

Analyse und Beurteilung der stofflichen Verwer-
tungsmöglichkeiten von hölzernen Prozessresten
im Biogas- und Kompostwerk Bützberg

Masterarbeit

zur Erlangung des akademischen Grades

Master of Science Holzwirtschaft

Fachbereich Biologie

Fakultät für Mathematik, Informatik und Naturwissenschaften

Universität Hamburg

Vorgelegt am 15.05.2020

von

Bastian Höhn

geboren am 18.06.1992 in Hamburg

Erstgutachter: Hr. Prof. Dr. Andreas Krause
Institut für Holzwissenschaften
Universität Hamburg
Leuschnerstr. 91 c
21031 Hamburg

Zweitgutachterin: Fr. Dr. Anke Boisch
Biogas- und Kompostwerk Bützberg
Stadtreinigung Hamburg
Wulksfelder Damm 2
22889 Tangstedt

Sperrvermerk

Kandidat: Höhn, Bastian

Studienabschluss: Master of Science

Thema: „Analyse und Beurteilung der stofflichen Verwertungsmöglichkeiten von hölzernen Prozessresten im Biogas- und Kompostwerk Bützberg“

Sperrvermerk: Die Arbeit wird in Bezug auf die Einsichtnahme Dritter bzw. die Ausleihe:

gesperrt () nicht gesperrt (X)

Bibliothek: 1. Der Verfasser ist mit der Einstellung der Abschlussarbeit in den Bestand der Bibliothek des Thünen-Instituts:

nicht einverstanden () einverstanden (X)

2. Die Arbeit darf nur nach ausdrücklicher Genehmigung durch den Erstgutachter der Arbeit eingesehen und ausgeliehen werden:

ja () nein (X)

Inhalte: Der Kandidat ist mit einer Weitergabe und/oder Verwertung von Inhalten der Arbeit nur gemeinsam mit dem Erstgutachter:

nicht einverstanden () einverstanden (X)

Hamburg, den 15.05.2020

Unterschrift (Kandidat)

Vorwort

Mein verbindlichster Dank, für die Unterstützung bei diesem umfangreichen Projekt, gilt zahlreichen Menschen, ohne welche die umfangreichen Versuche nicht so reibungslos funktioniert hätten:

Hr. Prof. Dr. Andreas Krause,

Fr. Dr. Anke Boisch,

allen Mitarbeitern des BKW Bützberg,

Fr. Jördis Sieburg-Rockel, sowie allen Mitarbeitern der Holzartenbestimmung,

Hr. Johannes Beruda, sowie den Mitarbeitern der Holzphysik,

Hr. Max Schierbecker, sowie den Mitarbeitern in der Holzchemie,

den Herren Dieter Varel und Aaron Mayer von der Universität Göttingen.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	1
1.1	Hintergrund.....	1
1.2	Ziele	2
2	Stand des Wissens.....	4
2.1	Holz: Grundlegende Eigenschaften	4
2.2	Siebüberlauf	7
2.3	Spanplatten aus recycelten Sortimenten.....	8
2.4	Anforderungen an Spanplatten	10
2.5	Bindemittel für Holzwerkstoffe	12
3	Material und Methoden	15
3.1	Analyse des Siebüberlaufes	15
3.1.1	Störstoffanteil	16
3.1.2	Holzarten.....	17
3.1.3	Holzfeuchte	18
3.1.4	Ascheanteil.....	19
3.1.5	Materialbeschaffenheit.....	21
3.2	Aufbereitung	22
3.2.1	Schwimm-Sink-Sortierung	22
3.2.1.1	Simulation.....	22
3.2.1.2	Praktische Durchführung	23
3.2.2	Röntgen- und Nah-Infrarot-Sortierung	26
3.2.3	Abrasive Oberflächenreinigung.....	29
3.3	Spanplattenherstellung	32
3.3.1	Trocknung	32
3.3.2	Zerspanung	32
3.3.3	Siebung	33
3.3.4	pH-Wert.....	33
3.3.5	Schüttdichte.....	33
3.3.6	Leime und Beleimung.....	33
3.3.7	Pressprogramm für die Spanplatten	34
3.3.8	Prüfkörper.....	35
3.4	Statistik.....	36
4	Ergebnisse	37
4.1	Analyse des Siebüberlaufes	37
4.1.1	Störstoffanteil	37
4.1.2	Holzarten.....	38

4.1.3	Holzfeuchte	44
4.1.4	Ascheanteil.....	44
4.1.5	Materialbeschaffenheit.....	45
4.2	Aufbereitung	45
4.2.1	Schwimm-Sink-Verfahren	45
4.2.1.1	Simulation.....	45
4.2.1.2	Praktische Durchführung	47
4.2.2	Röntgen- und Nah-Infrarot-Sortierung	49
4.2.3	Abrasives Oberflächenreinigung.....	51
4.3	Spanplattenherstellung	54
4.3.1	Trocknung	54
4.3.2	Zerspanung	54
4.3.3	Siebung	55
4.3.4	pH-Wert.....	56
4.3.5	Schüttdichte.....	56
4.4	Eigenschaften der Spanplatten.....	57
4.4.1	Optik.....	57
4.4.2	Dichte	59
4.4.3	Dickenquellung.....	60
4.4.4	Querzugfestigkeit.....	61
4.4.5	Biege-Elastizitätsmodul und Biegefestigkeit.....	62
4.4.6	Formaldehydabgabe.....	64
5	Diskussion	65
6	Fazit und Ausblick.....	68
7	Literaturverzeichnis.....	70
8	Normenverzeichnis	71
9	Anhang	72
9.1	Fotos zu 3.1.2 Holzarten.....	72
9.2	Fotos zu 4.1.1 Störstoffanteil	73
9.3	Fotos zu 4.1.4 Ascheanteil	75
9.4	Fotos zu 4.2.1.1 Simulation des SSV.....	76

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1: Querschnitt einer Douglasie mit makroskopischen Merkmalen	4
Abbildung 2-2: Darstellung des Aufbaus eines Nadelholzes	5
Abbildung 2-3: Darstellung von Nadel- und Laubholz mit Zellen	6
Abbildung 2-4: Recyclingholzanteil in Spanplatten in Deutschland	9
Abbildung 2-5: Einfluss des Herstellungsprozesses auf Spanplatteneigenschaften	12
Abbildung 3-1: Darstellung des Kompostaustrages.....	15
Abbildung 3-2: Probennahme aus dem Austrag des Siebüberlaufes.....	16
Abbildung 3-3: Viertelprobe des Siebüberlaufes; Störstoffe deutlich zu erkennen.....	17
Abbildung 3-4: Holzproben zur Artbestimmung (Auszug).....	18
Abbildung 3-5: Holzstück aus Siebüberlauf mit Anhaftungen aus der Kompostierung.	20
Abbildung 3-6: Unterschiedliche Helligkeit des Holzmehls vor der Veraschung	21
Abbildung 3-7: Simulation der Schwimm-Sink-Trennung von Siebüberlauf.....	23
Abbildung 3-8: Darstellung der Aufbereitung von Kompost durch Fa. Doppstadt	24
Abbildung 3-9: Gesamtansicht der Aufbereitung von Kompostsiebüberlauf	25
Abbildung 3-10: Darstellung der Schwimm-Sink-Trennung in der Maschine "HDS-S".	26
Abbildung 3-11: Schwimm-Sink-Trennung.....	26
Abbildung 3-12: Versuchsaufbau aus Röntgen- und NIR-Detektor bei Fa. Tomra	27
Abbildung 3-13: Funktionsweise Tomra "X-TRACT" (Querschnitt).....	28
Abbildung 3-14: Funktionsweise Tomra "AUTOSORT" (Querschnitt).....	29
Abbildung 3-15: Versuchsaufbau 1: Mischtrommel mit zwei Schaufeln.....	31
Abbildung 3-16: Versuchsaufbau 3: Mischtrommel ohne Schaufeln, mit Lochgitter.....	31
Abbildung 4-1: Prozentuale Anteile der Fraktionen im Siebüberlauf (Gew.-%).....	38
Abbildung 4-2: Eiche, Querschnitt.....	41
Abbildung 4-3: Eiche, Tangentialschnitt	41
Abbildung 4-4: Kiefer, Querschnitt	42
Abbildung 4-5: Kiefer, Radialschnitt	43
Abbildung 4-6: Holz- und Störstoffanteile vor und nach SSV	47
Abbildung 4-7: Holz- und Störstoffanteile vor und nach der Röntgensortierung	51
Abbildung 4-8: Ergebnisse der abrasiven Reinigung 1.....	53
Abbildung 4-9: Ergebnisse der abrasiven Reinigung 2.....	53
Abbildung 4-10: Späne aus Siebüberlauf, Nahaufnahme der Form	54
Abbildung 4-11: Späne aus Fichte, Nahaufnahme der Form.....	55
Abbildung 4-12: Prozentuale Verteilung der Siebfraktionen von SÜ und FI.....	56
Abbildung 4-13: Vergleich der vier Spanplattentypen.....	58
Abbildung 4-14: Weißgrade der Spanplatten nach ISO.....	59
Abbildung 4-15: Dickenquellung der Spanplatten nach Wasserlagerung	60

Abbildung 4-16: Querkzugfestigkeit der Spanplatten	61
Abbildung 4-17: Biege-Elastizitätsmodul der Spanplatten	62
Abbildung 4-18: Biegefestigkeit der Spanplatten.....	63
Abbildung 4-19: Formaldehydemission der Spanplatten	64
Abbildung 9-1: Erstellen eines Schnittes mit dem Mikrotom.....	72
Abbildung 9-2: Holzfraktion des Siebüberlaufes.....	73
Abbildung 9-3: Glasfraktion des Siebüberlaufes	73
Abbildung 9-4: Knochenfraktion des Siebüberlaufes.....	73
Abbildung 9-5: Kunststofffraktion des Siebüberlaufes	73
Abbildung 9-6: Metallfraktion des Siebüberlaufes	74
Abbildung 9-7: Sonstiges-Fraktion des Siebüberlaufes.....	74
Abbildung 9-8: Steinfraktion des Siebüberlaufes.....	74
Abbildung 9-9: Veraschte Proben des Holzmehls (Auszug)	75
Abbildung 9-10: Schwimmfraktion aus SSV	76
Abbildung 9-11: Holzanteil der Schwimmfraktion	77
Abbildung 9-12: Störstoffe der Schwimmfraktion.....	77
Abbildung 9-13: Sinkfraktion aus SSV	78

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1: Chemische Zusammensetzung von Nadel- und Laubholz.....	7
Tabelle 2-2: Allgemeine Anforderungen an Spanplatten nach DIN	10
Tabelle 2-3: Verwendungsspezifische Anforderungen an Spanplatten nach DIN	11
Tabelle 2-4: Vergleich verschiedener Eigenschaften von UF- und PF-Leim.....	13
Tabelle 3-1: Versuchsdaten X-TRACT	28
Tabelle 3-2: Versuchsdaten AUTOSORT LOD	29
Tabelle 3-3: Leimflotten für Plattenherstellung	34
Tabelle 3-4: Pressparameter der Plattenherstellung	35
Tabelle 4-1: Massenanteile für Holz und Störstoffe in der Siebüberlaufprobe	37
Tabelle 4-2: Holzarten in der Siebüberlaufprobe.....	39
Tabelle 4-3: Holzfeuchtwerte der Holzfraktion.....	44
Tabelle 4-4: Ascheanteile von ungereinigter und gereinigter Holzfraktion	45
Tabelle 4-5: Massen der Stoffe in der Schwimmfraktion	46
Tabelle 4-6: Massen der Stoffe in der Sinkfraktion.....	46
Tabelle 4-7: Mengenströme im SSV von Fa. Doppstadt.....	48
Tabelle 4-8: Ergebnis der Röntgensortierung.....	49
Tabelle 4-9: Ergebnis der VIS/NIR/LOD-Sortierung	50
Tabelle 4-10: Siebfraktionen von Siebüberlauf und Fichte	55
Tabelle 4-11: Dichten der Spanplatten.....	59

Verzeichnis benutzter Abkürzungen und Begriffe

Abfallverzeichnisverordnung (AVV)	System zur europaweit einheitlichen Klassifizierung von Abfällen
Altholz	Anfallende Holzreste der Be- und Verarbeitung sowie gebrauchte Holzzeugnisse mit einem Mindestholzanteil von 50 Gew.-%
FA	Formaldehyd (CH ₂ O)
FI	Fichte
Gew.-%	Gewichtsprozent
Holzfeuchte (u)	Verhältnis der im Holz enthaltenen Wassermasse zur <u>Trockenmasse</u> des Holzes in Prozent
Landschaftspflegematerial	Hier: Gras-, kraut- und holzartiger Rückschnitt von öffentlichen sowie privaten Flächen
LH	Laubholz
Mg	Megagramm = 1 Mio. Gramm = 1 t
MWh	Megawattstunde
NH	Nadelholz
Normklima	Standardklima zur Prüfung von Holz und Holzwerkstoffen: 20 °C, 65 % RH
PPK	Sammelbezeichnung für Papier, Pappe und Karton
ppm	Parts per million (1/1.000.000)
% RH	% relative Luftfeuchtigkeit
R-NIR	Röntgen- und Nah-Infrarot-Sortierung
Siebüberlauf	Hier: Material welches am Ende der Kompostierung ausgesiebt wird
SSV	Schwimm-Sink-Verfahren
Störstoff	Unerwünschte Stoffe in definierten Sortimenten
SÜ	Siebüberlauf

Abstract

Holzige Restfraktionen („Siebüberlauf“) aus der Kompostierung von Bioabfall und Grünschnitt werden in Deutschland derzeit wahrscheinlich vollständig zur Energieerzeugung genutzt. In dieser Arbeit wurde die Eignung des Holzes zur Verarbeitung zu Holzwerkstoffen ermittelt. Hierzu wurden Möglichkeiten getestet, um das Holz von Störstoffen zu befreien. Weiter wurden aus der Holzfraktion Spanplatten hergestellt und auf Querkzugfestigkeit, Biegefestigkeit, Dickenquellung sowie Formaldehydemissionen untersucht, diese wurden mit ebenfalls hergestellten Spanplatten aus Fichte verglichen. Die maschinelle Sortierung des Holzes war, in unterschiedlichem Maße, erfolgreich. Bei der Querkzugfestigkeit wiesen die Recyclingplatten höhere Werte als Fichte auf, bei der Biegefestigkeit wies Fichte höhere Werte auf. Die Dickenquellung nach Wasserlagerung war bei beiden Holzarten ähnlich, ebenso waren die Formaldehydemissionen ähnlich. Die Festigkeit der Spanplatten aus holziger Restfraktion war insgesamt noch ausreichend. Es konnte gezeigt werden, dass eine Nutzung des Siebüberlaufes in Holzwerkstoffen technisch möglich ist. Dies ermöglicht neue, zusätzliche Wege der Verwertung im Sinne einer Kaskadennutzung.

1 Einleitung

1.1 Hintergrund

Die Stadtreinigung Hamburg

Die Stadtreinigung Hamburg (SRH) ist eine Anstalt öffentlichen Rechts und zu 100 % im Besitz der Freien und Hansestadt Hamburg. Sie ist der größte Abfalldienstleister Hamburgs und erwirtschaftet mit ca. 3.300 Mitarbeitern einen Jahresumsatz von ca. 440 Mio. €.

Das Biogas- und Kompostwerk (BKW) Bützberg liegt nördlich der Hansestadt in Tangstedt (Schleswig-Holstein). Es ist Hauptträger der Biomasseverwertung innerhalb der SRH. Durch Fermentation wird aus Bio- und Grünabfall zunächst Biogas gewonnen und zu Biomethan aufgereinigt, anschließend wird die Biomasse kompostiert und als Dünger verkauft. 2018 wurden aus 51.000 t Bio- und 3.200 t Grünabfall 15.400 MWh (1,46 Mio. Nm³) Biomethan und 19.250 t Kompostprodukte gewonnen. Die Menge an produziertem Kompost beläuft sich auf ca. 50 % des Inputs, hiervon bilden wiederum ca. 20 % den Siebüberlauf.

Prozessreste – Der Siebüberlauf

Sowohl zur Fermentation als auch für den Rotteprozess wird Strukturmaterial benötigt, welches den nassen, matschigen Biomüll auflockert und Wege für Luft bildet und offenhält. Hierzu wird im BKW Bützberg zerkleinerter Grünschnitt eingesetzt, dieser wird, je nach Bedarf, auch mehrfach verwendet.

Die Biomasse durchläuft den Gesamtprozess ca. acht Wochen lang. Dann wird der fertige Kompost gesiebt und der Vermarktung zugeführt. Der Siebüberlauf, welcher hier behandelt werden soll, besteht aus allen herausgesiebten Bestandteilen > 30 mm. Hierbei handelt es sich überwiegend um Holz, verunreinigt mit diversen Stoffen, wie zum Beispiel Glas, Knochen, Kunststoffen, Metall, PPK, Steinen oder Folien. Diese Stoffe sind, trotz vielfacher Sortierung und Siebung, nicht vollständig zu entfernen. Ein Aussortieren oder Zerkleinern zu Beginn des Prozesses ist aus oben genannten Gründen nicht möglich.

Derzeit wird der Siebüberlauf zur thermischen Verwertung abgegeben. Die Stadtreinigung Hamburg ist an einer stofflichen Nutzung des anfallenden Siebüberlaufes interessiert. Hierfür gibt es vor allem zwei Motivationen:

- Die Entsorgung des Siebüberlaufes erfolgt kostenpflichtig. Die Kosten hierfür sind zwischen 2013 und 2018 branchenweit gestiegen, in über 1/3 der Kompostierungsanlagen haben sie sich verdoppelt (*Warning, 2018*). Zukünftig wird mit weiter steigenden Kosten gerechnet. Zusätzlich werden zwischen 2020 und 2034 sukzessive die EEG-Förderungen¹ für Biomasseverwertungsanlagen auslaufen. Dies wird voraussichtlich sowohl weitere Preissteigerungen als auch Anlagenstilllegungen bedingen (*Scheftelowitz/Thrän, 2016*).
- Im Sinne der Kaskadennutzung von Ressourcen wäre eine stoffliche Nutzung sinnvoller als das Verbrennen. Auch nach mehreren Stufen der Nutzung hat Holz immer noch den gleichen Brennwert – diese Verwertungsoption bleibt also stets erhalten – die Wertschöpfung wäre allerdings weitaus höher. Dies spiegelt sich auch in § 6 des Kreislaufwirtschaftsgesetzes² wider:

„1) Maßnahmen der Vermeidung und der Abfallbewirtschaftung stehen in folgender Rangfolge: 1. Vermeidung, 2. Vorbereitung zur Wiederverwertung, 3. Recycling, 4. Sonstige Verwertung, insbesondere energetische Verwertung und Verfüllung, 5. Beseitigung.“

Eine stoffliche Nutzung an Stelle der Verbrennung würde also eine Aufwertung von Stufe vier auf zwei bedeuten.

Des Weiteren entspricht die stoffliche Nutzung auch den Anforderungen der europäischen Recyclingziele. Diese sehen eine kontinuierliche Erhöhung der Recyclingquote für Siedlungsabfälle, getrennt nach Materialien, vor. 2030 müssen 60 % der Siedlungsabfälle und 30 % Holz recycelt werden (*Europäisches Parlament, 2017*).

1.2 Ziele

Die Frage, welcher diese Abschlussarbeit nachgehen soll, lautet: „Ist es möglich, die Holzfraktion des Siebüberlaufes für eine stoffliche Nutzung aufzubereiten und ist dieses Holz noch für eine solche geeignet?“

Hieraus ergeben sich zwei Arbeitsbereiche:

- Erstens muss der Siebüberlauf charakterisiert werden, um Ansätze zur Aufbereitung zu identifizieren. Diese sind im Folgenden zu testen und ihre Eignung zu

¹ „Erneuerbare-Energien-Gesetz“

² „Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen“

bewerten. Hierfür ist eine Kenntnis über die enthaltenen Störstoffe und ihre Mengenanteile notwendig. Weiter soll auch die Holzfraktion charakterisiert werden, um, in Kombination mit den Eigenschaftsprüfungen, ein umfassendes Bild zu erhalten.

- Zweitens die Prüfung der Holzeigenschaften. Hierzu sollen aus dem Siebüberlauf Einschicht-Spanplatten hergestellt werden, da hierbei im Herstellungsprozess eine Durchmischung der Hölzer, und somit eine Homogenisierung der Eigenschaften, stattfindet. Spanplatten geben dementsprechend den Mittelwert aller enthaltenen Späne wieder. Darüber hinaus werden Spanplatten bereits mit beliebig hohen Anteilen an Recyclingspänen hergestellt (*Umweltbundesamt, 2014*). Die Dicke der Platten soll 17 mm betragen. Für diese Platten sollen wichtige Kennwerte ermittelt werden.

Diese Ziele sollen durch umfassende, praktische Experimente erreicht werden. Zum Vergleich werden ebenfalls Spanplatten aus Fichte, im exakt selben Prozess, hergestellt.

2 Stand des Wissens

2.1 Holz: Grundlegende Eigenschaften

Holz ist ein natürlicher, inhomogener, anisotroper, hygroskopischer, poröser Faser-verbundwerkstoff. Es entsteht durch die Einlagerung von Lignin in die pflanzliche Zellwand (Lignifizierung). Holz ist vergleichsweise leicht bei hohen Festigkeiten, isoliert sehr gut und verbraucht wenig Energie bei Produktion und Transport.

Biologischer Aufbau

Makroskopisch besteht Holz im Wesentlichen aus Kern- und Splintholz sowie der Rinde. Weitere Bestandteile sind die Markröhre und das Kambium.

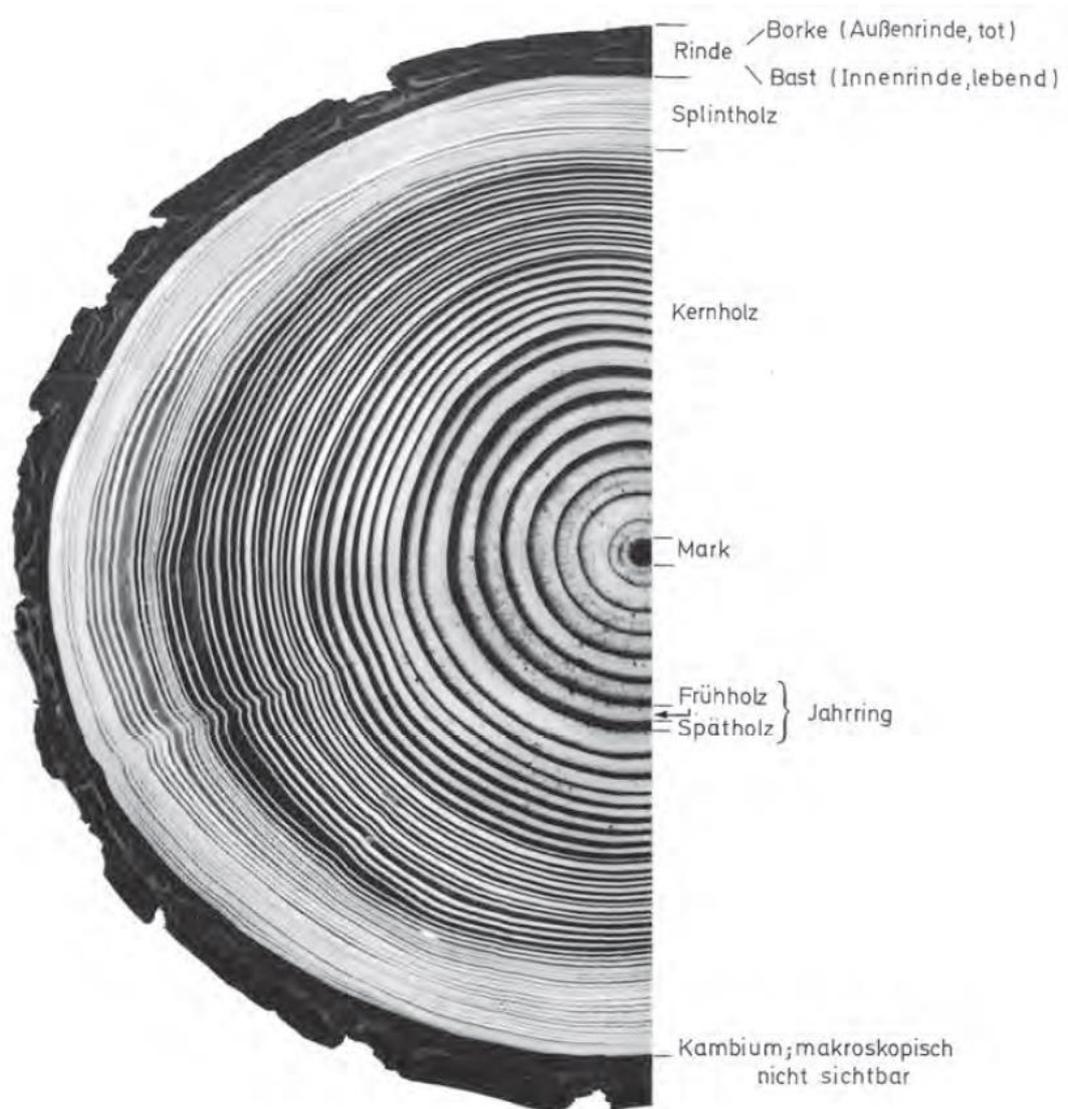


Abbildung 2-1: Querschnitt einer Douglasie mit makroskopischen Merkmalen (Grosser, 1977)

Die Markröhre leitet im jungen Spross das Wasser, stirbt jedoch nach einigen Jahren ab. Sie ist umgeben von Kernholz. Dieses entsteht wenn die Zellen des Splintholzes absterben. Es dient im Wesentlichen der Festigkeit des Stammes. Im äußeren Bereich des Querschnittes liegt das Splintholz. Dieses lebt noch und transportiert Wasser von den Wurzeln in die Blätter. Es ist weniger dauerhaft als das Kernholz. Zwischen Splintholz und Rinde liegt das Kambium, dieses ist mit bloßem Auge nicht zu erkennen. Es ist für das Wachstum zuständig, indem es nach innen Holz- und nach außen Rindenzellen produziert. Geschützt wird der Baum außen von der Rinde, welche sich in den inneren, Nährstoffe transportierenden Bast und die äußere, tote Borke unterteilt. Makroskopisch sind weiterhin die Jahrringe zu erkennen. Diese entstehen durch die Produktion von verschieden großen Zellen im jährlichen Verlauf der Wachstumsperiode.

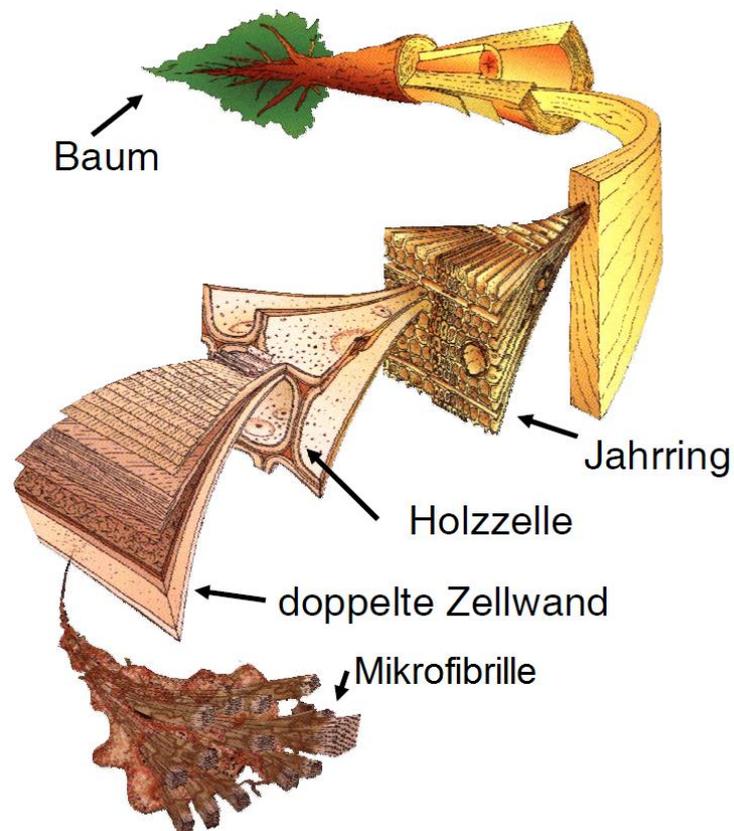


Abbildung 2-2: Darstellung des Aufbaus eines Nadelholzes
Ressel (2014)

Mikroskopisch besteht Holz aus unterschiedlichen Zellen mit verschiedenen Funktionen. Hierbei gibt es axial und radial ausgerichtete Zellen. Nadelhölzer sind älter und daher einfacher aufgebaut, Laubhölzer haben mehr Zelltypen entwickelt. Diese lassen sich

Beispiel Fette oder Harze, und verschiedene eingelagerte Mineralien, wie Calcium oder Eisen. Tabelle 2-1 gibt die chemischen Bestandteile von Nadel- und Laubhölzern wieder.

Tabelle 2-1: Chemische Zusammensetzung von Nadel- und Laubholz

Inhaltsstoff	Anteil in Nadelholz (%)	Anteil in Laubholz (%)
Cellulose	40-44	40-44
Hemicellulose	30-32	15-35
Lignin	25-32	18-25
Extraktstoffe	2-9	1-10
Mineralien	< 1 %	

Physikalische Eigenschaften

Die physikalischen Eigenschaften hängen von vielfältigen Faktoren ab. So ist zum Beispiel die Dichte der Holzart, also das Verhältnis von Zellwandstärke zu Lumen, einer der wichtigsten Faktoren (Bockel, 2020). Die Dichte der Zellwand liegt bei allen Holzarten bei ca. 1,55 g/cm³, erst das Verhältnis von Lumen zu Zellwand definiert die Rohdichte der Holzart. Weitere wichtige Faktoren sind zum Beispiel die Holzfeuchte, da Holz hygroskopisch ist und quillt und schwindet, die Belastungsrichtung oder Wuchsbedingungen.

Da Holz ein individuelles, umgebungsabhängiges Naturprodukt ist, weist jeder Baum andere Eigenschaften auf. Grundsätzlich lässt sich aussagen, dass die Zugfestigkeit in axialer Richtung (längs zur Faser) am höchsten ist, die Druckfestigkeit beträgt ca. die Hälfte. Die Festigkeit orthogonal zur Längsachse (quer zur Faser) beträgt nur einen Bruchteil (Dunky/Niemz, 2002).

2.2 Siebüberlauf

In Deutschland fallen pro Jahr ca. 16 Mio. t Abfall zur Verarbeitung in biologischen Behandlungsanlagen an. Hierunter sind 4,8 Mio. t Grünabfall (AVV 20 02 01: Biologisch abbaubare Abfälle) sowie 4,3 Mio. t Bioabfall (AVV 20 03 01: Abfälle aus der Biotonne), welche in ca. 1.100 Anlagen behandelt werden. Produziert werden 4,2 Mio. t Kompost (AVV 19 05 99), weitere 306.000 t fallen als nicht spezifikationsgerechter Kompost (AVV 19 05 03) an (Statistisches Bundesamt, 2017). In der Regel handelt es sich hierbei um

den Siebüberlauf. Allerdings wird zumindest eine Teilmenge hiervon tatsächlich aus Kompost bestehen, welcher zu stark verunreinigt – also nicht spezifikationsgerecht – ist. Weitere Mengen an Siebüberlauf können sich aus AVV 19 12 07 (Holz, mit Ausnahmen) rekrutieren. Der Anteil des Siebüberlaufes in den einzelnen Kompostierungsanlagen schwankt stark, zwischen 1 % und 35 %, mit einem Mittelwert von 11 %, bezogen auf den Input (*Warning*, 2018). Dies deckt sich mit den Mengenströmen im BKW Bützberg, hier lag der Anteil 2018 bei 13 %.

Diese Zahlen geben einen groben Überblick über den Mengenstrom in Deutschland und lassen den anfallenden Siebüberlauf abschätzen.

Derzeit wird vermutlich die gesamte Menge an Siebüberlauf thermisch verwertet. Der Großteil wird in Müllheiz- oder Biomassekraftwerken verwertet, weitere Mengen gehen an externe Aufbereitungsanlagen. Auch hier ist von einer Aufbereitung für die thermische Verwertung auszugehen, da dies in Anbetracht der vielfältigen Störstoffe die einfachste Möglichkeit darstellt. Zahlen oder Literatur zu stofflichen Nutzungen liegen nicht vor. Allerdings würden bereits simple Anwendungen, wie beispielsweise Hackschnitzel oder Mulch, eine umfangreiche Störstoffentfrachtung notwendig machen. Darüber hinaus ist der Begriff der „stofflichen Nutzung“ in solchen Fällen fraglich, da das Material seinem natürlichen Rotteprozess überlassen wird. Eine „echte“ stoffliche Nutzung müsste also auf unbestimmte Zeit ausgelegt sein.

2.3 Spanplatten aus recycelten Sortimenten

Spanplatten mit und aus Recyclingholz werden bereits seit mehreren Jahrzehnten hergestellt. Der deutschlandweite Anteil der Späne aus recyceltem Holz ist in diesem Zeitraum kontinuierlich gestiegen, wie Abbildung 2-4 zeigt. Die Anteile in verschiedenen Platten schwanken zwischen 0-100 %. Die Anteile von Altholz in Holzwerkstoffen (also auch OSB- und Faserplatten) in diversen europäischen Ländern liegen zwischen 0-90 %, der Mittelwert ist 19 % (*Knauf*, 2017).

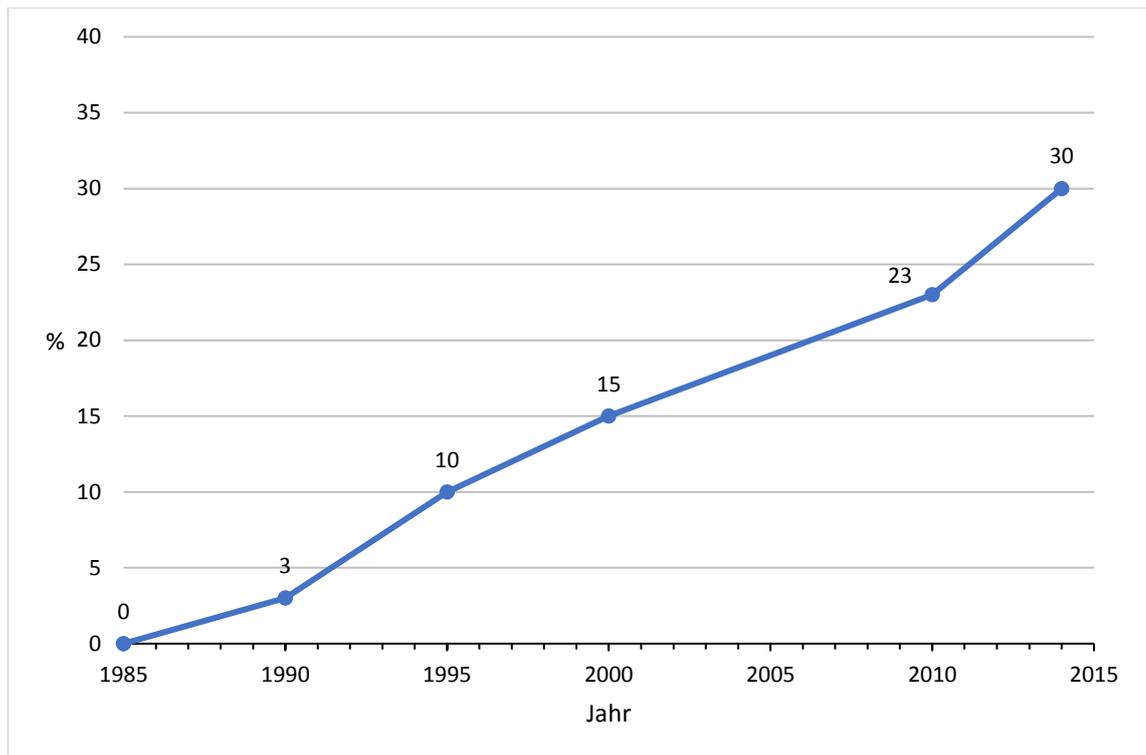


Abbildung 2-4: Recyclingholzanteil in Spanplatten in Deutschland (Dunky/Niemz, 2002; Mantau, 2012; Umweltbundesamt, 2014)

Unter den Begriff „Recyclingholz“ fällt hierbei allerdings ausschließlich Altholz, also Industrierestholz oder Gebrauchtholz. Für die Nutzung in Spanplatten sind gemäß Altholzverordnung³ die Kategorien I und II zugelassen. Absolut wurden 2010 1,05 Mio. t Altholz in Spanplattenwerken verarbeitet, dies entsprach 19 % der Altholz-Gesamtmenge. Ein weitaus größerer Teil (78 %) wurden energetisch verwertet (Mantau, 2012).

Betrachtet man die Mengenströme für Landschaftspflegematerial (nicht-verholzt und verholzt), so zeigt sich, dass 2010 1,16 Mio. t (von 2,8 Mio. t gesamt) in Biomasseanlagen energetisch genutzt wurden. Der Rest fiel in Privathaushalten an (Mantau, 2012). Der Anteil der holzigen Fraktion ist hierfür allerdings unbekannt. Somit blieben jedoch immer noch mindestens 4,5 Mio. t Altholz und eine unbekannte Menge Landschaftspflegeholz stofflich ungenutzt.

³ „Verordnung über Anforderungen an die Verwertung und Beseitigung von Altholz“

2.4 Anforderungen an Spanplatten

Die Anforderungen an Spanplatten sind in der Norm DIN EN 312 festgelegt. Sie gliedert sich in einen allgemeinen Teil und spezifische Anforderungen für bestimmte Plattentypen. Hierbei wird nach Verwendungszweck unterschieden.

Ausgewählte Werte sind in Tabelle 2-2 und Tabelle 2-3 dargestellt.

Tabelle 2-2: Allgemeine Anforderungen an Spanplatten nach DIN

Plattentyp	Maßhaltigkeit	Plattenfeuchte (%)	Rohdichte (%)	Formaldehydabgabe (mg/m ³ Luft)	
				E1	E2
Alle	Diverse Vorgaben, hier nicht relevant	5-13	Abweichung ± 10	E1	E2
				≤ 0,124	≤ 0,3

Tabelle 2-3: Verwendungsspezifische Anforderungen an Spanplatten nach DIN

Plattentyp		Biegefestigkeit (N/mm ²)	Biege-E-Modul (N/mm ²)	Querzugfestigkeit (N/mm ²)	Dickenquellung, 24h (%)
Inneneinrichtung/ Möbel (P2)		11	1.600	0,35	-
Trockenbereich	Allgemein (P1)	10	-	0,24	-
	Tragend (P4)	15	2.300	0,35	15
	Hochbelastbar (P6)	18	3.000	0,50	15
Feuchtbereich	Allgemein (P3)	14	1.950	0,45	14
	Tragend (P5)	16	2.400	0,45	10
	Hochbelastbar (P7)	20	3.100	0,70	10

Die Eigenschaften der Spanplatten werden durch den Herstellungsprozess maßgeblich beeinflusst. Einige, hier relevante, Zusammenhänge sind in Abbildung 2-5 angegeben.

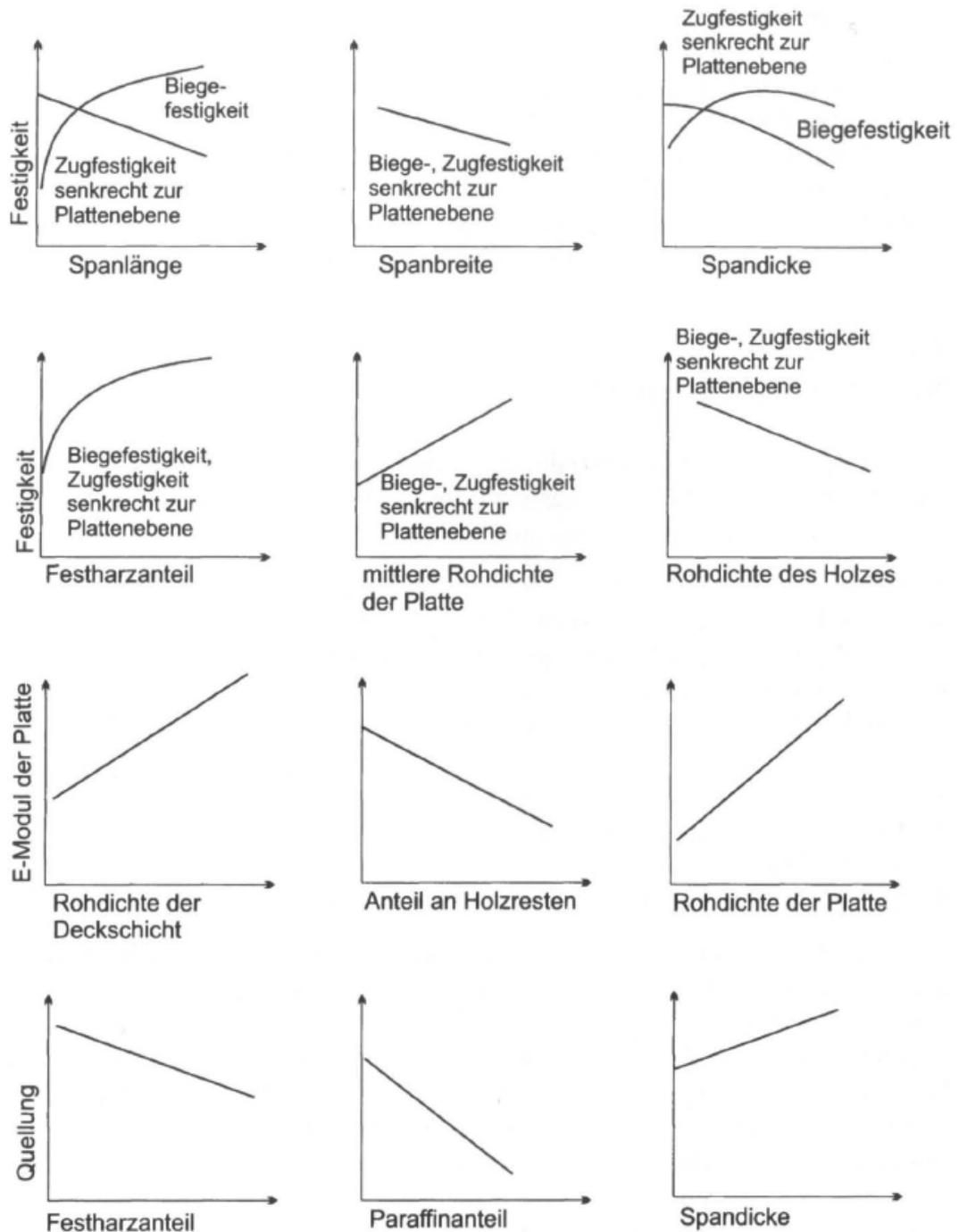


Abbildung 2-5: Einfluss des Herstellungsprozesses auf Spanplatteneigenschaften (Dunky/Niemz, 2002)

2.5 Bindemittel für Holzwerkstoffe

Holzleime sind Bindemittel, welche die Füge­teile (z.B. Furniere oder Späne) durch Flächenhaftung (Adhäsion) und innere Festigkeit (Kohäsion) stoffschlüssig verbinden. Sie werden auf das Holz aufgebracht und dann i.d.R. unter Einfluss von Druck und Hitze

verklebt. Da viele Leime Formaldehyd enthalten, sind die FA-Emissionen aus den fertigen Holzwerkstoffen eine wichtige Eigenschaft. FA ist von der WHO als „krebserregend für den Menschen“⁴, auf Bundesebene als „krebserzeugend bei Aufnahme über die Atemluft in höheren Konzentrationen als 124 Mikrogramm pro Kubikmeter“⁵ eingestuft. Die Emissionen dürfen daher keine höhere Konzentration als 0,1 ppm in der Raumluft hervorrufen (*Dunky/Niemz, 2002*).

Von den verschiedenen Holzleimen kommen in dieser Arbeit zwei zum Einsatz: Harnstoff-Formaldehyd-Leim (UF) und Phenol-Formaldehyd-Leim (PF).

Tabelle 2-4: Vergleich verschiedener Eigenschaften von UF- und PF-Leim (Dunky/Niemz, 2002)

Eigenschaft	UF	PF
Preis	Niedrig	Mittel
Empfindlichkeit gegenüber Holzart	Hoch	Niedrig
Wirksamkeit	Niedrig	Mittel bis Hoch
Kochbeständigkeit	Keine	Hoch

Harnstoff-Formaldehyd-Leim

UF-Leim wird aus Harnstoff ($\text{CH}_4\text{N}_2\text{O}$) und Formaldehyd (HCHO) hergestellt. Er härtet unter der Zugabe eines Katalysators, dies kann ein Härter oder eine Säure sein. Oft werden beispielsweise Ammoniumsalze in wässriger Lösung eingesetzt (z. B. NH_4Cl , NH_4NO_3). UF-Leime sind farblos bis milchig, mit einer Viskosität von 200-600 mPa·s.

Vorteile der UF-Harze sind der geringe Preis, die farblose Leimfuge und kurze Reaktionszeiten. Nachteile hingegen sind fehlende Feuchtebeständigkeit, Formaldehydemissionen und Sprödigkeit (*Dunky/Niemz, 2002*).

⁴ Internationale Agentur für Krebsforschung

⁵ Bundesinstitut für Risikobewertung

Phenol-Formaldehyd-Leim

PF-Leim wird aus Phenol (C_6H_6O) und Formaldehyd (HCHO) hergestellt. Er härtet auch ohne Zugabe eines Katalysators, nur durch Einwirkung von Hitze. PF-Leime sind dunkelbraun, mit einer Viskosität von 200-700 mPa·s

Vorteile der PF-Harze sind die geringe FA-Abgabe sowie hohe Feuchte- und Witterungsbeständigkeit. Nachteile sind die langsamere Härtung, dunkle Farbe und höhere Kosten (*Dunky/Niemz, 2002*).

3 Material und Methoden

3.1 Analyse des Siebüberlaufes

Um eine möglichst repräsentative Stichprobe des Siebüberlaufes zu erhalten, wurde diese direkt dem Stoffstrom entnommen. Dies geschah beim Nachsieben des Siebüberlaufes von 10 mm auf 30 mm.

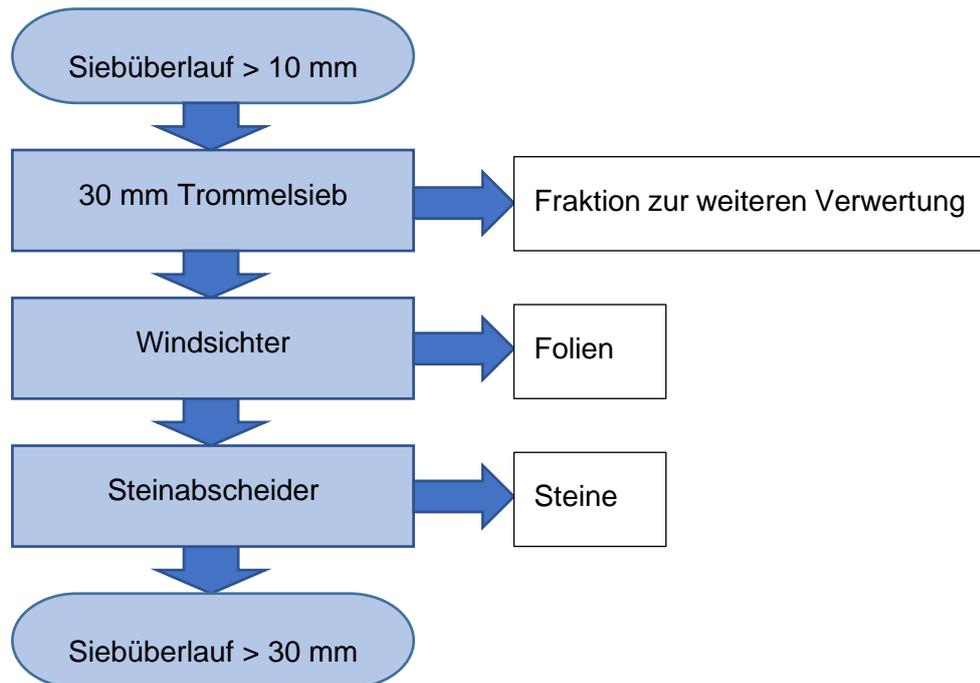


Abbildung 3-1: Darstellung des Kompostaustrages

Da das Material per Förderband aus der Maschine ausgetragen wird und dann per Radlader abtransportiert, musste direkt unter dem Förderband entnommen werden. Nur so ließ sich eine Heterogenisierung, beispielsweise durch unterschiedliche Dichten und Rollverhalten, vermeiden. Genutzt wurden hierzu zwei 240 L Mülltonnen. Mit diesen ließ sich der Siebüberlauf homogen auffangen. Die Gesamtmasse der gezogenen Probe betrug 130,40 kg.



Abbildung 3-2: Probennahme aus dem Austrag des Siebüberlaufes

3.1.1 Störstoffanteil

Der Störstoffanteil des Siebüberlaufes wurde mittels Viertelprobe der Gesamtmenge bestimmt. Hierzu wurde die genommene Probe gleichmäßig ausgebreitet und in gleich große Viertel unterteilt. Ein Viertel wurde zufällig ausgewählt, händisch sortiert und in die folgenden Kategorien unterteilt:

- Holz
- Glas
- Knochen
- Kunststoffe
- Metalle
- Steine
- Sonstiges

Die Gewichtsanteile der einzelnen Stoffe wurden mittels Waage bestimmt. Der Störstoffanteil für die drei verbleibenden Viertel wurde hochgerechnet.



Abbildung 3-3: Viertelprobe des Siebüberlaufes; Störstoffe deutlich zu erkennen

3.1.2 Holzarten

Auf Grund der originären Herkunft der Holzfraktion (überwiegend Grünschnitt aus privaten und gewerblichen Quellen) können grundsätzlich alle Holzarten enthalten sein. Dies umfasst sowohl heimische Holzarten als auch eingeführte Holzarten. Auf Grund des Einzugsgebietes der Grünschnittsammlung ist hier allerdings hauptsächlich von heimischen, in Norddeutschland verbreiteten, Hölzern auszugehen.

Um einen Überblick über die enthaltenen Hölzer zu erhalten, wurden zufällig 24 Holzstücke ausgewählt. Die Bestimmung erfolgte nur qualitativ, da eine quantitative Methode einen unverhältnismäßigen Aufwand erfordert hätte. Hierzu wurde die Gesamtprobe, nach dem Prinzip der Viertelprobe, in acht gleiche Teile geteilt und je drei Stück entnommen. Die Bestimmung der Familie und Gattung erfolgte unter dem Mikroskop im Holzartenbestimmungslabor des Thünen-Instituts für Holzforschung. Hierzu wurde aus jeder Holzprobe ein Würfel mit der Kantenlänge 1 cm geschnitten. Drei der Würfelflächen

entsprachen hierbei der radialen, axialen und tangentialen Ebene der Sprossachse (siehe Abbildung 2-3). Mit einem Mikrotom wurden von jeder Hauptebene Schnitte mit einer Dicke von 10-20 µm erstellt (Abbildung 9-1 im Anhang) und in Glycerin auf Objektträgern für die Mikroskopierung präpariert.



Abbildung 3-4: Holzproben zur Artbestimmung (Auszug)

Zur Bestimmung der Familie und Gattung wurden die Präparate unter einem Durchlichtmikroskop betrachtet und die Holzmerkmale bestimmt. Mit Hilfe der Datenbank des Thünen-Instituts konnten Familie und Gattung eingegrenzt und in der Regel bestimmt werden. Das Bestimmen der Art ist zum einen – mikroskopisch - nicht immer sicher möglich, zum anderen oft irrelevant, da sich die meisten Arten einer Gattung nur optisch unterscheiden. Bei drei der Proben war eine sichere Bestimmung nicht möglich. Bei einer Probe konnte eine hohe Übereinstimmung mit einer Art festgestellt werden, jedoch fehlten makroskopische Merkmale für eine sichere Bestimmung.

3.1.3 Holzfeuchte

Zur Bestimmung der Holzfeuchte wurden unmittelbar nach Entnahme aus dem Stoffstrom zehn Proben genommen. Diese wurden im Darrofen bei ± 103 °C in Anlehnung an DIN EN 13183-1 bis zur Gewichtskonstanz getrocknet. Vor Beginn der Trocknung

sowie alle 24 Stunden wurde das Gewicht auf einer Waage auf 0,01 g genau bestimmt. Die Holzfeuchte für jede Probe wurde gemäß folgender Formel berechnet:

$$\omega = \frac{m_1 - m_0}{m_0} \times 100$$

dabei ist:

m_1 = Masse des Prüfkörpers vor dem Trocknen in Gramm

m_0 = Masse des Prüfkörpers im darrtrockenen Zustand in Gramm

ω = Die Holzfeuchte in Prozent

3.1.4 Ascheanteil

Die Holzfraktion des Siebüberlaufes ist auch nach zweimaligem Absieben noch stark mit Anhaftungen verunreinigt (siehe Abbildung 3-5). Hierbei handelt es sich um organische und anorganische Partikel der Kompostierung. Um das Ausmaß der Verunreinigung abschätzen zu können, wurde eine Veraschung durchgeführt, also eine gezielte thermische Umsetzung aller organischen Anteile.



Abbildung 3-5: Holzstück aus Siebüberlauf mit Anhaftungen aus der Kompostierung

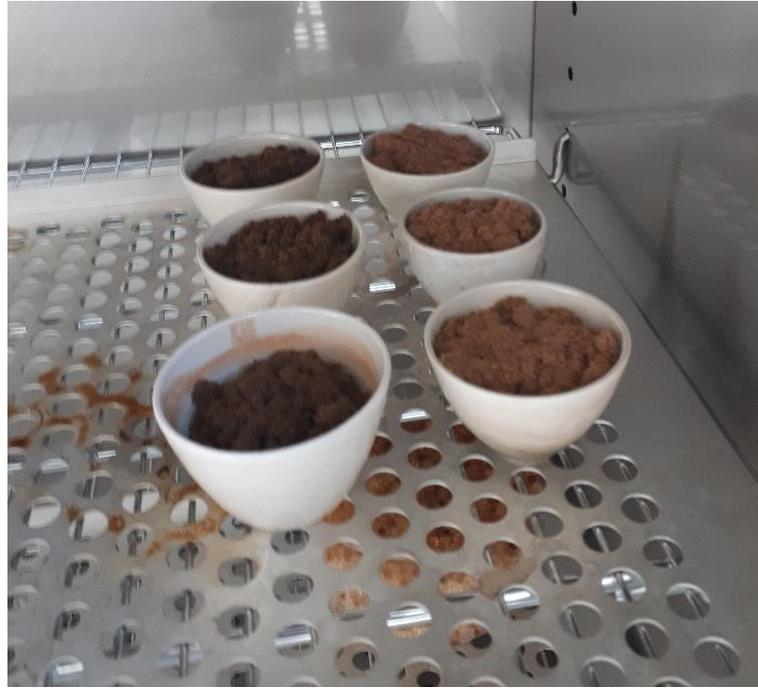
Durchgeführt wurde dies in einem Muffelofen:

1. Phase: 105°C, 10 min
2. Phase: 325°C, 60 min
3. Phase: 525°C, 60 min

Hierbei wurde das Probenmaterial langsam erhitzt, bis alle organischen Bestandteile thermisch umgesetzt waren.

Als Probenmaterial wurden Stücke der Holzfraktion mit einer Drahtbürste an der Oberfläche gereinigt bis keinerlei Verunreinigung mehr sichtbar war. Dann wurde aus dem gereinigten Holz sowie aus ungereinigtem Holz in einer Schneidmühle Mehl hergestellt. Bereits hier zeigte sich ein starker Unterschied in der Farbe des Holzmehls (siehe Abbildung 3-6). Von dem Mehl wurden ca. 5 Gramm in einen ausgeglühten Tiegel

eingewogen und zunächst der Feststoffgehalt per Darrprobe bei $\pm 103\text{ }^{\circ}\text{C}$ bestimmt. Anschließend wurde die Veraschung durchgeführt und das Restgewicht der Proben bestimmt.



*Abbildung 3-6: Unterschiedliche Helligkeit des Holzmehls vor der Veraschung
Links ungereinigt, rechts gereinigt*

3.1.5 Materialbeschaffenheit

Um einen Gesamteindruck der Holzfraktion zu erhalten wurde diese auch optisch und händisch analysiert. Hierbei wurde eine Probe aus zehn Holzstücken gezogen und Faktoren wie Oberflächenzustand, Gesamtzustand und Schädlingsbefall betrachtet und bewertet. Dies diente zum einen dazu, den Ausgangszustand der Holzfraktion zu dokumentieren, zum anderen um bereits notwendige Prozessschritte einplanen zu können. Des Weiteren hilft dies bei der Interpretation der Werkstoffprüfungsergebnisse.

Durchgeführt wurde dies mit verschiedenen Werkzeugen. Mit einem Messer wurde die Oberfläche, ähnlich der Beilprobe, abgeschabt und auf Festigkeit untersucht. Mit einer Säge wurden die Stücke zweifach zersägt und das Innere mittels Messerprobe auf Festigkeit untersucht. Alle Proben wurden weiterhin nach Anzeichen von Pilz- oder Schädlingsbefall sowie Abbauspuren untersucht.

3.2 Aufbereitung

3.2.1 Schwimm-Sink-Sortierung

Eine simple Methode zur Sortierung stellt das Schwimm-Sink-Verfahren dar. Hierbei dient ein Wasserbad als Trennmittel. Das Input-Material wird in dieses eingebracht, Stoffe mit einer geringeren Dichte als Wasser ($\rho = 1.000 \text{ kg/m}^3$) schwimmen oben, dichtere Stoffe sinken dagegen herab. Über Erweiterungen, beispielweise Aufstromanlagen, lässt sich die Trenndichte variieren. Die Schwimm- und die Sinkfraktion werden dann kontinuierlich ausgetragen.

3.2.1.1 Simulation

Um einen ersten Eindruck von den Möglichkeiten der Schwimm-Sink-Trennung zu erhalten wurde ein solches Verfahren im kleinen Maßstab simuliert. Hierzu wurde eine Maurerwanne mit Wasser gefüllt und schrittweise 28,38 kg Siebüberlauf eingebracht. Die Schwimmfraktion wurde jeweils abgeschöpft während sich die Sinkfraktion am Boden der Wanne ansammelte. Nach Beendigung der Sortierung wurde das Wasser abgelassen und die Sinkfraktion ebenfalls entnommen. Beide Fraktionen wurden, wie bei der Störstoffanalyse, in die Kategorien Holz, Glas, Knochen, Kunststoffe, Metalle, Steine und Sonstiges sortiert und gewogen.



Abbildung 3-7: Simulation der Schwimm-Sink-Trennung von Siebüberlauf

3.2.1.2 Praktische Durchführung

Eine praktische Durchführung der Schwimm-Sink-Sortierung im realen Maßstab war für Januar 2020 mit der „Hydro-Dichte-Separation“-Baureihe von Fa. Doppstadt⁶ geplant. Auf Grund technischer Probleme fiel dieser Versuch aus. Es wurde jedoch seitens Fa. Doppstadt Material zu einer früheren Aufbereitung von Kompost-Siebüberlauf aus Grünschnitt und Bioabfall bereitgestellt. Dieses wurde ausgewertet, in Bezug auf Vergleichbarkeit und Ergebnisse.

⁶ Doppstadt Beteiligungs GmbH, Steinbrink 4, D-42555 Velbert

Der Maschinenaufbau dieser Aufbereitung ist in Abbildung 3-8 dargestellt.

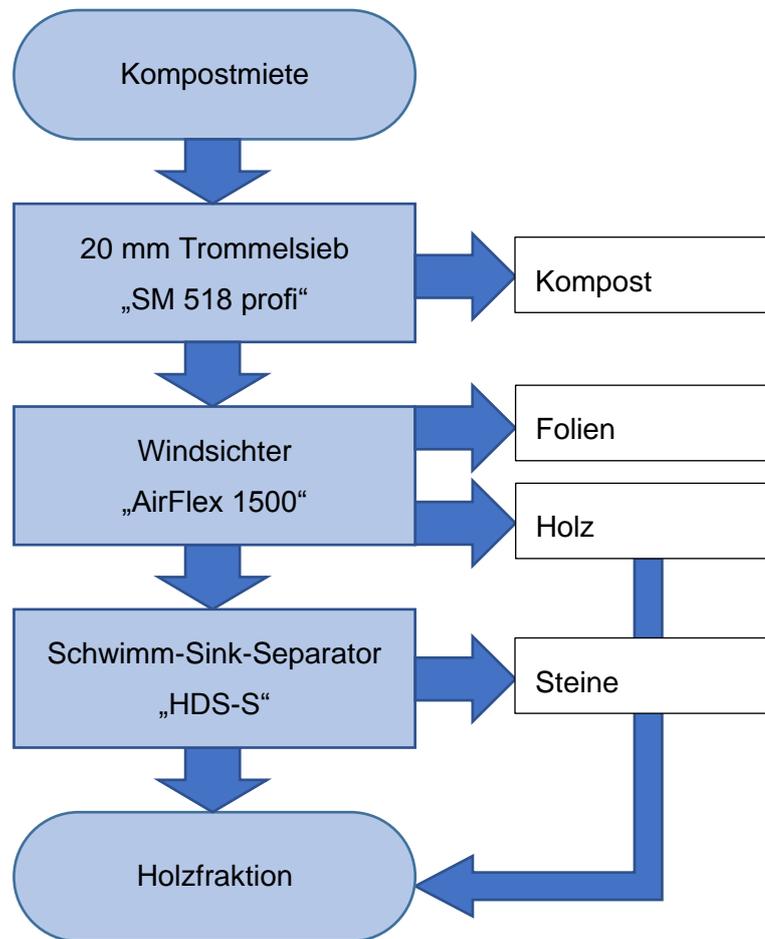


Abbildung 3-8: Darstellung der Aufbereitung von Kompost durch Fa. Doppstadt

Der Aufbau ähnelt grundsätzlich der Kompostaufbereitung im BKW Bützberg. Lediglich die Holzabscheidung im Windsichter und der Einsatz des nachgeschalteten Schwimm-Sink-Separators weichen ab. Die Aufgabe erfolgte per Radlader, die Entnahme der sortierten Fraktionen ist per Greifbagger oder Radlader möglich.



*Abbildung 3-9: Gesamtansicht der Aufbereitung von Kompostsiebüberlauf
Links: Schwimm-Sink-Sortierung; Mitte: Windsichter; Rechts: Trommelsieb*

Der Input pro Stunde in das Trommelsieb betrug ca. 40 m³. Abgesiebt wurde auf 20 mm, alle Stoffe mit einem größeren Durchmesser werden in den Windsichter ausgetragen. Im BKW Bützberg wird erst auf 10 mm, dann, nach mehrtätiger Nach Trocknung, auf 30 mm gesiebt.

Der Windsichter arbeitet mit drei Fraktionen: Schwer, leicht und sehr leicht. Im ersten Schritt trennt ein Luftstrom die schweren (Steine, Holz) und leichten (Holz, Folien) Stoffe per Druckluft, im zweiten Schritt werden die sehr leichten Stoffe (Folien) durch einen Luftzug von den leichten (Holz) getrennt. Die schwere Fraktion wird in die Schwimm-Sink-Trennung eingebracht. Am BKW Bützberg werden Folien abgesogen, Steine durch ihr Rollverhalten auf einem schrägen Laufband abgeschieden.

Die schwere Fraktion wird im Folgenden in die Schwimm-Sink-Trennung gefördert. Kern der Maschine ist ein Wasserbad, in welchem das Trennergebnis erreicht wird. Der Aus-trag funktioniert für die Schwimmfraktion über ein Stabförderband, für die Sinkfraktion über eine seelenlose Schnecke. Bei Betrieb der Anlage ist auf Einhaltung des benötigten Mindestwasserpegels zu achten, da anhaftendes Wasser sukzessive ausgetragen wird.

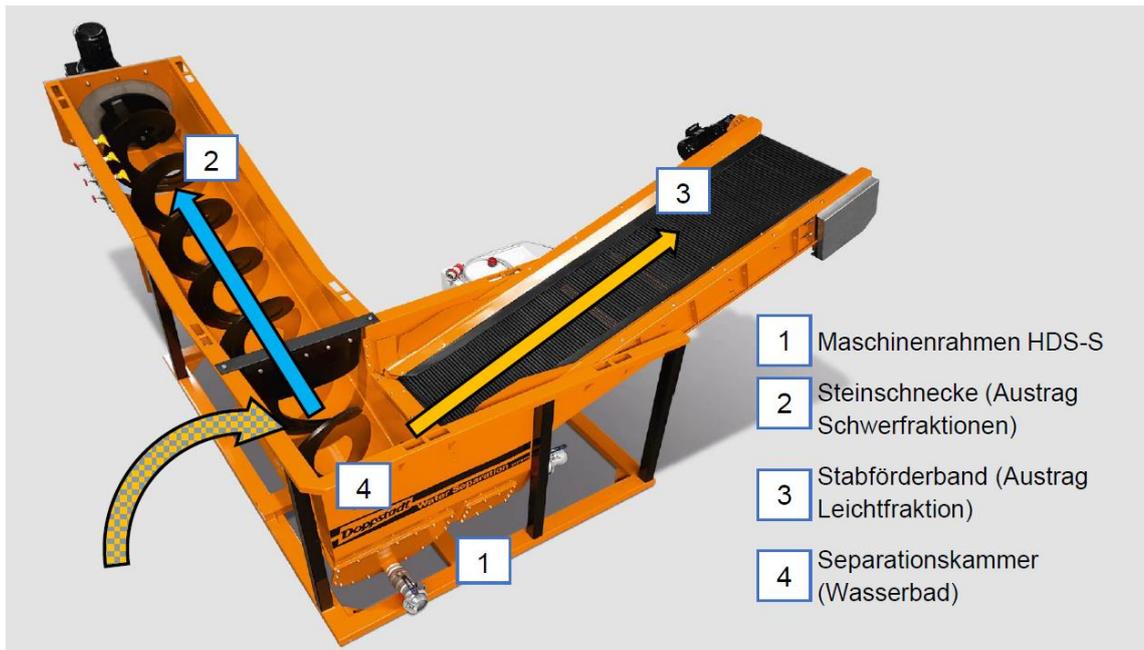


Abbildung 3-10: Darstellung der Schwimm-Sink-Trennung in der Maschine "HDS-S"

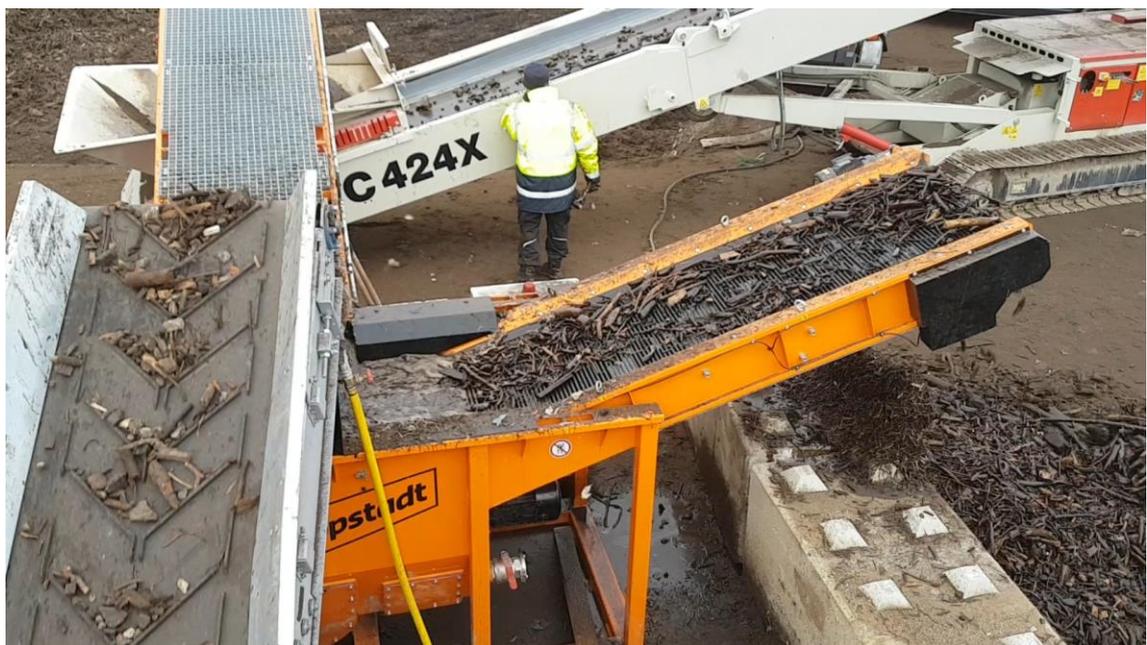


Abbildung 3-11: Schwimm-Sink-Trennung
Links: Input; Vorne: Schwimmfraktion; Hinten: Sinkfraktion

3.2.2 Röntgen- und Nah-Infrarot-Sortierung

Die Sortierung mit Hilfe von Röntgen und Nah-Infrarot stellt eine weitere Möglichkeit der Aufbereitung dar. Versuche hierzu wurden bei Firma „Tomra Sorting Solutions“ im Technikum in Mülheim-Kärlich durchgeführt. Für die Versuche wurde ein Kubikmeter

Siebüberlauf aus dem Austrag entnommen und zu Fa. Tomra geschickt. Gearbeitet wurde mit zwei Geräten. Im ersten Schritt wurde ein Röntgendetektor genutzt, um Metalle und inerte Stoffe abzuscheiden, im zweiten Schritt wurden mittels NIR-Erkennung und „Laser Object Detection“ Kunststoffe sowie Sonstiges abgeschieden. Vor und nach jedem Prozessschritt wurden die Holz- sowie Störstoffanteile sortiert und gewogen.

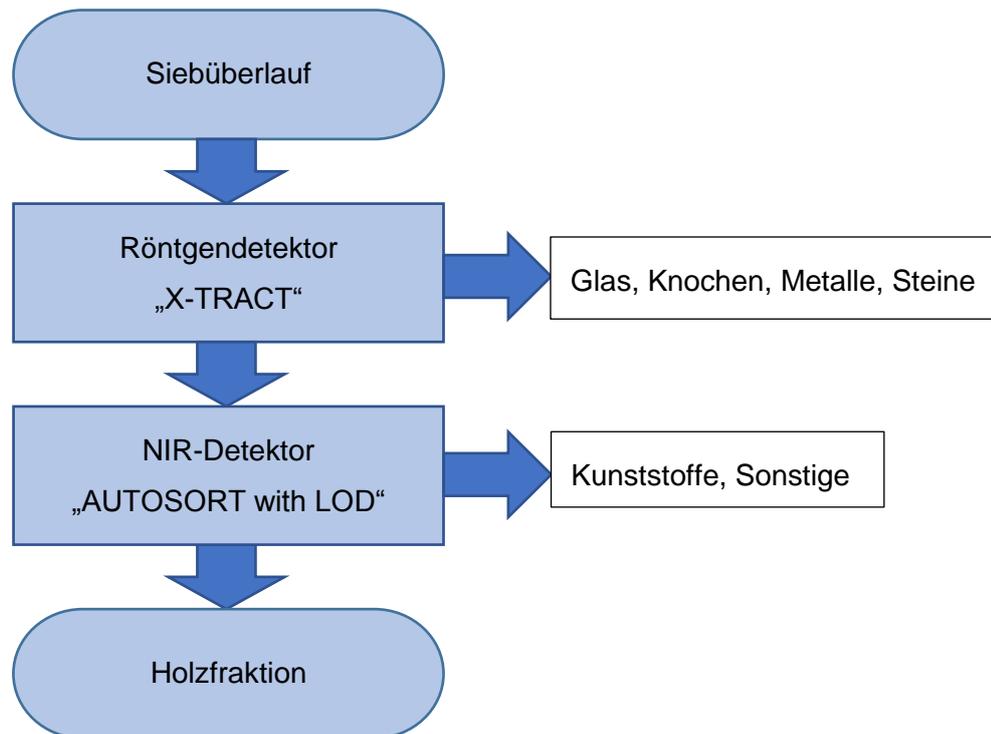


Abbildung 3-12: Versuchsaufbau aus Röntgen- und NIR-Detektor bei Fa. Tomra

„X-TRACT“ Röntgenerkennung

Der Input erfolgt über ein Transportband. Unerwünschte Stoffe wurden per Druckluft separiert.

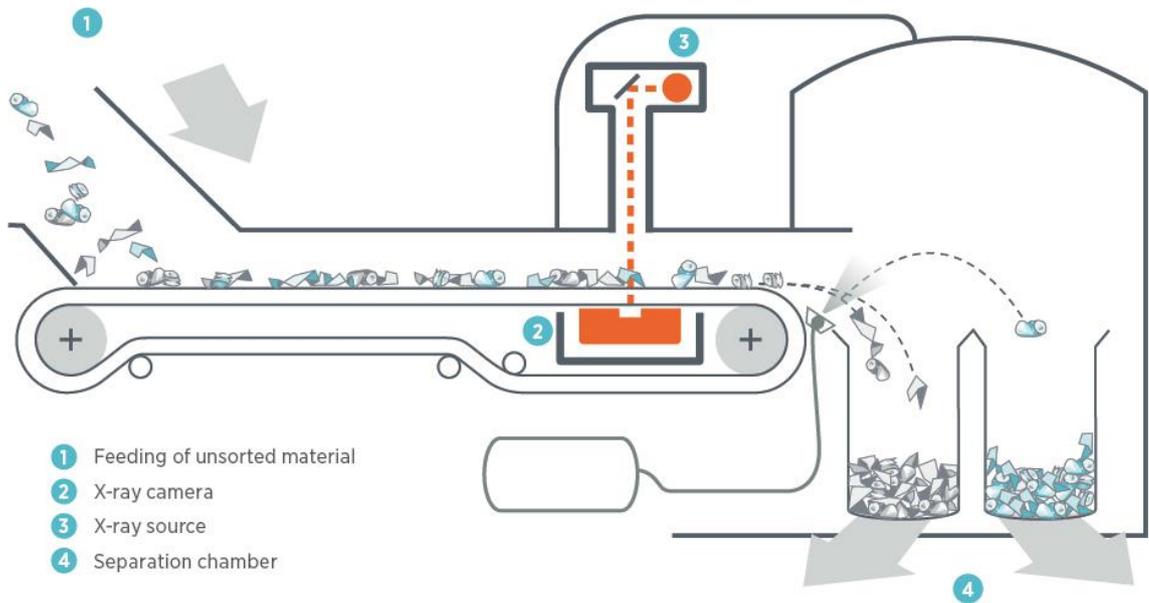


Abbildung 3-13: Funktionsweise Tomra "X-TRACT" (Querschnitt)

Die Prozessparameter gibt Tabelle 3-1 wieder.

Tabelle 3-1: Versuchsdaten X-TRACT

Maschine:	X-TRACT
Arbeitsbreite:	1200 mm
Version:	X1
Ventile:	TS1500
Ventilabstand:	6,25 mm
Bandgeschwindigkeit:	3,15 m/s
Luftdruck:	5 bar

„AUTOSORT“ mit LOD-Erweiterung

Der Input erfolgte über ein Transportband. Unerwünschte Stoffe wurden per Druckluft separiert.

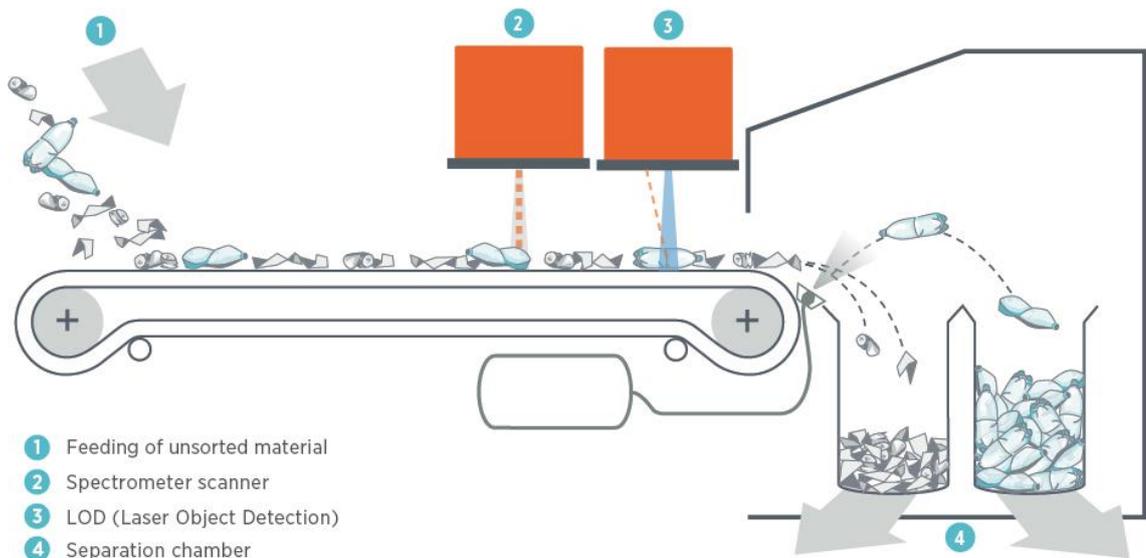


Abbildung 3-14: Funktionsweise Tomra "AUTOSORT" (Querschnitt)

Die Prozessparameter gibt Tabelle 3-2 wieder.

Tabelle 3-2: Versuchsdaten AUTOSORT LOD

Maschine:	AUTOSORT LOD
Arbeitsbreite:	1000 mm
Sensoren:	[NIR1]
Auflösung:	High
Ventile:	TS400
Ventilabstand:	12,5 mm
Bandgeschwindigkeit:	3 m/s
Luftdruck:	6 bar

3.2.3 Abrasive Oberflächenreinigung

Versuche zur abrasiven Reinigung wurden an der Technischen Universität Hamburg-Harburg sowie an der Universität Hamburg durchgeführt. Die Idee hierzu wurde von Trommelentrindern übernommen. In diesen wird die Reibung der Bäume untereinander in einer drehenden Trommel genutzt, um die Rinde zu entfernen. In Anlehnung an dieses

Prinzip wurde getestet, wie stark dieser Effekt zur Reinigung der Oberfläche des Siebüberlaufes genutzt werden kann.

Für den Versuch wurden handelsübliche Betonmischer in drei verschiedenen Versuchsaufbauten benutzt:

- Versuch 1: Mischtrommel mit zwei Schaufeln
- Versuch 2: Mischtrommel mit zwei Schaufeln und groben Kieselsteinen, um die Reibung zu erhöhen
- Versuch 3: Mischtrommel ohne Schaufeln, mit Lochgitter

Jeder Versuch wurde für zwei Stunden gefahren. Die Trommel wurde zu etwa einem Drittel gefüllt. Der Neigungswinkel der Trommelöffnung zur Vertikalen betrug ca. 60°.

Der dritte Versuchsaufbau resultierte aus den Erkenntnissen der vorherigen Versuche und wurde genutzt, um das Testmaterial zu reinigen. Die Trommelöffnung wurde mit einem 10 mm Lochgitter verschlossen, dies ermöglichte es regelmäßig die Trommel zu drehen, um die gelösten Verunreinigungen auszuwerfen.

Auf Grund der starken Entwicklung von Flugstaub war eine quantitative Erfassung der gelösten Verschmutzungsmengen nicht möglich. Daher wurden die Verfahren nur optisch bewertet und der Reinigungseffekt verglichen.



Abbildung 3-15: Versuchsaufbau 1: Mischtrommel mit zwei Schaufeln



Abbildung 3-16: Versuchsaufbau 3: Mischtrommel ohne Schaufeln, mit Lochgitter

3.3 Spanplattenherstellung

Zur Beurteilung der Holzeigenschaften wurden aus dem Siebüberlauf Einschicht-Spanplatten hergestellt. Hierzu wurden je vier Platten mit Harnstoff-Formaldehydharz-Leim (UF) sowie Phenol-Formaldehydharz-Leim (PF) verpresst. Um Referenzwerte zu erhalten wurden Referenzplatten aus Fichte (*Picea* spp.) im exakt gleichen Verfahren, auch mit beiden Leimen, hergestellt. Beide Holzarten werden im Folgenden gemeinsam behandelt.

Die verschiedenen Plattentypen werden wie folgt bezeichnet:

- SÜ-UF (Siebüberlauf, UF-Leim)
- SÜ-PF (Siebüberlauf, PF-Leim)
- FI-UF (Fichte, UF-Leim)
- FI-PF (Fichte, PF-Leim)

3.3.1 Trocknung

Der Siebüberlauf wurde in einem Umlufttrockner technisch getrocknet. Hierbei wurde kein Trockenprogramm eingesetzt, sondern konstant bei 80 °C bis zum Erreichen einer Holzfeuchte von 8 % getrocknet. Gemessen wurde die Holzfeuchte im Zentrum von vier der dicksten Holzstücke. Die Anlage fuhr dann automatisch herunter.

Die Fichte wurde getrocknet zugekauft und daher nicht weiter getrocknet.

Die Holzfeuchte wurde per Darrprobe in Anlehnung an DIN EN 13183-1 bestimmt. Hierzu wurden Proben des Holzes bei 103 °C bis zur Gewichtskonstanz getrocknet und die Masse des entwichenen Wassers berechnet.

3.3.2 Zerspanung

Für die Zerspanung wurde eine Messermühle eingesetzt. Die Schneidrichtung war 90° zur Faserrichtung des Holzes. Die Maschenweite des Siebes für die geschnittenen Späne war 10 mm.

Die Fichte wurde in Bohlen geliefert. Diese wurden zu 25 x 25 mm Leisten gesägt und in einem Häcksler vorzerkleinert. Im Anschluss wurden die Stücke wie der Siebüberlauf zerspannt.

3.3.3 Siebung

Die Späne wurden in einer Taumel-Siebmaschine gesiebt. Die Siebfractionen waren:

- > 4 mm (Überkorn)
- 4-0,5 mm (Nutzfraktion)
- < 0,5 mm (Staub)

Der Verteilung der Späne auf die Fraktionen wurde ermittelt. Für die Spanplatten wurden nur die Späne der Nutzfraktion eingesetzt.

3.3.4 pH-Wert

Um Rückschlüsse auf die Qualität der Verleimung ziehen zu können, wurde der pH-Wert des Siebüberlaufes bestimmt. Hierzu wurde das Holz zunächst in einer Messermühle zu Holzmehl zermahlen. Hiervon wurden 5 g Trockenmasse, entsprechend 7,99 g Gesamtmasse, mit 147 ml destilliertem Wasser versetzt und 24 h auf einem Rütteltisch extrahiert. Der pH-Wert wurde durch Filtration über einen Blaubandfilter per Doppelbestimmung ermittelt.

Da zum Zeitpunkt des Versuches noch kein Fichtenholz vorhanden war, wurde hierfür der gängige Literaturwert angenommen.

3.3.5 Schüttdichte

Die Schüttdichte der Späne wurde in einem Becherglas mit 2 L Fassungsvermögen als Doppelbestimmung ermittelt. In dieses wurden klimatisierte Späne (20 °C / 65 % RH) geschüttet und die Masse bestimmt. Die Schüttdichte wurde gemittelt und auf kg/m³ hochgerechnet.

3.3.6 Leime und Beleimung

Für die Verleimung wurden zwei Leime genutzt:

- Ein Harnstoff-Formaldehyd-Leim (UF) mit 66,50 % Feststoffgehalt. Diesem wurde zusätzlich ein Härter beigemischt. Hierbei handelte es sich um Ammoniumsulfat ((NH₄)₂SO₄), dieses wurde in Wasser gelöst.
- Ein Phenol-Formaldehyd-Leim (PF) mit 58,00 % Feststoffgehalt. Dieser wurde ohne Härter eingesetzt.

Die Leimflotten für die Beleimung sind in Tabelle 3-3 dargestellt.

Tabelle 3-3: Leimflotten für Plattenherstellung

	UF-Leim	PF-Leim
Leim atro / Holz atro (%)	10,00	10,00
Härter / Leim (%)	2,00	/
u Siebüberlauf vorher (%)	2,80	3,70
u Siebüberlauf nachher (%)	9,82	10,69
u Fichte vorher (%)	4,00	4,60
u Fichte nachher (%)	9,34	10,38

Die Beleimung der Späne erfolgte in einem Trommelbeleimer. Mit Hilfe von Druckluft wurde der Leim auf die Späne geblasen, durch die Rotation der Trommel erfolgte die Verteilung auf diesen. Nach Abschluss der Beleimung wurden die Späne unmittelbar weiterverarbeitet.

3.3.7 Pressprogramm für die Spanplatten

Die Spanplatten wurden einschichtig, unorientiert in einem 550 x 550 mm Rahmen von Hand gestreut, pneumatisch vorverdichtet und unverzüglich gepresst. Hierzu wurden 18 mm Distanzleisten genutzt.

Die Pressprogramme für die Plattentypen sind in Tabelle 3-4 dargestellt.

Tabelle 3-4: Pressparameter der Plattenherstellung

Parameter	UF-Leim	PF-Leim
Zieldichte atro (kg/m ³)	650	650
Pressdruck (bar)	188	188
Spez. Druck (N/mm ²)	4	4
Temperatur Presse (°C)	200	130
Presszeitfaktor (s/mm)	10	30
Presszeit (s)	170	510

Nach dem Pressvorgang wurden die Platten abgekühlt und im Normklima bei 20 °C und 65 % RH konditioniert.

3.3.8 Prüfkörper

Es wurden Prüfkörper zur Bestimmung von Dichte, Dickenquellung, Querkzugfestigkeit, Biegefestigkeit und Formaldehydemissionen hergestellt. Dies geschah in Anlehnung an DIN EN 326-1. Hierfür wurden die Platten auf 17 mm Dicke geschliffen, besäumt und dann auf Format gesägt. Von jedem Plattentyp wurden folgende Prüfkörper hergestellt:

- Dichte: 6 Stück, 50 x 50 mm
- Dickenquellung: 8 Stück, 50 x 50 mm
- Querkzugfestigkeit: 8 Stück, 50 x 50 mm
- Biegefestigkeit: 12 Stück, 390 x 50 mm
- Formaldehydemission: 3 Stück, 400 x 50 mm

Ferner wurde die Optik der Platten vergleichend beurteilt. Um die relative Darstellung auf Fotos zu quantifizieren, wurde eine Weißgradbestimmung nach ISO durchgeführt. Hierbei wird mit einem Photometer der Farbort der Platten über die Fläche bestimmt. Dieses Verfahren findet in der Regel nur bei Papier oder Zellstoff Anwendung, auf Grund des Corona-Virus im Frühjahr 2020, und den hiermit verbundenen enormen Einschränkungen im Universitätsbetrieb, war hier jedoch keine andere Möglichkeit nutzbar. Jede Platte wurde 6-fach bestimmt.

3.4 Statistik

Zur statistischen Auswertung der Ergebnisse wurde R Statistics⁷ genutzt. Zur Bewertung von Signifikanz wurde für homoskedastische Varianzen der ungepaarte t-Test genutzt, für heteroskedastische Varianzen der Welch-Test. Der P-Wert für den einseitigen Vertrauensbereich war 0,95.

Mittelwerte wurden stets als arithmetisches Mittel berechnet.

Alle Werte werden mit ihrer Standardabweichung angegeben.

⁷ The R Foundation for Statistical Computing, Welthandelsplatz 1, 1020 Wien, Österreich

4 Ergebnisse

4.1 Analyse des Siebüberlaufes

4.1.1 Störstoffanteil

Der absolute sowie prozentuale Störstoffanteil des Siebüberlaufes ist in Tabelle 4-1 beziehungsweise Abbildung 4-1 dargestellt.

Tabelle 4-1: Massenanteile für Holz und Störstoffe in der Siebüberlaufprobe

Fraktion	Masse (g)
Holz	93.600,00
Glas	476,64
Knochen	672,16
Kunststoffe	801,24
Metalle	504,20
Steine	14.083,60
Sonstiges	1.261,36
Störstoffe gesamt	17.799,20

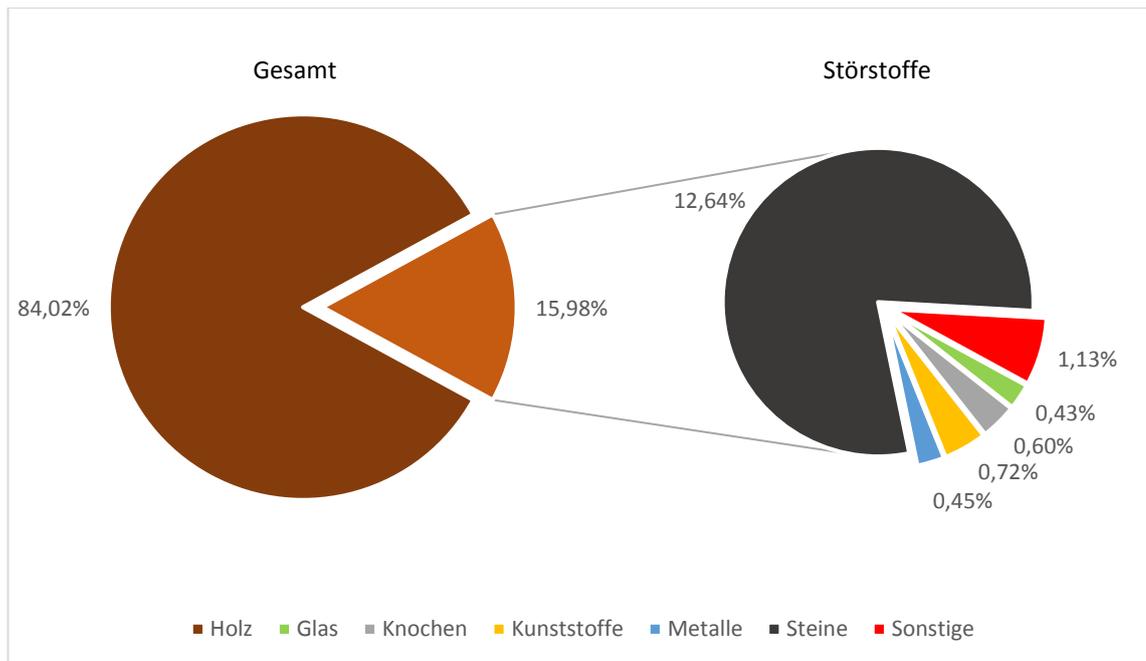


Abbildung 4-1: Prozentuale Anteile der Fraktionen im Siebüberlauf (Gew.-%)

Es zeigt sich eine klare Tendenz bei den Störstoffen. Über $\frac{3}{4}$ der Masse werden von Steinen ausgemacht, die restlichen Anteile schwanken zwischen 0,43-1,13 %. Bemerkenswert ist die Tatsache, dass trotz Steinabscheider und Windsichter noch Steine und Folien (enthalten in „Kunststoffe“) zu finden sind. Dies lässt sich jedoch leicht mit der Beschaffenheit der Materialien erklären: Die Steine werden über ein schräges Laufband abgeschieden. Runde Steine rollen, entgegen der Laufrichtung des Bandes, bergab. Haben Steine jedoch z. B. eine flache oder längliche Form, so werden sie bergauf transportiert. Die noch enthaltenen Folien hingegen konnten durch den Windsichter nicht abgesogen werden, da sie um schwerere Stoffe gewickelt waren oder im Moment der Luftstrompassage verdeckt wurden.

Aufnahmen aller sortierten Fraktionen finden sich im Anhang 9.2.

4.1.2 Holzarten

Die bestimmten Familien und Gattungen gibt Tabelle 4-2 wieder.

Tabelle 4-2: Holzarten in der Siebüberlaufprobe

Probennummer	Familie	Gattung	Deutscher Name
Laubholzgewächse			
K1	Betulaceae	Alnus spp.	Erle
E1	Fagaceae	Castanea spp.	Kastanie
Z1	Fagaceae	Fagus spp.	Buche
Z4	Fagaceae	Quercus spp.	Eiche
I4	Oleaceae	Syringa spp.	Flieder
Z6	Oleaceae	Syringa spp.	Flieder
K2	Rosaceae	Sorbus spp.	Eberesche
Z10	Rosaceae	Prunus spp.	Kirsche
Nadelholzgewächse			
Z2	Cupressaceae	?	Zypressengewächse
K3	Cupressaceae	Cupressus spp.	Zypresse
Z5	Cupressaceae	Thuja spp.	Lebensbaum
H1	Pinaceae	Picea spp.	Fichte
H2	Pinaceae	Picea spp.	Fichte
H3	Pinaceae	Picea spp.	Fichte
H4	Pinaceae	Pinus spp.	Kiefer
Z7	Pinaceae	Pinus spp.	Kiefer
Z8	Pinaceae	Tsuga spp.	Hemlocktanne
Z3	Pinaceae	Tsuga spp.	Hemlocktanne
Z9	Taxaceae	Taxus spp.	Eibe
H5	Taxaceae	Taxus spp.	Eibe

Probennummer	Familie	Gattung	Deutscher Name
Unklar / Nicht bestimmbar			
I3	Vitaceae?	Vitis spp.?	Weinrebe?
I1	Nicht bestimmbar		
I2	Nicht bestimmbar		
I5	Nicht bestimmbar		

Im Siebüberlauf kommen sowohl die vier häufigsten deutschen Baumarten Fichte, Kiefer, Buche und Eiche (*Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft, 2012*), als auch typische Gartenhölzer wie z. B. Kirsche, Thuja und Flieder vor. Die Stichprobe bestätigt somit die erwartete Vielfalt der enthaltenen Holzarten.

Im Folgenden ist die Bestimmung an zwei Gattungen exemplarisch dargestellt:

Eiche (*Quercus*): Kann an Hand folgender Merkmale sicher bestimmt werden.

Querschnitt:

- Ringporigkeit
- Große Gefäße
- Ein- und mehrreihige Holzstrahlen
- Netzparenchym vorhanden

Tangentialschnitt:

- Ein- und mehrreihige Holzstrahlen



Abbildung 4-2: Eiche, Querschnitt

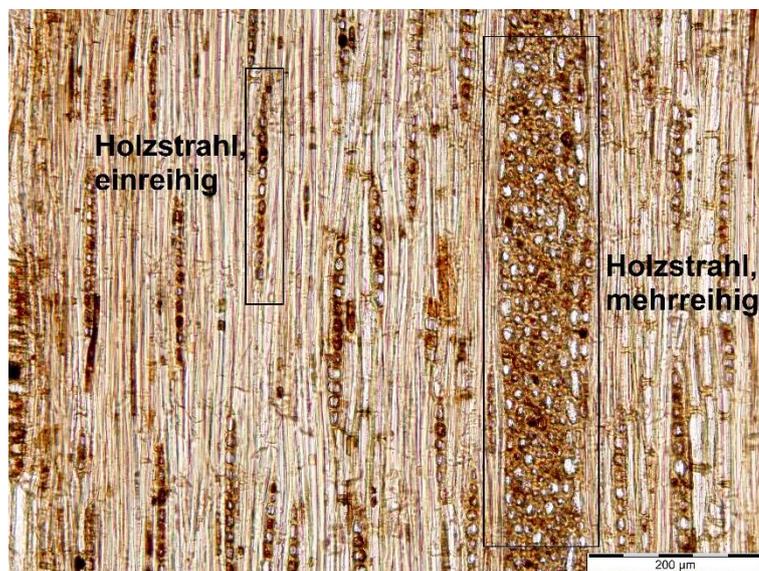


Abbildung 4-3: Eiche, Tangentialschnitt

Kiefer (Pinus): Kann an Hand folgender Merkmale sicher bestimmt werden.

Querschnitt:

- Harzkanäle vorhanden
- Früh- und Spätholz vorhanden und deutlich abgegrenzt

Radialschnitt:

- Fenstertüpfel vorhanden
- Stark gezähnte Quertracheiden



Abbildung 4-4: Kiefer, Querschnitt

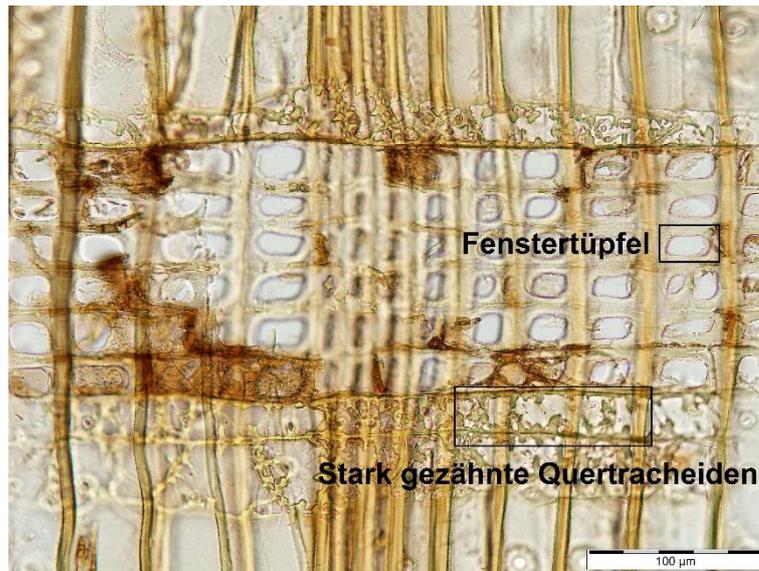


Abbildung 4-5: Kiefer, Radialschnitt

4.1.3 Holzfeuchte

Die ermittelten Holzfeuchten sind in Tabelle 4-3 dargestellt.

Tabelle 4-3: Holzfeuchtwerte der Holzfraktion

Probe	Masse Feucht (g)	Masse Darrtrocken (g)	Masseverlust (g)	Holzfeuchte u (%)
1	27,51	15,04	12,47	82,9
2	41,04	25,74	15,30	59,4
3	32,17	22,37	9,80	43,8
4	50,84	26,78	24,06	89,8
5	49,05	32,90	16,15	49,1
6	81,51	41,30	40,21	97,4
7	75,13	52,93	22,20	41,9
8	119,27	61,58	57,69	93,7
9	117,46	65,36	52,10	79,7
10	148,59	86,23	62,36	72,3
Ø				71,0

Die Holzfeuchte liegt ausnahmslos oberhalb des Fasersättigungsbereiches ($u_{FS} \sim 30\%$).

4.1.4 Ascheanteil

Der ermittelte Aschegehalt zeigt einen deutlichen Unterschied zwischen dem ungereinigten und dem gereinigten Material. Das ungereinigte Material weist durchschnittlich 6,30 % und damit 136 % mehr Asche – als die gereinigten Proben – auf. Das gereinigte Material liegt dagegen mit durchschnittlich 2,67 % Ascheanteil im üblichen Bereich (Dietz u. a., 2016). Siehe auch Tabelle 4-4.

Die Differenz des Aschegehaltes beträgt 3,63 %. Auf eine Tonne hochgerechnet bedeutet dies 36,30 kg Anhaftungen.

Bilder der veraschten Proben finden sich im Anhang 9.3.

Tabelle 4-4: Ascheanteile von ungereinigter und gereinigter Holzfraktion

Probe	Nr.	Einwaage netto (g)	Auswaage netto (g)	Aschegehalt [%]	Mittelwert
Holzfraktion ungereinigt	1	3,2212	0,2050	6,36	6,30
	2	3,1941	0,2026	6,34	
	3	3,1445	0,1952	6,21	
Holzfraktion gereinigt	1	3,6352	0,0928	2,55	2,67
	2	3,4568	0,0933	2,70	
	3	3,5808	0,0984	2,75	

4.1.5 Materialbeschaffenheit

Die Oberfläche war, nach Entfernen der Verschmutzung, noch gut intakt. Nur minimale Teile der Rinde ließen sich mit dem Messer einfach abschaben. Hierbei waren keinerlei Myzelien von Pilzen oder Bohrlöcher von Schädlingen zu finden.

Der freigelegte Querschnitt der Proben war ausnahmslos fest. Im Kern der Proben ließ sich keinerlei Befall von Pilzen oder durch Schädlinge feststellen.

An keiner der Proben ließ sich Fäule nachweisen.

4.2 Aufbereitung

4.2.1 Schwimm-Sink-Verfahren

4.2.1.1 Simulation

Die Gesamtprobe betrug 28,38 kg.

Das Ergebnis der Sortierung der beiden Fraktionen ist in Tabelle 4-5 und Tabelle 4-6 dargestellt.

Tabelle 4-5: Massen der Stoffe in der Schwimmfraktion

Stoff	Masse (kg)	Prozentualer Anteil (%)
Holz	18,90	98,11
Glas	0,00	0,00
Knochen	0,02	0,11
Kunststoffe	0,07	0,38
Metalle	0,00	0,00
Steine	0,00	0,00
Sonstiges	0,27	1,40
Störstoffe gesamt	0,36	1,89
Anteil aus Input	19,26	67,88

Es zeigt sich, dass bis auf einige Reste an Knochen, Kunststoffen und Sonstigem alle Störstoffe entfernt werden konnten.

Tabelle 4-6: Massen der Stoffe in der Sinkfraktion

Stoff	Masse (kg)	Prozentualer Anteil (%)
Holz	4,70	51,54
Glas	0,13	1,38
Knochen	0,19	2,08
Kunststoffe	0,10	1,07
Metalle	0,11	1,21
Steine	3,51	38,51
Sonstiges	0,38	4,21
Störstoffe gesamt	4,42	48,46
Anteil aus Input	9,12	32,12

Die Reinheit der Schwimmfraktion lag bei 98,11 %. Enthalten waren nur noch Knochen, Kunststoffe und Sonstiges. Die Zusammensetzung des Siebüberlaufes vor der Schwimm-Sink-Trennung sowie der Schwimm- und der Sinkfraktionen ist in Abbildung 4-6 dargestellt. Fotos finden sich im Anhang 9.4.

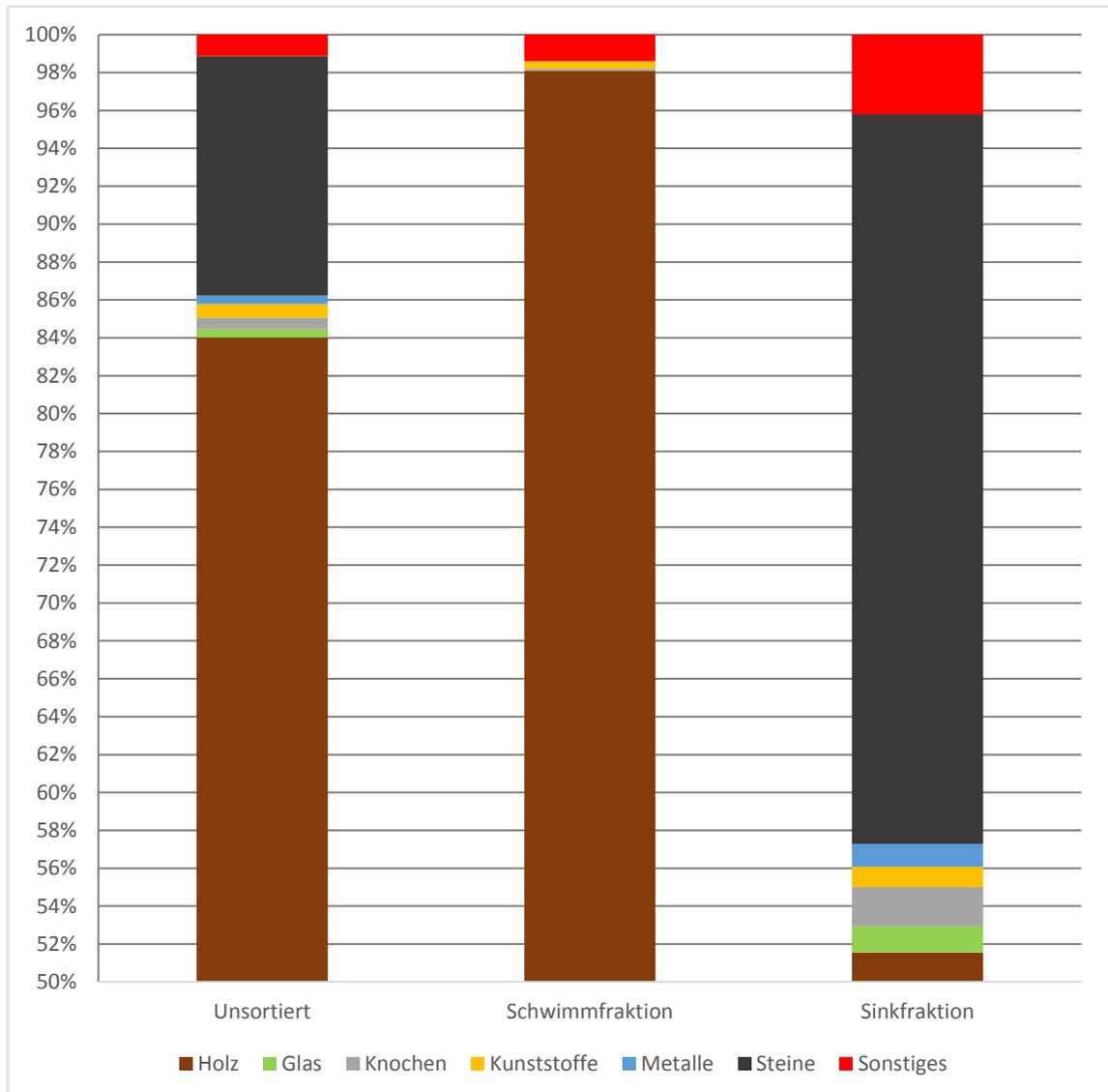


Abbildung 4-6: Holz- und Störstoffanteile vor und nach SSV

4.2.1.2 Praktische Durchführung

Vergleichbarkeit

Werte zu Störstoffanteil des Inputs oder zur Reinheit der Holzfraktion liegen zur praktischen Durchführung von Fa. Doppstadt nicht vor. Lediglich für die Gesamtbilanz liegen

Werte vor. Hierbei ist zu beachten, dass die Mengenströme nach Volumen und nicht nach Gewicht aufgestellt wurden. Eine sichere Umrechnung ist auf Grund stark schwankender Faktoren (Ursprung des Abfalls, Jahreszeit, Trockensubstanz, Prozessparameter oder Lagerungsdauer, um nur einige zu nennen) nicht möglich. Tabelle 4-7 gibt diese Werte wieder.

Tabelle 4-7: Mengenströme im SSV von Fa. Doppstadt

Fraktion	m ³ /h
Input von Kompostmiete	40,00
Kompostaustrag Trommelsieb	4,00
Holzaustrag Windsichter	15,00
Folienaustrag Windsichter (Schüttung in Container)	1,00
Holzaustrag Schwimm-Sink	10,00
Steinaustrag Schwimm-Sink	10,00

Der Input in das SSV bestand ebenfalls aus Siebüberlauf. Zu enthaltenen Störstoffen liegen keine Werte vor. Es ist allerdings von einer geringeren Störstoffbelastung auszugehen, dies zeigen zum einen die Fotos, zum anderen die Trennung in zwei, recht reine Fraktionen. Glas spielte im Versuch keine Rolle, Metall trat nur sehr vereinzelt in der Sinkfraktion auf.

Wird eine höhere, sowie vielfältigere Störstoffbelastung angenommen, so lassen sich die Ergebnisse auf den Siebüberlauf aus dem BKW Bützberg übertragen. Die Mengenströme würden sich deutlich ändern und die Schwimm- und Sinkfraktionen wären deutlich heterogener, analog der Ergebnisse der Simulation. Das Grundprinzip des Prozesses bleibt jedoch vergleichbar.

Ergebnisse

Die Auswertung des bereitgestellten Bildmaterials stand im Einklang mit dem Ergebnis der Simulation. Die Holzfraktion zeigt einen hohen Reinheitsgrad, lediglich Reste von Kunststoffen sind zu erkennen. Gemäß den Daten der Simulation ist davon auszugehen, dass auch Glas und Metalle sicher abgeschieden würden. Kunststoffe und Sonstige

schwimmen circa zur Hälfte, bei Knochen schwimmt ein geringer Teil. Eine Befreiung von Anhaftungen fand im Prozess nicht statt, da das Wasserbad schnell verschmutzt.

Durch Variieren der Trenndichte mittels Aufstromtechnik könnte das Ergebnis noch beeinflusst werden. Dies würde mehr Holz in der Schwimmfraktion erhalten, allerdings auch den Anteil der Störstoffe erhöhen. Hierzu müssten Erfahrungswerte gesammelt werden.

4.2.2 Röntgen- und Nah-Infrarot-Sortierung

„X-TRACT“ Röntgenerkennung

Für den ersten Prozessschritt, die Röntgensortierung, wurde nach drei Testläufen die beste Einstellung gefunden.

Der Durchsatz betrug 3,3 t/h. Der Verbrauch von Druckluft lag bei 200 l/min.

Input: 275,70 kg.

Tabelle 4-8: Ergebnis der Röntgensortierung

Fraktion	Masse (kg)	Anteil (%)
Accept: Holz, Kunststoffe, Sonstiges	230,60	83,60
Eject: Knochen, Metall, Steine, Glas	45,10	16,40

„AUTOSORT“ mit LOD-Erweiterung

Die Gutfraktion aus der Röntgensortierung wurde zur weiteren Aufbereitung in die VIS/NIR-Sortierung gegeben. Zur Verbesserung des Sortierergebnisses wurde der LOD ebenfalls zugeschaltet. Ziel war es die restlichen Störstoffe heraus zu filtern.

Der Durchsatz betrug 4,7 t/h. Der Verbrauch von Druckluft liegt nicht vor.

Input: 111,30 kg.

Tabelle 4-9: Ergebnis der VIS/NIR/LOD-Sortierung

Fraktion	Masse (kg)	Anteil (%)
Accept: Holz	107,50	96,60
Eject: Kunststoffe, Sonstiges	3,80	3,40

Im Accept konnten keine weiteren Verunreinigungen festgestellt werden.

Im Eject waren ca. 40 % (1,52 kg) Holz enthalten. Damit wurden 1,41 % Holz ausgeworfen.

Das Ergebnis der Sortierung ist in Abbildung 4-7 dargestellt.

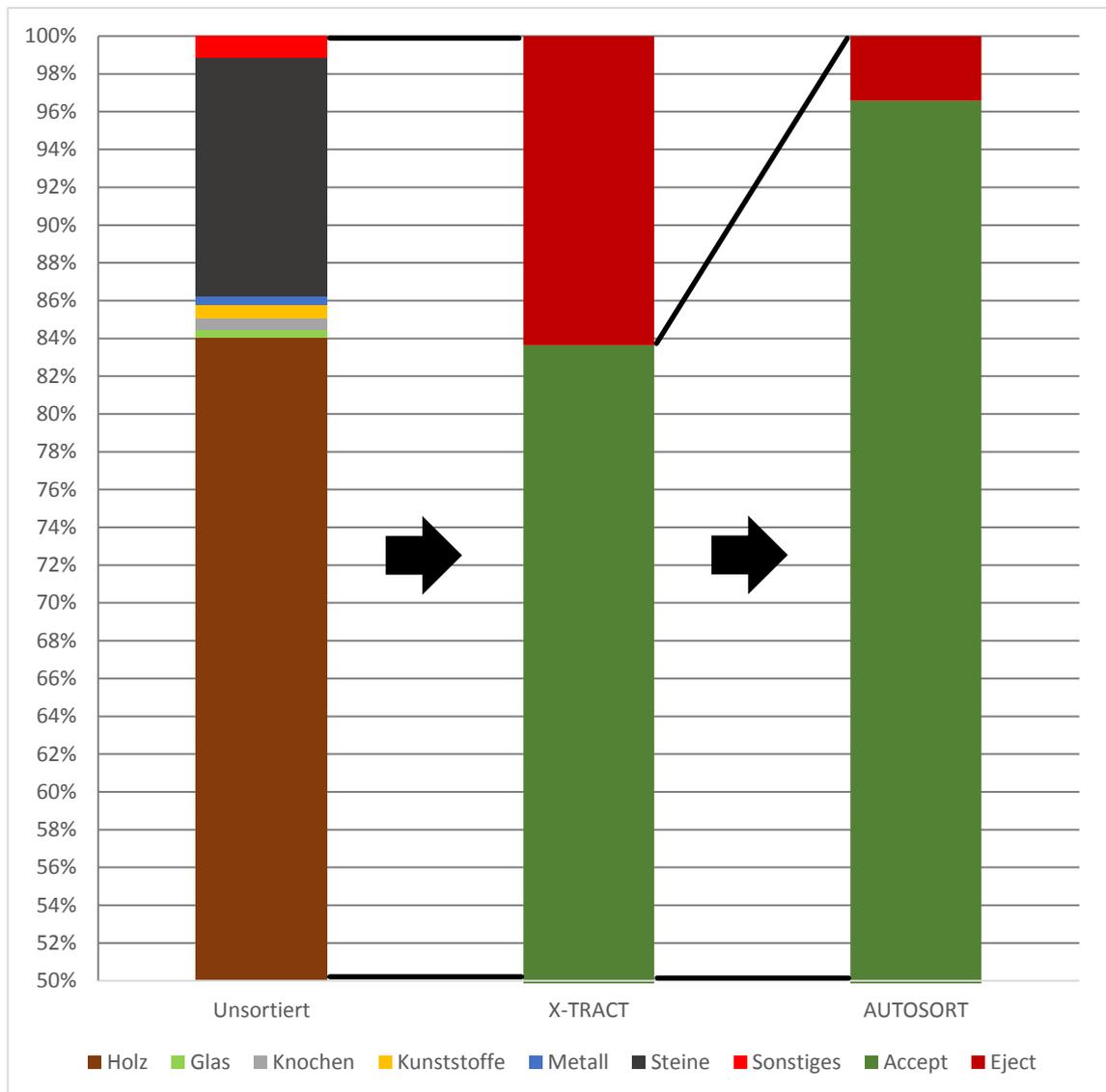


Abbildung 4-7: Holz- und Störstoffanteile vor und nach der Röntgensortierung

4.2.3 Abrasive Oberflächenreinigung

Die Staubentwicklung in allen Versuchsvarianten war enorm. Dies betraf sowohl Flugstaub als auch schwereren Staub, welcher sich in der Trommel ansammelte. Dieser Staub beeinträchtigte möglicherweise das Reinigungsergebnis, da er zu einer erneuten Verschmutzung geführt haben könnte. Mit einer Lochtrommel ließe sich hier wahrscheinlich ein besseres Ergebnis erzielen.

Versuch 1: Mischtrommel mit zwei Schaufeln

Im ersten Versuch zeigte sich nach einer Stunde bereits eine leichte Aufhellung des Materials, nach zwei Stunden eine deutliche Aufhellung. Durch die Schaufelblätter wurde das Material in der Trommel weit angehoben, teilweise deutlich über 90°. Dies führte dazu, dass das Material eher aufeinander fiel als aneinander zu reiben. Dies dürfte den Prozess verlangsamt haben.

Versuch 2: Mischtrommel mit zwei Schaufeln und groben Kieselsteinen

Im zweiten Versuch war der Reinigungseffekt nach einer Stunde bereits ausgeprägter als in Versuch 1. Das letztendliche Ergebnis war allerdings identisch. Weitere Versuche, um eine mögliche Geschwindigkeitssteigerung zu messen, waren nicht durchführbar. Auch in diesem Versuch dürfte sich das Anheben des Materials durch die Schaufelblätter eher nachteilig ausgewirkt haben.

Versuch 3: Mischtrommel ohne Schaufeln

Der dritte Versuch wurde gemäß den Erfahrungen aus Versuch 1 und 2 angepasst. Die Schaufeln in der Trommel wurden nicht genutzt, dies führte zu einer stärkeren Umwälzung des Materials. Die Kieselsteine wurden, auf Grund des geringen Effektes, nicht eingesetzt. Die gelösten Anhaftungen wurden regelmäßig, durch Drehen der Trommel, ausgeworfen.

Ergebnisse:

Rechts: Ungereinigt; unten: Versuch 1; oben: Versuch 2:



Abbildung 4-8: Ergebnisse der abrasiven Reinigung 1

Versuch 3:



Abbildung 4-9: Ergebnisse der abrasiven Reinigung 2

4.3 Spanplattenherstellung

4.3.1 Trocknung

Die Holzfeuchte des Siebüberlaufes lag nach der Trocknung bei 8,1 %.

Die Holzfeuchte der Fichte lag bei 11,6 %.

4.3.2 Zerspanung

Während der Zerspanung des Siebüberlaufes gab es, trotz der vorherigen Reinigungen, erneut eine starke Staubentwicklung.

Die Späne aus Siebüberlauf (Abbildung 4-10) wiesen einen deutlich geringeren Schlankheitsgrad auf. Sie hatten zum großen Teil kurze, eher kubische Formen. Die Fichtenspäne (Abbildung 4-11) waren hingegen länglicher und dünner.



Abbildung 4-10: Späne aus Siebüberlauf, Nahaufnahme der Form



Abbildung 4-11: Späne aus Fichte, Nahaufnahme der Form

4.3.3 Siebung

Die Verteilung auf die Siebfractionen ist in Tabelle 4-10 ersichtlich.

Tabelle 4-10: Siebfractionen von Siebüberlauf und Fichte

	Fraktion	Masse (g)	%
Siebüberlauf	> 4 mm	6.803,00	14,18
	4–0,5 mm	37.639,00	78,47
	< 0,5 mm	3.524,00	7,35
Fichte	> 4 mm	7.834,00	17,40
	4–0,5 mm	36.443,00	80,94
	< 0,5 mm	746,00	1,66

Bei der prozentualen Verteilung zeigt sich deutlich der hohe Staubanteil beim Siebüberlauf (Abbildung 4-12).

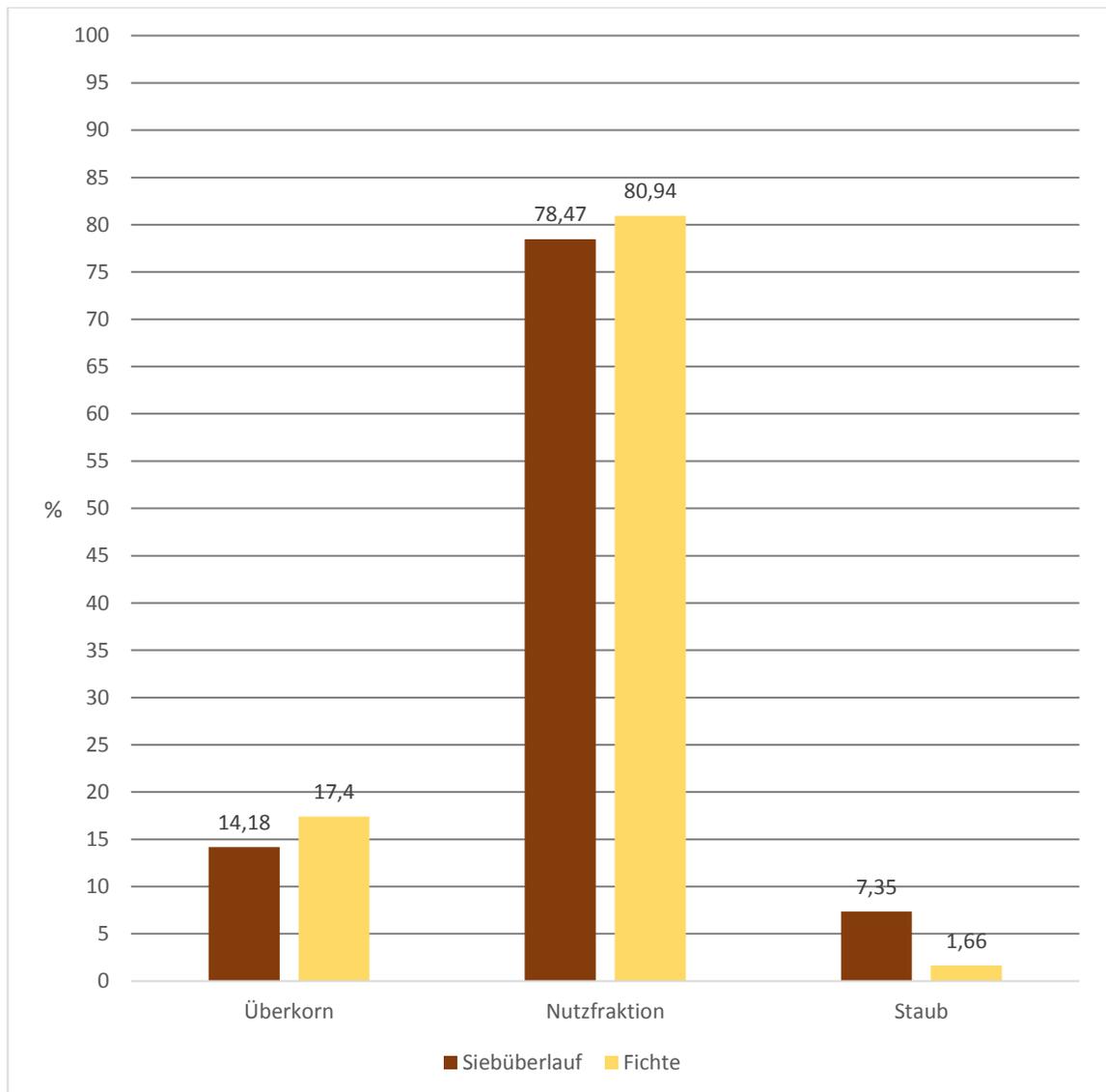


Abbildung 4-12: Prozentuale Verteilung der Siebfraktionen von SÜ und FI

4.3.4 pH-Wert

Der pH-Wert des Holzmehls aus Siebüberlauf war 7,83 bei 22 °C.

Der pH-Wert von Fichte ist im Bereich um 5,00 (Grosser/Teetz, 1998).

4.3.5 Schüttdichte

Die Schüttdichte des Siebüberlaufes betrug 259 kg/m³.

Die Schüttdichte der Fichte betrug 132 kg/m³.

4.4 Eigenschaften der Spanplatten

Alle Eigenschaften wurden nach den entsprechenden Normen oder zumindest in Anlehnung an diese bestimmt, da teilweise nicht alle geforderten Bedingungen eingehalten werden konnten.

Signifikante Unterschiede werden mit Hilfe von Buchstaben dargestellt:

Gleiche Buchstaben = Nicht signifikant

Verschiedenen Buchstaben = Signifikant

4.4.1 Optik

Auffällig war die dunkle Farbe der Spanplatten aus Siebüberlauf. Bei diesen war, im Gegensatz zu den Fichtenplatten, kein Unterschied zwischen dem hellen UF-Leim und dem dunklen PF-Leim zu erkennen.

Abbildung 4-13 zeigt alle Plattentypen.



Abbildung 4-13: Vergleich der vier Spanplattentypen

- I SÜ-UF
- II SÜ-PF, die dunklen Leimfugen durch den PF-Leim sind nicht zu erkennen
- III FI-UF
- IV FI-PF, die dunklen Leimfugen sind deutlich zu erkennen

Die Daten der Weißgradbestimmung bestätigen diesen Eindruck, ersichtlich in Abbildung 4-14.

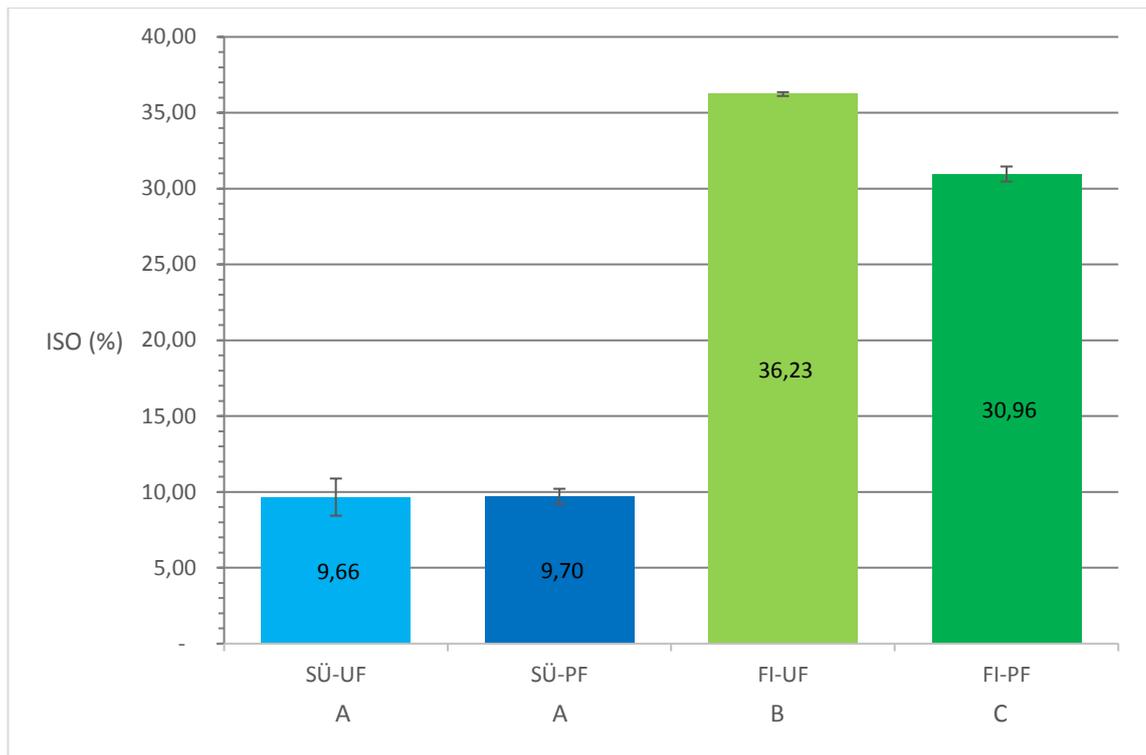


Abbildung 4-14: Weißgrade der Spanplatten nach ISO

4.4.2 Dichte

Die Mittelwerte der Dichtebestimmung sind in Tabelle 4-11 dargestellt.

Die Dichte wurde bei 12 % Holzfeuchte gemessen.

Tabelle 4-11: Dichten der Spanplatten

Plattentyp	Dichte (kg/m ³)	Dichte atro (kg/m ³)
SÜ-UF	718	641
SÜ-PF	721	644
FI-UF	715	638
FI-PF	715	638

Die Zieldichte atro von 650 kg/m³ wurde somit um 6-12 kg/m³, oder 0,92-1,82 %, untertroffen.

4.4.3 Dickenquellung

Die Dickenquellung nach Wasserlagerung wurde nach DIN EN 317 bestimmt. Die Proben wurden im Normklima in Wasser getaucht. Gemessen wurden Werte für die Quellung nach zwei Stunden sowie nach 24 Stunden. Hierbei zeigte sich im Quellverhalten keine Tendenz bezüglich Holzart oder Leim.

Die Ergebnisse sind in Abbildung 4-15 dargestellt.

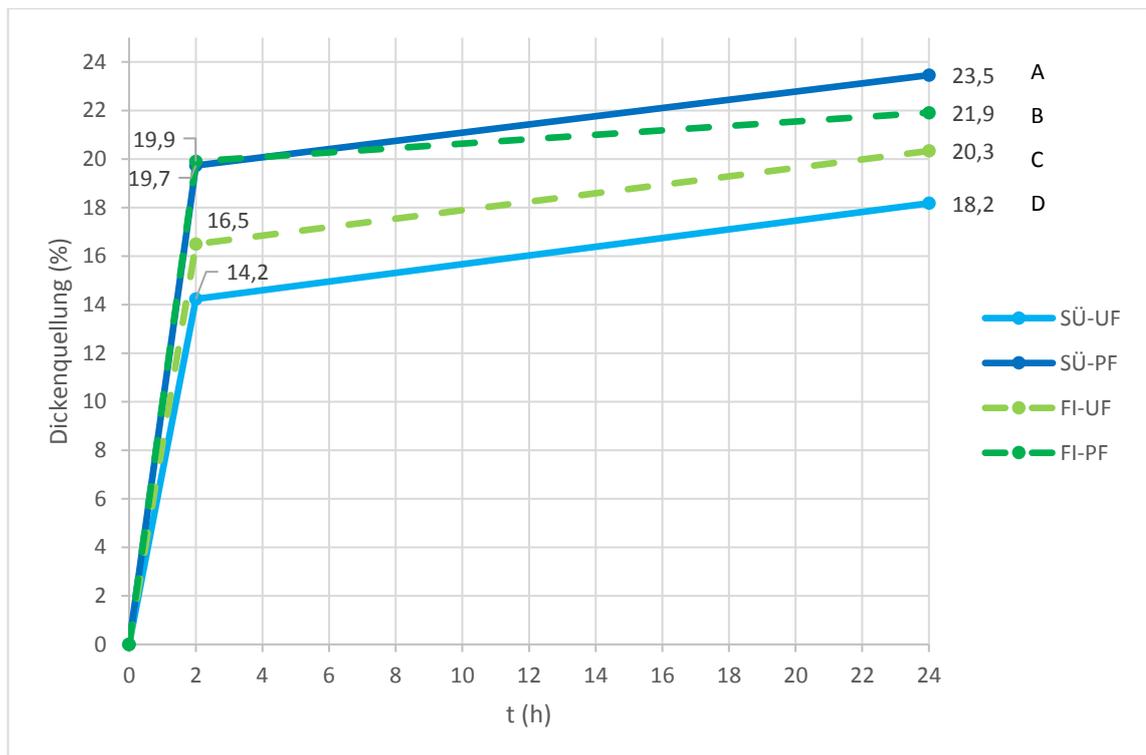


Abbildung 4-15: Dickenquellung der Spanplatten nach Wasserlagerung

4.4.4 Querzugfestigkeit

Diese wurde bestimmt nach DIN EN 319. Die Proben wurden bis zum Bruch quer belastet. Siebüberlauf wies hier die höchsten Werte auf, Fichte niedrigere. Bei Fichte war die Festigkeit mit PF-Leim niedriger.

Die Ergebnisse sind in Abbildung 4-16 dargestellt.

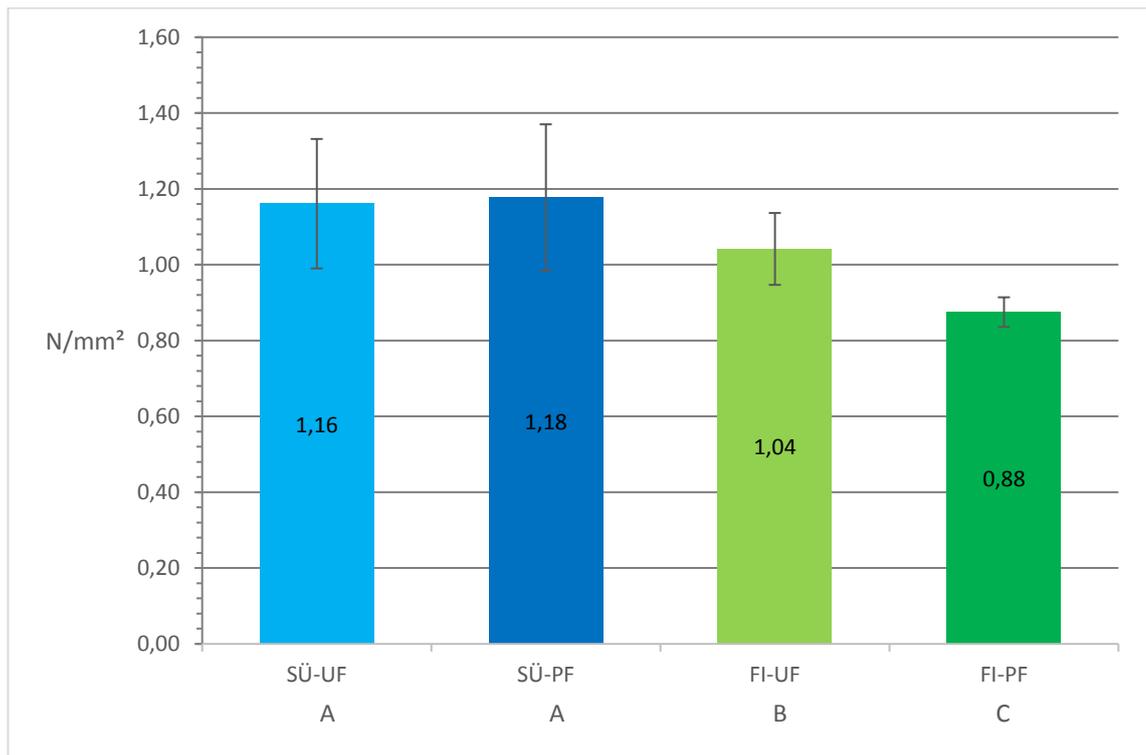


Abbildung 4-16: Querzugfestigkeit der Spanplatten

4.4.5 Biege-Elastizitätsmodul und Biegefestigkeit

Der Biege-Elastizitätsmodul und die Biegefestigkeit wurden bestimmt nach DIN EN 310. Die Proben wurden im Dreipunktbiegeversuch bis zum Bruch belastet. Fichte wies die höchsten Werte auf. Bei Siebüberlauf war die Festigkeit mit PF-Leim niedriger.

Die Ergebnisse sind in Abbildung 4-17 und Abbildung 4-18 dargestellt.

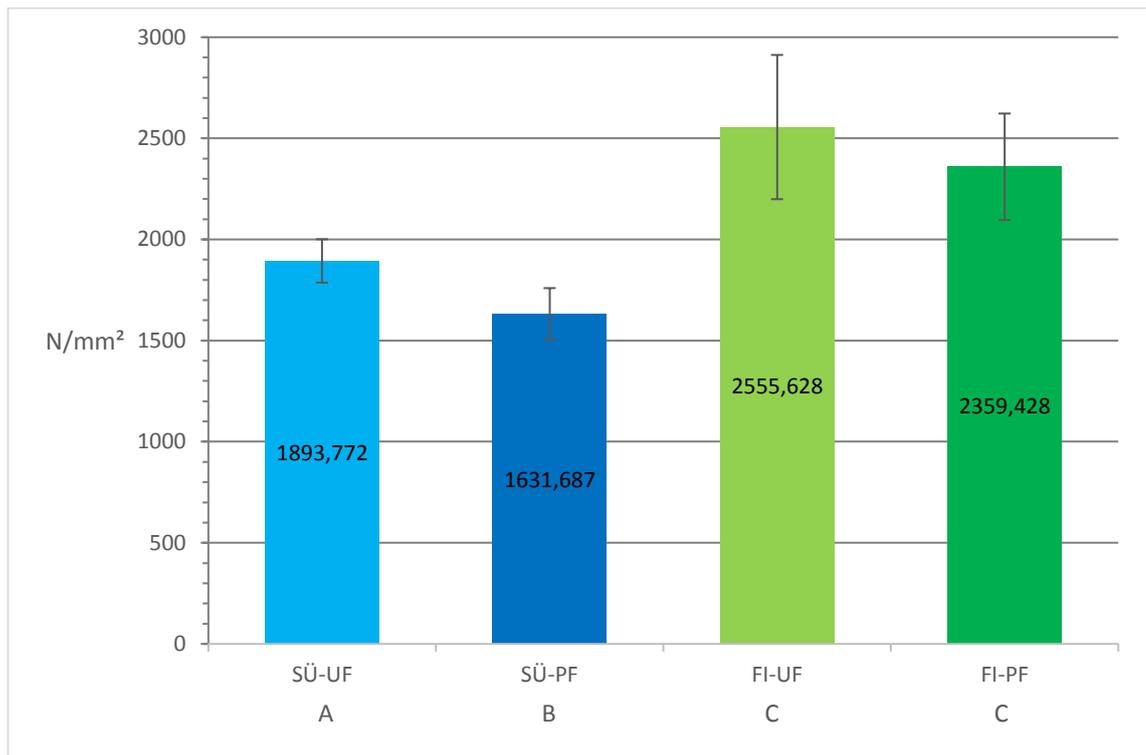


Abbildung 4-17: Biege-Elastizitätsmodul der Spanplatten

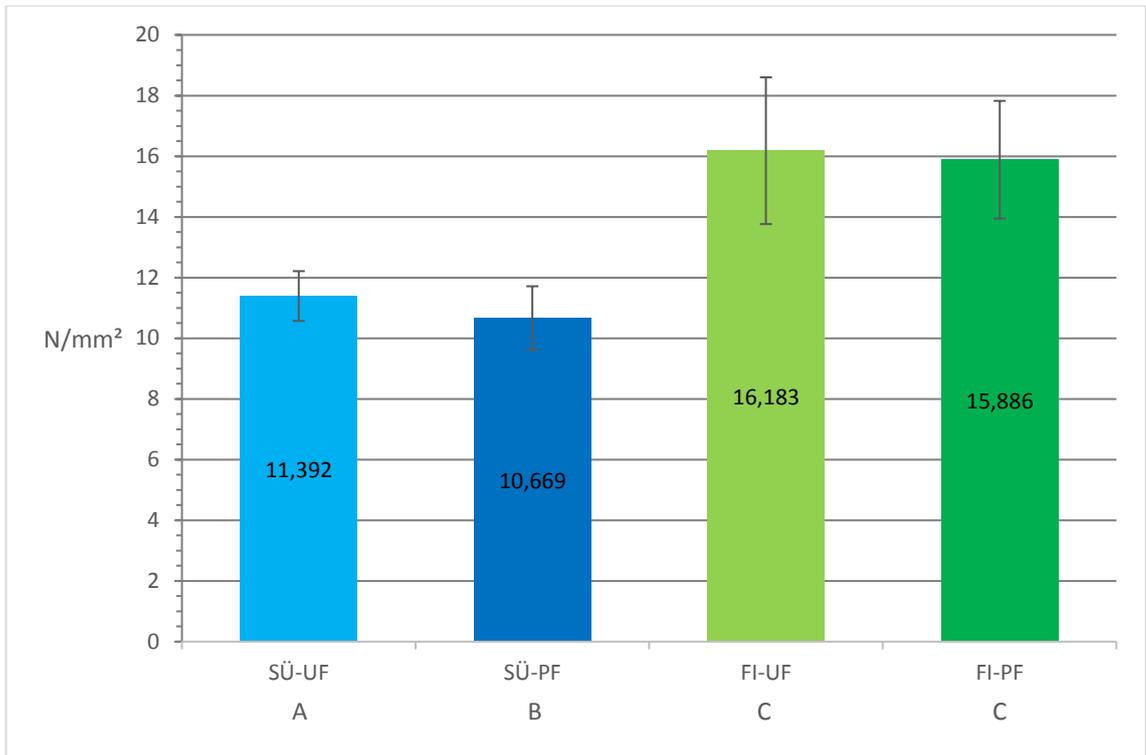


Abbildung 4-18: Biegefestigkeit der Spanplatten

4.4.6 Formaldehydabgabe

Die Formaldehydabgabe wurde bestimmt nach der DIN EN ISO 12460-3, mit Hilfe des Gasanalyse-Verfahrens. Hier zeigte sich keine Tendenz bezüglich Holzart oder Leim. Auffällig war das starke Schwanken der Werte.

Die Ergebnisse sind in Abbildung 4-19 dargestellt.

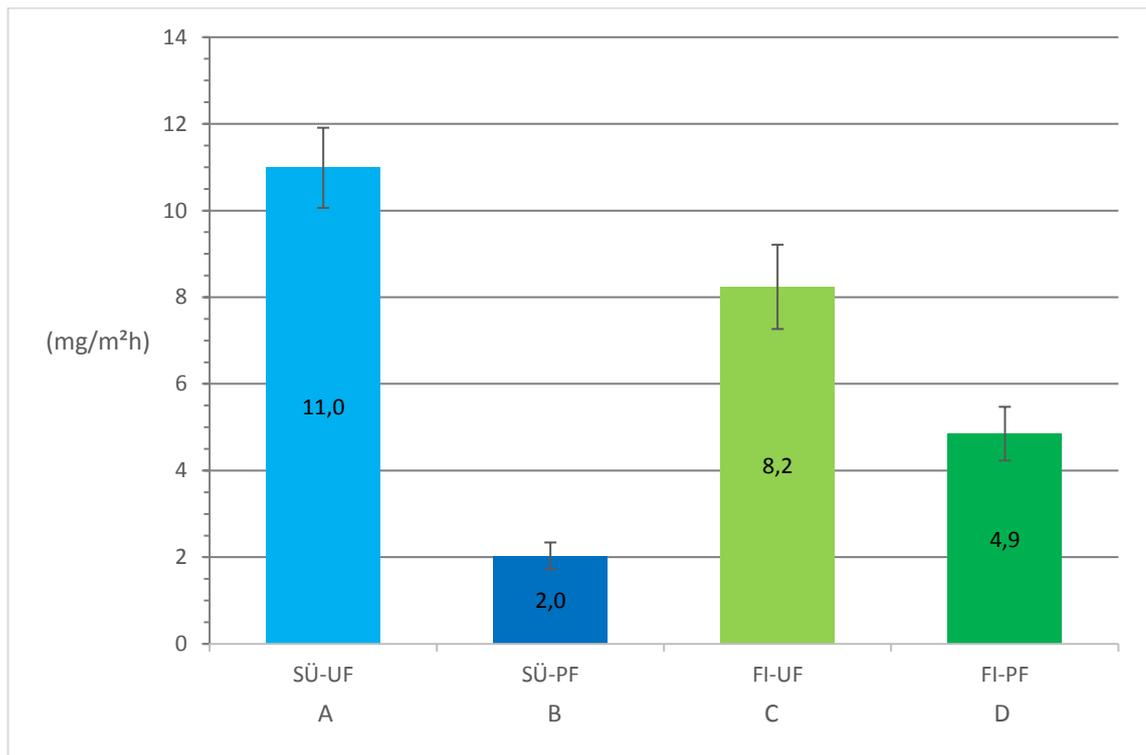


Abbildung 4-19: Formaldehydemission der Spanplatten

5 Diskussion

Bei der Störstoffanalyse des Siebüberlaufes zeigte sich deutlich eine Tendenz: Von den 16 % Störstoffen waren ca. $\frac{3}{4}$ Steine, der Restanteil setzt sich aus Glas, Knochen, Kunststoffen, Metallen und Sonstigem zusammen. Sowohl mit dem Schwimm-Sink-Verfahren als auch mit der aufwändigeren R-NIR-Sortierung ließen sich deutliche Verbesserungen erzielen: Der Störstoffanteil konnte auf < 2 Gew.-% bzw. 0 Gew.-% gesenkt werden; allerdings war der Ausschuss an Holz im SSV deutlich höher (ca. 20 %) als beim R-NIR-Gerät (ca. 1,4 %). Das Sortierergebnis ist besser als bei vergleichbaren Literaturwerten, dies wird u.a. an moderneren NIR-Geräten liegen (Adler, 2017; Timmel, 2010). Der hohe Holzverlust in der Schwimm-Sink-Sortierung lässt sich auf die Kombination von Holzart und hoher Holzfeuchte zurückzuführen: Je nach Dichte der Holzart ist mehr oder weniger Wasser in den Zellen notwendig um die Dichte von 1.000 kg/m^3 zu überschreiten. Dies lässt sich beispielhaft an der Buche (*Fagus*) darstellen:

Die Dichte der reinen Holzstruktur liegt bei etwa 640 kg/m^3 . Es müssen also noch 360 kg Wasser in den Zellen enthalten sein, um die Dichte von 1.000 kg/m^3 zu überschreiten. Erreicht wäre dies bei einer Holzfeuchte u von 57 % (entspricht 100 Teilen Holz und 57 Teilen Wasser):

$$640 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 1,57 = 1005 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Leichtere Hölzer müssen dementsprechend mehr Wasser enthalten, schwerere Hölzer weniger Wasser, um die Trenndichte zu überschreiten.

Bei beiden Trennverfahren blieben nur unkritische Störstoffe zurück: Knochen, Kunststoffe und Sonstige (Dunky/Niemz, 2002). Für diese Stoffe ist nur von optischen Auswirkungen auf den Herstellungsprozess auszugehen, wenngleich hierzu keine Erhebungen durchgeführt wurden.

Die ermittelte Holzfeuchte war mit durchschnittlich 71 % höher als erwartet. Bei $70 \text{ }^\circ\text{C}$ in der Kompostmiete müsste das Holz eigentlich trocknen, wies jedoch noch fällfrische Wasseranteile auf. Die hohe Holzfeuchte stellt jedoch kein Problem dar: Bei einer Nutzung des Holzes in Spanplatten wäre ein Trocknung nach dem Zerspanen sinnvoller, da Späne eine größere spezifische Oberfläche aufweisen und somit schneller trocknen. Dies wird daher üblicherweise so gehandhabt (Dunky/Niemz, 2002).

Durch die hohen Temperaturen in der Kompostmiete (fünf Wochen mit bis über $70 \text{ }^\circ\text{C}$) ist von einem Absterben aller holzschädigenden Käfer sowie vieler Pilze auszugehen (Huckfeldt/Schmidt/Quader, 2005). Dies trägt einen Teil zu der noch nutzbaren

Holzqualität bei, wenngleich die Zeiten bis zum Erreichen dieser Temperaturen, je nach vorheriger Lagerdauer, schwanken.

Die Anzahl der enthaltenen Holzarten war breit gestreut, hier dürften bei tiefergehenden Untersuchungen viele weitere Arten entdeckt werden. Zu einer möglichen Tendenz, bezüglich besonders häufiger Arten, lässt sich hier keine Aussage treffen. Besonderes Augenmerk verdient die Oberflächenverschmutzung: 3,63 Gew.-% wurden von anorganischen Anhaftungen ausgemacht, wie durch die Veraschung gezeigt werden konnte. Das Holz wurde für die weitere Verarbeitung soweit möglich von allen Anhaftungen befreit. Im gereinigten Zustand lag der Aschegehalt im Bereich von Holz aus Wäldern oder Kurzumtriebsplantagen (*Dietz u. a.*, 2016). Zur genauen Zusammensetzung der Asche wurden keine Daten erhoben, auf Grund der Kompostierung ist aber von organischen und anorganischen Bestandteilen, wie z.B. Humus und Bodenmineralen (Sand, Schluff, Ton), auszugehen. Trotzdem trat noch in allen weiteren Bearbeitungsschritten eine beachtliche Staubentwicklung auf. Dies zeigte auch die Siebung des Materials, hier war der Staubanteil beim Siebüberlauf über viermal höher als bei Fichte und führte zu > 7 % Ausschuss. Bei der Fichte war der Anteil an Überkorn höher, dieses kann allerdings durch erneutes Zerspanen in die Nutzfraktion überführt werden. Aus dem Siebüberlauf entstanden beim Zerspanen signifikant weniger lange Späne und signifikant mehr Staub. Dies bestätigt den, bereits optisch gewonnen, Eindruck einer deutlich geringeren Spanlänge. Eine hohe Staubentwicklung kann sich bei der Verklebung als Problem herausstellen, da die spezifische Oberfläche von Staub höher als die der Späne ist. Hierdurch wird mehr Leim gebunden als in den Berechnungen vorgesehen (*Dunky/Niemz*, 2002).

Die durchweg sehr dunkle Farbe der Siebüberlaufplatten konnte durch die Helligkeitsmessung quantifiziert werden. Während der PF-Leim die Fichtenplatten signifikant dunkler als die UF-verleimten macht, sind die Werte für Siebüberlauf ohne Unterschied. Die dunkle Farbe lässt sich möglicherweise mit wasserlöslichen Huminstoffen, Abbauprodukten während der Kompostierung, erklären: In Wasser gelöst könnten diese dunkel gefärbten Substanzen in das Holz eindringen.

Die hergestellten Platten wiesen ein sehr starkes Quellverhalten auf. Die PF-verleimten Platten quollen in beiden Fällen stärker. Allerdings wichen alle vier Werte statistisch signifikant voneinander ab. Der Einsatz von Paraffin in der Leimflotte sowie flacher dimensionierte Späne sollten das Quellverhalten mindern können (*Dunky/Niemz*, 2002).

Bei der Querkzugfestigkeit erreichte Siebüberlauf die höchsten Werte, UF- und PF-Leim waren gleich fest. FI-UF war signifikant niedriger. FI-PF war signifikant niedriger als FI-UF, wies aber immer noch höhere Werte als in der DIN EN 312 gefordert auf. Die höhere

Festigkeit ist wahrscheinlich ein Resultat der kürzeren Späne (*Dunky/Niemz, 2002*). Die geringere Festigkeit von FI-PF könnte auf den pH-Wert zurück zu führen sein: PF-Leim bindet alkalisch ab, Fichte ist jedoch pH-sauer. Hier war möglicherweise die Abstimmung zwischen Holz und Leim nicht optimal. Grundsätzlich ist die Leimfestigkeit jedoch als ausreichend zu bewerten, dies zeigen die erreichten Werte.

Im Einklang mit den Werten für Querkzugfestigkeit, war die Fichte bei Biegefestigkeit und folglich auch Biege-E-Modul fester (siehe Abbildung 2-5). Hier wies Fichte mit beiden Leimen gleiche Werte auf. SÜ-UF war signifikant niedriger, SÜ-PF wiederum signifikant niedriger als SÜ-UF. Die ca. 50 % höhere Festigkeit von Fichte lässt sich hier mehrfach herleiten: Die Späne sind länger und haben daher mehr Kontaktfläche untereinander. Weiter ist für die frische Fichte mit besseren Holzfestigkeiten zu rechnen, da diese – im Gegensatz zum Siebüberlauf – noch keinem Abbauprozess ausgesetzt war. Hierbei durchdringen die Pilze die Holzstruktur und lösen diese sukzessive auf. Daher kommt es beim Siebüberlauf möglicherweise schneller zum Versagen der Probe. Dieser konnte die Anforderungen der DIN EN 312 teilweise nicht erfüllen, hier ist durch Optimierung von Leim und Spänen aber mit Verbesserungen zu rechnen.

Bei der Formaldehydemission ist möglicherweise die pH-Wert-Kombination zwischen Holz und Leim entscheidend, hierauf deuten die Messergebnisse hin: Da die holzeigenen FA-Emissionen sehr gering sind (*Dunky/Niemz, 2002*) und im Prozess im BKW Bützberg weder FA eingebracht noch gemessen wird, ist anzunehmen, dass die Emissionen aus dem Leim stammen. Eine weitere Quelle könnte eine erhöhte FA-Abgabe des Holzes, bedingt durch Fermentation und/oder Kompostierung sein, hierzu wurden jedoch keine Versuche durchgeführt. Für PF-Leim liegen die FA-Emissionen signifikant unter UF-Leim, dies deckt sich mit Literaturwerten, z.B. von *Dunky/Niemz (2002)*. SÜ-PF hat signifikant geringere Emissionen als FI-PF. PF-Leim härtet alkalisch, und somit besser im alkalischen Siebüberlauf als in der pH-sauren Fichte. Der gleiche Effekt zeigt sich – entsprechend andersherum – für UF-Leim: Dieser härtet sauer, daher besser in der Fichte als im Siebüberlauf. Diese Logik könnte einen ersten Erklärungsansatz liefern. Der pH-Wert in der Kompostmiete kann jedoch zwischen schwach sauer und schwach alkalisch schwanken, dann wäre dieser Effekt gegenteilig. Die insgesamt sehr hohen Werte können zum einen durch die poröse, da ohne Deckschicht hergestellte, Oberfläche kommen, zum anderen ist sicherlich auch in der Leimflotte noch viel Optimierungspotential vorhanden, beispielsweise durch Zugabe von Paraffin (*Dunky/Niemz, 2002*).

6 Fazit und Ausblick

Fazit

- Die Störstoffe im Siebüberlauf lassen sich, bei einem Anteil von 16 %, bereits mit einfachen Methoden weitestgehend, mit komplexeren Methoden komplett ausschleusen. Die enthaltenen Reststörstoffe sind überwiegend für die Verarbeitung unkritisch (Kunststoffe, Sonstige). Zum Einfluss von Knochen auf Verarbeitung und Endprodukt wurden in dieser Arbeit keine Versuche durchgeführt.
- Eine Herausforderung stellt die große Menge an Anhaftungen am Holz dar. Diese konnten hier für die Versuche weitgehend händisch entfernt werden, hierfür gilt es noch einen automatischen Prozess zu finden. Das Schwimm-Sink-Verfahren kann dies nicht leisten, da eine schnelle Verschmutzung des Wassers stattfindet. Vielversprechende Ergebnisse lieferte das trockene Verfahren in der Drehtrommel mit Lochgitter, hier war Versuch 3 am effektivsten und effizientesten.
- Die Festigkeit der Siebüberlaufplatten ist noch in ausreichendem Maße gegeben. Die hergestellten Platten wiesen bei der Querkzugfestigkeit höhere Werte als Fichte auf. Optimierungspotential ist noch bei der Spanform sowie bei der Verleimung vorhanden, hierdurch könnten Quellverhalten und Formaldehydemissionen gesenkt sowie die Biegefestigkeit erhöht werden.

Die unter „1.2 Ziele“ formulierte Frage zur Zielsetzung dieser Arbeit – „Ist es möglich, die Holzfraktion des Siebüberlaufes für eine stoffliche Nutzung aufzubereiten und ist dieses Holz noch für eine solche geeignet?“ – lässt sich an Hand der gewonnenen Daten mit „sehr wahrscheinlich“ beantworten. Voraussetzungen wären ein Prozess zum Entfernen der Verschmutzung sowie Versuche, ob die Biegefestigkeit die Werte der DIN EN 312 erfüllen kann.

Ausblick

Diese Arbeit konnte aufzeigen, dass eine stoffliche Nutzung des Siebüberlaufes aus dem BKW Bützberg möglich ist. Diese Ergebnisse dürften zum großen Teil auf andere, ähnliche Anlagen übertragbar sein. Fraglich bleibt jedoch, ob die sehr dunkle Farbe der Platten einer Nutzung im Wege steht, da sie möglicherweise neue Methoden der Oberflächenbeschichtung erfordert.

Ansatzpunkte für weitere Untersuchungen – welche sich im Laufe dieser Arbeit ergeben – können sein:

- Wie stark und in welchen Phasen greifen Pilze das Holz während des Fermentations- und Kompostierungsprozesses an? Vor allem vor dem Hintergrund der hohen Temperaturen im Prozess könnten interessante Ergebnisse gewonnen werden. Hieraus ließe sich ableiten, wie ein Befall möglichst geringgehalten werden kann.
- Wie lassen sich die Anhaftungen am Siebüberlauf reduzieren? Es konnten mindestens 36,3 kg anorganischer Anhaftungen je Tonne nachgewiesen werden, hinzu kommt noch eine unbekannte Menge organischer Anhaftungen. Auf ein Jahr gerechnet bedeutet das einen dreistelligen Tonnenbetrag, welcher der Vermarktung entzogen wird und gleichzeitig die Verarbeitung des Siebüberlaufes erschwert.
- Wie lassen sich die notwendigen Prozessschritte, zur Aufbereitung der Holzfraktion für eine Nutzung, automatisiert umsetzen?
- Woher stammen die hohen Formaldehydwerte und wie lassen sie sich reduzieren? Welchen Einfluss hat eine Deckschicht aus kleinen Spänen (Barrierewirkung), und wie weit können die Emissionen durch Optimierung der Beleimung gesenkt werden?
- Woher kommt die dunkle Färbung des Holzes? Da kaum noch helle Späne vorhanden, aber viele helle Holzarten enthalten sind, ist von einer Verfärbung auszugehen.
- Wo werden derzeit dunkle Spanplatten eingesetzt und wo wären Einsatzmöglichkeiten für die hier hergestellten Platten? Allerdings sind sowohl Platten aus Frischholz als auch aus Altholz in aller Regel deutlich heller und werden nur dunkel furniert. Ob daher derart dunkle Platten existieren ist fraglich.

7 Literaturverzeichnis

- Adler, J.* (2017): Optionen der Stoffstromseparation im Abfallwirtschaftszentrum Lübeck
- Bockel, S.* (2020): Structural bonding auf European beech wood (*Fagus silvatica* L.) with polyurethane adhesive
- Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft* (2012): Der Wald in Deutschland: Ausgewählte Ergebnisse der dritten Bundeswaldinventur, 2012
- Dietz, E. u. a.* (2016): Qualität von Holzhackschnitzeln in Bayern: Gehalte ausgewählter Elemente, Heizwert und Aschegehalt
- Dunky, M./Niemz, P.* (2002): Holzwerkstoffe und Leime: Technologie und Einflussfaktoren, 2002
- Europäisches Parlament* (Hrsg.) (2017): Paket zur Kreislaufwirtschaft: Neue EU-Recyclingziele
- Grosser, D.* (1977): Die Hölzer Mitteleuropas: Ein mikrophotographischer Lehratlas
- Grosser, D./Teetz, W.* (1998): Einheimische Nutzhölzer: Fichte
- Huckfeldt, T./Schmidt, O./Quader, H.* (2005): Ökologische Untersuchungen am Echten Hausschwamm und weiteren Hausfäulepilzen
- Knauf, M.* (2017): Altholz stofflich nutzen oder thermisch verwerten?, in: Holz-Zentralblatt Nr. 32 v. 2017
- Mantau, U.* (2012): Holzrohstoffbilanz Deutschland: Entwicklungen und Szenarien des Holzaufkommens und der Holzverwendung von 1987 bis 2015, 2012
- Scheftelowitz, M./Thrän, D.* (2016): Biomasse im EEG 2016: Hintergrundpapier zur Situation der Bestandsanlagen in den verschiedenen Bundesländern
- Statistisches Bundesamt* (2017): Fachserie 19 Reihe 1: Umwelt - Abfallentsorgung
- Timmel, G.* (2010): NIR-Positivgewinnung von Sekundärbrennstoffen aus gemischten Siedlungsabfällen am Beispiel der Anlage R.A.B.E. Meschede
- Umweltbundesamt* (2014): Holzindustrie: Holzwerkstoffindustrie
- Warning, L.* (2018): Qualität von Siebüberläufen aus Kompostierungsanlagen und Verwertungsoptionen

8 Normenverzeichnis

DIN EN 310	Holzwerkstoffe – Bestimmung des Biege-Elastizitätsmoduls und der Biegefestigkeit
DIN EN 312	Spanplatten – Anforderungen
DIN EN 317	Spanplatten und Faserplatten – Bestimmung der Dickenquellung nach Wasserlagerung
DIN EN 319	Spanplatten und Faserplatten – Bestimmung der Zugfestigkeit senkrecht zur Plattenebene
DIN EN 326-1	Holzwerkstoffe – Probenahme, Zuschnitt und Überwachung, Teil 1: Probenahme und Zuschnitt der Prüfkörper sowie Angabe der Prüfergebnisse
DIN EN 13183-1	Feuchtegehalt eines Stückes Schnittholz, Teil 1: Bestimmung durch Darrverfahren
EN ISO 12460-3	Holzwerkstoffe – Bestimmung der Formaldehydabgabe – Teil 3: Gasanalyse-Verfahren
ISO 2470	Papier, Pappe und Faserstoff - Messung des diffusen Reflexionsfaktors im blauen Spektralbereich (ISO Brightness)

9 Anhang

9.1 Fotos zu 3.1.2 Holzarten



Abbildung 9-1: Erstellen eines Schnittes mit dem Mikrotom

9.2 Fotos zu 4.1.1 Störstoffanteil



Abbildung 9-2: Holzfraktion des Siebüberlaufes



Abbildung 9-3: Glasfraktion des Siebüberlaufes



Abbildung 9-4: Knochenfraktion des Siebüberlaufes



Abbildung 9-5: Kunststofffraktion des Siebüberlaufes



Abbildung 9-6: Metallfraktion des Siebüberlaufes



Abbildung 9-7: Sonstiges-Fraktion des Siebüberlaufes



Abbildung 9-8: Steinfraction des Siebüberlaufes

9.3 Fotos zu 4.1.4 Ascheanteil



*Abbildung 9-9: Veraschte Proben des Holzmehls (Auszug)
Links gereinigt; rechts ungereinigt*

9.4 Fotos zu 4.2.1.1 Simulation des SSV



Abbildung 9-10: Schwimmfraktion aus SSV



Abbildung 9-11: Holzanteil der Schwimmfraktion



Abbildung 9-12: Störstoffe der Schwimmfraktion



Abbildung 9-13: Sinkfraktion aus SSV

Erklärung

Hiermit bestätige ich an Eides statt, dass die vorliegende Arbeit von mir selbständig verfasst wurde und ich keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel – insbesondere keine im Quellenverzeichnis nicht benannten Internet-Quellen – benutzt habe und die Arbeit von mir vorher nicht einem anderen Prüfungsverfahren eingereicht wurde. Die eingereichte schriftliche Fassung entspricht der auf dem elektronischen Speichermedium.

Ich bin damit einverstanden, dass die Masterarbeit veröffentlicht wird.

Hamburg, den 15.05.2020

Unterschrift