°C bis 180°C zur fast ausschließlichen Separierung der Fasern entlang der Mittellamelle, wobei bei diesen Temperaturen die Fasern teilweise mit Lignin überzogen werden. Dadurch bleibt ein Großteil der Fasern unbeschädigt und führt somit zu einem geringeren Splittergehalt. Für die Papierindustrie sind die hergestellten Faserstoffe unbrauchbar, da sie jede weitere Defibrillierung erschweren. Bei den hier durchgeführten Aufschlussparametern (180°C) war die

Faserlängenverteilung von Frisch- und Altholz fast gleich. Die thermische Einwirkung der erhöhten Temperatur führte lediglich zu einer stärkeren Braunfärbung der Fasern.

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass eine Wasserlagerung als Einflussgröße Auswirkungen auf die Faserlängenverteilung hat. Die hier verarbeiteten Rest- und Althölzer hatten neben einem Wassergehalt zwischen 19% und 36% auch sekundäre Schädigungen wie Verfärbungen, Pilzbefall und Rissbildungen (Unterabschnitt 6.3.7). Der Wassergehalt der Hackspäne ist für die Herstellung von Faserstoffen von großer Bedeutung. Bei einer hohen Fasersättigung sind die Festigkeiten des Holzes am niedrigsten, was zu einer Begünstigung des Zerfaserungsprozesses führt und somit auch die Faserqualität verbessert.

Durch den Eintritt des Quellungswassers in die Holzsubstanz werden die Micellarabstände im Feinbaugerüst des Holzes vergrößert. Damit verringern sich die wirksamen Kohäsionskräfte, was zu einer Abnahme der mechanischen Festigkeit führt. Durch die Vorwärmung der Hackspäne erfolgte neben der Plastifizierung der Späne eine Vergleichmäßigung der Holzfeuchte. GORING (1963) gelang es nachzuweisen, dass die Einweichungstemperatur des Lignins und der Hemicellulosen in starkem Maße von deren Wassergehalt beeinflusst wird. Bei Wassergehalten von 30% bis 40% sinkt die Erweichungstemperatur von Lignin auf 90°C bis 100°C ab. Dies würde auch die verbesserte Faserlängenverteilung des Altholzes bei höheren Dämpftemperaturen erklären. Eine 24-stündige Wasserlagerung der relativ trockenen Altholz- und Frischholzhackspäne wirkt sich auf die spätere Faserlängenverteilung bei beiden Holzchargen vorteilhaft auf den Faserlangstoff aus.

Die vorliegenden Zusammenhänge könnten Industriell genutzt werden, um Altholz mit Frischholz zusammen aufzuschließen, ohne einen Qualitätsunterschied zwischen beiden Arten befürchten zu müssen.

6.3.4 Messung der Faserlängenverteilung von Faserstoff mittels Trockensiebung

In diesem Versuchsabschnitt wurden mit einer Trockensiebung die Massenanteile der Faserfraktionen dahingehend untersucht, ob eine Korrelation zwischen der Trockensiebung und der Bestimmung der Faserlängenverteilung in einer Suspension (Bauer McNett) besteht. Die Trockensiebung wurde im WKI mit Standardsieben durchgeführt, die eine Exzenterbewegung in

vertikaler Richtung ausführen. Von jeder Charge wurden durchschnittlich 135 g abgewogen und in Fraktionen der Maschenweite <0,160, >0,16, >0,315, >0,63, >1,25, >3,15 und >5,0 mm getrennt. Die gewogenen Fraktionen wurden rechnerisch auf die der Nasssiebung vom Bauer McNett Gerät abgestimmt, indem verschiedene Fraktionen zusammengefasst wurden. Damit konnte eine bessere Vergleichbarkeit der Ergebnisse erreicht werden. Analog zu den im Unterabschnitt 6.3.3 beschriebenen Abbildungen, sind in den Abbildungen 6.9 und 6.10 die Ergebnisse der Trockensiebung graphisch dargestellt.

Auffallend war im Gegensatz zum Nassverfahren, dass die in Abbildung 6.9 gezeigten Massenanteile von R200 (Faserfeinanteil) insgesamt geringer ausfielen. Eine mögliche Erklärung könnte sein, dass beim Bauer McNett-Verfahren die Fasern in der Suspension durch die Rotation des Rührers leichter voneinander getrennt werden. Damit ist der gemessene Feinanteil höher als beim Trockenverfahren.

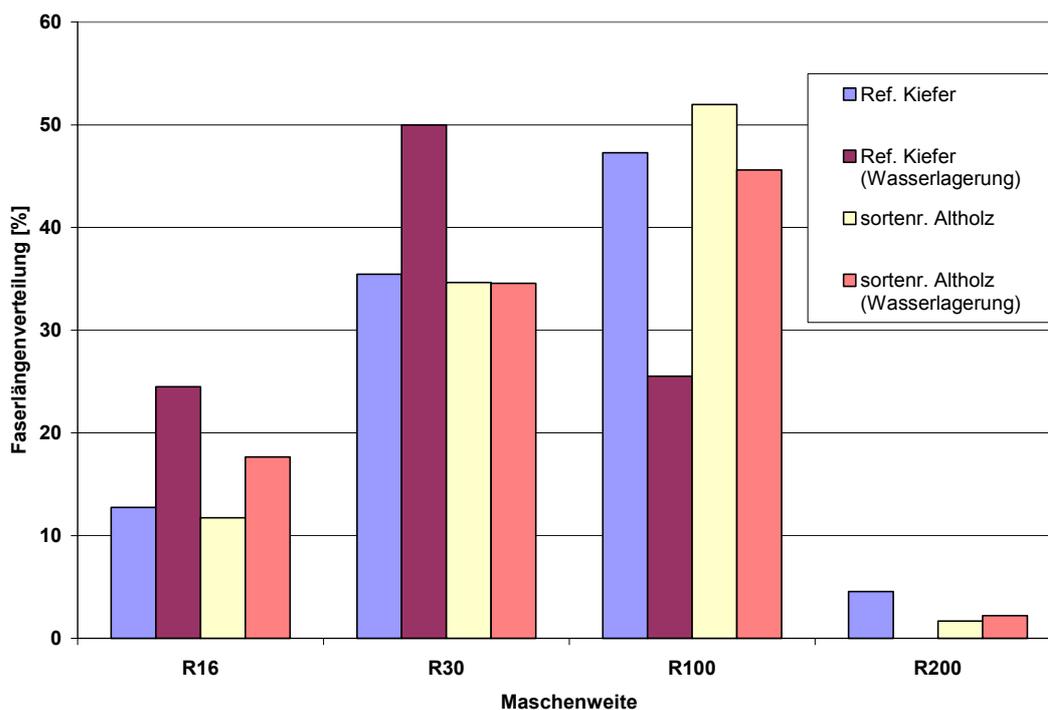


Abb. 6.9: Vergleich der Faserlängenverteilung bei der Trockensiebung von Faserstoff aus Hackspänen, die mit und ohne eine Wasserlagerung bei 3 min/150°C hergestellt wurden (Ermittlung durch Trockensiebung)

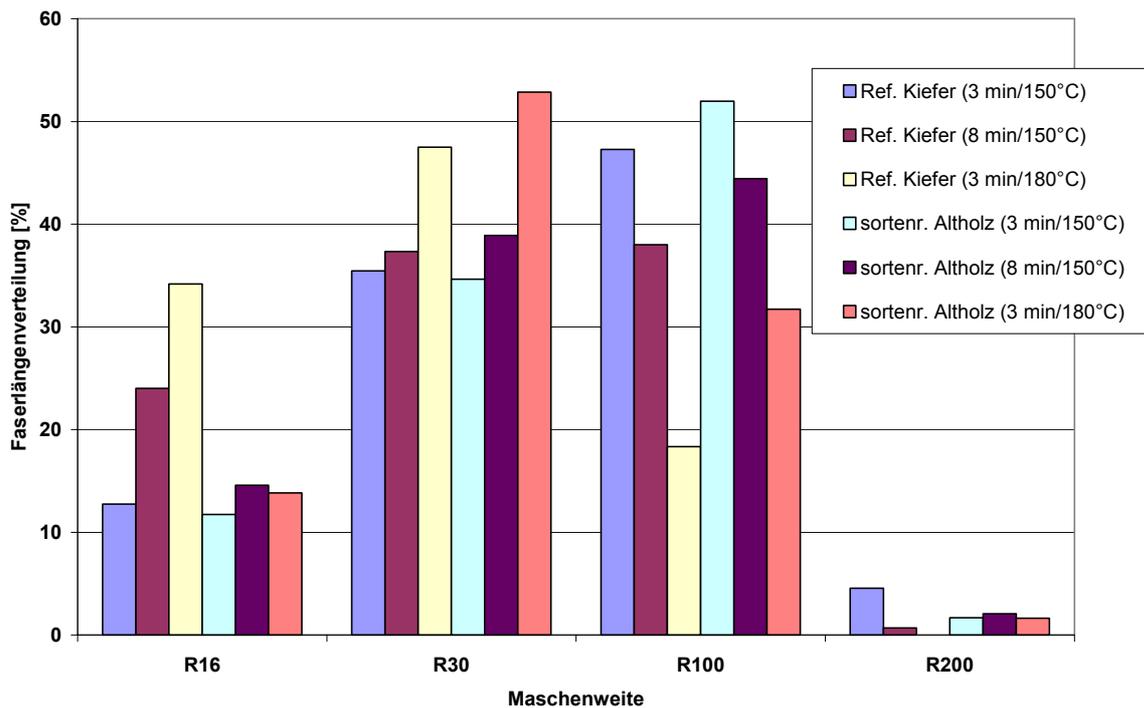


Abb. 6.10: Vergleich der Faserlängenverteilung bei der Trockensiebung von Faserstoff aus Hackspänen, die mit unterschiedlichen Aufschlussparametern hergestellt wurden (Ermittlung durch Trockensiebung)

Durch die Exzenterbewegung können bei der Trockensiebung anhaftende Feianteile an Faserbündeln verhältnismäßig schlecht von einander getrennt werden. Nachteilig wirkt sich auch das Agglomerieren der Fasern bei der Trockensiebung aus. Die Fasern liegen im Gegensatz zur Nasssiebung nicht vereinzelt vor. Dadurch können sich Faserbündel auf einzelnen Siebdecks ablagern, deren Einzelfasern sich im getrennten Zustand über mehrere Siebdecks verteilen würden.

Zusammenfassend sind die durch die Aufschlussparameter von 3 bzw. 8 Minuten bei einer Temperatur von 150°C bzw. 180°C gewonnenen Faserstoffe als normierte Summenhäufigkeitskurve der Faserfraktionen in Abbildung 6.11 dargestellt. Es galt zu überprüfen, ob und inwieweit sich die beiden eingesetzten Messverfahren hinsichtlich ihrer Aussagefähigkeit vergleichen lassen.

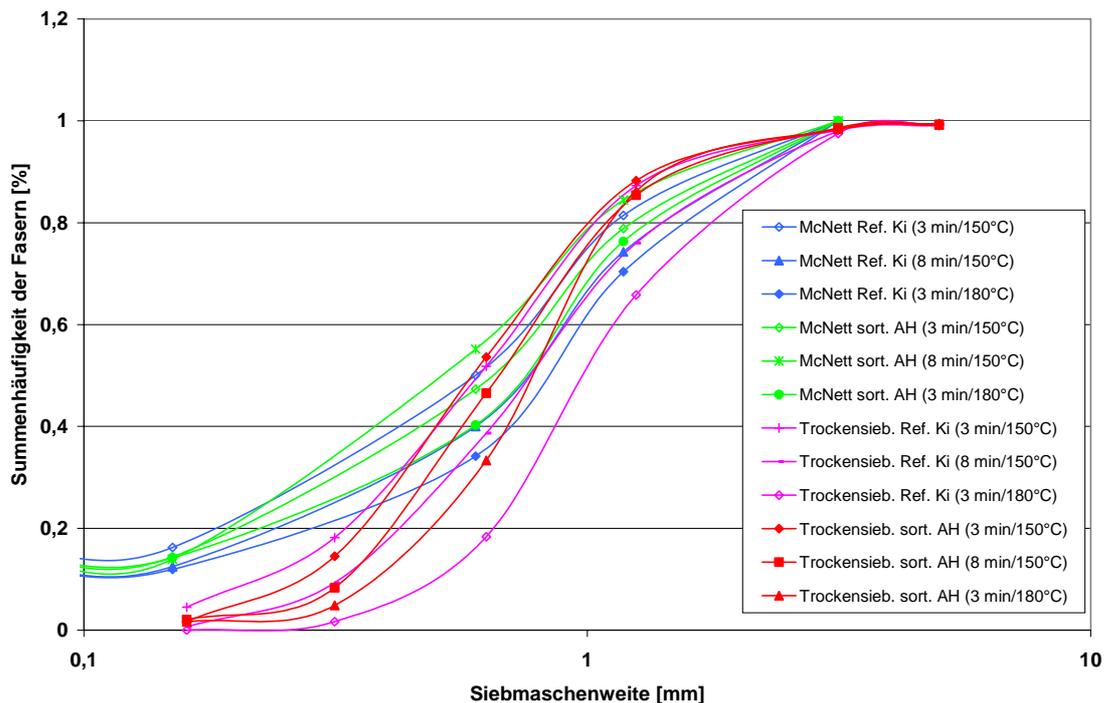


Abb. 6.11: Summenhäufigkeitskurve von Kiefernaltholz- und Kiefernfrischholzfaserstoffen, die mit unterschiedlichen Aufschlussparametern hergestellt wurden. Vergleich von Trockensiebung und Nassverfahren (Bauer McNett).

Für die Betrachtungsweise der normierten Summenhäufigkeitskurve spielt es keine Rolle, ob die x-Achse linear oder logarithmisch geteilt ist. Die einzig willkürliche Entscheidung bei der Darstellung besteht darin, die Bauer McNett-Kurve bei 3,15 mm auf 100% laufen zu lassen, weil die Trockensiebung dort schon fast 100% erreicht. Die Verwendung der 5 mm Maschenweite wäre ebenso denkbar, würde aber auf der log-Skala wenig Unterschied machen.

Das Ergebnis lässt erkennen, dass die Nass- und Trockensiebungen bei gleichen Aufschlussparametern ähnliche Ergebnisse zeigen. Größere Unterschiede gibt es nur beim Feinanteil. Bei der Trockensiebung ist eine Verschiebung der Kurven in den gröbereren Faserbereich deutlich zu erkennen. Dies wurde im Unterabschnitt 6.3.3 besprochen.

Die Trockensiebung erfordert einen wesentlich geringeren Zeitaufwand als die Nasssiebung und bietet sich daher aus praktischen Gründen als Verfahren zur Strukturuntersuchung des Faserstoffes an. Andererseits ist die Nassfraktionierung aufgrund der besseren Suspendierung des Feinanteils für eine Kalibrierung besser geeignet, da sie für ähnliche Messtechniken als Referenzverfahren verwendet werden kann.

6.3.5 Faserlängenbestimmung an Alt- und Frischholz durch Mikroskop-Bildverarbeitung

Um mögliche Zusammenhänge zwischen den unterschiedlichen Aufschlussbedingungen des Untersuchungsmaterials sowie den hergestellten Faserstoffen quantifizieren zu können, wurden von repräsentativem Probenmaterial Einzelfasern mit einer Videokamera als digitale Bilder abgebildet (Abb. 6.12 und 6.13). Die Fasern lagen in unterschiedlicher Form vor. Die Faserlängen und -breiten wurden durch Abfahren mit einem Cursor ermittelt.

Insgesamt wurden ca. 700 Altholzfaser und ca. 630 Frischholzfaser einzeln vermessen, wobei eine Messung am PC mit einigen Fehlerquellen wie Platzieren des Cursors und Messungengenauigkeit der Prüfperson behaftet ist. Dies könnte zum erhöhten Faserdurchmesser geführt haben. In Tabelle 6.10 sind die mit den unterschiedlichen Dämpfbedingungen gewonnenen Fasern hinsichtlich ihrer Faserlänge und -breite gegenübergestellt.

Tab. 6.10: Gegenüberstellung der Längen und Breiten bei unterschiedlichen Dämpfbedingungen von gewonnenen Fasern

Material	Altholz	Altholz	Kiefernfrischholz	Kiefernfrischholz
Aufschlussbedingungen	3 min/150°C	3 min/180°C	3 min/150°C	3 min/180°C
Faserlänge \bar{x}	1867 μm	2704 μm	1980 μm	2901 μm
Variationskoeffizient V (%)	63,8	37,8	54,9	43,5
Faserbreite \bar{x}	52 μm	49 μm	53 μm	48 μm
Variationskoeffizient V (%)	30,6	19,9	29,0	22,7

Die Hackschnitzelqualität des Untersuchungsmaterials selbst wurde durch den Hackvorgang von verschiedenen Aufbereitungsanlagen beeinflusst. Dies könnte mit eine Ursache für das breite Spektrum der Faserlängen gewesen sein. Welchen starken Einfluss die Hackspäneherstellung auf die spätere Faserqualität hat, konnten PATT et al. (1981) in ihren Untersuchungen an verschiedenen Hackspänen feststellen. Vor allem unterdimensionierte Hackspäne, die beim Altholz wesentlich häufiger vorkommen als bei Frischholz, führen zu erheblichen Eigenschaftsverlusten der später hergestellten Produkte.



Abb. 6.12: Repräsentative, angefärbte Frischholzeinzelfasern (3 min/150°C)

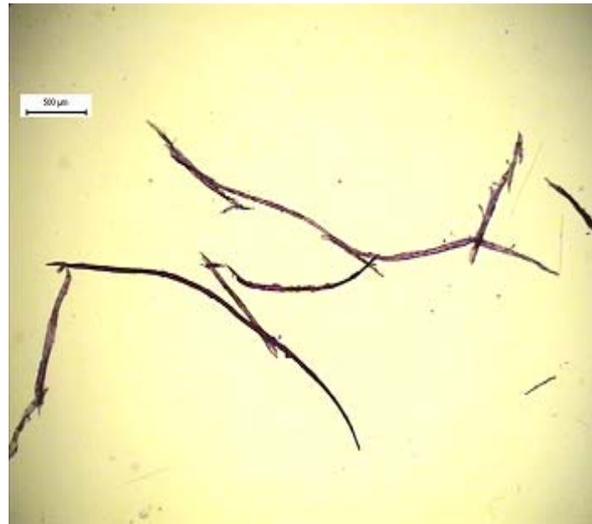


Abb. 6.13: Repräsentative, angefärbte Altholzeinzelfasern (3 min/150°C)

Die deutlichsten Unterschiede hinsichtlich ihrer Dimensionen konnten an Faserstoffen aus Alt- und Frischholzhackspänen ermittelt werden, die bei 150°C und 180°C bei 3-minütiger Dämpfzeit gewonnen wurden.

Wie bei der Bestimmung der Massenanteile mit dem Bauer McNett-Verfahren und der Siebfraktion deutlich wurde, zeigten sich auch bei der Bildanalyse tendenziell die gleichen signifikanten Unterschiede. Daher soll in diesem Kapitel nur auf die o. g. Zerkleinerungsparameter eingegangen werden. Die Unterschiede, die bezüglich der Längenverteilung der Fasern herausgearbeitet wurden, sind in den Abbildungen 6.14 bis 6.17 dargestellt und lassen folgende Rückschlüsse zu:

Kiefernfrischholz, das bei 3 min/150°C verarbeitet wurde, zeigt im Gegensatz zu Altholz neben einem höheren Anteil an kürzeren Fasern auch ein größeres Kollektiv an längeren Fasern. Die Altholzfaser hingegen wiesen eine sehr starke Konzentration mittlerer Faserlängen auf. Ganz kurze, aber auch ganz lange Fasern, waren verhältnismäßig wenig vertreten. Bei der Verarbeitung der Kiefernhackspäne bei einer Aufschlussbedingung von 3 min/180°C wurden, wie Abbildung 6.16 zeigt, deutlich mehr längere Frischholzfaser gebildet. Mit einer etwas geringeren Häufigkeit konnte dies ebenfalls für Altholzfaser ermittelt werden (Abb. 6.17). Insgesamt ist bei dieser Aufschlussstemperatur die Menge an kurzen Fasern bei Alt- und Frischholz deutlich niedriger als bei den Aufschlussparametern 3 min/150°C.

Die Messungen der unterschiedlichen Faserlängen des Alt- und Frischholzes ergeben sich durch verschiedene Einflussgrößen. Im Wesentlichen wirken sich die Parameter des Zerfaserungsprozesses auf den gewonnenen Faserstoff aus. Hierbei ist vor allem die Temperatur entscheidend, wobei bei niedrigen Dämpftemperaturen die Fasern teilweise an der Mittellamelle getrennt werden. Durch die Beschaffenheit der sich drehenden Mahlscheiben treten genügend Scherkräfte auf, um die sekundären Zellwände aufzureißen. Im Gegensatz dazu werden bei höheren Temperaturen die Fasern durch die Ligninkondensation leichter gelöst und der Splitteranteil verringert sich. Dass beim Zerfaserungsprozess (175°C) durch die mechanische Arbeit der Mahlscheiben die ursprüngliche Faserlänge verringert wird, konnten die Autoren ROFFAEL et al. (2003) in ihren Untersuchungen an Faserstoffen zeigen. Dabei wurden die gemessenen Faserlängen von Vollholz (durch Mazeration) den aus dem Zerfaserungsprozess gewonnenen gegenüber gestellt. Beim Kiefernfaserstoff zeigte sich eine leichte Abnahme der Faserlänge, während bei den untersuchten Buchenfasern eine deutlichere Verkürzung zu erkennen war.

Neben den Aufschlussbedingungen wirken sich die Hackspanqualitäten der einzelnen Fraktionen auf die spätere Faserlängenverteilung aus. Dabei sollten Hackspäne einen geringen Anteil an Fein-Fractionen aufweisen. Altholz, welches beim Altholzverwerter durch den Aufbereitungsvorgang oftmals undefinierter gehackt wurde, ist mit einem wesentlich höheren Feinanteil behaftet als Frischholzsortimente (Abschnitt 6.2.2). Beim Einsatz von Altholz wirkt sich des Weiteren die Zusammensetzung der Sortimente auf den Refinerfaserstoff aus. Einflussfaktoren sind dabei die Rohdichte, Holzart (Laub- oder Nadelholz) und Anteile an Extraktstoffen im Holz.

Ein weiterer Aspekt wäre die Form und Gestaltung der Mahlscheiben. Bei den vorliegenden Untersuchungen wurde immer derselbe Mahlscheibentyp gewählt und scheidet daher als weitere Einflussgröße aus.

Mit der Bildanalyse konnte belegt werden, dass in Abhängigkeit von der Aufschlusstemperatur eine Verschiebung der Häufigkeitsverteilung von kürzeren Fasern zu längeren Fasern besteht.

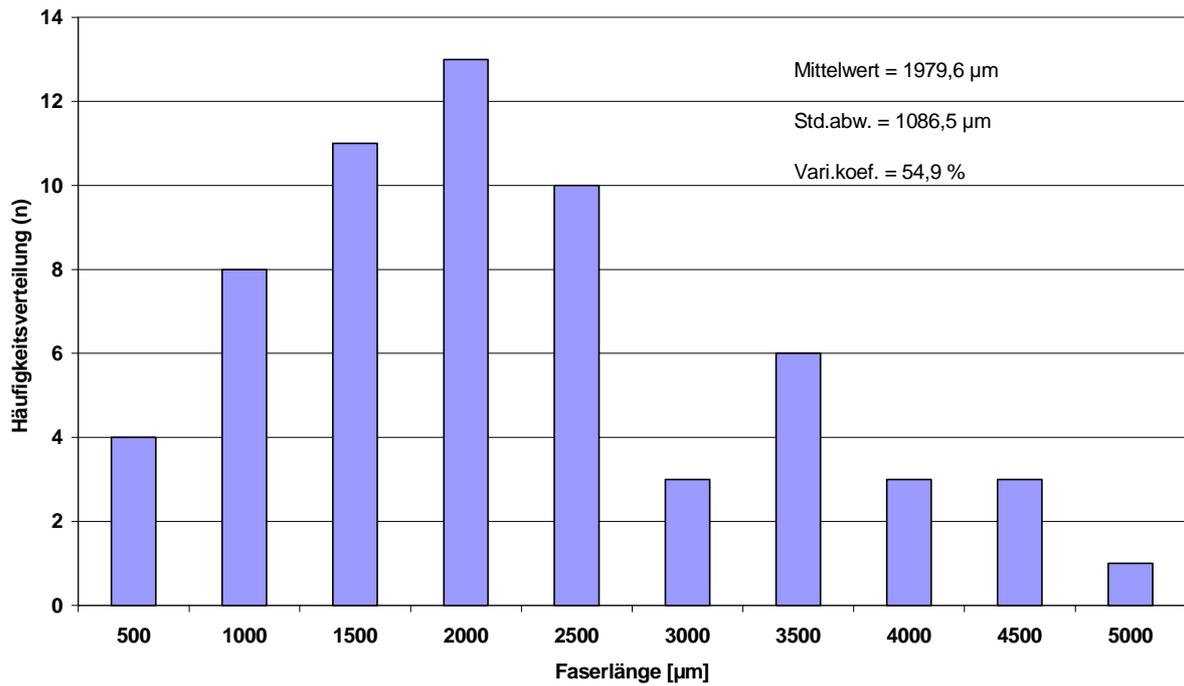


Abb. 6.14: Messung der Faserlängenverteilung mit der Bildanalyse von Kiefernfrischholzfasern, die bei 3 Minuten Vordämpfung und 150°C Aufschlusstemperatur hergestellt wurden

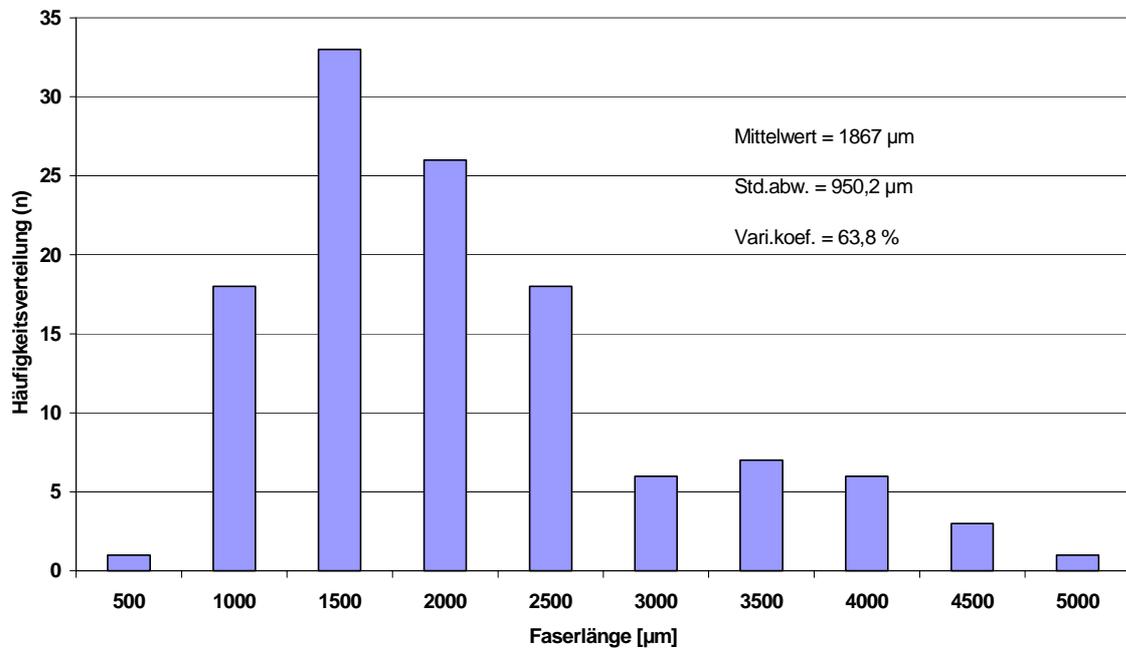


Abb. 6.15: Messung der Faserlängenverteilung mit der Bildanalyse von Kiefernalthholzfasern, die bei 3 Minuten Vordämpfung und 150°C Aufschlusstemperatur hergestellt wurden

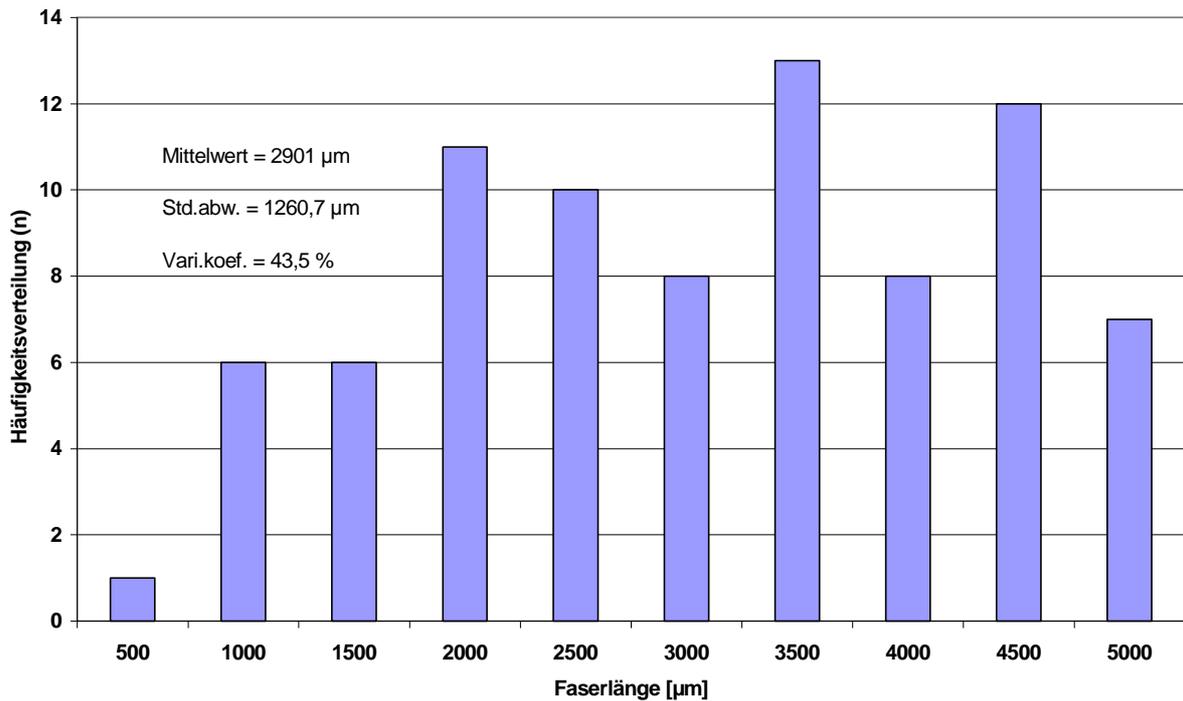


Abb. 6.16: Messung der Faserlängenverteilung mit der Bildanalyse von Kiefernfrischholzfäsern, die bei 3 Minuten Vordämpfung und 180°C Aufschlusstemperatur hergestellt wurden

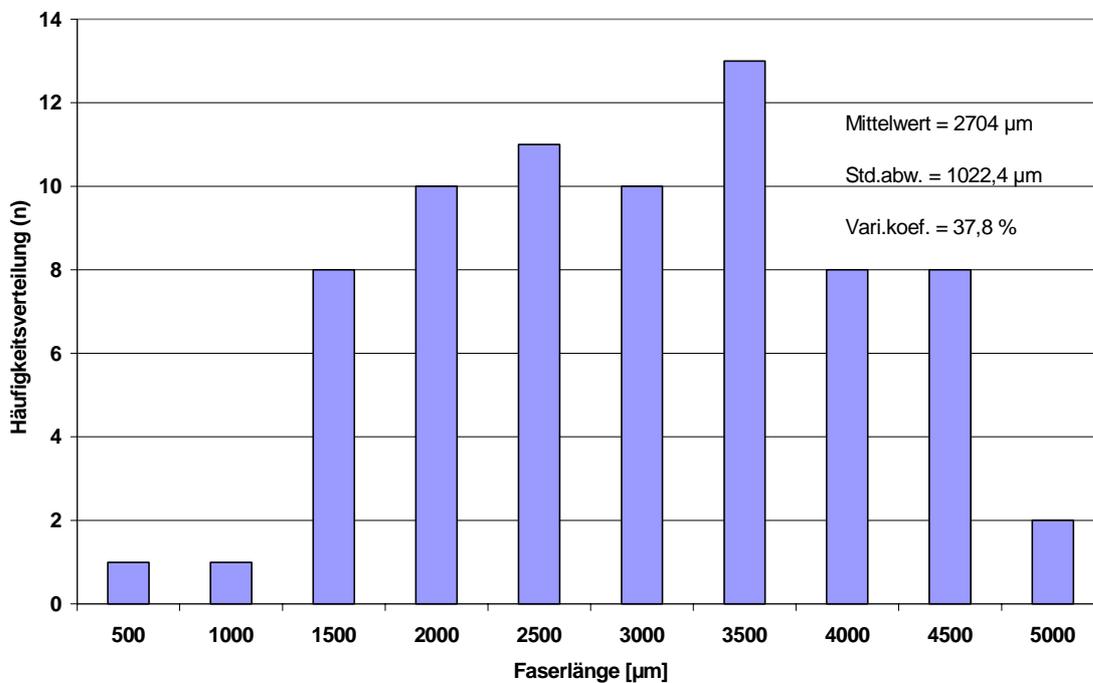
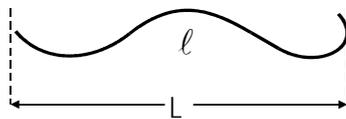


Abb. 6.17: Messung der Faserlängenverteilung mit der Bildanalyse von Kiefernaltholzfäsern, die bei 3 Minuten Vordämpfung und 180°C Aufschlusstemperatur hergestellt wurden

Die hier gemessenen Faserlängen decken sich mit den Untersuchungen von JAYME und HARDERS-STEINHÄUSER (1951). Sie konnten am Beispiel von Fichtenholz Zellstoff eine Längenverteilung ermitteln, die zeigt, dass die gemessenen Faserlängen in einem Bereich zwischen 1500 µm und 3000 µm ihr Maximum (Häufigkeit der Fasern eines Längenbereiches, Zahlenmittel) hatten. Bei *Pinus sylvestris* wurde von ihnen eine mittlere Faserlänge von 3180 µm gemessen.

Die Fasern lagen bei der Vermessung in unterschiedlichen Formen vor, so dass nicht immer eine ausgerichtete Faser vermessen werden konnte. Die Faserkräuselung (Curl) lässt sich bildanalytisch vermessen und wird als Faser-Curl-Index CI wie folgt ermittelt:



$$CI = \frac{\sum \left(\frac{l_i}{L} - 1 \right)}{N}$$

$$CI = \frac{\sum CI \cdot l_i}{\sum l_i}$$

Der Curl als Kennwert der Faserform beeinflusst die gemessene Faserlänge, wenn diese nicht bildanalytisch bewertet wird. Methoden zur Bestimmung von Faserlängenmessungen können z.B. durch das Helios-Beugungsspektrometer, am Fibre Quality Analyser (FOA) und am Kajaani Fiber Lab-Meßgerät durchgeführt werden. Dabei haben kleine und kurze Fasern die Chance, mit anderen, meist längeren Fasern in Kontakt zu kommen und werden so oftmals aus programmbedingten Gegebenheiten nicht erfasst. Daneben wird in der Papierindustrie die Bestimmung der Faserzusammensetzung durch Auszählung unter dem Mikroskop nach der TAPPI-Methode T401 om-88 angewendet. Hierzu werden alle Fasern gezählt, die eine gerade Bezugslinie im Sichtfeld des Mikroskops schneiden. Aus der Anzahl der gefundenen Fasern allein kann noch kein Rückschluss auf den Massenanteil gezogen werden. Dieser muss mit dem Gewichtsfaktor der Faserkomponente multipliziert werden.

Weitere Unsicherheitsfaktoren werden durch den selektiven Entnahmeprozess der Fasern für die Präparation auf dem Objektträger sowie vom Anteil an kurzen und langen Fasern eines Kollektives gebildet. Dies wird in den Abbildungen 6.14 bis 6.17 durch die hohen Standardabweichungen deutlich.

Zwischen einer bildanalytischen und der hier durchgeführten mechanisch erfassten Faserlänge kommt es daher zu geringen Abweichungen. Diese sind aber in der Aussagekraft dahingehend identisch, dass durch höhere Aufschluss Temperaturen längere Fasern erzeugt werden können, die sich auf die späteren technologischen Platteneigenschaften auswirken (SCHNEIDER, 2000). In der Papierindustrie wird die Faserlängenmessung zur Prozesskontrolle und –steuerung eingesetzt. Ansätze hierzu wurden für die Holzwerkstoffindustrie in einem anderen Forschungsprojekt untersucht (BENKER et al., 2001; PLINKE und BENKER, 2003).

Zur Verfahrensbewertung lässt sich festhalten, dass das Messergebnis bei ausreichender Partikelanzahl sehr genau ist und der „wahren“ Fasergrößenverteilung wahrscheinlich sehr nahe kommt. Allerdings ist der Aufwand für die Präparation und die Messung recht hoch und kann daher industriell für die Fasercharakterisierung nicht herangezogen werden.

6.3.6 Faserstofffraktionen

Mit dem Defibrator MFG No 1202 kann das Entwässerungsverhalten der Faserstoffgemische ermittelt werden. Bei der Papierherstellung können einem Stoff-Mahlgrad Papiereigenschaften zugeordnet werden. Dabei zeichnet sich ein gröberer Faserstoff durch kurze Filtrationszeiten aus, während ein feinerer Faserstoff, der mit einem höheren Feinanteil behaftet ist, höhere Filtrationszeiten hat.

Die Defibrator-Werte der gewonnenen Faserstoffe wurden an zuvor gewässertem Material ermittelt und sind in der Tabelle 6.11 wiedergegeben. Für eine bessere Vergleichbarkeit sind ihnen die Ergebnisse der mittleren Faserlängenmessung (Unterabschnitt 6.3.5) und die der Bauer McNett-Fraktionierung (Unterabschnitt 6.3.3) gegenübergestellt. Es lassen sich folgende Aussagen ableiten:

Wie zuvor schon beschrieben, kann bei steigenden Aufschluss Temperaturen eine höhere Faserlänge erreicht werden. Die mittlere Faserlänge entwickelte sich analog der unterschiedlichen Aufschlussbedingungen von Kiefernaltholz und Kiefernfrischholz. So erreicht sie für Kiefernfrischholz bei 3 min/150°C eine mittlere Länge von 1980 µm und bei 3 min/180°C von 2901 µm. Bei einem Einsatz von Altholz ist die gleiche Tendenz bei den Faserlängen zu erkennen. Lediglich die mittlere Gesamtlänge der Fasern fällt etwas niedriger aus.

Tab. 6.11: Ermittelte Faserlängen, Defibrator-Werte und Bauer McNett-Fraktionierung von unterschiedlich aufgeschlossenem Faserstoff aus Alt- und Frischholz

Materialkennzeichnung	Aufschlussbedingungen	Mittlere Faserlänge (µm)	Defibrator (sec.)	Bauer McNett				
				R 16	R 30	R 100	R 200	D 200
Aa (Kiefernfrischholz)	3 min/ 150°C	1980	17,0	18,57	31,40	33,81	0,87	15,35
Ab (Kiefernfrischholz)	8 min/ 150°C	2525	16,8	25,71	34,27	27,54	0,36	12,12
Ac (Kiefernfrischholz)	3 min/ 180°C	2901	15,5	29,63	36,21	22,23	0,21	11,72
Ba (Kiefernfrischholz) (Wasserlagerung)	3 min/ 150°C	1840	15,6	36,93	30,78	19,48	0,54	12,27
Ca (Kiefernaltholz)	3 min/ 150°C	1867	17,5	21,15	31,55	32,91	0,64	13,75
Cb (Kiefernaltholz)	8 min/ 150°C	2236	16,5	14,55	29,27	41,24	0,61	13,33
Cc (Kiefernaltholz)	3 min/ 180°C	2704	16,0	24,65	36,02	25,64	0,13	13,56
Da (Kiefernaltholz) (Wasserlagerung)	3 min/ 150°C	2057	15,3	28,50	22,80	22,83	0,13	25,75

Dieser Zusammenhang wird durch die Ergebnisse des Bauer McNett-Verfahrens bestätigt. An dieser Stelle sei auf die ausführliche Darstellung in Unterabschnitt 6.3.3 hingewiesen.

Aus den Defibrator-Werten der Freeness Scale Interconversion Tabelle (siehe Anhang 9.1) geht hervor, dass es sich bei den hergestellten Stoffen insgesamt um recht grobe Faserstoffe handelt. Die verschiedenen Aufschlussbedingungen hatten keine größeren Unterschiede beim Defibrator-Mahlgrad zur Folge. Daher ist diese Methode für eine Beurteilung der Faserstoffstruktur zu wenig spezifisch. Wenn auch diese Werte sehr dicht beieinander liegen, so können sie dennoch hinsichtlich der Auswirkungen der unterschiedlichen Aufschlussbedingungen für die eigene Arbeit genutzt werden. Sie geben in der Tendenz die Zusammenhänge zwischen der mittleren Faserlänge und den Werten der Bauer McNett-Fraktionierung wieder.

6.3.7 Lichtmikroskopische Untersuchungen an Alt- und Frischholz

6.3.7.1 Allgemeine Befunde

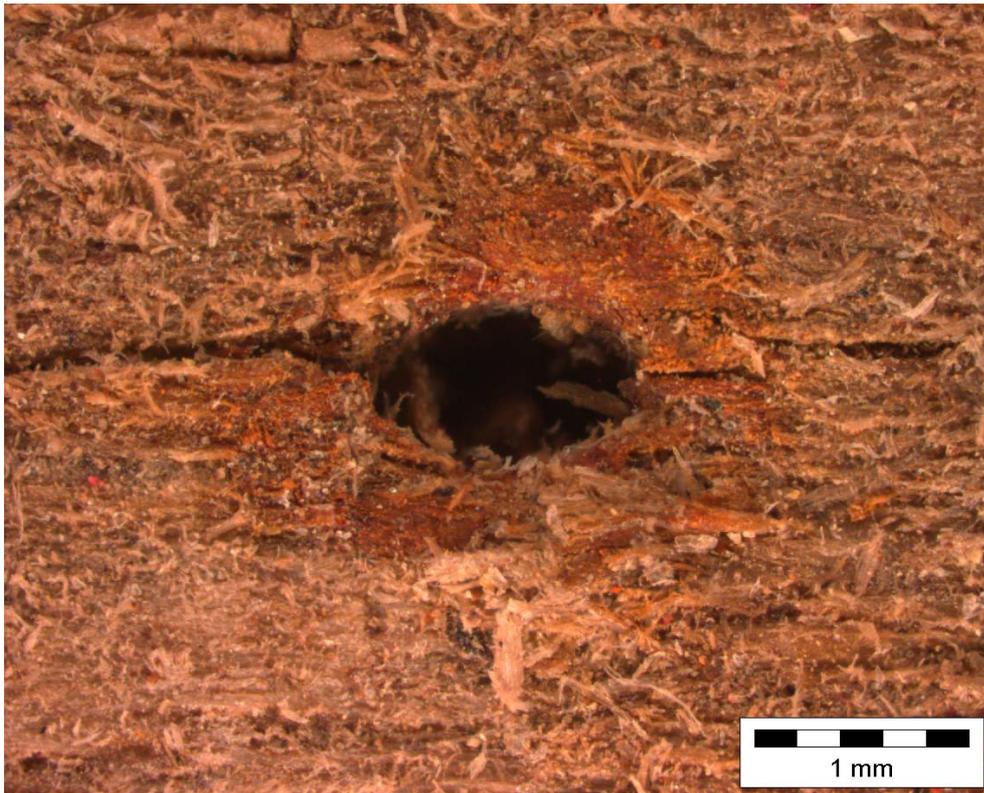
Das Untersuchungsmaterial setzte sich hauptsächlich aus der Holzart *Pinus* zusammen. Des Weiteren konnten im Untersuchungsmaterial in geringen Mengen die Holzarten *Picea*, *Abies*, *Pseudotsuga*, *Quercus* und *Fagus* mikroskopisch bestimmt werden.

Die Untersuchung der strukturellen Beschaffenheit der sehr unterschiedlich gebrochenen Hackspäne erfolgte zuerst durch eine visuelle Betrachtung. Mechanische Schädigungen an den Oberflächen, die vor allem durch den Messereinsatz bzw. durch die Vorbrecherwalzen hervorgerufen wurden, konnten als häufigste Ursache ausgemacht werden. Der Schnittwinkel und die Messerschärfe sind u. a. für die Hackspäneigenschaften maßgebend. Während Holz gegen mechanische Belastungen, die parallel zur Faserrichtung verlaufen, relativ unempfindlich ist, verursachen Kräfte, die senkrecht zur Faserrichtung wirken, Faserstauchungen und Risse in der Faserstruktur (Unterabschnitt 6.3.7.4). Lichtmikroskopische Aufnahmen an einzelnen Altholzhackspänen zeigten vorwiegend Schädigungen durch eingeschlagene Nägel (Abb. 6.18), Stauchungen (Abb. 6.19), Fraßspuren holzerstörender Insekten (Abb. 6.20), Verschmutzungspartikel, Pilzbefall (Abb. 6.21) und Verunreinigungen durch Lackspuren und pigmentierte Holzschutzmittel.

Im Allgemeinen haben Althölzer eine längere Gebrauchsdauer hinter sich, wodurch sich Verfärbungen und Pilzinfektionen ergeben können. Die mikroskopischen Untersuchungen zeigten an den Hackspänen, dass die Pilzhyphen hauptsächlich an peripheren Bereichen der Späne anzutreffen waren.

Einzelne Altholzhackspäne, die eine leichte Verfärbung aufwiesen, wurden auf Holzschutzmittel überprüft. Die Proben wurden für den Nachweis von Kupfer mit gelbem Blutlaugensalz (Kaliumhexacyanoferrat II) angefärbt. Für einen quantitativen Nachweis von quartären Amoniumverbindungen wurde Bromphenolblaulösung (R2) verwendet. Mit beiden Nachweisreaktionen konnte an verschiedenen Hackspänen kein Holzschutzmittel nachgewiesen werden.

Die Vorschädigung des Altholzes während der Nutzungsphase verstärkt sich noch durch den Aufbereitungsprozess des Altholzes und ist mikroskopisch in der Faserstruktur erkennbar (PARAMESWARAN et al., 1985). Dies wird im Folgenden an ausgewählten Einzelbeispielen intensiver untersucht.



**Abb. 6.18: Makroskopische Aufnahme eines Nagelloches mit umliegender Eisenreaktion
(Vergrößerung 2,5-fach, Auflicht)**



**Abb. 6.19: Stauchung an einer Altholzoberfläche, verursacht durch ein Verpackungsstahlband
(Vergrößerung 2,5-fach, Auflicht)**



Abb. 6.20: Mit Fraßspuren durchzogener Altholzhackspan (Vergrößerung 2,5-fach, Auflicht)



Abb. 6.21: Makroskopische Aufnahme eines Spanendes mit umliegender Eisenreaktion und Pilzhyphen (Vergrößerung 2,5-fach, Auflicht)

6.3.7.2 Makroskopische Aufnahmen von Alt- und Frischholzfaserstoffen

Um den Einfluss unterschiedlicher Aufschlussbedingungen auf die Faserstoffstruktur festzustellen, wurden von ausgewähltem repräsentativen Probenmaterial makroskopische Aufnahmen erstellt.

Das mit Auflicht und Durchlicht mikroskopisch aufgenommene Probenmaterial der Abbildungen 6.22 bis 6.29 soll die möglichen Beziehungen zwischen den Aufschlussbedingungen von 150°C und 180°C und der Qualität der hergestellten Faserstoffe verdeutlichen.

Die Holzerfaserung durch Einwirkung von Wasserdampf bei 180°C für etwa 5 min führt zur Erweichung der Mittellamelle bzw. zu einer Aktivierung des Lignins und der Hemicellulosen. Dabei gehen phenolische Spaltprodukte sowie Mono- und Oligosaccharide in Lösung. Unter diesen Bedingungen ist die Zerfaserung stets mit einer teilweisen Hydrolyse der Hemicellulose verbunden. Gleichzeitig findet ein partieller Abbau von Ligninbestandteilen und Hemicelluloseanteilen statt. Dies wirkt sich auf die später hergestellte Faserplatte bei der Dickenquellung aus.

In den hier vorgelegten eigenen Untersuchungen konnte gezeigt werden (Unterabschnitt 6.3.3), dass aus Altholz und Frischholz bei höheren Aufschlusstemperaturen ein Faserstoff mit längeren Fasern herzustellen ist. Dies kann durch andere Untersuchungen belegt werden (SCHNEIDER, 2000; KRUG und KEHR, 2000). Die höhere Aufschlusstemperatur führt außerdem zu einer Quellungsvergütung der hergestellten MDF. Damit ist jedoch eine Dunkelfärbung des Fasermaterials verbunden.

Durch die längere Gebrauchsdauer des Altholzes war dieses aufgrund des geringeren Wassergehaltes spröder. Untersuchungen haben gezeigt, dass aus getrocknetem Holz durch Wiederbefeuchtung gleiche Faserstoffqualitäten erzeugt werden können wie aus Frischholzqualitäten. Beim Herstellungsprozess von Faserstoff durch Defibrierung ist durch die Dämpfstufe gewährleistet, dass eine ausreichende Holzfeuchtigkeit erreicht werden kann. Dies lässt vermuten, dass die kürzeren Fasern eher durch die stufige Aufbereitung des Altholzes durch Zerkleinerungsmaschinen verursacht werden. Bei der Zerkleinerung von Frischholz wird dieses üblicherweise nur einmal zerspant. Im Gegensatz dazu muss Altholz, welches in grob-stückiger-Form vorliegt, dahingehend zerkleinert werden, dass Störstoffe und Verunreinigungen separiert werden können. Dabei ist nicht immer gewährleistet, dass die erzeugten Hackspäne eine gleichmäßige Größe aufweisen. Es entstehen bei diesem Prozess häufiger Splitter und damit ein höherer Fein-

anteil. Dieser Feinanteil gelangt z. T. mit in den Verarbeitungsprozess und führt u. U. zu einem höheren Kurzfasernanteil bei der Faserlängenverteilung.

Bedingt durch die Veränderung der Aufschlussstemperaturen von 150°C auf 180°C konnte bei den aufgeschlossenen Altholzfraktionen ein geringerer Splitteranteil als bei niedrigeren Aufschlussstemperaturen ermittelt werden. Bei der Betrachtung lag dieser beim Altholz immer etwas höher als beim Frischholz. Auch unvollständig zerfaserte Bündel waren beim Altholz mit schlechterer Qualität (Fa. D) häufiger zu finden als bei guten Altholzqualitäten (Fa. A und Fa. C).

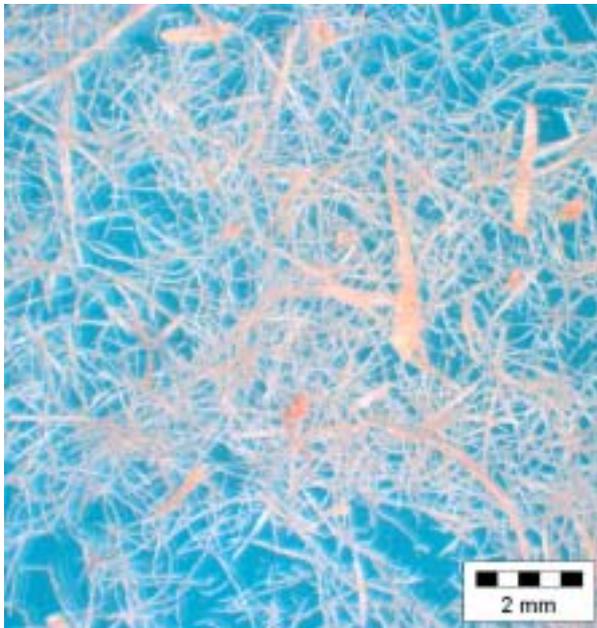


Abb. 6.22: Kiefernfaserstoff, gewonnen bei 150°C mit einer Vordämpfzeit von 5 min; Aufnahme einer repräsentativen Probe (Vergrößerung 6,3-fach)



Abb. 6.23: Kiefernfaserstoff, gewonnen bei 150°C mit einer Vordämpfzeit von 5 min; Aufnahme einer repräsentativen Probe (Vergrößerung 10-fach, Färbung: Jod-Jodkalium)

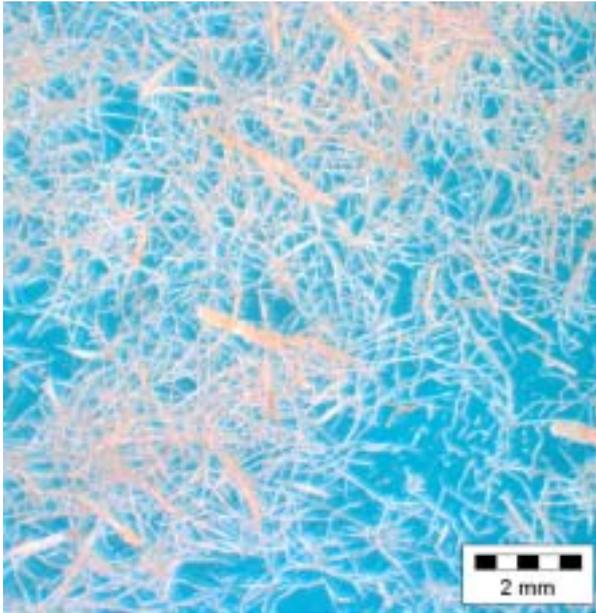


Abb. 6.24: Kiefernfaserstoff, gewonnen bei 180°C mit einer Vordämpfzeit von 5 min; Aufnahme einer repräsentativen Probe (Vergrößerung 6,3-fach)

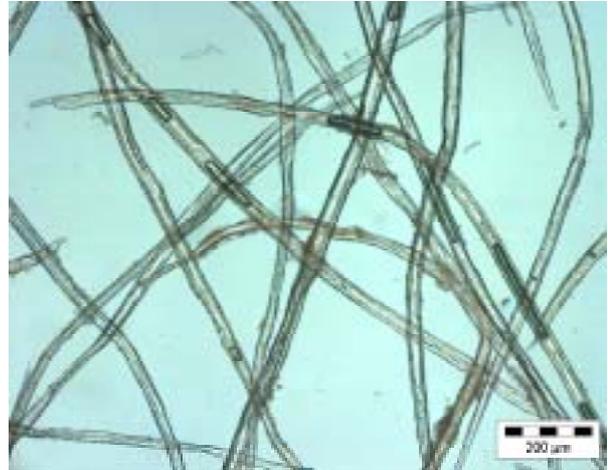


Abb. 6.25: Kiefernfaserstoff, gewonnen bei 180°C mit einer Vordämpfzeit von 5 min; Aufnahme einer repräsentativen Probe (Vergrößerung 10-fach, Färbung: Jod-Jodkalium)

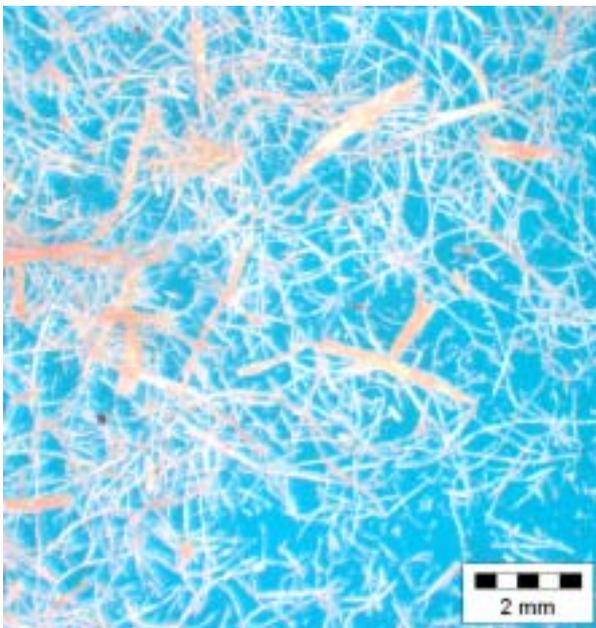


Abb. 6.26: Altholzfaserstoff, gewonnen bei 150°C mit einer Vordämpfzeit von 5 min; Aufnahme einer repräsentativen Probe (Vergrößerung 6,3-fach)



Abb. 6.27: Altholzfaserstoff, gewonnen bei 150°C mit einer Vordämpfzeit von 5 min; Aufnahme einer repräsentativen Probe (Vergrößerung 10-fach, Färbung: Jod-Jodkalium)

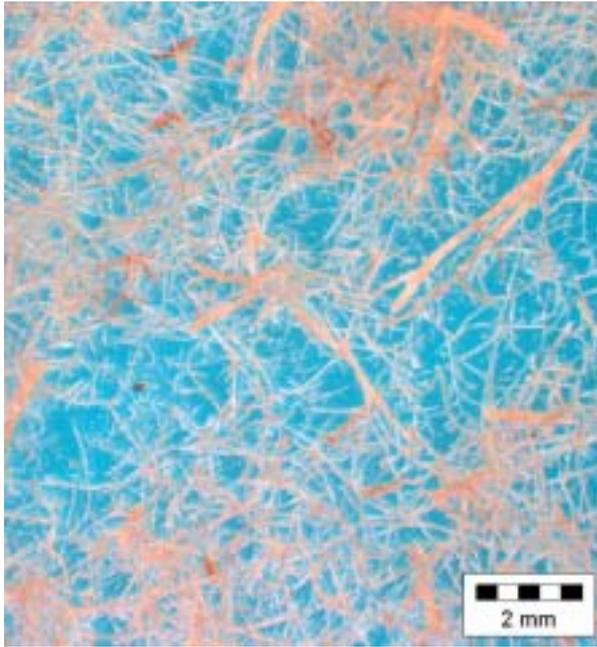


Abb. 6.28: Altholzfaserstoff, gewonnen bei 180°C mit einer Vordämpfzeit von 5 min; Aufnahme einer repräsentativen Probe (Vergrößerung 6,3-fach)



Abb. 6.29: Altholzfaserstoff, gewonnen bei 180°C mit einer Vordämpfzeit von 5 min; Aufnahme einer repräsentativen Probe (Vergrößerung 10-fach, Färbung: Jod-Jodkalium)

6.3.7.3 Mikroskopischer Nachweis von Pilzhyphen

Wie im Unterabschnitt 3.2.1 beschrieben, umfasst der Befall von Pilzen eine Vielzahl von unterschiedlichen Schadbildern und ist neben der mechanischen die häufigste Schädigung am Holz. Die folgenden Beispiele sollen stellvertretend für die Fülle möglicher Pilzinfektionen stehen.

Ein bei Palettenholz häufig auftretendes Schadbild ist die Bläue. In Anbetracht der Produktionskosten wird das Holz für die Palettenherstellung nicht oder wenig getrocknet und neigt zum Verblauen. Im Detail konnten Hyphen von Bläuepilzen, die die Fähigkeit haben, Zellwände zu durchdringen, beobachtet werden (Abb. 6.30). Die als Transpressorien bezeichneten Hyphen durchwachsen die Zellwand, ohne dass enzymatische Abbaureaktionen sichtbar sind (LIESE und SCHMID, 1964). Die Autoren vermuteten die Wirksamkeit mechanischer Kräfte. Das Verblauen von Holz ist zwar kein technologischer Nachteil, kann aber zu Farbnuancen in den daraus hergestellten Holzwerkstoffplatten führen. Bei Holzwerkstoffen, bei denen größere Späne verarbeitet werden (z.B. OSB), kann dies in der Deckschicht häufiger beobachtet werden.

Lichtmikroskopische Untersuchungen an Altholzhackspänen zeigten vereinzelt Pilzhypen (Abb. 6.31). Wie in Abbildung 6.32 dargestellt, durchbohren einzelne Hyphen die Tüpfel, um so in benachbarte Zellreihen vordringen zu können. Insgesamt gesehen waren bei Altholzsortimenten schätzungsweise 3% der Hackspäne durch Pilze befallen. Mit der Abbildung 6.33 konnte dargestellt werden, dass sich die Hyphen auch nach dem Aufschlussprozess in den Fasern befinden. Die Pilzhypen konnten nach dem Zerfaserungsprozess (3 min/150°C) durch die Pikrin-Anilinblau-Färbung in den Fasern sichtbar gemacht werden.

Verunreinigungen wie Thermoplaste, die sich bei höheren Temperaturen zersetzen, konnten erwartungsgemäß nicht mikroskopisch erfasst werden. Auch andere Störstoffpartikel konnten im Fasermaterial nicht ausgemacht werden.

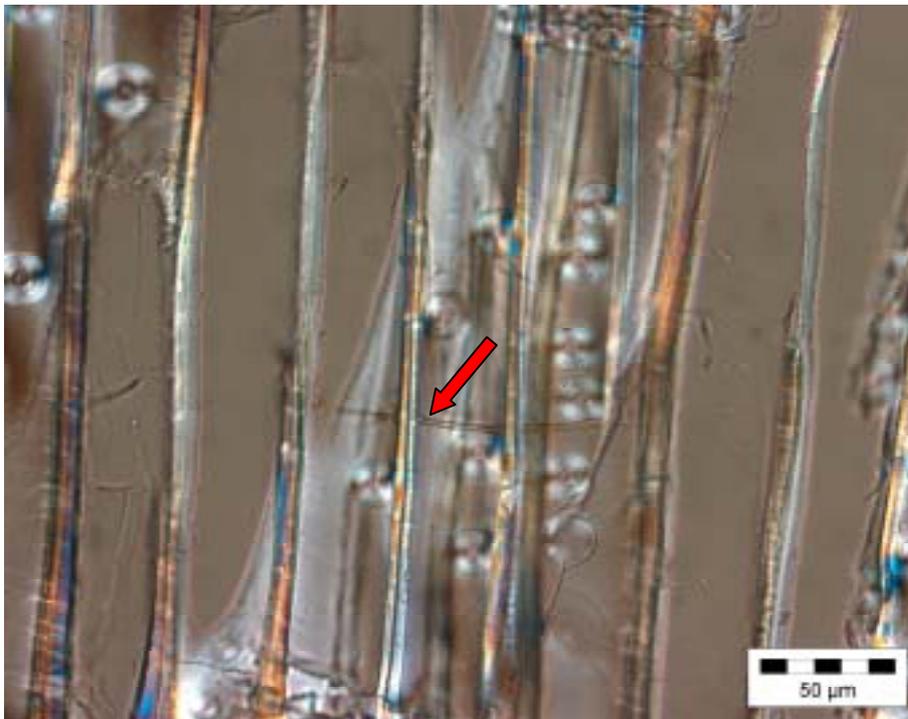


Abb. 6.30: Hyphe eines Bläuepilzes, der die verholzte Zellwand durchbohrt (Transpressorien) (Tangentialschnitt, Vergrößerung 40-fach, Durchlicht, Polfilter)



Abb. 6.31: Anhäufungen von Bläuehyphen in den Tracheiden eines Hackspans (Tangentialschnitt, Vergrößerung 40-fach, Durchlicht, Polfilter)



Abb. 6.32: Durchdringen von Pilzhyphen durch einen Tüpfel (Tangentialschnitt, Vergrößerung 100-fach mit Ölemulsion, Durchlicht, Färbung: Anilinblau und Safranin)

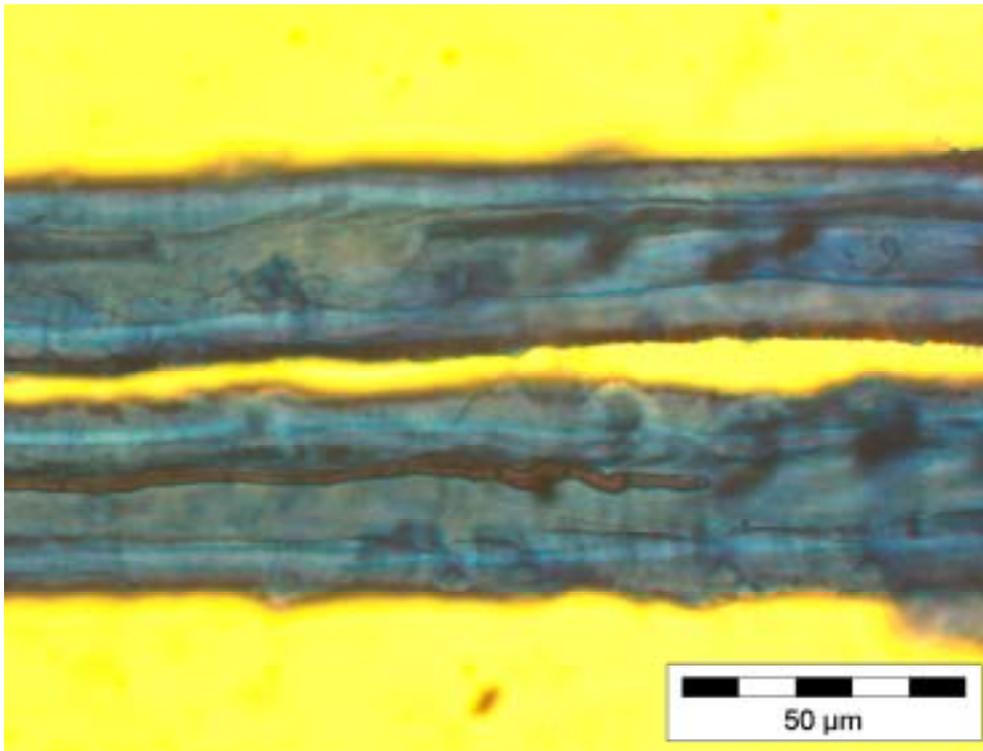


Abb. 6.33: Bei 3 min/150°C aufgeschlossene Faser mit einer eingeschlossenen Hyphe
(Vergrößerung 63-fach, Durchlicht, Färbung: Pikrin Anilinblau)

6.3.7.4 Strukturänderungen in überbeanspruchtem Holz

Starke dynamische Beanspruchungen als Folge des Messereingriffes führen zu irreversiblen Strukturänderungen im Holzverband und in den peripheren Bereichen auch zu Rissbildungen (Abb. 6.34) und Abspaltungen. Das Ausmaß der Schädigung hängt wesentlich von der Hackspänegröße ab. Je kleiner ein Span ist, desto stärker wirken sich die Schadensformen aus (PATT et al., 1981). Von ausgewählten Proben der Alt- und Frischholzsortimente (3 min/150°C und 3 min/180°C) wurden lichtmikroskopische Aufnahmen an Holzpräparaten und vom hergestellten Fasermaterial angefertigt. Die analysierten Proben zeigten besonders im polarisierten Licht die paarweise gekreuzten Stauchlinien und Auswölbungen der Zellwand (Abb. 6.35 bis 6.37). Dies konnte sowohl bei den Altholzfraktionen als auch an den Frischholzproben beobachtet werden. Die Tracheiden sind in diesen Bereichen durch die Überbeanspruchung stark geschwächt, was nach DELORME und VERHOFF (1975) auf Veränderungen in der Micellarstruktur der Sekundärwände zurückgeführt werden kann, wobei es bis zum Zerfaserungsprozess (Abb. 6.38), nicht zum Bruch der Fibrillen kommt.

Aus den Untersuchungen geht hervor, dass die Linien in einem Winkel von ca. 70° zur Faserachse verlaufen. Inwieweit die Stauchlinien in mechanischer Hinsicht Schwächezonen im Holzverband darstellen und diese Auswirkungen auf die mechanisch-technologischen Eigenschaften der MDF haben, wurde im Rahmen dieser Arbeit nicht untersucht.

Bei der mikroskopischen Betrachtung des Faserstoffes kann bei gekreuzten Linien nicht immer davon ausgegangen werden, dass es sich um Stauchlinien handelt. Der in Abbildung 6.39 zu sehende Faserausschnitt lässt zwar auf eine Stauchung der Faser schließen, aber bei genauerer Betrachtung der Faser an anderer Stelle zeigten sich schraubige Verdickungen in den Zellwänden, was auf die Holzart Douglasie hinweist. Als Vergleich ist in Abbildung 6.40 eine mit Stauchlinien geschädigte Kiefernfrischholzfaser dargestellt.

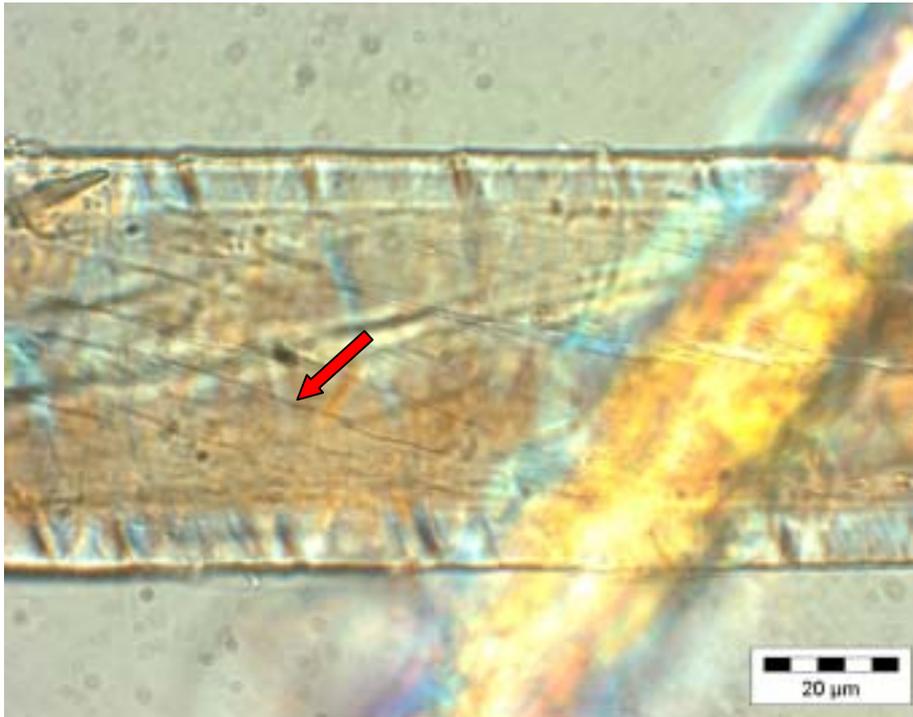


Abb. 6.34: Aufnahmen von Rissbildungen in der Zellwand des durch Belastung beanspruchten Holzes (Vergrößerung 100-fach mit Ölemulsion, Färbung: May-Grünwald)

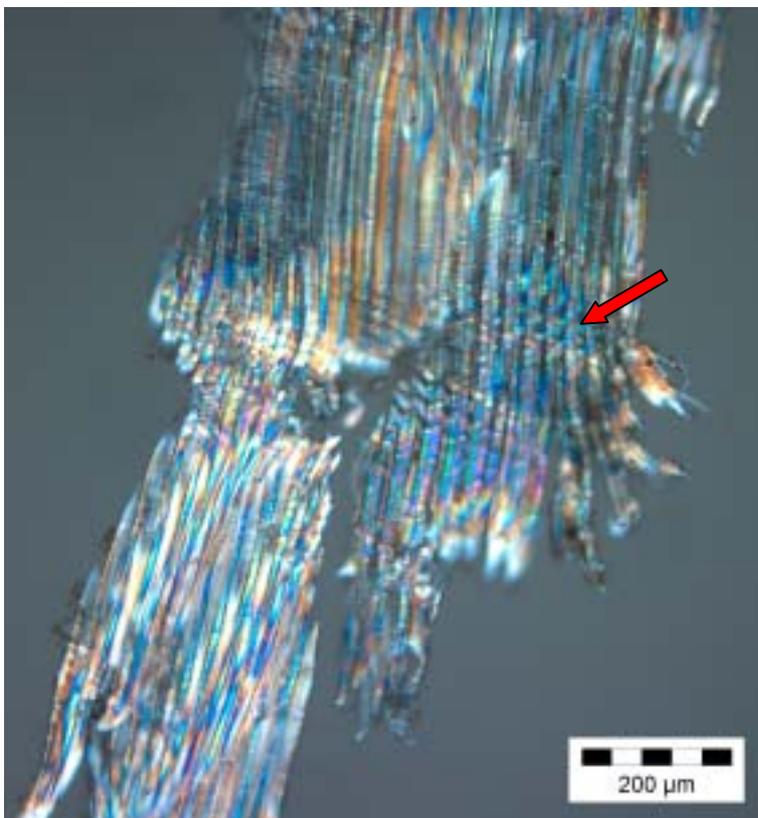


Abb. 6.35: Tangentialschnitt eines Altholzhackspanes mit paarweise gekreuzten Stauchlinien, die durch mechanische Bearbeitung hervorgerufen wurden (Vergrößerung 10-fach, Polfilter)

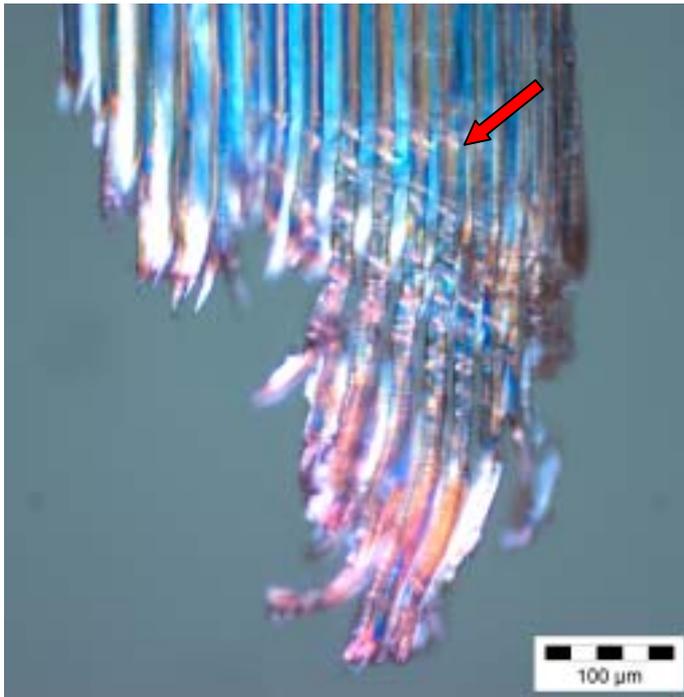


Abb. 6.36: Tangentialschnitt durch einen Altholzhackspan (Tanne) mit paarweise gekreuzten Stauchlinien und Auswölbungen an den Zellwänden (Vergrößerung 20-fach, Polfilter)

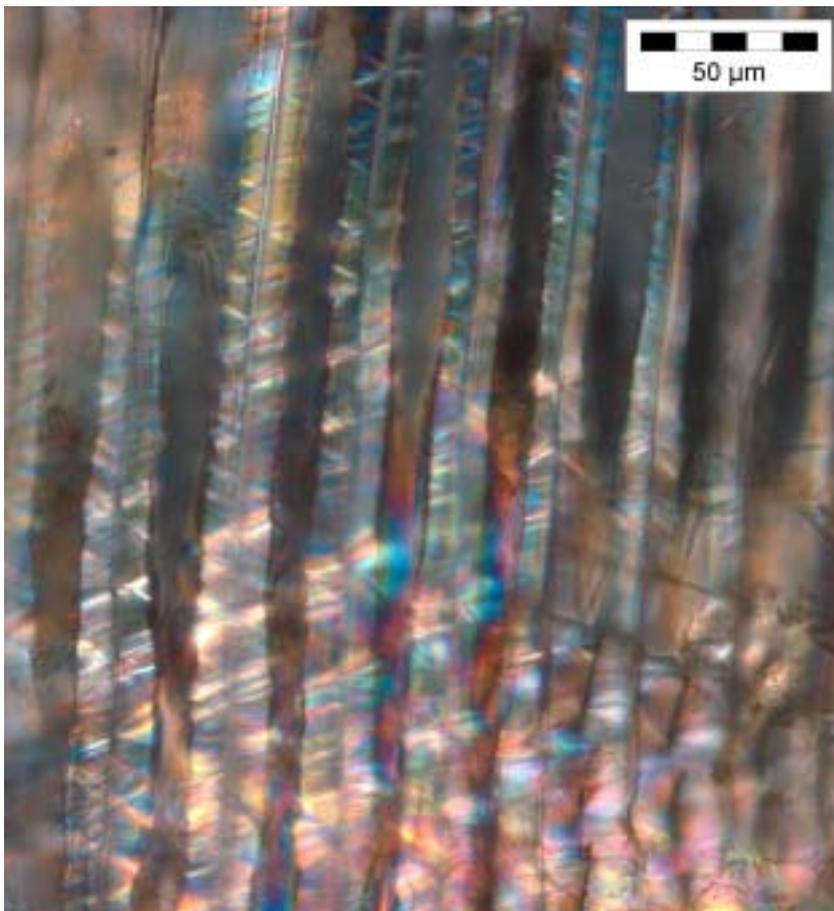


Abb. 6.37: Deutlich zu sehende Kreuzlinien, die durch Stauchung an einem Altholzspan hervorgerufen wurden (Tangentialschnitt, Vergrößerung 40-fach, Polfilter)

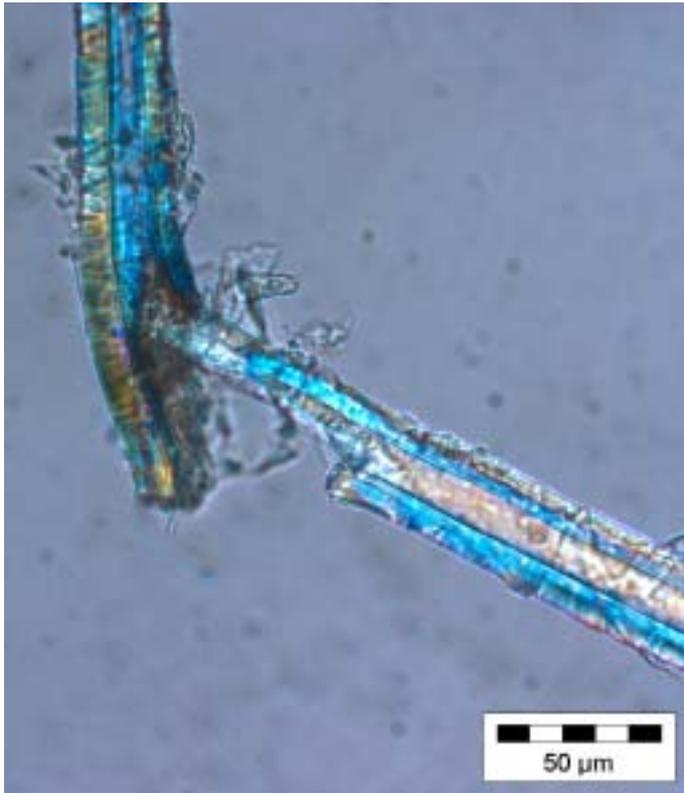


Abb. 6.38: Eine durch Stauchungen vorgeschädigte und dadurch gebrochene Faser (Vergrößerung 40-fach, Polfilter)

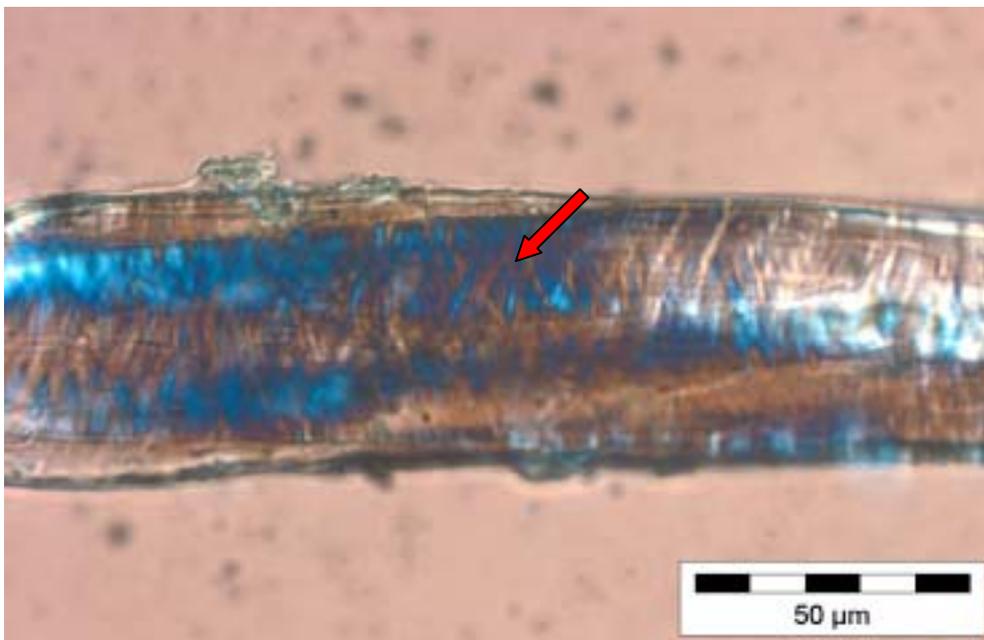


Abb. 6.39: Keine Stauchlinien, sondern schraubige Verdickungen einer Douglasienfaser (Vergrößerung 63-fach, Färbung: Astra Blau)

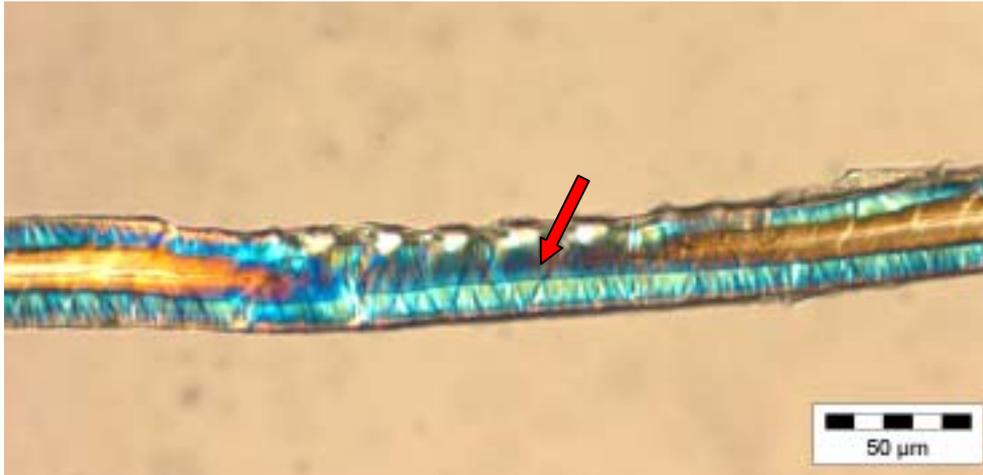


Abb. 6.40: Stauchlinie an Frischholzfaser (Kiefer)
(Vergrößerung 40-fach, Färbung: May-Grünwald)

6.3.7.5 Eigenschaftsänderungen des Untersuchungsmaterials durch biologische und mechanische Einflüsse

Bei der Bearbeitung des Altholzes konnten immer wieder starke Schädigungen an den Faserenden ausgemacht werden. Steigt der Anteil an kurzen Hackspänen nach dem Aufbereitungsprozess, so können Schädigungen an den Faserenden in gehäufter Form auftreten. Sowohl an den Holzchnitten (Abb. 6.41), als auch an den hergestellten Einzelfasern (Abb. 6.42) konnten oftmals zerrissene Enden festgestellt werden.

Neben Kiefer befanden sich einige Laubhölzer in den Altholzsortimenten. An einigen Roteichenaltholzhackspänen konnte ein partieller Zellwandabbau durch Weißfäulepilze lokalisiert werden (Abb. 6.43). Bei der Weißfäule wird vom Pilz zuerst das Lignin abgebaut und erst im weiteren Verlauf auch Cellulose. Im Gegensatz zur Weißfäule tritt die Braunfäule, bei der durch spezielle Enzyme nur Cellulose abgebaut wird, vorwiegend, aber nicht ausschließlich an Nadelhölzern auf. Die Braunfäule konnte am Untersuchungsmaterial nicht gefunden werden.

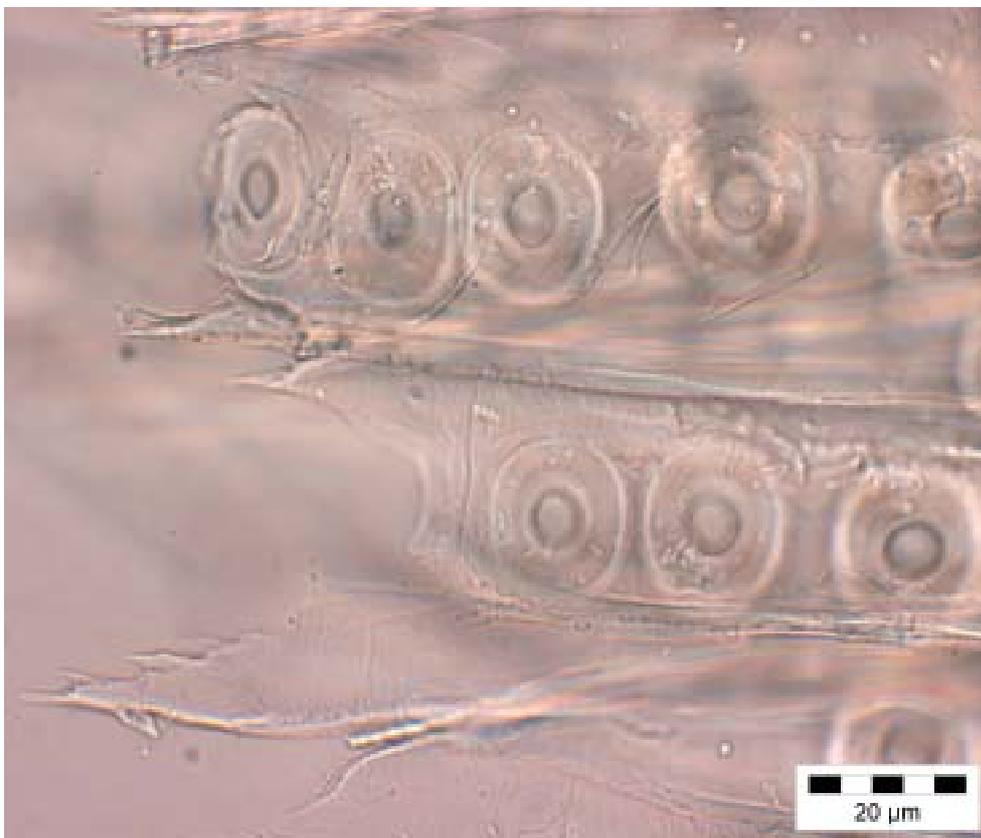


Abb. 6.41: Schnittfläche eines Kiefernhackspanes mit beschädigten Tracheidenwänden (Tangentialschnitt, Vergrößerung 100-fach mit Ölemulsion, Polfilter)



Abb. 6.42: Aufnahme eines beschädigten Altholzfaserendes (Vergrößerung 40-fach, Färbung: May-Grünwald)

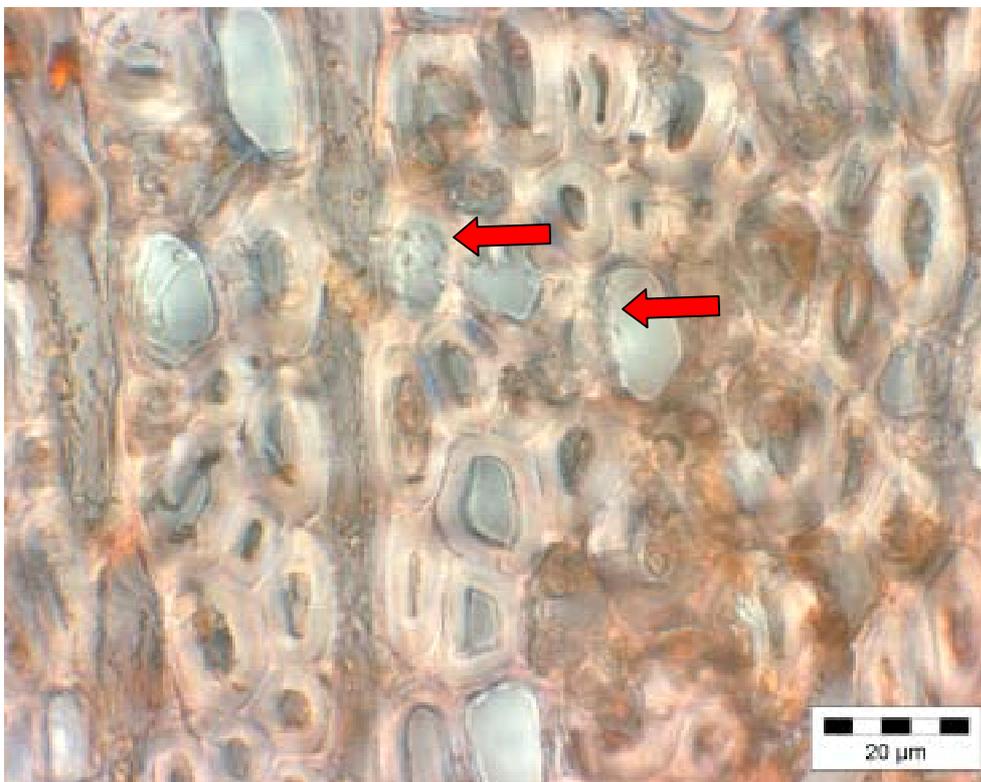


Abb. 6.43: Partieller Zellwandabbau von Roteichenaltholz durch einen Weißfäuleerreger (Querschnitt, Vergrößerung 100-fach, Ölemulsion)

Vergleiche der ursprünglichen Fasern aus Altholzhackspänen und den daraus hergestellten Fasern der einzelnen Altholzchargen untereinander ergaben keine signifikanten Unterschiede in ihrer Morphologie. Dass bestimmte technologische Eigenschaften der hergestellten MDF durch eine Strukturveränderung der Fasern beeinflusst werden, konnte anhand des Probenmaterials der Firma D dargestellt werden. Wie im Unterabschnitt 3.2.2 beschrieben, traten bei diesen im Freien gelagerten Altholzhackspänen erste Lagerungseinflüsse ein, die sich auf die späteren mechanisch-technologischen Eigenschaften übertrugen.

6.3.8 pH-Wert, Pufferkapazität und Wasserrückhaltevermögen von Faserstoffen

Zur Beurteilung der verleimungsrelevanten Eigenschaften wurden neben dem pH-Wert die Pufferkapazität und das Wasserrückhaltevermögen (WRV) der unbeleimten Faserstoffe bestimmt.

Bei der Herstellung von MDF werden hauptsächlich säurehärtende Harnstoff-Formaldehydharze (UF-Harze) eingesetzt. Als Aciditätsgröße kaltwässriger Faserstoffextrakte können der pH-Wert und die Pufferkapazität angesehen werden. Sie spielen im Hinblick auf die Verleimung der hergestellten Faserstoffe eine große Rolle, da die Bindung von Holzfasern mit UF-Harzen der Gesetzmäßigkeit der allgemeinen Säure-Base-Katalyse unterliegen (ROFFAEL, 1987). Die Geschwindigkeit der Härtereaktion des Harzes wird sowohl vom pH-Wert als auch vom gesamten Säuregehalt während des Herstellungsprozesses beeinflusst (SCHNEIDER et al., 2001). Die Ergebnisse der pH-Bestimmung, der Pufferkapazität und des Wasserrückhaltevermögens der im Abschnitt 6.6 beschriebenen Versuchsserie sind in Tabelle 6.12 aufgeführt.

Tab. 6.12: Durchschnittliche pH-Werte, Pufferkapazitäten und WRV-Werte von unbeleimten Fasern aus Altholz, ohne und mit einer Hackspänereinigung des Ausgangsmaterials

Fa.	pH-Wert		Pufferkapazität [mg NaOH/100g atro]		WRV-Wert [%]	
	ohne Hackspänewäsche	mit Hackspänewäsche	ohne Hackspänewäsche	mit Hackspänewäsche	ohne Hackspänewäsche	mit Hackspänewäsche
A	5,10	6,36	0,99	0,85	107,6	109,1
B	5,34	6,60	0,89	0,60	107,5	113,4
C	5,48	6,27	0,86	0,87	106,5	110,5
D	5,93	6,71	0,44	0,25	97,9	103,8
Ref. F	5,20	5,42	0,99	1,43	110,02	101,0

Die pH-Werte der Kaltwasserextrakte von Fasern ohne Hackspänewäsche aus unterschiedlichen Altholzsortimenten stiegen, je nach Verschmutzungsgrad des Materials, leicht an. Der pH-Wert des Altholzmaterials des Altholzverwerterers A (sauberes Altholz) lag auf einem Niveau von Frischholz (Ref. F), während der pH-Wert bei stark verunreinigtem Material (Fa. D) deutlich höher lag (pH 5,9). Der am nicht gereinigten Altholzmaterial bestimmte Anstieg des pH-Wertes der Kaltwasserextrakte der eigenen Untersuchungen kann vermutlich durch eine Neutralisation durch alkalische Verunreinigungen wie Kalk oder Zement hervorgerufen worden sein, die jedoch nicht bestimmt wurden.

Die Abspaltung von Acetylgruppen der Hemicellulosen wird unter Einfluss von Wasser und steigender Temperatur gefördert. Bei dem als Hackspäne vorliegenden Material der Firma D könnte ein Temperaturanstieg im Hackspänehaufen zu einer Zunahme der Essigsäurekonzentration geführt haben. Nach PECINA (1981) verlaufen mit der Einwirkung von Essigsäure auf die Holzbestandteile Hydrolyse- und Acetylierungsvorgänge parallel. Inwieweit die Lagerungsbedingungen von Altholz (Freilandlagerung, kurze und lange Lagerungsperioden) den pH-Wert des Holzes beeinflussen, müsste durch gezielte mikrobiologische Untersuchungen geklärt werden.

Faserstoffe, die aus Altholzhackspänen mit einer vorherigen Hackspänereinigung hergestellt wurden, weisen schwach saure pH-Werte auf. Die Verlagerung des pH-Wertes in den schwach sauren Bereich könnte durch organische Säuren, wie z.B. Ameisensäure und Essigsäure, die sich schon bei ca. 40°C verflüchtigen, hervorgerufen werden (DIX und ROFFAEL, 1994; ROFFAEL, 1989). Beim Referenzmaterial Kiefer konnte dieser pH-Wertunterschied nicht ermittelt werden.

Bei einem so inhomogenen Material wie Altholz ist es grundsätzlich sehr schwierig, aufgrund der verschiedenen Einflussgrößen eine plausible Erklärung für die pH-Wert Unterschiede zu finden.

Die Pufferkapazitäten der Kaltwasserextrakte aus Faserstoff sinken entsprechend der steigenden pH-Werte der Altholzzusammensetzung. Mit zunehmendem Verschmutzungsgrad des Altholzes nimmt die alkalische Pufferkapazität jedoch ab, was mit dem Anstieg der pH-Werte konform geht.

Wie im Unterabschnitt 3.3.3 beschrieben, wird eine Veränderung in der Feinstruktur der Zellwand durch die Holz-/Fasertrocknung hervorgerufen. Dies ist unter dem Begriff „Verhornung“ bekannt und lässt sich mit Hilfe des Wasserrückhaltevermögens (WRV-Wert) erfassen (JAYME und ROFFAEL, 1970). 1921 erwähnte SCHWALBE in diesem Zusammenhang, dass bei

trockenem Holz die Zellmembranen eine „hornige Oberfläche“ besitzen und dadurch diese Hölzer weniger Wasser aufnehmen können.

Während der Trocknung aggregieren die Mikrofasern der Zellwände durch Kapillarkräfte, so dass sich zusätzliche Wasserstoff-Brücken zwischen den einzelnen Fibrillen ausbilden können. Dadurch bilden sich starre, durch H-Brücken fixierte Domänen. Diese sind beim Wiederanfeuchten für Wasser nur zum Teil zugänglich, so dass verhornte Bereiche bestehen bleiben, die makroskopisch zu einer Versprödung der Faser führen (JAYME und HUNGER, 1957). Während das Quellungsvermögen durch eine Trocknung sinkt, steigt die Irreversibilität des Quellungsverlustes mit zunehmendem Trockengehalt an. Die Strukturänderung der Faserwand während der Trocknung von Cellulosefasern führt zu einem irreversiblen Schließen von Mikroporen bei gleichzeitigem Absinken des mittleren Porendurchmessers und des Gesamtporenvolumens (THODE et al., 1953 und 1955). Der Aufbau der Poren der Hackspäne hat für die Wasserlagerung Bedeutung, da das Wasser in Hackspäne offenerporiger Holzarten besser eindringen kann und sich damit der Wassergehalt erhöht. Dadurch sind die Festigkeiten der Späne geringer, was sich vorteilhaft auf den Zerfaserungsprozess und somit auf die Faserqualität auswirkt.

Der weitaus überwiegende Teil der Kohlenhydrate im Holz liegt in Form meist wasserunlöslicher Polysaccharide vor. Zu den wichtigsten Polysacchariden gehören Cellulose, Polyosen (Hemicellulose) sowie Amylose. Polyosen gehen während des Holzaufschlusses in Lösung, fallen jedoch später wieder auf der Faseroberfläche aus (bei sinkendem pH-Wert). Pentosen sind relativ instabil und werden in saurem Medium zu Furfural abgebaut. In begrenztem Umfang geschieht dies bereits beim Dämpfen, Kochen und Erhitzen von Holz, wobei die durch die Abspaltung von Acetylgruppen gebildete Essigsäure als Katalysator dient. Bei hohen Temperaturen kondensiert das Furfural teilweise mit Lignin und trägt so zur Verklebung der Holzfasern oder -späne bei. Aus der Zellstoffherstellung ist bekannt, dass Polyosen in den Zellstoff-Fasern die Festigkeit von Papier steigern können, wobei dies direkt von der Faser-Faser-Bindung abhängt. Bei Trocknung tendiert deren Polyosenanteil besonders zur Verhornung, wodurch sich die Quellbarkeit verschlechtert. Dieser Faktor ist mitverantwortlich für die Qualitätsminderung von Sekundärfasern.

Bei den in dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen mit Aufschlusstemperaturen von 150°C tritt mit hoher Wahrscheinlichkeit eine zumindest teilweise Ligninkondensation auf der Faseroberfläche ein, so dass die Elastizität der Fasern beeinträchtigt wurde und außerdem weniger Zwischenfaserbindungen ausgebildet wurden. Durch den Aufschluss werden amorphe

Substanzen (Lignin, Hemicellulosen, Pektine) von den Mikrofibrillen abgelöst, wobei die freien Hydroxylgruppen der Fibrillen mit Wassermolekülen belegt werden.

Bei hohen Temperaturen können bei der Cellulose Veränderungen eintreten, wie Kettenabbau oder Carbonylgruppenbildung. Durch den Wechsel von Trocknung und Wiederbefeuchtung lässt auch die Festigkeit im Inneren der Faserwand zwischen den Lamellen bzw. den Mikrofibrillen nach, da auch hier viele Hydroxylgruppen abgesättigt und somit die Größe der aktiven Oberfläche stark herabgesetzt wird.

Die hier ermittelten Ergebnisse des WRV-Wertes lassen bei Betrachtung der Firmen A (sauberes Altholz) bis D (stark verunreinigtes Altholz) den Rückschluss zu, dass mit qualitativ hochwertigem Altholz (vergl. Abschnitt 6.2.3) der WRV-Wert ansteigt. Das Alter und der Verschmutzungsgrad des eingesetzten Altholzes wirkt sich auf den WRV-Wert nachteilig aus. Das Material der Firma D, welches stark mit Störstoffen behaftet war, zeigt neben dem WRV-Wert auch bei der Pufferkapazität die niedrigsten Werte. Beim Einsatz von Altholz geringer Qualitäten (Firma D) wirkt sich die veränderte Faserstruktur stärker auf den WRV-Wert aus als bei Altholz, das vorwiegend aus Palettenholz besteht. Mit der Durchführung der Hackspänereinigung erhöhte sich bei allen Altholzverwertern der WRV-Wert.

Eine Korrelation beim Untersuchungsmaterial zwischen dem pH-Wert und dem WRV konnte nur bedingt bestätigt werden. Nicht immer zeigte ein höherer pH-Wert auch einen geringeren WRV-Wert.

Tab. 6.13: Durchschnittlicher pH-Wert, Pufferkapazität und das Wasserrückhaltevermögen von hergestellten, unbeleimten Laborfasern aus Altholz unter Zugabe von Frischholz

Fa.	pH-Wert	Pufferkapazität [mg NaOH/100g atro]	Wasserrückhalte- vermögen (WRV) [%]
C mit 100% AH	6,27	0,87	-*
C mit 10% FH	5,32	0,80	98,8
C mit 25% FH	5,19	0,85	102,7
C mit 50% FH	4,98	0,96	103,7
C mit 75% FH	4,87	0,99	106,5
D mit 100% AH	6,71	0,25	-*
D mit 10% FH	5,70	0,55	102,4
D mit 25% FH	6,12	0,30	107,1
D mit 50% FH	5,28	0,77	99,1
D mit 75% FH	4,99	1,19	108,9
Ref. F	4,70	1,17	101,2

* wurde nicht bestimmt

Diese Modellvorstellungen können auf die durchgeführten Untersuchungen übertragen werden, dass ein niedriger WRV-Wert und eine geringe Pufferkapazität die technologischen Platteneigenschaften negativ beeinflussen (siehe Abschnitt 6.6).

In einem weiteren Untersuchungsabschnitt des Abschnittes 6.7 wurden den Altholzspänen vor dem Zerfaserungsprozess Anteile an Kiefernfrischholzspänen dazugegeben. Die Auswirkungen der Holzzusammensetzung auf die verleimungsrelevanten Parameter verdeutlicht Tabelle 6.13.

Die Extraktion des Fasermaterials bestätigt die erwartete Verminderung des pH-Wertes mit steigendem Frischholzanteil. Die Ergebnisse stimmen grundsätzlich mit den Ergebnissen der Kaltwasserextrakte der untersuchten gereinigten und ungereinigten Hackspäne überein. Bei der reinen Altholzfaserplatte der Firma C reduzierte sich der pH-Wert von 6,27 auf einen pH-Wert von 4,87 bei der Faserplatte, die zu 75% aus Frischholz und zu 25% aus Altholz hergestellt wurde. Durch Beimischung von 75% Frischholz zum Altholz der Firma D veränderte sich der pH-Wert der reinen Altholzfaserplatte von 6,71 auf einen pH-Wert von 4,99. Der sinkende pH-Wert bei Zugabe von Frischholz hat einen Anstieg der Pufferkapazität zur Folge und kann bei den Ergebnissen der Firma D noch deutlicher herausgestellt werden als bei den Werten der Firma C.

6.3.9 Chemische Eigenschaften von Altholzfasern im Vergleich zu Frischholzfasern

Bei einer Vielzahl technischer Vorgänge wie der Trocknung oder dem thermo-mechanischen Aufschluss von Holz, werden bei thermischen Belastungen durch Hydrolyse kurzkettige Säuren, insbesondere Essigsäure, freigesetzt. Die Abgabe flüchtiger Säuren ist abhängig von der Holzart, der Temperatur sowie der Dauer der thermischen Belastung.

Die vorliegenden Untersuchungen wurden an kaltwässrigen Extrakten folgender Alt- und Frischholzfaser vorgenommen:

Materialbezeichnung	Dampfbehandlung	
	Aufschluss-temperatur	Aufschluss-dauer
F Ref. Kiefer*	150°C	3 min
F Ref. Kiefer, 24 Std. H ₂ O -Lagerung**	150°C	3 min
Fa. E: Kiefern Altholz*	150°C	3 min
Fa. E: Kiefern Altholz, 24 Std. H ₂ O -Lagerung**	150°C	3 min

* Referenz Kiefernfrischholz mit Holzfeuchte nach Fällung des Baumes bzw. Kiefernaltholz mit vorhandener Holzfeuchte

** Referenz Kiefernfrischholz bzw. Kiefernaltholz mit einer 24 stündigen Wasserlagerung der Hackspäne

Die Holzfeuchten wurden vor der Aufbereitung der Hackschnitzel in der MDF-Laboranlage ermittelt und sind im Unterabschnitt 6.3.2 in Tabelle 6.9 aufgeführt. Aus den Untersuchungsergebnissen der Tab. 6.14 lässt sich folgendes ableiten:

Der pH-Wert des Fasermaterials blieb bei beiden Holzsubstanzen (Alt- und Frischholz) und bei den unterschiedlichen Vorbedingungen der Hackspäne auf einem in etwa gleich bleibenden, schwach sauren Niveau.

Als weitere Aciditätsgröße kaltwässriger Faserstoffextrakte wurde die Pufferkapazität bestimmt. Der Zusammenhang zwischen steigendem pH-Wert und sinkender Pufferkapazität konnte beim Frischholz zwar ermittelt, aber nicht auf die Altholzfasern übertragen werden. Die Pufferkapazität kann als Richtungsindex für die Zugabe von Säuren oder Basen zum Bindemittel dienen. Bei UF-Harzen muss Säure dazugegeben werden, damit das Harz im sauren Milieu aushärten kann (BOEHME, 2000).

Tab. 6.14: Durchschnittlich chemische Eigenschaften von Frisch- und Altholzfasern

Eigenschaften	F Ref. Kiefer	F Ref. Kiefer, 24 Std. H ₂ O - Lagerung	Fa. E: Kiefern Altholz	Fa. E: Kiefern Alt- holz, 24 Std. H ₂ O -Lagerung
pH-Wert	4,74	4,42	4,53	4,59
Pufferkapazität (mg NaOH/100g Faserstoff)	0,86	1,21	1,33	1,07
Extraktstoffgehalt (Heißwasserex- traktion) (%)	2,93	3,19	4,10	3,19
Gehalt an Formiat und Acetat (Kaltwasserextraktion) (mg/100g atro Faserstoff)				
- Formiat	1,7	23,8	8,1	11,2
- Acetat	n.n.*	3,4	2,6	4,0
Abgabe an flüchtigen Säuren (Fla- schen-Methode, 24h bei 40°C) (mg/100g atro Faserstoff)				
- Ameisensäure	1,3	3,9	1,8	2,4
- Essigsäure	1,7	3,0	1,5	1,5
WRV-Wert (%)	108,9	107,4	105,6	109,1

* nicht nachweisbar

Einen Überblick über die Untersuchungsergebnisse der unterschiedlichen Materialien und deren Vorbehandlung liefert die Abbildung 6.44.

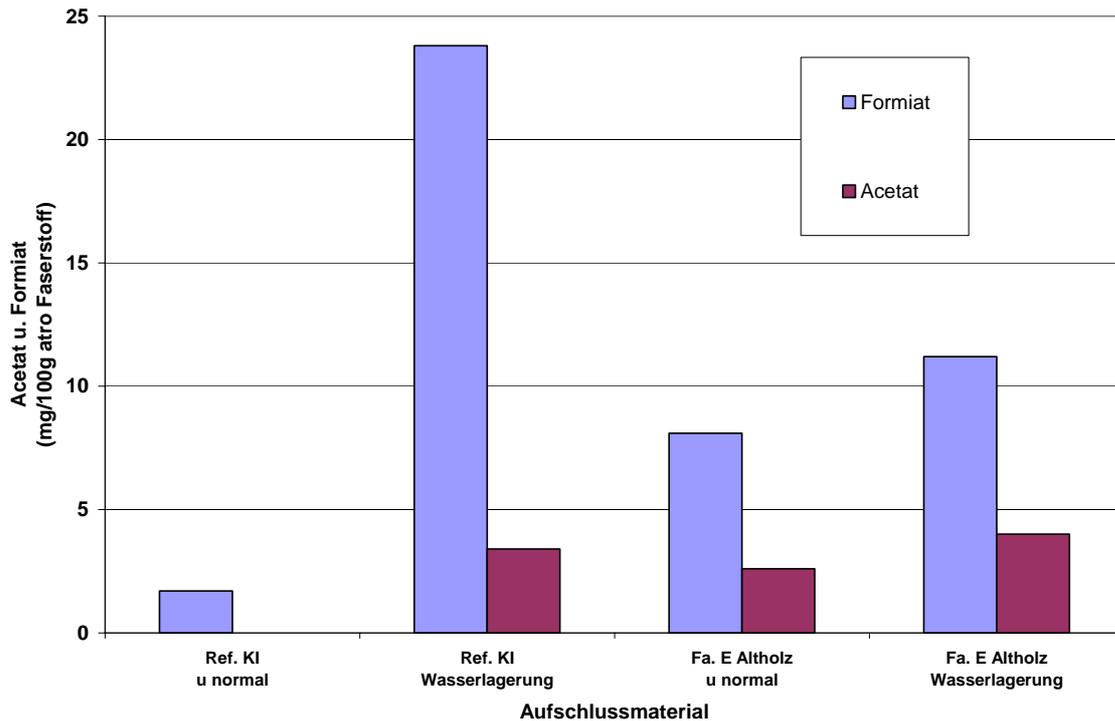


Abb. 6.44: Durchschnittlicher Gehalt an Acetat- und Formiationen (mg/100g Faserstoff) in Kaltwasserextrakten aus Fasern, hergestellt aus Frisch- und Altholzhackschnitzeln

Die Abnahme des Gehaltes an Acetat- und Formiationen der Kaltwasserextrakte durch die unterschiedlichen Vorbehandlungen stehen mit den Ergebnissen der pH-Wert- und Pufferkapazitätsbestimmung im Einklang. Kaltwasserextrakte mit niedrigem pH-Wert und hoher Pufferkapazität weisen den höchsten Anteil an Acetat- und Formiationen auf. Besonders auffällig ist der vergleichsweise hohe Gehalt an Formiat in kaltwässriger Extraktion bei einer vorherigen Wasserlagerung des Materials. Acetat konnte bei der Referenzkiefer nicht nachgewiesen werden.

Die Untersuchungen der Säureabgabe am Fasermaterial zeigten, dass sich die Abgabe an flüchtigen Säuren durch die Wasserlagerung der Alt- und Frischholzhackspäne erhöhte. In Abbildung 6.45 sind die Ergebnisse der Abgabe von flüchtigen Säuren (Ameisensäure und Essigsäure) dargestellt.

Nach KLAUDITZ und STEGMANN (1955) wirkt sich die thermische Behandlung von Holz günstig auf die Bildung von Essigsäure aus, die als Abbauprodukt der Acetylgruppen aus Hemicellulosen entsteht. Zur Bildung von Ameisensäure liegen verschiedene Theorien vor, wobei eine davon dem Abbau von Polysacchariden des Holzes unter sauren oder alkalischen Bedingungen zuge-

geschrieben wird (RUNKEL, 1951a). Daneben wird vermutet, dass ein biologischer Abbau die Ursache für die Abnahme an Essig- und Ameisensäure ist (PACKMANN, 1960).

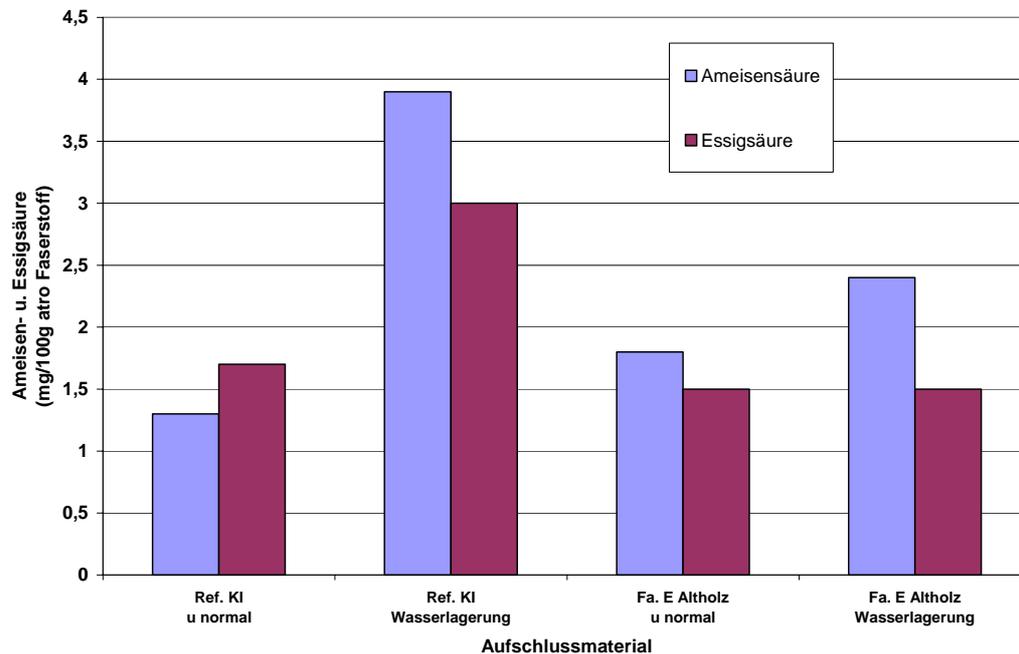


Abb. 6.45: Durchschnittliche Abgabe von Ameisen- und Essigsäure (mg/100g Faserstoff) von Fasern, hergestellt aus Frisch- und Altholzhackschnitzeln

6.3.10 Zusammenfassung

Fasercharakterisierung:

- Die Ergebnisse der Faserlängenverteilung nach dem Bauer McNett-Verfahren verdeutlichen, dass mit den Aufschlussparametern (3 min/150°C) sich die Massenanteile der Alt- und Frischholzfaser von langen Fasern hin zu einem höheren Feinanteil (hoher Massenanteil bei R100) und damit zu kürzeren Faserlängen verschieben.
- Bei intensiverer Aufschlusstemperatur der Hackspäne von 180°C und 3 min Dämpfzeit wurden deutlich höhere Massenanteile an langen Fasern bei Alt- und Frischholz als gegenüber der Aufschlusstemperatur von 150°C ermittelt.
- Die ermittelten Faserlängenverteilungen bei der Trockensiebung deckten sich mit denen der Nasssiebung.
- Die Faserlängenbestimmung durch die Mikroskop-Bildverarbeitung zeigte, wie auch bei der Faserlängenverteilung nach Bauer McNett, dass die Menge an kurzen Fasern bei einer Dämpf-

bedingung von 3 min/180°C des Alt- und Frischholzes deutlich niedriger waren als bei den Dämpfbedingungen 3 min/150°C.

- Im Gegensatz zur Fischholzfaser war die Altholzfaserlänge etwas kürzer.

Lichtmikroskopie:

- Die durch mechanische Schädigungen an den Oberflächen der Hackspäne hervorgerufenen Stauchlinien wurden lichtmikroskopisch erfasst.
- Des Weiteren wurde am Altholz, bedingt durch seine Gebrauchsdauer, der Befall von Pilzen ausgemacht, welcher im Faserstoff wieder gefunden wurde.
- Die Enden der spröderen Altholzfasern waren oftmals gebrochen oder wiesen abgelöste Faserenden auf.

Chemische Analysen:

- Die hier ermittelten Ergebnisse des WRV-Wertes lassen bei Betrachtung der Firmen A (sauberes Altholz) bis D (stark verunreinigtes Altholz) den Rückschluss zu, dass mit qualitativ hochwertigem Altholz der WRV-Wert ansteigt.
- Der pH-Wert des Fasermaterials blieb bei beiden Holzsubstanzen (Alt- und Frischholz) und bei den unterschiedlichen Vorbedingungen der Hackspäne auf einem in etwa gleich bleibenden, schwach sauren Niveau.
- Die Untersuchungen der Säureabgabe am Fasermaterial zeigten, dass sich die Abgabe an flüchtigen Säuren durch die Wasserlagerung der Alt- und Frischholzhackspäne erhöhte.

6.4 Einfluss variierender Aufschlussbedingungen auf die Eigenschaften von Alt- und Frischholzfasern

6.4.1 Zielsetzung

Die unter Abschnitt 6.3 hergestellten Faserstoffe wurden zu einem späteren Zeitpunkt in einem Pflugscharmischer beleimt und anschließend zu Laborfaserplatten verarbeitet. Dabei sollten folgende Fragen betrachtet werden:

- Wie wirken sich unterschiedliche Aufschlussbedingungen der Hackspäne auf die hergestellten Laborfaserplatten hinsichtlich ihrer mechanisch-technologischen Eigenschaften aus?
- Ist eine Korrelation zwischen den Ergebnissen der Fasercharakterisierung (Abschnitt 6.3.3) und der in diesem Abschnitt ermittelten Platteneigenschaften möglich?
- Besteht eine Abhängigkeit zwischen den verschiedenen Aufschlussbedingungen und der Ausgleichsfeuchte (Prüffeuchte)?

6.4.2 Untersuchungsprogramm

Diese Untersuchungen wurden zur Ergänzung der im Abschnitt 6.3 beschriebenen Fasercharakterisierungen durchgeführt. Aus Gründen des Versuchsablaufes wurde der im Abschnitt 6.3 gewonnene Faserstoff in einem Lödige FM 130 D Pflugscharmischer mit dem UF-Harz Kaurit® 407 flüssig der Fa. BASF trocken beleimt und zu Faserplatten verarbeitet. Bei allen anderen nachfolgenden Untersuchungen erfolgte die MDF-Beleimung des Fasermaterials stets in der Blow-Line. Nach einer zwei wöchigen Lagerung der Prüfkörper im Normklima wurden deren technologische Eigenschaften nach den entsprechenden Normen ermittelt.

Für jede Untersuchungsbedingung wurden jeweils zwei 16 mm dicke Laborfaserplatten des gleichen Typs hergestellt (Abschnitt 5.5).

6.4.3 Beziehung zwischen der Faserlängenverteilung von Faserstoffen und den mechanisch-technologischen Eigenschaften daraus hergestellter Platten

Die Eigenschaften der mit Fasern aus reinem Kiefernalt- und Kiefernfrischholz mit unterschiedlichen Aufschlussparametern hergestellten MDF sind in den Tabellen 6.15 und 6.16 aufgeführt (Anhang 9.2: Tab. 1 bis 10).

Nachteilig ist bei der Blow-Line-Beleimung, 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; DEPPE, 1996). Im Gegensatz zur Blow-Line wird bei der Mischerbeleimung das Bindemittel auf die trockene Faser gesprüht, wodurch weniger flüchtige Leimkomponenten und Vorreaktionen entstehen. Beim direkten Vergleich führt die Beleimung in der Blow-Line, bei gleichem Bindemiteleinsatz, zu einer Verringerung der Biege- und Querzugfestigkeiten der Faserplatten. Diese Zusammenhänge wurden kürzlich durch Arbeiten von ROFFAEL et al. (2003) bestätigt. Die vorliegenden Ergebnisse lassen den Schluss zu, dass sich durch die Mischerbeleimung eine Verbesserung der technologischen Eigenschaftswerte der MDF bei gleichem Beleimungsfaktor der Fasern gegenüber der Blow-Line Beleimung erzielen lässt. Ein direkter Vergleich mit denen ab Abschnitt 6.5 nachfolgenden Abschnitten der hergestellten Laborfaserplatten ist daher nur bedingt möglich.

Bis heute konnte der erhöhte Bindemittelverbrauch durch die Blow-Line Beleimung nicht vollständig geklärt werden. Ansätze einer Erklärung hierfür wären, neben der Leimverflüchtigung beim Trocknungsvorgang, die Leimvoraushärtung, die Leimverteilung und die Vorkondensation des Leimes im Trockner (GRAN, 1982; BUCKING, 1982; WALTERS, 1990; ROBSON, 1991; BUCHHOLZER, 2000). Die Voraushärtung des Leimfilmes auf der Faser durch die Einwirkung der organischen Säuren wird durch die hohe Fasertemperatur (rd. 100°C) sehr beschleunigt. Gleichzeitig können hydrolytische Abbauprozesse des Leimes durch die anwesende Feuchte ablaufen. Durch Puffern mittels Alkalizugabe ist diese unerwünschte Vorhärtung zu reduzieren. Erste mögliche Lösungsversuche konnten XING et al. (2002) mit der Laser Scanning Mikroskopy und der Bildanalyse machen. Mit dieser Methode ist es möglich, Formaldehydleime auf Faserstoffen zu detektieren.

Tab. 6.15: Mittelwerte (Biege-E-Modul und Biegefestigkeiten n = 12; Rohdichte n = 10; Querzug- und Abhebefestigkeiten n = 20) von 16 mm dicken Labor-MDF, deren Fasern aus reinem Kiefernaltholz mit unterschiedlichen Aufschlussparametern hergestellt wurden (mit Pflugscharmischer trocken beleimt)

	Rohdichte	$S_x^{1)}$	$V^{2)}$	Biege-E-Modul	$S_x^{1)}$	$V^{2)}$	Biegefestigkeit	$S_x^{1)}$	$V^{2)}$	Querzugfestigkeit	$S_x^{1)}$	$V^{2)}$	Abhebefestigkeit	$S_x^{1)}$	$V^{2)}$
Firma	\bar{x} kg/m ³	\bar{x} kg/m ³	(%)	\bar{x} N/mm ²	\bar{x} N/mm ²	(%)									
Fa. E Altholz (3 min/150°C)*	707	19,25	2,72	3711	237	6,38	42,6	3,1	7,16	0,67	0,02	3,60	1,99	0,18	8,83
Fa. E Altholz (8 min/150°C)	703	21,69	3,08	3607	245	6,80	44,1	3,7	8,35	0,66	0,03	4,58	1,98	0,13	6,56
Fa. E Altholz (3 min/180°C)	703	17,20	2,45	3843	159	4,15	45,6	2,4	5,25	0,60	0,04	6,25	1,93	0,24	12,37
Fa. E Altholz (8 min/180°C)	698	20,88	2,99	3472	238	3,84	35,9	3,3	9,18	0,67	0,11	12,79	2,07	0,26	12,38
Anforderungen nach EN 622-5	-	-	-	≥2200	-	-	≥20	-	-	≥0,55	-	-	-	-	-

* Referenz Kiefernaltholz mit Holzfeuchte, die im Abschnitt 6.5 in Tab. 6.10 aufgeführt ist; in Klammern die Aufschlussbedingungen

¹⁾ S_x = Standardabweichung

²⁾ V = Variationskoeffizient

Tab. 6.16: Mittelwerte (Biege-E-Modul und Biegefestigkeiten n = 12; Rohdichte n = 10; Querkzug- und Abhebefestigkeiten n = 20) von 16 mm dicken Labor-MDF, deren Fasern aus reinem Kiefernfrischholz mit unterschiedlichen Aufschlussparametern hergestellt wurden (mit Pflugscharmischer trocken beleimt)

	Rohdichte	$S_x^{1)}$	$V^{2)}$	Biege-E-Modul	$S_x^{1)}$	$V^{2)}$	Biegefestigkeit	$S_x^{1)}$	$V^{2)}$	Querkzugfestigkeit	$S_x^{1)}$	$V^{2)}$	Abhebefestigkeit	$S_x^{1)}$	$V^{2)}$
Firma	\bar{x} kg/m ³	\bar{x} kg/m ³	(%)	\bar{x} N/mm ²	\bar{x} N/mm ²	(%)	\bar{x} N/mm ²	\bar{x} N/mm ²	(%)	\bar{x} N/mm ²	\bar{x} N/mm ²	(%)	\bar{x} N/mm ²	\bar{x} N/mm ²	(%)
F Ref. Kiefer	702	24,31	3,46	3674	204	5,54	44,1	3,7	8,35	0,64	0,03	5,05	1,81	0,21	11,42
F Ref. Kiefer (8 min/150°C)	704	20,45	2,91	3810	218	5,71	46,6	3,3	6,99	0,68	0,05	7,91	1,97	0,19	9,64
F Ref. Kiefer (3 min/180°C)	701	28,49	4,06	3797	330	8,69	44,9	3,9	8,80	0,59	0,04	6,58	1,70	0,20	11,72
F Ref. Kiefer (8 min/180°C)	714	29,76	4,17	4083	221	5,41	46,7	1,9	4,01	0,56	0,05	9,36	1,87	0,20	10,75
Anforderungen nach EN 622-5	-	-	-	≥2200	-	-	≥20	-	-	≥0,55	-	-	-	-	-

* Referenz Kiefernfrischholz mit Holzfeuchte nach Fällung des Baumes; in Klammern die Aufschlussbedingungen

¹⁾ S_x = Standardabweichung

²⁾ V = Variationskoeffizient

Inwieweit sich Rückschlüsse aus der Faserlängenverteilung des Faserstoffes auf die spätere Plattenqualität ergeben, soll an nachfolgendem Beispiel dargestellt werden.

Die nach dem Bauer McNett-Verfahren ermittelten Faserlängenverteilungen der Faserstoffe, welche unter den Aufschlussbedingungen 3 min/150°C und 3 min/180°C hergestellt wurden, sind in der Abbildung 6.46 für einen besseren Vergleich nochmals wiedergegeben.

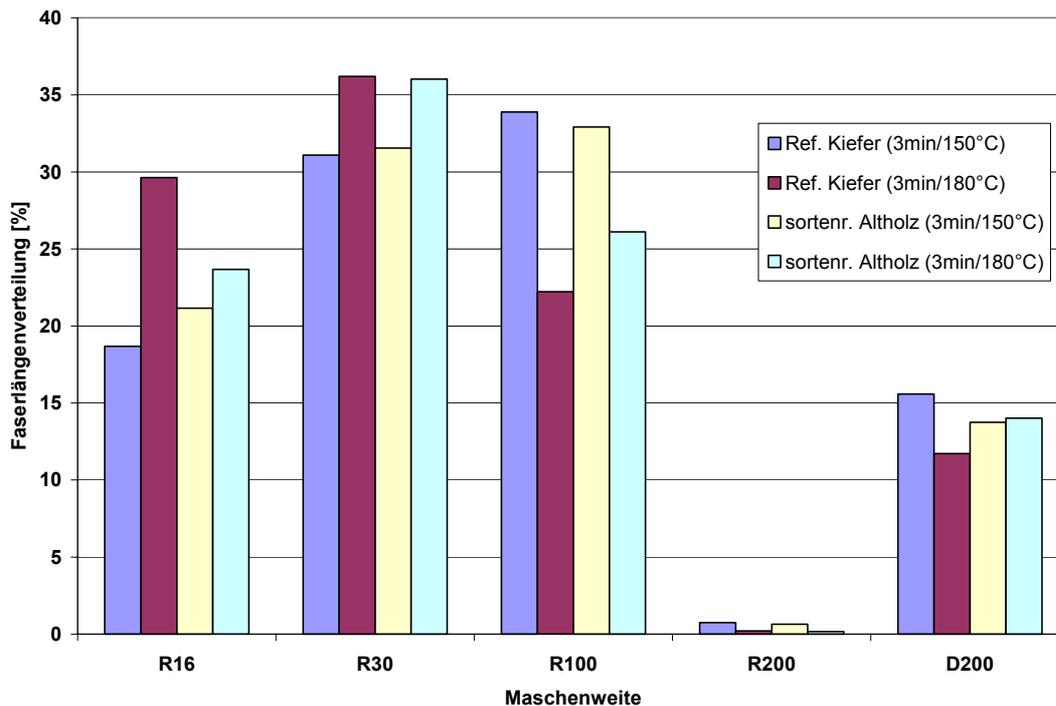


Abb. 6.46: Vergleich der Faserlängenverteilung von Faserstoffen, ermittelt nach dem Bauer McNett-Verfahren, die mit unterschiedlichen Aufschlussparametern hergestellt wurden

Die Faserstoffe aus reinem Kiefernaltholz und Kiefernfrischholz, die bei einer niedrigen Aufschlusstemperatur hergestellt wurden, weisen höhere Feianteile (R100) und geringere Anteile langer Fasern (R16) auf. Bei höheren Aufschlusstemperaturen des Alt- und Frischholzes konnte ein zunehmender Anteil an langen Fasern ermittelt werden. Die technologischen Eigenschaften der daraus hergestellten Platten sind in den Abbildungen 6.47 bis 6.49 dargestellt. Ihre statistischen Werte sind in Tabelle 6.15 und 6.16 aufgeführt.

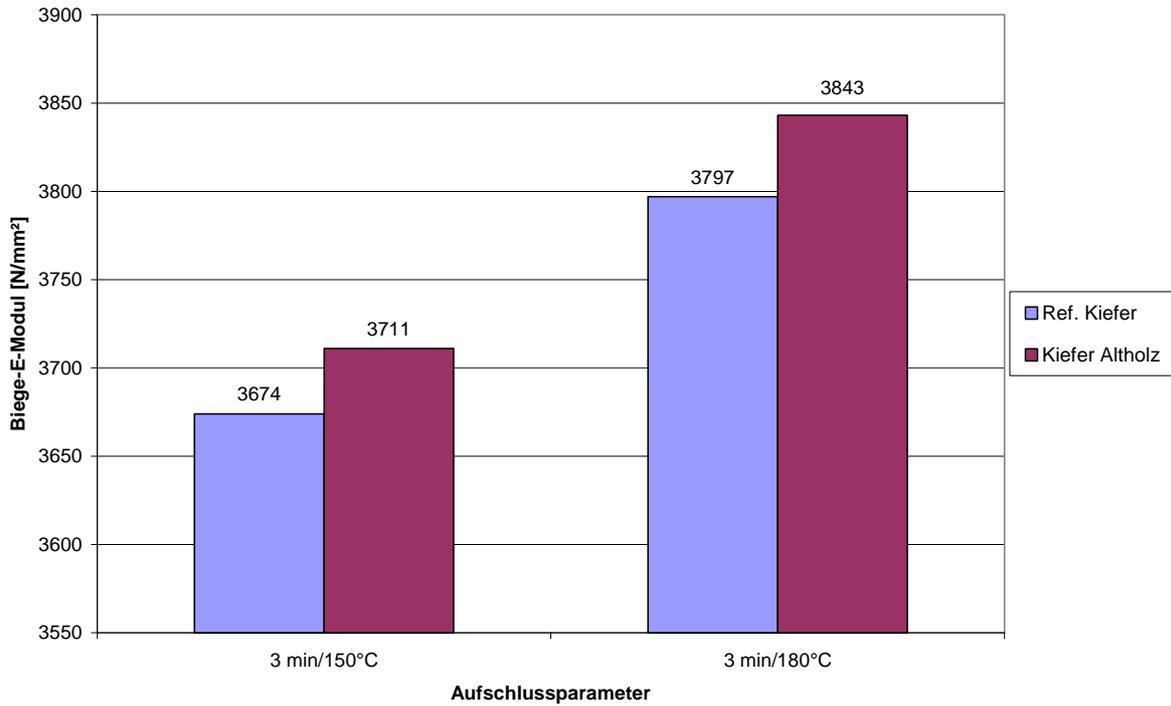


Abb. 6.47: Mittelwerte des Biege-E-Moduls von Labor-MDF, deren Fasern aus Alt- und Frischholzhackspänen bei gleichen Dämpfzeiten und mit unterschiedlichen Aufschluss-temperaturen hergestellt wurden (n = 12)

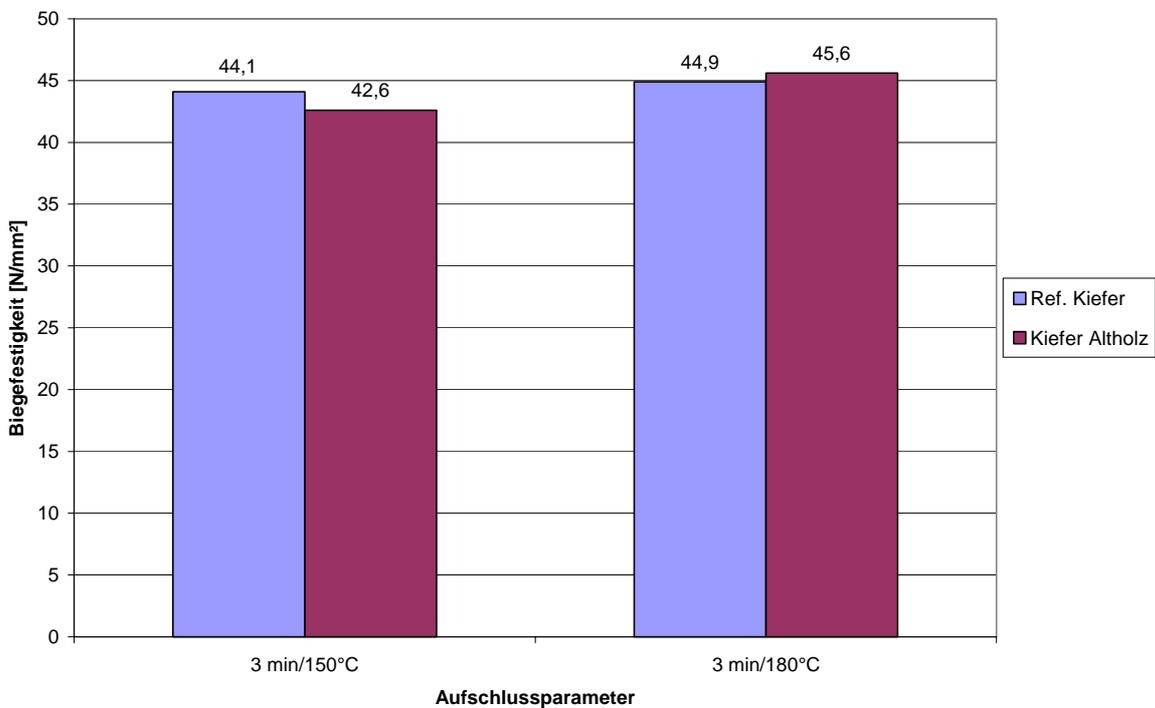


Abb. 6.48: Mittelwerte der Biegefestigkeit von Labor-MDF, deren Fasern aus Alt- und Frischholzhackspänen bei gleichen Dämpfzeiten und mit unterschiedlichen Aufschluss-temperaturen hergestellt wurden (n = 12)

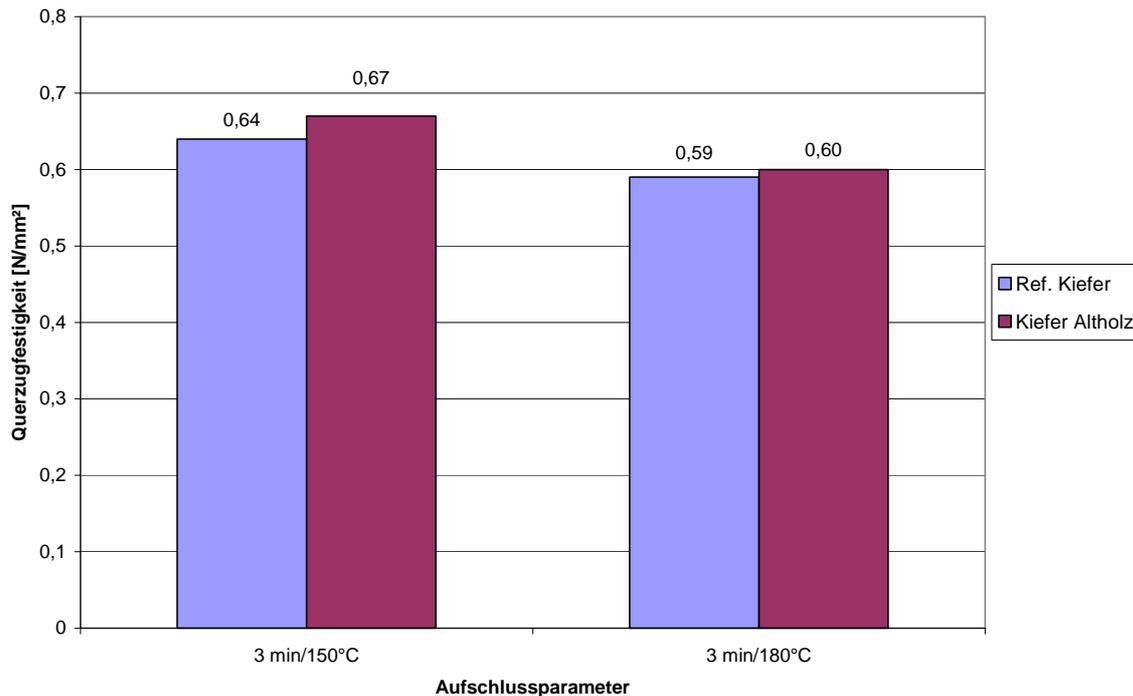


Abb. 6.49: Mittelwerte der Querzugfestigkeit von Labor-MDF, deren Fasern aus Alt- und Frischholzhackspänen bei gleichen Dämpfzeiten und mit unterschiedlichen Aufschluss-temperaturen hergestellt wurden (n = 20)

Aus den Abbildungen 6.47 bis 6.49 lassen sich folgende Zusammenhänge erkennen:

In der Abbildung 6.47 sind die Änderungen des Biege-E-Moduls zwischen den Alt- und Frischholzlaborfaserplatten aufgezeigt. Es wird erkennbar, dass durch eine höhere Aufschluss-temperatur eine Verbesserung um durchschnittlich 2,5% gegenüber den mit einer geringeren Aufschluss-temperatur hergestellten Platten erreicht werden kann.

Auch die Biegeeigenschaften (Abb. 6.48) der unter den Aufschlussbedingungen von 3 min/150°C hergestellten Alt- und Frischholzplatten blieben auf ähnlichem Niveau. Durch die höhere Aufschluss-temperatur nahm die Biegefestigkeit der Altholzplatten von 44,4 N/mm² auf 46,3 N/mm² leicht zu, was einer 4%igen Verbesserung entspricht. Mit einem Unterschied von 0,8 N/mm² fiel das Ergebnis gegenüber den niedrigeren Aufschlussparametern bei der Frischholzplatte relativ gering aus.

Entgegen den übrigen Ergebnissen änderten sich die Querzugfestigkeiten sowohl bei der Aufschluss-temperatur von 150°C als auch von 180°C nur geringfügig (Abb. 6.49). Die ermittelten Ergebnisse beider Plattentypen verringerten sich leicht bei einer höheren Aufschluss-temperatur.

Durch die vorliegenden Werte konnten die von KEHR (1977) und BUCHHOLZER (1994) beschriebenen Querkzugfestigkeitsverluste der MDF durch steigende Aufschluss Temperaturen und einer längeren Aufschlussdauer bestätigt werden. Die Autoren machten zum einen hierfür die hydrothermische Plastifizierung der Hackspäne und zum anderen die fortschreitende Hydrolyse bei verlängerter Dämpfzeit verantwortlich, die zu vergleichsweise niedrigen Faserstoff-pH-Werten führt und damit auch die Verleimungsqualität beeinträchtigt.

Hohe Aufschluss Temperaturen beim Zerfaserungsprozess führen zu einer teilweisen Kondensation des Lignins auf der Faser Oberfläche, so dass diese zum größten Teil von Bestandteilen der Mittellamelle und der Primärwand, die einen höheren Gehalt an Lignin aufweisen, bedeckt sind. Dies führt bei den Fasern zu einer Verringerung der Zugänglichkeit gegenüber dem Bindemittel.

Durch die Temperaturerhöhung sind neben einer größeren Ausbeute an längeren Fasern auch Zersetzungsreaktionen von Beschichtungsmaterialien und Schmelzklebern, sofern diese dem Altholz anhafteten, zu erwarten. Anhand der Faserlängenverteilung der Faserstoffe kann mit diesen ersten Ergebnissen ein tendenzieller Rückschluss auf die spätere Plattenqualität gezogen werden. Deutlich ist der Zusammenhang zwischen der Faserlängenverteilung, die mit dem Bauer McNett-Verfahren ermittelt wurde und den technischen Eigenschaften erkennbar. Die Genauigkeit der Aussage über das Faserplattenverhalten hinsichtlich der Faserlängenanteile wird allerdings durch den geringen Probenumfang gemindert. Um hier eine differenziertere Aussage machen zu können, bedarf es weiterer Untersuchungen.

Dieser Ansatz ist für eine mögliche Onlinemessung von Fasermaterial ein wichtiger Aspekt. Gerade bei der Prozesskontrolle müssen gesicherte Daten vorliegen, die als Grundlage für die Entscheidungen im weiteren Prozess ausschlaggebend sind. In der Papierindustrie ist dieser Zusammenhang von noch größerer Bedeutung als bei der Herstellung von MDF. Der Grund liegt in der Blattstruktur, die nachhaltig von der Faserstruktur abhängt. Bei der MDF können Defizite in der Faserstruktur durch eine variable Leimdosierung ausgeglichen werden.

6.4.4 Einfluss einer Wasserlagerung der Hackspäne auf die Faserqualität

In einem weiteren Untersuchungsabschnitt wurde Faserstoff aus Alt- und Frischholz, deren Hackspäne vor dem Zerfaserungsprozess 24 h in Wasser gelagert wurden, zu Faserplatten verarbeitet. Anhand der Abbildungen 6.50 bis 6.52 lassen sich folgende Ergebnisse ableiten:

Der direkte Vergleich beider Aufschlussparameter (3 min/150°C und 8 min/180°C) zeigt für beide Sortimenten eine positive Ergebnisentwicklung. Der Biege-E-Modul der Altholzfaserplatten lag bei beiden Aufschlussparametern deutlich über dem der Frischholzplatten. Bei der Frischholzplatte hingegen konnte durch eine längere Dämpfzeit, die gleichzeitig mit einer höheren Aufschlussstemperatur verbunden war, ein Anstieg des Biege-E-Moduls um 5,8% ermittelt werden. Die Biegefestigkeit der hergestellten Platten konnte bei beiden Ausgangsmaterialien durch die intensivierten Aufschlussparameter durchschnittlich um 5,8% verbessert werden.

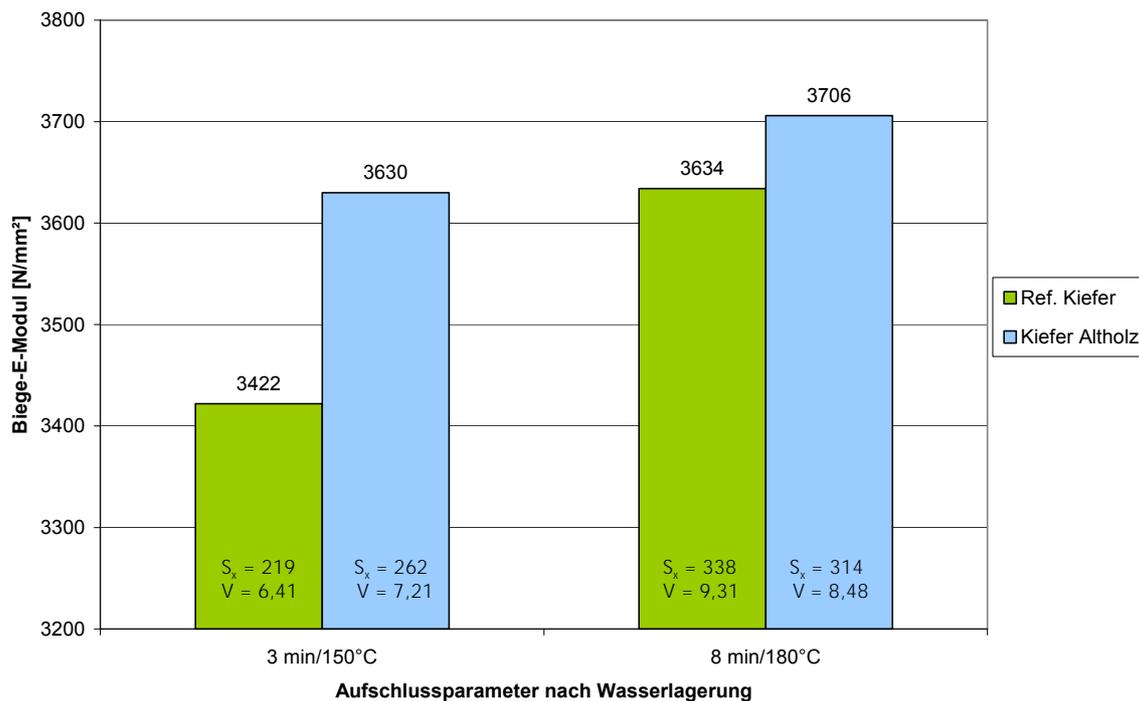


Abb. 6.50: Mittelwerte (n = 12) des Biege-E-Moduls von Labor-MDF, deren Fasern aus Alt- und Frischholzhackspänen mit einer vorherigen Wasserlagerung (24 Std.) und unterschiedlichen Aufschlussparametern hergestellt wurden (S_x = Standardabweichung [N/mm²]; V = Variationskoeffizient [%])

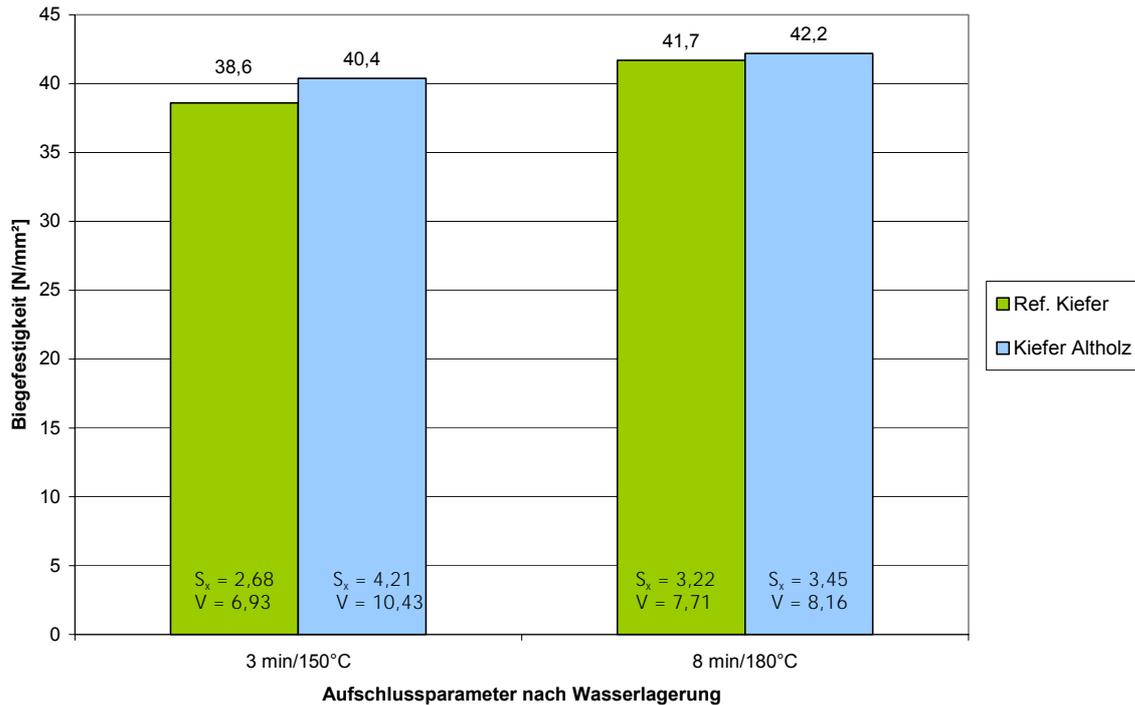


Abb. 6.51: Mittelwerte ($n = 12$) der Biegefestigkeit von Labor-MDF, deren Fasern aus Alt- und Frischholzhackspänen mit einer vorherigen Wasserlagerung (24 Std.) und unterschiedlichen Aufschlussstemperaturen und Dämpfzeiten hergestellt wurden (S_x = Standardabweichung [N/mm²]; V = Variationskoeffizient [%])

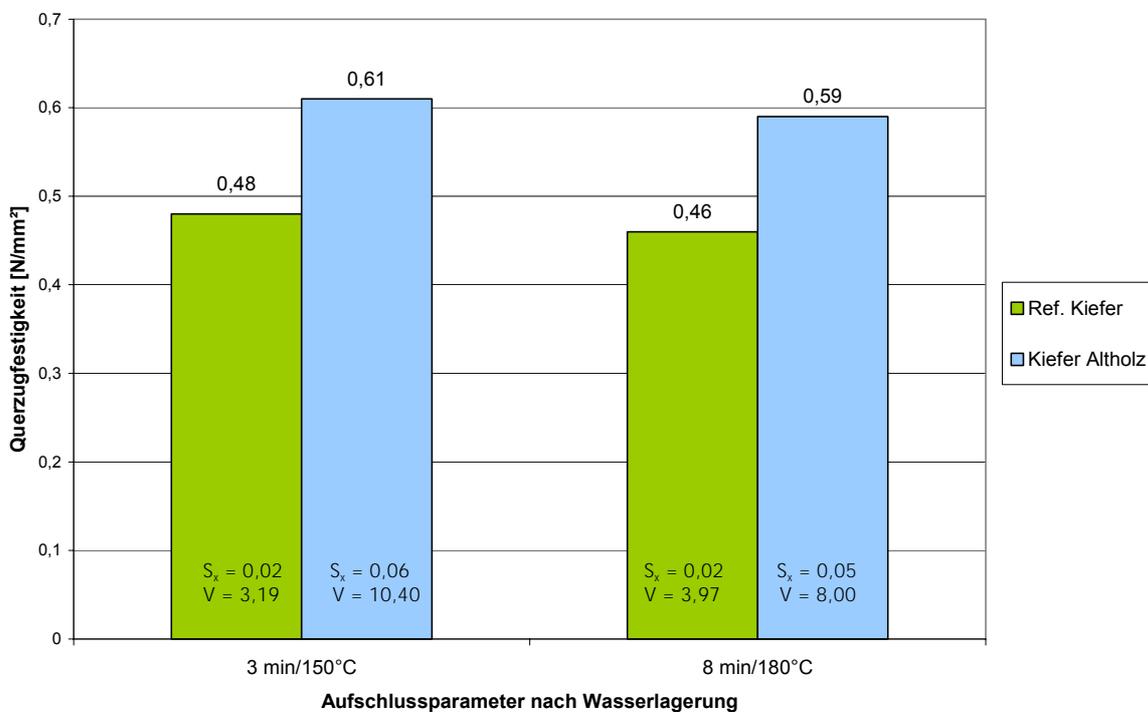


Abb. 6.52: Mittelwerte ($n = 20$) der Querzugfestigkeit von Labor-MDF, deren Fasern aus Alt- und Frischholzhackspänen mit einer vorherigen Wasserlagerung (24 Std.) und unterschiedlichen Aufschlussstemperaturen und Dämpfzeiten hergestellt wurden (S_x = Standardabweichung [N/mm²]; V = Variationskoeffizient [%])

Die Mittelwerte des Biege-E-Moduls und der Biegefestigkeit der Altholzplatten lagen bei beiden Dämpfbedingungen über denen der Frischholzplatten. Ähnlich wie bei den Querkzugfestigkeiten des Unterabschnittes 6.4.3 wurde auch hier zwischen beiden Aufschlussparametern eine leichte Abnahme bei intensiveren Dämpfbedingungen festgestellt.

Neben den im Unterabschnitt 6.4.3 beschriebenen Ursachen für die Querkzugfestigkeitsverluste könnte es bei dem reinen Kiefernalt- und Kiefernfrischholz auch möglich sein, dass die intensiveren Zerfaserungsbedingungen das stärkere Eindringen von Bindemitteln in die Faser ermöglichen. Somit stünde für die Ausbildung der Faser-zu-Leim-Bindung weniger Bindemittel zur Verfügung.

Wie in diesem Untersuchungsabschnitt belegt werden konnte, führt eine Lagerung der Hackspäne im Wasser vor dem Zerfaserungsprozess zu einer Qualitätsverbesserung der technologischen Eigenschaften. Insgesamt betrachtet fallen die erreichten Mittelwerte des Aufschlusses mit 3 min/150°C jedoch etwas geringer aus als die im Unterabschnitt 6.4.3 ermittelten. Diese Unterschiede können auch durch die zuvor erwähnten Parametereinstellungen am Laborrefiner, durch unterschiedliches Streuen der Faserplatte oder durch die Zusammensetzung des Untersuchungsmaterials hervorgerufen werden.

6.4.5 Einfluss von unterschiedlichen Dämpfzeiten auf die Faserqualität

Basierend auf den Erkenntnissen der vorliegenden Untersuchungen, soll in diesem Untersuchungsabschnitt aufgezeigt werden, welche Auswirkungen die unterschiedlichen Verweilzeiten im Vordämpfer von 3 und 5 Minuten auf die technologischen Eigenschaften der hergestellten Platten haben.

Die an den Laborplatten ermittelten technologischen Eigenschaften sind in den Abbildungen 6.53 bis 6.55 gegenübergestellt. Die Untersuchungen weisen nachfolgende Ergebnisse auf:

Wird die Dämpfzeit der Hackspäne von 3 auf 5 Minuten erhöht, verbessert sich das an den Laborplatten ermittelte Biege-E-Modul um 11%. Die aus Frischholzfasern hergestellten Platten

zeigten hingegen durch eine verlängerte Dämpfzeit eine Abnahme des Biege-E-Moduls um 3,4%.

Während die übrigen Ergebnisse der Kiefernfrischholzplatten bei beiden Dämpfzeiten auf einem annähernd gleichen Niveau blieben, konnten bei den Altholzplatten Eigenschaftsverbesserungen mit der verlängerten Verweildauer von 5 Minuten erreicht werden.

Die in den Unterabschnitten 6.4.3 bis 6.4.5 ermittelten Ergebnisse stellen, alle für sich betrachtet, eine positive Entwicklung für den Einsatz von Altholz bei einer Aufschlusstemperatur von 180°C und einer Dämpfzeit von 3 bis 8 Minuten dar. Werden die Ergebnisse aber untereinander verglichen, so zeigt sich, dass sich die technologischen Eigenschaften der Platten bei Verwendung von Altholzhackspänen, die mit einer Temperatur von 180°C nach einer Wasserlagerung oder bei einer etwas höheren Dämpfzeit (5 Minuten) zu Faserstoff verarbeitet wurden, gegenüber denen der Frischholzplatten deutlich verbessern ließen. Die Mittelwerte der einzelnen Untersuchungsabschnitte wiesen aber unterschiedliche Ergebnisse auf. Denkbar wäre hier als Erklärung der zeitliche Ablauf der Versuchsserien, da nicht alle MDF zur selben Zeit hergestellt werden konnten.

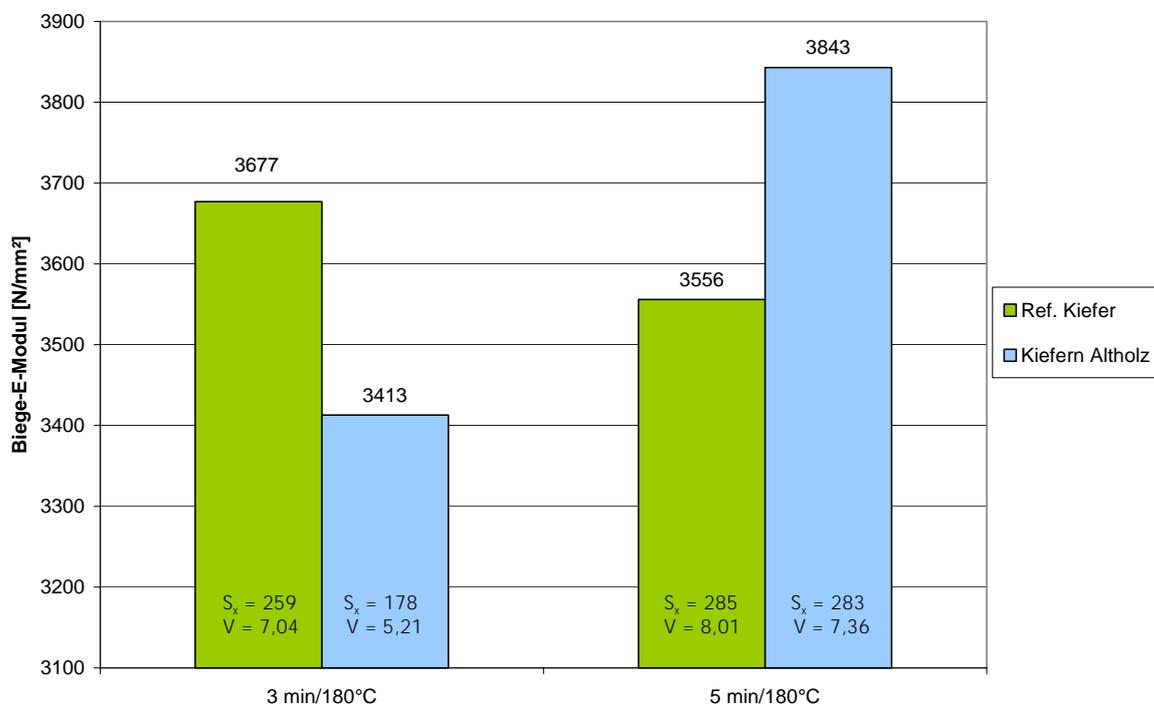


Abb. 6.53: Mittelwerte ($n = 12$) des Biege-E-Moduls von Labor-MDF, deren Fasern aus Alt- und Frischholzhackspänen bei gleicher Aufschlusstemperatur mit unterschiedlichen Verweilzeiten im Vordämpfer hergestellt wurden (S_x = Standardabweichung [N/mm²]; V = Variationskoeffizient [%])

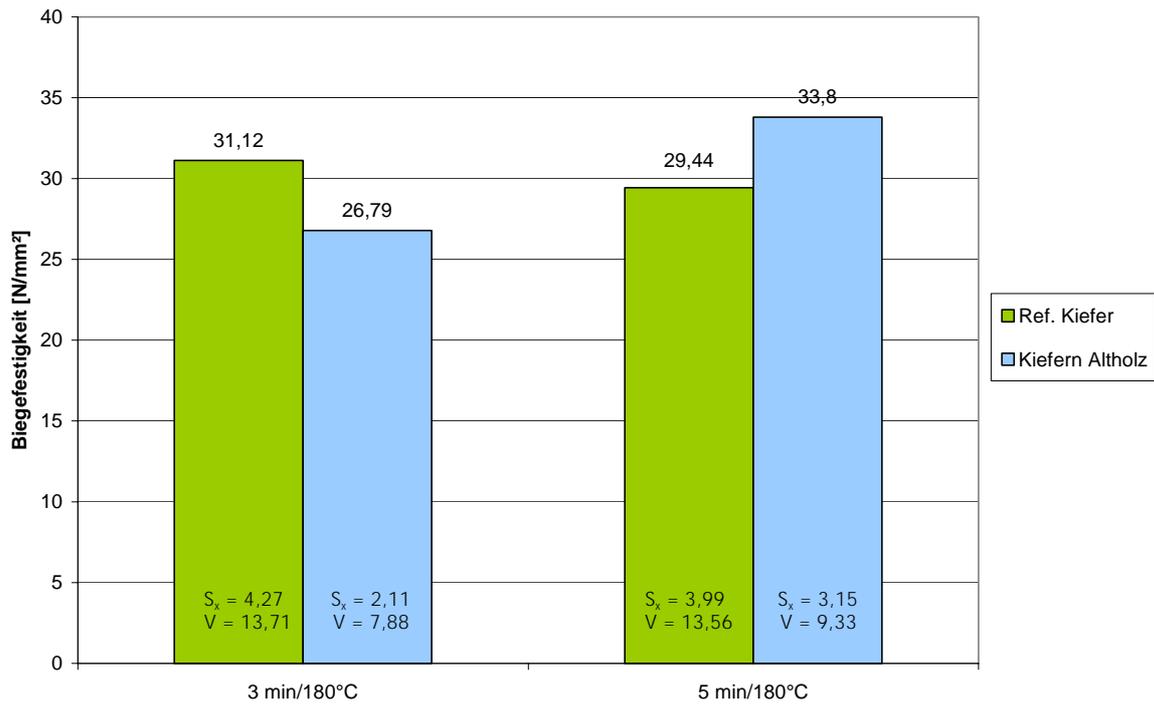


Abb. 6.54: Mittelwerte ($n = 12$) der Biegefestigkeit von Labor-MDF, deren Fasern aus Alt- und Frischholzhackspänen bei gleicher Aufschlusstemperatur mit unterschiedlichen Verweilzeiten im Vordämpfer hergestellt wurden (S_x = Standardabweichung [N/mm²]; V = Variationskoeffizient [%])

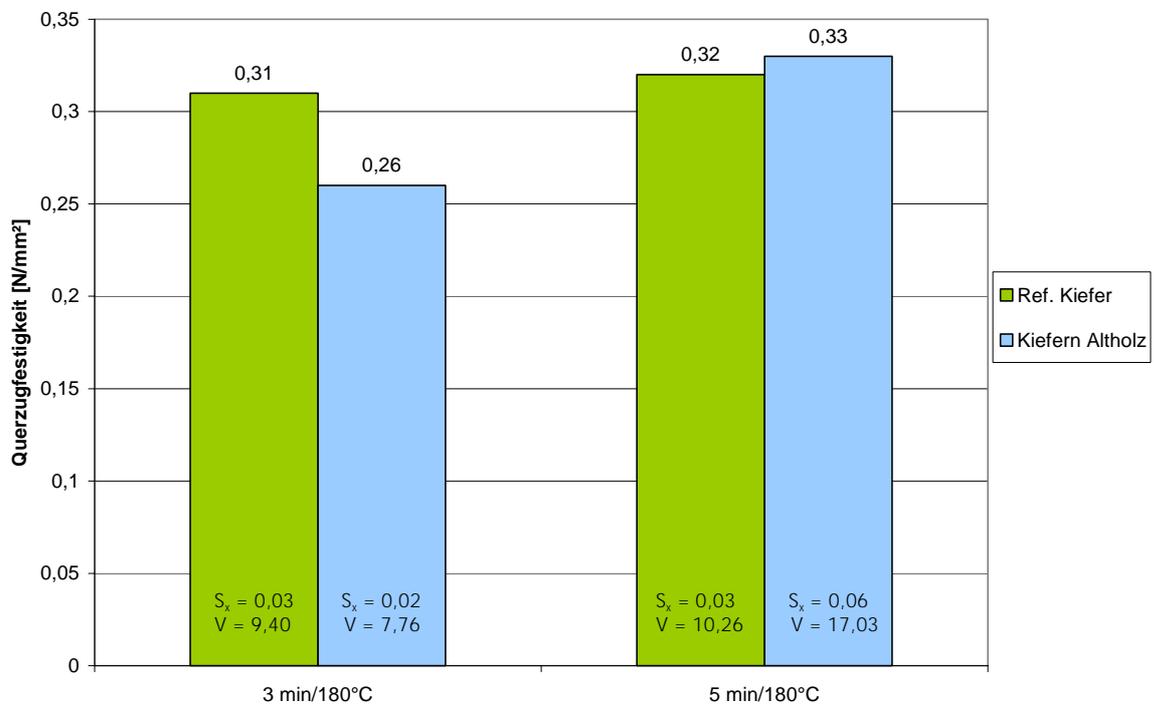


Abb. 6.55: Mittelwerte ($n = 20$) der Querzugfestigkeit von Labor-MDF, deren Fasern aus Alt- und Frischholzhackspänen bei gleicher Aufschlusstemperatur mit unterschiedlichen Verweilzeiten im Vordämpfer hergestellt wurden (S_x = Standardabweichung [N/mm²]; V = Variationskoeffizient [%])

6.4.6 Feuchtigkeitsgehalt

In Abhängigkeit von den verschiedenen Aufschlussbedingungen ist in Tabelle 6.17 die Ausgleichsfeuchte (Prüffeuchte) der MDF dargestellt, die sich nach der Klimatisierung der Platten im Normklima 20°C und 65% relative Luftfeuchte einstellt.

Tab. 6.17: Durchschnittliche Ausgleichsfeuchten von UF-gebundenen MDF aus Kiefernalt- und Kiefernfrischholz in Abhängigkeit von den Aufschlussbedingungen

Materialbezeichnung	Dampfbehandlung	Ausgleichsfeuchte (%) im Normklima 20°C/ 65% rel. LF
Ref. Kiefer	3 Minuten / 150 °C	7,6
Ref. Kiefer	8 Minuten / 150 °C	7,3
Ref. Kiefer	3 Minuten / 180 °C	7,0
Ref. Kiefer	8 Minuten / 180 °C	6,4
reines Kiefernaltholz	3 Minuten / 150 °C	7,5
reines Kiefernaltholz	8 Minuten / 150 °C	7,4
reines Kiefernaltholz	3 Minuten / 180 °C	6,9
reines Kiefernaltholz	8 Minuten / 180 °C	6,9

Es ist erkennbar, dass die sich einstellende Ausgleichsfeuchte mit zunehmender Aufschlusszeit und Aufschlussstemperatur beim Zerfaserungsprozess abnimmt. Eine Erklärung hierfür könnten die hohen Aufschlussstemperaturen sein, die dazu führen, dass die Hemicellulosen zum Teil abgebaut werden, die aufgrund ihrer molekularen und übermolekularen Struktur eine höhere Ausgleichsfeuchtigkeit besitzen als Cellulose und Lignin (SKAAR, 1972). Des Weiteren können hohe Temperaturen eine Verhornung der Kohlenhydrate induzieren (JAYME und HUNGER, 1958).

Die ermittelten Ausgleichsfeuchten von UF-gebundenen Laborfaserplatten, deren Hackspäne vor dem Zerfaserungsprozess im Wasser lagerten, sind in Tabelle 6.18 aufgeführt. Der Einfluss der Wasserlagerung der Hackspäne und die intensiveren Dämpfbedingungen (Dämpftemperatur und Dämpfzeit) führen zu einer Abnahme der erreichten Ausgleichsfeuchte. Die Durchfeuchtung der Hackspäne führt zu einer schonenden Zerfaserung und damit verbunden zu einer hohen

Faserstoffqualität. Ein Erklärungsansatz hierfür wäre, dass sich Wassermoleküle in die Räume zwischen den Mycellen der Zellwände anlagern und somit die Abstände zwischen den Mycellen vergrößern.

Tab. 6.18: Durchschnittliche Ausgleichsfeuchten von UF-gebundenen MDF aus wassergelagertem Kiefernalt- und Kiefernfrischholz in Abhängigkeit von den Aufschlussbedingungen

Materialbezeichnung	Dampfbehandlung	Ausgleichsfeuchte (%) im Normklima 20°C/65% rel. LF
Ref. Kiefer Wasserlagerung	3 Minuten / 150 °C	7,7
Ref. Kiefer Wasserlagerung	8 Minuten / 180 °C	7,0
reines Kiefernaltholz Wasserlagerung	3 Minuten / 150 °C	7,6
reines Kiefernaltholz Wasserlagerung	8 Minuten / 180 °C	6,9

6.4.7 Dickenquellung der aus Altholz hergestellten MDF

Aus den hergestellten Laborfaserplatten wurden 50*50 mm² große Prüfkörper für die Bestimmung der Dickenquellung nach 2 und 24 Stunden gemäß EN 317 entnommen, wobei folgende Resultate erzielt wurden:

Durch längere Dämpfzeiten bei der Herstellung des Fasermaterials konnte ein Faserstoff gewonnen werden, der die Dickenquellung bei Laborfaserplatten erheblich reduziert. Die EN 622-5 legt für die Anforderungen an Platten zur Verwendung im Trockenbereich eine Dickenquellung (24 h) von maximal 12% für den Nennbereich von >12 bis ≤19 mm fest. Einen Maximalwert für die 2 h Dickenquellung gibt es nach EN nicht, sie wurde aber im Rahmen dieser Arbeit zusätzlich ermittelt.

Die Abbildungen 6.56 und 6.57 geben die Dickenquellungen von hergestellten Altholz-MDF ohne Hydrophobierungsmittel an. Durch eine Erhöhung der Verweildauer der Altholzhackspäne im Dämpfbehälter von 3 min auf 8 min bei gleichbleibender Temperatur von 180°C konnten die Quellungseigenschaften der Altholzlaborfaserplatten nach 2 Stunden um 29% reduziert werden.

Beim Einsatz von Frischholz unter gleichen Bedingungen reduzierte sich der Quellungswert (q_2) dabei um 32%. Die Prüfkörper der MDF, deren Fasermaterial unter Dämpfbedingungen von 3 min/180°C gewonnen wurden, erreichten eine Dickenquellung nach 24 h von 10,2%. Verglichen mit den Werten der Altholzplatte, deren Fasermaterial bei 8 min/180°C aufgeschlossen wurde, liegt die Dickenquellung dieser Prüfkörper bei 7,6 %. Das entspricht einer Reduzierung der 24-stündigen Dickenquellung durch höhere Verweilzeiten im Vordämpfer von 25,5%. Bei beiden Altholzplatten lagen diese Parameter deutlich unter dem nach EN 622-5 geforderten Maximalwert von 12%. Die 24 h Dickenquellung von Frischholzplatten aus intensiv gedämpftem Holz konnte zwar um 32% reduziert werden, lag damit aber immer noch oberhalb des geforderten Maximalwertes von 12%.

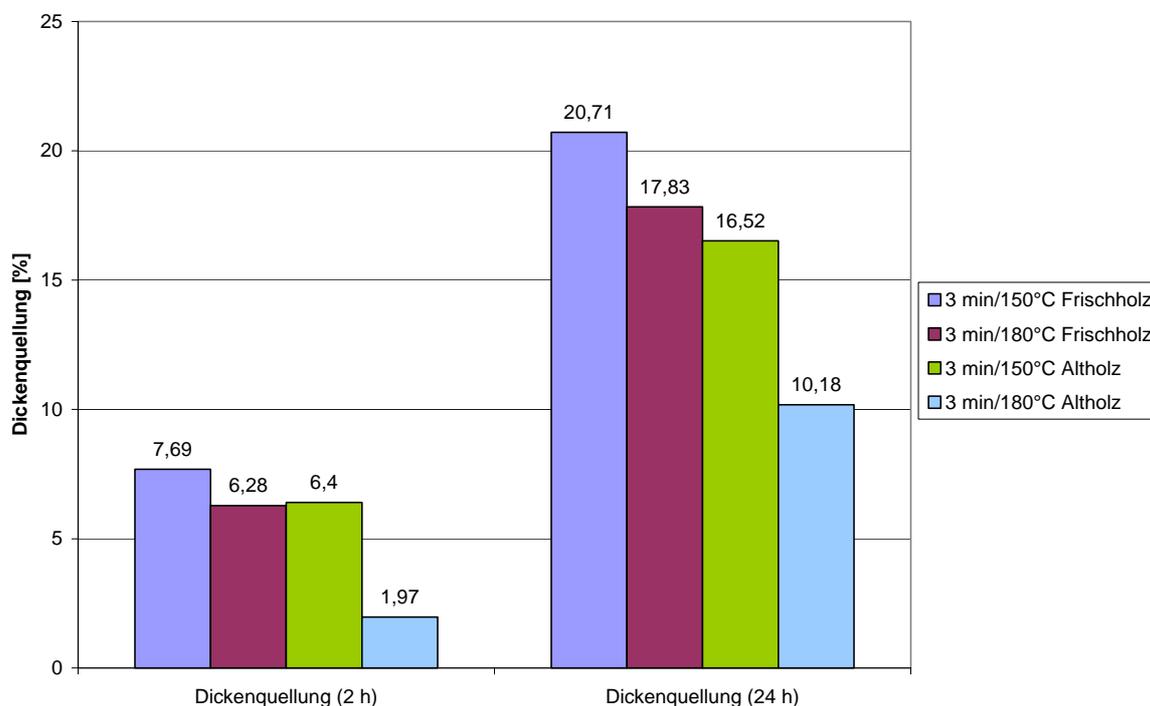


Abb. 6.56: Durchschnittliche Dickenquellung (q_2 und q_{24}) von MDF aus Altholz- und Frischholzfaserfasern mit unterschiedlichen Dämpftemperaturen bei gleichen Aufschlusszeiten (3 min)

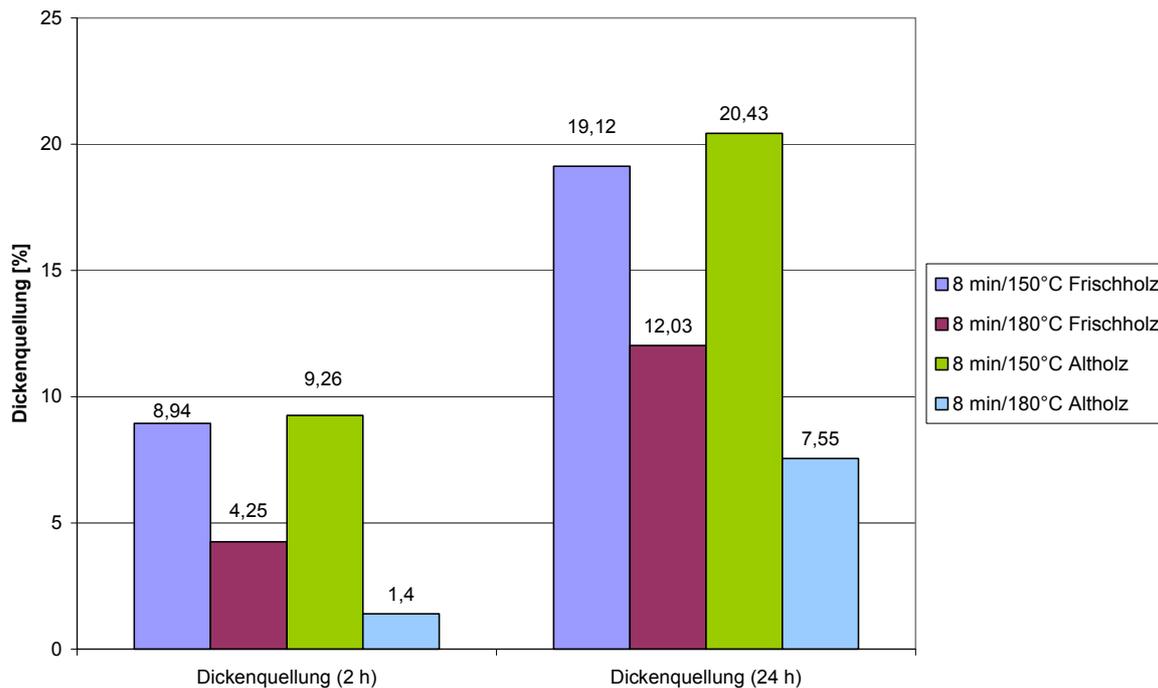


Abb. 6.57: Durchschnittliche Dickenquellung (q_2 und q_{24}) von MDF aus Altholz- und Frischholzfaser mit unterschiedlichen Dämpftemperaturen bei gleichen Aufschlusszeiten (8 min)

Laborfaserplatten, welche mit einer Dämpftemperaturen von 150°C bei unterschiedlichen Dämpfzeiten von 3 und 8 Minuten hergestellt wurden, wiesen durch die geringe Temperatureinwirkung auf die Hackspäne keine signifikanten Verbesserungen ihrer Eigenschaften auf. Arbeiten von KRUG und KEHR (2000) haben gezeigt, dass die Dickenquellung nach 24 h Wasserlagerung, speziell bei PF-Harz-gebundenen MDF, mit steigender Dämpftemperaturen (200°C) und längeren Behandlungszeiten (bis 8 Minuten) deutlich abnimmt.

Von GRAN und BYSTEDT (1973) konnte gezeigt werden, dass steigende Temperaturen während der Dampfbehandlung des Holzes sowie einer Verlängerung der Dampfbehandlung bei der Faserherstellung zu niedrigeren Dickenquellungswerten führen.

Die Autoren BUCHHOLZER (1994) als auch ROFFAEL et al. (1994) konnten an UF-Harz-gebundenen MDF aus Buchen-TMP keine signifikanten Veränderungen der Dickenquellung (24 h) infolge einer Erhöhung der Aufschlussstemperatur feststellen.

Demgegenüber konnten ROFFAEL et al. (1995) bei der Herstellung von UF-Harz-gebundenen MDF aus Kiefern-CTMP, der bei einer höheren Aufschluss Temperatur gewonnen wurde, eine Verminderung der Dickenquellung feststellen. Es scheinen hier grundsätzliche Unterschiede zwischen Laub- und Nadelhölzern zu bestehen, wobei der hohe Hemicellulosegehalt der Laubhölzer die wesentliche Ursache darstellt.

Bei dem Vergleich der Dickenquellungswerte mit den Ausgleichsfeuchten der Platten (Unterabschnitt 6.4.6) kann anhand der hier vorliegenden Ergebnisse ein direkter Zusammenhang zwischen beiden Parametern hergestellt werden.

Somit ist festzuhalten, dass mit schärferen Aufschlussbedingungen die von der Norm EN 622-5 geforderte maximale Dickenquellung von 12% bei Altholz und Frischholz auch ohne Verwendung eines Hydrophobierungsmittels erreicht werden kann. Das Verhalten von Holzwerkstoffen auf Klimawechselbeanspruchungen kann durch einen Zyklustest ermittelt werden. Diese Untersuchungen wurden aber im Rahmen dieser Arbeit nicht durchgeführt.

6.4.8 Zusammenfassung

- Anhand der mechanisch-technologischen Eigenschaften konnte durch eine höhere Dämpf temperatur bei gleich bleibender Dämpfzeit hinsichtlich des Biege-E-Moduls und der Biege eigenschaften eine leichte Verbesserung festgestellt werden.
- Durch höhere Dämpftemperaturen (180°C) verringerten sich die Querkzugfestigkeiten geringfügig.
- Anhand der Faserlängenverteilung der Faserstoffe aus Abschnitt 6.3.3 kann mit den ermittelten Ergebnissen ein tendenzieller Rückschluss auf die spätere Plattenqualität gezogen werden. Allerdings bedarf es aufgrund des geringen Probenumfangs weiterer Untersuchungen.
- Die sich einstellende Ausgleichsfeuchte der Laborfaserplatten im Normklima (20°C/65% rel. LF) nahm mit zunehmender Aufschlusszeit und Aufschluss Temperatur ab.
- Durch intensivere Dämpfbedingungen nahmen die Dickenquellungswerte, die an Laborfaserplatten ohne Hydrophobierungsmittel ermittelt wurden, deutlich ab.

6.5 Auswirkungen unterschiedlicher Holzfeuchten auf die Qualität von Alt- und Frischholzfasern zur MDF-Herstellung

6.5.1 Zielsetzung

Der Durchfeuchtung der Hackspäne wird im Hinblick auf den Zerfaserungsprozess und somit der späteren Faserqualität große Bedeutung beigemessen. Bedingt durch die Freilandlagerung konnte am gelieferten Altholz eine Eingangsfeuchte zwischen 19% und 36% ermittelt werden (Abschnitt 5.1). In dieser Untersuchungsreihe standen daher folgende Fragen im Vordergrund:

- Hat die Holzfeuchte als Einflussparameter eine Auswirkung auf die hergestellten Fasern und somit auf die späteren technologischen Eigenschaften der hergestellten Laborfaserplatten?
- Kann die Eingangsfeuchte bei der Herstellung von MDF vernachlässigt werden?
- Wie stark wirken sich dabei unterschiedliche Dämpfzeiten auf die spätere Faserstoffqualität aus?

Die Altholzhackspäne wurden auf gewünschte Holzfeuchten von 15%, 23%, 35%, 50% und 90% eingestellt. Der Zerfaserungsprozess erfolgte mit einer Dämpfbedingung von 3 min/150°C.

6.5.2 Untersuchungsprogramm

Die nachfolgende Versuchsserie schließt sich an die Erkenntnisse aus den Untersuchungen des vorherigen Abschnittes an und wurde im Gegensatz zu den im Abschnitt 6.4 durchgeführten Untersuchungen unter industrienahen Bedingungen mit der Laborrefineranlage im WKI durchgeführt. Hierzu wurde das Fasermaterial nicht trocken, sondern nach dem Zerfaserungsprozess direkt in der Blow-Line beleimt (BUCHHOLZER, 2000).

Die gegenüber Frischholz wesentlich trockeneren Altholzsortimente weisen, je nach Lagerungsbedingungen, eine Holzfeuchte zwischen 15% und maximal ca. 40% auf. Waldholz, welches 1 bis 2 Wochen auf dem Rundholzlagerplatz lagerte, weist eine Holzfeuchte um 70% auf. Vor der Zerfaserung von Altholz im Refiner muss daher der niedrige Feuchtigkeitsgehalt ausgeglichen werden. Eine Holzfeuchte von 100% und mehr ist für einen bestmöglichen Wärmetransport und eine optimale Zerfaserung unbedingt notwendig. Verhornte Oberflächen und verdichtete Holzteile führen zur Aufnahme von unzureichenden Mengen an Wasser. Dadurch erschweren sie

den Mahlvorgang und es können lokale Überhitzungen auftreten, die zu groben Fasern bzw. Faserbündeln führen. Dies beeinträchtigt die Homogenität der Faserplatten und ihre Eigenschaften.

Im ersten Abschnitt dieser Versuchsreihe wurden die Altholzhackspäne der Firma B beim Durchmischen so lange mit Wasser vermengt, bis eine gewünschte Holzfeuchte von 90% erreicht wurde (Tab. 6.19, Materialkennung Ba und Ref. F₁). Zu feuchte Altholzchargen wurden schonend bei 40°C im Trockenschrank (Heraeus, Typ TUH 100/150) auf die entsprechende Holzfeuchte getrocknet. Nach einer Lagerung der befeuchteten Hackspäne von 24 Stunden wurde das so vorbehandelte Material in der Laborrefineranlage des WKI aufgeschlossen und anschließend ohne Zusatz von Frischholzfasern zu Altholzfaserplatten verarbeitet. Für die Vergleichbarkeit wurden Referenzplatten aus frischem Kiefernholz mit einer Holzfeuchte von 75% bis 85% hergestellt.

Mit dem gleichen Untersuchungsmaterial sollte in einem weiteren Versuchsabschnitt nachgewiesen werden, inwieweit sich eine veränderte Dämpfzeit bei einer Temperatur von 150°C auf die Zerfaserung von definiert vorbehandelten Hackspänen auswirkt. Die eingestellten Holzfeuchten betragen 15%, 35% und 90%. Ansonsten wurde wie zuvor beschrieben verfahren. Eine Übersicht über die verschiedenen Parameter gibt Tabelle 6.19 (Materialkennung Bd, Bf und Ref. F₂₊₃) wieder. Für jeden Parameter wurden ohne Zugabe von Hydrophobierungsmitteln zwei MDF hergestellt.

Tab. 6.19: Aufschlussparameter des Untersuchungsmaterials mit unterschiedlichen Holzfeuchten

Firma	Dampfbehandlung		Holzfeuchten der Hackspäne [%]					
	Aufschluss-temperatur	Aufschluss-dauer	15	23	35	50	90	
Ba*	150°C	5 min	15	23	35	50	90	
Ref. F ₁ **	150°C	5 min						75-85
Bd*	150°C	3 min	15		35		90	
Ref. F ₂ **	150°C	3 min						75-85
Bf*	150°C	8 min	15		35		90	
Ref. F ₃ **	150°C	8 min						75-85

*Ba, Bd, Bf = Fa. B mit Prozesskennbuchstabe (a,d,f)

**Referenzplatte F aus Kiefernfrischholz

6.5.3 Mechanisch-technologische Eigenschaften der Laborfaserplatten

6.5.3.1 Altholzhackspäne mit unterschiedlicher Holzfeuchte

Die in der Tabelle 6.20 aufgeführten Ergebnisse wurden an klimatisierten Prüfkörpern von Laborfaserplatten ermittelt, die aus Alt- und Frischholzhackspänen mit unterschiedlichen Holzfeuchten (Tab. 6.19) hergestellt wurden (siehe Anhang 9.3 Tabellen 1 bis 5).

Daraus ist abzuleiten, dass sich durch die eingestellten unterschiedlichen Holzfeuchten in den physikalisch-technologischen Eigenschaften keine signifikanten Unterschiede ergaben. Verglichen mit der Referenzplatte blieben alle ermittelten Eigenschaftsparameter auf einem niedrigen Niveau. Durchschnittlich wies die Referenzplatte um ein Drittel höhere Mittelwerte auf.

Die Abbildungen 6.58 bis 6.60 zeigen am Beispiel des Biege-E-Moduls, der Biegefestigkeit und der Querkzugfestigkeit die sehr geringen Veränderungen, die durch den Einfluss der eingestellten Holzfeuchte ermittelt wurden.

Die Biegefestigkeitswerte und auch die Biege-E-Modul-Werte liegen bei diesen Laborfaserplatten mit einer Rohdichte von ca. 700 kg/m^3 noch über den Mindestanforderungen der EN 622-5 von 20 N/mm^2 . Allerdings erreichten die Querkzugfestigkeiten nicht die Mindestanforderungen der Norm. Veränderungen der Herstellungsbedingungen und der Bindemittelrezeptur könnten dies ausgleichen.

Wie Eingangs erwähnt, wurde das hergestellte Fasermaterial in der Blow-Line und nicht durch eine Trockenbeimung beleimt. Daher resultieren vermutlich die geringen Eigenschaftswerte. Sie sind mit den Untersuchungen im Abschnitt 6.4 nur bedingt vergleichbar.

Durch eine Erhöhung der Hackspänefeuchten in Stufen von 15% bis auf 90% konnte lediglich eine leichte Zunahme der Querkzugfestigkeitswerte von $0,22 \text{ N/mm}^2$ bei 15% Hackspänefeuchte auf $0,28 \text{ N/mm}^2$ bei einer 90%igen Holzfeuchte erreicht werden (Abb. 6.60). Damit liegt der Wert der MDF-Probe mit 90% Holzfeuchte immer noch um 26% unter dem Wert der Frischholzplatte. Bei der Biegefestigkeit und dem Biege-E-Modul konnte eine solche Zunahme der Festigkeiten nicht nachgewiesen werden.

Tab. 6.20: Mittelwerte (Biege-E-Modul und Biegefestigkeiten n = 12; Rohdichte n = 10; Querzug- und Abhebefestigkeiten n = 20) von 16 mm dicken Labor-MDF, deren Fasern aus Altholzhackspänen mit unterschiedlichen Holzfeuchten hergestellt wurden (Blow-Line Beleimung)

	Rohdichte	$S_x^{1)}$	$V^{2)}$	Biege-E-Modul	$S_x^{1)}$	$V^{2)}$	Biegefestigkeit	$S_x^{1)}$	$V^{2)}$	Querzugfestigkeit	$S_x^{1)}$	$V^{2)}$	Abhebefestigkeit	$S_x^{1)}$	$V^{2)}$
Firma	\bar{x} kg/m ³	\bar{x} kg/m ³	(%)	\bar{x} N/mm ²	\bar{x} N/mm ²	(%)									
Ba mit u = 15%	698	7,55	1,08	3022	91	3,00	23,6	1,5	6,29	0,22	0,02	9,19	0,81	0,10	12,29
Ba mit u = 23%	702	22,35	3,19	2975	96	3,24	23,6	1,8	7,71	0,22	0,03	13,58	0,76	0,12	15,75
Ba mit u = 35%	702	16,00	2,23	3055	32	1,04	24,4	1,0	4,23	0,23	0,04	17,32	0,75	0,12	15,30
Ba mit u = 50%	701	13,44	1,92	2984	123	4,14	22,2	1,3	5,80	0,24	0,02	7,61	0,58	0,17	30,16
Ba mit u = 90%	703	13,11	1,86	3008	175	5,82	23,7	2,2	9,06	0,28	0,03	12,14	0,77	0,10	12,79
Ref. F*	702	12,89	1,83	3738	171	4,57	35,6	2,2	6,24	0,38	0,03	7,73	1,28	0,13	10,53
Anforderungen nach EN 622-5	-	-	-	≥2200	-	-	≥20	-	-	≥0,55	-	-	-	-	-

* Referenzplatte F aus Kiefernfrischholz

u = Holzfeuchte

¹⁾ S_x = Standardabweichung

²⁾ V = Variationskoeffizient

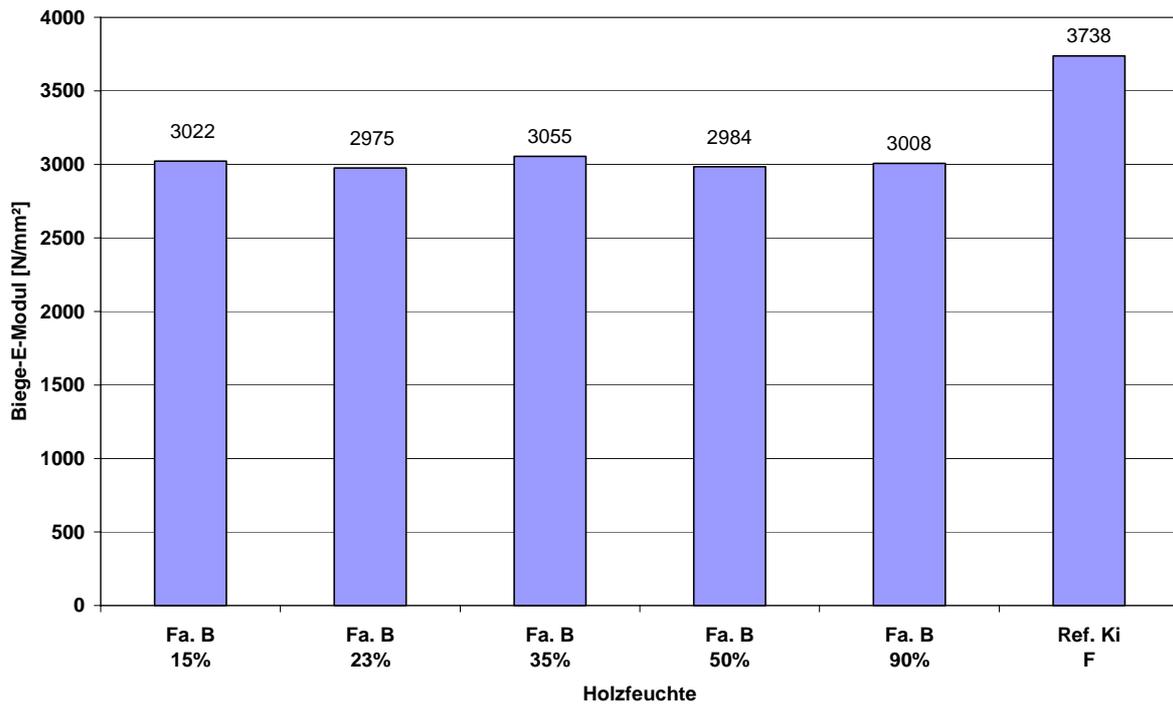


Abb. 6.58: Biege-E-Modul von MDF, deren Fasern aus Altholz hackspänen mit unterschiedlichen Holzfeuchten hergestellt wurden (n = 12)

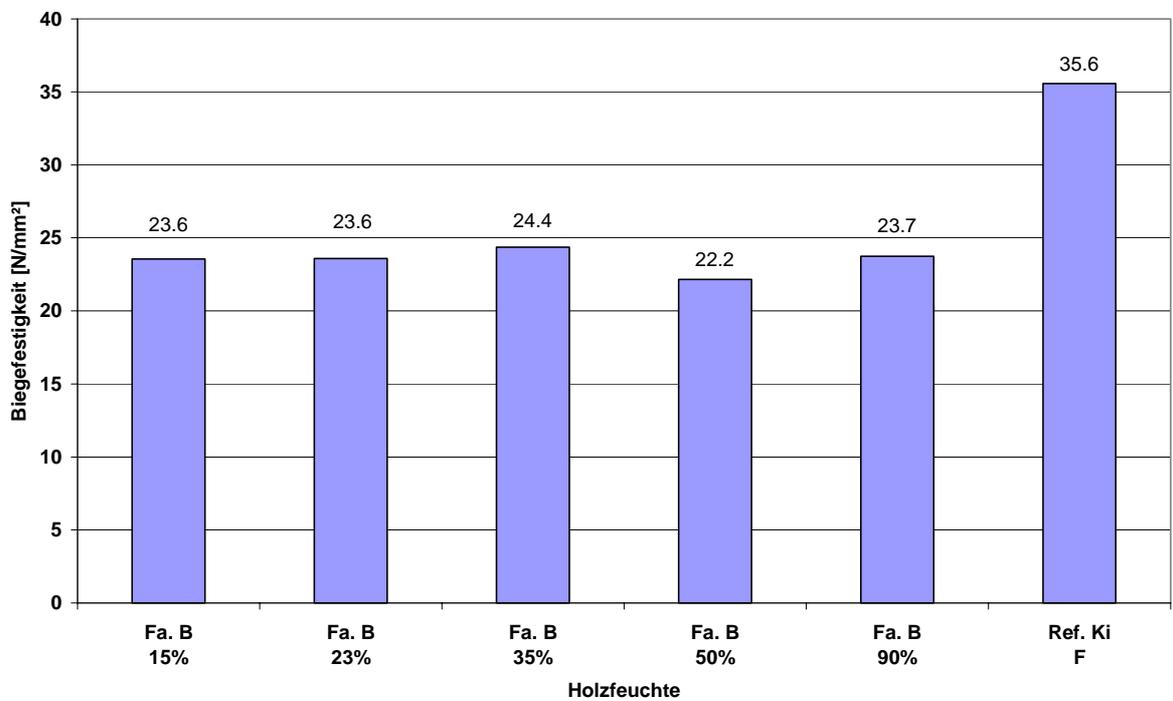


Abb. 6.59: Biegefestigkeiten von MDF, deren Fasern aus Altholz hackspänen mit unterschiedlichen Holzfeuchten hergestellt wurden (n = 12)

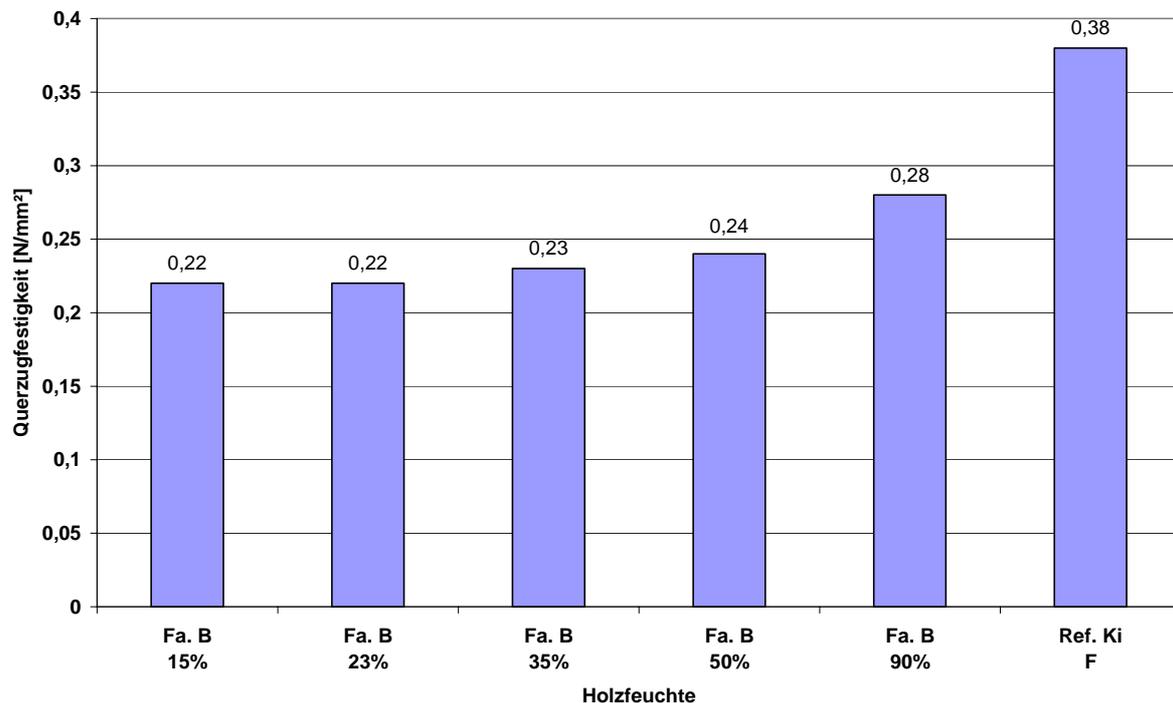


Abb. 6.60: Querzugfestigkeiten von MDF, deren Fasern aus Altholzchhackspänen mit unterschiedlichen Holzfeuchten hergestellt wurden (n = 20)

Dies könnte dadurch erklärt werden, dass die Altholzchhackspäne zwar befeuchtet waren, diese Feuchtenuancen aber durch den Aufschlussprozess (Dämpftemperatur, -druck, Dämpfzeit) überdeckt wurden. Hinzu kommt, dass durch die inhomogene Zusammensetzung des Materials eine Streuung der technologischen Eigenschaften nie ganz auszuschließen ist, was bei der Beurteilung der Ergebnisse mit berücksichtigt werden sollte. Diese Schwankungen betreffen auch die Querzugfestigkeiten.

Dass sich allein durch eine Holzfeuchteänderung des aufzuschließenden Materials keine wesentlichen Verbesserungen der Faserbeschaffenheit erreichen lassen, konnte auch durch andere Arbeiten im WKI bestätigt werden (THOLE, 2002; persönliche Mitteilung).

6.5.3.2 Altholzhackspäne mit unterschiedlicher Holzfeuchte bei verschiedenen Zerfaserungsbedingungen

In einem weiteren Versuchsabschnitt dieser Serie sollte untersucht werden, wie sich eine veränderte Dämpfzeit der Hackspäne mit unterschiedlicher Feuchte im Vordämpfer bei gleichbleibender Temperatur von 150°C auf die Zerfaserung auswirkt. Dazu wurden die im Unterabschnitt 6.5.3.1 beschriebenen Altholzhackspäne mit einer Holzfeuchte von 15%, 35% und 90% für die Herstellung von Fasern verwendet. Die Dämpfung der Hackspäne erfolgte für 3 und 8 Minuten. Die Vergleichsdaten der mittleren Dämpfzeit (5 min) stammen aus den im Unterabschnitt 6.5.3.1 durchgeführten Versuchen. In den Ergebnistabellen der technologischen Eigenschaften ist die 3-minütige Dämpfzeit mit Bd und die 8-minütige Verweildauer mit Bf gekennzeichnet. Alle übrigen Prozessparameter blieben unverändert.

Die nach einer Klimatisierung an den Prüfkörpern der Alt- und Frischholzplatten ermittelten technologisch-mechanischen Eigenschaften sind als Mittelwerte in den Tabellen 6.21 und 6.22 wiedergegeben. Die Einzelheiten können Anhang 9.3 (Tab. 6 bis 10 (3-minütige Vordämpfung) und Tab. 11 bis 15 (8-minütige Vordämpfung)) entnommen werden.

Das für diese Untersuchungen verwendete Altholzmaterial bestand im Gegensatz zum verwendeten Material aus Abschnitt 6.4 nicht aus reinem Kiefernaltholz, sondern aus einer gemischten Charge mittlerer Qualität (Firma B). Die Abbildungen 6.61 und 6.62 geben den Einfluss der Verweildauer der Hackspäne mit unterschiedlicher Feuchte im Vordämpfer bei gleich bleibender Temperatur von 150°C wieder.

Tab. 6.21 : Mittelwerte (Biege-E-Modul und Biegefestigkeiten n = 12; Rohdichte n = 10; Querzug- und Abhebefestigkeiten n = 20) von 16 mm dicken Labor-MDF, deren Fasern aus befeuchteten Altholzhackspänen mit einer 3-minütigen Vordämpfung hergestellt wurden (Bd)

	Rohdichte	$S_x^{1)}$	$V^{2)}$	Biege-E-Modul	$S_x^{1)}$	$V^{2)}$	Biegefestigkeit	$S_x^{1)}$	$V^{2)}$	Querzugfestigkeit	$S_x^{1)}$	$V^{2)}$	Abhebefestigkeit	$S_x^{1)}$	$V^{2)}$
Firma	\bar{x} kg/m ³	\bar{x} kg/m ³	(%)	\bar{x} N/mm ²	\bar{x} N/mm ²	(%)									
Bd mit u = 15%	704	27,41	3,89	3006	211	7,36	23,4	1,8	7,79	0,29	0,04	13,28	0,83	0,10	11,86
Bd mit u = 35%	706	21,38	3,03	3150	96	3,04	24,3	0,9	3,60	0,28	0,02	5,27	0,88	0,06	7,04
Bd mit u = 90%	713	17,76	2,49	2999	235	7,82	23,5	1,9	7,97	0,31	0,10	36,97	0,75	0,16	21,84
Ref. Fd*	703	18,99	2,70	3664	367	10,01	34,2	5,0	14,60	0,37	0,08	24,36	1,03	0,48	46,88
Anforderungen nach EN 622-5	-	-	-	≥2200	-	-	≥20	-	-	≥0,55	-	-	-	-	-

* Referenzplatte F aus Kiefernfrischholz

u = Holzfeuchte

¹⁾S_x = Standardabweichung

²⁾V = Variationskoeffizient

Tab. 6.22: Mittelwerte (Biege-E-Modul und Biegefestigkeiten n = 12; Rohdichte n = 10; Querzug- und Abhebefestigkeiten n = 20) von 16 mm dicken Labor-MDF, deren Fasern aus befeuchteten Altholzhackspänen mit einer 8-minütigen Vordämpfung hergestellt wurden (Bf)

	Rohdichte	$S_x^{1)}$	$V^{2)}$	Biege-E-Modul	$S_x^{1)}$	$V^{2)}$	Biegefestigkeit	$S_x^{1)}$	$V^{2)}$	Querzugfestigkeit	$S_x^{1)}$	$V^{2)}$	Abhebefestigkeit	$S_x^{1)}$	$V^{2)}$
Firma	\bar{x} kg/m ³	\bar{x} kg/m ³	(%)	\bar{x} N/mm ²	\bar{x} N/mm ²	(%)									
Bf mit u = 15%	704	14,19	2,01	3110	112	3,60	24,8	1,2	4,64	0,29	0,02	7,75	0,83	0,10	12,12
Bf mit u = 35%	710	10,79	1,52	3212	117	3,65	24,9	1,8	7,29	0,28	0,03	10,69	0,92	0,06	6,78
Bf mit u = 90%	706	13,63	1,93	3181	156	4,89	25,1	2,2	8,85	0,31	0,03	10,01	0,85	0,10	11,42
Ref. Ff*	705	12,45	1,77	3803	222	5,83	36,8	2,5	6,75	0,37	0,09	23,61	1,11	0,33	29,55
Anforderungen nach EN 622-5	-	-	-	≥2200	-	-	≥20	-	-	≥0,55	-	-	-	-	-

* Referenzplatte F aus Kiefernfrischholz

u = Holzfeuchte

¹⁾S_x = Standardabweichung

²⁾V = Variationskoeffizient

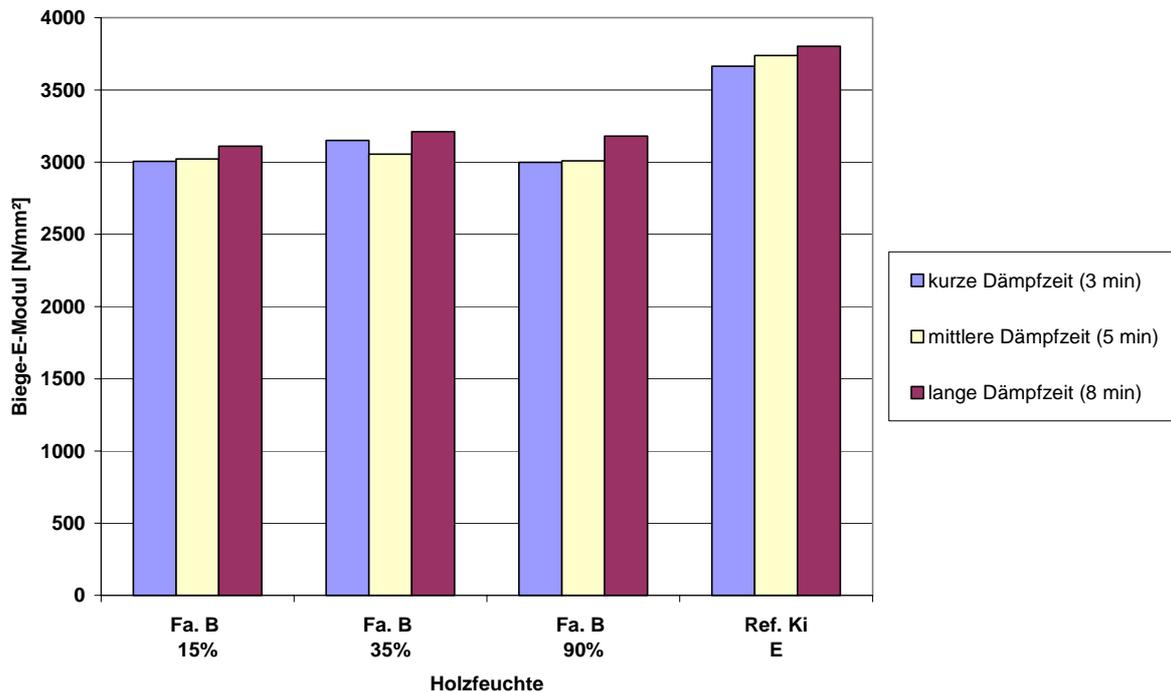


Abb. 6.61: Biege-E-Modul von MDF, deren Fasern aus Altholzhackspänen mit unterschiedlichen Holzfeuchten und unterschiedlichen Dämpfzeiten hergestellt wurden (n =12)

Analog den Ergebnissen aus Abschnitt 6.4 zeigten auch diese Untersuchungen, dass mit veränderten Dämpfzeiten eine Eigenschaftsverbesserung der MDF erreicht wird. Es ist festzustellen, dass die Dauer der Dämpfung einen Einfluss auf die Faserstoffqualität und damit auf die Platteneigenschaften hat und die Ausgangsfeuchte des Holzes von untergeordneter Bedeutung ist.

Werden die Ergebnisse zwischen einer 3-minütigen und einer 5-minütigen Verweildauer der Hackschnitzel im Vordämpfer betrachtet, so war beim Biege-E-Modul wie auch bei der Biegefestigkeit ein Unterschied von nur 1% zu verzeichnen. Beim Vergleich der mittleren Dämpfzeit von 5 Minuten mit der langen Dämpfzeit von 8 Minuten konnte ein prozentualer Anstieg der technologischen Eigenschaften von durchschnittlich 4,5% erreicht werden. Auch SCHNEIDER (2000) konnte diesen Zusammenhang mit seinen Untersuchungsergebnissen belegen. Insgesamt ergab eine Verlängerung der Verweilzeit im Vordämpfer von 3 auf 8 Minuten eine Erhöhung der Biegefestigkeit.

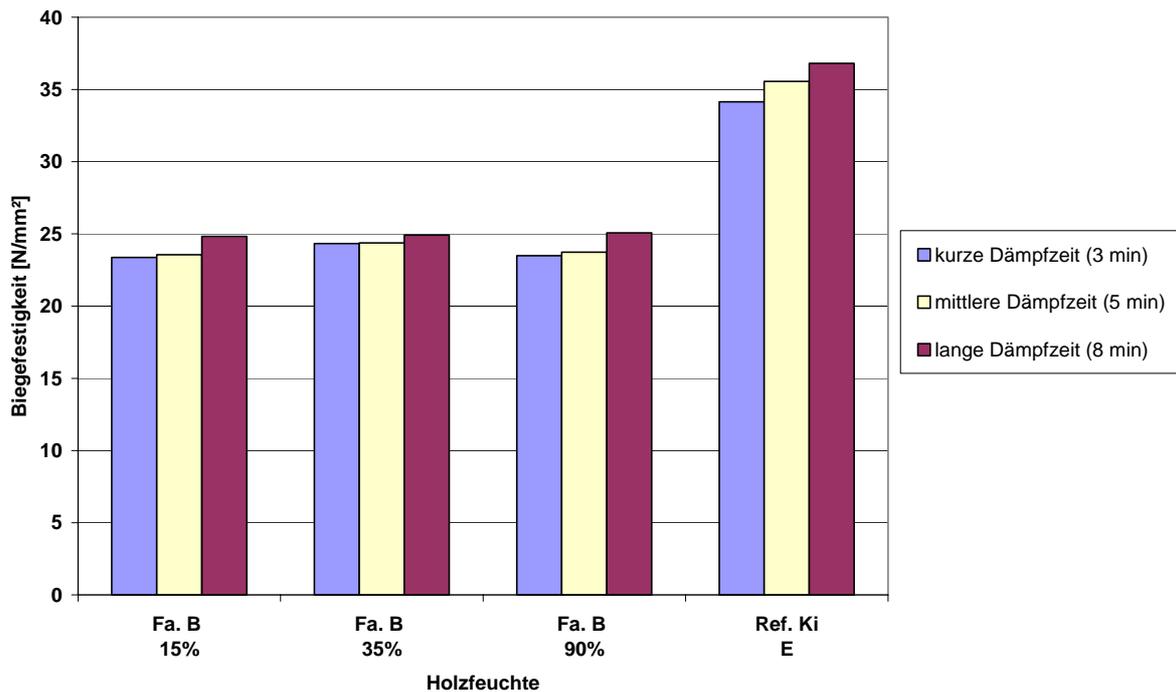


Abb. 6.62: Biegefestigkeiten von MDF, deren Fasern aus Altholzhackspänen mit unterschiedlichen Holzfeuchten und unterschiedlichen Dämpfzeiten hergestellt wurden (n = 12)

Der Biege-E-Modul-Wert erhöhte sich durch Verlängerung der Dämpfzeit um ca. 2%, die Biegefestigkeit um 3,5% beim Referenzmaterial Kiefer. Die ermittelten technologischen Werte der Referenzplatte aus Kiefer lagen insgesamt deutlich höher als die der geprüften Altholzfaserplatten.

Bei dem thermo-mechanischen Aufschlussverfahren kommt es zu verhältnismäßig starken Faserschädigungen und -kürzungen, was sich negativ auf die Strukturbildung und damit auf die Festigkeitseigenschaften der Faserplatten auswirkt. Durch die eingestellte Verweilzeit im Vordämpfer wurden die Altholzhackschnitzel vorübergehend in einen plastisch verformbaren Zustand überführt. Damit kann die Zerfaserung der Altholzhackschnitzel durch einen geringeren Mahlwiderrstand selektiver erfolgen. Hierbei wirkt sich die längere thermische Behandlung der Hackspäne entscheidend auf die Faserlängenverteilung aus (Abschnitt 6.3). Die vorliegenden Ergebnisse bestätigen die tendenzielle Qualitätsveränderung der hergestellten MDF durch veränderte Dämpfzeiten, zeigen aber auch gleichzeitig die Qualitätsunterschiede zwischen Alt- und Frischholz auf.

Ähnliches wird auch durch die Modifizierung von Hackschnitzeln durch Pilze erreicht. Durch eine 12- bis 15-tägige Behandlung des vorzerkleinerten Holzes mit Braunfäulepilzen (*Coniophora fomitopsis*) ist es möglich, den Energieaufwand beim Zerfasern zu senken (KÜHNE, 1993). Der Autor konnte anhand seiner Untersuchungen belegen, dass sich die Bindefestigkeit der Fasern untereinander deutlich verbesserte. Die holzeigenen Bindekräfte blieben im hohen Maße erhalten bzw. wurden aktiviert.

Für die industrielle Anwendung bedeutet dies, dass eine Lagerung der Hackspäne im Wasser für die Verarbeitung von trockenen Altholzspänen entscheidender ist als das Erreichen einer bestimmten Holzfeuchte. Hackspäne, die im Wasser lagern, können über ihr Porenvolumen besser Wasser aufnehmen (vergl. Unterabschnitt 6.4.4) als Hackspäne, die lediglich mit Wasser auf eine bestimmte Holzfeuchte gebracht wurden. Durch die intensivere Durchtränkung der Hackspäne werden die inneren Festigkeiten der Hackspäne vermindert. Beim Zerfaserungsprozess kann bei entsprechender Dämpftemperatur eine schonende Zerfaserung erfolgen. Ein Besprühen bzw. leichtes Bewässern der Hackspäne auf eine bestimmte Holzfeuchte hat, wie im Unterabschnitt 6.5.3.1 beschrieben, keinen Einfluss auf die mechanisch-technologischen Eigenschaften der MDF.

6.5.4 Zusammenfassung

- Die Veränderung der Hackspänefeuchte wirkte sich auf die mechanisch-technologischen Eigenschaften der Laborfaserplatten nur geringfügig aus.
- Nach den hier durchgeführten Untersuchungen ist für die MDF-Herstellung aus Altholzhackspänen eine bestimmte Eingangsfuchte für den Zerfaserungsprozess weniger relevant. Entscheidender ist vielmehr eine intensivere Durchtränkung der Hackspäne während des Dämpfprozesses.
- Aufgrund der Ergebnisse kann bestätigt werden, dass nicht die eingestellte Holzfeuchte selbst, sondern eine längere Dämpfzeit einen wesentlich größeren Einfluss auf den Zerfaserungsprozess hat.
- Nach den hier vorliegenden Untersuchungen könnte bei der industriellen Verarbeitung die Holzfeuchte der angelieferten Altholzhackspäne vernachlässigt werden.

6.6 Untersuchungen an Mitteldichten Laborfaserplatten aus Alt- und Frischholz ohne und mit einer Reinigung der Hackspäne

6.6.1 Zielsetzung

Für die Praxis ist es wichtig, den Rohstoff ohne größere Zwischenstufen dem Fertigungsprozess zu zuführen. Mit den vorgehend dargestellten Versuchsserien konnte belegt werden, dass nicht die Holzfeuchte, sondern die Dampfbehandlung und die Aufschlusstemperatur einen großen Einfluss auf das herzustellende Fasermaterial ausüben. In den hier durchgeführten zwei Untersuchungsabschnitten sollte daher untersucht werden, ob sich eine Verarbeitung der relativ trockenen Altholzhackspäne ohne eine weitere Vorbehandlung auf die technologischen Platteneigenschaften auswirkt. Es sollte folgendes überprüft werden:

- Bewirkt eine vorgeschaltete Wäsche der Altholzhackspäne eine qualitative Verbesserung der Platteneigenschaften?
- Wie verhalten sich die Dickenquellungen der hergestellten Laborfaserplatten?
- Wie sieht die Benetzung der Fasern aus?

Das für diesen Untersuchungsabschnitt verwendete Altholz wurde mit einer Dampfbehandlung von 5 min/150°C aufgeschlossen.

6.6.2 Untersuchungsprogramm

Neben der Altholzcharge der Firma B wurde von 3 weiteren Altholzverwertern (Firma A, C, D) Untersuchungsmaterial verwendet. Es handelt sich dabei um marktübliche Altholzsortimente der Kategorie A1, die sich lediglich in ihrer Zusammensetzung unterscheiden. Eine Störstoffanalyse wurde, wie im Abschnitt 6.2.3 beschrieben, durchgeführt. Bis auf die metallischen Verunreinigungen wurden die zur Analyse entnommenen Störstoffe prozentual dem zu verarbeitenden Hackspänematerial wieder zugegeben.

Die Herstellung der Alt- und Frischholzplatten sowie die Überprüfung der technologischen Eigenschaften verliefen analog zu den vorherigen Abschnitten.

Ein Teil des Untersuchungsmaterials der jeweiligen Altholzverwerter wurde ohne eine vorherige Hackspänewäsche dem Zerfaserungsprozess zugeführt. Die entsprechenden Aufschlussparameter sind in Tabelle 6.23 aufgeführt.

Tab. 6.23: Aufschlussparameter von Altholzhackspänen ohne eine vorherige Reinigung der Hackspäne

Firma	Material	Holzfeuchte vor Verarbeitung [%]	Dampfbehandlung	Mahlscheibenabstand [mm]	eingesetztes Bindemittel
A	Altholz	17,4	5 min/150°C	0,1	Kaurit 407
B	Altholz	7,5	5 min/150°C	0,1	Kaurit 407
C	Altholz	9,8	5 min/150°C	0,1	Kaurit 407
D	Altholz	5,4	5 min/150°C	0,1	Kaurit 407
F	Frischholz	ca. 85	5 min/150°C	0,1	Kaurit 407

Ein weiterer Teil des Untersuchungsmaterials sollte vor der Verarbeitung einer Wäsche unterzogen werden. Dazu wurde das Spangut in einen Siebkorb geschüttet, welcher in einer Wanne hing. Zur Reinigung des Materials von Sand und Verschmutzungen wurde dieses mit einem Wasserstrahl von ca. 2 bar bei ca. 40°C gereinigt.

Durch die Reinigung der feuchten Hackspäne mit Wasser und einer anschließenden Lagerung von 24 Stunden in einem abgeschlossenen Behälter erreichte das Altholzmaterial aller Firmen eine mittlere Holzfeuchte von über 90% (wie Frischholz). Die übrigen Aufschlussparameter blieben unverändert (Tab. 6.24).

Tab. 6.24: Aufschlussparameter von Altholzhackspänen mit einer vorherigen Reinigung der Hackspäne

Firma	Material	Holzfeuchte vor Verarbeitung [%]	Dampfbehandlung	Mahlscheibenabstand [mm]	eingesetztes Bindemittel
A	Altholz	96	5 min/ 150°C	0,1	Kaurit 407
B	Altholz	93	5 min/ 150°C	0,1	Kaurit 407
C	Altholz	95	5 min/ 150°C	0,1	Kaurit 407
D	Altholz	92	5 min/ 150°C	0,1	Kaurit 407
F	Frischholz	ca. 85	5 min/ 150°C	0,1	Kaurit 407

6.6.3 Mechanisch-technologische Eigenschaften der Laborfaserplatten

Die aus beiden Versuchsvarianten gewonnenen Faserstoffe wurden zu MDF-Altholzplatten verarbeitet. Die zugeschnittenen Prüfkörper wurden anschließend im Normklima bei 20°C und 65% rel. Luftfeuchte (DIN 50 014) bis zur Gewichtskonstanz für mehrere Wochen gelagert und danach geprüft. In den Tabellen 6.25 und 6.26 sind die Eigenschaften der 16 mm dicken Labor-MDF ohne und mit einer Hackspänevorbereitung dargestellt. Die Mittelwerte setzen sich aus zwei Laborplatten mit je 6 Proben für die Prüfung der Biegeeigenschaften, 10 Proben für die Querkzugfestigkeit und 10 Proben für die Abhebefestigkeit pro Material und Versuchsserie, zusammen (Anhang 9.4: Tab. 1 bis 10).

Durch die Reinigungsstufe konnte eine Verbesserung der Biegefestigkeitswerte der MDF aus Altholz der Firma B um 13,5%, der Firma C um 12,3% und der Firma D sogar um 18,7% erreicht werden. Mit dem Material der Firma A konnten schon ohne Reinigung der Hackspäne Eigenschaftswerte erreicht werden, die von dem Material der übrigen Altholzaufbereiter erst mit einer Reinigungsstufe erreicht wurden. Die Biege-E-Modulwerte der MDF konnten bei den Firmen B bis D um 6,4% (Fa. B) bis 11,8% (Fa. D) verbessert werden. Die Verbesserung der Eigenschaftswerte könnte auf die eingeführte Wäsche der Späne zurückzuführen sein. Zum einen konnte der Verschmutzungsgrad des Ausgangsmaterials verringert werden (Unterabschnitt 6.2.4.4) und zum anderen wurden dadurch gleichzeitig die Feinanteile herausgewaschen, die sich negativ auf die Eigenschaften der Platte auswirken können. Durch eine günstigere Faserverteilung in der Platte könnte die Bindungseigenschaft zwischen Bindemittel und Faser erhöht werden, wodurch sich verbesserte technologische Eigenschaften erzielen lassen.

Im Zugversuch senkrecht zur Plattenebene wird innerhalb der Holzwerkstoffplatte die Schicht mit der niedrigsten Festigkeitsausbildung ermittelt. Durch die Reinigung der Hackspäne von Schmutz, Staub und anderen Verunreinigungen konnte bei der Querkzugfestigkeit der MDF der Firma D die Faser-zu-Faser-Bindung um 21,6% verbessert werden. Mit den Materialien der übrigen Firmen wurden ähnliche Ergebnisse erzielt. Durch die Hackspänereinigung erreichte die Querkzugfestigkeit bei allen Untersuchungsmaterialien einen Wert von über 0,33 N/mm².

Wie anhand der vorliegenden Ergebnisse zu erkennen ist, kann der Hackspänereinigung eine besondere Bedeutung beigemessen werden. Es konnte bei den Firmen A und B durch die Reinigung der Hackspäne eine Verbesserung der Abhebefestigkeitswerte von 2,5% erreicht werden. Bei verschmutztem Ausgangsmaterial betrug die Verbesserung dieser Eigenschaft 12,8% (Firma C) und bei stark verschmutztem Ausgangsmaterial (Firma D) sogar 17,2%.

Die Abhebefestigkeit nach EN 311 ist als die Festigkeit der Deckschicht gegen eine Abhebekraft zwischen der Plattenoberfläche und dem darunter liegenden Material definiert. Bei der Weiterverarbeitung von Möbelplatten aus MDF, die mit unterschiedlichen Materialien beschichtet werden, ist die Abhebefestigkeit von großer Bedeutung. SENNEBOGEN (1991) konnte an Spanplatten feststellen, dass mit zunehmender Rohdichte und steigendem Feingutanteil in der Deckschicht die Abhebefestigkeit anstieg. Dies ist indirekt auch auf die MDF übertragbar.

Durch die stark unterschiedliche Zusammensetzung der einzelnen Altholzchargen führt jede Art von Verunreinigung zu einer Veränderung der späteren Platteneigenschaften. Die im Abschnitt 6.6 ermittelten Ergebnisse von MDF, die aus reinem Kiefernaltholz hergestellt wurden, verdeutlichen diesen Zusammenhang. Durch das sortenreine Altholzmaterial konnten wesentlich bessere technologische Platteneigenschaften erreicht werden als bei MDF, die aus stark vermischtem Material hergestellt wurden.

Tab. 6.25: Mittelwerte (Biege-E-Modul und Biegefestigkeiten n = 12; Rohdichte n = 10; Querzug- und Abhebefestigkeiten n = 20) der mechanisch-technologischen Eigenschaften von 16 mm Labor-MDF, die aus ungereinigten Altholzhackspänen hergestellt wurden (Blow-Line Beleimung)

	Rohdichte	$S_x^{1)}$	$V^{2)}$	Biege-E-Modul	$S_x^{1)}$	$V^{2)}$	Biegefestigkeit	$S_x^{1)}$	$V^{2)}$	Querzugfestigkeit	$S_x^{1)}$	$V^{2)}$	Abhebefestigkeit	$S_x^{1)}$	$V^{2)}$
Firma	\bar{x} kg/m ³	\bar{x} kg/m ³	(%)	\bar{x} N/mm ²	\bar{x} N/mm ²	(%)									
A	703	24,54	3,5	3574	305	8,5	31,8	2,9	9,2	0,35	0,05	14,8	0,78	0,14	18,0
B	702	15,93	2,3	3263	268	8,2	26,9	3,0	11,1	0,29	0,03	10,7	0,80	0,09	10,9
C	702	17,07	2,4	3397	297	8,7	28,6	2,8	9,8	0,30	0,05	16,0	0,75	0,07	9,5
D	704	14,18	2,0	3198	236	7,4	25,9	2,7	10,2	0,29	0,03	11,9	0,72	0,20	28,1
Ref.*	705	15,15	2,2	3750	196	5,2	36,9	3,1	8,5	0,38	0,03	8,6	0,75	0,15	20,0
Anforderungen nach EN 622-5	-	-	-	≥2200	-	-	≥20	-	-	≥0,55	-	-	-	-	-

* Referenzplatte aus Kiefernfrischholz

¹⁾ S_x = Standardabweichung

²⁾ V = Variationskoeffizient

Tab. 6.26: Mittelwerte (Biege-E-Modul und Biegefestigkeiten n = 12; Rohdichte n = 10; Querzug- und Abhebefestigkeiten n = 20) der mechanisch-technologischen Eigenschaften von 16 mm Labor-MDF, die aus gereinigten Altholzhackspänen hergestellt wurden (Blow-Line Beleimung)

	Rohdichte	$S_x^{1)}$	$V^{2)}$	Biege-E-Modul	$S_x^{1)}$	$V^{2)}$	Biegefestigkeit	$S_x^{1)}$	$V^{2)}$	Querzugfestigkeit	$S_x^{1)}$	$V^{2)}$	Abhebefestigkeit	$S_x^{1)}$	$V^{2)}$
Firma	\bar{x} kg/m ³	\bar{x} kg/m ³	(%)	\bar{x} N/mm ²	\bar{x} N/mm ²	(%)									
A	705	29,67	4,2	3578	295	8,2	31,9	2,8	8,7	0,36	0,05	13,6	0,80	0,17	20,6
B	707	26,06	3,7	3485	204	5,9	31,1	2,8	9,0	0,33	0,04	11,3	0,82	0,09	10,8
C	707	21,95	3,1	3700	246	6,7	32,6	2,3	6,9	0,36	0,04	11,7	0,86	0,15	17,5
D	704	18,68	2,7	3625	384	10,6	31,9	3,7	11,5	0,37	0,06	15,4	0,87	0,09	11,0
Ref. F*	707	24,57	3,5	3875	286	7,4	37,1	3,5	9,4	0,37	0,04	11,4	0,87	0,15	17,0
Anforderungen nach EN 622-5	-	-	-	≥2200	-	-	≥20	-	-	≥0,55	-	-	-	-	-

* Referenzplatte aus Kiefernfrischholz

¹⁾ S_x = Standardabweichung

²⁾ V = Variationskoeffizient

6.6.4 Dickenquellung der aus Altholz hergestellten MDF

In den Tabellen 6.27 und 6.28 sind die durchschnittlichen Werte der Dickenquellungen von je zwei UF-Harz-gebundenen Laborfaserplatten dargestellt. Auf einen Einsatz von Hydrophobierungsmitteln wurde verzichtet. Folgende Ergebnisse können abgeleitet werden:

Tab. 6.27: Mittelwerte (n = 20) der Dickenquellung nach 2 Std. und 24 Std. von 16 mm dicken Labor-MDF, die aus ungereinigten Altholzhackspänen hergestellt wurden

	Dickenquellung 2 h			Dickenquellung 24 h		
	Mittelwert	Standardabweichung	Variationskoeffizient	Mittelwert	Standardabweichung	Variationskoeffizient
	\bar{x} [%]	s_x [%]	V %	\bar{x} [%]	s_x [%]	V %
Fa. A	27,90	0,75	2,7	33,18	0,80	2,4
Fa. B	26,54	0,82	3,1	35,08	0,64	1,8
Fa. C	29,62	1,80	6,1	37,80	1,29	3,4
Fa. D	23,43	3,59	15,3	35,91	1,50	4,2
Ref. F	27,06	0,80	2,9	34,61	0,82	2,4

Tab. 6.28.: Mittelwerte (n = 20) der Dickenquellung nach 2 Std. und 24 Std. von 16 mm dicken Labor-MDF, die aus gereinigten Altholzhackspänen hergestellt wurden

	Dickenquellung 2 h			Dickenquellung 24 h		
	Mittelwert	Standardabweichung	Variationskoeffizient	Mittelwert	Standardabweichung	Variationskoeffizient
	\bar{x} [%]	s_x [%]	V %	\bar{x} [%]	s_x [%]	V %
Fa. A	26,75	0,51	1,9	32,82	0,65	2,0
Fa. B	26,91	0,66	2,5	32,87	1,04	3,2
Fa. C	26,38	1,27	5,4	31,50	1,55	4,9
Fa. D	19,85	1,88	9,5	28,39	0,68	2,4
Ref. F	24,78	0,65	2,6	31,70	0,75	2,4

Bei gleichen Aufschlussbedingungen des Untersuchungsmaterials für die Herstellung von Fasern für MDF konnte gezeigt werden, dass die durchschnittliche Dickenquellung bei einer Hackspänewäsche (2 h) um durchschnittlich 7,6 % verringert werden konnte. Dies konnte auch in ähnlicher Weise bei der Dickenquellung nach 24 Stunden ermittelt werden. Dort wurde durch die Reinigung eine Verbesserung von ca. 10,6% erzielt. Offensichtlich führt die Wäsche der Hackspäne zu einer besseren Verleimungsqualität.

Diese positive Tendenz der Dickenquellungsverringerung bei einer Hackspänevorbereitung und anschließenden Lagerung der feuchten Hackspäne könnte durch den Einsatz eines Hydrophobierungsmittels noch gesteigert und somit die Grenzwerte der Industrienorm erreicht bzw. unterschritten werden (Abb. 6.63 und 6.64).

Bei der Interpretation dieser Ergebnisse muss berücksichtigt werden, dass die Faserplatten mit 12% UF-Harz auf atro Faserstoff und ohne Hydrophobierungsmittel hergestellt wurden.

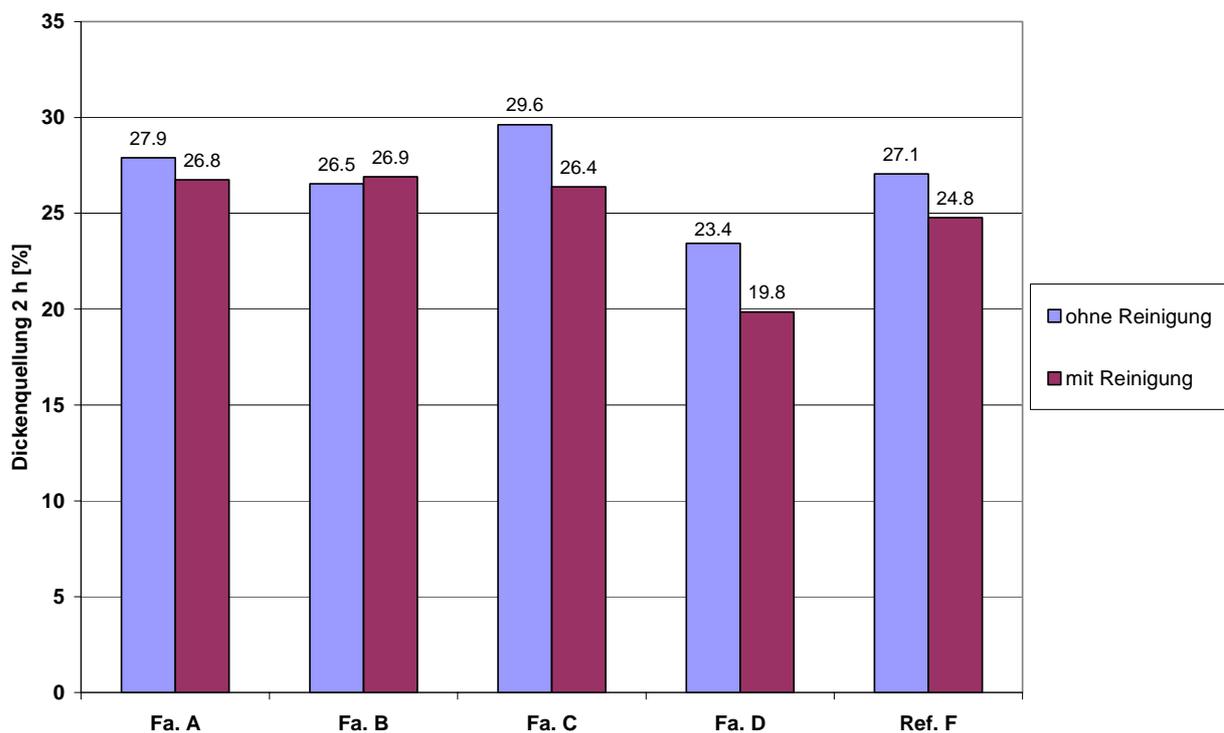


Abb. 6.63: Vergleich der durchschnittlichen Dickenquellung (q_2) von MDF, die aus Altholz- und Frischholzfasern ohne und mit einer Hackspänereinigung hergestellt wurden

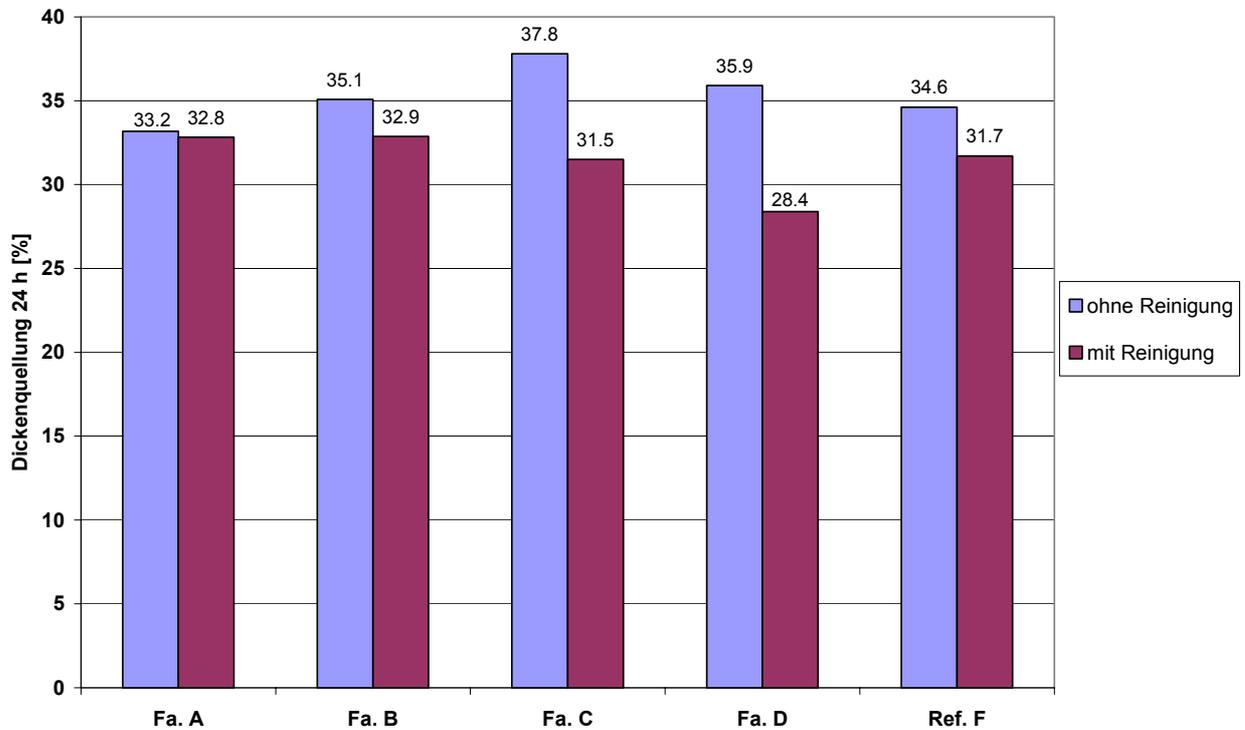


Abb. 6.64: Vergleich der durchschnittlichen Dickenquellung (q_{24}) von MDF, die aus Altholz- und Frischholzfasern ohne und mit einer Hackspänereinigung hergestellt wurden

6.6.5 Wasseraufnahme der aus Altholz hergestellten MDF

Die Mittelwerte der Wasseraufnahme von UF-gebundenen MDF können aus den Tabellen 6.29 und 6.30 entnommen werden. Danach lassen sich folgende Aussagen treffen:

Tab. 6.29: Mittelwerte ($n = 20$) der Wasseraufnahme nach 2 Std. und 24 Std. von 16 mm dicken Labor-MDF, die aus ungereinigten Altholzhackspänen hergestellt wurden

	Wasseraufnahme 2 h			Wasseraufnahme 24 h		
	Mittelwert \bar{x} [%]	Standardabweichung s_x [%]	Variationskoeffizient V %	Mittelwert \bar{x} [%]	Standardabweichung s_x [%]	Variationskoeffizient V %
Fa. A	88,34	4,94	5,6	102,01	6,28	6,2
Fa. B	86,03	7,28	8,5	110,41	5,74	5,2
Fa. C	95,12	9,10	9,6	113,21	7,36	6,5
Fa. D	82,51	15,62	19,2	108,85	7,06	6,5
Ref. F	84,69	4,85	5,7	104,07	2,54	2,4

Tab. 6.30: Mittelwerte (n = 20) der Wasseraufnahme nach 2 Std. und 24 Std. von 16 mm dicken Labor-MDF, die aus gereinigten Altholzhackspänen hergestellt wurden

	Wasseraufnahme 2 h			Wasseraufnahme 24 h		
	Mittelwert \bar{x} [%]	Standardabweichung s_x [%]	Variationskoeffizient V %	Mittelwert \bar{x} [%]	Standardabweichung s_x [%]	Variationskoeffizient V %
Fa. A	87,30	6,60	7,6	101,35	6,94	6,8
Fa. B	85,99	7,95	9,3	99,05	7,24	7,3
Fa. C	84,50	5,42	6,4	95,79	5,53	5,8
Fa. D	74,82	9,08	12,1	93,57	4,55	4,9
Ref. F	78,45	6,83	8,7	99,19	6,61	6,7

Bei der Wasseraufnahme zeigte sich ein ähnliches Bild wie bei der Dickenquellung zwischen den Laborfaserplatten, die ohne und mit einer Reinigung der Hackspäne mit Wasser hergestellt wurden. Vergleicht man die durchschnittliche Wasseraufnahme der UF-Harz gebundenen Platten, bei denen eine Reinigung der Hackspäne durchgeführt wurde, mit den Ergebnissen der Altholzfaserplatten, die ohne eine Reinigung der Hackspäne hergestellt wurden, so zeigt sich bei allen aufgeschlossenen Altholzchargen eine Reduzierung der Wasseraufnahme.

Nach einer 2-stündigen Wasserlagerung der Prüfkörper zeigte sich eine durchschnittliche Reduzierung der Wasseraufnahme von 5,6% bei den Platten, die aus vorbehandelten Altholzhackschnitzeln hergestellt wurden. Bei der 24-stündigen Wasserlagerung konnte eine Abnahme um durchschnittlich 10,1% ermittelt werden. Die Abbildungen 6.65 und 6.66 verdeutlichen die Abnahme der Wasseraufnahme bei vorbehandelten Hackspänen. Ähnlich wie bei der Dickenquellung scheint auch die Wasseraufnahme der MDF von den unterschiedlichen Vorbehandlungen und den Aufschlussbedingungen abzuhängen. MDF aus den Fasern, die mit einer Aufschlusstemperatur von 150°C hergestellt wurden, zeigten einen positiven Einfluss auf die hygroskopischen Eigenschaften der Platten. Dies kann in erster Linie auf die chemisch-thermisch bedingte Veränderung der Hemicellulosen zurückgeführt werden (KLAUDITZ und STEGMANN, 1951). Anhand abgespaltener Stoffe wie Wasser, Kohlendioxid und Essigsäure konnte durch eine qualitative und quantitative Erfassung bei der Wärmevergütung nachgewiesen werden, dass durch Dehydratisierung und gleichgerichtete Vorgänge eine Hydrophobierung des Faserstoffes bzw. der MDF eintritt. Dies wirkt sich auf die Dickenquellung und die Wasseraufnahme vorteilhaft aus. Um dieses ausnutzen zu können, müsste Reinigungswasser mit höherer Temperatur eingesetzt werden. Das verwendete Reinigungswasser hatte eine Temperatur von ca. 40 °C.

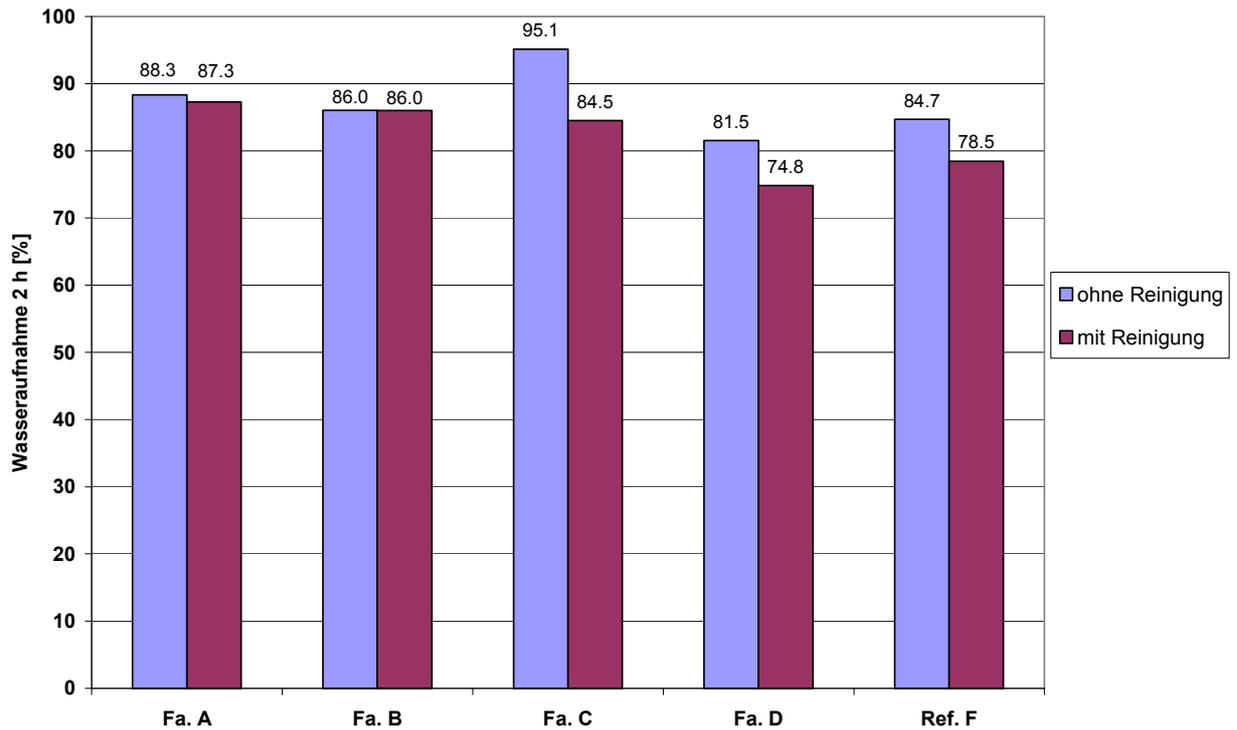


Abb. 6.65: Vergleich der durchschnittlichen Wasseraufnahme (nach 2 h) von MDF, die aus Altholz- und Frischholzfasern ohne und mit einer Hackspänereinigung hergestellt wurden

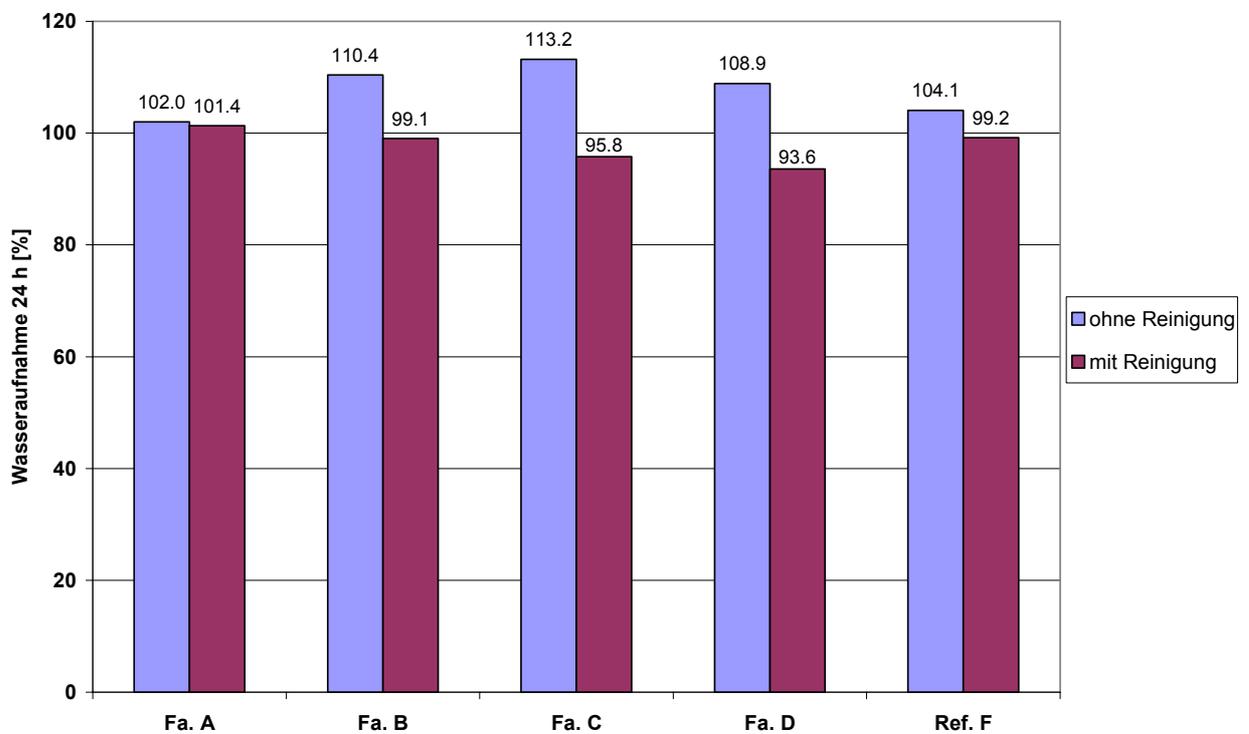


Abb. 6.66: Vergleich der durchschnittlichen Wasseraufnahme (nach 24 h) von MDF, die aus Altholz- und Frischholzfasern ohne und mit einer Hackspänereinigung hergestellt wurden

6.6.6 Benetzbarkeit von Prüfblättern

Eine wichtige Voraussetzung für die Herstellung von Holzwerkstoffen ist eine ausreichende Benetzung der Faseroberfläche mit dem Bindemittel bzw. dem Klebstoff. Im Rahmen dieses Untersuchungsabschnittes sollte daher untersucht werden, wie sich die ungereinigten Altholzfasern gegenüber den Frischholzfasern hinsichtlich der Benetzung verhalten. Wie im Unterabschnitt 5.7.2 beschrieben, wird bei der Benetzung das Zeitintervall vom Auftrag des mit Anilinblau gefärbten Wassertropfens bis zu seinem vollständigen Eindringen in das Prüfblatt gemessen. Je schneller der Wassertropfen eindringt, desto besser ist die Benetzbarkeit.

Abbildung 6.67 zeigt zwei Prüfblätter, die einmal ohne (= unbenetzt) und einmal mit (= benetzt) einem Anilinblautropfen versehen wurden. Die Messungen der Benetzbarkeit (Tab. 6.31) zeigen grundsätzlich, dass Prüfblätter der Altholzchargen niedrigere Mittelwerte (= bessere Benetzbarkeit) aufwiesen als die vergleichbaren Prüfpapiere der Kiefernfrischholzcharge.

Tab. 6.31: Benetzbarkeit von Prüfblättern, hergestellt aus Altholzfasern (Fa. A-D) und aus Frischholzfasern (Referenzmaterial) [Angaben in sek.]

Messung-Nr.	Fa. A	Fa. B	Fa. C	Fa. D	Ref. Mat. F
1	63	22	58	23	147
2	66	20	52	25	120
3	64	26	42	20	115
4	60	23	41	21	132
5	68	23	42	22	116
6	65	23	39	22	140
7	54	20	35	19	90
8	63	24	36	21	178
9	53	23	37	18	117
10	65	19	42	19	109
Mittelwert	62,1	22,3	42,4	21,0	126,4
V (%)*	8,05	9,47	17,12	10,04	19,20

* V = Variationskoeffizient

Die Messungen an den Prüfblättern, die aus Altholzfasern hergestellt wurden und deren Ausgangsmaterialien sich sehr unterschiedlich zusammensetzten, zeigten ein schnelles Eindringen des Anilinblautropfens (Firma B und D). Die Altholzprüfpapiere der Firmen A und C, welche sich vorwiegend aus Paletten- und Verpackungshölzern zusammensetzten, wiesen höhere Messzeiten auf. Diese Gebrauchthölzer haben einen wesentlich kürzeren Lebenszyklus als andere. Die unterschiedlichen Messzeiten der Prüfpapiere aus Altholz könnte in dem durch den Lagerungsprozess hervorgerufenen Abbau der Holzinhaltstoffe begründet sein. Dies würde auch die höheren Messzeiten (= schlechtere Benetzbarkeit) bei den Frischholzprüfpapieren mit 126 sec. erklären, da beim Frischholz Holzinhaltstoffe nicht reduziert sind.

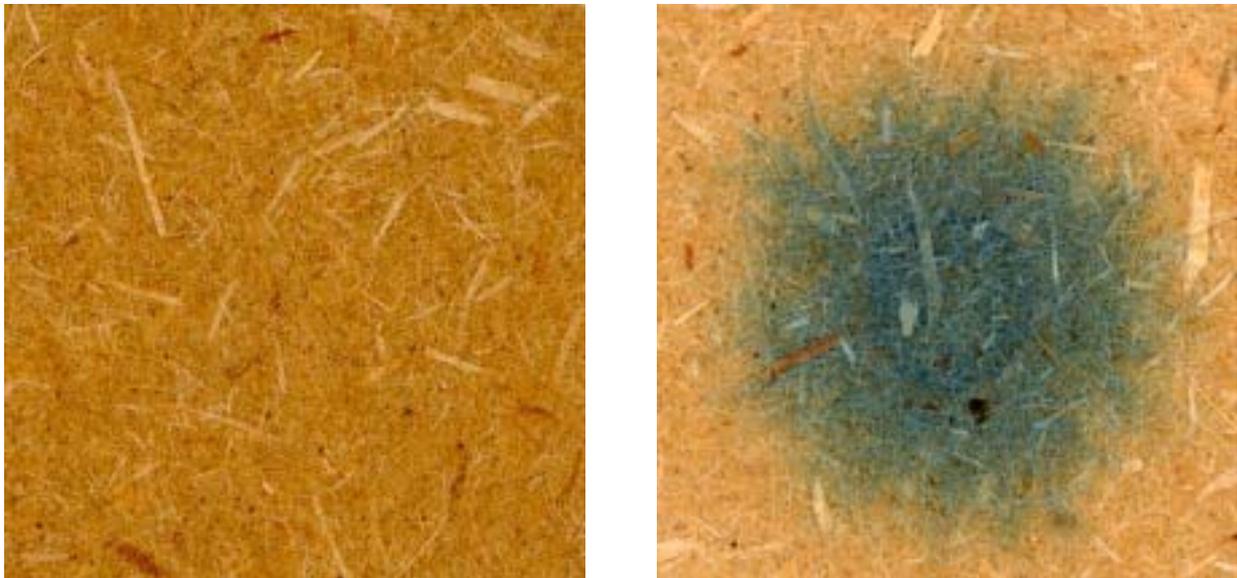


Abb. 6.67: Detailansicht von einem unbenetzten Ausgangsprüfblatt (links) und einem benetzten Prüfblatt aus Faserstoffen nach der Prüfung (rechts)

Grundsätzlich sollte die Verbindung zwischen Faser und Bindemitteltropfen so sein, dass einerseits das Bindemittel nicht zu tief in die Faser eindringt und andererseits das Bindemittel nicht locker auf der Faser sitzt. Bei beiden Varianten wäre die Verbindung von Faser zu Faser nicht ausreichend. Es sollte eine Verbindung zwischen Beileimungstropfen und Faser entstehen. Verschiedene Einflussfaktoren wie die Rohdichte des Holzes, die Oberflächenbeschaffenheit, Extraktstoffe, Abbau von Holzsubstanzen durch Pilze sowie Früh-, Spät-, Kern- und Splintholzanteile können die Benetzung zwischen Bindemittel und Holzfasern beeinflussen. Mit diesen Einflüssen, die in unterschiedlichen Intensitäten auftreten können, sind die meisten Altholzchargen behaftet.

6.6.7 Zusammenfassung

- Durch eine vorgeschaltete Reinigungsstufe vor dem Zerfaserungsprozess konnte eine Verbesserung der mechanisch-technologischen Eigenschaften von bis zu 21% erreicht werden.
- Die Dickenquellung (q_2 und q_{24}) konnte an den ohne Hydrophobierungsmitteln hergestellten Laborplatten ebenfalls verbessert werden. Durch Zugabe von Hydrophobierungsmitteln könnte die Dickenquellung noch weiter verringert und somit die Grenzwerte der Industrienorm erreicht bzw. unterschritten werden.
- Die Messzeiten der Benetzbarkeit von Prüfblättern aus Faserstoffen weisen beim Altholz Unterschiede auf. Diese könnten in dem durch den Lagerungsprozess hervorgerufenen Abbau der Holzinhaltsstoffe begründet sein. Im Gegensatz zu den aus Altholz hergestellten Prüfpapieren wiesen die Frischholzprüfpapiere höhere Messzeiten auf.

6.7 Mischung von Alt- und Frischholz zur Herstellung von Mitteldichten Faserplatten

6.7.1 Zielsetzung

Ziel des Untersuchungsabschnittes war es, durch Beimischen von Frischholz zum Altholz eine Plattenqualität zu erreichen, die einer aus reinem Frischholzmaterial hergestellten MDF äquivalent ist. Folgendes galt es zu überprüfen:

- Bei welchem Anteil an Frischholz lässt sich die Plattenqualität bei unterschiedlich eingesetzten Altholzqualitäten deutlich verbessern?

Dazu wurde Altholzmaterial des Altholzverwerters D (AI Qualität mit erhöhtem Anteil an Störstoffen) und das des Altholzverwerters C (bessere AI Qualität) verwendet, welches mit einer Dämpfbehandlung von 5 min/150°C verarbeitet wurde.

6.7.2 Untersuchungsprogramm

Unter industriellen Bedingungen muss Frischholz mit Altholz verarbeitet werden, da für eine ausschließlich aus Altholz hergestellte MDF regional bedingt nicht genügend Altholz zur Verfügung stehen wird. Einerseits besteht die Möglichkeit, das Alt- und Frischholzfasermaterial nach dem Zerfaserungsprozess zu vermischen, wobei die Mischung der Fasern in der Trockenbeimischung erfolgt. Hierzu müssten zwei Aufschlusszyklen, einmal mit Alt- und einmal mit Frischholz, durchgeführt werden. Andererseits besteht die Möglichkeit, die Hackspäne vor dem Zerfaserungsprozess zu mischen und die Fasern direkt in der Blow-Line zu beimischen. Diese Variante entspricht mehr der industriellen Vorgehensweise und wurde hier angewendet.

Unter diesem Gesichtspunkt wurde vor der Zerfaserung in der MDF-Laboranlage das von Metallteilen befreite Altholz mit Anteilen an Frischholzhackschnitzeln (Ref. Kiefer) von 10%, 25%, 50% und 75% vermischt. Bei der Mischung der Hackspäne wurde sorgfältig darauf geachtet, dass die prozentualen Anteile eingehalten wurden. Aufgeschlossen wurde das gemischte Material mit den Parametern aus dem Unterabschnitt 6.5.2. Die Ausgangsfeuchte des Untersuchungsmaterials ist der Tabelle 6.32 zu entnehmen. Das hergestellte Fasermaterial wies nach der Trocknung eine Feuchte zwischen 7,5 und 7,7% auf, bevor es zu Faserplatten verarbeitet wurde.

Die Herstellungs- und Prüfparameter wurden gegenüber denen in den zuvor beschriebenen Abschnitten nicht verändert.

Tab. 6.32: Holzfeuchte des Untersuchungsmaterials vor dem Aufschlussprozess in %

Firma	Altholz mit 10% FH	Altholz mit 25% FH	Altholz mit 50% FH	Altholz mit 75% FH	100% Altholz	100% Frischholz
C	13,4	17,8	25,3	32,8	10,3	-
D	8,7	14,5	23,6	32,6	15,6	-
Ref. F*	-	-	-	-	-	ca. 60

*Referenzplatte F aus Kiefernfrischholz
AH = Altholz, FH = Frischholz

6.7.3 Ergebnisse der mechanisch-technologischen Untersuchungen der Laborfaserplatten

In der Übersichtstabelle 6.33 sind die mechanisch-technologischen Eigenschaften der in den zuvor beschriebenen Untersuchungen hergestellten Platten dargestellt. Einzelheiten können dem Anhang 9.5 (Tab. 1 bis 5) entnommen werden. Zur besseren Vergleichbarkeit der einzelnen Versuchsserien untereinander wurde auch bei dieser Versuchsreihe eine Soll-Rohdichte von ca. 700 kg/m³ vorgegeben, die im Mittel auch erreicht wurde.

Erwartungsgemäß stiegen durch die Zugabe des Frischholzmaterials die Mittelwerte der mechanisch-technologischen Eigenschaften kontinuierlich an. Die Mindestanforderungen für den Biege-E-Modul und die Biegefestigkeit nach DIN EN 622-5 an Platten für allgemeine Zwecke zur Verwendung im Trockenbau wurden von den reinen Altholz-MDF erreicht und konnten durch Zugabe von Frischholz noch erheblich verbessert werden. Die ohne Frischholzanteil hergestellten Altholz-MDF der Firma C (mit geringem Störstoffanteil) zeigten tendenziell bessere technologische Eigenschaften als Platten, die aus dem Material der Firma D (höherer Störstoffanteil) gefertigt wurden. Die Biegefestigkeitseigenschaften der nur aus Altholzmaterial der Firma C hergestellten Platten konnten im Mittel von 27,4 N/mm² auf 36,0 N/mm² (Altholzplatte mit 75% Frischholzanteil) erhöht werden, was einer Steigerung von ca. 24% entspricht. Bei der Verwendung von stärker mit Störstoffen verschmutztem Altholzmaterial (Firma D) wurde hingegen nur eine Steigerung der Biegefestigkeit von 15% erreicht. Dabei können die aus dem Material der Firma C hergestellten MDF an die Eigenschaftswerte von Kiefernfrischholzplatten reichen. Die Trockenquerzugfestigkeit wurde in Anlehnung an die Spanplattenprüfung nach EN 319 durchgeführt. Sie zeigte nicht so deutliche Unterschiede, wie zuvor bei Biege-E-Modul und Biegefestigkeit beschrieben.

Tab. 6.33: Mittelwerte (Biege-E-Modul und Biegefestigkeiten n = 12; Rohdichte n = 10; Querzug- und Abhebefestigkeiten n = 20) von 16 mm dicken Labor-MDF, deren Fasern aus Altholzhackspänen unter Zugabe von Frischholzhackspäneanteilen hergestellt wurden (Blow-Line Beleimung)

	Rohdichte	$S_x^{1)}$	$V^{2)}$	Biege-E-Modul	$S_x^{1)}$	$V^{2)}$	Biegefestigkeit	$S_x^{1)}$	$V^{2)}$	Querzugfestigkeit	$S_x^{1)}$	$V^{2)}$	Abhebefestigkeit	$S_x^{1)}$	$V^{2)}$
Firma	\bar{x} kg/m ³	\bar{x} kg/m ³	(%)	\bar{x} N/mm ²	\bar{x} N/mm ²	(%)									
C mit 100%AH	697	21,01	3,02	3366	303	9,00	27,4	3,7	13,37	0,28	0,05	19,39	0,73	0,08	11,00
C mit 10% FH	692	17,24	2,49	3353	154	4,60	28,0	2,6	9,33	0,28	0,03	11,42	0,92	0,14	14,82
C mit 25% FH	699	24,83	3,55	3450	296	8,59	30,4	4,5	14,94	0,31	0,02	7,46	1,00	0,16	16,43
C mit 50% FH	695	10,65	1,53	3505	143	4,09	30,7	1,9	6,29	0,32	0,04	11,64	1,08	0,16	14,35
C mit 75% FH	701	14,10	2,01	3803	173	4,55	35,9	2,7	7,50	0,32	0,03	10,29	1,15	0,18	15,33
D mit 100%AH	707	18,94	2,68	3198	236	7,38	25,9	2,7	10,20	0,31	0,05	15,49	0,71	0,21	29,34
D mit 10% FH	702	18,33	2,61	3195	177	5,53	25,6	1,6	6,38	0,24	0,03	10,93	0,90	0,13	14,25
D mit 25% FH	703	24,52	3,49	3216	205	6,38	26,4	1,8	6,77	0,26	0,03	13,39	0,97	0,11	11,38
D mit 50% FH	695	15,32	2,20	3129	250	7,99	26,6	3,0	11,32	0,26	0,04	15,26	0,98	0,11	11,59
D mit 75% FH	696	19,61	2,82	3250	214	6,57	30,5	2,5	8,08	0,27	0,02	6,79	1,10	0,13	11,94
Ref.F*	697	13,50	1,94	3841	244	6,35	36,1	3,3	9,18	0,37	0,05	13,75	1,31	0,19	14,64
Anforderungen nach EN 622-5	-	-	-	≥2200	-	-	≥20	-	-	≥0,55	-	-	-	-	-

* Referenzplatte aus Kiefernfrischholz

¹⁾ S_x = Standardabweichung

²⁾ V = Variationskoeffizient

Die Abbildungen 6.68 und 6.69 zeigen die Biege-E-Modul- und Biegefestigkeitswerte in Abhängigkeit von der Menge des zugegebenen Frischholzes. Bei einer Zugabe von 10% Frischholz ist die Auswirkung, bezogen auf eine ausschließlich aus Altholz hergestellte MDF, weder bei den Biege-E-Modul noch bei den Biegefestigkeitswerten so ausgeprägt, dass von einer Verbesserung gesprochen werden kann.

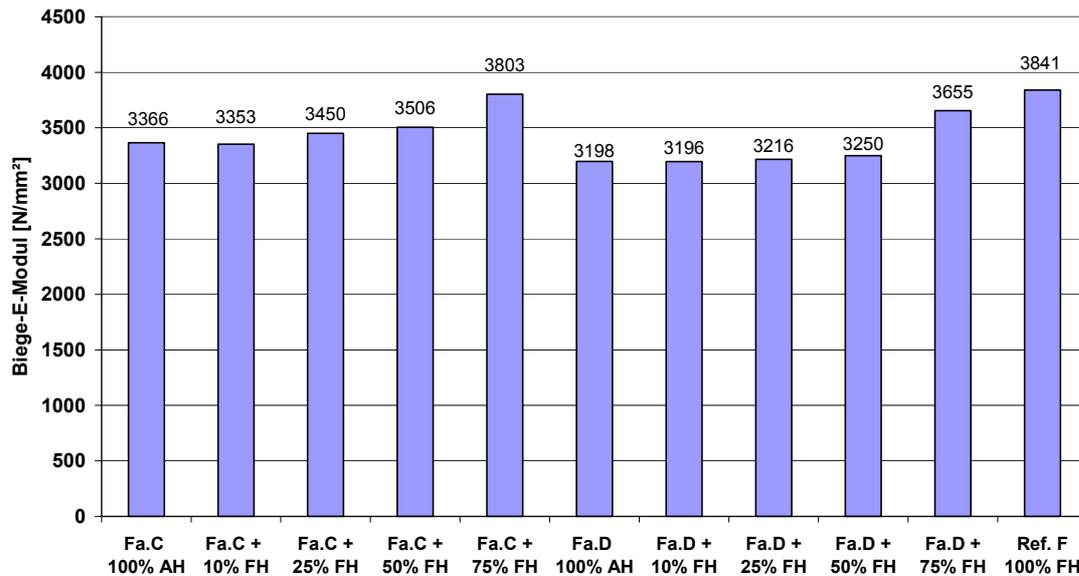


Abb. 6.68: Biege-E-Modul von MDF der Firmen C und D, deren Fasern aus Altholz unter Zugabe von Frischholzanteilen (FH) hergestellt wurden (n = 12)

Auch mit einem Frischholzanteil von 25% und 50% zeigten die Biege-E-Modul-Werte der Platten keine gravierende Verbesserung. Erst bei einer Beimischung von 75% Frischholzanteil zum Altholz konnte bei beiden untersuchten Altholzfraktionen ein Anstieg der Biege-E-Modul-Werte der Labor-MDF-Platten zwischen 8,5% (Fa. C) und 12,5% (Fa. D) ermittelt werden. Bei der Biegefestigkeit hingegen wird noch ein leichter Anstieg zwischen 8,5% (Fa. C) und 2,5% (Fa. D) der Werte bei Zugabe von 25% Frischholz erreicht. Dieser Anstieg der Festigkeit setzt sich aber bei Zugabe bis 75% Frischholz nicht fort. Eine Qualitätsverbesserung wird erst dann wieder bei einer Zugabe mit 75% Frischholz erreicht. Diese Tendenz der Biegefestigkeitserhöhung konnte jeweils bei beiden untersuchten Altholzfraktionen ermittelt und durch Arbeiten von CONG und KÜHNE (1995) bestätigt werden.

Beim Einsatz von Altholzmaterial der Firmen C und D treten hinsichtlich der Hackspänegröße Unterschiede zu den Frischholzspänen auf. Diese Unterschiede sind besonders durch den hohen Staubanteil bedingt und wirken sich auf die Eigenschaften der aus den Fasern hergestellten MDF aus. Um den Einfluss dieser Parameter statistisch absichern zu können, müsste die Anzahl der herzustellenden Platten erhöht werden. Dies wurde im Rahmen der Untersuchungen jedoch nicht durchgeführt.

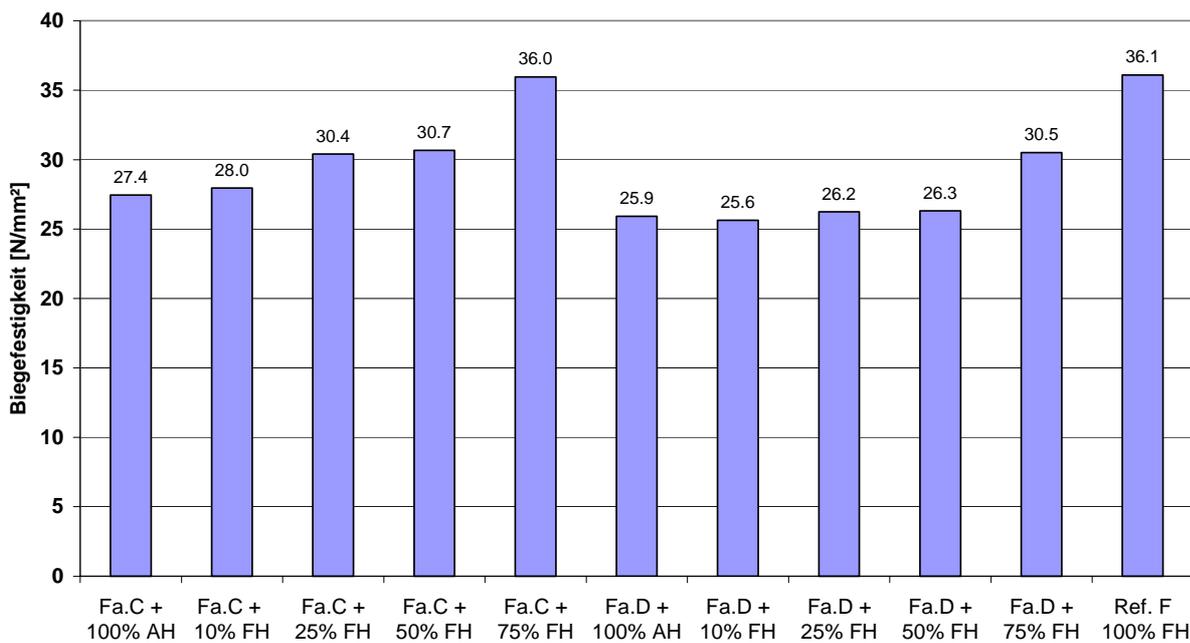


Abb. 6.69: Biegefestigkeiten von MDF der Firmen C und D, deren Fasern aus Altholz unter Zugabe von Frischholzanteilen (FH) hergestellt wurden (n = 12)

Die Querkzugfestigkeit und die Abhebefestigkeit zeigten ein ähnliches Bild. MDF mit einem Anteil von 25% Altholz zeigten, dass die Qualität dieser Platten der aus Frischholz (Ref. F) hergestellten MDF entsprach.

In der Spanplattenindustrie wird dem Fertigungsprozess oftmals für den Mittelschichtbereich der Platte Altholz in Mengen von ca. 15 bis 25% zugegeben. Hierbei stehen wirtschaftliche Überlegungen im Vordergrund. Die vorliegenden Untersuchungsergebnisse zeigen, dass durch Zugabe von 25% gut vorsortiertem und gereinigtem Altholz zum Frischholz technologische Platteneigenschaften erreicht werden, die einer Frischholzplatte gleich kommen.

6.7.4 Zusammenfassung

- Erst bei einer Beimischung von 75% Frischholzanteil zum Altholz konnte bei beiden untersuchten Altholzfraktionen ein Anstieg der mechanisch-technologischen Eigenschaften der Laborfaserplatten ermittelt werden.
- Die vorliegenden Untersuchungen zeigen, dass MDF aus sauberem Altholzmaterial verbesserte Eigenschaftswerte aufweisen als diejenigen Platten, die mit stark verunreinigtem Material hergestellt wurden.
- In der Spanplattenindustrie wird dem Fertigungsprozess oftmals Altholz in Mengen von 15 bis 25% zugegeben. Dies könnte anhand der ermittelten Ergebnisse auch von der MDF-Industrie umgesetzt werden. Voraussetzung ist jedoch Altholz von sauberer und guter Qualität.

6.8 Chemische Vorbehandlung von Alt- und Frischholzhackspänen für die MDF-Herstellung

6.8.1 Zielsetzung

Zusätzlich zu den thermo-mechanischen Zerfaserungsprozessen, die in den vorangegangenen Abschnitten dargestellt wurden, sollte in dieser Untersuchungsreihe ein chemo-thermo-mechanischer Aufschluss durchgeführt werden. Hierfür wurden Altholzhackspäne (Firma E) und Frischholzhackspäne mit 5%iger Natriumsulfitlösung (Na_2SO_3) im Flottenverhältnis 1:2 versetzt. Die Dampfbehandlung erfolgte bei 3 Minuten und 180°C . Für eine Vergleichbarkeit der hier ermittelten Ergebnisse mit den übrigen Untersuchungsabschnitten dieser Arbeit wurde weder die Leimmenge, noch die Rohdichte optimiert. Auch alle sonstigen Herstellungsparameter blieben unverändert.

6.8.2 Untersuchungsprogramm

Für den Holzaufschluss ist die selektive Entfernung der störenden Bestandteile aus dem Holzverband zur Gewinnung hochwertigen Fasermaterials von großer Bedeutung. Die Hauptkomponente des zu entfernenden Anteils ist das Lignin, das in seiner nativen Form nicht wasserlöslich ist. Der Sulfitaufschluss ist unter Einhaltung spezieller Bedingungen geeignet, Lignin so zu funktionalisieren, dass es hydrolysierbar und wasserlöslich wird. Die wichtigsten Reaktionen beim Sulfitverfahren sind die Sulfonierung und die Kondensation des Lignins. Bei der Sulfonierung werden an den Seitenketten der Phenylpropan-Einheiten befindliche Sulfonat-Gruppen (SO_3H -Gruppen) angelegt, die dem Lignin hydrophile Eigenschaften verleihen und es wasserlöslich machen. Neben den genannten Sulfitierungs- und Abbaureaktionen können bei niedrigem pH-Wert ($\text{pH} < 4$) auch Kondensationsreaktionen auftreten. Liegen im Holz größere Mengen (ca. 0,5%) an phenolischen Inhaltsstoffen mit reaktionsfähigen Stellen vor, so erfolgt im Bereich niedriger pH-Werte auch eine Kondensation mit diesen reaktionsfähigen Phenolen, wodurch die α -Stellen des Ligninmoleküls der Sulfonierung entzogen werden und das Lignin nicht mehr in lösliche Produkte überführt wird.

Das kondensierte Lignin unterscheidet sich chemisch erheblich von dem ursprünglichen Lignin. Dies ist vor allem darauf zurückzuführen, dass im Rückstand auch Kondensationsprodukte phenolischer Inhaltsstoffe (Gerbstoffe) sowie Abbauprodukte der Kohlenhydrate (Furfural) enthalten sind.

Aus dem Schrifttum ist bekannt, dass thermische sowie chemische Vorbehandlungen der Hackspäne bei der Herstellung von Halbzellstoff und Zellstoff durch den thermomechanischen Prozess (TMP) und den chemo-thermomechanischen Prozess (CTMP) qualitätsverbessernde Wirkungen besitzen (DIX et al., 1998; SCHNEIDER, 2000).

6.8.3 Technologische Eigenschaften von Platten aus chemisch vorbehandelten Hackspänen

Die Tabelle 6.34 zeigt die technologischen Eigenschaften der Faserplatten, hergestellt aus Alt- und Frischholzhackspänen, welche mit und ohne chemischer Vorbehandlung mit Na_2SO_3 verarbeitet wurden. Die Mittelwerte ergeben sich aus der Prüfung entsprechender Prüfkörperanzahl von zwei Laborfaserplatten (Anhang 9.6: Tab. 1 bis 5).

Werden die Eigenschaften der hergestellten MDF untereinander verglichen, so wird deutlich, dass die MDF, die aus chemisch vorbehandelten Hackspänen hergestellt wurden, höhere Festigkeiten aufweisen. Bei MDF aus Frischholzhackspänen, die vor dem Zerfaserungsprozess mit Na_2SO_3 vorbehandelt wurden, verbesserte sich der Biege-E-Modul um 6,5% und die Biegefestigkeit um 8,9%. Eine deutlichere Verbesserung der technologischen Eigenschaften konnte bei der Verarbeitung von chemisch vorbehandelten Altholzhackspänen erreicht werden. So verbesserte sich der Biege-E-Modul der Altholz-MDF um 15,6% und die Biegefestigkeit sogar um 20,8%. Damit wurden die Anforderungen der DIN EN 622-5 erfüllt. Auffallend sind bei beiden Vorbehandlungen der Hackspäne die auf gleichem Niveau liegenden Querkzugfestigkeiten der MDF. Der von der DIN EN 622-5 geforderte Mindestwert von $0,55 \text{ N/mm}^2$ für die Querkzugfestigkeit konnte weder von den Altholz-MDF noch von den Frischholz-MDF erreicht werden.

Tab. 6.34: Mittelwerte (Biege-E-Modul und Biegefestigkeiten n = 12; Rohdichte n = 10; Querzug- und Abhebefestigkeiten n = 20) von 16 mm dicken Alt- und Frischholzfaserplatten, deren Fasern bei 3 min/180°C aus nicht chemisch und chemisch vorbehandelten Hackspänen hergestellt wurden

	Rohdichte	$S_x^{1)}$	$V^{2)}$	Biege-E-Modul	$S_x^{1)}$	$V^{2)}$	Biegefestigkeit	$S_x^{1)}$	$V^{2)}$	Querzugfestigkeit	$S_x^{1)}$	$V^{2)}$	Abhebefestigkeit	$S_x^{1)}$	$V^{2)}$
Firma	\bar{x} kg/m ³	\bar{x} kg/m ³	(%)	\bar{x} N/mm ²	\bar{x} N/mm ²	(%)	\bar{x} N/mm ²	\bar{x} N/mm ²	(%)	\bar{x} N/mm ²	\bar{x} N/mm ²	(%)	\bar{x} N/mm ²	\bar{x} N/mm ²	(%)
AH ³⁾ ohne chem. Vorbehandlung	691	17,55	2,54	3413	178	5,21	26,8	2,1	7,88	0,26	0,02	7,76	0,94	0,09	9,42
AH ³⁾ mit chem. Vorbehandlung	706	21,16	3,00	4042	268	6,62	33,8	4,9	14,42	0,30	0,05	14,92	1,19	0,17	14,65
FH ⁴⁾ ohne chem. Vorbehandlung	701	12,27	1,75	3433	195	5,69	28,4	2,1	7,33	0,26	0,03	11,20	0,98	0,16	16,47
FH ⁴⁾ mit chem. Vorbehandlung	700	14,70	2,10	3677	259	7,04	31,1	4,3	13,71	0,31	0,03	9,40	1,31	0,13	9,64
Anforderungen nach EN 622-5	-	-	-	≥2200	-	-	≥20	-	-	≥0,55	-	-	-	-	-

¹⁾ S_x = Standardabweichung

²⁾ V = Variationskoeffizient

³⁾ AH = Altholzmaterial der Firma E

⁴⁾ FH = Frischholzmaterial (Kiefer)

Der pH-Wert von Holz ist für die Verleimbarkeit der Späne mit säurehärtenden Harnstoff-Formaldehydharzen von großer Bedeutung. Der pH-Wert nimmt Einfluss auf die Aushärtung des Bindemittels. Literaturangaben entsprechend (KEHR, 1977; ROFFAEL, 1994a und 1994b) führen steigende Dämpftemperaturen zu einer Verringerung des pH-Wertes sowie zu einem Anstieg der Pufferkapazität des Faserstoffes und dadurch zu einer Herabsetzung der Querkzugfestigkeit der UF-gebundenen MDF (vergl. Abschnitt 6.4.3). Untersuchungen von SCHNEIDER (2000) über die Veränderung der Aufschlussbedingungen zeigten eine leichte Abnahme der pH-Werte mit steigender Dämpftemperatur. Verbessern ließe sich die Querkzugfestigkeit z.B. durch einen höheren Anteil an Bindemitteln und durch eine höhere Plattenrohichte.

Die Werte für die Abhebefestigkeit lassen den Rückschluss zu, dass sich diese MDF hervorragend für die Beschichtung einsetzen lassen. Neben den im Unterabschnitt 6.8.5 beschriebenen Dickenquellungen und den guten Abhebefestigkeiten ließe sich die MDF, hergestellt aus Altholz, ohne Bedenken im Laminatfußbodenbereich einsetzen. Dieses Marktsegment, welches unter einem starken Wettbewerbsdruck steht, hat einen Marktanteil von über 50% an der MDF-Gesamtproduktion. Hergestellte Produkte aus Altholz mit technologischen Eigenschaften, die mit denen der aus Frischholz hergestellten MDF vergleichbar sind, bieten hierfür durchaus eine Alternative.

Bei der Betrachtung der technologischen Eigenschaften sollte berücksichtigt werden, dass das aufbereitete Altholzmaterial aus einer reinen Kiefernaltholzcharge stammte. Würde sich das Altholz aus einer Mischfraktion verschiedener Holzarten zusammensetzen, sind MDF mit niedrigeren technologischen Eigenschaften zu erwarten.

Im Gegensatz zum thermischen Zerfaserungsprozess erfolgt die Trennung der Fasern beim chemischen Aufschluss vorwiegend in der Mittellamelle. Die entstehende intakte Faseroberfläche ist jedoch mit Lignin bedeckt. Durch die Sulfonierung erhöht sich das Eigenbindungsvermögen der Faserstoffe, was zu einer Erhöhung der mechanischen Festigkeiten der MDF beiträgt. Dies wird durch den Heißpressvorgang noch verstärkt (ROFFAEL et al., 1994a, 1995).

Positiv zu werten ist, dass bei einem bestimmten Temperaturbereich von 150°C eine starke Reduzierung des Kraftbedarfes beim Zerfaserungsprozess erfolgt. Durch Zugabe von Na_2SO_3 kann praktisch eine Halbierung des Energiebedarfes erreicht werden (POLLER und KLETZIN, 1990). Damit könnten die zusätzlichen Ausgaben für den Chemikalieneinsatz bei der Herstellung von MDF aus Altholz ein wenig kompensiert werden.

6.8.4 Formaldehydgehalt nach der Perforatormethode

Die MDF, hergestellt aus Alt- und Frischholzhackpänen, die mit und ohne Natriumsulfitlösung vorbehandelt wurden, wiesen die in Tabelle 6.35 aufgeführten Gehalte an Formaldehyd auf.

Tab. 6.35: Durchschnittlicher Formaldehydgehalt von Alt- und Frischholzfaserplatten, deren Hackspäne chemisch und nicht chemisch vorbehandelt wurden

Perforator	AH ¹⁾ ohne chem. Vorbehandlung	AH ¹⁾ mit chem. Vorbehandlung	FH ²⁾ ohne chem. Vorbehandlung	FH ²⁾ mit chem. Vorbehandlung
Feuchte [%]	3,7	4,6	4,6	3,7
A-Wert*	4,7	4,2	5,5	3,9
B-Wert*	6,1	5,3	6,8	5,3

* Perforator A und B-Wert in [mg HCHO/100g atro Späne

* B-Wert auf Bezugsfeuchte von 6,5% umgerechnet

¹⁾ AH = Altholzmaterial der Firma E

²⁾ FH = Frischholzmaterial (Kiefer)

Die Werte lassen erkennen, dass die MDF aus Faserstoffen, die aus chemisch vorbehandelten Hackspänen hergestellt wurden, geringfügig niedrigere Formaldehydgehalte aufweisen als die MDF, die aus nicht vorbehandelten Hackspänen gefertigt wurden. Es kann vermutet werden, dass das Natriumsulfit, mit dem die Hackspäne behandelt wurden, nach dem Aufschluss zumindest teilweise als Natriumbisulfit vorlag und als Formaldehydfänger diente.

6.8.5 Dickenquellung von Laborfaserplatten aus chemisch vorbehandelten Spänen

Die Dickenquellungswerte der UF-Harz-gebundenen mitteldichten Faserplatten, die aus Hackspänen ohne und mit einer chemischen Vorbehandlung mit Na₂SO₃ hergestellt wurden, sind in Abbildung 6.70 aufgeführt.

Bei der 2 h Dickenquellung unterscheiden sich die Dickenquellungswerte zwischen dem Alt- und Frischholz ohne und mit einer chemischen Vorbehandlung nur geringfügig. Dagegen konnten nach der 24 h Dickenquellung Unterschiede zwischen den MDF aus vorbehandeltem und unbehandeltem Material ermittelt werden. Die Dickenquellungswerte (24 h) waren bei

MDF aus chemisch vorbehandelten Hackspänen deutlich geringer als bei MDF, hergestellt aus unbehandelten Hackspänen.

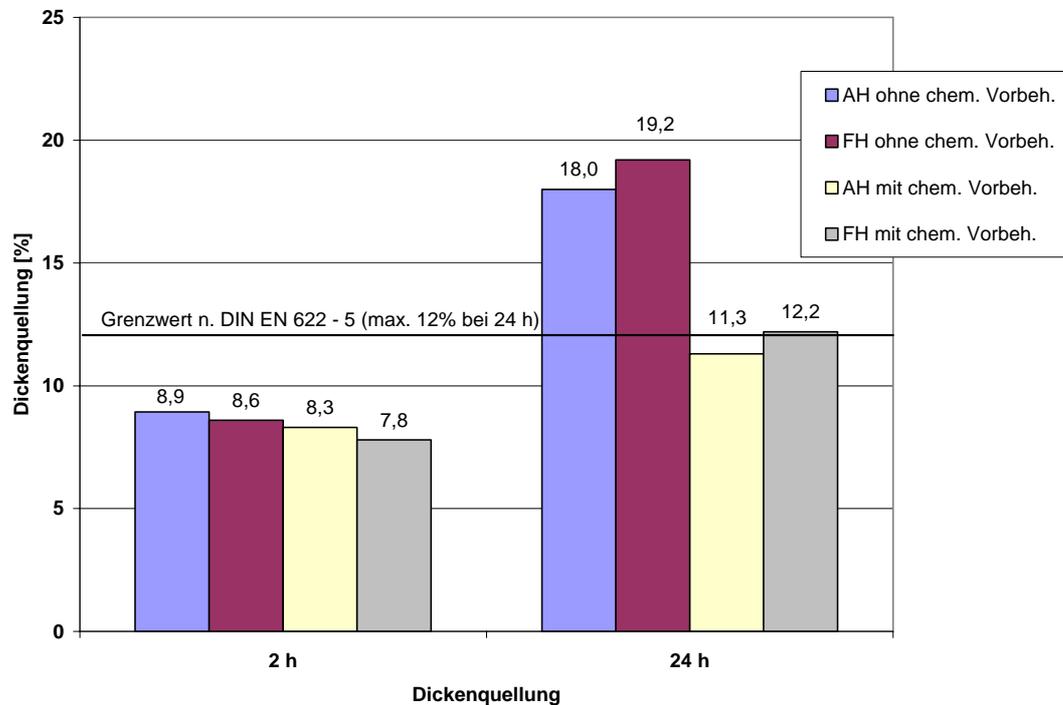


Abb. 6.70: Dickenquellung von Alt- und Frischholzfaserplatten, die ohne und mit chemischer Vorbehandlung der Hackspäne hergestellt wurden

Durch die Vorbehandlung der Hackspäne mit Na_2SO_3 sollte eine verbesserte und vor allem schonendere Zerfaserung der Alt- und Frischholzhackspäne erreicht werden. Die Fasern blieben in ihrer Form weitgehend bestehen und konnten mit Hilfe des Bindemittels eine bessere Faser-zu-Faser-Bindung eingehen. Diese wirkt sich günstig auf die Quellungseigenschaften aus.

Entgegen der Untersuchungen von SCHNEIDER (2000), haben sich die Quellungseigenschaften von MDF aus chemisch vorbehandelten Hackspänen bei diesen Versuchen nicht sehr deutlich von denen aus nicht vorbehandelten Hackspänen unterschieden. Die von SCHNEIDER hergestellten Labor-MDF hatten eine Soll-Rohdichte von 800 kg/m^3 . Die Unterschiede können in den unterschiedlichen Rohdichten der Platten und in den abweichenden Aufschlussbedingungen begründet sein. Auch DIX et al. (1998) konnten bei einem CTMP-Aufschluss mit 1% Na_2SO_3 / 0,5% NaOH, bezogen auf atro Holz, mit einer Aufschlusstemperatur von 180°C , wesentlich geringere Dickenquellungen an Labor-MDF mit einer Soll-Rohdichte von 800 kg/m^3 ermitteln.

Insgesamt aber lässt sich feststellen, dass durch ein Tränken der Hackspäne mit Natriumsulfit die Dickenquellung gegenüber unbehandelten Hackspänen deutlich abnimmt. Die Anforderungen an MDF nach DIN EN 622-5 bezüglich der 24-stündigen Dickenquellung wurde von den MDF aus chemisch vorbehandelten Altholzhackspänen erfüllt und von den MDF aus Frischholzhackspänen nicht.

Bei der Beurteilung der Ergebnisse sollte beachtet werden, dass alle Platten ohne Zusatz von Hydrophobierungsmitteln und nur mit 12% Festharz auf atro Fasern beleimt wurden.

6.8.6 Zusammenfassung

- Bei MDF aus Frischholzhackspänen, die vor dem Zerfaserungsprozess mit Na_2SO_3 vorbehandelt wurden, verbesserte sich der Biege-E-Modul um 6,5% und die Biegefestigkeit um 8,9%.
- Bei MDF aus Altholzhackspänen verbesserte sich der Biege-E-Modul sogar um ca. 16% und die Biegefestigkeit um ca. 21%.
- Die Werte der Abhebefestigkeiten lassen den Rückschluss zu, dass sich diese MDF hervorragend für die Beschichtung einsetzen lassen.
- Durch eine chemische Vorbehandlung der Altholzhackspäne würden die Produktionskosten leicht ansteigen. Dies könnte durch einen z.Z. noch günstigen Altholzpreis kompensiert werden.

6.9 Bindemittelinfluss auf die technologischen Eigenschaften von MDF aus Alt- und Frischholz

6.9.1 Zielsetzung

In einer abschließenden Untersuchung wurde das Altholzmaterial mit unterschiedlichen Bindemitteln versetzt, um eventuelle Unterschiede aufzuzeigen. Hierfür wurden UF, MF und PF als Bindemittel eingesetzt. Einem Teil dieser MDF wurde Paraffin als Hydrophobierungsmittel beigegeben. Das hergestellte Fasermaterial wurde unter den gleichen Bedingungen wie im vorangegangenen Untersuchungsabschnitt (Abschnitt 6.8) gewonnen.

6.9.2 Untersuchungsprogramm

Für die Holzwerkstoffhersteller stehen mit den Amino-Phenoplastharzen sowie mit dem Polyurethanklebstoff PMDI seit vielen Jahren neben UF weitere Bindemittel zur Verfügung, die alle wesentlichen Anforderungsbereiche abdecken und mit denen Bindefestigkeiten mit hoher Feuchtebeständigkeit erreicht werden. Die eingesetzten Bindemittel und die Plattenparameter sind in nachfolgender Tabelle 6.36 zusammengestellt:

Tab. 6.36: Herstellungsparameter von Alt- und Frischholzfaserplatten, die mit unterschiedlichen Bindemitteln hergestellt wurden

Plattengröße:	520 x 520 mm ²
Plattendicke (roh): (geschliffen):	17 mm 16 mm
Plattentyp:	MDF
Rohdichte (Soll):	700 kg/m ³
Streuung:	Handstreuung
Bindemittel:	UF, BASF Kaurit [®] 407 flüssig MUPF, BASF K 415 Phenol, Bakelite 1279 HW
Beleimung:	12% auf atro Fasern (Blow-Line)
Hydrophobierungsmittel:	1% auf atro Fasern (Mobilcer)
Presszeitfaktor:	15 s/mm
Pressentemperatur:	200°C

6.9.3 Technologische Platteneigenschaften

Die technischen Eigenschaftswerte der Faserplatten, die mit unterschiedlichen Bindemitteln hergestellt wurden, sind in der Tabelle 6.37 zusammengefasst. Was die Querkzugfestigkeit anbelangt, wurde aus Vergleichsgründen nur die Trockenquerkzugfestigkeit ermittelt.

An Platten für allgemeine Zwecke zur Verwendung im Trockenbereich sind nach EN 622-5 für die Biegefestigkeiten 20 N/mm² und für den Biege-E-Modul 2200 N/mm² als Mindestanforderungen festgelegt. Diese Werte konnten von allen unterschiedlich gebundenen Faserplatten erreicht werden. Die geforderten Querkzugfestigkeiten wurden allerdings weder von den Altholz-, noch von den Frischholzfaserplatten erreicht, was an der geringen Rohdichte der hergestellten MDF liegen könnte. Während für die Phenolharz-gebundenen Frischholzfaserplatten Querkzugfestigkeiten von deutlich über 0,30 N/mm² ermittelt wurden, lagen sie bei den hergestellten Altholzfaserplatten bei annähernd 0,30 N/mm². Die ermittelten Abhebefestigungen lagen bis auf wenige Ausnahmen bei allen MDF über 1 N/mm².

Die Ergebnisse der ohne Paraffin hergestellten Alt- und Frischholz-MDF der Tabelle 6.38 unterscheiden sich kaum von den Platteneigenschaften, welche an MDF mit Paraffin als Hydrophobierungsmittel ermittelt wurden. Sie sind im Anhang 9.7 (Tab. 1 bis 10) aufgeführt.

Tab. 6.37: Technologische Eigenschaften von 16 mm dicken Alt- und Frischholzfaserplatten, die mit unterschiedlichen Bindemitteln ohne Hydrophobierungsmittel hergestellt wurden (Biege-E-Modul und Biegefestigkeiten n = 12; Rohdichte n = 10; Querzug- und Abhebefestigkeiten n = 20)

	Rohdichte	$S_x^{1)}$	$V^{2)}$	Biege-E-Modul	$S_x^{1)}$	$V^{2)}$	Biegefestigkeit	$S_x^{1)}$	$V^{2)}$	Querzugfestigkeit	$S_x^{1)}$	$V^{2)}$	Abhebefestigkeit	$S_x^{1)}$	$V^{2)}$
Firma	\bar{x} kg/m ³	\bar{x} kg/m ³	(%)	\bar{x} N/mm ²	\bar{x} N/mm ²	(%)									
AH ³⁾ UF	701	20,06	2,86	3473	268	7,72	29,9	4,3	14,28	0,29	0,03	9,90	1,14	0,19	16,27
AH ³⁾ MF	678	14,32	2,11	3275	234	7,16	25,8	3,5	13,62	0,24	0,03	10,74	0,95	0,12	12,69
AH ³⁾ PF	695	14,04	2,02	3082	175	5,68	33,7	4,9	14,62	0,43	0,04	8,37	1,34	0,29	21,73
FH ⁴⁾ UF	701	22,78	3,25	2882	647	22,44	22,9	8,0	35,03	0,28	0,04	14,24	1,20	0,16	13,61
FH ⁴⁾ MF	706	19,14	2,71	3479	168	4,82	28,0	3,1	11,18	0,25	0,03	11,33	1,01	0,10	9,53
FH ⁴⁾ PF	710	34,06	4,80	3072	270	8,78	38,7	6,0	15,60	0,38	0,12	31,64	0,97	0,55	56,52
Anforderungen nach EN 622-5	-	-	-	≥2200	-	-	≥20	-	-	≥0,55	-	-	-	-	-

¹⁾ S_x = Standardabweichung

²⁾ V = Variationskoeffizient

³⁾ AH = Altholzmaterial der Firma E

⁴⁾ FH = Frischholzmaterial (Kiefer)

6.9.4 Dickenquellung von Platten, die mit unterschiedlichen Bindemitteln hergestellt wurden

Inwieweit sich eine Dickenquellung durch unterschiedliche Bindemittel und durch Zugabe von Paraffin auf Faserplatten aus Alt- und Frischholz auswirken, ist in den Abbildungen 6.71 und 6.72 dargestellt.

Es war zu erwarten, dass sich die 24 h Dickenquellung durch Zugabe von Hydrophobierungsmitteln deutlich reduziert. Dieser Trend ist bei UF- und Melaminharz-gebundenen Alt- und Frischholzfaserplatten zu erkennen. Die Phenolharz-gebundenen MDF aus Altholz hackspänen bildeten hier eine Ausnahme. Ohne Hydrophobierungsmittel überschritt die Altholz-MDF nur leicht die maximale Dickenquellung (24 h) nach DIN EN 622-5 von 12%. Entgegen den Erwartungen stieg die Dickenquellung durch die Zugabe von Paraffin auf 18,5% an. Möglicherweise war dies ein Verteilungsproblem dieser geringen Menge an Hydrophobierungsmittel. Dies konnte im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter untersucht werden.

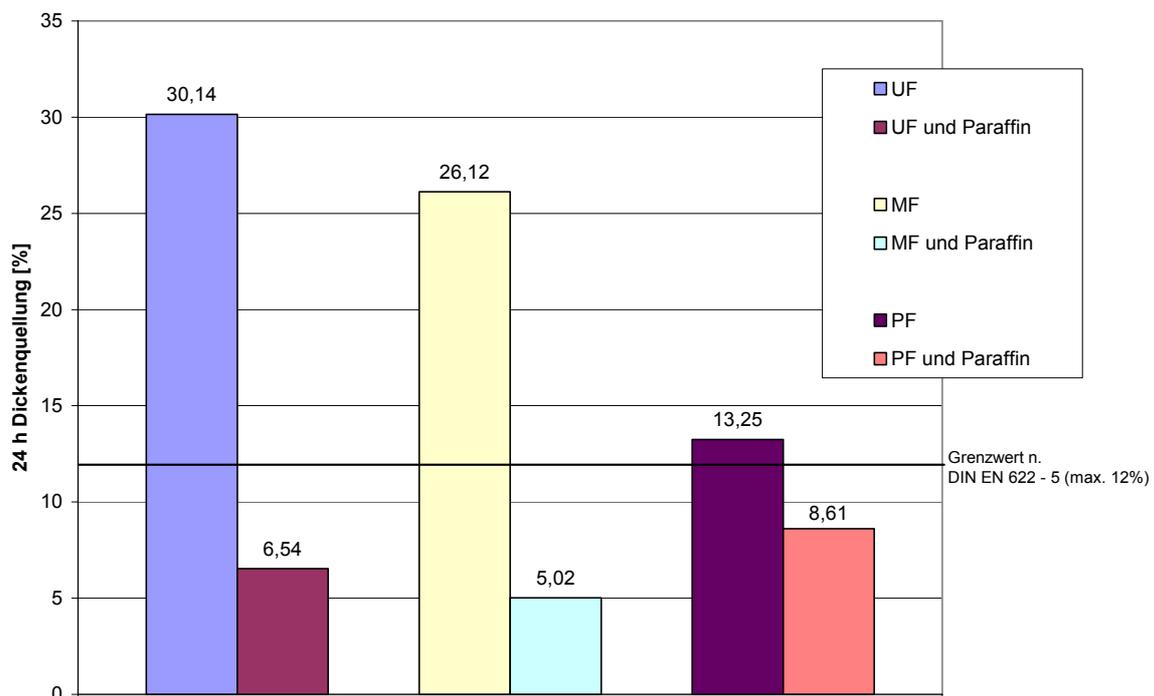


Abb. 6.71: Dickenquellung von Altholzfaserplatten, die mit unterschiedlichen Bindemitteln hergestellt wurden

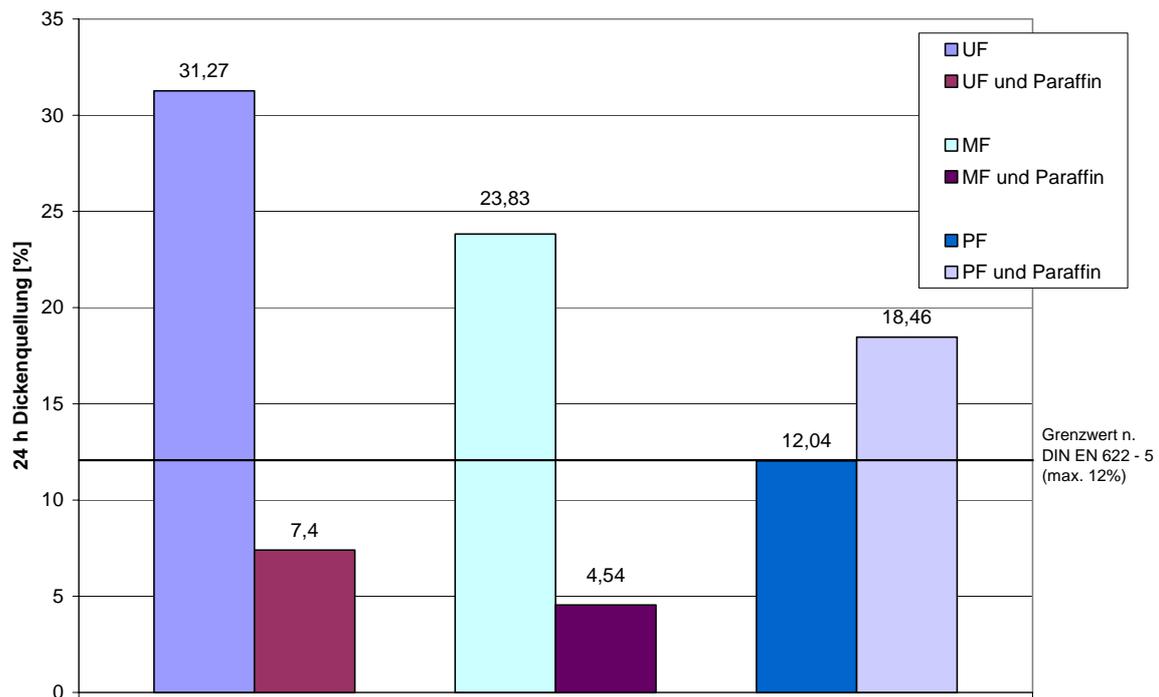


Abb. 6.72: Dickenquellung von Frischholzfaserplatten, die mit unterschiedlichen Bindemitteln hergestellt wurden

Bei allen übrigen MDF wurde durch Zugabe von Paraffin die Anforderung der DIN EN 622-5 von maximal 12% Dickenquellung erfüllt. Bei den mit Phenolharz-gebundenen Frischholzfaserplatten konnte diese Anforderung ohne Paraffinzugabe teilweise erfüllt werden.

6.9.5 Zusammenfassung

- Das Fasermaterial, welches aus chemisch vorbehandelten Hackspänen gewonnen wurde, wurde mit unterschiedlichen Bindemitteln (UF, MF und PF) zu MDF verarbeitet. Die Platten erfüllten die für allgemeine Zwecke zur Verwendung im Trockenbereich nach DIN EN 622 – 5 festgelegten Mindestanforderungen.
- Bei den mit Paraffin versetzten Laborfaserplatten reduzierte sich erwartungsgemäß die 24 h Dickenquellung, so dass auch hier die Anforderungen gemäß Norm eingehalten werden konnten.
- Aus Sicht der Praxis werden MF- und PF-gebundene MDF nur für spezielle Anwendungsbereiche hergestellt. Dieser Marktanteil ist jedoch sehr gering. Hauptsächlich wird die UF-gebundene MDF im Möbelbereich eingesetzt.

7 Zusammenfassung

Produkte aus Holz und Holzwerkstoffen unterliegen einem immer kürzer werdenden Lebenszyklus. Altholz und holzhaltige Alt- und Reststoffe fallen nach dem Gebrauch in großen Mengen an und müssen entsorgt werden. Typische Holzabfallsortimente sind z.B. Holzabfälle aus der Holzbe- und -verarbeitung, Verpackungshölzer, Baustellenhölzer (Bauholz und Abbruchholz) und Hölzer aus dem Außenbereich. Die rund 8 Mio. t Altholz p. a., die in Deutschland anfallen, können aufgrund der am 01. März 2003 in Kraft gesetzten Altholzverordnung, die erstmalig die Verwertung vor die Beseitigung von Holzabfällen stellt, genutzt werden (MARUTZKY, 1997). Die Holzwerkstoff-, Papier- und Zellstoffindustrie ist beim Rohholzbedarf vorwiegend auf Sortimente angewiesen, die auch in die energetische Nutzung einbezogen werden. Dieses Potential muss von der Industrie für die stoffliche Verwertung genutzt werden.

Angeregt durch den sich abzeichnenden knapperen Rohholzmarkt für die MDF-Industrie wurde in dieser Arbeit untersucht, ob sich aus Alt- und Frischholz hergestellte Fasern zur MDF-Herstellung eignen. Das Ziel war die Durchführung systematischer Untersuchungen zum Einfluss von Aufschlussbedingungen beim Zerkleinerungsprozess einschließlich unterschiedlicher Vorbehandlungen und der Charakterisierung der hergestellten Faserstoffe sowie Untersuchungen der physikalisch-technologischen und chemischen Eigenschaften, der aus diesen Fasern hergestellten mitteldichten Faserplatten (MDF). Hierfür wurden von fünf unterschiedlichen Altholzverwertern in Deutschland handelsübliche Altholzsortimente verwendet.

Vor Untersuchungsbeginn wurden die Altholzsortimente hinsichtlich ihrer Störstoff- und Sandanteile überprüft. Hier war zu erkennen, dass die in der Industrie üblichen Werte an Sandanteilen von einer stark verunreinigten Altholzcharge (Firma D) deutlich überschritten wurden. Zugleich wies diese Altholzcharge den höchsten Störstoffanteil von 3,5 Gew.-% auf. Bei Altholzsortimenten, die sich hauptsächlich aus Paletten- und Verpackungshölzern zusammensetzten (Firma A, C und E), fielen diese Anteile wesentlich niedriger aus.

Die Holzschutzmittelbelastung des Altholzmaterials zeigte bei allen ermittelten Parametern eine gewisse Schwankungsbreite innerhalb des Untersuchungsmaterials. Lediglich das stark mit Störstoffen behaftete Material der Firma D wies für Blei und Chrom leicht erhöhte Analysewerte auf, während die übrigen Altholzsortimente die Grenzwerte der Altholzverordnung einhielten.

Zur Charakterisierung des Faserstoffes wurden aus Kiefernalt- und Kiefernfrischholz unter Industriebedingungen unbeleimte Fasern hergestellt.

Der gewonnene Faserstoff sollte durch folgende Untersuchungen charakterisiert werden:

- Faserlängenverteilung mit dem Bauer McNett-Verfahren,
- Faserlängenverteilung mittels Trockensiebung,
- Faserlängenmessung mit Hilfe der Mikroskop-Bildverarbeitung,
- Ermittlung der Defibratorwerte,
- lichtmikroskopische Untersuchungen,
- chemische Analysen.

Ein Teil der für die Untersuchungen hergestellten Hackspäne aus Alt- und Frischholz wurde 24 Stunden in Wasser eingelagert, bevor sie dem weiteren Verarbeitungsprozess zugeführt wurden. In der Laborrefineranlage des WKI wurde das Fasermaterial durch Dämpfung der Hackspäne bei 3 min/150°C hergestellt. Die Faserlängenverteilung beider Aufschlussvarianten, d.h. mit und ohne Wasserlagerung, wurde mit dem Bauer McNett-Verfahren bestimmt.

Die Ergebnisse verdeutlichen, dass die im Wasser gelagerten Hackspäne wesentlich längere Fasern erzeugen können als Hackspäne, die diese Vorbehandlung nicht erfuhren. Durch die Wasserlagerung konnte der Langfaseranteil des Frischholzes, der nicht das R16 Sieb (grob) passierte, um 49% verbessert werden. Dem gegenüber ergab Altholz mit Wasserlagerung einen um 35% höheren Langfaseranteil. Charakteristisch für das Analyseergebnis nicht im Wasser gelagerter Faserstoffe war der wesentlich höhere Feinanteil. Die sich hieraus ableitende vorteilhafte Wasserlagerung der Hackspäne könnte mit der Investition eines Wasserbehälters zur Vorbehandlung der Hackspäne relativ einfach industriell umgesetzt werden.

Bekanntlich beeinflusst die Dämpfbehandlung beim Zerfaserungsprozess die Faserstoffqualitäten wesentlich. Bei höheren Dämpftemperaturen werden die Fasern durch die Ligninkondensation leichter gelöst und der Splitteranteil verringert sich. Um eine deutliche Veränderung der Aufschlussbedingung zu erreichen, wurden nicht wassergelagerte Alt- und Frischholzhackspäne mit einer Dämpfbehandlung von 3 min/150°C und 3 min/180°C aufgeschlossen. Dabei wurden durch die intensiveren Dämpftemperaturen deutlich höhere Faserlangstoffe bei Alt- und Frischholz ermittelt. Das Altholz liegt bei der Maschenweite R16 (grob) mit fast 25 Massenprozenten noch unterhalb der Massenanteile von Frischholz (ca. 30%), aber deutlich über den Massen-

teilen, die bei 150°C Dämpftemperatur erzielt wurden. Im mittleren Faserlängenbereich besitzen die Altholzfasern in etwa den gleichen Massenanteil wie die Frischholzfasern.

Unter der Voraussetzung, dass eine saubere, homogene Altholzcharge zur Verfügung steht, können unter diesen Bedingungen Alt- und Frischholzhackspäne zusammen aufgeschlossen werden, ohne Qualitätsunterschiede befürchten zu müssen. Bei ausreichender Altholzversorgung könnte auch ausschließlich Altholz entsprechender Qualitäten aufgeschlossen werden.

Angaben über Faserlängen von unterschiedlichen Holzarten sind aus der Literatur hinreichend bekannt, wobei sie für Althölzer gegenwärtig noch fehlen. Mit einer Mikroskop-Bildverarbeitung wurde von digital erstellten Bildern die Länge und Breite der Alt- und Frischholzfasern vermessen. Ziel dieses Untersuchungsabschnittes war, einen Überblick über die Verteilung der Faserlänge $> 400 \mu\text{m}$ zu erhalten. Eine tendenzielle Übereinstimmung mit der Faserlängenverteilung, gemessen mit dem Bauer McNett-Verfahren und der PC-Messung konnte bestätigt werden. Die deutlichsten Unterschiede bezüglich der Dimensionen waren an Fasern aus Alt- und Frischholzhackspänen zu erkennen, die bei 150°C und 180°C bei 3-minütiger Dämpfzeit gewonnen wurden. Mit der Bildanalyse wurde belegt, dass die Aufschlusstemperatur ursächlich für eine Verschiebung der Häufigkeitsverteilung von kürzeren zu längeren Fasern ist.

Zur Charakterisierung des Alt- und Frischholzmaterials wurden die Hackspäne und Fasern lichtmikroskopisch auf Schädigungen begutachtet, die durch äußere Einwirkungen während der Gebrauchs- und Aufbereitungsphase entstanden. Dabei konnten bei beiden Holzsortimenten Stauchungen und Quetschungen an den Holzfasern erkannt werden, die durch die Krafteinwirkung der Hackmesser hervorgerufen wurden. Untersuchungen an den Altholzpräparaten zeigten, dass 3% der Hackspäne von Pilzen und vor allem von Bläuepilzen befallen waren. Durch den Zerfaserungsprozess werden diese nicht zerstört, sondern verbleiben in den Fasern und gelangen so später in die Platte.

Andere Verunreinigungen wie Thermoplaste, die sich bei höheren Temperaturen zersetzen, konnten erwartungsgemäß nicht mikroskopisch erfasst werden. Sonstige Störstoffpartikel wurden am Fasermaterial nicht ausgemacht.

Die Verhornungsneigung der Faserstoffe wurde über das Wasserrückhaltevermögen (WRV-Wert) bestimmt. Durch die Trocknung sinkt das Quellungsvermögen, während die Irreversibilität des Quellungsverlustes mit zunehmendem Trockengehalt anstieg. Die Strukturänderung der Faserwand führt zu einem irreversiblen Schließen der Mikroporen bei gleichzeitigem Absinken des mittleren Porendurchschnittes und des Gesamtvolumens. Die Untersuchungen zeigten, dass die Verhornungsneigung in erster Linie von der Qualität der Altholzhackspäne geprägt wird. Die ermittelten Resultate des WRV-Wertes lassen bei Betrachtung der Materialien der Firmen A (sauberes Altholz) bis D (stark verunreinigtes Altholz) den Rückschluss zu, dass mit einer hochwertigen Altholzqualität ein Faserstoff erzeugt werden kann, bei dem der WRV-Wert dem von Frischholz entspricht.

Das unter variierenden Aufschlussbedingungen gewonnene Fasermaterial, welches zur Charakterisierung diente, wurde anschließend beleimt und zu MDF verarbeitet. Hierdurch sollten Rückschlüsse aus der Faserlängenverteilung des Faserstoffes auf die spätere Plattenqualität gezogen werden. Die Ergebnisse zeigten, dass durch eine höhere Dämpftemperatur (3 min/180°C) eine Verbesserung der mechanisch-technologischen Eigenschaften wie Biege-E-Modul, Biegefestigkeit und Querzugfestigkeit gegenüber den mit geringeren Dämpftemperaturen (3 min/150°C) hergestellten Platten erreicht werden. Anhand der Faserlängenverteilung der Faserstoffe, ermittelt mit dem Bauer-McNett-Verfahren, kann mit diesen ersten Ergebnissen ein tendenzieller Rückschluss auf die spätere Plattenqualität gezogen werden. Allerdings ist eine allgemein gültige Aussage über die Faserplatteneigenschaften hinsichtlich der Faserlängenanteile aufgrund des geringen Probenumfangs nicht möglich.

Sowohl durch eine Wasserlagerung der Hackspäne vor dem Zerfaserungsprozess als auch durch Variieren der Dämpfzeit lassen sich am Alt- und Frischholzmaterial verbesserte technologische Eigenschaften erzielen. Allerdings sind die ermittelten Werte nur bedingt mit den übrigen Ergebnissen dieser Arbeit vergleichbar, da bei dieser Versuchsserie das Material während des Fertigungsprozesses nicht in der Blow-Line, sondern zu einem späteren Zeitpunkt in einem Pflugscharmischer beleimt wurde. Anhand der Ergebnisse konnte dokumentiert werden, dass die Verwendung von Altholzhackspänen, die mit einer Temperatur von 180°C nach einer Wasserlagerung oder bei einer etwas höheren Dämpfzeit (5 Minuten) zu Faserstoff verarbeitet wurden, nicht immer zu geringeren technischen Eigenschaftswerten im Vergleich zu denen aus Frischholz hergestellten MDF führen. Teilweise lagen die Eigenschaftswerte der Altholzplatten über denen der Frischholzplatten.

Bei der Herstellung von Faserplatten ist bekanntlich die Temperatur ein Einflussfaktor auf das hygroskopische Verhalten gegenüber Feuchteschwankungen. MDF, deren Hackspäne unter sehr intensiven Dämpfbedingungen (8 min/180°C) zerfasert wurden, hielten die von der Norm EN 622 - 5 geforderte maximale Dickenquellung von 12% auch ohne Verwendung eines Hydrophobierungsmittels ein. Dieser Zusammenhang kann neben einer Produktverbesserung auch zur Senkung der Kosten führen.

Die Erkenntnisse aus der Alt- und Frischholzfasercharakterisierung bildeten die Basis für weitere Untersuchungen. Während üblicher Weise die Holzfeuchte des Altholzes und der Altholzhackspäne um 25% lag, konnten mit einer abgestuften und definierten Holzfeuchte der Hackspäne, die ohne Druck eingebracht wurde, keine vergleichbar besseren Platteneigenschaften erreicht werden. An den im Labor durchgeführten industrienahe Versuchen wurde festgestellt, dass für die Zerfaserung des Altholzes eine Feuchte unterhalb von 100% keinen entscheidenden Einfluss auf den Zerfaserungsprozess bildete. Die eingestellten Dämpfbedingungen sind dabei wesentlich entscheidender.

Eine Verarbeitung der relativ trockenen Altholzhackspäne ohne weitere Vorbehandlung wäre aus Sicht der Produktion eine günstige Herstellungsvariante. Es zeigte sich jedoch, dass Platten, die aus nicht vorbehandelten Altholzhackspänen mit den in dieser Arbeit verwendeten Verleimungsparametern hergestellt wurden, nur selten die Anforderungen nach DIN EN 622 – 5 erfüllen. Durch eine Hackspänereinigung konnte belegt werden, dass sich neben den mechanisch-technologischen Eigenschaften auch die Quellungseigenschaften verbessern ließen. Die mit diesen Verarbeitungsparametern hergestellten MDF, deren Altholzmaterial sich hauptsächlich aus Paletten und Verpackungshölzern zusammensetzte, erreichten leicht verbesserte Platteneigenschaften gegenüber den Platten, produziert aus stark verunreinigtem Altholzmaterial.

In der Spanplattenindustrie werden gegenwärtig ungefähr 25% Altholz eingesetzt, ohne Qualitätseinbußen der Platten zu erhalten. Unter industriellen Bedingungen muss davon ausgegangen werden, dass Altholz mit Frischholz verarbeitet wird, da für eine ausschließlich aus Altholz hergestellte MDF regional bedingt nicht genügend Altholz zur Verfügung stehen wird. Zur Ermittlung der optimalen Einsatzmenge wurden Altholzhackspäne mit Frischholzhackspänen vermischt, zerfasert und zu MDF verarbeitet. Durch die Zugabe des Frischholzmaterials stiegen die Mittelwerte der mechanisch-technologischen Eigenschaften kontinuierlich an. Die Mindestanforderungen für den Biege-E-Modul und die Biegefestigkeit nach DIN EN 622 – 5 an Standardplatten zur Verwendung im Trockenbau wurden von den ausschließlich aus Altholz

hergestellten MDF erreicht und konnten durch Zugabe von Frischholz noch erheblich verbessert werden. Die durchgeführten Untersuchungen zeigen, dass durch Zugabe von 25% gut vorsortiertem und gereinigtem Altholz zum Frischholz technologische Platteneigenschaften erreicht werden, die einer Frischholzplatte gleich kommen.

Die gewonnenen Erkenntnisse dieser Arbeit dienen als Grundlage für eine Versuchsserie, bei der mit einem Flottenverhältnis von 1:2 die Hackspäne mit Natriumsulfit vorbehandelt wurden. Bei einer Dampfbehandlung von 3 min/180°C, die sich durch die eigenen Untersuchungen für Altholz als geeignet erwies, wurde der Faserstoff aufgeschlossen.

Erwartungsgemäß zeigten sich deutlich höhere technologische Eigenschaften der MDF, die aus chemisch vorbehandelten Altholzhackspänen hergestellt wurden. Es hat sich anhand der hier vorliegenden Untersuchungen gezeigt, dass eine Vorbehandlung der Hackspäne mit Natriumsulfit für Alt- und Frischholz einen deutlichen Vorteil gegenüber der Verarbeitung nicht vorbehandelter Hackspäne bringt. Bei den Altholzplatten wurde beispielsweise eine verbesserte Biegefestigkeit von 21% und bei den Frischholzplatten von 9% erreicht.

Auch die Abhebefestigkeitswerte der mit chemisch vorbehandelten Hackspänen hergestellten MDF wiesen deutlich höhere Werte auf als die Vergleichsplatten dieser Untersuchungsserie. Gerade für den Einsatz dieser Platten im Laminatbodenbereich, der ungefähr 50% der MDF-Gesamtproduktion ausmacht, ist die Abhebefestigkeit für eine spätere Beschichtung der Platten von großer Bedeutung. In diesem Marktsegment könnten nach den vorliegenden Untersuchungen die aus Altholz gefertigten MDF aufgrund ihrer Eigenschaften ohne weiteres eingesetzt werden.

Im Bereich der Laminatfußböden werden hohe Anforderungen hinsichtlich der Quellung gestellt. Die vorgestellten Untersuchungen zeigen bei optimierten Bedingungen einen viel versprechenden Weg zur Herstellung von MDF mit quellungsarmen Eigenschaften, wobei auf Hydrophobierungsmittel bei üblichen Bindemittelanteilen verzichtet werden kann. Die Quellungseigenschaften der als Trägerplatte konzipierten Altholz-MDF können zusätzlich über Leimdosierung und Hydrophobierungsmittel verringert werden. Dies ist für eine zurzeit immer noch wachsende MDF-Industrie sicher von großem wirtschaftlichem Interesse.

8 Literaturverzeichnis

- ALBERT, G. (1995)**, „Strukturbewegungen auf dem Holzwerkstoffmarkt“, Holz-Zentralblatt Nr. 57, S. 891,
- ANNERGREN, G.; RYDHOLM, S.; VARDHEIM, S. (1963)**, „Influence of raw material and pulping process on the chemical and physical properties of paper pulps“, Svensk Papperstidn. 66 (6), S. 196 – 210,
- ANONYMUS (a) (2001)**, „MDF Produktion in Europa legt überdurchschnittlich zu“, MDF – Magazin; S. 8 - 10
- ANONYMUS (b) (2001)**, „Holzwerkstoffe mit schlechtem erstem Halbjahr“, Holz-Zentralblatt 9
- ANONYMUS (c) (2001)**, „Seeking profitability“, Focus on MDF part I., Wood Based Panels International, June/July, S. 9 –12
- ANONYMUS (d) (2001)**, „Ansätze zur Verbesserung der Rundholzlogistik“, Holz-Zentralblatt Nr. 77, S. 1003,
- ASSARSSON, A.; CROON, I.; DONETZHUER, A. (1963)**, „Studies on wood resin, especially the change in chemical composition during seasoning of the wood. Part 2. A comparison of chip seasoning of spruce wood (*Picea abies* Karst.) with log seasoning“, Svensk Papperstidn. 66, (22), S. 940 – 948
- ASSARSSON, A.; CROON, I.; FRISK, E. (1970)**, „Outside chip Storage (OCS)“, Svensk Papperstidn. 73, S. 483 – 501,
- BACK, E.L.; BJÖRKLUND JANSSON, M. (1987)**, „Harzkomponenten im Holz und Auswaschung derselben nach einer Sulfatkochung“, Wochenblatt für Papierfabrikation, 115, (8), S. 339 – 349
- BENKER, B.; ERBREICH, M; PLINKE, B. (2001)**, „Charakterisierung von Faserstoff für die MDF-Herstellung aus Gebrauchtholz“, MDF-Magazin, S. 44-49
- BOCKELMANN, C.; MARUTZKY, R. und STRECKER, M. (1993)**, „Recyclingholz für die Holzwerkstoffindustrie“, Holz und Kunststoff 11, S. 1242, 1245 – 1247
- BOCKELMANN, C.; MARUTZKY, R. (1993)**, „Verwertung von Holzpackmitteln und Paletten in der Bundesrepublik Deutschland“, Holz-Zentralblatt 19, S. 295 – 298
- BOCKELMANN, C. (1996)**, „Zusammensetzung, Sortierung und Verwendung von Altholz in der Bundesrepublik Deutschland“, Diss. TU Braunschweig, Verlag Papierflieger 1996, Clausthal-Zellerfeld, 129 S.
- BODIG, J., JAYNE, B.A. (1982)**, „Mechanics of wood composites“, Von Nostrand Reinhold Company, New York, Cincinnati, Toronto, 712 S.
- BOEHME, C. (1982)**, „Einfluss verschiedener Korngrößen von Sandteilen in Spanplatten-Deckschichtbereichen auf den Schneidverschleiß beim Umfangsplanfräsen“, WKI-Kurzbericht Nr. 36/1982

- BOEHME, C.; HARBS, C. (1984)**, „Prüfung und Beurteilung der Dauerhaftigkeit unterschiedlich verleimter V20-Bauspanplatten bei Belastung und Beanspruchung in definiertem Wechselklima“, Holz als Roh- und Werkstoff 42, Nr. 9, S. 335 – 341
- BOEHME, C. (1992)**, „Die Bedeutung des Rohdichteprofiles für MDF“, Holz als Roh- und Werkstoff 50, S.18 – 24
- BOEHME, C. (1993)**, „Altmöbel als Rohstoff für die Spanplattenindustrie“, Vortrag anlässlich der 3. Sitzung des Arbeitskreises Werkstoffkreislauf Holz des HDH 24.04.1993
- BOEHME, C. (1996)**, „Bestimmung des Asche- und Sandgehaltes von beschichteten und unbeschichteten Spanplatten“, WKI-Kurzbericht Nr. 2/1996
- BOEHME, C. (2000)**, „Über die Formaldehydabgabe von Holz und ihre Veränderung während technischer Prozesse der Holzwerkstoffherstellung“, Dissertation, Shaker Verlag 2000
- BORGARDS, A.; KORDSACHIA, O.; PATT, R. (1995)**, „Zellstoffgewinnung aus schutzmittelbehandeltem Holz“, Informationsblatt anlässlich der Ligna, Hannover
- BRUNNAUER, S.; EMMERT, P.H.; TELLER, E. (1938)**, „Adsorption of Gases in Multimolecular Layers“, Journal of the American chemical society : JACS / Albert Noyes, ed. - Washington, DC : American chemical society, Bd. 60.
- BRUNNER, M.; EUGESTER, R.; TRENKA; BERGAMIN-STROTZ, L. (1996)**, „FT-IR Spectroscopy and wood identification“, Holzforschung 50, S. 130 – 134
- BUCHHOLZER, P. (1994)**, „Orientierende Untersuchungen über den Einfluß der Hackschnitzel-dämpfzeit auf die Eigenschaften von MDF“, WKI-Kurzbericht Nr. 2/1994
- BUCHHOLZER, P. (2000)**, „Trockenbeimung als Alternative zur Blow-Line-Beimung in der MDF-Herstellung“, Holzwerkstoffsymposium der Mobil Schmierstoff GmbH, Travemünde
- BUCKING, G. (1982)**, „Resin blending of MDF fiber. Proceedings“, Sixteenth Washington State University International Symposium on Particleboard, T.M. Maloney, Ed., Washington State University, Pullman, WA, S. 269 – 276
- BUES, C.-T. (2000)**, „Faserstauchungen in sturmgeschädigtem Fichtenholz“, Holz-Zentralblatt 47/48, S. 647
- Bundesverband der Deutschen Entsorgungswirtschaft E. V. (BDE), (2000)**, „Kreislaufwirtschaft in der Praxis Nr. 9, Praxisgerechte Anforderungen an die Verwertung von Holzabfällen“, Kennziffer 030500
- BURMESTER, A. (1974)**, „Erfolgreiche Quellungsvergütung mit einfachen Mitteln, Teil 1 und 2“, Holz- und Kunststoffverarbeitung 9, S. 534 – 538 und 610 – 613
- BUTIN, H. (1996)**, „Krankheiten der Wald- und Parkbäume. Diagnose - Biologie – Bekämpfung“, Georg Thieme Verlag Stuttgart, 261 S., ISBN 3 – 13 – 639003 – 2
- BUTLER, T. (1991)**, „Metal detection testing provides protection“, Sensor Review, vol. 11, no. 1, pp. 10-14

- CHEN, T.-Y.; PAULITSCH, M. (1976)**, „Eigenschaften von Hackschnitzeln, Spänen und Spanplatten aus Sägeabfällen von Kiefer und Buche“, *Holzforschung und Holzverwertung* 28, 4, S. 87 – 92
- CHOW, P.; ZHAO, L. (1992)**, „Medium density fiberboard made from phenolic resin and wood residues of mixed species“, *Forest Products Journal*, Vol. 42, No. 10
- ÇOLAKOĞLU, G.; ROFFAEL, E. (1992)**, „Untersuchungen an 40 Jahre alten UF-Spanplatten“, *WKI-Mitteilung* 550/1992
- CONG; KÜHNE (1995)**, „Untersuchungen der Eignung von Fasern aus Altspanplatten zur Herstellung von Gipsfaserplatten und phenolharzgebundenen MDF“, In: *Methoden und Möglichkeiten der stofflichen Nutzung von Altholz und Altholzwerkstoffen. Workshop am Institut für Holztechnologie GmbH, Dresden (ihd) vom 09. und 10. November 1995*
- CRAWFORD, R.L. (1981)**, „Lignin biodegradation and transformation“, John Wiley & Sons; New York
- CRESTINI, C.; BERNINI, R.; PORRI, A. (1996)**, „Biodegradation of monomeric, dimeric and polymeric lignin models by *lentinus edodes*“, *Holzforschung* 50, S. 193 – 200
- CROON, I. (1965)**, „Harz-, Wachs-, Fett-Komponenten in Holz und Zellstoff“, *Das Papier*. 19. Jahrgang, Heft 10a, S. 711 – 719
- DELORME, A.; VERHOFF, S. (1975)**, „Zellwanddeformationen in sturmgeschädigtem Fichtenholz unter dem Rasterelektronenmikroskop“, *Holz als Roh- und Werkstoff* 33, S. 456 – 460
- DEPPE, H.-J. (1989)**, „Industrieholz- und Altholzrecycling bei der Holzwerkstoffherzeugung“, *Holz und Kunststoff* 11/89, S. 1272 – 1277
- DEPPE, H.-J.; ERNST, K. (1991)**, „Taschenbuch der Spanplattentechnik, Kapitel über MDF“, 3. überarbeitete und erweiterte Auflage, DRW-Verlag, Leinfelden-Echterdingen
- DEPPE, H.-J. (1994)**, „Altmöbelrecycling – Die Zeit verlangt nach Lösungen“, *Holz und Kunststoff* 1/1994, S. 88 - 90
- DEPPE, H.-J. (1996)**, „Steigender Holzbedarf und tropische Plantagenwirtschaft“, Fachhochschule Eberswalde
- DEPPE, H.-J., Ernst, K. (1996)**, „MDF–Mitteldichte Faserplatte“, DRW-Verlag, ISBN 3-87181-329-X
- DEPPE, H.-J., ERNST, K. (2000)**, „Taschenbuch der Spanplattentechnik. 4. überarbeitete und erweiterte Auflage“, DRW-Verlag 2000, ISBN 3-87181-349-4
- DINWOODIE, J.M. (1965)**, „The relationship between fibre morphology and paper properties: a review of literature“, *TAPPI* 48 (8), 440 – 6
- DICKERHOOF, H.E. (1975)**, „Insulation Board, Hardboard, and Particleboard Industries“, *Forest Products Journal* Vol. 25, No. 4, S. 10 – 15
- DIX, B.; ROFFAEL, E. (1994)**, „Einfluss der Verkernung und des Baumalters auf die Eigenschaften von Spanplatten aus Kiefernholz (*Pinus sylvestris*)“, *WKI-Mitteilungen* Nr. 682 und 685

- DIX, B.; SCHNEIDER, T.; ROFFAEL, E. (1998)**, „Einfluss von Holzaufschlussverfahren (TMP-, CTMP-Verfahren) und Aufschlussbedingungen auf die physikalisch-technologischen Eigenschaften von mitteldichten Faserplatten (MDF)“, WKI-Kurzbericht Nr. 20/1998
- EGNER, K. (1937)**, „Neuere Erkenntnisse über die Vergütung der Holzeigenschaften“, Mitteilung Fachausschuss Holzfragen H. 18, Berlin, S. 2 – 3
- EISELE, F. (1996)**, „Industrierestholz – Bedrohung oder Chance für die Waldproduktion?“, Holz-Zentralblatt Nr. 108, S. 1638
- EMB (1996)**, „MDF – A users manual“, Euro MDF Board Gießen
- ENGELMANN, I. (1993)**, „Analyse der werkstofflichen Zusammensetzung von Altmöbeln“, Diplomarbeit (FH) TU Dresden, Institut für Holz- und Papiertechnik
- ERIKSSON, K-E.L.; BLANCHETTE, R.A.; ANDER, P. (1990)**, „Microbial and enzymatic degradation of wood and wood components“, Springer-Verlag, Berlin
- ERNST, K. (1995)**, „Entwicklungsmöglichkeiten von MDF“, Vortrag Mobil Oil Symposium, Magdeburg 1995
- FAIX, O.; MOLTRAN, J. (1996)**, „Persönliche Mitteilung“, aus Lay, J.P.; Stock, R.: Schnellerkennung von Holzschutzmitteln in Altholz. Initiativen zum Umweltschutz, Bd. 27, ISBN 3-503-06005-7
- FEIST, W.C.; HAJNY, G.J.; SPRINGER, E.L. (1973)**, „Effect of storing green wood chips at elevated temperatures“, TAPPI, 56, (8), S. 91 – 95
- FENGEL, D.; WEGENER, G. (1989)**, „Wood: Chemistry, Ultrastructure, Reactions“, 2nd edn. de Gruyter, Berlin
- FINK, M. (1996)**, „Aufbau und Erprobung einer Spektren-Datenbank für organische Holzschutzmittel- Wirkstoffe mit Hilfe der Gaschromatographie/Massenspektrometrie“, Dipl.-Arbeit, Universität Hamburg, 41 S.
- FISCHER, H. (1991)**, „Möbel vom Sperrmüll als mögliche Rohstoffquelle“, EUWID 2/1991, S. 5 – 6
- FLAMM, E. (1963)**, „Harzschwierigkeiten in der Sulfitzellstoffindustrie, insbesondere bei Verwendung von Birke als Rohstoff“, Holzforschung und Holzverwertung, 15, (5), S. 107 – 109
- FLEMMING, H.; KUSIAN, R.; SEDLACEK, W. (1960)**, „Orientierende Untersuchungen über den Einfluss von Kiefernspint- und Kiefernkernelholz auf die Eigenschaften dreischichtiger Spanplatten“, Holztechnologie 1, S. 23 – 28
- FORTER, M. (2001)**, „Giftstoffe in Spanplatten“, Saldo Nr. 13, S. 13
- FORTUIN, E.; WELLING, J.; HESSE, Ch.; BRÜCKNER, E. (1988)**, „Verfärbung von Eichen-schnittholz bei der Trocknung; Teil 2“, Holz-Zentralblatt 114, S. 1621 – 1622
- FRANKE, R.; ROFFAEL, E. (1998)**, „Zum Recycling von Span- und MDF-Platten (Teil 2)“, Holz als Roh- und Werkstoff 56, Springer-Verlag, S. 381 – 385

- FRIEDRICH, G.; NAKE, R. (1990)**, „Probleme und Möglichkeiten bei der Verwertung von Holzresten, die in der Möbelindustrie anfallen“, Holztechnologie 30, 2, S. 71 – 74
- GILLWALD, W. (1965)**, „Zur Problematik der Herstellung von Spanplatten aus Abfallspänen“, Holztechnologie 6, S. 27 – 32
- GÖTTSCHING, L. (1986)**, „Prüfung von Holzstoffen für Papier, Karton und Pappe. Gleichzeitige Bestimmung des Gehaltes an Splitter und Faserfraktionen“, Verein der Zellstoff- und Papier-Chemiker und -Ingenieure, Merkblatt V/1.4/86, 20.03.1986
- GORING, D.A.I. (1963)**, „Thermal Softening of Lignin, Hemicellulose and Cellulose“, Pulp Pap. Mag. Can., 64, (12), S. 517 – 527
- GRAN, G.; BYSTEDT, I. (1973)**, „Latest Developments in Pressurized-Refining with Defibrator Equipment“, Proceedings of Seventh Washington State University, Symposium on Particleboard, Pullman, Washington, S. 105 – 163
- GRAN, G. (1982)**, „Blowline blending in dry process fibreboard production. Proceedings“, Sixteenth Washington State University International Symposium on Particleboard, T.M. Maloney, Ed., Washington State University, Pullman, WA, S. 261 – 267
- GRESSEL, P. (1986)**, „In: Niemz, P. (1993): Physik des Holzes und der Holzwerkstoffe“, DRW-Verlag, Leinfelden-Echterdingen, 243 S.
- GROSSER, D. (1985)**, „Pflanzliche und tierische Bau- und Werkholzschädlinge“, DRW Weinbrenner, Leinfelden-Echterdingen
- GRUBER, E.; WEIGERT, J. (1998)**, „Chemische Modifizierung von Zellstoffen zur Verminderung ihrer Verhornungsneigung“, Das Papier 10A, S. 20 – 26
- GRÜLL, G. (1999)**, „Ultrastrukturelles Bruchverhalten von Holz“, Holzforschung und Holzverwertung, ISSN: 0018-3849, Austria, v. 51(6), S. 95, 3 ill.
- HAJNY, G.J. (1966)**, „Outside storage of pulpwood chips. A review and bibliography“, TAPPI J. 49, S.97 – 105
- HAMEED, M. ROFFAEL, E. (1999)**, „Über die Benetzbarkeit von Splint- und Kernholz der Kiefer, Douglasie und Lärche“, Holz als Roh- und Werkstoff 57, S. 287 – 293, Springer-Verlag
- HAMEY, L.G.C. (1998)**, „Pre-processor colour images with self-organising map: Baking curve identification and bake images segmentation“, IEEE, vol. 2, pp. 1771 – 1775
- HARTLER, N. (1985)**, „Wood quality requirements, process adaptation and necessary energy sacrifice“, International Mechanical Pulping Conference, Stockholm, Preprints, S. 109 – 119
- HARTLER, N. (1986)**, „Wood quality requirements in mechanical pulping“, Nordic Pulp Paper Res. J. (1), S. 4 - 10
- HAUPT, K.; BAUMANN, R.R. (1983)**, „Erfahrungen beim Einsatz von Hackschnitzeln zur Herstellung von mitteldichten Faserplatten“, Holzindustrie 1, S. 9 – 11

- HEIKKURINEN, A.; LEVLIN, J.-E.; PAULAPURO, H. (1991)**, „Principles and methods in pulp characterization – Basic fibre properties“, *Paperi ja Puu* 5, S. 411 – 417
- HELLER, B. (1995)**, „Spanplattenfibel“, Springer
- HIGGINS, H.G.; MCKENZIE, A.W. (1963)**, „The structure and properties of paper“, XIV. Effect of drying on cellulose fibres and the problem of maintaining pulp strength. *Appita* 16, S. 145 – 161
- HIMMELREICH, M. (2002)**, „persönliche Mitteilung“
- HÖPNER, T.; JAYME, G.; ULRICH, S.C. (1955)**, „Bestimmung des Wasserrückhaltevermögens (Quellwert) von Zellstoffen“, *Das Papier* 9, S. 476 – 482
- HOFF, M. (1994)**, „Untersuchungen zur Charakterisierung von schutzbehandelten Hölzern“, Dipl.-Arbeit, Fachhochschule Hamburg, Fachbereich Maschinenbau u. Chemie-Ingenieurwesen, 55 S.
- HOMAN, W.J.; MILITZ, H. (1994)**, „Evaluation of rapid methods for detecting wood preservatives in waste wood“, The intern. Research Group on Wood Preservation, 25. annual meeting, Stockholm, Document IRG/WP 50024, 9 S.
- HORN, W.; MARUTZKY, R. (1994)**, „A rapid pyrolytical method for the determination of wood preservatives in treated wood“, *Fresenius J. Anal. Chem.* 348, S. 832 – 835
- HÜTTEL, K. (2002)**, „Die künftige Altholzverordnung aus Sicht der Praxis“, *Holz-Zentralblatt* Nr. 25, S. 303
- JACKSON, M. (1988)**, „High yield pulps from Canadian hardwoods“, *Nord. Pulp Pap. Res. J.*, Special Issue (Otto Brauns 85 aar), S. 40 – 45
- JAYME, G. (1944)**, „Mikro-Quellungsmessungen an Zellstoffen“, *Papier-Fabrikant / Wochenblatt für Papierfabrikation*, 42 (6), S. 187 – 194
- JAYME, G.; HARDERS-STEINHÄUSER, M. (1951)**, „Bestimmung der Faserlänge von Zellstoffen“, In: Freund, H. (Ed): *Handbuch der Mikroskopie in der Technik*. Band V, Teil 2, Umschau Verlag
- JAYME, G.; HUNGER, G. (1957)**, „Die Faser-zu-Faser-Bindung der Papierblattgefüges im elektronenoptischen Bild“, *Das Papier* 11, Nr. 7/8, S. 140 – 145
- JAYME, G.; HUNGER, G. (1958)**, „Eine elektronenoptische Studie über das Verhalten der Zellulosemikrofibrillen bei der Trocknung. Ausbildung von Ringnetzstrukturen und Fibrillensträngen“, *Mikroskopie-Zentralblatt für mikroskopische Forschung und Methodik*. 13, (1/2), S. 24 – 38
- JAYME, G.; FENGEL, D. (1963)**, „Über die Veränderung des Feinbaus feuchter Zellstoffe bei der Trocknung“, *Das Papier* 17, S. 550 – 555
- JAYME, G.; ROFFAEL, E. (1970)**, „Über ein neues Verfahren zur Bestimmung der Mercerisierbarkeit von Cellulosen auf der Basis von WRV-Messungen“, *Das Papier* 24, S. 181 – 186
- KÄÄRIK, A. (1975)**, „Succession of microorganisms during wood decay“, In: Liese, W. (ed) *Biological transformation of wood by microorganisms*. Springer-Verlag, Berlin, S. 39 – 51

- KEYS, J.C.; LEASK, R.A. (1973)**, „Refinerholzschliff – Vergangenheit, Gegenwart und Möglichkeiten“, Paper Trade Journal, New York, 157, 35, S. 20 – 29
- KEHR, E. (1977)**, „Verfahren zur Herstellung von Faserplatten mittlerer Dichte – MDF“, Holztechnologie 18, S. 67 – 76
- KEHR, E. (1980)**, „Die Veränderung des Rohstoffeinsatzes bei der Herstellung von Faser- und Spanplatten“, Holzindustrie 3, S. 84 – 87
- KELLY, M.W.; BAREFOOT, J.E.; SWINT, W.H.; LEVI, M.P. (1982)**, „Properties of particle- and hardboard made from healthy and beetle-killed southern pine“, Forest Products Journal Vol. 32, No. 3, S. 33 –39
- KEYLWERTH, R. (1958)**, „Zur Mechanik der mehrschichtigen Spanplatte“, Holz als Roh- und Werkstoff 16 (11), S. 419 - 430
- KEYLWERTH, R. (1966)**, „Praxis und Fortschritte der Holz Trocknung“, Holz als Roh- und Werkstoff 24 (5), S. 205 - 212
- KIRCHNER, R. (2002)**, „Recycling von Holzwerkstoffen durch das Verfahren der thermohydrolytischen Spaltung“, Vortrag 2. Fachtagung „Umweltschutz in der Holzwerkstoffindustrie, Tagungsband 2002, S. 72-81
- KLAUDITZ, W.; STEGMANN, G. (1951)**, „Über die grundlegenden chemischen und physikalischen Vorgänge bei der Wärmevergütung von Hartfaserplatten“, Holzforschung, 5, (1), S. 68 - 74
- KLAUDITZ, W.; STEGMANN, G. (1955)**, „Beiträge zur Kenntnis des Ablaufes und der Wirkung thermischer Reaktionen bei der Bildung von Holzwerkstoffen“, Holz als Roh- und Werkstoff, 13, S. 434 - 440
- KLAUDITZ, W. (1955)**, „Entwicklung, Stand und holzwirtschaftliche Bedeutung der Holzfasertplattenherstellung“, Holz als Roh- und Werkstoff 11, S. 405 – 421
- KÖRNER, I.; PECINA, H.; KÜHNE, G.; KÖRNER, St. (1991)**, „Überwachung und Steuerung mykologischer Abbauprozesse an Holz für die Holzwerkstoffherstellung – Möglichkeiten und Grenzen“, Holzforschung und Holzverwertung 43 H. 6
- KOLLMANN, F.; KEYLWERTH, R.; KÜBLER, H. (1951)**, „Verfärbungen des Vollholzes und der Furniere bei der künstlichen Holz Trocknung“, Holz- als Roh- und Werkstoff 9 (10), S. 382 – 391
- KOLLMANN, F.; SCHNEIDER, A. (1963)**, „Über das Sorptionsverhalten wärmebehandelter Hölzer“, Holz als Roh- und Werkstoff 21, S. 77 – 85
- KOLLMANN, F.; FENGEL, D. (1965)**, „Änderungen der chemischen Zusammensetzung von Holz durch thermische Behandlung“, Holz als Roh- und Werkstoff 23, S. 461 – 468
- KOLLMANN, F. (1982)**, „Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe“, Band 2. Auflage, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1050 S.
- KRÄSSIG, H. (1984)**, „Struktur und Reaktivität von Cellulosefasern“, Das Papier 38, Nr. 12, S. 571 – 582
- KRUG, D.; KEHR, E. (2000)**, „Quellungsvergütung“, MDF-Magazin, S. 18 – 23

- KUCERA, L.J.; SELL, J. (1987)**, „Die Verwitterung von Buchenholz im Holzstrahlbereich“, Holz als Roh- und Werkstoff 45, S. 89 – 93
- KÜHNE, G. (1993)**, „Modifizierung von Rohholz durch Pilze für die Holzwerkstoffherstellung“, In: Hüttermann, A. und Kharazipour, A. (Ed): Die pflanzliche Zellwand als Vorbild für Holzwerkstoffe. Naturorientierte Herstellung von Span- und Faserplatten – Stand der Technik und Perspektiven. Frankfurt am Main, Germany, Sauerländer, S. 55 – 68
- LAMPERT, H. (1966)**, „Faserplatten“, Leipzig
- LAWS Umwelttechnik Berlin (1996)**, „Systematisierung der Begriffe Rest- und Altholz“
- LIESE, W.; SCHMID, R. (1964)**, „Über das Wachstum von Bläuepilzen durch verholzte Zellwände“, Phytopathologische Zeitung 51, S. 385 – 393,
- LUKOWSKY, D.; LEHMANN, J.; BURK, R. (2002)**, „Vergütetes Kiefernholz für den Fensterbau“, WKI-Mitteilung 800/2002
- LUNDBERG, R.; de RUVO, A. (1978)**, „The influence of drying conditions on the recovery of swelling and strength of recycled fibres“, Svensk Papperstidn. 81, Nr. 11, S. 355 – 358
- MAHLER, G.; MAIER, T.; SCHÜLER, G. (1999)**, „Ganzjährig frisches Rundholz aus dem Lager“, Holz-Zentralblatt Nr. 73, S.1092 - 1094
- MALONEY, T. (1977)**, „Modern Particleboard & DRY-Process Fiberboard Manufacturing“, San Francisco
- MANTANIS, G.I.; YOUNG, R.A.; ROWELL, R.M. (1994)**, „Swelling of Wood – Part 2“, Holzforschung 48, S. 480 – 490
- MANTANIS, G.I.; YOUNG, R.A.; ROWELL, R.M. (1995)**, „Swelling of Wood – Part 3“, Holzforschung 49, S. 239 – 248
- MANTAU, U. (1999)**, „Industrierestholz – Altholz“, Forschungsbericht Holzabsatzfonds HAF
- MARTINI, F. (2003)**, „persönliche Mitteilung“
- MARUTZKY, R.; ROFFAEL, E. (1977)**, „Über die Abspaltung von Formaldehyd bei der thermischen Behandlung von Holzspänen“, Holzforschung 31, (1), S. 8 – 12,
- MARUTZKY, R.; KESERÜ, G. (1982)**, „Herstellung von Spanplatten aus gelagerten Hack-schnitzeln. 3. Mitteilung – Einfluss der Lagerung auf die Qualität der Holzspanplatten“, Holz-Zentralblatt 108, 7, S. 81 – 82
- MARUTZKY, R. (1993)**, „Möglichkeiten der Entsorgung und Verwertung von Altmöbeln“, WKI-Mitteilung 567/1993
- MARUTZKY, R.; STRECKER, M.; BOCKELMANN, C. (1993)**, „Recyclingholz für die Holzwerkstoffindustrie“, WKI-Mitteilung 593/1993
- MARUTZKY, R.; STRECKER, M. (1994)**, „Aspekte der energetischen Verwertung von Altholz“, Holz-Zentralblatt Nr. 67, S. 1101, 1102 und 1110

- MARUTZKY, R. (1995)**, „Recyclingverfahren für Holzwerkstoffe“, Vortrag Mobil-Oil Symposium, Magdeburg
- MARUTZKY, R. (1996)**, „Qualitätsanforderungen und Entsorgungswege für Rest- und Gebrauchthölzer“, Sonderpublikation der Fachzeitschrift Umwelt, VDI-Verlag
- MARUTZKY, R.; STRECKER, M. (1998)**, „Energetische Nutzung von Gebrauchtholz: Stand der Technik“, Holz-Zentralblatt Nr. 145, S. 2169, 2174, 2175
- MARUTZKY, R.; SEEGER, K. (1999)**, „Energie aus Holz und anderer Biomasse“, DRW-Verlag Weinbrenner
- MARUTZKY, R. (2000)**, „Qualitätssicherung bei Recyclingholz – Eine Einführung in die Thematik“, In: Marutzky, R. Bahadir, M.: Bestimmung von Holzschutzmitteln in Gebrauchtholz. Workshop des Wilhelm-Klauditz-Instituts, Braunschweig März 2000, WKI-Bericht Nr. 36
- MARUTZKY, R. (2003)**, „Neue Wettbewerbssituation bei Holzsortimenten“, Holz-Zentralblatt 129, 10, S. 180 – 181
- MAY, H.A.; STEGMANN, G. (1966)**, „Methoden zur Bestimmung der Spandimensionen und zur Bestimmung von Sichtvorgängen“, Holz als Roh- und Werkstoff 24, S. 305 – 311
- MAY, H.A.; KÜHN, W. ; SCHÄTZLER, H.-P. (1976)**, „Messung des Dichteprofiles von Spanplatten mittels Gammastrahlen“, Kerntechnik, 18 Nr. 11, S. 491 – 494, WKI Mitteilungen 236/1976
- MAY, H.A.; KESERÜ, G. (1982)**, „Zusammenhänge zwischen Eigenschaften, Rohstoffkomponenten und dem Dichteprofil von Spanplatten“, Holz als Roh- und Werkstoff 40, S. 105 – 110, WKI-Mitteilung 340/1982
- MEIER, D. (1994)**, „Möglichkeiten zur Identifizierung von Spurenstoffen im Holz“, In: Prüfung und Überwachung von Holzhackschnitzeln für die Feuerungsanlagen. Fachgespräch LUA Brandenburg, Kleinmachnow 9.11.1994
- MEINLSCHMIDT, P.; MÄRGNER, V. (2002)**, „Detection of foreign substances in food using thermography“, Thermosense XXIV, Xavier P. Maldague, Andrés E. Rozlosnik, Editors, Proceedings of SPIE Vol. 4710, 0277-786X/02
- MICHANICKL, A.; BOEHME, C. (1996)**, „Recycling von Spänen und Fasern aus Holzwerkstoffen“, Holz und Kunststoff 4/1996, S. 50 - 55
- MÖLLER, A. ; HERRLICH S. (1994)**, „Kreislauf geschlossen – Platten aus Altmöbeln“, Deutsche Schreiner und Tischler
- NAULT, J.R.; MANVILLE, J.F. (1997)**, „Species Differentiation of two common lumber mixes by diffuse reflectance fourier transform infrared (drift) spectroscopy“, Wood and Fibre 29, S. 2 – 9
- NUSSBAUER, T. (1997)**, „Primär- und Sekundärmaßnahmen zur Stickoxidminderung bei Holzfeuerungsanlagen“, In: Marutzky, R. (Hersg.): Moderne Feuerungstechnik zur energetischen Verwertung von Holz und Holzabfällen. Springer-VDI-Verlag GmbH & Co. KG, Düsseldorf, ISBN 3-18-990028-0
- OLLMANN, H. (2000)**, „Mündliche Mitteilung“

- OSTWALD, A. (1993)**, „Aspekte der stofflichen Wiederverwertung von Problemsortimenten“, Vortrag anlässlich der Dreiländer Holztagung der DGfH in München
- PACKMANN, D.F. (1960)**, „The acidity of wood“, *Holzforschung*, 14, (6), S. 178 – 183
- PALADIN, R. (2002)**, „Cleaning up Urban Forest“, PAL srl, Treviso/IT; Vortrag anlässlich der 2. Fachtagung „Umweltschutz in der Holzwerkstoffindustrie“, Göttingen 2002, S.31 - 43
- PARAMESWARAN, N.; DENG, H.J.; PATT, R. (1985)**, „Restholzhackschnitzel für die Herstellung von TMP und Zellstoff“, *Holz als Roh- und Werkstoff* 43 (1), S. 1 – 8
- PATT, R.; PARAMESWARAN, N.; KRUSE, J.; BEHLER, H. (1981)**, „Zur Qualität von Nadelrestholzhackschnitzeln für die Faserherstellung. 2. Mitteilung. Einfluss der Hackschnitzelherstellung auf die Struktur und Eigenschaften von Faserstoffen“, *Wochenblatt f. Papierfabrik*. 109, S. 919 – 924, 926
- PATT, R.; SCHMITT, U.; NEUMANN, J.; KORDSACHIA, O. (1992)**, „Vom Holz zum Papier“, *Physik in unserer Zeit*, 23. Jahrg., Nr.3, S. 129 – 136
- PATZELT, M.; STINGL, R. (2001)**, „Thermische Modifizierung – Holzschutz ohne Chemie?“, *Holz-Zentralblatt* 135, S. 1699
- PAULITSCH, M. (1976)**, „Untersuchungen zur Charakterisierung von Hackschnitzeln für die Spanplattenherstellung“, *Holz-Zentralblatt* 102, 142, S. 2032 – 2033
- PECINA, H. (1981)**, „Eigenschaftsänderungen durch chemische Einflussnahme auf die Grundbestandteile des Holzes. Teil II: Veränderte Eigenschaften bindemittelfreier Faserplatten aus chemisch behandeltem Faserstoff“, *Holztechnologie* 22, (3), S. 148 – 154
- PECINA, H.; PAPRZYCKI, O. (1990)**, „Untersuchungen über die Benetzbarkeit chemisch modifizierter Hölzer“, *Holz als Roh- und Werkstoff* 48, S. 61 – 65
- PECINA, H. (1993)**, „Betrachtung über natürliche Faserbindungen und ihre Beeinflussbarkeit – ein Überblick“, *Holzforschung und Holzverwertung* Nr. 4, S. 69 – 72
- PEYLO, A. (1998)**, „Schnellerkennung von Holzkontaminationen – Ein Überblick“, Tagungsband VDI-Seminar Holzabfälle, UTECH, Berlin 18. – 19.2.1998
- PLATH, E. (1971)**, „Beitrag zur Mechanik der Holzspanplatten“, *Holz als Roh- und Werkstoff* 28 (11), S. 377 - 382
- PLATH, E.; SCHNITZLER, E. (1974)**, „Das Rohdichteprofil als Beurteilungsmerkmal von Spanplatten“, *Holz als Roh- und Werkstoff* 32 (11), S. 443 - 449
- PLINKE, B.; BENKER, B. (2003)**, „Messverfahren zur morphologischen Charakterisierung von Faserstoff für die Herstellung mitteldichter Faserplatten (MDF)“, *AiF-Abschlussbericht* 12 590N
- POLLER, S.; KLETZIN, J. (1990)**, „Bessere Stoffausnutzung durch Kombination von Holzhydrolyse und Faserplattennassverfahren?“, *Holztechnologie* 31, No. 3, S. 117 – 119
- PRECHEL, J. (1999)**, „Altholz-Tourismus in Europa muss vermieden werden“, *Holz-Zentralblatt* Nr. 148, S. 2016

- RACKWITZ, G.; OBERMEIER, M. (1962)**, „Die Sichtung von Holzspänen. Erste Mitteilung: Grundlagen der Sichtung und die Sichtung im waagerechten Luftstrom“, Holz als Roh- und Werkstoff 20, S. 27 – 38
- RACKWITZ, G. (1963)**, „Der Einfluss der Spanabmessung auf einige Eigenschaften von Holzspanplatten“, Holz als Roh- und Werkstoff 21, S. 200 – 209
- RACKWITZ, G. (1964)**, „Die Sichtung von Holzspänen. Zweite Mitteilung: Beurteilung von Spänegemischen und Sichtvorgängen“, Holz als Roh- und Werkstoff 22, S. 365 – 371
- RANTA, L.; MAY, H.-A. (1978)**, „Zur Messung von Rohdichteprofilen an Spanplatten mittels Gammastrahlen“, WKI Mitteilungen 276/1978, Holz als Roh- und Werkstoff 36, S. 467-474
- REIB, J. (1986)**, „Schimmelpilze“, Springer-Verlag, Berlin
- ROBSON, D. (1991)**, „What happens with blending in the MDF blowline. Proceedings of the 25th“, Particleboard/Composite Materials Symposium, Washington State University, Pullman, WA, USA, S. 167 – 179
- ROFFAEL, E. (1975)**, „Messung der HCHO Abgabe; Praxisnahe Methode zur Ermittlung der HCHO Abgabe harnstoffharzgebundener Spanplatten für das Bauwesen“, Holz-Zentralblatt, 101, S. 1403 - 1404
- ROFFAEL, E. (1978)**, „Einfluss der Lagerung von harnstoffformaldehydharzgebundenen Spanplatten auf ihre Formaldehydabgabe“, WKI-Mitteilung 265/1978
- ROFFAEL, E. (1979)**, „Zur Erfassung von Verhornungen bei der Trocknung von initialfeuchten Zellstoffen“, Holzforschung 33, S. 33 – 35
- ROFFAEL, E. (1982)**, „Die Formaldehydabgabe von Spanplatten und anderen Werkstoffen“, DRW-Verlag, Stuttgart
- ROFFAEL, E. (1987)**, „Einfluss der Trocknungsbedingungen auf Kiefernspäne und ihre Verleimbarkeit mit UF-Harzen“, Holz als Roh- und Werkstoff, 45, S. 449 – 456
- ROFFAEL, E. (1989)**, „Abgabe von flüchtigen organischen Säuren aus Holzspänen und Holzspanplatten“, Holz als Roh- und Werkstoff
- ROFFAEL, E.; DIX, B.; BÄR, G.; BAYER, R. (1994a)**, „Über die Eignung von thermo-mechanischem und chemo-thermo-mechanischem Holzstoff (TMP und CTMP) aus Buchen- und Kiefernholz für die Herstellung von mitteldichten Faserplatten (MDF). Teil 1: Aufschluss des Holzes und Eigenschaften der Faserstoffe“, Holz als Roh- und Werkstoff 52, S. 239 – 246, Springer-Verlag
- ROFFAEL, E.; DIX, B.; BÄR, G.; BAYER, R. (1994b)**, „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 2: Eigenschaften von MDF aus Buchen-Faserstoff“, Holz als Roh- und Werkstoff 52, S. 293 – 298, Springer-Verlag

- ROFFAEL, E.; DIX, B.; BÄR, G.; BAYER, R. (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 3: Eigenschaften von aus Kiefern-Faserstoff hergestellten MDF“, Holz als Roh- und Werkstoff 53, S. 8 – 11, Springer-Verlag
- ROFFAEL, E., HÜSTER, H. (1996)**, „Zur Verwertung von Industrierestholz in Deutschland“, Holz-Zentralblatt Nr. 100/101, S. 1504 – 1506
- ROFFAEL, E. (1997)**, „Stand der Kenntnisse beim Recycling von Holzwerkstoffen“, Recycling-konzepte der Holzwerkstoffindustrie. Herausgeber: A. Kharazipour, E. Roffael
- ROFFAEL, E.; SCHNEIDER, T.; DIX, B.; KRUG, D.; STEPHANI, B. (2003)**, „Blowline contra Blender“, MDF-Magazin, 2003, S. 16 - 22
- RUG, W.; SEEMANN, A. (1988)**, „Festigkeit von Altholz“, Holztechnologie–Leipzig 29, S. 186 – 190
- RUNKEL, R.O.H. (1951)**, „Zur Kenntnis des thermoplastischen Verhaltens von Holz. 1. Mitteilung“, Holz als Roh- und Werkstoff 9, Berlin, S. 41 – 53
- RUNKEL, R.O.H. (1951a)**, „Zur Kenntnis des thermoplastischen Verhaltens von Holz. 2. Mitteilung“, Holz als Roh- und Werkstoff 9, Berlin, S. 260 – 270
- RUNKEL, R.O.H.; WITT, H. (1953)**, „Zur Kenntnis des thermoplastischen Verhaltens von Holz. Dritte Mitteilung. Über die wasser- und alkohollöslichen Anteile in hitzeplastifiziertem Holz. Ergebnisse einer papierchromatographischen Untersuchung“, Holz als Roh- und Werkstoff 11, S. 457 – 431
- RUTSCHMANN, C. (1991)**, „Die energetische Nutzung von Altholz“, Holz-Zentralblatt Nr. 122, S. 1907
- RUVO de, A.; HTUN, M. (1981)**, „Fundamental and practical aspects of paper-making with recycled fibres“, In: Brander, J. (Hrsg.): The Role of Fundamental Research in Paper Making. Vol. 1. London: BPBIF, Mechanical Engineering Publications Ltd., S. 195 – 225
- SALINGER, C.M. (1989)**, „Chemische Grundlagen und Besonderheiten der Holz- und Holzwerkstoffverbrennung“, Holztechnologie 30, 6
- SANDBERG, A.G. (1965)**, „Verfahren zur Wiedergewinnung von Spanmaterial aus mit ausgehärteten Bindemitteln durchsetzten Abfällen, Sägespänen, Müll usw. für die Herstellung von Spanplatten und ähnlichen geleimten und gepressten Erzeugnissen, dadurch gekennzeichnet, dass der Abfall oder dgl. der Einwirkung von überspanntem Dampf ausgesetzt wird“, Deutsches Patentamt, Auslegeschrift 1 201 045. 19.09.1965
- SANDERMANN, W.; AUGUSTIN, H. (1963)**, „Chemische Untersuchungen über die thermische Zersetzung von Holz. Stand der Forschung“, Holz als Roh- und Werkstoff 21, S. 256 – 265
- SANDERMANN, W.; AUGUSTIN, H. (1964)**, „Chemische Untersuchungen des Zersetzungsablaufes“, Holz als Roh- und Werkstoff 22, S. 377 – 386
- SCHÄFER, M. (1996)**, „Einfluss der Lagerung von Fichten- und Kiefern-Industrierestholz aus der Profilerspannung auf die Eigenschaften von Spanplatten und mitteldichten Faserplatten (MDF)“, Dissertation an der Georg-August Universität Göttingen, 273 S.

- SCHÄFER, M.; ROFFAEL, E. (2000)**, „On the formaldehyde release of wood“, Holz als Roh- und Werkstoff 58, S. 259 – 264
- SCHLIPPHAK, G. (1965)**, „Das Sandberg-Verfahren zur Rückgewinnung von Spänen aus Spanplattenabfällen“, Holz als Roh- und Werkstoff 4, S. 154 – 155
- SCHMIDT, O.; LIESE, W. (1966)**, „Elektronenmikroskopische Beobachtungen an Hyphen von Holzpilzen“, Beih 1 Mat Org: S. 251 – 261
- SCHMIDT, O. (1985)**, „Occurrence of micro organisms in the wood of Norway spruce trees from polluted sites“, Eur J For Pathol 15, S. 2 – 10
- SCHMIDT, O.; KERNER-GANG, W. (1986)**, „Natural materials“, In: Rehm H.-J., Reed G (eds) Microbial degradations, Vol. 8. Biotechnology. VCH Verlagsgesellschaft, Weinheim, S. 557 – 582
- SCHMIDT, O.; WALTER, K. (1978)**, „Succession and activity of microorganisms in stored bagasse“, Eur J Appl Microbiol Biotechnol 5, S. 69 - 77
- SCHMIDT, O. (1994)**, „Holz- und Baumpilze. Biologie, Schäden, Schutz, Nutzen“, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 246 S.,
- SCHNEIDER, T.; ROFFAEL, E.; MAY, H.-A. (1982)**, „Untersuchungen über den Einfluss von Rohdichte, Bindemittelaufwand und Spänebeschaffenheit auf das Sorptionsverhalten und die Dickenquellung von Holzspanplatten“, Holz als Roh- und Werkstoff 40, 9, S. 339 - 344
- SCHNEIDER, T. (2000)**, „Untersuchungen über den Einfluss von Aufschlussbedingungen des Holzes und der Faserstofftrocknung auf die Eigenschaften von mitteldichten Faserplatten (MDF)“, Dissertation 2000
- SCHNEIDER, T. ; ROFFAEL, E. ; DIX, B. (2001)**, „Farbverkernung begünstigt die MDF-Eigenschaften“, WKI-Mitteilung 779/2001
- SCHOEMAKER, H.E.; TUOR, U.; SCHMIDT, H.W.H.; LEISOLA, M.S.A. (1991)**, „White-rot degradation of lignin and xenobiotics“, In : Betts W.E. (ed) Biodegradation: natural and synthetic compounds. Springer-Verlag, London, S. 157 – 174
- SCHRIEVER, E.; BOEHME, C. (1984)**, „Bestimmung von mineralischen Bestandteilen in Spanplatten“, Holz als Roh- und Werkstoff 42, S. 51 – 54
- SCHUMANN, A. (2000)**, „Holzschutzmittel im Gebrauch Bestimmung, Probenahme, Analysemethoden, Schnellerkennungsverfahren“, WKI-Mitteilung 746/2000
- SCHWALBE, C.G. (1921)**, „Einige Betrachtungen über Holz Zellstoffkochung, insbesondere die Sulfitzellstoffkochung“, Zellstoff Papier 1, Nr. 1, S. 11 – 15
- SEEHANN, G.; LIESE, W.; KESS, B. (1975)**, „List of fungi in soft-rot test“, IRG / WP / 105, 72 S.
- SELL, J. (1968)**, „Untersuchungen über die Besiedlung von unbehandeltem und angestrichenem Holz durch Bläuepilze“, Holz als Roh- und Werkstoff 26, S. 215 – 222
- SENNEBOGEN, L. (1991)**, „Abhebefestigkeit und Folienabschälfestigkeit von Spanplatten in Abhängigkeit von Spangrößenverteilung und Beileimungsfaktoren der Deckschicht“, Diplomarbeit Berufsakademie Mosbach

- SINKEY, J.D. (1983)**, „Analyzing the effects of sulfonation in softwood chemi-mechanical pulping“, Paper Trade Journal, 8, S. 23 – 30
- SKAAR, C. (1972)**, „Water in Wood“, Syracuse Wood Science Series, Vol. 4. ISBN 0-9156-5034-5
- SOINÉ, H. (1994)**, „Holz im Kreislauf“, HK 2/94, S. 164 – 165
- SOINÉ, H. (2001)**, „Hartholz – MDF“, MDF-Magazin 2001, S. 30 - 36
- SPECKELS, L. (2001)**, „Ökologischer Vergleich verschiedener Verwertungs- und Entsorgungswege für Altholz“, Mitteilungen der Bundesforschungsanstalt für Forst- und Holzwirtschaft Hamburg, Kommissionsverlag Max Wiedebusch, Nr. 205, ISSN 0368-8798
- SPRINGER, S. (1999)**, „Lässt Blumen wachsen aber brennt schlecht“, Holzbau-Magazin 1/1999, S. 38-42
- STAMM, A.J. (1956)**, „Thermal Degradation of Wood and Cellulose“, Ind. Eng. Chem. Bd. 48, S. 413 – 417
- STELZER, O.F. (1994)**, „Recyclingholz und seine maschinelle Aufarbeitung (1)“, HK 2/94, S.170 - 173
- STONE, J.E.; SCALLAN, A.M.; ABRAHAMSON, B. (1968)**, „Influence of beating on cell wall swelling and internal fibrillation“, Svensk Papperstidn. 71, Nr. 19, S. 687 – 694
- STRECKER, M.; MARUTZKY, R. (1993)**, „Untersuchungen von Holz und Holzwerkstoffen auf Holzschutzmittel und deren Emissionen bei der Verbrennung“, UBA-Forschungsvorhaben 76-10403518, Abschlussbericht, 86 S.
- SUNDERMANN, B.; SPODEN, F.; DOHR, R. (1999)**, „Aufkommen und Verwertungswege für Altholz in Deutschland“, Müll und Abfall 5/1999, S. 269 – 274
- SUTTER, H.-P. (1986)**, „Holzschädlinge an Kulturgütern erkennen und bekämpfen“, Haupt, Bern
- TASMAN, J.E. (1972)**, „The Fibre Length of Bauer McNett Screen Fractions“, TAPPI, Vol. 55, Nr. 1, S. 136 – 138
- THODE, E.F.; CHASE, A.J.; MAJMUDAR, S.S.; MCKINNON, D.R. (1953)**, „Dye Adsorption on Wood Pulp. III. Effect of Pulp Processing on Specific Adsorption“, Tappi 36, No. 11, S. 498 – 504
- THODE, E.F.; CHASE, A.J.; HU, Y. (1955)**, „Dye Adsorption on Wood Pulp. IV. Note on Effect of Drying of Pulp on Specific Dye Adsorption“, Tappi 38, No. 2, S. 88 – 89
- THOLE, V. (2001)**, „Faserplatten aus Palmenresten“, Holz und Kunststoff Nr. 4/2001, S. 90 – 92
- TJEERDSMA, B.; STEVENS, M.; MILITZ, H.; ACKER, J. van (2002)**, „Effect of process conditions on moisture content and decay resistance of hydro-thermally treated wood“, Holzforschung / Holzverwertung, Wien 54, 5, S. 94 – 96, 98 – 99
- TRENDELENBURG, R.; MAYER-WEGELIN, H. (1955)**, „Das Holz als Rohstoff“, 2. Auflage, Carl Hanser Verlag / München, 541 S.
- TSUCHIKAWA, S.; HAYASHI, K.; TSUTSUMI, S. (1992)**, „Application of near Infrared Spectroscopy to Wood I. Effects of surface structure“, Mokuzai Gakkaishi 38, S. 128 – 136

- VAUCK, W.R.A. (1994)**, „Grundoperationen chemischer Verfahrenstechnik“, Deutscher Verlag der Grundstoffindustrie 10. Auflage, Seite: 336-365, Kapitel: Klassieren und Sortieren
- VAUCK, W.R.A. (2000)**, „Grundoperationen chemischer Verfahrenstechnik“, Deutscher Verlag der Grundstoffindustrie 11. überarbeitete Auflage; Seite: 222-223
- VÖLKER, M. (2000)**, „Altholz: Wie aussagefähig sind die Messwerte?“, Holz-Zentralblatt 147, S. 2044
- VOLKMER, T.; PECINA, H.; WAGENFÜHR, A.; BUCHELT, B. (2002)**, „Anatomische und mechanische Untersuchungen an längsgestauchtem Holz“, Forschung / Entwicklung Nr.2, S. 41 – 44
- VOGT, M. (2000)**, „Holzschutzmittel in Gebrauchtholz. Bestimmung, Probenahme, Analysemethoden, Schnellerkennungsverfahren“, WKI-Mitteilung 746/2000
- VOGT, M.; KEHRBUSCH, P. (2000)**, „Die Röntgen-Fluoreszenz-Analytik zum Nachweis von Chlor und Schwermetallen in Holz – Erfahrungen in Labor und Feldtest“, In: Marutzky, R. Bahadir, M.: Bestimmung von Holzschutzmitteln in Gebrauchtholz. Workshop des Wilhelm-Klauditz-Instituts, Braunschweig März 2000, WKI-Bericht Nr. 36
- VOGT, M.; SCHULZE, A.; WYLAMRZY, J. (2003)**, „Geringe Kosten, hoher Nutzen“, Müllmagazin 1/2003, S. 17 - 23
- VOSS, A.; BRINGEZU, S. (1993)**, „Hinweise zur Entsorgung von holzschutzmittelbehandeltem Altholz“, Müll- Handbuch. Hrsg. G. Hösel, W. Schenkel und H. Schnurer, 6/93, Kennzahl 8565, Berlin: Erich Schmidt Verl., 19 S.
- VOSS, A.; WILLEITNER, H. (1994)**, „Gesamtkonzept für die Entsorgung von schutzmittelhaltigen Hölzern“, Forschungsbericht d. Bundesforschungsanstalt f. Forst- u. Holzwirtschaft, Hamburg, 252 S.
- WAGENFÜHR, A. (1988)**, „Anwendung der Biotechnologie in der Holz- und Faserwerkstofftechnik“, Dissertation, TU Dresden
- WALTERS, G. D. (1990)**, „Medium density fibreboard blowline blending-theories in and around the black box“, Proceedings of NPA Resin and Blending Seminar. National Particleboard Association, Gaithersburg, MD, USA, S. 56 – 61
- WEBER, B. (1986)**, „Wovon ist die Lebensdauer der Holzfenster abhängig?“, Deutsches Malerblatt 3, S. 192 – 194
- WEGENER, G.; FENGEL, D. (1988)**, „Zum Stand der chemischen und mikroskopischen Untersuchung an trocknungsverfärbtem Eichenschnittholz“, Holz-Zentralblatt 114, S. 2238 – 2241
- WEGENER, G.; FRÜHWALD, A. (1994a), (1994b)**, „Der Beitrag der Holzverwendung zum Umweltschutz“, 7. Internationaler Kongress Interforst, Forstliche Forschungsberichte München, 142, S. 121 – 131
- WIESE, U.; PAULAPURO, H. (1996)**, „Der Zusammenhang zwischen Faserschrumpfung und Verhornung“, Das Papier 6, S. 328 – 333
- WILLEITNER, H; BUCKI, C. (1994)**, „Möglichkeiten und Grenzen der stofflichen Verwertung von Holzprodukten nach Gebrauch“, 9. Holztechnologisches Kolloquium (HTK), S. 1 – 10

WOLF, F.; LIESE, W. (1977), „Zur Bedeutung von Schimmelpilzen für die Holzqualität“, Holz als Roh- und Werkstoff 35, S. 53 – 57

XING, C.; RIEDL, B; CLOUTIER, A. (2002), „New Method to Measure Urea-Formaldehyde Resin Coverage on Wood Fibers by Laser Scanning Microscopy and Image Analysis“, unveröffentlicht

Zitierte Normen

DIN EN 120, Holzwerkstoffe: Bestimmung des Formaldehydgehaltes, Beuth Verlag, Berlin 1992

DIN EN 310, Holzwerkstoffe: Bestimmung des Biege-Elastizitätsmoduls und der Biegefestigkeit, Beuth Verlag, Berlin 1993

DIN EN 319, Spanplatten und Faserplatten: Bestimmung der Zugfestigkeiten senkrecht zur Plattenebene, Beuth Verlag, Berlin 1993

DIN EN 311, Spanplatten: Abhebefestigkeit von Spanplatten, Beuth Verlag, Berlin 1992

DIN EN 322, Holzwerkstoffe: Bestimmung des Feuchtegehaltes, Beuth Verlag, Berlin 1993

DIN EN 317, Spanplatten und Faserplatten: Bestimmung der Dickenquellung nach Wasserlagerung, Beuth Verlag, Berlin 1993

DIN 52351, Prüfung von Holzfasernplatten: Bestimmung des Feuchtigkeitsgehaltes, der Wasseraufnahme und der Dickenquellung, Beuth Verlag, Berlin, 1956

DIN EN 622, Faserplatten: Anforderungen Teil 1 bis 5, Beuth Verlag, Berlin, 1997

DIN EN 323, Holzwerkstoffe: Bestimmung der Rohdichte, Beuth Verlag, Berlin, 1993

9 Anhang

9.1 Freeness Scale Interconversion Tabelle

FREENESS SCALE INTERCONVERSION								
DEFIBRATOR 128g in 10000 ml	CANADIAN STANDARD 3g 20 C	SCHOPPER REGLER 2g 20 C	3g 25 C	WILLIAMS PRECISION 4g 25 C	Kraft pulp	MOTSCHMAN SLOWNESS 1g 20 C Unbleached Sulphite	ORIGINAL GREEN 3g 20 C	WILLIAMS MODEL - 27 4g 20 C
	1000							
	975							
	950							
	925							
	900							
	875							
12,0	850		0	0				
17,0	825		4	4				
22,0	800	11,0	7	7	0	0	730	855
28,0	775	12,0	8	8			720	830
35,0	750	13,0	10	10	15	15	705	806
41,8	725	14,0	13	13	19	19	690	780
51,0	700	15,0	16	16	23	23	675	757
61,0	675	16,0	18	19	27	28	660	728
72,0	650	17,0	21	22	31	34	645	707
87,0	625	18,0	24	25	36	39	625	680
110,0	600	20,0	27	30	41	45	610	655
	575	21,0	31	34	46	50	595	630
	550	22,0	35	39	51	56	575	607
	525	24,0	40	44	57	62	560	580
	500	26,0	45	49	63	69	535	555
	475	27,0	49	56	69	75	515	530
	450	28,0	55	63	77	83	495	505
	425	30,0	62	73	85	91	470	480
	400	32,0	66	80	93	100	445	457
	375	34,0	76	91	103	109	420	432
	350	36,0	85	102	114	120	395	408
	325	38,0	96	115	125	132	365	385
	300	41,0	108	129	139	145	330	358
	275	43,0	121	145	153	160	305	330
	250	46,0	138	165	169	178	275	305
	225	48,0	153	195	187	197	240	282
	200	52,0	170	217	208	216	210	258
	175	55,0	205	252	227	238	175	232
	150	58,0	240	297	249	257	145	210
	125	63,0		370	272	279	115	183
	100	66,0			297	303	90	157
	75	70,0			322	330		
	50	73,0			350	364		
	25	78,0			390	420		
	0						0	

9.2 Einfluss variierender Aufschlussbedingungen auf die Eigenschaften von Alt- und Frischholzfasern

Tab. 1: Rohdichten von 16 mm dicken Labor-MDF, deren Fasern aus reinem Kiefernaltholz mit unterschiedlichen Aufschlussparametern hergestellt wurden (N = 2)

Bezeichnung	Rohdichte (n = 10)				
	Kleinstwert min x_i kg/m ³	Größtwert max x_i kg/m ³	Mittelwert \bar{x} kg/m ³	Standardabweichung s_x kg/m ³	Variationskoeffizient V %
Fa. E: Ki Altholz*, (3 min/150°C)	685	743	707	19,25	2,72
Fa. E: Ki Altholz, (8 min/150°C)	675	735	703	21,69	3,08
Fa. E: Ki Altholz, (3 min/180°C)	668	721	703	17,20	2,45
Fa. E: Ki Altholz, (8 min/180°C)	670	742	698	20,88	2,99
Fa. E: Ki Altholz, 24 Std. H ₂ O -Lagerung (3 min/150°C)**	682	737	709	21,23	3,00
Fa. E: Ki Altholz, 24 Std. H ₂ O -Lagerung (8 min/180°C)	640	733	701	30,32	4,32

* Kiefernaltholz der Firma E mit Holzfeuchte die im Abschnitt 6.5 in Tab. 6.10 aufgeführt ist; in Klammern die Aufschlussbedingungen

** Kiefernaltholz der Firma E mit einer 24 stündigen Wasserlagerung der Hackschnitzel; in Klammern die Aufschlussbedingungen

Tab. 2: Biege-E-Modulwerte von 16 mm dicken Labor-MDF, deren Fasern aus reinem Kiefernaltholz mit unterschiedlichen Aufschlussparametern hergestellt wurden (N = 2)

Bezeichnung	Biege-E-Modul (n = 12)				
	Kleinstwert min x_i N/mm ²	Größtwert max x_i N/mm ²	Mittelwert \bar{x} N/mm ²	Standardabweichung s_x N/mm ²	Variationskoeffizient V %
Fa. E: Ki Altholz, (3 min/150°C)*	3449	3910	3711	237	6,38
Fa. E: Ki Altholz, (8 min/150°C)	3271	3898	3607	245	6,80
Fa. E: Ki Altholz, (3 min/180°C)	3677	3994	3843	159	4,15
Fa. E: Ki Altholz, (8 min/180°C)	3116	3760	3472	238	3,84
Fa. E: Ki Altholz, 24 Std. H ₂ O -Lagerung (3 min/150°C)**	3259	3859	3630	262	7,21
Fa. E: Ki Altholz, 24 Std. H ₂ O -Lagerung (8 min/180°C)	3342	4044	3706	314	8,48

* Kiefernaltholz der Firma E mit Holzfeuchte die im Abschnitt 6.5 in Tab. 6.10 aufgeführt ist; in Klammern die Aufschlussbedingungen

** Kiefernaltholz der Firma E mit einer 24 stündigen Wasserlagerung der Hackschnitzel; in Klammern die Aufschlussbedingungen

Tab. 3: Biegefestigkeiten von 16 mm dicken Labor-MDF, deren Fasern aus reinem Kiefernaltholz mit unterschiedlichen Aufschlussparametern hergestellt wurden (N = 2)

Bezeichnung	Biegefestigkeit (n = 12)				
	Kleinstwert min x_i N/mm ²	Größtwert max x_i N/mm ²	Mittelwert \bar{x} N/mm ²	Standardab- weichung s_x N/mm ²	Variations- koeffizient V %
Fa. E: Ki Altholz, (3 min/150°C)*	38,3	45,7	42,6	3,1	7,16
Fa. E: Ki Altholz, (8 min/150°C)	38,1	48,3	44,1	3,7	8,35
Fa. E: Ki Altholz, (3 min/180°C)	43,2	49,5	45,6	2,4	5,25
Fa. E: Ki Altholz, (8 min/180°C)	30,4	40,1	35,9	3,3	9,18
Fa. E: Ki Altholz, 24 Std. H ₂ O -Lagerung (3 min/150°C)**	33,6	45,1	40,4	4,2	10,40
Fa. E: Ki Altholz, 24 Std. H ₂ O -Lagerung (8 min/180°C)	38,0	45,1	42,2	3,5	8,16

* Kiefernaltholz der Firma E mit Holzfeuchte die im Abschnitt 6.5 in Tab. 6.10 aufgeführt ist; in Klammern die Aufschlussbedingungen

** Kiefernaltholz der Firma E mit einer 24 stündigen Wasserlagerung der Hackschnitzel; in Klammern die Aufschlussbedingungen

Tab. 4: Querzugfestigkeiten von 16 mm dicken Labor-MDF, deren Fasern aus reinem Kiefernaltholz mit unterschiedlichen Aufschlussparametern hergestellt wurden (N = 2)

Bezeichnung	Querzugfestigkeit (n = 20)				
	Kleinstwert min x_i N/mm ²	Größtwert max x_i N/mm ²	Mittelwert \bar{x} N/mm ²	Standardab- weichung s_x N/mm ²	Variations- koeffizient V %
Fa. E: Ki Altholz, (3 min/150°C)*	0,64	0,70	0,67	0,02	3,60
Fa. E: Ki Altholz, (8 min/150°C)	0,64	0,74	0,66	0,03	4,58
Fa. E: Ki Altholz, (3 min/180°C)	0,56	0,67	0,60	0,04	6,25
Fa. E: Ki Altholz, (180°C/8 min.)	0,72	1,09	0,87	0,11	12,79
Fa. E: Ki Altholz, 24 Std. H ₂ O -Lagerung (3 min/150°C)**	0,52	0,70	0,61	0,06	10,40
Fa. E: Ki Altholz, 24 Std. H ₂ O -Lagerung (8 min/180°C)	0,54	0,66	0,59	0,05	8,00

* Kiefernaltholz der Firma E mit Holzfeuchte die im Abschnitt 6.5 in Tab. 6.10 aufgeführt ist; in Klammern die Aufschlussbedingungen

** Kiefernaltholz der Firma E mit einer 24 stündigen Wasserlagerung der Hackschnitzel; in Klammern die Aufschlussbedingungen

Tab. 5: Abhebefestigungen von 16 mm dicken Labor-MDF, deren Fasern aus reinem Kiefernaltholz mit unterschiedlichen Aufschlussparametern hergestellt wurden (N = 2)

Bezeichnung	Abhebefestigkeit (n = 20)				
	Kleinstwert min x_i N/mm ²	Größtwert max x_i N/mm ²	Mittelwert \bar{x} N/mm ²	Standardab- weichung s_x N/mm ²	Variations- koeffizient V %
Fa. E: Ki Altholz, (3 min/150°C)*	1,69	2,23	1,99	0,18	8,83
Fa. E: Ki Altholz, (8 min/150°C)	1,74	2,18	1,98	0,13	6,56
Fa. E: Ki Altholz, (3 min/180°C)	1,70	2,34	1,93	0,24	12,37
Fa. E: Ki Altholz, (8 min/180°C)	1,70	2,34	2,07	0,26	12,38
Fa. E: Ki Altholz, 24 Std. H ₂ O -Lagerung (3 min/150°C)**	1,77	2,08	1,91	0,10	5,15
Fa. E: Ki Altholz, 24 Std. H ₂ O -Lagerung (8 min/180°C)	1,40	2,29	1,97	0,27	13,85

* Kiefernaltholz der Firma E mit Holzfeuchte die im Abschnitt 6.5 in Tab. 6.10 aufgeführt ist; in Klammern die Aufschlussbedingungen

** Kiefernaltholz der Firma E mit einer 24 stündigen Wasserlagerung der Hackschnitzel; in Klammern die Aufschlussbedingungen

Tab. 6: Rohdichten von 16 mm dicken Labor- MDF, deren Fasern aus reinem Kiefernfrischholz mit unterschiedlichen Aufschlussparametern hergestellt wurden (N = 2)

Bezeichnung	Rohdichte (n = 10)				
	Kleinstwert min x_i kg/m ³	Größtwert max x_i kg/m ³	Mittelwert \bar{x} kg/m ³	Standardab- weichung s_x kg/m ³	Variations- koeffizient V %
F Ref. Ki, (3 min/150°C)*	659	728	702	24,31	3,46
F Ref. Ki, (8 min/150°C)	666	735	704	20,45	2,91
F Ref. Ki, (3 min/180°C)	661	744	701	28,49	4,06
F Ref. Ki, (8 min/180°C)	655	732	714	29,76	4,17
F Ref. Ki, 24 Std. H ₂ O - Lagerung (3 min/150°C)**	603	769	702	48,63	6,93
F Ref. Ki, 24 Std. H ₂ O - Lagerung (8 min/180°C)	673	731	702	16,95	2,41

* Referenz Kiefernfrischholz mit Holzfeuchte nach Fällung des Baumes; in Klammern die Aufschlussbedingungen

** Referenz Kiefernholz mit einer 24 stündigen Wasserlagerung der Hackschnitzel; in Klammern die Aufschlussbedingungen

Tab. 7: Biege-E-Modulwerte von 16 mm dicken Labor-MDF, deren Fasern aus reinem Kiefernfrischholz mit unterschiedlichen Aufschlussparametern hergestellt wurden (N = 2)

Bezeichnung	Biege-E-Modul (n = 12)				
	Kleinstwert min x_i N/mm ²	Größtwert max x_i N/mm ²	Mittelwert \bar{x} N/mm ²	Standardab- weichung s_x N/mm ²	Variations- koeffizient V %
F Ref. Ki, (3 min/150°C)*	3487	3898	3674	204	5,54
F Ref. Ki, (8 min/150°C)	3489	4126	3810	218	5,71
F Ref. Ki, (3 min/180°C)	3339	4213	3797	330	8,69
F Ref. Ki, (8 min/180°C)	3759	4317	4083	221	5,41
F Ref. Ki, 24 Std. H ₂ O - Lagerung (3 min/150°C)**	3092	3693	3422	219	6,41
F Ref. Ki, 24 Std. H ₂ O - Lagerung (8 min/180°C)	3272	3998	3634	338	9,31

* Referenz Kiefernfrischholz mit Holzfeuchte nach Fällung des Baumes; in Klammern die Aufschlussbedingungen

** Referenz Kiefernholz mit einer 24 stündigen Wasserlagerung der Hackschnitzel; in Klammern die Aufschlussbedingungen

Tab. 8: Biegefestigkeiten von 16 mm dicken Labor-MDF, deren Fasern aus reinem Kiefernfrischholz mit unterschiedlichen Aufschlussparametern hergestellt wurden (N = 2)

Bezeichnung	Biegefestigkeiten (n = 12)				
	Kleinstwert min x_i N/mm ²	Größtwert max x_i N/mm ²	Mittelwert \bar{x} N/mm ²	Standardab- weichung s_x N/mm ²	Variations- koeffizient V %
F Ref. Ki, (3 min/150°C)*	38,1	48,3	44,1	3,7	8,35
F Ref. Ki, (8 min/150°C)	42,0	50,9	46,6	3,3	6,99
F Ref. Ki, (3 min/180°C)	40,1	48,8	44,9	3,9	8,80
F Ref. Ki, (8 min/180°C)	43,6	48,5	46,7	1,9	4,01
F Ref. Ki, 24 Std. H ₂ O - Lagerung (3 min/150°C)**	33,9	41,2	38,6	2,7	6,93
F Ref. Ki, 24 Std. H ₂ O - Lagerung (8 min/180°C)	38,6	45,6	40,9	3,2	7,71

* Referenz Kiefernfrischholz mit Holzfeuchte nach Fällung des Baumes; in Klammern die Aufschlussbedingungen

** Referenz Kiefernholz mit einer 24 stündigen Wasserlagerung der Hackschnitzel; in Klammern die Aufschlussbedingungen

Tab. 9: Querzugfestigkeiten von 16 mm dicken Labor-MDF, deren Fasern aus reinem Kiefernfrischholz mit unterschiedlichen Aufschlussparametern hergestellt wurden (N = 2)

Bezeichnung	Querzugfestigkeit (n = 20)				
	Kleinstwert min x_i N/mm ²	Größtwert max x_i N/mm ²	Mittelwert \bar{x} N/mm ²	Standardab- weichung s_x N/mm ²	Variations- koeffizient V %
F Ref. Ki, (3 min/150°C)*	0,59	0,68	0,64	0,03	5,05
F Ref. Ki, (8 min/150°C)	0,57	0,76	0,68	0,05	7,91
F Ref. Ki, (3 min/180°C)	0,54	0,64	0,59	0,04	6,58
F Ref. Ki, (8 min/180°C)	0,49	0,63	0,56	0,05	9,36
F Ref. Ki, 24 Std. H ₂ O - Lagerung (3 min/150°C)**	0,45	0,49	0,48	0,02	3,19
F Ref. Ki, 24 Std. H ₂ O - Lagerung (8 min/180°C)	0,42	0,48	0,46	0,02	3,97

* Referenz Kiefernfrischholz mit Holzfeuchte nach Fällung des Baumes; in Klammern die Aufschlussbedingungen

** Referenz Kiefernholz mit einer 24 stündigen Wasserlagerung der Hackschnitzel; in Klammern die Aufschlussbedingungen

Tab. 10: Abhebefestigkeiten von 16 mm dicken Labor-MDF, deren Fasern aus reinem Kiefernfrischholz mit unterschiedlichen Aufschlussparametern hergestellt wurden (N = 2)

Bezeichnung	Abhebefestigkeit (n = 20)				
	Kleinstwert min x_i N/mm ²	Größtwert max x_i N/mm ²	Mittelwert \bar{x} N/mm ²	Standardab- weichung s_x N/mm ²	Variations- koeffizient V %
F Ref. Ki, (3 min/150°C)*	1,46	2,06	1,81	0,21	11,42
F Ref. Ki, (8 min/150°C)	1,66	2,26	1,97	0,19	9,64
F Ref. Ki, (3 min/180°C)	1,37	1,99	1,70	0,20	11,72
F Ref. Ki, (8 min/180°C)	1,51	2,21	1,87	0,20	10,75
F Ref. Ki, 24 Std. H ₂ O - Lagerung (3 min/150°C)**	0,77	1,79	1,23	0,39	32,08
F Ref. Ki, 24 Std. H ₂ O - Lagerung (8 min/180°C)	1,40	1,87	1,61	0,15	9,10

* Referenz Kiefernfrischholz mit Holzfeuchte nach Fällung des Baumes; in Klammern die Aufschlussbedingungen

** Referenz Kiefernholz mit einer 24 stündigen Wasserlagerung der Hackschnitzel; in Klammern die Aufschlussbedingungen

9.3 Auswirkung unterschiedlicher Holzfeuchten auf die Qualität von Alt- und Frischholzfasern zur MDF-Herstellung

Tab. 1: Rohdichten von 16 mm dicken Labor-MDF, deren Fasern aus Altholzhackspänen mit unterschiedlichen Holzfeuchten hergestellt wurden (N = 2)

Firma	Rohdichte (n = 10)				
	Kleinstwert min x_i kg/m ³	Größtwert max x_i kg/m ³	Mittelwert \bar{x} kg/m ³	Standardabweichung s_x kg/m ³	Variationskoeffizient V %
Ba* mit u= 15%	690	717	698	7,55	1,08
Ba mit u= 23%	672	755	702	22,35	3,19
Ba mit u= 35%	669	733	702	16,00	2,23
Ba mit u= 50%	681	728	701	13,44	1,92
Ba mit u= 90%	682	729	703	13,11	1,86
Ref.F**	686	731	702	12,89	1,83

u= Holzfeuchte

* Ba = Fa. B mit Prozesskennbuchstabe

** Referenzplatte aus Kiefernfrischholz

Tab. 2: Biege-E-Modulwerte von 16 mm dicken Labor-MDF, deren Fasern aus Altholzhackspänen mit unterschiedlicher Holzfeuchte hergestellt wurden (N = 2)

Firma	Biege-E-Modul (n = 12)				
	Kleinstwert min x_i N/mm ²	Größtwert max x_i N/mm ²	Mittelwert \bar{x} N/mm ²	Standardabweichung s_x N/mm ²	Variationskoeffizient V %
Ba* mit u= 15%	2900	3143	3022	91	3,00
Ba mit u= 23%	2849	3079	2975	96	3,24
Ba mit u= 35%	2982	3081	3055	32	1,04
Ba mit u= 50%	2830	3153	2984	123	4,14
Ba mit u= 90%	2777	3376	3008	175	5,82
Ref.F**	3505	3981	3738	171	4,57

u= Holzfeuchte

* Ba = Fa. B mit Prozesskennbuchstabe

** Referenzplatte aus Kiefernfrischholz

Tab. 3: Biegefestigkeiten von 16 mm dicken Labor-MDF, deren Fasern aus Altholzhackspänen mit unterschiedlichen Holzfeuchten hergestellt wurden (N = 2)

Firma	Biegefestigkeit (n = 12)				
	Kleinstwert min x_i N/mm ²	Größtwert max x_i N/mm ²	Mittelwert \bar{x} N/mm ²	Standardabweichung s_x N/mm ²	Variationskoeffizient V %
Ba* mit u= 15%	22,2	26,7	23,6	1,5	6,29
Ba mit u= 23%	20,9	26,9	23,6	1,8	7,71
Ba mit u= 35%	22,7	25,6	24,4	1,0	4,23
Ba mit u= 50%	19,8	23,5	22,2	1,3	5,80
Ba mit u= 90%	21,5	28,3	23,7	2,2	9,06
Ref.F**	32,4	37,9	35,6	2,2	6,24

u= Holzfeuchte

* Ba = Fa. B mit Prozesskennbuchstabe

** Referenzplatte aus Kiefernfrischholz

Tab. 4: Querzugfestigkeiten von 16 mm dicken Labor-MDF, deren Fasern aus Altholzhackspänen mit unterschiedlichen Holzfeuchten hergestellt wurden (N = 2)

Firma	Querzugfestigkeit (n =20)				
	Kleinstwert min x_i N/mm ²	Größtwert max x_i N/mm ²	Mittelwert \bar{x} N/mm ²	Standardabweichung s_x N/mm ²	Variationskoeffizient V %
Ba* mit u= 15%	0,20	0,26	0,22	0,02	9,19
Ba mit u= 23%	0,16	0,26	0,22	0,03	13,58
Ba mit u= 35%	0,16	0,28	0,23	0,04	17,32
Ba mit u= 50%	0,21	0,27	0,24	0,02	7,61
Ba mit u= 90%	0,19	0,33	0,28	0,03	12,14
Ref.F**	0,29	0,42	0,38	0,03	7,73

u= Holzfeuchte

* Ba = Fa. B mit Prozesskennbuchstabe

** Referenzplatte aus Kiefernfrischholz

Tab. 5: Abhebefestigkeiten von 16 mm dicken Labor-MDF, deren Fasern aus Altholzhackspänen mit unterschiedlichen Holzfeuchten hergestellt wurden (N = 2)

Firma	Abhebefestigkeit (n = 20)				
	Kleinstwert min x_i N/mm ²	Größtwert max x_i N/mm ²	Mittelwert \bar{x} N/mm ²	Standardabweichung s_x N/mm ²	Variationskoeffizient V %
Ba* mit u= 15%	0,63	1,01	0,81	0,10	12,29
Ba mit u= 23%	0,54	1,00	0,76	0,12	15,75
Ba mit u= 35%	0,46	0,91	0,75	0,12	15,30
Ba mit u= 50%	0,23	0,89	0,58	0,17	30,16
Ba mit u= 90%	0,63	0,98	0,77	0,10	12,79
Ref.F**	1,05	1,47	1,28	0,13	10,53

u= Holzfeuchte

* Ba = Fa. B mit Prozesskennbuchstabe

** Referenzplatte aus Kiefernfrischholz

Tab. 6: Rohdichten von 16 mm dicken Labor-MDF, deren Fasern aus befeuchteten Altholzhackspänen mit einer 3-minütigen Vordämpfung hergestellt wurden (N = 2)

Rohdichte (n = 10)					
Firma	Kleinstwert min x_i kg/m ³	Größtwert max x_i kg/m ³	Mittelwert \bar{x} kg/m ³	Standardab- weichung s_x kg/m ³	Variations- koeffizient V %
Bd* mit u= 15%	649	757	704	27,41	3,89
Bd mit u= 35%	648	727	706	21,38	3,03
Bd mit u= 90%	677	736	713	17,76	2,49
Ref.Fd**	648	740	703	18,99	2,70

* Bd = Fa. B mit Prozesskennbuchstabe

** Referenzplatte aus Kiefernfrischholz

u = Holzfeuchte

Tab. 7: Biege-E-Modulwerte von 16 mm dicken Labor-MDF, deren Fasern aus befeuchteten Altholzhackspäne mit einer 3-minütigen Vordämpfung hergestellt wurden (N = 2)

Biege-E-Modul (n = 12)					
Firma	Kleinstwert min x_i N/mm ²	Größtwert max x_i N/mm ²	Mittelwert \bar{x} N/mm ²	Standardab- weichung s_x N/mm ²	Variations- koeffizient V %
Bd* mit u= 15%	2744	3496	3006	211	7,36
Bd mit u= 35%	3001	3263	3150	96	3,04
Bd mit u= 90%	2580	3403	2999	235	7,82
Ref.Fd**	2965	4109	3664	367	10,01

* Bd = Fa. B mit Prozesskennbuchstabe

** Referenzplatte aus Kiefernfrischholz

u = Holzfeuchte

Tab. 8: Biegefestigkeiten von 16 mm dicken Labor-MDF, deren Fasern aus befeuchteten Altholzhackspänen mit einer 3-minütigen Vordämpfung hergestellt wurden (N = 2)

Biegefestigkeit (n = 12)					
Firma	Kleinstwert min x_i N/mm ²	Größtwert max x_i N/mm ²	Mittelwert \bar{x} N/mm ²	Standardab- weichung s_x N/mm ²	Variations- koeffizient V %
Bd* mit u= 15%	20,5	26,3	23,4	1,8	7,79
Bd mit u= 35%	22,8	25,2	24,3	0,9	3,60
Bd mit u= 90%	20,7	27,0	23,5	1,9	7,97
Ref.Fd**	24,5	40,6	34,2	5,0	14,60

* Bd = Fa. B mit Prozesskennbuchstabe

** Referenzplatte aus Kiefernfrischholz

u = Holzfeuchte

Tab. 9: Querzugfestigkeiten von 16 mm dicken Labor-MDF, deren Fasern aus befeuchteten Altholzhackspänen mit einer 3-minütigen Vordämpfung hergestellt wurden (N = 2)

Firma	Querzugfestigkeit (n = 20)				
	Kleinstwert min x_i N/mm ²	Größtwert max x_i N/mm ²	Mittelwert \bar{x} N/mm ²	Standardab- weichung s_x N/mm ²	Variations- koeffizient V %
Bd* mit u= 15%	0,23	0,33	0,28	0,04	13,28
Bd mit u= 35%	0,27	0,32	0,29	0,02	5,27
Bd mit u= 90%	0,12	0,39	0,28	0,10	36,97
Ref.Fd**	0,20	0,44	0,33	0,08	24,36

* Bd = Fa. B mit Prozesskennbuchstabe
 ** Referenzplatte aus Kiefernfrischholz
 u = Holzfeuchte

Tab. 10: Abhebefestigigkeiten von 16 mm dicken Labor-MDF, deren Fasern aus befeuchteten Altholzhackspänen mit einer 3-minütigen Vordämpfung hergestellt wurden (N = 2)

Firma	Abhebefestigkeit (n = 20)				
	Kleinstwert min x_i N/mm ²	Größtwert max x_i N/mm ²	Mittelwert \bar{x} N/mm ²	Standardab- weichung s_x N/mm ²	Variations- koeffizient V %
Bd* mit u= 15%	0,65	1,01	0,83	0,10	11,86
Bd mit u= 35%	0,75	1,00	0,88	0,06	7,04
Bd mit u= 90%	0,46	0,97	0,75	0,16	21,84
Ref.Fd**	0,26	1,62	1,03	0,48	46,88

* Bd = Fa. B mit Prozesskennbuchstabe
 ** Referenzplatte aus Kiefernfrischholz
 u = Holzfeuchte

Tab. 11: Rohdichten von 16 mm dicken Labor-MDF, deren Fasern aus befeuchteten Altholzhackspänen mit einer 8-minütigen Vordämpfung hergestellt wurden (N = 2)

Firma	Rohdichte (n = 10)				
	Kleinstwert min x_i kg/m ³	Größtwert max x_i kg/m ³	Mittelwert \bar{x} kg/m ³	Standardab- weichung s_x kg/m ³	Variations- koeffizient V %
Bf* mit u= 15%	674	731	704	14,19	2,01
Bf mit u= 35%	694	729	710	10,79	1,52
Bf mit u= 90%	682	731	706	13,63	1,93
Ref.Ff**	679	732	705	12,45	1,77

* Bf = Fa. B mit Prozesskennbuchstabe
 ** Referenzplatte aus Kiefernfrischholz
 u = Holzfeuchte

Tab. 12: Biege-E-Modulwerte von 16 mm dicken Labor-MDF, deren Fasern aus befeuchteten Altholzhackspäne mit einer 8-minütigen Vordämpfung hergestellt wurden (N = 2)

Biege-E-Modul (n = 12)					
Firma	Kleinstwert min x_i N/mm ²	Größtwert max x_i N/mm ²	Mittelwert \bar{x} N/mm ²	Standardab- weichung s_x N/mm ²	Variations- koeffizient V %
Bf* mit u= 15%	2944	3354	3110	112	3,60
Bf mit u= 35%	3018	3458	3212	117	3,65
Bf mit u= 90%	3012	3507	3181	156	4,89
Ref.Ff**	3575	4199	3803	222	5,83

* Bf = Fa. B mit Prozesskennbuchstabe
 ** Referenzplatte aus Kiefernfrischholz
 u = Holzfeuchte

Tab. 13: Biegefestigkeiten von 16 mm dicken Labor-MDF, deren Fasern aus befeuchteten Altholzhackspäne mit einer 8-minütigen Vordämpfung hergestellt wurden (N = 2)

Biegefestigkeit (n = 12)					
Firma	Kleinstwert min x_i N/mm ²	Größtwert max x_i N/mm ²	Mittelwert \bar{x} N/mm ²	Standardab- weichung s_x N/mm ²	Variations- koeffizient V %
Bf* mit u= 15%	22,8	26,8	24,8	1,2	4,64
Bf mit u= 35%	22,2	29,0	24,9	1,8	7,29
Bf mit u= 90%	23,4	31,2	25,1	2,2	8,85
Ref.Ff**	32,9	40,3	36,8	2,5	6,75

* Bf = Fa. B mit Prozesskennbuchstabe
 ** Referenzplatte aus Kiefernfrischholz
 u = Holzfeuchte

Tab.14: Querzugfestigkeiten von 16 mm dicken Labor-MDF, deren Fasern aus befeuchteten Altholzhackspänen mit einer 8-minütigen Vordämpfung hergestellt wurden (N = 2)

Querzugfestigkeit (n = 20)					
Firma	Kleinstwert min x_i N/mm ²	Größtwert max x_i N/mm ²	Mittelwert \bar{x} N/mm ²	Standardab- weichung s_x N/mm ²	Variations- koeffizient V %
Bf* mit u= 15%	0,25	0,34	0,29	0,02	7,75
Bf mit u= 35%	0,22	0,33	0,28	0,03	10,69
Bf mit u= 90%	0,26	0,37	0,31	0,03	10,01
Ref.Ff**	0,19	0,45	0,37	0,09	23,61

* Bf = Fa. B mit Prozesskennbuchstabe
 ** Referenzplatte aus Kiefernfrischholz
 u = Holzfeuchte

Tab. 15: Abhebefestigkeiten von 16 mm dicken Labor-MDF, deren Fasern aus befeuchteten Altholzhackspänen mit einer 8-minütigen Vordämpfung hergestellt wurden (N = 2)

Firma	Abhebefestigkeit (n = 20)				
	Kleinstwert min x_i N/mm ²	Größtwert max x_i N/mm ²	Mittelwert \bar{x} N/mm ²	Standardabweichung s_x N/mm ²	Variationskoeffizient V %
Bf* mit u= 15%	0,67	1,03	0,83	0,10	12,12
Bf mit u= 35%	0,85	1,05	0,92	0,06	6,78
Bf mit u= 90%	0,69	1,05	0,85	0,10	11,42
Ref.Ff**	0,63	1,54	1,11	0,33	29,55

* Bf = Fa. B mit Prozesskennbuchstabe
 ** Referenzplatte aus Kiefernfrischholz
 u = Holzfeuchte

9.4 Untersuchungen an Mitteldichten Laborfaserplatten aus Alt- und Frischholz ohne und mit einer Reinigung der Hackspäne

Tab. 1: Rohdichten von 16 mm dicken Labor-MDF, die aus Altholz ohne Hackspänereinigung hergestellt wurden (N = 2)

Firma	Rohdichte (n = 10)				
	Kleinstwert min x_i kg/m ³	Größtwert max x_i kg/m ³	Mittelwert \bar{x} kg/m ³	Standardabweichung s_x kg/m ³	Variationskoeffizient V %
A	658	748	703	24,54	3,5
B	685	746	702	15,93	2,3
C	678	743	702	17,07	2,4
D	674	736	704	14,18	2,0
F *	683	735	705	15,15	2,2

* Referenzplatte aus Kiefernfrischholz

Tab. 2: Biege-E-Modulwerte von 16 mm dicken Labor-MDF, die aus Altholz ohne Hackspänereinigung hergestellt wurden (N = 2)

Firma	Biege-E-Modul (n = 12)				
	Kleinstwert min x_i N/mm ²	Größtwert max x_i N/mm ²	Mittelwert \bar{x} N/mm ²	Standardabweichung s_x N/mm ²	Variationskoeffizient V %
A	3201	4088	3574	305	8,5
B	2871	3703	3263	268	8,2
C	2812	3760	3397	297	8,7
D	2680	3638	3198	236	7,4
F*	3425	4088	3750	196	5,2

* Referenzplatte aus Kiefernfrischholz

Tab. 3: Biegefestigkeiten von 16 mm dicken Labor-MDF, die aus Altholz ohne Hackspänereinigung hergestellt wurden (N = 2)

Firma	Biegefestigkeit (n = 12)				
	Kleinstwert min x_i N/mm ²	Größtwert max x_i N/mm ²	Mittelwert \bar{x} N/mm ²	Standardab- weichung s_x N/mm ²	Variations- koeffizient V %
A	28,5	37,4	31,8	2,9	9,2
B	22,0	31,9	26,9	3,0	11,1
C	24,6	32,9	28,6	2,8	9,8
D	21,3	30,7	25,9	2,7	10,2
F*	31,8	41,4	36,9	3,1	8,5

* Referenzplatte aus Kiefernfrischholz

Tab. 4: Querzugfestigkeiten von 16 mm dicken Labor-MDF, die aus Altholz ohne Hackspänereinigung hergestellt wurden (N = 2)

Firma	Querzugfestigkeit (n = 20)				
	Kleinstwert min x_i N/mm ²	Größtwert max x_i N/mm ²	Mittelwert \bar{x} N/mm ²	Standardab- weichung s_x N/mm ²	Variations- koeffizient V %
A	0,24	0,46	0,35	0,05	14,8
B	0,24	0,34	0,29	0,03	10,7
C	0,24	0,39	0,30	0,05	16,0
D	0,23	0,36	0,29	0,03	11,9
F*	0,31	0,44	0,38	0,03	8,6

* Referenzplatte aus Kiefernfrischholz

Tab. 5: Abhebefestigkeiten von 16 mm dicken Labor-MDF, die aus Altholz ohne Hackspänereinigung hergestellt wurden (N = 2)

Firma	Abhebefestigkeit (n = 20)				
	Kleinstwert min x_i N/mm ²	Größtwert max x_i N/mm ²	Mittelwert \bar{x} N/mm ²	Standardab- weichung s_x N/mm ²	Variations- koeffizient V %
A	0,56	1,07	0,78	0,14	18,0
B	0,68	0,95	0,80	0,09	10,9
C	0,64	0,88	0,75	0,07	9,5
D	0,49	1,11	0,72	0,20	28,1
F*	0,55	1,00	0,75	0,15	20,0

* Referenzplatte aus Kiefernfrischholz

Tab. 6: Rohdichten von 16 mm dicken Labor-MDF, die aus Altholz mit einer Hackspänereinigung hergestellt wurden (N = 2)

Rohdichte (n = 10)					
Firma	Kleinstwert min x_i kg/m ³	Größtwert max x_i kg/m ³	Mittelwert \bar{x} kg/m ³	Standardab- weichung s_x kg/m ³	Variations- koeffizient V %
A	662	755	705	29,67	4,2
B	639	738	707	26,06	3,7
C	640	736	707	21,95	3,1
D	680	746	704	18,68	2,7
F*	647	754	707	24,57	3,5

* Referenzplatte aus Kiefernfrischholz

Tab. 7: Biege-E-Modulwerte von 16 mm dicken Labor-MDF, die aus Altholz mit einer Hackspänereinigung hergestellt wurden (N = 2)

Biege-E-Modul (n = 12)					
Firma	Kleinstwert min x_i N/mm ²	Größtwert max x_i N/mm ²	Mittelwert \bar{x} N/mm ²	Standardab- weichung s_x N/mm ²	Variations- koeffizient V %
A	3160	4099	3578	295	8,2
B	3116	3839	3485	204	5,9
C	3331	4154	3700	246	6,7
D	3055	4376	3625	384	10,6
F*	3448	4355	3875	286	7,4

* Referenzplatte aus Kiefernfrischholz

Tab. 8: Biegefestigkeiten von 16 mm dicken Labor-MDF, die aus Altholz mit einer Hackspänereinigung hergestellt wurden (N = 2)

Biegefestigkeit (n = 12)					
Firma	Kleinstwert min x_i N/mm ²	Größtwert max x_i N/mm ²	Mittelwert \bar{x} N/mm ²	Standardab- weichung s_x N/mm ²	Variations- koeffizient V %
A	28,0	36,8	31,9	2,8	8,7
B	26,3	34,4	31,1	2,8	9,0
C	29,2	35,4	32,6	2,3	6,9
D	26,4	38,5	31,9	3,7	11,5
F*	32,9	43,9	37,1	3,5	9,4

* Referenzplatte aus Kiefernfrischholz

Tab. 9: Querzugfestigkeiten von 16 mm dicken Labor-MDF, die aus Altholz mit einer Hackspänereinigung hergestellt wurden (N = 2)

Firma	Querzugfestigkeit (n = 20)				
	Kleinstwert min x_i N/mm ²	Größtwert max x_i N/mm ²	Mittelwert \bar{x} N/mm ²	Standardab- weichung s_x N/mm ²	Variations- koeffizient V %
A	0,28	0,44	0,36	0,05	13,6
B	0,27	0,44	0,33	0,04	11,3
C	0,28	0,43	0,36	0,04	11,7
D	0,25	0,46	0,37	0,06	15,4
F*	0,32	0,48	0,37	0,04	11,4

* Referenzplatte aus Kiefernfrischholz

Tab. 10: Abhebefestigkeiten von 16 mm dicken Labor-MDF, die aus Altholz mit einer Hackspänereinigung hergestellt wurden (N = 2)

Firma	Abhebefestigkeit (n = 20)				
	Kleinstwert min x_i N/mm ²	Größtwert max x_i N/mm ²	Mittelwert \bar{x} N/mm ²	Standardab- weichung s_x N/mm ²	Variations- koeffizient V %
A	0,63	1,10	0,80	0,17	20,6
B	0,67	0,94	0,82	0,09	10,8
C	0,58	1,20	0,86	0,15	17,5
D	0,72	1,07	0,87	0,09	11,0
F*	0,65	1,21	0,87	0,15	17,0

* Referenzplatte aus Kiefernfrischholz

9.5 Mischung von Alt- und Frischholz zur Herstellung von Mitteldichten Faserplatten

Tab. 1: Rohdichten von 16 mm dicken Labor-MDF, deren Fasern aus Altholzhackspänen unter Zugabe von Frischholzhackspäneanteilen hergestellt wurden (N = 2)

Firma	Rohdichte (n = 10)				
	Kleinstwert min x_i kg/m ³	Größtwert max x_i kg/m ³	Mittelwert \bar{x} kg/m ³	Standardabweichung s_x kg/m ³	Variationskoeffizient V %
C ¹⁾ mit 100%AH	650	743	697	21,01	3,02
C mit 10% FH	671	729	692	17,24	2,49
C mit 25% FH	626	730	699	24,83	3,55
C mit 50% FH	676	712	695	10,65	1,53
C mit 75% FH	676	723	701	14,10	2,01
D ²⁾ mit 100%AH	674	762	707	18,94	2,68
D mit 10% FH	660	738	702	18,33	2,61
D mit 25% FH	663	744	703	24,52	3,49
D mit 50% FH	680	725	695	15,32	2,20
D mit 75% FH	666	736	696	19,61	2,82
Ref. F ³⁾	679	722	697	13,50	1,94

¹⁾ Material des Altholzverwerters der Fa. C

²⁾ Material des Altholzverwerters der Fa. D

³⁾ Referenzplatte aus Kiefernfrischholz

AH = Altholz; FH = Frischholz

Tab. 2: Biege-E-Modulwerte von 16 mm dicken Labor-MDF, deren Fasern aus Altholzhackspänen unter Zugabe von Frischholzhackspäneanteilen hergestellt wurden (N = 2)

Firma	Biege-E-Modul (n = 12)				
	Kleinstwert min x_i N/mm ²	Größtwert max x_i N/mm ²	Mittelwert \bar{x} N/mm ²	Standardabweichung s_x N/mm ²	Variationskoeffizient V %
C ¹⁾ mit 100%AH	2812	3760	3366	303	9,00
C mit 10% FH	3085	3583	3353	154	4,60
C mit 25% FH	2979	3886	3450	296	8,59
C mit 50% FH	3226	3736	3505	143	4,09
C mit 75% FH	3500	4059	3803	173	4,55
D ²⁾ mit 100%AH	2680	3638	3198	236	7,38
D mit 10% FH	2936	3501	3195	177	5,53
D mit 25% FH	2915	3537	3216	205	6,38
D mit 50% FH	3015	3618	3129	250	7,99
D mit 75% FH	3494	3618	3250	214	6,57
Ref. F ³⁾	3457	4267	3841	244	6,35

¹⁾ Material des Altholzverwerters der Fa. C

²⁾ Material des Altholzverwerters der Fa. D

³⁾ Referenzplatte aus Kiefernfrischholz

AH = Altholz; FH = Frischholz

Tab. 3: Biegefestigkeiten von 16 mm dicken Labor-MDF, deren Fasern aus Altholzhackspänen unter Zugabe von Frischholzhackspäneanteilen hergestellt wurden (N = 2)

Firma	Biegefestigkeit (n = 12)				
	Kleinstwert min x_i N/mm ²	Größtwert max x_i N/mm ²	Mittelwert \bar{x} N/mm ²	Standardabweichung s_x N/mm ²	Variationskoeffizient V %
C ¹⁾ mit 100%AH	21,7	32,8	27,4	3,7	13,37
C mit 10% FH	23,4	31,3	28,0	2,6	9,33
C mit 25% FH	22,3	36,4	30,4	4,5	14,94
C mit 50% FH	27,4	33,9	30,7	1,9	6,29
C mit 75% FH	30,4	40,0	35,9	2,7	7,50
D ²⁾ mit 100%AH	21,3	30,7	25,9	2,7	10,20
D mit 10% FH	23,7	28,5	25,6	1,6	6,38
D mit 25% FH	23,1	28,5	26,4	1,8	6,77
D mit 50% FH	22,9	30,8	26,6	3,0	11,32
D mit 75% FH	25,7	34,2	30,5	2,5	8,08
Ref. F ³⁾	31,0	44,2	36,1	3,3	9,18

¹⁾ Material des Altholzverwerters der Fa. C

²⁾ Material des Altholzverwerters der Fa. D

³⁾ Referenzplatte aus Kiefernfrischholz

AH = Altholz; FH = Frischholz

Tab. 4: Querzugfestigkeiten von 16 mm dicken Labor-MDF, deren Fasern aus Altholzhackspänen unter Zugabe von Frischholzhackspäneanteilen hergestellt wurden (N = 2)

Firma	Querzugfestigkeit (n = 20)				
	Kleinstwert min x_i N/mm ²	Größtwert max x_i N/mm ²	Mittelwert \bar{x} N/mm ²	Standardabweichung s_x N/mm ²	Variationskoeffizient V %
C ¹⁾ mit 100%AH	0,19	0,39	0,28	0,05	19,39
C mit 10% FH	0,23	0,36	0,28	0,03	11,42
C mit 25% FH	0,26	0,36	0,31	0,02	7,46
C mit 50% FH	0,25	0,39	0,32	0,04	11,64
C mit 75% FH	0,27	0,37	0,32	0,03	10,29
D ²⁾ mit 100%AH	0,23	0,40	0,31	0,05	15,49
D mit 10% FH	0,20	0,30	0,24	0,03	10,93
D mit 25% FH	0,20	0,32	0,26	0,03	13,39
D mit 50% FH	0,20	0,32	0,26	0,04	15,26
D mit 75% FH	0,23	0,30	0,27	0,02	6,79
Ref. F ³⁾	0,28	0,45	0,37	0,05	13,75

¹⁾ Material des Altholzverwerters der Fa. C

²⁾ Material des Altholzverwerters der Fa. D

³⁾ Referenzplatte aus Kiefernfrischholz

AH = Altholz; FH = Frischholz

Tab. 5: Abhebefestigigkeiten von 16 mm dicken Labor-MDF, deren Fasern aus Altholzhackspänen unter Zugabe von Frischholzhackspäneanteilen hergestellt wurden (N = 2)

Firma	Abhebefestigkeit (n = 20)				
	Kleinstwert min x_i N/mm ²	Größtwert max x_i N/mm ²	Mittelwert \bar{x} N/mm ²	Standardab- weichung s_x N/mm ²	Variations- koeffizient V %
C ¹⁾ mit 100%AH	0,60	0,88	0,73	0,08	11,00
C mit 10% FH	0,60	1,13	0,92	0,14	14,82
C mit 25% FH	0,73	1,32	1,00	0,16	16,43
C mit 50% FH	0,85	1,33	1,08	0,16	14,35
C mit 75% FH	0,76	1,40	1,15	0,18	15,33
D ²⁾ mit 100%AH	0,43	1,11	0,71	0,21	29,34
D mit 10% FH	0,64	1,13	0,90	0,13	14,25
D mit 25% FH	0,77	1,19	0,97	0,11	11,38
D mit 50% FH	0,80	1,22	0,98	0,11	11,59
D mit 75% FH	0,85	1,32	1,10	0,13	11,94
Ref. F ³⁾	0,99	1,66	1,31	0,19	14,64

¹⁾ Material des Altholzverwerfers der Fa. C

²⁾ Material des Altholzverwerfers der Fa. D

³⁾ Referenzplatte aus Kiefernfrischholz

AH = Altholz; FH = Frischholz

9.6 Chemische Vorbehandlung von Alt- und Frischholzhackspänen für die MDF-Herstellung

Tab. 1: Rohdichten von Alt- und Frischholzfaserplatten, deren Fasern bei 3min/180°C aus nicht chemisch und chemisch vorbehandelten Hackspänen hergestellt wurden (N = 2)

AH + FH ohne und mit chemischer Vorbehandlung	Rohdichte (n = 10)				
	Kleinstwert min x_i kg/m ³	Größtwert max x_i kg/m ³	Mittelwert \bar{x} kg/m ³	Standardab- weichung s_x kg/m ³	Variations- koeffizient V %
AH ohne chem. Vorbeh.	641	714	691	17,55	2,54
AH mit chem. Vorbeh.*	644	739	706	21,16	3,00
FH ohne chem. Vorbeh.**	678	724	701	12,27	1,75
FH mit chem. Vorbeh.	671	732	700	14,70	2,10

* AH = Altholz

** FH = Frischholz

Tab. 2: Biege-E-Modulwerte von 16 mm dicken Alt- und Frischholzfaserverplatten, deren Fasern bei 3min/180°C aus nicht chemisch und chemisch vorbehandelten Hackspänen hergestellt wurden (N = 2)

AH + FH ohne und mit chemischer Vorbehandlung	Biege-E-Modul (n = 12)				
	Kleinstwert min x_i kg/m ³	Größt- wert max x_i kg/m ³	Mittelwert \bar{x} kg/m ³	Standardab- weichung s_x kg/m ³	Variations- koeffizient V %
AH ohne chem. Vorbeh.	3117	3713	3413	178	5,21
AH mit chem. Vorbeh.*	3689	4452	4042	268	6,62
FH ohne chem. Vorbeh.**	3161	3717	3433	195	5,69
FH mit chem. Vorbeh.	3310	4037	3677	259	7,04

* AH = Altholz

** FH = Frischholz

Tab. 3: Biegefestigkeiten von 16 mm dicken Alt- und Frischholzfaserverplatten, deren Fasern bei 3min/180°C aus nicht chemisch und chemisch vorbehandelten Hackspänen hergestellt wurden (N = 2)

AH + FH ohne und mit chemischer Vorbehandlung	Biegefestigkeit (n = 12)				
	Kleinstwert min x_i kg/m ³	Größt- wert max x_i kg/m ³	Mittelwert \bar{x} kg/m ³	Standardab- weichung s_x kg/m ³	Variations- koeffizient V %
AH ohne chem. Vorbeh.	22,2	30,2	26,8	2,1	7,88
AH mit chem. Vorbeh.*	27,3	43,9	33,8	4,9	14,42
FH ohne chem. Vorbeh.**	25,8	32,9	28,6	2,1	7,33
FH mit chem. Vorbeh.	23,8	36,9	31,1	4,3	13,71

*AH = Altholz

** FH = Frischholz

Tab. 4: Querzugfestigkeiten von 16 mm dicken Alt- und Frischholzfaserverplatten, deren Fasern bei 3min/180°C aus nicht chemisch und chemisch vorbehandelten Hackspänen hergestellt wurden (N = 2)

AH + FH ohne und mit chemischer Vorbehandlung	Querzugfestigkeit (n = 20)				
	Kleinstwert min x_i kg/m ³	Größt- wert max x_i kg/m ³	Mittelwert \bar{x} kg/m ³	Standardab- weichung s_x kg/m ³	Variations- koeffizient V %
AH ohne chem. Vorbeh.	0,23	0,29	0,26	0,02	7,76
AH mit chem. Vorbeh.*	0,22	0,39	0,30	0,05	14,92
FH ohne chem. Vorbeh.**	0,23	0,34	0,26	0,03	11,20
FH mit chem. Vorbeh.	0,26	0,35	0,31	0,03	9,40

*AH = Altholz

** FH = Frischholz

Tab. 5: Abhebefestigkeiten von 16 mm dicken Alt- und Frischholzfaserplatten, deren Fasern bei 3min/180°C aus nicht chemisch und chemischen vorbehandelten Hackspänen hergestellt wurden (N = 2)

AH + FH ohne und mit chemischer Vorbehandlung	Abhebefestigkeit (n = 20)				
	Kleinstwert min x_i kg/m ³	Größtwert max x_i kg/m ³	Mittelwert \bar{x} kg/m ³	Standardab- weichung s_x kg/m ³	Variations- koeffizient V %
AH ohne chem. Vorbeh.	0,77	1,06	0,94	0,09	9,42
AH mit chem. Vorbeh.*	0,85	1,50	1,19	0,17	14,65
FH ohne chem. Vorbeh.**	0,71	1,27	0,98	0,16	16,47
FH mit chem. Vorbeh.	1,09	1,53	1,31	0,13	9,64

*AH = Altholz

** FH = Frischholz

9.7 Bindemittleinfluss auf die technologischen Eigenschaften von MDF aus Alt- und Frischholzfäsern

Tab. 1: Rohdichten von 16 mm dicken Altholzfaserplatten, die mit unterschiedlichen Bindemitteln hergestellt wurden (N = 2)

Altholzfaserplatten mit verschiedenen Bindemitteln hergestellt	Rohdichte (n = 10)				
	Kleinstwert min x_i kg/m ³	Größtwert max x_i kg/m ³	Mittelwert \bar{x} kg/m ³	Standardab- weichung s_x kg/m ³	Variations- koeffizient V %
AH UF	667	754	701	20,06	2,86
AH MF	652	698	678	14,32	2,11
AH PF	674	719	695	14,04	2,02
AH UF und Paraffin	662	724	701	16,79	2,40
AH MF und Paraffin	621	712	681	23,33	3,43
AH PF und Paraffin	614	716	685	24,54	3,58

Tab. 2: Biege-E-Modulwerte von 16 mm dicken Altholzfaserplatten, die mit unterschiedlichen Bindemitteln hergestellt wurden (N = 2)

Altholzfaserplatten mit verschiedenen Bindemitteln hergestellt	Biege-E-Modul (n = 12)				
	Kleinstwert min x_i kg/m ³	Größtwert max x_i kg/m ³	Mittelwert \bar{x} kg/m ³	Standardabweichung s_x kg/m ³	Variationskoeffizient V %
AH UF	3054	3798	3473	268	7,72
AH MF	3013	3699	3275	234	7,16
AH PF	2860	3272	3082	175	5,68
AH UF und Paraffin	2965	4164	3448	365	10,60
AH MF und Paraffin	3098	4041	3451	264	7,65
AH PF und Paraffin	1857	2794	2315	289	12,46

Tab. 3: Biegefestigkeiten von 16 mm dicken Altholzfaserplatten, die mit unterschiedlichen Bindemitteln hergestellt wurden (N = 2)

Altholzfaserplatten mit verschiedenen Bindemitteln hergestellt	Biegefestigkeit (n = 12)				
	Kleinstwert min x_i kg/m ³	Größtwert max x_i kg/m ³	Mittelwert \bar{x} kg/m ³	Standardabweichung s_x kg/m ³	Variationskoeffizient V %
AH UF	23,9	36,7	29,9	4,3	14,28
AH MF	22,2	32,2	25,8	3,5	13,62
AH PF	26,3	40,9	33,7	4,9	14,62
AH UF und Paraffin	20,6	35,6	27,4	4,6	16,76
AH MF und Paraffin	22,1	33,7	26,0	3,5	13,60
AH PF und Paraffin	13,5	25,8	18,5	3,8	20,31

Tab. 4: Querzugfestigkeiten von 16 mm dicken Altholzfaserplatten, die mit unterschiedlichen Bindemitteln hergestellt wurden (N = 2)

Altholzfaserplatten mit verschiedenen Bindemitteln hergestellt	Querzugfestigkeit (n = 20)				
	Kleinstwert min x_i kg/m ³	Größtwert max x_i kg/m ³	Mittelwert \bar{x} kg/m ³	Standardabweichung s_x kg/m ³	Variationskoeffizient V %
AH UF	0,24	0,34	0,29	0,03	9,90
AH MF	0,18	0,28	0,24	0,03	10,74
AH PF	0,33	0,50	0,43	0,04	8,37
AH UF und Paraffin	0,19	0,27	0,23	0,02	9,91
AH MF und Paraffin	0,18	0,32	0,26	0,03	12,88
AH PF und Paraffin	0,19	0,36	0,27	0,05	17,87

Tab. 5: Abhebefestigkeiten von 16 mm dicken Altholzfaserplatten, die mit unterschiedlichen Bindemitteln hergestellt wurden (N = 2)

Altholzfaserplatten mit verschiedenen Bindemitteln hergestellt	Abhebefestigkeit (n = 20)				
	Kleinstwert min x_i kg/m ³	Größtwert max x_i kg/m ³	Mittelwert \bar{x} kg/m ³	Standardabweichung s_x kg/m ³	Variationskoeffizient V %
AH UF	0,85	1,50	1,14	0,19	16,27
AH MF	0,69	1,13	0,95	0,12	12,69
AH PF	0,74	1,82	1,34	0,29	21,73
AH UF und Paraffin	0,82	1,21	1,01	0,12	11,52
AH MF und Paraffin	0,75	1,25	0,97	0,14	14,03
AH PF und Paraffin	-	-	-	-	-*

* Aus versuchstechnischen Gründen standen für die Abhebefestigkeit keine Prüfkörper zu Verfügung

Tab. 6: Rohdichten von 16 mm dicken Frischholzfaserplatten, die mit unterschiedlichen Bindemitteln hergestellt wurden (N = 2)

Frischholzfaserplatten mit verschiedenen Bindemitteln hergestellt	Rohdichte (n = 10)				
	Kleinstwert min x_i kg/m ³	Größtwert max x_i kg/m ³	Mittelwert \bar{x} kg/m ³	Standardabweichung s_x kg/m ³	Variationskoeffizient V %
FH UF	645	752	701	22,78	3,25
FH MF	655	730	706	19,14	2,71
FH PF	608	758	710	34,06	4,80
FH UF und Paraffin	630	756	723	30,51	4,22
FH MF und Paraffin	646	724	686	14,63	2,13
FH PF und Paraffin	656	733	702	17,58	2,50

Tab. 7: Biege-E-Modulwerte von 16 mm dicken Frischholzfaserplatten, die mit unterschiedlichen Bindemitteln hergestellt wurden (N = 2)

Frischholzfaserplatten mit verschiedenen Bindemitteln hergestellt	Biege-E-Modul (n = 12)				
	Kleinstwert min x_i kg/m ³	Größtwert max x_i kg/m ³	Mittelwert \bar{x} kg/m ³	Standardabweichung s_x kg/m ³	Variationskoeffizient V %
FH UF	2123	3968	2882	647	22,44
FH MF	3271	3841	3479	168	4,82
FH PF	2809	3636	3072	270	8,78
FH UF und Paraffin	3348	4018	3767	195	5,17
FH MF und Paraffin	2942	3446	3134	171	5,44
FH PF und Paraffin	2275	3367	2738	389	14,22

Tab. 8: Biegefestigkeiten von 16 mm dicken Frischholzfaserplatten, die mit unterschiedlichen Bindemitteln hergestellt wurden (N = 2)

Frischholzfaserplatten mit verschiedenen Bindemitteln hergestellt	Biegefestigkeit (n = 12)				
	Kleinstwert min x_i kg/m ³	Größtwert max x_i kg/m ³	Mittelwert \bar{x} kg/m ³	Standardabweichung s_x kg/m ³	Variationskoeffizient V %
FH UF	10,0	39,7	22,9	8,0	35,03
FH MF	23,9	32,5	28,0	3,1	11,18
FH PF	29,0	52,4	38,7	6,0	15,60
FH UF und Paraffin	27,7	36,3	31,3	2,9	9,41
FH MF und Paraffin	17,7	25,6	21,6	2,7	12,50
FH PF und Paraffin	19,5	44,5	30,8	8,3	27,04

Tab. 9: Querzugfestigkeiten von 16 mm dicken Frischholzfaserplatten, die mit unterschiedlichen Bindemitteln hergestellt wurden (N = 2)

Frischholzfaserplatten mit verschiedenen Bindemitteln hergestellt	Querzugfestigkeit (n = 20)				
	Kleinstwert min x_i kg/m ³	Größtwert max x_i kg/m ³	Mittelwert \bar{x} kg/m ³	Standardabweichung s_x kg/m ³	Variationskoeffizient V %
FH UF	0,21	0,37	0,28	0,04	14,24
FH MF	0,2	0,29	0,25	0,03	11,33
FH PFI	0,2	0,59	0,38	0,12	31,64
FH UF und Paraffin	0,22	0,35	0,29	0,04	13,07
FH MF und Paraffin	0,15	0,26	0,20	0,03	13,96
FH PF und Paraffin	0,25	0,54	0,41	0,09	21,05

Tab. 10: Abhebefestigkeiten von 16 mm dicken Frischholzfaserplatten, die mit unterschiedlichen Bindemitteln hergestellt wurden (N = 2)

Frischholzfaserplatten mit verschiedenen Bindemitteln hergestellt	Abhebefestigkeit (n = 20)				
	Kleinstwert min x_i kg/m ³	Größtwert max x_i kg/m ³	Mittelwert \bar{x} kg/m ³	Standardabweichung s_x kg/m ³	Variationskoeffizient V %
FH UF	0,84	1,46	1,20	0,16	13,61
FH MF	0,78	1,17	1,01	0,10	9,53
FH PF	0,43	1,93	0,97	0,55	56,52
FH UF und Paraffin	0,99	1,38	1,17	0,12	10,08
FH MF und Paraffin	0,61	1,00	0,79	0,11	14,11
FH PF und Paraffin	0,33	1,70	1,06	0,34	32,36

Erklärung:

Ich versichere, diese Arbeit selbstständig angefertigt zu haben. Wörtlich oder inhaltlich aus anderen Quellen entnommene Stellen sind von mir als solche kenntlich gemacht worden. Die Inanspruchnahme persönlicher Hilfen habe ich namentlich ausgeführt.

An einer anderen Universität wurde bisher kein Promotionsantrag gestellt oder mit einer Promotion begonnen.

Hamburg, im April 2004

Markus Erbreich

Persönliche Daten

Geburtsdatum : 30.09.1964
Geburtsort : Hamburg
Nationalität : deutsch
Familienstand : verheiratet seit 2001, ein Kind

Schulbildung / Berufsausbildung

Grundschule : Kath. Schule Hamburg / Hamm
1971 – 1975
Beobachtungsstufe : Kath. Schule Wandsbek
1975 – 1978
Realschule : Kath. Volks u. Realschule, Schmilinskystr. 70
1978 – 1982
Gymnasium : Wirtschaftsgymnasium Schlankreye - Abschluss Abitur
1982 – 1985
Berufsausbildung : Fa. KAEFER Isoliertechnik GmbH, Niederlassung Hamburg
1988 – 1990
19.06.1990 Abschlussprüfung zum Industriekaufmann

Wehrdienst

Bundeswehr : Wehrdienst beim Fernmeldesektor A / Fernmelderegiment 71
1985 – 1986
der Luftwaffe in Großenbrode

Berufliche Tätigkeit

Berufstätigkeit : Fa. KAEFER Isoliertechnik als Disponent in der Material-
1990 – 1992
wirtschaft
1997 – 1999 : Fa. MORALT Fertigungselemente als Gruppenleiter im
Verkaufsinendienst
1999 – 2004 : Wilhelm-Klauditz-Institut, Fraunhofer-Institut
für Holzforschung, Braunschweig
2004 – heute : Fa. Impan GmbH als Produktmanager

Fortsetzung Lebenslauf

Studium

- Studium : Elektrotechnik an der FH Kiel mit vorherigem
1987 – 1988 Praktikum
- Studium : Studium der Holzwirtschaft an der Universität
1992 – 1997 Hamburg Abschluss im September 1997
- Diplomarbeit : Thema „ Untersuchungen zur Xylemwasserleitung
ausgewählter tropischer Wirtschaftsbaumarten“
Aufenthalt in Manaus/Brasilien für die praktischen
und experimentellen Untersuchungen