



Universität für Bodenkultur, Wien

Stoffliche Anwendungen mit Alttextilien als alternativer Rohstoff

Masterarbeit
Zur Erlangung des akademischen Grades
Diplomingenieur

Eingereicht von: Clemens Gasser BSc.

01141021

Betreuer: Wimmer Rupert, Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.nat.techn.

Mitbetreuer: Weichhart Christian, ARat Ing.

Kurzfassung

Jährlich werden in der Textilindustrie große Mengen an Alttextilien aussortiert und fallen somit als Abfall an, nur ein gewisser Teil davon kann wieder- beziehungsweise weiterverwendet werden. Im Rahmen dieser Arbeit wurde die Verarbeitbarkeit von Alttextilien aus Baumwolle und Mischgewebe (jeweils 50% Baumwoll- und Polyesteranteil) zu Faserplattenwerkstoffen und Papier untersucht. Nach dem Aufschluss der Fasern wurden daraus Mittelharte Faserplatten im Nassverfahren (MB), Ultraleichte Faserplatten (Dämmplatten) im Trockenverfahren (UL-MDF) und „Handsheets-Papier“ aus 100% Baumwoll-Frotteehandtüchern hergestellt.

Um den Einfluss der Alttextilfasern auf die mechanischen Eigenschaften zu untersuchen, wurden die Laborplatten sowohl aus 100% Alttextil-Fasern hergestellt als auch aus unterschiedlichen Mischungen von Alttextil- und Holzfasern. Die Ergebnisse zeigten eine gewisse Verschlechterung der mechanischen Kennwerte mit steigendem Alttextilfaseranteil, es wurden jedoch auch verbesserte Eigenschaften hinsichtlich der Wärmeleitfähigkeit festgestellt. Zusätzlich konnten die mechanischen Eigenschaften auch durch eine erhöhte Mahldauer der Fasern erheblich verbessert werden. In den Versuchen zeigte sich außerdem die einwandfreie Verarbeitbarkeit von Baumwollfasern aus Alttextilien zu Papier, welches auch zufriedenstellende Werte hinsichtlich der Berstfestigkeit erreichte. Generell weisen Fasern aus Alttextilien also durchaus Potenzial als Roh- bzw. Zusatzmaterial für die Herstellung von Faserplatten und Papier auf.

Abstract

Large amounts of used textiles are sorted out by the textile industry every year and so accumulate as waste, only a certain percentage can be recycled or reused. Within the scope of this thesis the processability of used textiles consisting of cotton and mixed fabric (50% cotton, 50% polyester) into fiberboard materials and paper was determined. After decomposition of the fibers medium-density fiberboards were produced via wet method, ultra-light-density fiberboards (insulating boards) via dry method, and „handsheets paper“ was made from 100% cotton terry towel.

To investigate the influence of used textile fibers on mechanical properties the lab boards were made from 100% used textile fibers as well as different mixtures of used textile and wood fibers. The results showed certain deterioration in mechanical parameters with increasing used textile fiber amount, on the other hand improved properties concerning heat conductivity were observed. Additionally, mechanical properties could be noticeably enhanced by a prolonged fiber grinding time. The experiments showed furthermore the impeccable processability of cotton fibers from used textiles into paper which reached satisfying values in regard to rupture strength. So generally speaking, fibers from used textiles definitely display potential as raw or additional material for the production of fiberboards and paper.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	II
Abstract	III
1. Einleitung	1
1.1. Hintergrund Alttextilrecycling	1
1.2. Begriffsbestimmung	1
1.2.1. Alttextilaufkommen in Deutschland.....	2
1.2.2. Alttextilaufkommen in Österreich.....	2
1.3. Sammeltätigkeit von Alttextilien	2
1.3.1. Karitative Sammlung	3
1.3.2. Sammlung durch gewerbliche Unternehmen und kommunale Einrichtungen.....	3
1.3.3. Sammelinfrastruktur und Logistik	4
1.4. Sortierung und Verwertung	4
1.4.1. Alttextilverwertung in Deutschland	5
1.4.2. Alttextilverwertung in Österreich.....	6
1.4.3. Globale Situation	7
1.5. Weitere Verwertung und Nutzungsmöglichkeiten für Alttextilien	8
1.5.1. Einsatzmöglichkeiten von Textilfasern als Dämm- und Isolationsmaterial	9
1.5.2. Einsatzmöglichkeiten von Textilfasern in Plattenwerkstoffen und als Verstärkungsmaterial in Verbundwerkstoffen	10
1.5.3. Weitere Anwendungen	11
1.6. Gesetzliche Rahmenbedingungen	12
1.7. Wirtschaftliche Betrachtung und Marktpotentiale	14
1.8. Holzfaserplatte (Rohstoffe, Herstellung, Potenzial)	14
1.9. Papier (Rohstoffe und Herstellung)	16
2. Ziel und Forschungsfragen	17
3. Material und Methoden	18
3.1. Ausgangsmaterial	18
3.2. Materialzerkleinerung	18
3.3. Materialaufschluss im Refiner	19
3.4. Materialaufschluss im Holländer	19
3.5. Herstellung einer Dämmplatte (UL-MDF) im Trockenverfahren	20
3.5.1. Berechnung der Stoffmengen	21
3.5.2. Beleimung und Pressvorgang	22

3.6.	Herstellung Mittelharte Faserplatte (MB) im Nassverfahren	23
3.6.1.	Berechnung der Stoffmengen	23
3.6.2.	Kuchenbildung und Pressvorgang	24
3.7.	Herstellung von „Handsheet“ Papier aus Baumwoll-Alttextilien	25
3.7.1.	Berechnung der Stoffmengen	25
3.7.2.	Papierherstellung	26
3.8.	Materialprüfung.....	27
3.8.1.	Querzugprüfung	27
3.8.2.	Biegeprüfung	28
3.8.3.	Dichtebestimmung	28
3.8.4.	Prüfung der Wärmeleitfähigkeit.....	28
3.8.5.	Prüfung der Berstfestigkeit	29
3.8.6.	Weitere Versuche.....	29
4.	Ergebnisse.....	31
4.1.	Dämmplatte (UL-MDF) im Trockenverfahren (Holz-und Alttextilfaser)	31
4.1.1.	Dichte	31
4.1.2.	Querzugfestigkeit	32
4.1.3.	Biegefestigkeit und Biege-Elastizitätsmodul	33
4.1.4.	Wärmeleitfähigkeit.....	36
4.2.	Mittelharte Faserplatte (MB) im Nassverfahren (Holz- und Alttextilfaser)	36
4.2.1.	Dichte	36
4.2.2.	Querzugfestigkeit	38
4.2.3.	Biegefestigkeit und Biege-Elastizitätsmodul	39
4.3.	Mittelharte Faserplatten (MB) hergestellt im Nassverfahren (Alttextilfasern mit unterschiedlicher Mahldauer im Holländer)	40
4.3.1.	Dichte	41
4.3.2.	Querzugfestigkeit	42
4.3.3.	Biegefestigkeit und Biege-Elastizitätsmodul	43
4.4.	Handsheet Papier aus Baumwollfaser-Alttextilien	45
4.4.1.	Grammatur	46
4.4.2.	Berstdruckfestigkeit	47
4.5.	Zusätzliche Versuchsplatten Mittelharte Platten (MB) hergestellt im Nassverfahren ..	48
5.	Diskussion	50
5.1.	Materialherstellung und Faseraufschluss	50
5.2.	Faserplattenherstellung.....	51
5.3.	Eigenschaften der Faserplatten.....	52
5.3.1.	Dichte und Wärmeleitfähigkeit	52
5.3.2.	Mechanische Eigenschaften	54

5.4. Papierherstellung und Eigenschaften	55
6. Schlussfolgerungen.....	56
Literaturverzeichnis	58
Anhang.....	66

1. EINLEITUNG

1.1. Hintergrund Alttextilrecycling

In Zeiten der erhöhten Sensibilisierung und Bewusstseinsbildung in Hinblick auf Nachhaltigkeit und Ressourceneffizienz, steigt auch das Interesse sich mit der möglichst ganzheitlichen Nutzung und Verwertung von Rohstoffen und deren Bedeutung für den Stoffkreislauf zu beschäftigen (Peter 2012). Vor diesem Hintergrund stellt auch das Recycling beziehungsweise die Verwertung von Alttextilien oder textilen Reststoffen einen wichtigen Bereich dar. Das vor allem auch deshalb, weil der Herstellungsprozess von Textilien einen beträchtlichen Energie- und Rohstoffeinsatz erfordert (Bartl 2011a) und hierbei auch die ökologische Komponente besonders zu bedenken ist. So verbraucht laut dem deutschen Bundesamt für Statistik die Produktion von einer Tonne Rohbaumwolle im weltweiten Durchschnitt 3600 Kubikmeter Wasser, auf die fertige Baumwollfaser umgerechnet ergibt sich ein spezifischer Wasserverbrauch von 8500 Kubikmeter pro Tonne Baumwollfaser (Mayer 2013). Dabei sind auch die erheblichen Mengen an verschmutzten Abwässern, die durch Einsatz von Insekten- und Pflanzenschutzmitteln beim Baumwollanbau entstehen und auch verunreinigte Prozesswasser die durch Färben, Bleichen und weitere Textilverarbeitungsschritte anfallen zu bedenken (Mayer 2013).

In Anbetracht dieser Situation sollte vor allen Dingen der oftmaligen Wiederverwendung und möglichst effizienten Verwertung von textilen Produkten und Reststoffen eine hohe Relevanz beigemessen werden.

1.2. Begriffsbestimmung

Bezüglich des Materials können die Textilien je nach Verwendungszweck in verschiedene Kategorien eingeteilt werden. Lottner (2013) nimmt demnach folgende Einteilung und Begriffsbestimmung für gebrauchte Textilien vor:

- **Altkleider:** wird als unbestimmter Sammelbegriff für gebrauchte Bekleidung und weitere Textilien verwendet
- **Alttextilien:** gebrauchte Bekleidungs- und Haushaltstextilien inklusive Schuhe
- **Bekleidungstextilien:** Kleidung (Oberbekleidung und Leibwäsche, sowie Accessoires wie Hüte, Mützen, Handschuhe etc.) ohne Schuhe
- **Haustextilien:** Bett- und Tischwäsche, Hand-, Bade- und Trockentücher, etc.

- **Heimtextilien:** Bettwaren (Decken, Kissen), Gardinen mit Vorhängen, Möbel- bzw. Matratzenstoffe, Planen, Rucksäcke, Schirmstoffe, Teppiche etc.
- **Technische Textilien:** werden vor allem in den Medizin-, Hygiene-, Fahrzeug- und Baubereichen eingesetzt (Reinigungstücher, Dämmstoffe, Verstärkungsmatten, Polsterungen, Geotextilien, etc.) (Gulich 2009).

1.2.1. Alttextilaufkommen in Deutschland

Die genaue, tatsächlich anfallende Menge an Alttextilien lässt sich aufgrund der verschiedenen Erfassungs- und Sammelsysteme schwer beziffern. Laut einer Studie des Bundesverbandes Sekundärrohstoffe und Entsorgung e.V. lag das Gesamtsammelaufkommen von Alttextilien und Schuhen im Jahr 2013 in Deutschland bei 1,01 Millionen Tonnen. Im Vergleich dazu lag die Erfassungsmenge im Jahr 2007 noch bei 750 000 Tonnen (Korolkow 2015). Die Menge an Textilien, welche im Haushaltsabfall zu finden sind, wird vom Statistischen Bundesamt mit 139 500 t im Jahr 2015 angegeben (Statistisches Bundesamt 2017). Im Vergleich zum Jahr 2014 steigerte sich dieser Wert um 15 800 t.

1.2.2. Alttextilaufkommen in Österreich

In Österreich waren es 1999 insgesamt 21 000 t Alttextilien aus der getrennten Haushaltssammlung (Bundesabfallwirtschaftsplan 2001), wobei sich diese Zahl laut Bundesabfallwirtschaftsplan 2011 bzw. 2017 in den Jahren 2009 auf 26 000 t, sowie 2015 auf 29 400 t gesteigert hat (BMLFUW 2017).

Bezüglich des Gesamtaufkommens von Alttextilien in Österreich nennt Domenig (2001) eine Menge von 75 000 t Alttextilien im Jahr 1999. Laut Angaben der ÖPULA Rohstoff- und Recycling GesmbH liegt das Alttextilaufkommen in Österreich bei ca. 80 000 t pro Jahr (ÖPULA 2018).

1.3. Sammeltätigkeit von Alttextilien

Die einzelnen Akteure am Alttextilmarkt unterscheiden sich vor allem in ihrer Ausrichtung und Zielsetzung, wobei einerseits ein gemeinnütziger Zweck verfolgt wird und andererseits Alttextilien als Handelsgut im Mittelpunkt wirtschaftlicher Bestrebungen stehen. So werden beispielsweise große Mengen an aussortierten Textilien von karitativen Organisationen gesammelt, in anderen Fällen übernehmen gewerbliche Entsorgungsunternehmen die Sammlung und Verwertung. Des Weiteren treten auch noch Institutionen der öffentlichen Hand (kommunale Entsorger) als Alttextilsammler auf und bieten privaten Haushalten eine

Entsorgungsmöglichkeit für nicht mehr verwendete Textilien an (Peter 2012). Nicht zuletzt führen die erzielbaren Erlöse aus Alttextilien unter den diversen Akteuren zu einem Konkurrenzkampf um die vorhandenen Mengen, wobei auch oftmals Kooperationen unter den einzelnen Marktteilnehmern zustande kommen (Korolkow 2015). Ein nicht unerhebliches Problem der Branche stellen illegale Sammlungen dar, die häufig über das Aufstellen von Sammelcontainern ohne behördliche Genehmigung betrieben werden. Oftmals wird dabei auch bewusst eine gemeinnützige Absicht im Sinne des Recyclinggedankens und der sozialen Hilfeleistung vorgegeben, obwohl dabei tatsächlich nur monetäre Interessen an der Alttextilsammlung bestehen (Hasenkamp 2013).

1.3.1. Karitative Sammlung

Bei diesen Systemen treten gemeinnützige Organisationen als Sammler auf, welche die Alttextilien dann entweder in Form von Kleiderspenden direkt an Bedürftige weitergeben oder an Sortierbetriebe weiterverkaufen. Daraus gewonnene Erlöse werden wiederum zur Finanzierung von karitativen Projekten eingesetzt (Peter 2012). In Österreich sind in diesem Bereich unter anderem die Organisationen Caritas, Kolping, Volkshilfe, Humana und Rotes Kreuz zu nennen.

1.3.2. Sammlung durch gewerbliche Unternehmen und kommunale Einrichtungen

Solche Alttextilsammlungen werden von privaten Unternehmen durchgeführt, welche die Sammlung organisieren und die anfallenden Mengen dann entweder selbst sortieren und verwerten, oder direkt an eigene Sortierbetriebe weiterreichen. Derartige Sammlungen unterliegen dabei wirtschaftlichen Interessen und haben keinen karitativen Hintergrund. Laut Korolkow (2015) sind in dieser Branche zahlreiche Betriebe unterschiedlicher Größenordnung tätig, bei welchen auch in die unternehmerischen Wirkungsbereiche regionaler Sammlungen sowie Herstellung von Recyclingprodukten, bis hin zu internationalem Handel mit Alttextilien reichen.

Weiter sind auch noch kommunale Entsorger auf Gemeinde-, Bezirks- oder Landesebene als Sammler von Alttextilien tätig. Gründe dafür sind einerseits die Eindämmung oben genannter illegaler Containersammlungen und in weiterer Folge auch der Schutz von Sammeleinrichtungen mit karitativem Charakter. Daher werden Sammelprojekte vielfach auch in Kooperation mit gemeinnützigen Organisationen durchgeführt. Ein weiterer Beweggrund ist der Anspruch der kommunalen Entsorger den Bürgern und Bürgerinnen eine ausreichende Entsorgungsmöglichkeit für Alttextilien zu bieten, da diese in vielen Fällen noch immer über den Hausmüll entsorgt werden.

Und nicht zuletzt stellen Alttextilien, indem sie an private Sortier- und Verwertungsunternehmen weitervermarktet werden, eine beachtliche Einnahmequelle dar. Die kommunalen Entsorger erhalten somit die Möglichkeit Erlöse zu generieren und beispielsweise für die Stabilisierung der Entsorgungsgebühren einzusetzen (Hasenkamp 2013).

1.3.3. Sammelinfrastruktur und Logistik

Diesbezüglich werden ebenfalls unterschiedliche Methoden und Konzepte angewendet. Ein weit verbreitetes System ist das der Sammelcontainer, die an gewissen Standorten aufgestellt und in regelmäßigen Intervallen entleert werden (Domenig 2001). Problematisch ist hierbei jedoch eine mögliche Verunreinigung der Sammelware durch Einwurf anderer Abfälle oder auch das gezielte Entwenden von qualitativ höherwertigen Stücken durch Aufbrechen des Containers (Peter 2012).

Eine weitere Methode ist die „Straßensammlung“, bei welcher die Bevölkerung gezielt über angesetzte Sammeltermine informiert wird (etwa durch Aufrufe in diversen Medien, Verteilung von Sammelsäcken, etc.) und die gesammelten Alttextilien an der Straße abgeholt werden. Ähnlich verhält es sich bei der sogenannten „Körbchensammlung“, bei welcher eigene Sammelbehälter aufgestellt und an festgesetzten Sammeltagen wieder abgeholt werden. Als weitere Möglichkeit zur Erfassung von Alttextilien gibt es für die Bevölkerung die Möglichkeit ausgemusterte Stücke direkt an Sammelstellen oder bei Organisationen abzugeben, was in diesem Fall als sogenannte „Bringware“ bezeichnet wird (Peter 2012).

Eine 2014 durchgeführte Studie unter den Mitgliedsunternehmen des deutschen Bundesverbands Sekundärrohstoffe und Entsorgung (bsve)-Fachverband Textilrecycling (FTR), ergab, dass in Deutschland die Containersammlung das mit Abstand verbreitetste Sammelsystem ist. Demnach lag der Anteil dieser Sammelart im Jahr 2013 bei 88% (Korolkow 2015), im Jahr 2007 lag dieser Anteil noch bei 80% (Gu 2008).

Im Gegensatz dazu verringerte sich die „Straßensammlung“ von 20% im Jahr 2007 auf 9% im Jahr 2013. Die fehlenden 3% im Jahr 2013 stellen sonstige Systeme zur Alttextilsammlung dar. Korolkow (2015) nennt als Beispiel dafür Sammlungen über Modehäuser oder auch die Beschaffung von Alttextilien über das Internet.

1.4. Sortierung und Verwertung

Aufgrund der vielen verschiedenen gesammelten Alttextil-Fraktionen und auch deren unterschiedlichen Beschaffenheit und Qualität ist für die weitere Verwertung eine

Sortierung notwendig. Ziel dabei ist es, die Alttextilien entsprechend ihrer jeweiligen Qualität einer möglichst optimalen und gewinnbringenden Verwertung zuzuführen, um so maximale Wertschöpfung und Nutzungsdauer in der Produkt- und Recyclingkette zu erreichen (Korolkow 2015). Dies hat einerseits wirtschaftliche Interessen zur Ursache, andererseits liegen diesem Gedanken wie schon erwähnt auch das Ziel der Kreislaufwirtschaft und die Schonung der natürlichen Ressourcen im Sinne des Umweltschutzes zu Grunde (Peter 2012). Eine 2013 durchgeführte Umfrage unter Mitgliedsfirmen des bsve-Fachverbandes ergab, dass die Sortierung zwar einen sehr aufwändigen Verfahrensschritt im Alttextilrecycling darstellt, jedoch auch gleichzeitig zu einer hohen Verwertungsquote und Wertschöpfung beiträgt (Korolkow 2015). Die durchschnittliche Anzahl der Fraktionen, in welche sortiert, wird lag bei 154, die maximale Anzahl immerhin bei 350. Die Auswertung ergab weiter, dass die Unternehmen 93% der Alttextilien in der Europäischen Union sortieren und davon allein 66% in Deutschland. Da der Prozessschritt der Sortierung ohnehin einen hohen Personalaufwand erfordert, bedeutet dies in Kombination mit dem vergleichsweise hohen Lohnniveau in Deutschland hohe Kosten für die jeweiligen Sortierbetriebe. In Hinblick auf die steigende Konkurrenz um Sammelmengen und den resultierenden Preisdruck am Alttextilmarkt bleibt abzuwarten wie sich die geografische Verteilung der Sortierkapazitäten in der Zukunft entwickelt (Korolkow 2015).

1.4.1. Alttextilverwertung in Deutschland

Bezüglich der unterschiedlichen Verwertungsanteile variieren die Angaben in der Literatur, wobei sich die Anteile ebenso wie die Erfassungsmengen im zeitlichen Verlauf verändert haben. Die Studie des Bundesverbandes für Sekundärrohstoffe und Entsorgung teilt die Verwertungsoptionen der Alttextilien in fünf Kategorien ein.

- **Wiederverwendung** der sortierten, tragbaren Kleidung (Beispielsweise Vermarktung über Second Hand Shops, Flohmärkte oder in Form von Kleiderspenden)
- **Weiterverwendung** von beschädigter, nicht mehr tragbarer Kleidung (Beispielsweise in Form von Putzlappen für industrielle Bereiche und Anwendungen)
- **Weiterverwertung in Form einer stofflichen Nutzung** (Beispielsweise Verarbeitung der Alttextilien zu Fasern und in weiterer Folge Einsatz in unterschiedlichsten Branchen und Industrie. Dämmmaterial, Reißspinnstoffe oder Vliesstoffe, Anwendung in der Automobilindustrie)

- **Weiterverwertung in Form einer thermischen Nutzung** (Verbrennung des anfallenden Materials und Nutzung der thermischen Energie)
- **Beseitigung von Fremdstoffen und sonstigen Abfallfraktionen**, welche sich unter der gesammelten Ware befinden (Beispielsweise Elektroschrott, Folien, Haus- und Sondermüll, etc.)

Im Vergleich mit Ergebnissen aus dem Jahr 2007 (Gu 2008) stieg der Anteil der Wiederverwendung von Alttextilien und Schuhen von 43% auf 54% an (Abbildung 1). Gleichzeitig erhöhte sich auch die Weiterverwertung um 5% (2007: 16%). Um 4% gesunken sind hingegen die Anteile der Weiterverwertung, sowohl in stofflicher als auch in thermischer Form. Sehr positiv zu bewerten ist auch die relativ deutliche Abnahme des Abfallanteils in der Sammelware (von 10% im Jahr 2007 auf 2% im Jahr 2013), was zugleich eine erhebliche Erhöhung der Verwertungsquote von 90% auf 98% (tatsächlich verwertete Sammelmenge ohne Abfälle) bedeutet (Korolkow 2015; Gu 2008).

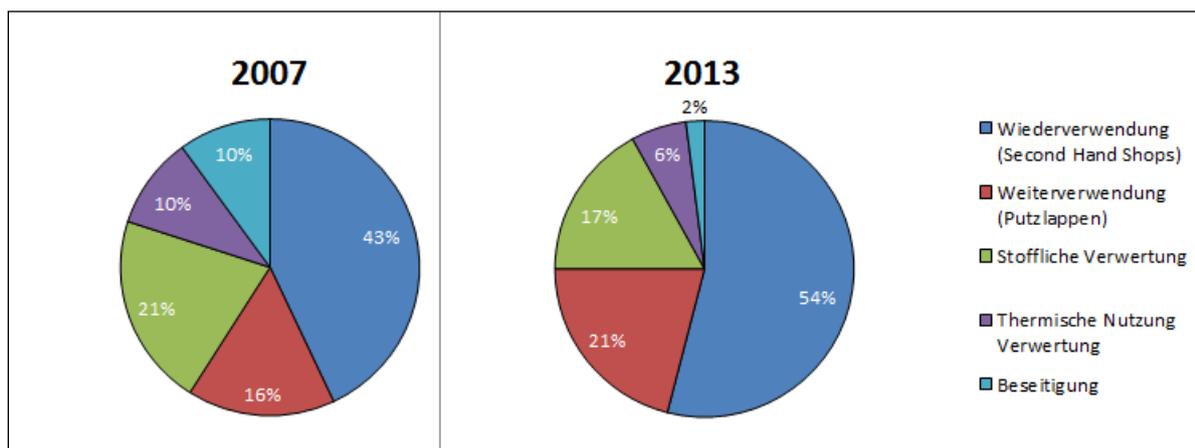


Abbildung 1: Verwertungskategorien und jeweilige Anteile in Deutschland 2007 und 2013 (eigene Darstellung nach Gu 2008 und Korolkow 2015)

1.4.2. Alttextilverwertung in Österreich

Bezüglich der Verwertungsanteile in der österreichischen Alttextilsammlung liegen gegenwärtig keine aktuellen Daten vor. Domenig (2001) schätzt als Anteil für wiederverwendbare Kleidung, die in Second Hand Shops oder als Kleiderspenden vermarktet wird mit 30%, für das Jahr 1999. Dazu wird der Anteil von minder qualitativen Textilien mit rund 45% angegeben. Darin inbegriffen sind die Ausgangsmaterialien für die Putzlappenherstellung und Materialien, die als Faserstoffe für die Industrie (Autokarosserien, Dämmstoffe, Füllstoffe, Filz) verwendet werden. Die restlichen 25% bezeichnet Domenig (2001) als unbrauchbare Textilien, die in weiterer Folge einer thermischen Verwertung zugeführt werden bzw. auch deponiert werden.

Darin enthalten sind höchstwahrscheinlich ebenso die Mengen an Abfällen und Fremdstoffen, welche sich unter der Sammelware befinden.

Auch Bartl (2011b) spricht bezüglich der gesammelten Altkleider von einem Anteil von 10 bis 25%, welche einer Entsorgung zugeführt werden müssen.

1.4.3. Globale Situation

Die Sammel- bzw. Sortiermengen der einzelnen Alttextilfraktionen hängen natürlich auch stark von der gegenwärtigen Nachfrage und Bedarf am globalen Markt ab. Second-Hand-Kleidung hat im Allgemeinen jedoch eine sehr hohe Bedeutung als Wirtschafts- und Handelsgut. So verwenden über 70% der Weltbevölkerung Second-Hand-Kleidung, vor allem in Entwicklungs- und Schwellenländern (Humananova 2017). Hauptexporteure von Gebraucht-Kleidung sind hingegen die industriell hoch entwickelten Staaten in Westeuropa und Nordamerika, bei welchen die verhältnismäßig hohe Kaufkraft einen hohen Kleiderkonsum nach sich zieht und auf diese Weise große Mengen an gebrauchter Kleidung anfallen. Das Thema des Exports von Second-Hand-Kleidung wird jedoch seit jeher kontrovers diskutiert. So argumentieren Kritiker, dass Exporte von Gebrauchttextilien (beispielsweise von Westeuropa nach Afrika) in Konkurrenz zu der Textilindustrie der jeweiligen Importländer treten und diese teilweise sogar verdrängen würden. Somit würden lokale Wirtschaftskreisläufe geschwächt und die Situation für die einheimische Bevölkerung unter anderem durch den Verlust von Arbeitsplätzen verschlechtert (FairWertung 2015). Experten vertreten in Wirklichkeit jedoch die Ansicht, dass für die Menschen in den Einfuhrländern durch Handel, Verarbeitung und Verkauf zusätzliche Verdienstmöglichkeiten entstehen und die Importe gleichzeitig die Möglichkeit bieten, relativ preiswert qualitativ hochwertige Bekleidungsware zu erwerben (Wiener Zeitung online 2016). Weit größere Probleme der lokalen Textilindustrie seien indes oft schlechte wirtschaftliche und technische Rahmenbedingungen (fehlendes Kapital und Knowhow, veraltete Maschinen, etc.). Außerdem erschwere die Einfuhr von billig produzierter Neukleidung asiatischer Textilhersteller die Situation für die einheimische Textilbranche zusätzlich (FairWertung 2015). Laut der bsve Studie aus dem Jahr 2013 verbleibt der Großteil der in Deutschland gesammelten Alttextilien, nämlich 44%, in der EU bzw. in den Staaten der ehemaligen Sowjetunion. Mit 28% geht der zweitgrößte Anteil indes nach Afrika, während 14% in weitere Länder (beispielsweise in Südamerika oder in den Nahen Osten) exportiert werden. Auch nach Indien und Pakistan geht mit 10% ein nicht unerheblicher Anteil. Bemerkenswert ist, dass lediglich 4% der in Deutschland gesammelten Altkleiderware im Land bleibt und dort in Second-Hand-Shops weiterverkauft wird (Korolkow 2015).

1.5. Weitere Verwertung und Nutzungsmöglichkeiten für Alttextilien

Während noch tragbare Alttextilien durch Vermarktung in Second-Hand-Shops oder Kleiderspenden ihrem ursprünglichen Zweck entsprechend weiterverwendet werden, gibt es für beschädigte bzw. nicht mehr tragbare Altkleider unterschiedlichste Arten der Verwertung. So werden sie einerseits zerkleinert und kommen in industriellen Anwendungen zum Einsatz (beispielsweise als Putzlappen), allerdings wird dabei der ursprüngliche Materialverbund nicht zerstört.

Anders wird das Textil beim stofflichen Recycling in seine Grundmaterialien aufgetrennt und diese als Rohstoff für die Herstellung neuer Produkte verwendet. Beispiele dafür sind unter anderem die mechanische Auftrennung in die Einzelfasern und anschließende Nutzung dieser Fasern für die Herstellung neuer Produkte wie Matten, Isoliermaterialien oder auch diverse Polsterungen (Gulich 2009). Andererseits gibt es auch Auftrennungsmethoden, die es mittels chemischer oder biologischer Verfahren ermöglichen aus einem textilen Mischgewebe einen bestimmten Fasertyp zu isolieren.

So ist beispielsweise ein Patent für ein Verfahren zur Verwertung von Faserreststoffen angemeldet, durch welches aus einem Mischgewebe cellulosischer und synthetischer Fasern, die synthetischen Fasern isoliert werden. Dabei wird das Mischgewebe einer mikrobiologischen Hydrolyse unterzogen und die cellulosischen Fasern werden vollständig abgebaut (anaerobe Vergärung zu Biogas). Zurück bleibt die synthetische Faser (beispielsweise Polyesterfaser), welche dann in weiteren Verfahrensschritten recycelt werden kann (Huber und Stein 1995).

In einem anderen Verfahren werden Textilabfälle aus Mischgewebe (cellulosische Fasern und Polyesterfasern) mit Salzsäuregas behandelt und so die cellulosischen Fasern zu einem feinen Pulver abgebaut. Anschließend werden die Polyesterfasern vom cellulosischen Material abgetrennt, beispielsweise durch Filtration (Cowan und Trash 1982). Die möglichen Anwendungen richten sich dabei jedoch nach den Faserlängen bzw. auch der Homogenität des Fasermaterials. Längere, inhomogene Fasern, wie sie etwa durch die Auftrennung von Alttextilien mittels Reissanlagen gewonnen werden, finden zum Beispiel Anwendung als Ausgangsmaterial für die Herstellung von Vliesstoffen, Matten und Filzen (Bartl 2011b). Weiterverarbeitet werden diese Materialien auch zu Dämmmaterialien und Auskleidungen in der Automobilindustrie, Malervliesen oder auch Baumwoll-einkaufstaschen (Peter 2012). Zur Herstellung von Vliesstoffen bzw. Nonwovens aus recycelten Textilien sind in der Literatur auch einige Patente zu finden (Milding et al. 1996; Coates et al. 2011).

Dagegen weisen kürzere Fasern, welche in einer Schneidmühle verarbeitet werden, eine relativ hohe Homogenität der Faserlängen auf und können beispielsweise als Zusatzmaterialien in der Bauindustrie eingesetzt werden (Bartl 2011b). Wichtig zu erwähnen ist jedoch, dass für das stoffliche Recycling nicht nur bereits getragene und aussortierte Textilien zur Anwendung kommen, sondern auch Abfälle und Nebenprodukte, die bei der Textilproduktion teilweise in beträchtlichen Mengen anfallen. Als Beispiel dafür sind vor allem Fadenreste, Stofffetzen, oder auch Ausschussstücke anzuführen (Barbero-Barrera et al. 2016). Für Maschinen zur Werkstellung einer mechanischen Auftrennung und Faseröffnung existieren auch bereits einzelne Patente (Morel 1984; LaRoche und Morel 1996). Ebenfalls besteht für eine Maschine ähnlicher Anwendung ein US Patent aus dem Jahr 2000 (Rowe 2000). Allerdings haben schon alle drei Patente die Gültigkeitsfrist überschritten und sind somit nicht mehr aufrecht. Gegenwärtig werden im Textilrecycling für die Gewinnung von Fasermaterial meist industrielle Reissanlagen aber auch Shredder eingesetzt. Bei Reissanlagen werden die Textilien in einem ersten Schritt durch Schneidmaschinen zerkleinert und dann über eine Reissmaschine geführt. Dort erfolgt eine Auflösung des textilen Gewebes mittels rotierender Walzen (Tamboures), die mit Haken, Zähnen oder Stahlstiften ausgestattet sind. Durch Klemmung des Materials im Einzug und gleichzeitigem Kontakt mit den schnell rotierenden Tambouren werden die textilen Strukturen aufgerissen und in die Einzelfasern zerlegt (Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin 2010). Bei der Materialaufbereitung für andere Anwendungen, wie zum Beispiel in einigen angeführten Patenten, werden herkömmliche Shredder oder Schneidmühlen verwendet.

1.5.1. Einsatzmöglichkeiten von Textilfasern als Dämm- und Isolationsmaterial

Abderrazak et. al (2016) erforschten die Eignung von Textilabfallprodukten als Isolationsmaterial. Dabei wurden zwei Textilabfallfraktionen (Tischdecken und Flusen) auf ihre Eigenschaften und ihr Verhalten hinsichtlich Feuchtigkeitsaufnahme, Dampfdiffusion und in weiterer Folge der Wärmeleitfähigkeit untersucht. Die Ergebnisse zeigten, dass die thermischen Eigenschaften der untersuchten Fraktionen durchaus konkurrenzfähig zu konventionellen Dämmmaterialien wie Steinwolle oder Polyurethan-Schaum sind und das Textilmaterial in Bezug auf das hygroskopische Verhalten (Dampfdiffusion bzw. Evaporation) sogar besser ist (Abderrazak et al. 2016).

Es besteht auch ein deutsches Patent zum Recycling von Textilfaserprodukten zu einer Dämmwolle, welche wiederum als wärmeisolierendes Material für Dach- und Fassadenelemente genutzt werden kann (Elges 1996a).

Dieses Patent umfasst sowohl den Aufbereitungsprozess der Alttextilien (Abtrennung von Fremdkörpern wie Knöpfe oder Reißverschlüsse), bis hin zur Herstellung der Dämmwolle und Behandlung dieser gegen Schimmel. Anschließend werden die Fasern in Dach- oder Fassadenbereiche eingeblasen, um so eine ausreichende Wärmedämmung zu erzielen. Zusätzlich besteht ein Patent zur Herstellung einer Leichtbau-Faserplatte mit kurzen Faserstücken aus organischen Textilfasern und mechanischem Holzzellstoff. Als Bindemittel wird Wasserglas eingesetzt, die Platten haben verbesserte Eigenschaften hinsichtlich Festigkeiten, sowie Wärme- und Schalldämmung (Hemersam 1976).

1.5.2. Einsatzmöglichkeiten von Textilfasern in Plattenwerkstoffen und als Verstärkungsmaterial in Verbundwerkstoffen

Für den Einsatz von (Alt)textilfasern in der Plattenwerkstoffherstellung liegen bereits einige wissenschaftliche Untersuchungen beziehungsweise auch Patente dazu vor. Verwendet wurden dazu sowohl Textilfasern unterschiedlichen Ursprungs, als auch verschiedene Bindemittel und Herstellungsverfahren. So stellten Barbero-Barrera et al. (2016) Platten aus Textilabfallfasern in Verbindung mit natürlichem Kalk her. Als Rohstoff dienten dazu Fasern, welche als Nebenprodukte in der Textilproduktion anfallen. Die Fasern bestanden hauptsächlich aus Baumwolle, als Bindemittel wurde eine Paste aus hydraulisch härtendem Kalk eingesetzt. Das Material wurde mit dem Bindemittel vermischt, in Formen eingebracht und anschließend getrocknet. Die anschließende Prüfung und Analyse der mechanischen und thermischen Eigenschaften ergab laut Autoren, dass sich der hergestellte Werkstoff durchaus für Anwendungen in Gebäuden eignet (Barbero-Barrera et al. 2016).

Weitere Anwendung von recycelten Textilfasern ist der Einsatz als Verstärkungsmaterial in einer Polymermatrix. Lundahl et al. (2010) untersuchten die mechanischen Eigenschaften von Verbundwerkstoffen, die durch Fasern aus Abfallprodukten verstärkt wurden. Als Rohstoff diente dabei Fasermaterial aus Textilabfällen, das überwiegend aus zellulosischen Fasern bestand. Mittels Vernadelungstechnik wurden daraus Non-Wovens hergestellt, welche in einer mehrschichtigen Kombination mit einer Polypropylenfolie (Verbundmatrix) in einer Formpresse zu Platten verarbeitet wurden (Lundahl et al. 2010). Die Ergebnisse zeigten eine hohe Beeinflussbarkeit der mechanischen Eigenschaften durch Variation der Produktionsparameter, wie etwa Anzahl der Schichten oder Dicke des Non-Woven-Gewebes. Dies bedeutet eine hohe Flexibilität und daher ebenfalls vielseitige Anwendungsmöglichkeiten (Lundahl et al. 2010). Für ein ähnliches Verfahren besteht ein Patent zur Herstellung eines wasserfesten Sperr- oder Schichtholzsubstitutes aus ausrangierten Teppichteilen oder sonstigen recycelten Textilien.

Dabei werden die Ausgangsmaterialien zerkleinert und ebenfalls über Vlieslegung und Vernadelung Fasermatten erzeugt, welche dann unter Zugabe von Bindemitteln oder matrixbildenden Kunststofffasern wie Polypropylenfasern verpresst werden (Bacon et al. 2004).

Darüber hinaus bestehen noch weitere Patente zur Zerkleinerung und Aufbereitung von Alttextilien oder auch alten Schuhen und Lederprodukten, welche anschließend mit Bindemitteln vermischt und zu Plattenwerkstoffen beziehungsweise Formteilen verpresst werden (Cordes et al. 2000; Binder und Dave 2009).

1.5.3. Weitere Anwendungen

Als weitere Anwendung können Fasern aus Textilabfällen als Füllstoffe beziehungsweise verstärkende Komponente in Recycling-Kunststoffen eingesetzt werden. So besteht ein Patent zur Herstellung von einem faserverstärkten thermoplastischen Verbundwerkstoff. In diesem Verfahren wird Fasermaterial aus Textilabfällen mittels Shredder zu Flockfasern verarbeitet und anschließend mit zerkleinertem Kunststoffgranulat vermischt, welches ebenfalls aus Abfällen gewonnen wird. Als Beispiel für den Thermoplast wird im Patent zerkleinertes Polyethylen genannt. Die Mischung wird unter Druck erhitzt und durch das Aufschmelzen des Thermoplasts wird der Verbundwerkstoff aus den beiden Komponenten gebildet (Griffith und Griffith 2001).

Zu einem ähnlichen Recyclingverfahren besteht ein chinesisches Patent (CN 105014824 A). Dabei wird auf die Oberfläche des Textilmaterials ein Bindemittel (duroplastisches Epoxidharz und ein Härter) aufgesprüht und unter Temperatur ausgehärtet. Das gehärtete Textil wird dann in einer Feinmühle zu einem Pulver gemahlen und enthaltene Fremdstoffe wie Metalle werden abgetrennt. Anschließend wird das Pulver mit einer thermoplastischen Komponente (z.B. PE, PP, oder PVC-Granulat) und zusätzlichen Additiven vermischt. Im letzten Verfahrensschritt können daraus durch Extrusion gewünschte Profile bzw. ein Rohmaterial für weitere Anwendungen hergestellt werden (Huang et al. 2015). In der Literatur sind auch konkrete Anwendungen von recycelter Textilfaser für die Baubranche beschrieben. So wurde bereits in diversen Studien die Eignung von Fasern aus Abfällen der Teppichproduktion als Verstärkungsmaterial für Beton untersucht, beziehungsweise wurde diese Anwendung auch bereits in Bauprojekten von großem Umfang eingesetzt (Wang 2006). Zusätzlich wird in einzelnen Arbeiten auch die Eignung von recycelten Teppichfasern für den Einsatz als Bodenbewehrung im Erdbau beschrieben (Murray et al. 2000).

Weiter entwickelte Bartl (2011b) speziell für Kurzfasern eine Methode zur Zerkleinerung beziehungsweise zum Aufschluss von Alttextilien in Einzelfasern mittels einer langsamlaufenden Schneidmühle. In Bezug auf die Faserlängen konnte mittels dieses Verfahrens eine große Homogenität erreicht werden, wodurch die Fasern auch eine vielseitige Anwendbarkeit aufwiesen. Bartl (2011b) nennt in diesem Zusammenhang unter anderem die potentielle Anwendung von Fasermaterial als Füllstoff bei der Herstellung von Asphalt, Beton, Zement- und Gipsfaserplatten, oder als Additiv zur Verstärkung von Kunststoffen (Thermo- bzw. Duroplaste, Elastomere).

Ein sehr spezielles Verfahren für das Recycling von Alttextilien aus Naturfasern wurde von Elges (1996b) patentiert. Dabei werden Naturfasertextilien in der Pflanzenkultivierung als Speicherstreu für Wasser und Nährstoffe eingesetzt, gewissermaßen als Substitute zu Ton in Kulturerden. Vorteile gegenüber Ton sollen dabei in einer erhöhten Lebensdauer und gleichmäßigeren Wasser- bzw. Nährstoffabgabe in der Erde bestehen.

Aufgrund des vergleichsweise hohen Heizwertes können Alttextilien auch als Sekundärbrennstoffe beziehungsweise als Substitut von Regelbrennstoffen wie Öl oder Gas eingesetzt werden. Der mittlere Heizwert von Textilabfällen liegt laut Literatur bei 20,09 MJ/kg (Fricke 2008 zitiert nach Korolkow 2015). Textilstäube fallen entweder direkt bei der Produktion oder Verarbeitung von Textilien an, beziehungsweise entstehen auch bei der Aufbereitung oder Herstellung von Recyclingmaterialien aus Alttextilien (Dämmstoffe). Aufgrund der Feinheit dieses Materials kann es nicht wieder im Produktionsprozess eingesetzt werden, sondern muss kostenpflichtig entsorgt werden. Diese Entsorgung wird meist über eine Mitverbrennung in entsprechenden Feuerungsanlagen bewerkstelligt. Die eingesetzten Textilstäube erreichen dabei je nach Faserzusammensetzung einen Heizwert im Bereich von 17 MJ/kg (Baumwolle) bis zu 30 MJ/kg (Polyacryl) und dienen so der Erzeugung von Wärmeenergie (Leithner et al. 2001).

1.6. Gesetzliche Rahmenbedingungen

Auf Ebene der Europäischen Union ist für Maßnahmen zum Umgang mit Abfällen eine bestimmte Reihenfolge vorgesehen, konkreter eine sogenannte fünfstufige Abfallhierarchie. Dabei hat laut EU-Abfallrichtlinie 2008 die Vermeidung von Abfällen Priorität, weiter folgen Wiederverwendung, Recycling, Verwertung für andere Zwecke (z.B. energetisch) und als letzte Stufe die Beseitigung (Europäische Union 2017).

Diese Richtlinie wird in den Mitgliedsstaaten in den jeweiligen nationalen Gesetzen und Bestimmungen umgesetzt. Zusätzlich besteht in Staaten, wie Deutschland oder Österreich, ein Deponierungsverbot für Abfälle mit einem Gesamtkohlenstoffgehalt (TOC- total organic carbon) größer als 5%.

Dieses Verbot betrifft dabei auch Alttextilien und Faserabfälle, was zur Folge hat, dass für eine Entsorgung von Abfällen dieser Art nur eine Verbrennung in geeigneten Anlagen in Frage kommt. Dies führt demnach zu deutlichen Kosten der Sammel- und Sortierbetriebe für anderweitig nicht mehr nutzbare Alttextilfraktionen (Bartl und Marini 2008).

In Österreich gelten Altkleider oder Alttextilien im Sinne des Abfallwirtschaftsgesetzes 2002 als Abfall. Für das Entgegennehmen von Alttextilien benötigt ein Alttextilsammler nach §24a ff. eine eigene Erlaubnis.

Ein Betrieb für die Sortierung von Altkleidern nach bestimmten Qualitäten benötigt darüber hinaus eine Bewilligung nach § 37 AWG 2002 für diese Anlagen (Sander 2015).

In Deutschland änderte sich die rechtliche Situation für die Sammlung und Verwertung von Alttextilien mit Inkrafttreten des neuen Kreislaufwirtschaftsgesetzes (KrWG) 2012. Als wesentliche Änderungen sind vor allem die Überlassungspflicht (§17) und Anzeigepflicht (§18) zu nennen.

Bezüglich Überlassungspflicht ist in Artikel 1 geregelt, dass Abfälle privater Haushalte grundsätzlich öffentlich-rechtlichen Entsorgungsträgern überlassen werden müssen. Jedoch besteht laut Artikel 2 diese Überlassungspflicht nicht für Abfälle,

- „die durch gemeinnützige Sammlung einer ordnungsgemäßen und schadlosen Verwertung zugeführt werden“ (Absatz 3) oder
- „die durch gewerbliche Sammlung einer ordnungsgemäßen und schadlosen Verwertung zugeführt werden, soweit überwiegende öffentliche Interessen dieser Sammlung nicht entgegenstehen.“ (Absatz 4)

Die Anzeigepflicht (§18 KrWG) sagt aus, dass sowohl gemeinnützige als auch gewerbliche Sammlungen spätestens drei Monate vor Beginn der zuständigen Behörde anzuzeigen sind. Darüber hinaus sind der Anzeige laut Kreislaufwirtschaftsgesetz (2012) zusätzliche Angaben beizufügen, unter anderem Angaben bezüglich des Sammelunternehmens (Größe und Organisation), der eigentlichen Sammlung (Art, Ausmaß und Dauer) und der verbleibenden Abfälle (Art, Menge, Verwertung). In Deutschland fallen Alttextilien laut Korolkow (2015) nach der bisherigen Rechtsauffassung unter den Abfallbegriff (§ 3 Abs. 1-3 KrWG), da bei der Abgabe die ursprüngliche Zweckbestimmung der Alttextilien aufgegeben wird und somit von einer Entledigungsabsicht des Besitzers auszugehen ist. Eine in Deutschland durchgeführte repräsentative Umfrage aus dem Jahr 2013 ergab jedoch, dass der Großteil der Verbraucher seine Altkleider mit der Absicht zur Sammlung abgibt, dass diese weitergetragen werden. Vor diesem Hintergrund könnte also durchaus über eine tatsächliche Aufgabe der Zweckbestimmung bzw. folglich über die korrekte Verwendung des Abfallbegriffs diskutiert werden.

1.7. Wirtschaftliche Betrachtung und Marktpotentiale

Aufgrund des Deponierungsverbots für Abfallstoffe mit einem Kohlenstoffgehalt größer als fünf Prozent welches in Österreich und Deutschland gilt, müssen nicht mehr nutzbare Alttextilien bzw. Textilabfälle von Betrieben oft kostenintensiv über eine thermische Verwertung entsorgt werden.

Bartl (2011b) spricht in seiner Arbeit zur Untersuchung zur stofflichen Verwertung der textilen Restfraktion dabei von Kosten in Höhe von 130-180€/t, die einem am Projekt beteiligten Firmenpartner für die Entsorgung entstehen würden. Andererseits könnten die hergestellten Rezyklatfasern laut Bartl (2009) als Substitut herkömmlicher Additive (vor allem im Bausektor) eingesetzt werden und in dieser Form Erlöse im Größenbereich von 200-300€/t erzielen. Dabei würden jedoch noch Aufbereitungskosten in der Höhe von 100-150€/t zu Buche stehen, am Ende könnte das Recyclingprodukt aber trotzdem gewinnbringend vermarktet werden.

Jedoch könnten diese genannten Abschätzungen möglicher Marktpotentiale höchstwahrscheinlich nur durch Umsetzung in industriellem Maßstab auf ihre tatsächliche Realisierbarkeit überprüft werden. Als Beispiel für Einnahmen aus sortierten Alttextilfraktionen können Vergleichspreise des deutschen Textilhandel- und Textilrecyclingunternehmens „Resales“ herangezogen werden. Laut Angaben des Unternehmens können Putzlappen für 25 Eurocent pro Kilogramm veräußert werden, ein Kilogramm textiler Rohstoff für die stoffliche Nutzung (z.B. für die Herstellung von Vliesstoff oder Dämmmaterial) bringt 13 Eurocent. Dagegen ist der Vergleichspreis für ein Kilogramm tragbare Kleidung, welche nach Osteuropa, Asien oder Afrika exportiert wird mit 1 € angeführt, der Verkaufspreis an einen Second-Hand-Handel in Deutschland liegt bei über 1 € (Dörn 2014).

1.8. Holzfaserplatte (Rohstoffe, Herstellung, Potenzial)

Zur Herstellung von Holzfaserwerkstoffen wird das Holz in seine faserigen Bestandteile aufgeschlossen und diese unter Zugabe von Bindemitteln unter hohen Temperaturen und Drücken zu Platten verpresst. Holzfaserplatten zeichnen sich als Werkstoff vor allem durch gute mechanische Eigenschaften sowie vielseitige Anwendbarkeit aus, weshalb sie auch in großen Mengen im Innenausbau und Möbelbau eingesetzt werden. Von Vorteil sind aus technologischer Sicht dabei vor allem die gleichmäßige Dichte, sowie hohe Werte bei Bruch- und Biegefestigkeit. Weiteres Plus sind die gute Bearbeitbarkeit und Oberflächeneigenschaften (Spatt 2001).

Erste Untersuchungen zur Faserplattenherstellung wurden bereits im späten 19. Jahrhundert unternommen, eine nennenswerte Produktionsindustrie entwickelte sich jedoch erst nach 1910 in den USA (Kollmann 1955). Vor allem die Entwicklung industrieller Verfahren zur Holzerfaserung (Masonite Prozess, Asplund Prozess) in den folgenden Jahrzehnten trug wesentlich zu einem raschen Anstieg der Produktionsstandorte und Kapazitäten bei. Aus diesem Grund befanden sich 1951 weltweit bereits 97 Faserplattenwerke in Betrieb und weitere 29 Werke im Bau (Kollmann 1955). Als Rohstoff dienen hauptsächlich Nadelhölzer, welche meist unter thermo- beziehungsweise hygromechanischer Behandlung zerfasert werden (Dunky und Niemz 2002). Als verbreitetstes Verfahren gilt die Zerfaserung von Hackschnitzeln mittels Dampf und Defibratoren, bei dem Refiner unterschiedlicher Bauart eingesetzt werden. Alternative Prozesse sind beispielsweise der Holzschliff von Rundhölzern an rotierenden Schleifsteinen, beziehungsweise auch die Separierung der Holzfasern mittels eines chemischen Aufschlusses (Bosshard 1975). Bei der Plattenherstellung wird grundsätzlich in zwei Verfahren unterschieden, in Nass- und Trockenverfahren (Dunky und Niemz 2002).

Im Nassverfahren werden die Holzfasern mit Wasser zu einer Suspension aufgeschwemmt und durch kontinuierliche Entwässerung auf einem umlaufenden Siebband ein Faservlies gebildet. Im anschließenden Pressvorgang werden unter Temperatur und Druck die holzeigenen Bindungskräfte aktiviert und ermöglichen so die Herstellung eines Plattenwerkstoffes mit hoher Festigkeit (Dunky und Niemz 2002). Aufgrund der hohen Eigenbindung erfolgt die Herstellung meist ohne Zugabe von Bindemitteln und Additiven, in einzelnen Produktionsverfahren werden diese jedoch in sehr geringen Mengen zugesetzt (Spatt 2001). Bei der Herstellung von Holzfaserplatten im Trockenverfahren werden den Holzfasern Bindemittel und Additive zugesetzt und die beleimten Fasern anschließend auf eine bestimmte Restfeuchte getrocknet. Daraufhin werden die Fasern zu einem Kuchen aufgestreut und dieser dann unter Temperatur und Druck verpresst. Der Pressvorgang verläuft dabei je nach Anlage in einem diskontinuierlichen beziehungsweise kontinuierlichen Verfahren (Spatt 2001). Bei der Herstellung von Faserplatten wird mittlerweile überwiegend das Trockenverfahren eingesetzt. Gründe dafür sind unter anderem ein größerer Energiebedarf beziehungsweise auch eine erhöhte Abwasserbelastung bei der Anwendung des Nassverfahrens, was meist zu einer Verdrängung durch das Trockenverfahren führte (Svehla und Winter 2013).

Einteilung von Faserplatten nach DIN EN 622:

- Platten nach Nassverfahren:

Harte Faserplatte (HB):	Dichte ab 900 kg/m ³ (DIN 622-2)
Mittelharte Faserplatte (MB):	Dichte von 400-900 kg/m ³ (DIN 622-3)
MBH (MB hoher Dichte):	Dichte von 560-900 kg/m ³
MBL (MB geringer Dichte):	Dichte von 400-560 kg/m ³
Poröse Faserplatte (SB):	Dichte von 230-400 kg/m ³ (DIN 622-4)
- Platten nach Trockenverfahren:

Mitteldichte Faserplatten (MDF):	Dichte von 550-900 kg/m ³ (DIN 622-5)
----------------------------------	--

Bezüglich Mitteldichten Faserplatten gibt es seitens der Hersteller noch eine Einteilung in L-MDF (Leicht-MDF mit einer Dichte unter 650 kg/m³) beziehungsweise UL-MDF (Ultra-Leicht-MDF mit einer Dichte unter 550 kg/m³) (Holzforschung Austria 2017). Weiter hat sich am Markt der Begriff HDF (Hochdichte Faserplatte) für MDF-Platten mit einer Dichte ≥ 800 kg/m³ eingebürgert, HDF-Platten sind jedoch kein eigener Normtyp nach DIN EN 622-5 (Svehla und Winter 2013).

1.9. Papier (Rohstoffe und Herstellung)

Das Papier ist laut Baumann (1994) ein „Werkstoff, der vorwiegend aus Fasern pflanzlichen Ursprungs besteht, die durch Oberflächenanziehungskräfte miteinander zu einem Blatt im Wesentlichen regellos verbunden sind.“ Papier als Werkstoff hat eine lange Geschichte, so nutzten bereits die antiken Ägypter gepresste Papyrusstengel als Beschreibmaterial (Sandermann 1988). Die Erfindung des Papiers aus Pflanzenfasern wird jedoch den Chinesen im 2. Jahrhundert n. Chr. zugeschrieben (Jixing 1989). Durch den Handel mit dem arabischen Raum erreichte die Technik der Papierherstellung schließlich im 12. Jahrhundert Europa. Lange Zeit wurde das Papier aus Einzelfasern, die durch Zerstampfen von Lumpen, Hadern oder Baumrinden erzeugt wurden, hergestellt. Erst durch die Erfindung des sogenannten Holländers als Zerfaserungsgerät und der Lumpen- und Papierbleiche stellte sich eine gewisse Industrialisierung der Papierherstellung ein. Im Jahre 1840 patentierte der Deutsche Friedrich Keller ein Verfahren zur Gewinnung von Holzfaserstoff durch Schleifen. Dies trug maßgeblich dazu bei, dass sich die Holzfaser über die Zeit und durch zunehmende Beimischung zur Lumpenfaser, zur Hauptkomponente des Papiers entwickelte (Sandermann 1988). Laut Baumann (1994) lässt sich die Papierherstellung prinzipiell in vier Verfahrensschritte unterteilen. In der Stoffaufbereitung werden die Faserstoffe für die Verarbeitung gewonnen.

Dabei kommen Holzhackschnitzel in einen Kocher, dort erfolgt je nach Verfahren die Fasergewinnung und Abtrennung des Lignins durch physikalische und chemische Prozesse. Der nach dem Mahlen in einem Holländer erhaltene Faserbrei kommt in die Papiermaschine, in der die Faservernetzung zu einer Papierbahn und die Trocknung erfolgen. Als nächster Verfahrensschritt kommt die Veredelung des Rohpapiers zur jeweiligen gewünschten Qualität. In der sogenannten Ausrüstung wird das Papier abschließend in die gewünschten Bögen und Formate geschnitten.

2. ZIEL UND FORSCHUNGSFRAGEN

Hauptziel dieser Arbeit ist es, Alttextilien auf ihre Eignung als (Zusatz-) Material für Werkstoffe zu untersuchen und somit eine mögliche weitere Verwertungsstufe in der kaskadischen Nutzungskette zu finden. Dies würde aufgrund erweiterter Recyclingkreisläufe bei gleichzeitiger Einsparung von Primärrohstoffen einen wichtigen Beitrag zur Erhöhung der Ressourceneffizienz leisten.

Die Hypothese lautet: Alttextilien können so aufgeschlossen und verarbeitet werden, sodass daraus Plattenwerkstoffe hergestellt werden können.

Im Zuge der Arbeit sollen darüber hinaus folgende Forschungsfragen beantwortet werden:

- Welche Unterschiede bezüglich Verarbeitung und Eigenschaften ergeben sich im Vergleich zu herkömmlichen Plattenwerkstoffen?
- Welchen Einfluss hat ein zunehmender Alttextilfaseranteil auf die mechanischen Eigenschaften einer Holzfaserverplatte?
- Welche potentiellen Anwendungen ergeben sich für Werkstoffe, welche aus Alttextilfasern hergestellt werden?

3. MATERIAL UND METHODEN

3.1. Ausgangsmaterial

Für diese Masterarbeit wurden Alttextilien mit unterschiedlicher Gewebezusammensetzung (in erster Linie das Verhältnis von Baumwollfaser zu synthetischen Fasern) verwendet, die vom Firmenpartner „Salesianer Miettex GmbH“ zur Verfügung gestellt wurden. Große Unterschiede ergaben sich auch hinsichtlich der vorherigen Verwendungsart der Rohmaterialien, wie die Verwendung als Leintücher, Bettüberzüge, oder Arbeitskleidung. Für die Versuche zur Faserplattenherstellung wurde Bettüberzüge-Alttextilmaterial mit einer Gewebezusammensetzung von 50% Baumwollfaser und 50% Polyesterfaser verwendet. Grund dafür ist der hohe Anteil von Baumwolle sowie synthetischen Fasern am weltweiten Faserverbrauch und die daraus folgenden anfallenden Mengen an Alttextilien (Lenzing 2018). Weiter sollte ein möglichst industriell anwendbares Verfahren dargestellt werden, bei dem der aufwändige Prozessschritt einer Sortierung und Trennung von Naturfaser und synthetischer Faser nicht durchgeführt werden muss und somit die Herstellung vereinfacht würde.

3.2. Materialzerkleinerung

Für die Zerkleinerung des Ausgangsmaterials wurden die Bettüberzüge in Streifen geschnitten und anschließend mit einer Schlagschere (Tafelschere) händisch zu Fetzen mit einer Größe von circa 20mm x 50mm zerkleinert. Grund für die Zerkleinerung war die dadurch erleichterte Verarbeitung im Refiner bzw. im Holländer.

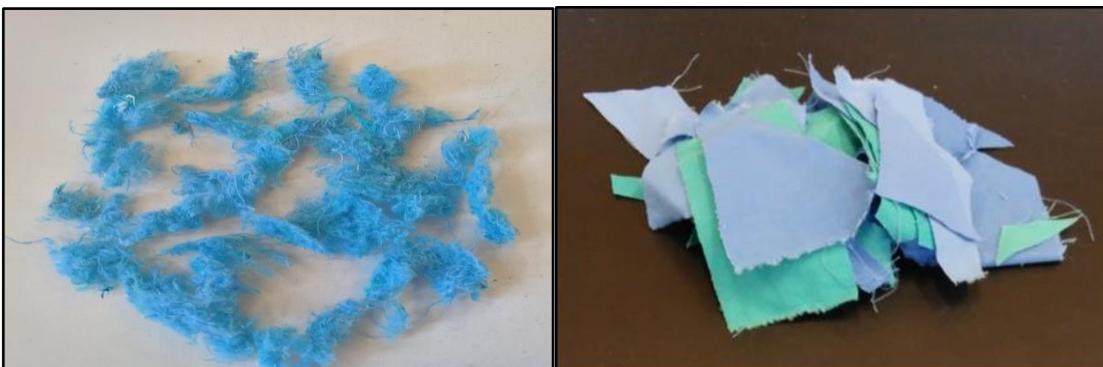


Abbildung 2: Durch den Refiner-Prozess gewonnene Alttextilfasern und eingesetztes Rohmaterial

In den Vorversuchen kam es durch zu große Fetzen zu einer Verstopfung der Zufuhrschnecke im Refiner, beziehungsweise zu einer Blockade der Messerwalze im Holländer. Da die verwendeten Maschinen Laborgeräte waren, würde sich dieses Problem einer Verstopfung durch die hohe Leistungsfähigkeit industrieller Maschinen wahrscheinlich nicht ergeben.

3.3. Materialaufschluss im Refiner

Als erstes wurde versucht, den Faseraufschluss durch thermo-hydrmechanische Behandlung in einem Refiner zu bewerkstelligen. Dazu wurde ein Laborrefiner des Herstellers Sprout and Waldron verwendet. Zuerst wurde der Kocher des Refiners mit 500 Gramm Fetzen befüllt und verschlossen, anschließend erfolgte darin eine dreiminütige Behandlung des Materials bei einem Druck von 6,4 bar und einer Temperatur von 160°C. Anschließend wurde das gekochte Material mittels einer Förderschnecke in den Mahlraum geführt, wo es in einem Mahlspace von 0,25mm zwischen zwei Mahlscheiben (eine davon rotierend) zerkleinert wurde. Anschließend wurden die zerkleinerten Fasern in einem Zyklon abgeschieden und mittels eines Siebs vom Prozesswasser bzw. kondensiertem Wasserdampf getrennt. Die gewonnenen Fasern wurden auf einer Kunststoffplatte großflächig aufgebracht und bei Raumtemperatur ca. 72 Stunden getrocknet. Probleme bei der Anwendung des Refiner-Verfahrens ergaben sich insbesondere durch die Gefahr die Förderschnecke zu verstopfen und dem daraus resultierenden relativ niedrigen Mengendurchsatz. Weiters begannen bei der hohen Prozesstemperatur bereits die PET Fasern im Material zu reagieren, da sie weich wurden und teilweise sogar aufschmolzen beziehungsweise verklumpten. Aufgrund dieser Probleme konnten durch den Aufschluss im Refiner nur geringe Mengen des benötigten Fasermaterials hergestellt werden, welche nicht für die geplanten Versuchsreihen ausreichten. Daher wurde nach einem alternativen Verfahren für den Faseraufschluss der Alttextilien gesucht.

3.4. Materialaufschluss im Holländer

Da sich beim Faseraufschluss mit dem Refiner einige Nachteile ergaben (siehe 3.3.), wurde als zweites Verfahren ein Aufschluss mit einem Labor-Holländer des Herstellers PTI angewendet. In diesem Prozess wurde das Material mit der Wasserströmung zwischen einer rotierenden Messerwalze und einer gegendrückenden Platte geführt, wo es anschließend durch die auftretenden Beanspruchungen aufgerissen bzw. gemahlen wurde (Abbildung 3). Für den Faseraufschluss wurde der Holländer zuerst mit 14 Litern Wasser befüllt und 300 Gramm Alttextilfetzen zugegeben.

Dann wurde der Holländer gestartet und die ersten drei Minuten der Spalt zwischen Messerwalze und Gegenplatte manuell geregelt, um ein erstes Aufreißen der Fetzen in Einzelfasern zu bewerkstelligen. Anschließend wurden weitere zwei Liter Wasser zugegeben und ein Gewicht angebracht welches den Mahlspace konstant hielt. Dieser Prozess lief dann weitere 15 Minuten bis der Holländer gestoppt und die Fasersuspension entnommen wurde. Anschließend wurde die Suspension mittels eines Siebs entwässert und das Fasermaterial in einer Trocknungstrommel bei 70°C getrocknet. Da die Fasern während des Trocknungsprozesses verklumpten, wurden sie nach der Trocknung noch 5 Minuten in einen Pflugscharmischer (Lödige FM 50E/1HZ) gegeben, um die Fasern weitgehend zu vereinzeln.



Abbildung 3: Durch den Prozess gewonnene Alttextilfasern und eingesetztes Material im Labor-Holländer

Da in einer zweiten Versuchsreihe festgestellt werden sollte, ob und inwiefern sich die Mahldauer der Fasern im Holländer auf die Qualität und Eigenschaften der Platten auswirkt, wurde das Material hierbei zusätzlich zu den 15 Minuten dann jeweils 30, 60, 90 und 120 Minuten im Holländer gemahlen.

3.5. Herstellung einer Dämmplatte (UL-MDF) im Trockenverfahren

Es sollten Dämm-Faserplatten mit den Abmessungen 350*350*14 mm und einer Darrdichte von 450 kg/m³ hergestellt werden. Der Festharzanteil der Platte sollte 10% betragen, was einem Beleimgrad von 11,1% Festharz/atro Faser entspricht. Als Bindemittel wurde „Acrodur DS 3015“ des Herstellers BASF verwendet, ein formaldehydfreies Acrylharz mit einem Festharzanteil von 50%.

Es sollten sowohl Platten nur aus Alttextilfasern bzw. nur aus Fichtenholzfasern hergestellt werden, sowie auch Platten mit unterschiedlichen Mischungen aus beiden Fasertypen. Dazu wurde ein Versuchsplan festgelegt. Von jedem Plattentyp wurden zwei Platten hergestellt, da jeweils eine Platte für die Wärmeleitfähigkeitsprüfung, sowie eine weitere Platte für die mechanischen Eigenschaften Prüfungen (Querzugfestigkeit und Biegefestigkeit) notwendig waren.

3.5.1. Berechnung der Stoffmengen

Aus den Plattenabmessungen wurde das Plattenvolumen V_0 bestimmt und mit der gewünschten Darrdichte konnte die Darrmasse m_0 berechnet werden (1):

$$m_0 = \rho_0 * V_0 \quad (1)$$

Aus der Darrmasse m_0 wurde die Menge an Fasern sowie Festharz wie folgt berechnet (2):

$$m_0 (\text{Fasern}) = 0,9 * m_0 \quad (2)$$

$$m_0 (\text{Festharz}) = 0,1 * m_0$$

Aus der Festharzmenge konnte die Menge an Flüssigharz $m(\text{Flüssigharz})$ bestimmt werden (3):

$$m(\text{Flüssigharz}) = m_0(\text{Festharz})/0,5 \quad (3)$$

Zur Bestimmung des Feuchtgehalts der Fasern wurde ein Feuchtebestimmer des Typs „MA 150“ von Sartorius[®] verwendet. Gemessen wurde bei einer Temperatur von 103° C und die Messung ergab eine Feuchte der Textilfasern von $\omega=4,96\%$ und eine Feuchte der Fichtenfasern von $\omega=10,17\%$.

Der nächste Berechnungsschritt (4) war die Bestimmung der Feuchtmasse der Fasern $m\omega(\text{Fasern})$:

$$m\omega(\text{Fasern}) = m_0 (\text{Fasern}) * (\omega + 1) \quad (4)$$

Als letzter Schritt wurde sowohl die Fasermenge als auch die Menge an Bindemittel mit 1,05 multipliziert, um etwaige Materialverluste während des Beileimungs- und Pressvorgangs zu kompensieren.

3.5.2. Beleimung und Pressvorgang

Die Fasern wurden in einer elektrisch angetriebenen rotierenden Beleimtrommel gemischt und mittels einer Spritze, welche das Bindemittel durch Druckluft gleichmäßig in die Trommel einsprühete, beleimt. Zur besseren Vermischung und Vermeidung von Klumpenbildung der Fasern wurde das Material anschließend noch fünf Minuten in einem Pflugscharmischer des Herstellers „Lödige“ (Typ „FM 50E/1HZ“) gegeben. Anschließend wurde das beleimte Fasermaterial entnommen und händisch in einen Streukasten mit den Abmessungen 350mm x 350mm gestreut. Der Streukasten wurde dabei auf ein mit Backpapier bedecktes Aluminiumblech gestellt, um später das Einlegen in die Presse zu erleichtern (Abbildung 4). Nach der Streuung wurden die Fasern im Streukasten händisch vorverdichtet und der Faserkuchen in die Presse eingelegt. Vor dem Pressvorgang wurde das Aluminiumblech unter dem Kuchen herausgezogen, es wurden Distanzleisten mit einer Höhe von 14mm eingelegt und die Oberseite des Faserkuchens mit einer Schicht Backpapier bedeckt.



Abbildung 4: Manuell gestreuter Faserkuchen (UL-MDF) vor dem Pressvorgang

Für die Versuche wurde eine Presse des Herstellers „Langzauner“ (Typ „LZT-OK 175L“), Baujahr 2005 verwendet. Die Presstemperatur betrug 180°C, für die Schließgeschwindigkeit der Presse wurde 100% gewählt, ab einer Höhe von 90mm wurde in den „Schleichgang“ (12% der Geschwindigkeit) geschaltet. Der Pressdruck wurde mit 0,5 MPa möglichst niedrig gehalten, da aufgrund der geringen Plattendichte die notwendige

Dicke von 14mm auch mit diesem Druck problemlos erreicht werden konnte. In den Vorversuchen war oft das Problem aufgetreten, dass während des Pressvorgangs die Feuchtigkeit in der Platte nicht genügend reduziert werden konnte. Um dies zu vermeiden, wurde eine relativ lange Presszeit gewählt und zwar 30 Minuten pro Platte. Nach Ablauf der Presszeit wurde die Platte aus der Presse entnommen und nach dem Abkühlen auf das festgelegte Maß zugeschnitten. Danach wurde die Platte bis zur weiteren Verwendung im Klimaraum bei 20° C und 65% relativer Luftfeuchtigkeit gelagert.

3.6. Herstellung Mittelharte Faserplatte (MB) im Nassverfahren

Es sollten Faserplatten mit den Abmessungen 250mm x 265mm x 6mm und einer Darrdichte von 700 kg/m³ hergestellt werden. Die Herstellung dieses Plattentyps erfolgte ohne Bindemittel. Das heißt, der innere Faserverbund wurde rein durch die Eigenbindungsfähigkeit der jeweiligen Fasern im nassen Zustand erreicht. Es sollten wie auch beim vorherigen Plattentyp sowohl Platten aus reinen Alttextilfasern bzw. aus reinen Fichtenfasern hergestellt werden, sowie auch Mischungen der beiden Fasertypen. In einer zweiten Versuchsreihe wurden ebenfalls weitere Mitteldichte Faserplatten mit den Abmessungen 250mm x 265mm x 6mm und einer Darrdichte von 700 kg/m³ hergestellt, jedoch bestanden diese Platten aus 100% Alttextilfasern, es wurde keine Holzfasern und Bindemittel zugegeben. Für diese Versuchsreihe wurde die Mahldauer des Fasermaterials im Holländer variiert, um die Auswirkungen der Mahldauer auf Qualität und mechanische Eigenschaften der Platten abzuschätzen. Dazu wurde das Material 15, 30, 60, 90 und 120 Minuten im Holländer gemahlen und im Anschluss die Testplatten hergestellt.

3.6.1. Berechnung der Stoffmengen

Wie in der vorderen Versuchsreihe wurde aus den Plattenabmessungen das Plattenvolumen V_0 und mit der Darrdichte in weiterer Folge die Darrmasse m_0 berechnet (5):

$$m_0 = \rho_0 * V_0 \quad (5)$$

Anschließend wurde für diese Versuchsreihe der Feuchtegehalt der Fasern ebenfalls mit dem Messgerät „Sartorius MA 150“ erneut bestimmt und die Werte zur Bestimmung der notwendigen Feuchtmasse herangezogen. Die Feuchte (6) dieser Fichtenfasern ergab $\omega=11,21\%$, die Feuchte der Textilfasern lag bei $\omega=4,71\%$.

$$m_{\omega}(\text{Fasern}) = m_0(\text{Fasern}) * (\omega + 1) \quad (6)$$

Als letzter Schritt wurde auch hier die Fasermenge diesmal mit einem Faktor von 1,1 multipliziert um etwaige Materialverluste während des Misch- und Pressvorgangs zu kompensieren.

3.6.2. Kuchenbildung und Pressvorgang

Nach der Einwaage der berechneten Fasermenge wurde diese in ein Gefäß gegeben und mit 15 Liter Wasser aufgefüllt um eine im industriellen Verfahren übliche Stoffkonzentration von 2-2,5% (Dunky und Niemz 2002) zu erreichen. Danach wurde die Suspension 5 Minuten mit einem Rührbesen verquirlt, um ausreichende Faservereinzelnung und Durchmischung zu gewährleisten. Anschließend wurde die Suspension noch 30 Minuten ruhen gelassen, damit die Fasern ausreichend Wasser aufnehmen bzw. quellen konnten. So sollte der Faserverbund durch erhöhte Bildung von Wasserstoffbrücken zusätzlich verbessert werden. Um einen Faserkuchen zu bilden wurde die Suspension in einen Siebrahmen gegossen und anschließend im Rahmen händisch zur groben Entwässerung des Faserkuchens vorverdichtet. Danach wurden die Seitenwände des Rahmens abgebaut, der Faserkuchen mit dem Sieb entnommen und für den Pressvorgang vorbereitet (Abbildung 5). Dabei wurde der Kuchen in eine Metallwanne gelegt, bei welcher das übrige, durch den Pressvorgang entweichende Wasser, durch eine vorhandene Randöffnung abfließen konnte. Es wurden Distanzleisten mit einer Höhe von 6 mm eingelegt und die Oberseite des Faserkuchens mit einer Schicht Backpapier bedeckt. Wie bei den Platten im Trockenverfahren kam auch bei diesen Versuchen wiederum die Presse „Langzauner“ (Typ „LZT-OK 175L“), Baujahr 2005 zum Einsatz. Aufgrund des hohen Wassergehalts der Fasern traten in den Vorversuchen (speziell bei den reinen Holzfaserplatten) bei höheren Presstemperaturen Dampfriesen in der Platte auf. Um dies zu vermeiden wurde eine niedrige Presstemperatur von 120°C gewählt, dafür betrug die Presszeit 45 Minuten. Die lange Presszeit sollte die ausreichende Trocknung und Formstabilität der Platte sicherstellen. Ein weiteres Problem in den Vorversuchen waren Dampfriesen, die vermutlich durch zu schnelles Abkühlen der Platte beim Öffnen der Presse auftraten. Um das zu vermeiden, wurden die Platten nach dem Pressvorgang in der Presse auf 70°C rückgekühlt. Der Pressdruck wurde auf 1 MPa eingestellt, als Schließgeschwindigkeit der Presse wurde 100% gewählt, ab einer Höhe von 60mm wurde in den Schleichgang (12% der Geschwindigkeit) geschaltet.

Nach dem Rückkühlen wurde die Platte aus der Presse entnommen, das Sieb entfernt und die Platte besäumt bzw. auf das festgelegte Maß zugeschnitten (Abbildung 5).

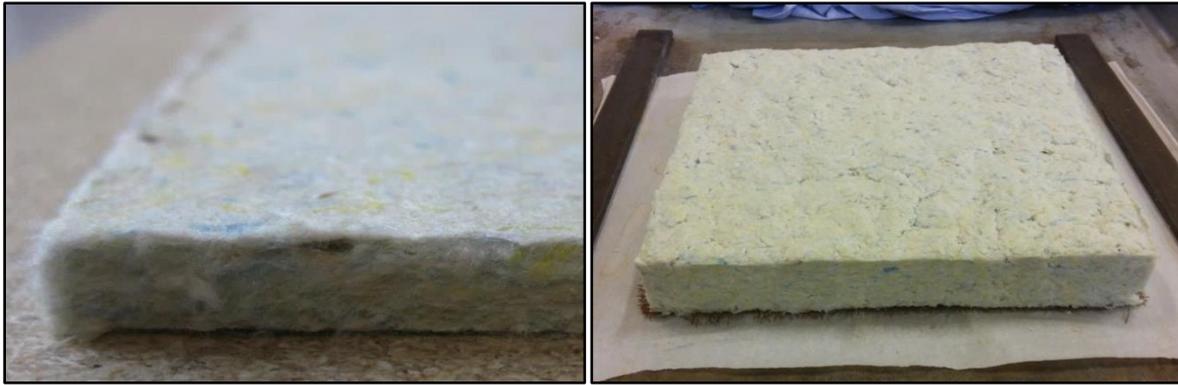


Abbildung 5: Gepresste Mittelharte Faserplatte und Faserkuchen hergestellt im Nassverfahren

Danach wurde sie bis zur weiteren Verwendung in einem Klimaraum bei 20° C und 65% relativer Luftfeuchtigkeit gelagert. Um einen möglichen Einfluss der Presstemperatur auf die Platteneigenschaften festzustellen, wurde außerhalb der Versuchsreihe noch eine Einzelplatte nach der gleichen Vorgehensweise, nur bei einer Presstemperatur von 180°C, hergestellt. Um den Einfluss von Bindemittel auf die Verarbeitbarkeit festzustellen, wurde eine weitere Platte nach der gleichen Vorgehensweise (Presstemperatur wieder 120°C) hergestellt, bei der für die Fasersuspension statt 15 Liter Wasser lediglich 10 Liter Wasser bzw. 5 Liter „Acrodur DS 3015“ (Feststoffgehalt 50%) verwendet wurden. Die Ergebnisse sind im Kapitel 4.5. angeführt.

3.7. Herstellung von „Handsheets“ Papier aus Baumwoll-Alttextilien

Für die labormäßige Herstellung von Papierblättern („Handsheets“) wurden Frottee-Handtücher aus 100% Baumwollfaser verwendet. Diese wurden wie auch schon in Kapitel 3.2. beschrieben händisch vorzerkleinert. Weiter wurde zu Vergleichszwecken auch Papier aus industriellem Birkenzellstoff hergestellt, bzw. aus einer Mischung der beiden Rohmaterialien (50% Birkenzellstoff, 50% Baumwollfaser aus Alttextil).

3.7.1. Berechnung der Stoffmengen

Die Füllmenge (7) des Holländers wurde auf 17 Liter Wasser festgelegt, die Faserkonzentration in der Suspension sollte 1,11% betragen.

$$m_0 \text{ (Zellstoff)} = \text{Konzentration} \left(\frac{\text{g}}{\text{l}} \right) * \text{Menge Suspension (l)} \quad (7)$$

Dies ergab eine Trockenmasse von 188,4 g Fasern. Bei einer Temperatur von 103° C ergab die Feuchtemessung der Textilfetzen $\omega=5,21\%$ bzw. $\omega=5,87\%$ für Birkenzellstoff.

Der nächste Berechnungsschritt war die Bestimmung der Feuchtmasse der Textilfetzen beziehungsweise des Birkenzellstoffs $m\omega$: (8)

$$m\omega(\text{Textilfetzen}) = m_0(\text{Textilfetzen}) * (\omega + 1) \quad (8)$$

$$m\omega(\text{Zellstoff}) = m_0(\text{Zellstoff}) * (\omega + 1)$$

Daraus ergab sich eine Feuchtmasse von 198,2g Textilfetzen bzw. 199,46g Birkenzellstoff. Das Flächengewicht eines Blattes Papier sollte 70g/m² betragen, der Durchmesser des Blattbildungssiebs der „Sheet Former“ Maschine betrug 201mm, d.h. die Fläche eines Blattes lag bei 0,0317m². Somit waren für ein einzelnes Blatt 2,22g atro Fasern notwendig.

$$70 * 0,0317 = 2,22g$$

Bei einer Faserkonzentration in der Suspension von 1,11%, mussten für ein Blatt Papier 200 ml Suspension verwendet werden.

$$2,22/1,11\% = 200$$

3.7.2. Papierherstellung

Der Faserrohstoff wurde 60 Minuten im Holländer gemahlen und anschließend entnommen. Für die Papierherstellung wurde die berechnete Menge an Suspension mit einem Messbecher entnommen. Die Blattbildung erfolgte erneut mit dem PTI Gerät, bzw. dem „Rapid-Köthe Sheet Former“. Dieses Gerät besteht aus der sogenannten Blattformersäule und dem Blatttrockner. Als erstes wurde die Blattformersäule mit circa vier Litern Wasser gefüllt, dann die benötigte Menge Zellstoff-Suspension hinzugegeben. Die Säule wurde auf circa 7 Liter aufgefüllt und die Suspension aufgewirbelt. Nach fünf Sekunden wurde auf „Entwässern“ geschaltet und das Wasser mit einem Unterdruck von 0,3 bar durchs Sieb abgezogen. Nach dem Entwässern wurde die „Formersäule“ geöffnet. Danach wurde ein sogenannter Trägerkarton mit einer beschichteten Oberfläche auf den Zellstoff gelegt und zur mechanischen Vorentwässerung eine sogenannte „Gautschrolle“ viermal über den Trägerkarton gerollt. Das entstandene Papierbatt wurde vom Trägersieb abgenommen, umgedreht und „abgeklopft“. Anschließend kam auf das Papier ein Deckblatt und alles zusammen (Deckblatt, Papier und Trägerkarton) für 7 Minuten bei 92°C in den Blatttrockner. Bei einem Unterdruck von 0,8 bar wurde nach Beendigung des Trocknungsvorgangs Deckblatt und Trägerkarton entfernt und das Papier in einem Klimaraum bei 20° C und 65% relativer Luftfeuchtigkeit bis zur Materialprüfung gelagert.

3.8. Materialprüfung

Zur Bestimmung der Platteneigenschaften wurden Prüfungen der Querkzug- und Biegefestigkeit durchgeführt, sowie auch die Dichte der jeweiligen Faserplatten ermittelt. Für die im Trockenverfahren hergestellten 14mm Dämmplatten wurde auch eine Prüfung der Wärmeleitfähigkeit durchgeführt. Die Ergebnisse der Auswertungen wurden grafisch aufbereitet und in Form von Boxplotdiagrammen dargestellt. Die statistische Datenauswertung der drei Faserplattentypen und der Papiertypen erfolgte mit der Statistiksoftware „R“, mit welcher bezogen auf die einzelnen Versuchsreihen, eine einfaktorische Varianzanalyse durchgeführt wurde. Als multipler Mittelwertevergleich bzw. post-hoc Test wurde der Tukey-Test durchgeführt um die Gruppenmittelwerte auf statistisch signifikante Unterschiede zu untersuchen (Signifikanzniveau 0,05). Die Ergebnisse daraus sind im Anhang dargestellt, die einzelnen Signifikanzgruppen sind mittels Buchstaben gekennzeichnet. Jene Gruppenmittelwerte welche mit demselben Buchstaben gekennzeichnet sind weisen untereinander keine statistisch signifikanten Unterschiede auf. Die Ergebnisse der Wärmeleitfähigkeitsprüfung und der zusätzlichen Platten wurden aufgrund der geringen Probenanzahl nicht statistisch untersucht, es wurde jeweils der Median und die Standardabweichung in einem Balkendiagramm dargestellt.

3.8.1. Querkzugprüfung

Für die Prüfung der Querkzugfestigkeit wurden aus den 14mm UL-MDF-Platten je zehn Prüfkörper pro Platte, von den 6mm Mittelharten Platten je acht Prüfkörper zugeschnitten. Die Querkzugprüfung erfolgte nach ÖNORM EN 319: 2005 „Spanplatten und Faserplatten - Bestimmung der Zugfestigkeit senkrecht zur Plattenebene“. Die Maße der Prüfkörper betragen 50mm x 50mm, diese wurden mit einem Dispersionsholzleim (PATTEX PV/H Express Holzleim) auf Buchensperrholzjoche geklebt. Geprüft wurden die Querkzugproben auf einer Universalprüfmaschine des Herstellers Zwick Roell AG (Typ Z020).

Aufgrund der variierenden Zusammensetzung von Holz- bzw. Textilfasern der jeweiligen Platten ergaben sich große Unterschiede hinsichtlich der Querkzugfestigkeiten. Um den in der Norm festgelegten Zeitraum bis zum Eintreten des Bruchs (60 ± 30 s) einzuhalten, musste also die jeweilige Prüfgeschwindigkeit angepasst werden.

So wurde bei den 14mm Platten, bei Platten aus 100% Holzfasern, eine Prüfgeschwindigkeit von 2mm/min gewählt, bei Platten mit Textilfasern betrug die Prüfgeschwindigkeit 1mm/min. Die Vorkraft war mit 10N festgelegt, das Prüfungsende mit einem 50%igen Kraftabfall der maximalen Bruchkraft F_{max} . Bei den 6mm Platten aus 100% Holzfasern wurde ebenfalls eine Prüfgeschwindigkeit von 2mm/min gewählt, bei Platten mit Textilfasern hingegen 1mm/min.

Als Vorkraft wurde hier 30N gewählt, das Prüfungsende wurde mit einem 50%igen Kraftabfall der maximalen Bruchkraft F_{max} definiert.

3.8.2. Biegeprüfung

Die Biegeprüfung erfolgte nach DIN EN ISO 14125:1998 „Faserverstärkte Kunststoffe-Bestimmung der Biegeeigenschaften“. Für die Prüfung wurde das Verfahren des Dreipunkt-Biegeversuchs angewendet. Die Radien der Auflager bzw. der Druckfinne betragen 5mm. Für die Prüfung der Biegefestigkeit und des Biege-Elastizitätsmodul wurden aus den 14mm UL-MDF-Platten je zehn Prüfkörper pro Platte, von den 6mm Mittelharten Platten je acht Prüfkörper zugeschnitten. Die Probekörper für die 14mm Platten wiesen eine Länge von 280mm und eine Breite von 20 mm auf, die Stützweite war 224 mm. Die Probekörper für die 6mm Platten waren 120mm lang und 15mm breit, die Stützweite hierbei betrug 96mm. Für beide Plattentypen wurde eine Vorkraft von 5N gewählt, die Prüfgeschwindigkeit betrug auf 5mm/min. Bei den 6mm Platten war das Prüfungsende mit einer Kraftabschaltsschwelle von 20% der maximalen Buchkraft (F_{max}) definiert, bei den 14mm Platten mit einer Kraftabschaltsschwelle von 40% F_{max} .

3.8.3. Dichtebestimmung

Zur Bestimmung der Dichte der jeweiligen Testplatten wurden die einzelnen Prüfkörper für die Querkzugprüfung vermessen und mittels der Laborwaage „Denver Instrument SI 603“ das Gewicht ermittelt. Aus den ermittelten Abmessungen und dem Gewicht des Prüfkörpers konnte die jeweilige Dichte berechnet werden.

3.8.4. Prüfung der Wärmeleitfähigkeit

Die Messung der Wärmeleitfähigkeit erfolgte gemäß ISO 8302, beziehungsweise EN 12667. Für die Messung wurde ein Einplatten-Wärmeleitfähigkeitsmessgerät „lambda-Meter EP 500“ nach EN 1946-2 der Firma „Lambda-Messtechnik GmbH Dresden“ eingesetzt. Der Messaufbau ist mit waagrechten Messplatten mit der Warmseite nach oben konzipiert. Die acht Prüfplatten mit den Abmessungen von 350mm x 350mm wurden in die Messkammer eingelegt und die Messplatten geschlossen.

Die Messung der Wärmeleitfähigkeit erfolgte bei einem definierten Prüfdruck von 200 Pa beziehungsweise 1000 Pa und einer Messtemperatur von 10°C.

3.8.5. Prüfung der Berstfestigkeit

Die Prüfung der Berstfestigkeit der hergestellten Laborblätter wurde auf einem Prüfgerät der Firma Karl Frank GmbH (Deutschland) durchgeführt. Das zu prüfende Papier wird dabei auf die Prüffläche gelegt, worauf sich dann eine Spannglocke pneumatisch schließt und das Papier spannt. Unter der Prüffläche befindet sich eine Kunststoffmembran, die sich durch das Hineinpumpen von Glycerin aufwölbt und gegen das Papier drückt, welches sich ebenfalls wölbt und schließlich zum Bersten gebracht wird. Als Einstellungen wurden für den Schließdruck 700 kPa, für den Messbereich 2000kPa festgelegt. Als Einstellung für die maximale Wölbung wurde die Wölbstufe 5 gewählt. Pro Papiertyp wurden 15 Messungen durchgeführt, wobei zuvor das Flächengewicht (Grammatur) von jedem Laborblatt bestimmt wurde. Dafür wurde jedes Probenblatt mit einer Laborwaage („Denver Instrument SI 603“) verwogen und mit Hilfe der definierten Fläche des Probenblattes, welche sich aus dem Durchmesser der Blattformersäule ergibt, wurde die jeweilige Grammatur berechnet. Für den Vergleich der Laborblätter zu einem industriell hergestellten Papier wurden aus einem handelsüblichen Notizblock (Marke Ursus®, Hersteller Format Werk GmbH 4623 Gunskirchen-Österreich) mit einem angegebenen Flächengewicht von 70g/m² pro Blatt, ebenfalls 15 Probekörper hergestellt und geprüft.

3.8.6. Weitere Versuche

Über die oben genannten Versuchsreihen zur Faserplattenproduktion hinaus wurden des Weiteren noch einige Versuche unternommen ein Vlies mit Alttextilteilen herzustellen, welches in weiterer Folge für die Herstellung von Plattenwerkstoffen und Formteilen verwendet werden könnte. Die Vliese wurden dabei mittels einer Maschine der Firma „Formfiber Denmark APS“ nach der Methode des Luftlegeverfahrens hergestellt. Dabei werden die verschiedenen Fasermaterialien über einen Luftstrom in die Maschine transportiert, wo sie über ein System von rotierenden Stachelwalzen („Spikes“) geführt und dort vereinzelt werden. Die Fasern legen sich dann auf einem Förderband ab und bilden dort eine Fasermatte, welche aus der Maschine transportiert wird und dieser wieder zugeführt werden kann. Da bei diesen Versuchen mehrere Fasertypen im Einsatz waren, wurde dieser Vorgang einige Male wiederholt, um eine ausreichende Durchmischung der Komponenten und notwendige Homogenität des Vlieses zu gewährleisten. In einem zweiten Schritt wurde die aerodynamisch gelegte Fasermatte über eine Vernadelungsmaschine geführt, wo eine Verdichtung und Verfestigung des Faservlieses erfolgte. Das erste Vlies wurde aus einer Mischung von 50% Hanffaser, 20% Polypropylenfaser und 30% Stoffstreifen hergestellt. Das Flächengewicht des Vlieses betrug 1096g/m².

In einem weiteren Verfahrensschritt wurde das Vlies in Matten mit den Abmessungen 500mm x 500mm geschnitten und in einer Foulard-Maschine mit einer Acrodur-Acrylharzlösung (Mischverhältnis Acrodur:Wasser 1:3) imprägniert. Nach der Trocknung der imprägnierten Matten wurden diese vierlagig in der Laborpresse (Langzauner) zu einer Platte verpresst. Die Presszeit betrug dabei 10 Minuten und die Pressung erfolgte bei einer Temperatur von 160°C sowie 5 MPa Druck auf Distanzleisten mit einer Stärke von 6 mm. Im Zuge dieses Versuchs ließen sich zwar erfolgreich Platten mit einer sehr hohen spezifischen Dichte (1100-1180 kg/m³) herstellen, jedoch war die Verteilung der Stoffstreifen im Vlies und folglich auch in der Platte sehr inhomogen. Dieser Umstand ergab sich dadurch, dass sich die Stoffstreifen aufgrund ihrer Größe, Form und ihres Gewichts im Luftlegeverfahren nicht optimal verteilten. Somit waren über die gesamte Platte gravierende Dicke- und auch Dichteunterschiede zu beobachten. Um also eine möglichst gleichmäßige Verteilung des Textilanteils im gesamten Faservlies zu gewährleisten, wurde ein zusätzlicher Versuch mit bereits vereinzelt Textildfasern durchgeführt. Dazu wurden Textildfasern verwendet, welche zuvor im Holländer aufgeschlossen und in einer Trocknungstrommel getrocknet worden waren (siehe 3.4.- Materialaufschluss im Holländer). Im Luftlegeverfahren wurde in der Formfiebermaschine ein Vlies mit 4,2m Länge und 0,5m Breite hergestellt. Die Faserzusammensetzung lag bei 50% Alttextilfaser, 30% Hanffaser und 20% Polypropylenfaser. Als erstes wurde ein Vlies aus Hanffaser gelegt, dann wurden die Polypropylenfasern und zum Schluss die Textildfasern zugegeben. Um eine gute Durchmischung und gleichmäßige Faserverteilung zu gewährleisten wurden mehrere Durchläufe durchgeführt, bei welchen das gelegte Vlies wieder der aerodynamischen Legemaschine zugeführt wurde. Das gelegte Vlies wurde anschließend wiederrum über eine Vernadelungsmaschine geführt. In diesem Versuch konnte durch die vereinzelt Fasern eine sehr gleichmäßige Verteilung der Textildfasern erreicht werden, außerdem konnte auch ein Faservlies mit vergleichsweise hohem Alttextilanteil (50%) hergestellt werden. In weiterführenden Versuchen des Kollegen Christian Weichhart am Institut für Holztechnologie und nachwachsende Rohstoffe, konnte aus einem Abschnitt dieses Vlieses mittels einer Formpresse unter Druck und Temperatur sogar ein Formteil (Schüssel) hergestellt werden. Dies zeigt daher auch das Potential von Alttextildfasern für weitere mögliche Anwendungen als Formteil in unterschiedlichsten Branchen. Aufgrund des großen Umfangs der Thematik konnte jedoch nicht weiter auf diesen Bereich der Vliesherstellung eingegangen werden, jedoch würde sich dieses Gebiet womöglich als Gegenstand weiterer Untersuchungen beziehungsweise wissenschaftlicher Arbeiten anbieten.

4. ERGEBNISSE

Im Folgenden sind die Ergebnisse der Prüfung der mechanischen Eigenschaften der jeweiligen Plattentypen in Form von Abbildungen dargestellt.

4.1. Dämmplatte (UL-MDF) im Trockenverfahren (Holz-und Alttextilfaser)

4.1.1. Dichte

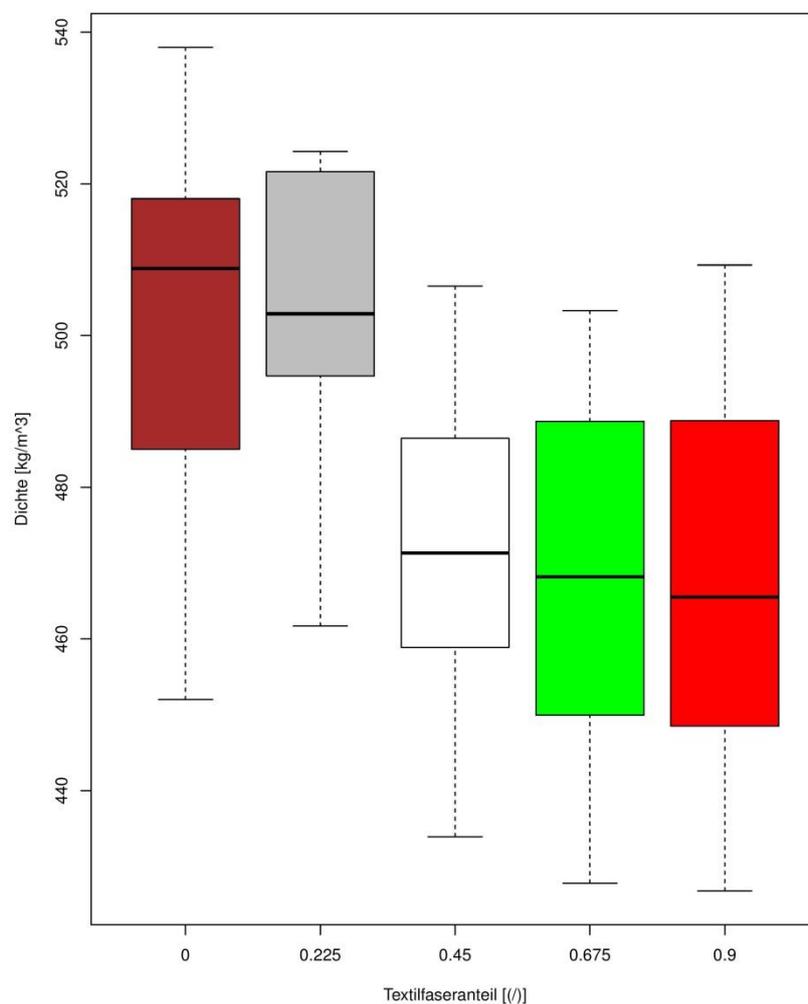


Abbildung 6: Dichte (in kg/m³) der jeweiligen Dämmplatten (UL-MDF) hergestellt im Trockenverfahren

Abbildung 6 zeigt die Dichteverteilung der einzelnen Dämmplatten, gruppiert nach dem Textilfaseranteil der jeweiligen Platten. Der Holz- bzw. Textilfaseranteil in den unterschiedlichen Rezepturen variierte von 0 bis 90 Prozent, der Festharzanteil wurde bei allen Mischungen mit 10 Prozent konstant gehalten. Der Median aller Plattentypen liegt über der Zieldichte von 450 kg/m³. Allerdings bezieht sich dieser Wert auf die Darrdichte, wodurch die realen Werte aufgrund der Lagerung im Normklima erhöht sind. Aus der Abbildung geht hervor, dass die Rezepturen mit geringem bzw. keinem Textilfaseranteil deutlich höhere Werte erreichen. Der Tukey post-hoc Test zeigt ebenfalls einen signifikanten Unterschied zwischen den Mittelwerten der Gruppen mit niedrigem bzw. hohem Textilfaseranteil ($p < 0,05$). Auffällig ist zusätzlich eine verhältnismäßig hohe Streuung der jeweiligen Werte, die wahrscheinlich auf eine ungleichmäßige Faserverteilung bei der Streuung des Faserkuchens zurückzuführen ist.

4.1.2. Querzugfestigkeit

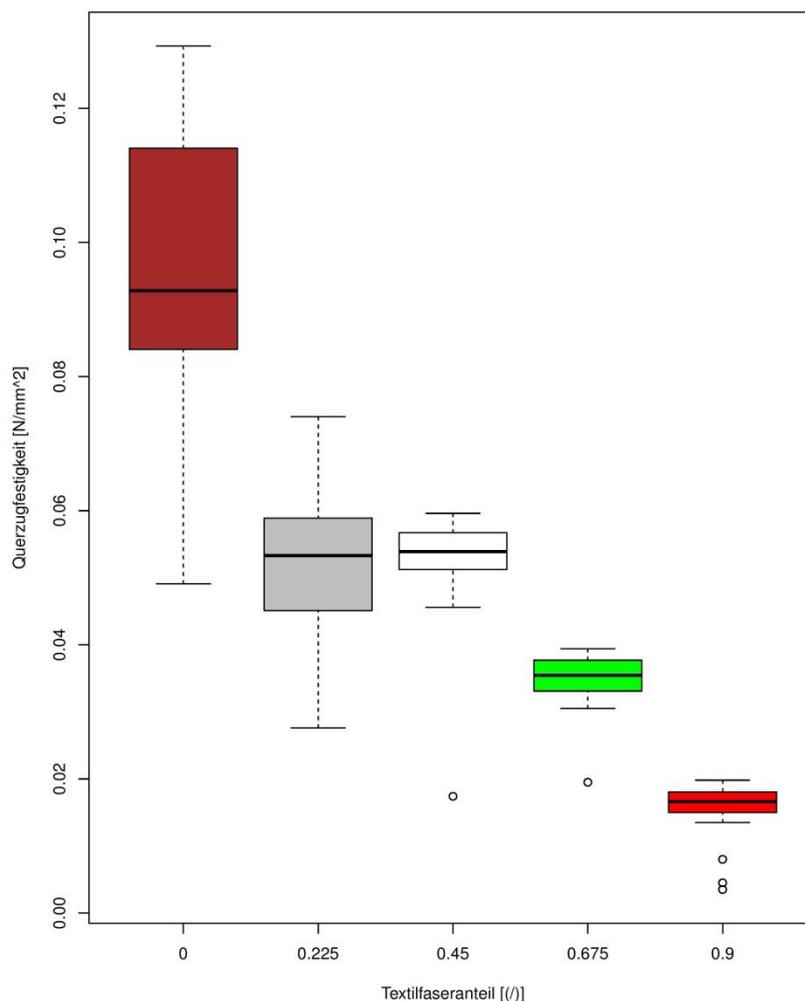


Abbildung 7: Querzugfestigkeit (in N/mm²) der jeweiligen Dämmplatten (UL-MDF) hergestellt im Trockenverfahren

In Abbildung 7 sind die Werte für die Querkzugfestigkeiten der jeweiligen Rezepturen dargestellt. Im Allgemeinen erreichen alle Plattentypen aufgrund der geringen Dichte wie erwartet äußerst niedrige Querkzugfestigkeiten, besonders auffallend ist jedoch die verhältnismäßig starke Abnahme der Werte mit höherem Textilanteil. Liegt der Median der Rezeptur ohne Textilfaseranteil noch bei 0,0928 N/mm², so fällt er bei der Rezeptur mit 0,225% Textilfaseranteil bereits auf 0,0533 N/mm² zurück. Der Median der Rezeptur, welche nur aus Textilfaser und Bindemittel besteht, liegt hingegen bei nur 0,0166 N/mm². Beachtenswert ist jedoch die geringe Streuung der Werte bei den Rezepturen, welche einen hohen Textilanteil haben.

4.1.3. Biegefestigkeit und Biege-Elastizitätsmodul

Ein ähnliches Bild zeigt sich bei der Darstellung der Werte für die Biegefestigkeit (Abbildung 8). Auch hier ist die starke Abnahme der Biegefestigkeit mit steigendem Textilfaseranteil klar ersichtlich und auch statistisch hoch signifikant ($p < 0,001$). Die Rezeptur, welche nur Holzfasern und Bindemittel beinhaltet, erreicht die höchsten Werte (Median=9,1 MPa), allerdings ist auch die Streuung der Messwerte bei dieser Rezeptur am höchsten. Zum Vergleich liegt der Median der Rezeptur, welche ausschließlich Textilfasern und Bindemittel beinhaltet, lediglich bei 1,8 MPa, der relative Verlust der Biegefestigkeit beträgt 80,2%. Der Tukey post-hoc Test zeigt, dass sich die Gruppen mit 0,225% und 0,45% Textilanteil bzw. die Gruppen mit 0,675% und 0,9% Textilfaseranteil statistisch nicht signifikant unterscheiden.

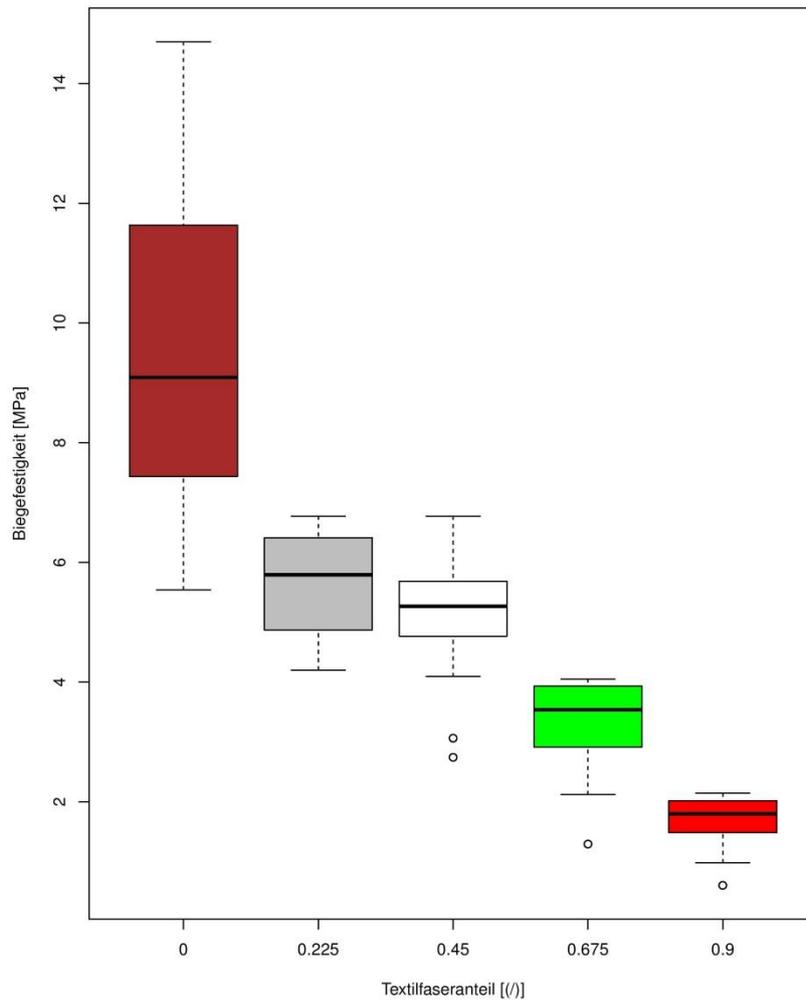


Abbildung 8: Biegefestigkeit (in MPa) der jeweiligen Dämmplatten (UL-MDF) hergestellt im Trockenverfahren

Aus Abbildung 9 ist die Entwicklung des Biege-Elastizitätsmoduls in Abhängigkeit vom Textilfaseranteil der Rezeptur ersichtlich. Es zeigt sich wiederum eine signifikante Abnahme der Werte mit steigendem Textilfaseranteil ($p < 0,001$). Der Median der reinen Holzfaserplatte ist mit 1,34 GPa über dreimal so hoch wie der Median der reinen Alttextilfaserplatte (0,356 GPa).

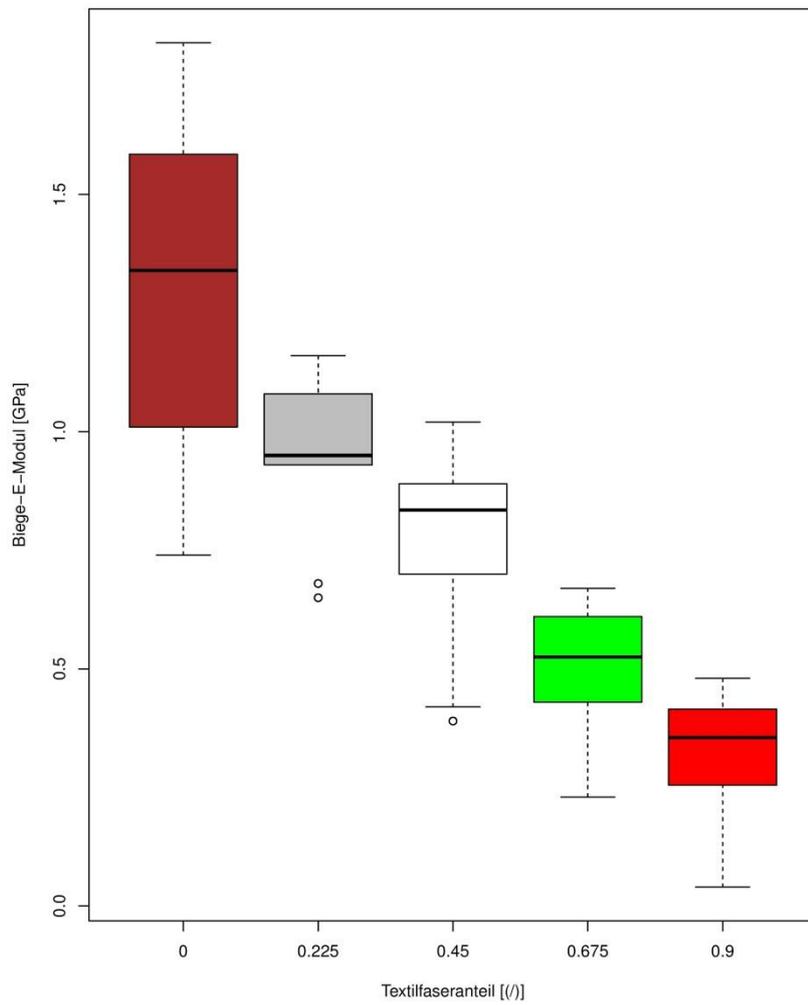


Abbildung 9: Biege-Elastizitätsmodul (in GPa) der jeweiligen Dämmplatten (UL-MDF) hergestellt im Trockenverfahren

4.1.4. Wärmeleitfähigkeit

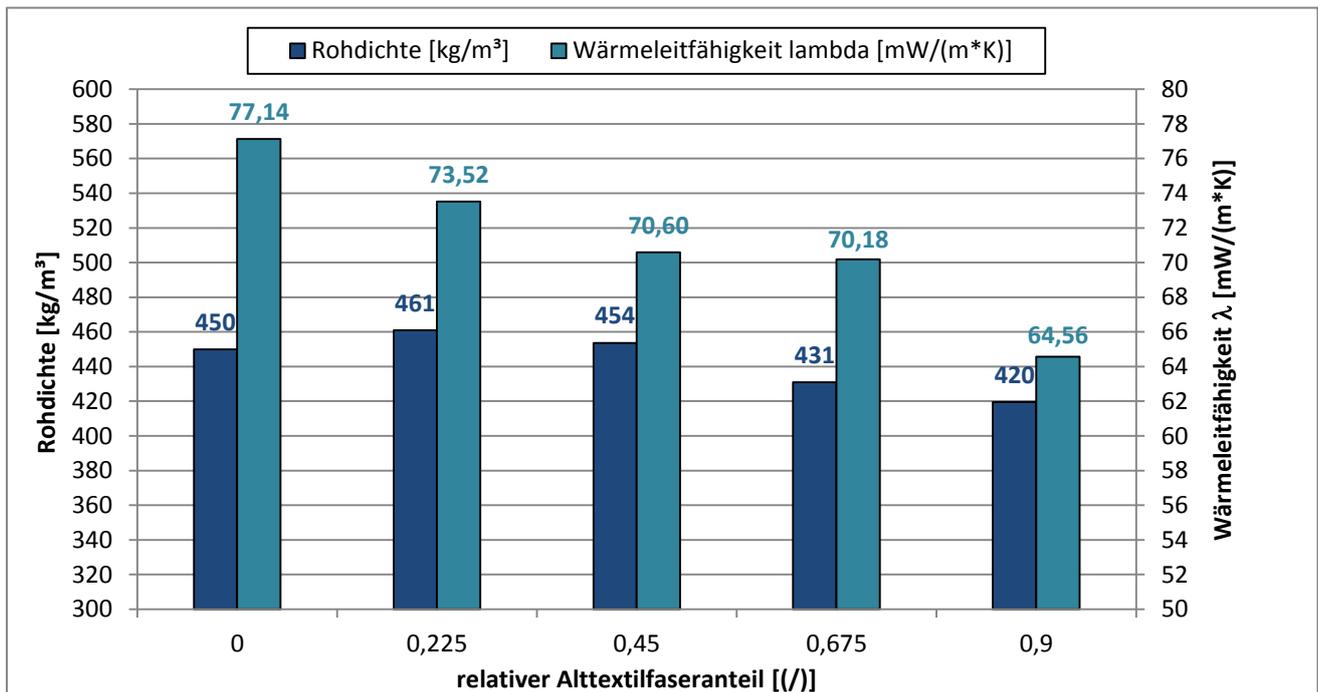


Abbildung 10: Rohdichte (in kg/m³) und Wärmeleitfähigkeit λ (in mW/m*K) der jeweiligen Dämmplatten (UL-MDF) hergestellt im Trockenverfahren

In Abbildung 10 sind die Ergebnisse der Wärmeleitfähigkeitsprüfung dargestellt. Dabei ist klar erkennbar, dass mit zunehmendem Alttextilfaseranteil die Wärmeleitfähigkeit sinkt, respektive die Dämmfähigkeit steigt. Zwar weisen die Proben mit hohem Alttextilfaseranteil auch niedrigere Rohdichtewerte auf, welche ebenfalls zu einer besseren Dämmwirkung beitragen, allerdings war auch bei den Platten mit 22,5% beziehungsweise 45% Alttextil die Wärmeleitfähigkeit trotz höherer Dichte schlechter als bei den Platten ohne Alttextilfasern.

4.2. Mittelharte Faserplatte (MB) im Nassverfahren (Holz- und Alttextilfaser)

4.2.1. Dichte

In Abbildung 11 ist die Dichteverteilungen der Mittelharten Faserplatten gruppiert nach dem Textilfaseranteil dargestellt. Der Median aller Rezepturen liegt über der berechneten Zieldichte von 700kg/m³.

Die Zieldichte wurde jedoch für den absolut trockenen Zustand berechnet, die reale Dichte bei der Prüfung war aufgrund der Lagerung bei Normalklima erhöht. Im Allgemeinen ist die Dichteverteilung der einzelnen Rezepturen sehr unterschiedlich. Bei einer durchgeführten Varianzanalyse konnte kein signifikanter Einfluss des Textilfaseranteils auf die Dichte nachgewiesen werden ($p > 0,05$). Der Tukey post-hoc Test zeigte keine signifikanten Unterschiede zwischen den jeweiligen Gruppenmittelwerten. Auffällig ist auch hier die große Streuung der Werte, vor allem bei den Faserplatten mit hohem Holzfaseranteil.

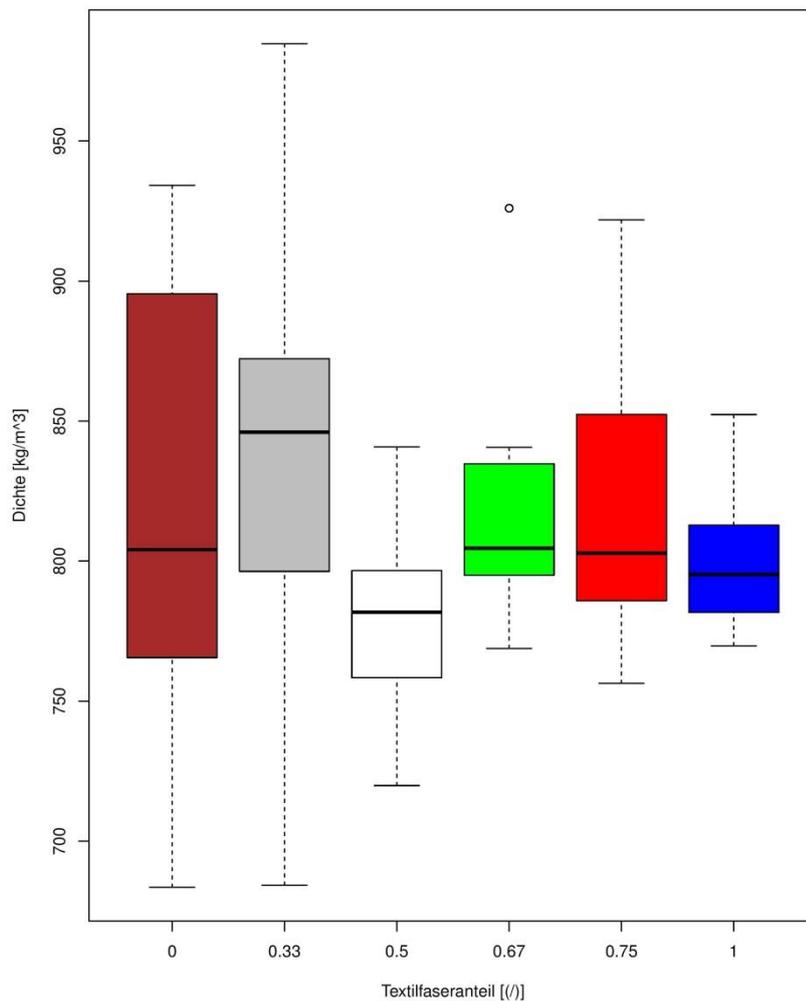


Abbildung 11: Dichte (in kg/m^3) der Mittelharten Faserplatten (MB) hergestellt im Nassverfahren

4.2.2. Querzugfestigkeit

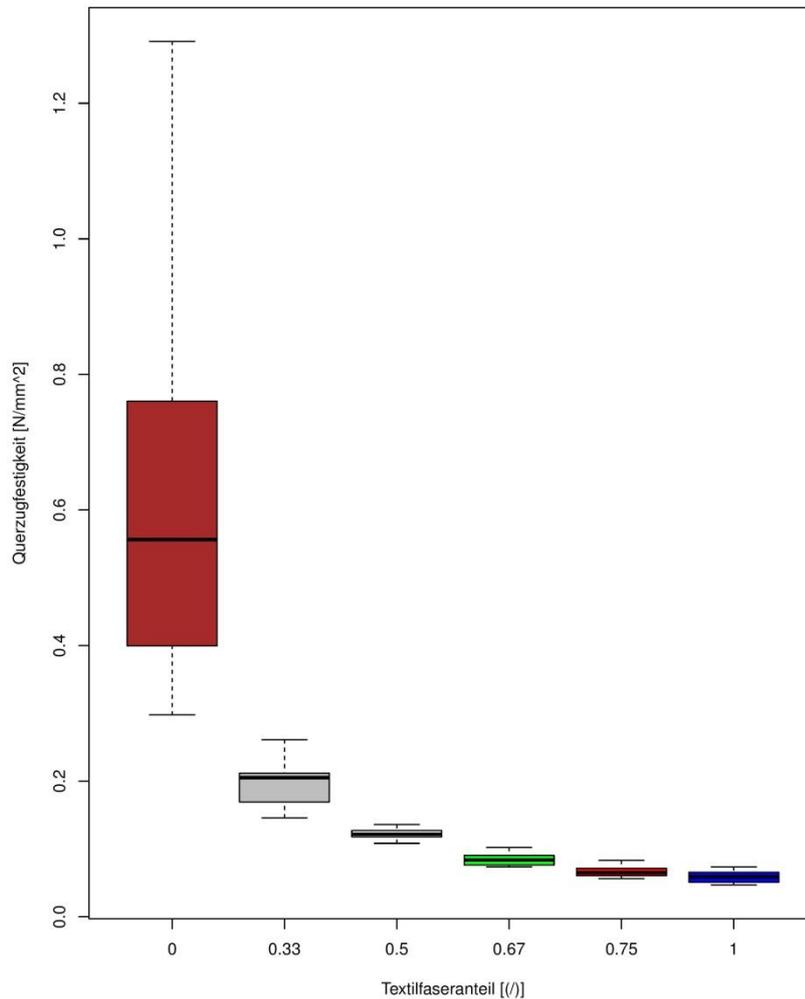


Abbildung 12: Querzugfestigkeit (in N/mm²) der Mittelharten Faserplatten (MB) hergestellt im Nassverfahren

Abbildung 12 zeigt die Querzugfestigkeit der Mittelharten Faserplatten. Hier ist zu erkennen, dass die Festigkeit schon mit geringer Zugabe (33%) von Textilfasern stark abnimmt, jedoch ab 50 % nur mehr leicht sinkt. Bemerkenswert ist die geringe Streuung der Messwerte, mit Ausnahme der reinen Holzfaserplatte, bei welcher sich die Werte in einem sehr weiten Bereich bewegen. Beispielsweise liegt der Variationskoeffizient der reinen Holzfaserplatten bei 0,45, bei der reinen Textilfaserplatte hingegen bei 0,156.

4.2.3. Biegefestigkeit und Biege-Elastizitätsmodul

In Abbildung 13 und 14 sind die Ergebnisse der Biegeprüfung der Mittelharten Faserplatten (MB) dargestellt. Analog zur Querkzugfestigkeitsprüfung zeigt sich auch hier eine hoch signifikante Abnahme ($p < 0,001$) der Werte für Biegefestigkeit und Biege-Elastizitätsmodul mit steigendem Textilfaseranteil, besonders augenscheinlich ist ebenfalls der Vorteil der reinen Holzfaserplatte im Vergleich zu den Platten mit Alttextilfasern. Der Tukey post-hoc Test zeigt bei der Biegefestigkeit keine signifikanten Unterschiede der Gruppenmittelwerte zwischen 50% und 100% Textilfaseranteil. Der Median für die Biegefestigkeit liegt bei der Rezeptur ohne Textilfasern bei 43,22 MPa. Bei der Rezeptur mit 33% Textilfaser ist dieser Wert bereits weniger als halb so hoch (19,34 MPa). Ähnlich verhält es sich beim Vergleich des Biege-Elastizitätsmoduls dieser beiden Rezepturen, bei welchen sich der Median auch nahezu halbiert (3,34 GPa zu 1,77 GPa).

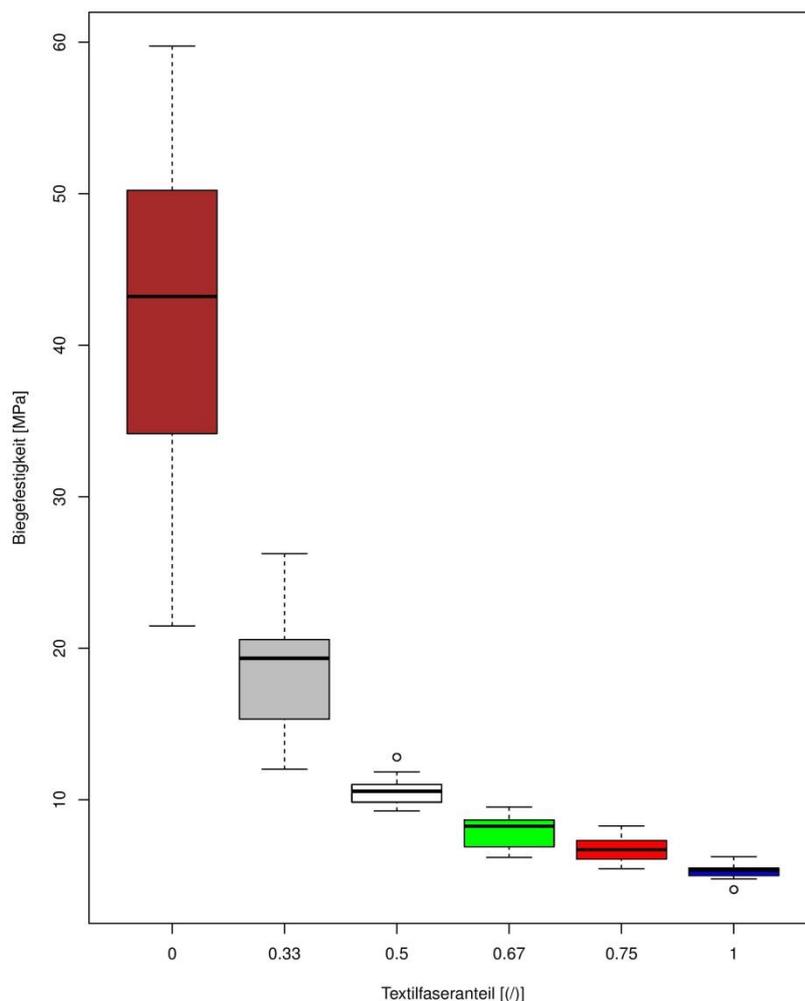


Abbildung 13: Biegefestigkeit (in MPa) der Mittelharten Faserplatten (MB) hergestellt im Nassverfahren

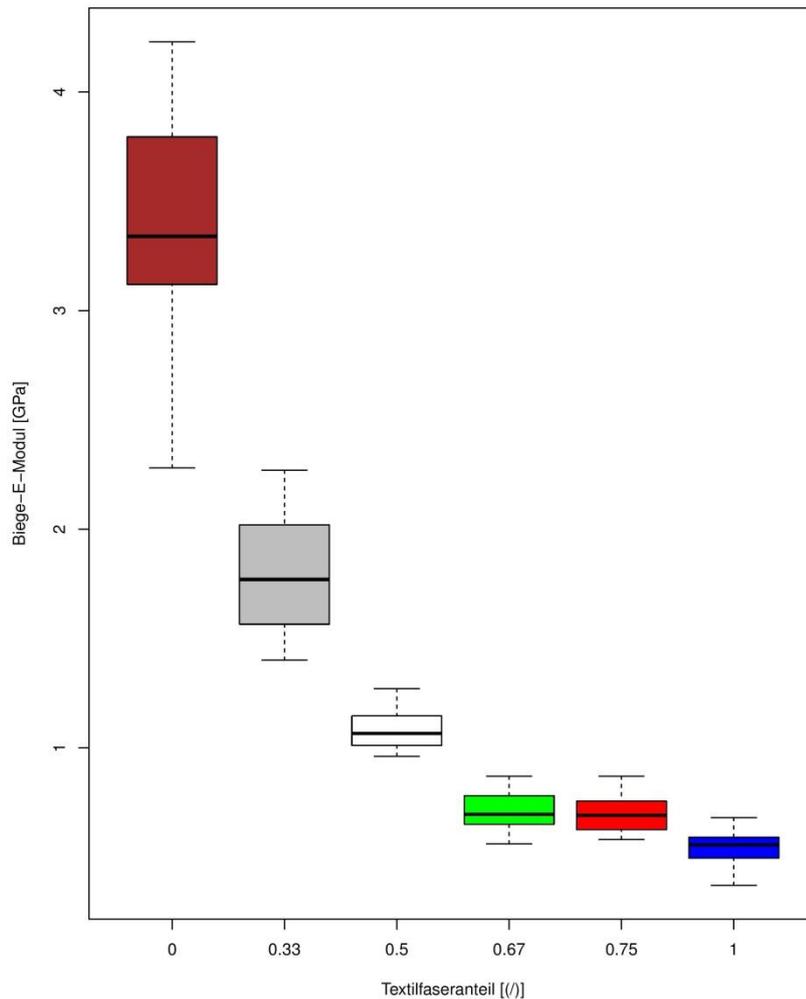


Abbildung 14: Biege-Elastizitätsmodul (in GPa) der Mittelharten Faserplatten (MB) hergestellt im Nassverfahren

4.3. Mittelharte Faserplatten (MB) hergestellt im Nassverfahren (Alttextilfasern mit unterschiedlicher Mahldauer im Holländer)

Im Zuge dieser Versuchsreihe sollte der Einfluss des Mahlvorgangs der Alttextilfasern im Holländer auf die Plattenqualität und mechanischen Eigenschaften untersucht werden. Dazu wurden im Nassverfahren Mittelharte Platten ausschließlich aus Alttextilfasern hergestellt, wobei dafür die Mahldauer im Holländer variiert wurde. Die unterschiedliche Mahldauer des Fasermaterials betrug dabei 15, 30, 60, 90 und 120 Minuten.

4.3.1. Dichte

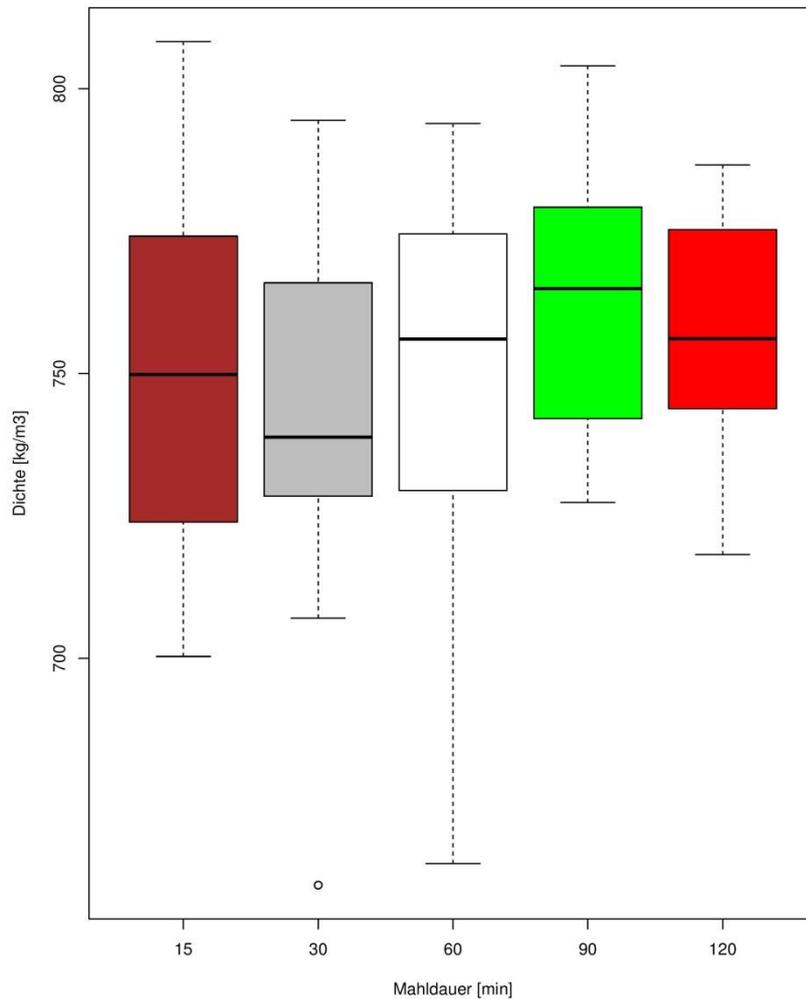


Abbildung 15: Dichte (in kg/m^3) der Mittelharten Faserplatten (MB) mit unterschiedlicher Mahldauer (in min), hergestellt im Nassverfahren

In Abbildung 15 sind die Werte für die Dichte der Mittelharten Faserplatten, gruppiert nach Mahldauer im Holländer, dargestellt. Die Materialmengen wurden wie schon in der vorherigen Versuchsreihe für eine Darrdichte von 700 kg/m^3 berechnet, durch die Lagerung bei Normklima sind die Werte für die tatsächliche Rohdichte erhöht. Mittels einer durchgeführten Varianzanalyse konnte hier kein signifikanter Einfluss des Textilfaseranteils auf die Dichte nachgewiesen werden ($p > 0,05$). Der Tukey Test zeigt hier keine statistisch signifikanten Unterschiede der Gruppenmittelwerte. Im Allgemeinen bewegen sich die Mediane in einem relativ engen Bereich, deutlich erkennbar ist wiederum eine große Streuung der einzelnen Werte.

4.3.2. Querzugfestigkeit

Die Querzugfestigkeit steigt, wie in Abbildung 16 ersichtlich ist, mit zunehmender Mahldauer an. Die Ausnahme stellt dabei jene Platte dar, bei welcher das Fasermaterial 90 Minuten im Holländer gemahlen wurde. Hier liegt der Median sogar knapp unterhalb der Platte mit einer Mahldauer von 60 Minuten. Auffallend ist der starke Anstieg der Festigkeit bei Verdopplung der Mahldauer von 15 auf 30 bzw. von 30 auf 60 Minuten. Dabei erhöht sich der Median von 0,06 auf 0,11 bzw. 0,16 N/mm². Bei einer Mahldauer von 120 Minuten liegt der Median bei 0,25 N/mm². Der Tukey Test zeigt bei dieser Versuchsreihe, dass sich 4 von 5 Gruppen signifikant unterscheiden.

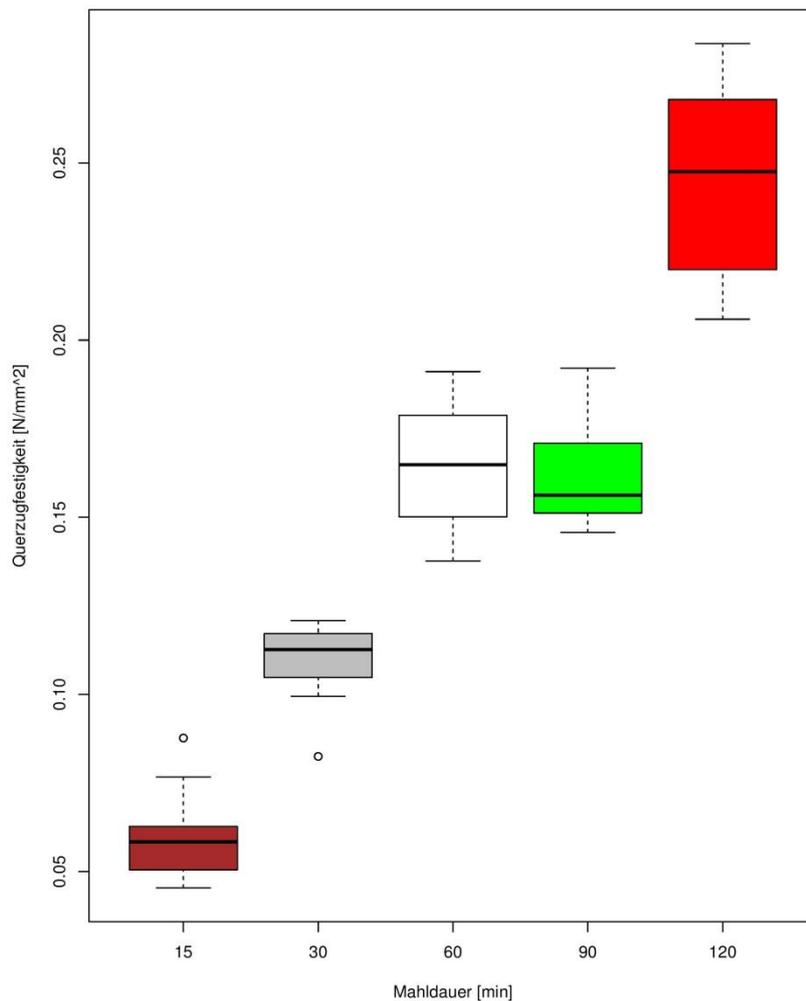


Abbildung 16: Querzugfestigkeit (in N/mm²) der Mittelharten Faserplatten (MB) mit unterschiedlicher Mahldauer (in min), hergestellt im Nassverfahren

4.3.3. Biegefestigkeit und Biege-Elastizitätsmodul

Bei den mechanischen Eigenschaften der Biegefestigkeit und des Biege-Elastizitätsmoduls (Abbildung 17 und 18) weist die Platte aus Fasern mit 90 Minuten Mahldauer höhere Werte auf als die mit 60 Minuten, beim Elastizitätsmodul sogar einen minimal höheren Wert als die Platte, deren Ausgangsmaterial 120 Minuten im Holländer gemahlen wurde.

Ebenfalls gut erkennbar ist wie bei der Querkzugfestigkeit auch hier der starke Anstieg der Biegeeigenschaften bei den ersten drei Mahlintervallen (von 15 bis 60 Minuten), bei welchen sich der Median für die Biegefestigkeit von 4,16 MPa auf 10,42 MPa erhöht. Der Median für den Biege-Elastizitätsmodul im selben Intervall steigt von 0,39 GPa auf 1,11 GPa an, fast schon auf das Wertenniveau der Rezeptur, bei welcher die Fasern 120 Minuten gemahlen wurden (1,15 GPa). Die Rezeptur mit 90 Minuten Fasermahldauer im Holländer liegt sogar noch leicht höher bei 1,16 GPa.

Der Tukey post-hoc Test zeigt, dass sich sowohl bei der Biegefestigkeit als auch beim Biege-Elastizitätsmodul die Gruppen 60, 90 und 120 Minuten statistisch nicht signifikant unterscheiden. Es hat also den Anschein als würde ab einer gewissen Mahldauer eine weitere Verlängerung zu keiner deutlichen Verbesserung der Biegeeigenschaften mehr führen, speziell in Hinblick auf den Biege-Elastizitätsmodul.

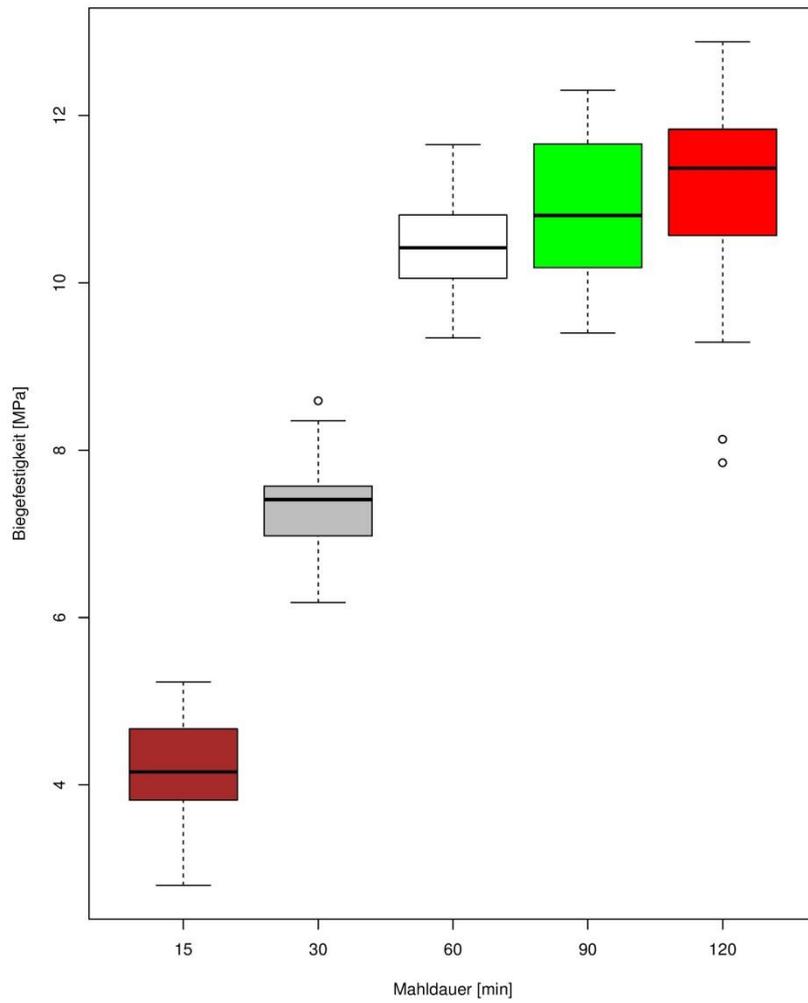


Abbildung 17: Biegefestigkeit (in MPa) der Mittelharten Faserplatten (MB) mit unterschiedlicher Mahldauer (in min), hergestellt im Nassverfahren

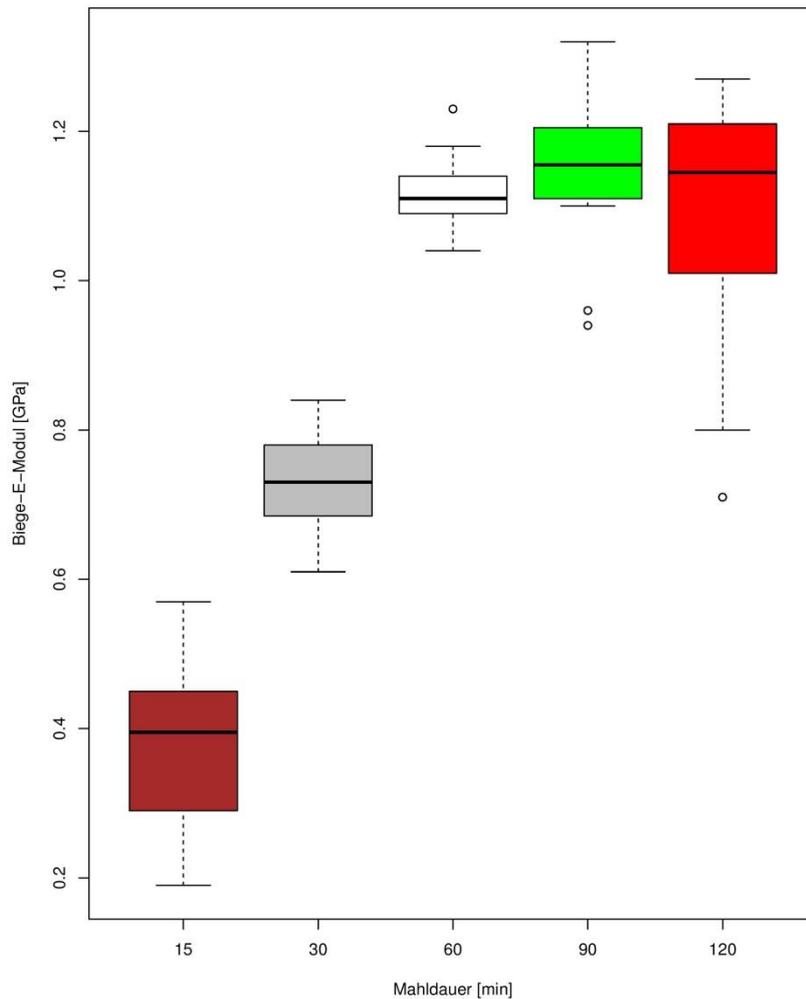


Abbildung 18: Biege-Elastizitätsmodul (in GPa) der Mittelharten Faserplatten (MB) mit unterschiedlicher Mahldauer (in min), hergestellt im Nassverfahren

4.4. Handsheet Papier aus Baumwollfaser-Alttextilien

Um einen weiteren möglichen Anwendungszweck von Alttextilien zu untersuchen wurde aus Baumwollfasern, welche aus Frottee-Handtüchern gewonnen wurden, Handsheet-Papier oder auf Deutsch „Labor-Papierblätter“ hergestellt. Zu Vergleichszwecken wurde auch Papier aus industriellem Birkenzellstoff hergestellt, bzw. auch aus einer Mischung der beiden Rohmaterialien. Anschließend wurde die Grammaturn der jeweiligen Probenblätter ermittelt und die Proben auf ihre Berstdruckfestigkeit geprüft.

4.4.1. Grammatur

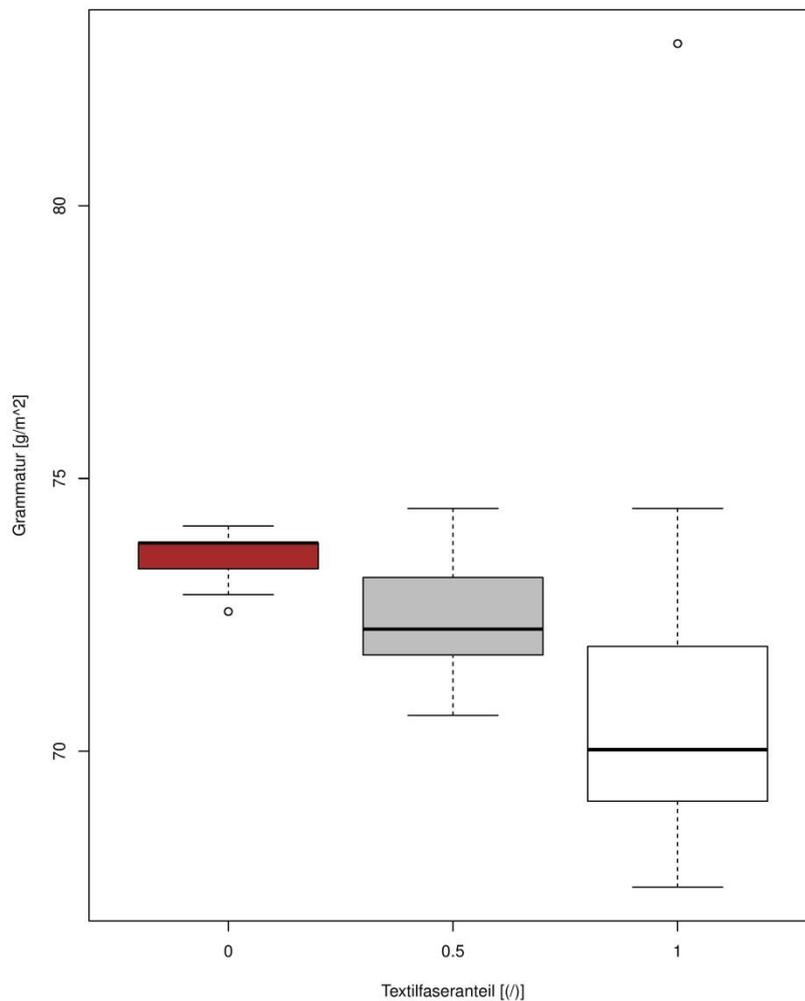


Abbildung 19: Grammatur (in g/m^2) des Handsheet-Papiers mit unterschiedlichem Alttextilfaseranteil

Abbildung 19 zeigt die Grammaturen der drei unterschiedlichen Rezepturen. Die berechnete Zielgrammatur von 70 g/m^2 wurde von allen drei Rezepturen erreicht, die höchste Grammatur zeigten die Proben aus 100% Birkenzellstoff, der Median liegt bei $73,82 \text{ g/m}^2$. Mit zunehmendem Textilfaseranteil sinken die Grammaturen, die Streuung nimmt dabei erkennbar zu.

4.4.2. Berstdruckfestigkeit

Abbildung 20 zeigt die Berstdruckfestigkeiten der unterschiedlichen Papierproben. Die niedrigsten Werte erreicht dabei das Handsheet-Papier aus 100% Birkenzellstoff, der Median liegt bei 171 kPa. Die höchste Berstdruckfestigkeit hatte die Mischung aus 50% Alttextil-Baumwollfaser und 50% Birkenzellstoff, mit einem Median von 274 kPa. Dazwischen liegen die Handsheet-Papiere aus 100% Alttextil-Baumwollfaser, welche einen Median von 217 kPa aufweisen. Der durchgeführte Tukey post-hoc Test zeigt, dass sich alle drei Gruppenmittelwerte statistisch signifikant voneinander unterscheiden.

Die Werte des gemessenen Industripapiers der Marke Ursus sind in diesem Boxplot nicht dargestellt. Allerdings lag der Median bei 196 kPa, also in einem ähnlichen Wertebereich wie das Papier aus recycelten Baumwoll-Handtüchern.

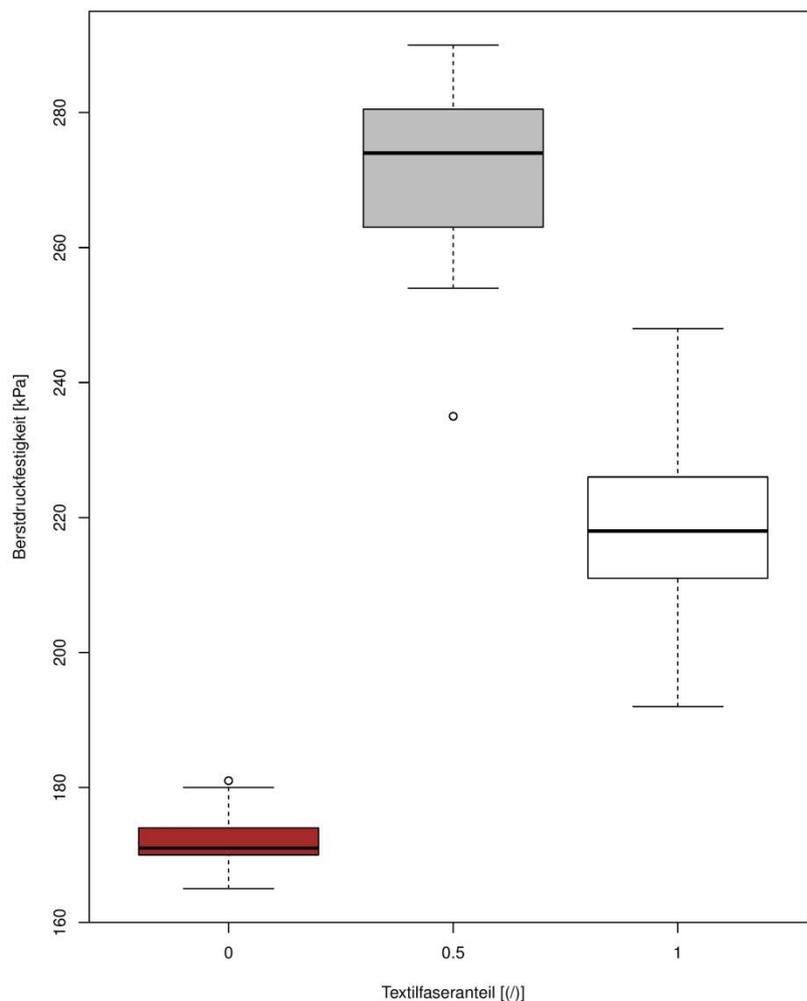


Abbildung 20: Berstdruckfestigkeit (in kPa) des Handsheet-Papiers mit unterschiedlichem Alttextilfaseranteil

4.5. Zusätzliche Versuchsplatten Mittelharte Platten (MB) hergestellt im Nassverfahren

Um mögliche Auswirkungen unterschiedlicher Parameteränderungen auf die Platteneigenschaften feststellen zu können, wurden weitere Versuchsplatten hergestellt. Wie bereits in Kapitel 3.3. erwähnt, konnten aufgrund diverser Probleme beim Materialaufschluss im Refiner nicht genügend Fasern für eine eigene Versuchsreihe hergestellt werden. Die vorhandenen Refinerfasern wurden jedoch in einigen zusätzlichen Mittelharten Platten verarbeitet um einen Vergleich mit Platten aus Holländer-Fasern ziehen zu können. Daher wurden zwei Mittelharte Faserplatten aus 100% Refinerfasern hergestellt. Zusätzlich wurde jeweils eine Platte aus 50% Refinerfasern und 50% Holzfasern beziehungsweise eine aus 50% Refinerfasern und 50% Holländerfasern hergestellt. Um den möglichen Einfluss der Presstemperatur auf die mechanischen Eigenschaften feststellen zu können wurde eine Platte aus 100% Holländerfasern bei einer Temperatur von 180°C anstatt der üblichen 120°C verpresst. In einer weiteren Versuchsplatte wurden bei der Herstellung der Fasersuspension statt 15 Liter Wasser nur 10 Liter Wasser und 5 Liter Acrylharz „Acrodur DS 3015“ (Feststoffgehalt 50%) verwendet, also die Mittelharte Platte mit Bindemittel versetzt. Wie bei den Mittelharten Faserplatten der vorherigen Versuchsreihen wurden nach Lagerung im Normklima pro Platte acht beziehungsweise zwölf Proben für die Querkzug- und Biegeprüfung zugeschnitten und geprüft. Die Ergebnisse der jeweiligen Materialprüfung sind in Abbildung 21 und 22 dargestellt.

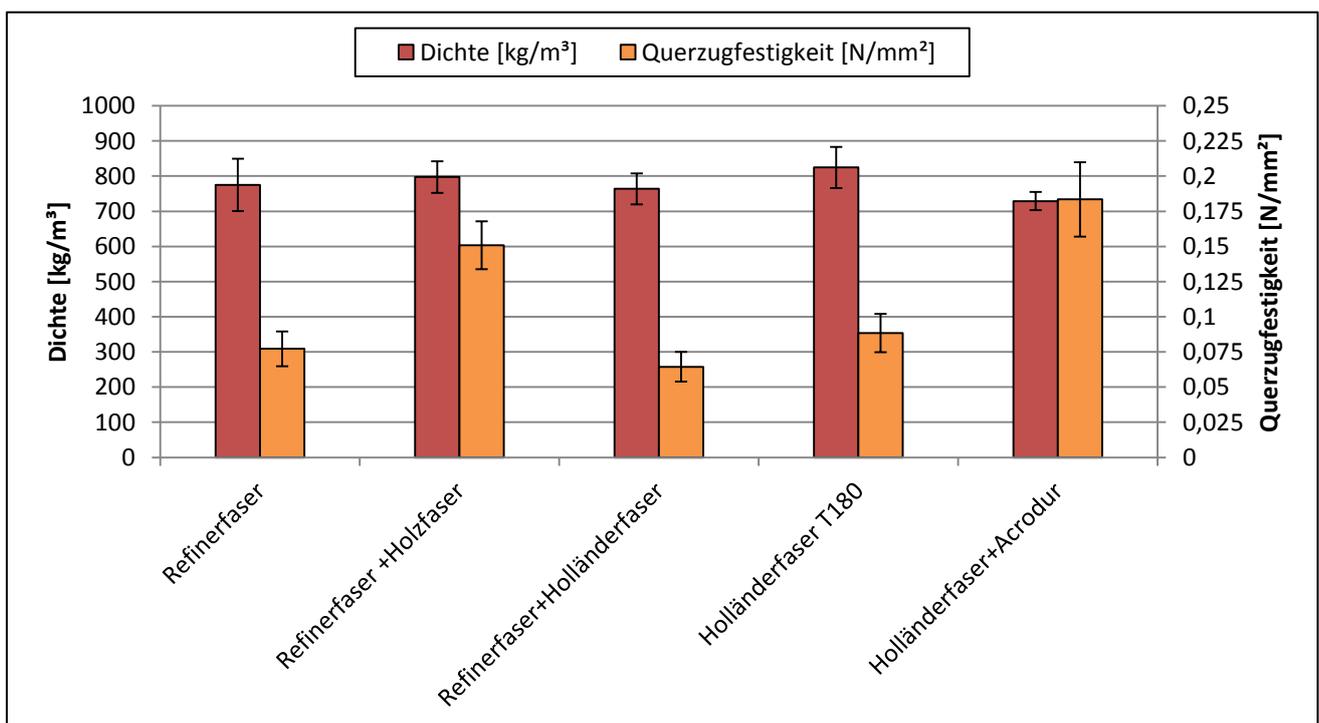


Abbildung 21: Querkzugfestigkeit (in N/mm²) und Dichte (in kg/m³) der zusätzlich hergestellten Mittelharten Platten (MB) im Nassverfahren

In Abbildung 21 sind die Werte für die Dichte und die Querkzugfestigkeit der zusätzlichen Versuchsplatten ersichtlich. Die jeweiligen Mediane für die Dichte und Querkzugfestigkeit sind dabei in Form von Balken auf der Primär- bzw. Sekundärachse dargestellt, zusätzlich ist auch noch die dazugehörige Standardabweichung abgebildet. Die hergestellten Platten weisen eine vergleichbare Dichte auf, die Mediane bewegen sich in einem Schwankungsbereich von etwa 100 kg/m^3 . Bei den Querkzugfestigkeiten sind vor allem bei den reinen Alttextilfaserplatten die niedrigen Werte augenscheinlich, die Platten aus Refinerfasern bewegen sich in einem ähnlichen Wertebereich wie die Platten aus Holländerfasern (siehe 4.2.2.).

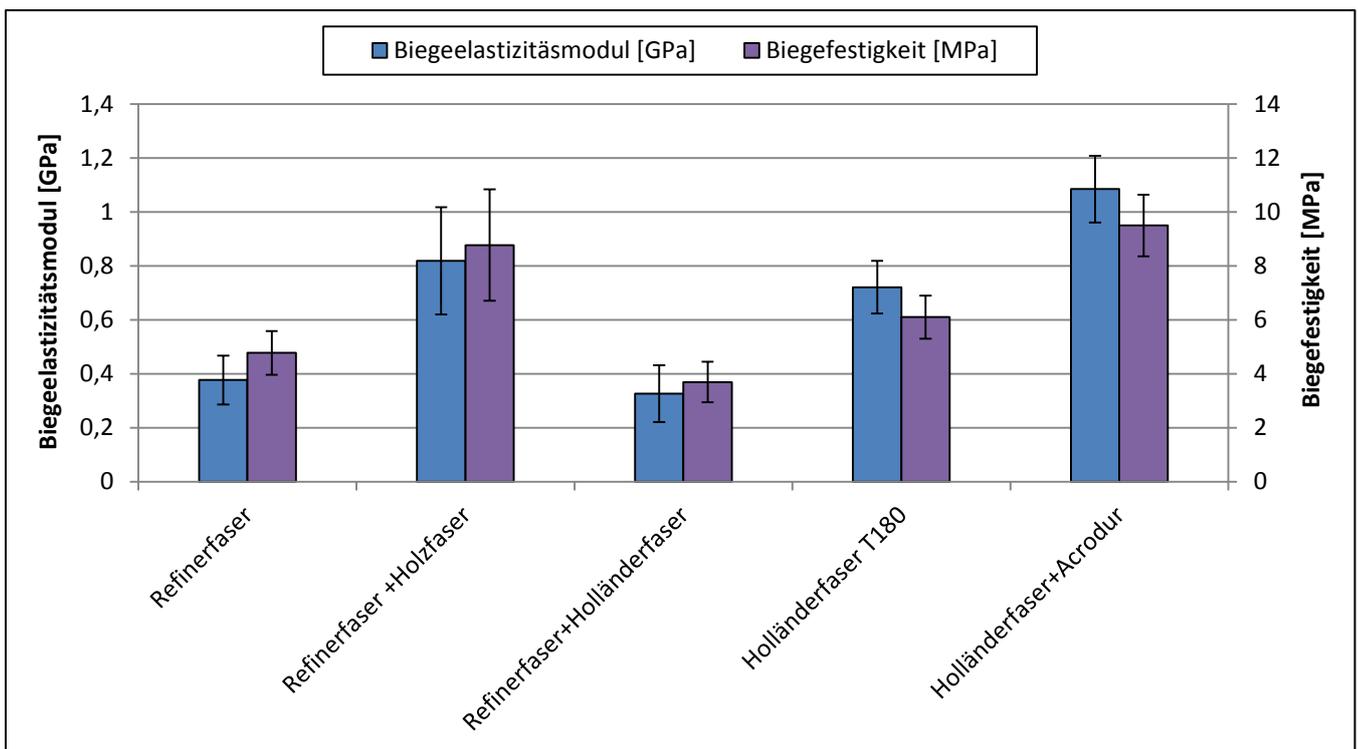


Abbildung 22: Biegeelastizitätsmodul (in GPa) und Biegefestigkeit (in MPa) der zusätzlich hergestellten Mittelharten Platten (MB) im Nassverfahren

Auch durch die erhöhte Presstemperatur ist nur ein sehr leichter Anstieg der Querkzugfestigkeit zu verzeichnen, deutlich ist jedoch die Steigerung der Festigkeit durch Zugabe von Holzfasern beziehungsweise Bindemittel (Acrodur). Ein ähnliches Verhalten der Eigenschaften ist in Abbildung 22 gezeigt. Auch hier zeigt sich nur eine geringe Verbesserungen der Biegeeigenschaften der Platte aus Refiner-Fasern. Ein Anstieg der Biegefestigkeit und des Biege-E-Moduls sind durch die erhöhte Presstemperatur, vor allem aber wiederum durch die Zugabe von Holzfasern sowie auch Bindemittel im Herstellungsprozess erkennbar.

5. DISKUSSION

5.1. Materialherstellung und Faseraufschluss

Die Herstellung und Aufbereitung des Fasermaterials für diese Arbeit funktionierte teilweise gut, obwohl der Arbeitsaufwand für diesen Verfahrensschritt hoch war. Vor allem die händische Zerkleinerung war zeitraubend, da für die Verwendung im Laborrefiner bzw. Laborholländer zusätzlich auch alle Nähte entfernt werden mussten, um eine Verstopfung zu vermeiden. Die Zerfaserung im Laborrefiner funktionierte trotzdem nicht optimal. Es konnten nur sehr geringe Materialmengen verarbeitet werden, da die Zuführschnecke sonst sehr rasch verstopfte. Zusätzlich begannen bei den hohen Temperaturen im Kocher des Refiners (160°C) die Polyesterfasern teilweise weich zu werden und zu verklumpen. Dieser Vorgang kann durch die Charakteristik der Polyesterfaser erklärt werden. Der Schmelzpunkt der Polyesterfaser ist laut Literatur bei 250-260°C (Material-Archiv 2018), allerdings liegt die Glasübergangs- oder Erweichungstemperatur, also die Temperatur bei der ein Stoff in einen weichen, elastischen Zustand übergeht, bei ca. 80°C (Fachportal Chemie.de 2018).

Der Faseraufschluss im Holländer dagegen funktionierte sehr gut, es konnte in kurzer Zeit eine akzeptable Menge verarbeitet werden. Allerdings nahm das Material im Holländer klarerweise sehr viel Wasser auf, was einen erhöhten Aufwand bei der Trocknung bedeutete. Nach der Trocknung waren die Fasern wiederum verklumpt und mussten in einem Pflugscharmischer vereinzelt werden, im Gesamten also ein sehr hoher Manipulationsaufwand für die Materialaufbereitung. Dies gilt jedoch wohlgermerkt nur für diese spezielle Verarbeitung im Labormaßstab. Auf einen industriellen Prozess umgelegt würde sich der Gesamtprozess höchstwahrscheinlich um einiges vereinfachen, vor allem unter dem Aspekt, dass im Textilrecycling bereits Reissanlagen oder andere Geräte zur Faseröffnung verwendet werden, welche die Störstoffabscheidung und auch Verarbeitbarkeit von entsprechend großen Mengen gewährleisten (Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin 2010).

5.2. Faserplattenherstellung

Im Zuge dieser Arbeit konnten aus Alttextilien sowohl im Nass- als auch im Trockenverfahren erfolgreich Faserplatten hergestellt werden.

Die größte Herausforderung war hierbei vor allem die geeigneten Parameter für den Pressvorgang zu finden. Zudem war es schwierig durch die händische Streuung in beiden Verfahren eine gleichmäßige Materialverteilung zu gewährleisten um später eine möglichst homogene Dichte über die gesamte Platte zu erreichen. Bei der Herstellung der Ultraleichten Dämmplatten im Trockenverfahren musste zusätzlich auf eine möglichst gleichmäßige Beleimung der Fasern geachtet werden, was durch ein konstantes Einsprühen des Bindemittels auf die Fasern in einer rotierenden Trommel bewerkstelligt wurde.

Bei der Herstellung der Mittelharten Platten (MB) im Nassverfahren war vor allem der hohe Wassergehalt eine Herausforderung, da durch das händische Vorverdichten der Faserkuchen nicht ausreichend entwässert werden konnte. Das Verpressen erfolgte daher in einer Blechwanne, bei welcher das austretende Wasser durch Öffnungen ablaufen konnte. Aufgrund der hohen Restfeuchte traten bei höheren Presstemperaturen in den Vorversuchen jedoch Dampfriesen in der Mitte der Platte auf. Dieses Problem entstand vor allem bei den Platten mit hohem Holzfasergehalt, weshalb die Presstemperatur auf 120°C verringert und dafür die Presszeit auf 45 Minuten verlängert wurde. Die Platten aus reinen Alttextilfasern könnten jedoch unter wesentlich höheren Temperaturen verpresst werden, die versuchsweise Herstellung einer Platte bei 180°C Presstemperatur funktionierte einwandfrei (siehe 4.5.). Dies ist wahrscheinlich auf die geringere Wasserabsorption der Textilfasern im Vergleich zu den Fichtenholzfasern zurückzuführen. Durch den vergleichsweise hohen Anteil an synthetischen Polyesterfasern (50%) wird das Wasser von den Textilfasern wesentlich schlechter aufgenommen und gebunden als von den Naturfasern (Nóbrega et al. 2010). In Verbindung mit der hohen Temperatur beim Pressvorgang führte die hohe Restfeuchte des Faserkuchens zu einer Energieentwicklung in Form von Wasserdampf und letztlich zu den Rissen bzw. Spalten in den Holzfasernplatten.

Vorversuche zeigten, dass bei Platten mit erhöhter Fasermahldauer im Holländer (90 bzw. 120 Minuten Mahldauer) vor allem sehr genau auf die händische Vorentwässerung zu achten ist. Bei zu hohem Restwassergehalt wird nämlich die oberste Schicht des Faserkuchens unter dem hohen mechanischen Druck beim Schließen der Presse teilweise hinausgedrückt und es kommt zur Bildung von Falten auf der Plattenoberfläche. Eine mögliche Erklärung dafür ist, dass durch die lange Mahldauer im Holländer die Fasern aufquellen, fibrillieren und sich ihre Oberflächeneigenschaften verändern-es bildet sich schließlich eine Art Zellstoffschleim (Schwalbe 1932; Naujock 2013).

Durch das Quellen der Fasern und die schleimige Konsistenz wird die oberste Schicht aufgrund ihrer gleitenden Eigenschaften ähnlich einem Brei teilweise von der Pressenplatte verdrängt. Genannte Probleme traten jedoch wie schon erwähnt nur unter diesen Laborbedingungen auf, bei einer Herstellung auf industrieller Ebene wären diese Probleme vor dem Hintergrund optimierter Entwässerungsanlagen und Verfahrensweisen wohl eher vermeidbar.

Eine zusätzliche Herausforderung war darüber hinaus der Zuschnitt der Materialproben für die Querkzug-beziehungsweise Biegeprüfung. Bei Zuschnitt einiger Platten aus den Vorversuchen zeigte sich, dass die Proben mit hohem Textilfaseranteil beim Schneiden mit der Kreissäge stark ausfranst und so keine saubere Kante erreicht werden konnte. Dieses Problem wurde allerdings so gelöst, dass die Platten für den Zuschnitt zwischen zwei Holzspanplatten eingespannt wurden. Dies ermöglichte einen sauberen Schnitt und folglich eine präzise Probengeometrie.

5.3. Eigenschaften der Faserplatten

5.3.1. Dichte und Wärmeleitfähigkeit

Bei Betrachtung der Ergebnisse der Dichteprüfung ist vor allem die große Streuung der einzelnen Werte über den gesamten Probenumfang auffällig. Dies ist sicherlich zu einem großen Teil auf die händische Streuung des jeweiligen Faserkuchens und die damit einhergehende inhomogene Materialverteilungen über die gesamte Platte zurückzuführen. Letztendlich wirkt sich eine ungleichmäßige Dichteverteilung über die Plattenebene auch auf die Qualität und Eigenschaften der Platte aus, jedoch lassen sich gewisse Dichteunterschiede aufgrund von Streuschwankungen auch im industriellen Herstellungsprozess nie ganz ausschließen (Dunky und Niemz 2002).

In Bezug auf die im Trockenverfahren hergestellten Ultraleichten Faserplatten ist außerdem ersichtlich, dass die Rezepturen mit geringem bzw. keinem Textilfaseranteil höhere Dichtewerte erreichen. Dies könnte möglicherweise damit zusammenhängen, dass bei den Platten mit höherem Textilfaseranteil aufgrund des hohen Polyesteranteils der Alttextilfasern (50%) eine geringere Aufnahme der Bindemittellösung stattfand (Nóbrega et al. 2010). Bei den im Nassverfahren hergestellten Mittelharten Faserplatten lässt sich kein Zusammenhang zwischen Textilfaseranteil und Dichte feststellen, jedoch ist hierbei die Streuung der einzelnen Probenergebnisse bei den Platten mit hohem Textilfaseranteil deutlich geringer als bei den Faserplatten mit verhältnismäßig hohem Holzfaserteil.

Ein möglicher Grund dafür könnte sein, dass es bei den Holzfasern zu einer stärkeren mechanischen Verzahnung der Faserstrukturen kommt und sie so nach Eingießen der Suspension in den Siebrahmen untereinander stärker zusammenhalten und verklumpen (Pecina 1993). Somit ist im Vergleich zu den Textilfasern eine gleichmäßige Faserverteilung schwerer zu bewerkstelligen.

Die Textilfasern hingegen verteilen sich besser in der Suspension und füllen aufgrund der brei- bzw. schleimartigen Konsistenz den Siebrahmen beim Eingießen gleichmäßiger aus (Naujock 2013). Wie schon mehrfach erwähnt sind diese Unterschiede wohl zum größten Teil auf den laborstabsmäßigen Herstellungsprozess zurückzuführen, bei welchem die Streuung beziehungsweise Faserkuchenbildung manuell durchgeführt werden musste.

In Bezug auf die Wärmeleitfähigkeit der Ultraleichten Faserplatten zeigen die Ergebnisse eine Abnahme der Wärmeleitfähigkeit mit zunehmendem Alttextilfaseranteil.

Laut Literatur sind Materialien mit Wärmeleitfähigkeitswerten unter $0,030 \text{ W}/(\text{m}^*\text{K})$ als „sehr gut“ zu bezeichnen. Materialien, welche Werte von $0,030$ - $0,050 \text{ W}/(\text{m}^*\text{K})$ aufweisen sind als „gut“ einzustufen (Pfundstein et al. 2007). Weisen Materialien eine Wärmeleitfähigkeit kleiner als $0,10 \text{ W}/(\text{m}^*\text{K})$, dürfen Sie laut DIN 4108 generell als Wärmedämmstoffe bezeichnet werden. Die Wärmeleitfähigkeitswerte der in dieser Arbeit verwendeten Rohstoffe sind in der Literatur mit $0,040 \text{ W}/(\text{m}^*\text{K})$ für Baumwolle, $0,035$ - $0,045 \text{ W}/(\text{m}^*\text{K})$ für Polyesterfasern und mit $0,040$ - $0,090 \text{ W}/(\text{m}^*\text{K})$ für Holzfasern angegeben (Pfundstein et al. 2007). Die im Zuge dieser Arbeit hergestellten Dämmplatten erreichten eine Wärmeleitfähigkeit von $0,0646$ - $0,0771 \text{ W}/(\text{m}^*\text{K})$, die Wärmeleitfähigkeit einer Holzwoleplatte (WW) nach DIN 13168 wird bei Pfundstein et al. (2007) mit $0,09 \text{ W}/(\text{m}^*\text{K})$ angegeben. In Bezug auf die Dämmwirkung sind die hergestellten UL-MDF-Platten also durchaus konkurrenzfähig gegenüber einem bereits etablierten Bauprodukt. Wieland et al. (2007) untersuchten die Wärmeleitfähigkeit verschiedener Dämmstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen. Dabei wurde neben Hanf-, Flachs-, und Holzfasermatten unter anderem auch eine Matte aus Altkleiderfasern geprüft. Zu der Materialzusammensetzung und Herstellung konnten leider keine Angaben gefunden werden. In Bezug auf die Wärmeleitfähigkeit wies diese Altkleidermatte jedoch bessere Werte als Cellulose-Einblasdämmstoffe, Hanf-, Flachs- und Holzfasermatten auf. Bei Betrachtung dieser Erkenntnisse lassen sich also potenzielle Anwendungsmöglichkeiten von Alttextilfasern in der Herstellung von Dämmstoffen ableiten.

5.3.2. Mechanische Eigenschaften

Bei beiden Plattentypen (Ultraleichte Faserplatte, Mittelharte Faserplatte) zeigt sich anhand der Ergebnisse ein signifikanter Einfluss des Alttextilfaseranteils auf die Querzug- und Biegeeigenschaften. Bei beiden Typen erreichte die Rezeptur ohne Textilfaser die mit Abstand höchsten Festigkeitswerte. Dies liegt an der Holzfaser, welche aufgrund ihrer chemischen Zusammensetzung und Struktur (Lignin, Hemizellulosen, Zellulose) von Natur aus sehr gute mechanische Eigenschaften mit sich bringt und welche es auch ermöglichen im Faserverbund ein stabiles Gefüge zu bilden (Gruber 2012).

Wichtiger Bestandteil ist hierbei das Lignin, welches aufgrund seiner Druckfestigkeit einerseits stark zur Erhöhung der Zellwandfestigkeit beiträgt und in verholzten Pflanzenzellen eine Stützfunktion erfüllt (Krüger 1976; Niemz et al. 2006). Andererseits ist es aufgrund seiner Vernetzungsfähigkeit unter Druck und Wärme auch ein wichtiger Faktor für die Aktivierung der Selbstbindekräfte des Holzes bei der Herstellung von Faserplatten (Dunky und Niemz 2002). Während des Nassverfahrens sind Wasserstoffbrückenbindungen, kovalente Bindungen, mechanische Verzahnung und Bindungen zwischen den Fasern Mechanismen, die zur Festigkeit führen (Pecina 1993 zitiert nach Dunky und Niemz 2002).

Hingegen bestehen die in der Arbeit verwendeten Alttextilien aus Baumwolle- und Polyesterfasern, welche ihrerseits keine festigkeitsunterstützenden Bestandteile wie das Lignin enthalten. Baumwolle enthält kein Lignin und Pektin, auch der Anteil an Hemizellulosen ist sehr gering (Gindl-Altmutter 2015). Hinzu kommt, dass die Alttextilien im Zuge ihres Produktzyklus bereits einige physikalische und chemische Prozesse (Waschen, Bleichen, Bügeln, etc.) durchlaufen haben, welche durch unterschiedlichste Einwirkungen sicherlich zur Schädigung und Schwächung der Faser beitragen (Rath 1963). Unter diesen Gesichtspunkten sind die deutlichen Nachteile der Alttextilfaser im Vergleich zur Holzfaser in Bezug auf Festigkeit nachvollziehbar.

Interessant ist jedoch wie sehr sich die Festigkeiten der reinen Alttextilfaserplatten durch längere Mahldauer im Holländer erhöhen lassen. So liegt bei einer Mahldauer von 120 Minuten der Median der Querzugfestigkeit bei $0,25 \text{ N/mm}^2$ und erreicht somit den Normwert von $0,2 \text{ N/mm}^2$ für hochbelastbare tragende Anwendungen im Trockenbereich (MBH.LA2) nach DIN 622-3. Der geforderte Normwert für allgemein tragende Anwendungen im Trockenbereich liegt bei $0,1 \text{ N/mm}^2$ und wird bereits von der Platte mit 30 Minuten Mahldauer erreicht (Median $0,11 \text{ N/mm}^2$). Mit erhöhter Mahldauer ist es also möglich, die notwendigen Festigkeiten für den Einsatz von Alttextilfaserplatten im Möbel- oder Innenausbau zu erreichen.

Durch die lange Mahldauer wird die Fibrillierung der Fasern erhöht, dadurch entstehen flexible Fasern mit hohem Bindevermögen (Naujock 2013). Generell ist dem Verfahrensschritt des Mahlprozesses ein hoher Stellenwert bei der Stoffaufbereitung beizumessen, da er einen großen Einfluss auf die fasermorphologischen und physikalischen Eigenschaften hat (Bär 2007).

Daher könnten die Optimierung der Mahldauer und deren Einfluss auf die Faser- und Papiereigenschaften Gegenstand weiterführender Untersuchungen sein.

Bezüglich der Presstemperatur lagen die mechanischen Kennwerte der Faserplatte, welche bei einer Temperatur von 180°C verpresst wurde, über jenen der bei 120°C verpressten Platten. Dies könnte möglicherweise daran liegen, dass durch die höheren Temperaturen die im Material enthaltenen Polyesterfasern mehr erweichen und so die Bindung teilweise verbessert wird. Von Interesse wäre die Entwicklung des Festigkeitsverhaltens bei noch höheren Temperaturen, vor allem da der Schmelzpunkt der Polyesterfaser mit 256°C verhältnismäßig hoch ist (Rath 1963). Zusätzlich ist aus den Ergebnissen ersichtlich, dass die Zugabe von Bindemittel (Acrodur DS 3015) zu der Fasersuspension zu einer deutlichen Verbesserung der Festigkeitseigenschaften führte.

5.4. Papierherstellung und Eigenschaften

Die Herstellung von Labor-Papierblättern aus Baumwoll-Alttextilfaser funktionierte einwandfrei. Größter Aufwand war auch in diesem Fall die Aufbereitung des Grundmaterials um es entsprechend im Labor-Holländer verarbeiten zu können. Die Zielgrammatur von 70g/m² wurde bei allen drei Rezepturen erreicht und konnte auch bei den einzelnen Proben relativ konstant gehalten werden. In Bezug auf die Berstdruckfestigkeit lässt sich feststellen, dass der Median der Proben aus Alttextil-Baumwollfaser deutlich über dem der Proben aus vorgemahlenem Birkenzellstoff liegt. Ein Grund dafür könnten die generell kürzeren Faserlängen von Laubhölzern sein, jedoch hat laut Sandermann (1988) die im Mahlvorgang erreichte Fibrillierung einen wesentlich größeren Einfluss auf die Berstfestigkeit als die Faserlängen. Bei Hadernzellstoffen (Baumwolle, Leinen, Hanf) kommt es laut Schwalbe (1932) zu einer Fibrillierung in Längsrichtung der Faser, was eine erhöhte Festigkeit bedingt. Darüber hinaus ist der Literatur zu entnehmen, dass Baumwoll- beziehungsweise Leinenfasern auch höhere Falzwiderstände als Laubholz Zellstoffe aufweisen (Austropapier 2018). Der Falzwiderstand beschreibt die Festigkeit eines Papiers bei wiederholtem Falten bis zum Bruch unter genormten Bedingungen und wird als Doppelfalzzahl angegeben. Die Doppelfalzzahlen werden wiederum stark durch Bindekräfte zwischen den Fasern beziehungsweise durch die Elastizitätsmodule der Fasern beeinflusst (Austropapier 2018).

Daher kann beim Papier auch von einer höheren naturbedingten Festigkeit des Verbundes von Baumwollfasern im Vergleich zum Birkenzellstoff ausgegangen werden. Die hohe Berstdruckfestigkeit der Papiermischung aus Baumwollfaser und Birkenzellstoff ließe sich mitunter dadurch erklären, dass die längeren Baumwollfasern im Verbund als Matrix und die kürzeren Birkenzellstofffasern unterstützend als Füllstoff fungieren. Laut Deutschle (2015) erhöht ein hoher Xylananteil im Zellstoff die Papierfestigkeit durch Brückenbindung zwischen den Zellstofffasern. Der Anteil an Xylan im Birkenholz ist mit 27,5% relativ hoch (Patt et al. 2006), also könnte dieser Effekt durchaus gegeben sein.

6. SCHLUSSFOLGERUNGEN

Im Zuge dieser Arbeit konnten Alttextilien erfolgreich aufgeschlossen und aus den einzelnen Fasern Plattenwerkstoffe und Papier hergestellt werden. Es konnte gezeigt werden, dass der Faseraufschluss grundsätzlich durch eine Verarbeitung des Alttextilmaterials in einem Refiner beziehungsweise Holländer möglich ist, wobei sich im Falle dieser Versuche das Holländerverfahren als wesentlich praktischer und effektiver erwies. Sowohl die Herstellung von Ultraleichten Faserplatten (14mm UL-MDF) im Trockenverfahren, als auch von Mittelharten Faserplatten (6mm MB) im Nassverfahren funktionierte prinzipiell sehr gut, etwaige auftretende Schwierigkeiten konnten durch Adaptierung der Herstellungsparameter (Presstemperatur, Presszeit) gelöst werden.

In Hinblick auf die mechanischen Eigenschaften wiesen die aus Alttextil hergestellten Faserplatten starke Defizite gegenüber den reinen Holzfaserplatten auf. Bei beiden Plattentypen sanken die Werte für Querkzugfestigkeit, Biegefestigkeit und Biegeelastizitätsmodul bei Zugabe eines gewissen Alttextilfaseranteils deutlich ab. Im Falle der Mittelharten Faserplatten konnte jedoch gezeigt werden, dass durch eine Erhöhung der Mahldauer im Holländer eine massive Steigerung der mechanischen Eigenschaften der jeweiligen Alttextilfaserplatten möglich ist und bei der Querkzugfestigkeit auch die mechanischen Normwerte für bestimmte Faserplattenanwendungen (MBH.LA1 bzw. MBH.LA2, allgemein tragende bzw. hochbelastbar tragende Zwecke im Trockenbereich) erreicht werden können. Positiv wirkte sich die Zugabe von Alttextilfasern auch auf die Dämmwirkung der Ultraleichten Faserplatten aus.

Die Zugabe eines gewissen Alttextilanteils bei der Herstellung von Holzfaserplatten könnte unter den richtigen Bedingungen also umgesetzt werden und birgt damit gewisse Potenziale.

Eine tatsächliche Eignung und Umsetzbarkeit müsste jedoch durch groß angelegte Versuche in industriellem Maßstab geprüft werden.

In den Versuchen zeigte sich außerdem die einwandfreie Verarbeitbarkeit von Baumwollfasern aus Alttextilien (Frottee-Handtücher) zu Papier, welches auch durchaus zufriedenstellende Werte hinsichtlich der Berstfestigkeit aufwies. Zudem konnten Alttextilfasern im Zuge dieser Arbeit auch erfolgreich zu einem Vliesmaterial weiterverarbeitet werden, für welches wiederum zahlreiche potentielle Verwendungszwecke (Fasermatten, Nonwovens, Formteile, etc.) bestehen und somit ein interessantes Themenfeld für weiterführende Untersuchungen darstellen.

Bedingt durch die wirtschaftliche Entwicklung und daraus resultierendes gesteigertes Konsumverhalten, sind die Mengen an Alttextilien in der letzten Vergangenheit stark angewachsen und werden auch nach gegenwärtigem Stand der Einschätzungen weiter steigen. Aufgrund dieser Entwicklungen wird auch der Markt für Alttextilien ökonomisch interessanter, was sich unter anderem in der Ausweitung der Sammel- und Verwertungsinfrastruktur widerspiegelt. Ebenso gilt es im Sinne der Nachhaltigkeit und Ressourceneffizienz mit diesen ansteigenden Materialmengen sinnvoll umzugehen und diese so gut wie möglich als Ressource zu nutzen, vor allem unter dem Gesichtspunkt, dass hierfür auch ökonomische Potenziale bestehen. Für die Produktion von Naturbeziehungsweise Synthetikfasern werden immense Mengen an Ressourcen eingesetzt (Wasser- und Energie, Kunstdünger). Dieser Einsatz zieht wiederum zahlreiche nachteilige Auswirkungen (Treibhausgasemissionen, Wasserverschmutzung, Landverbrauch) nach sich (Muthu 2014). Vor diesem Hintergrund sollte eine möglichst effiziente Nutzung und Verwertung von textilen Produkten und Reststoffen forciert werden. Dass die Entwicklungen bereits teilweise in diese Richtung gehen zeigen sowohl steigende Wiederverwendungs- beziehungsweise Wiederverwertungsquoten, als auch zahlreiche wissenschaftliche Untersuchungen und Patente, welche bereits zum Thema der stofflichen Nutzung von Alttextilien vorliegen.

Auch in dieser Arbeit konnten Beispiele für mögliche weiterführende Anwendungen im kaskadischen Nutzungszyklus von Alttextilien gegeben werden. Der Einsatz von textilen Reststoffen als alternativer Rohstoff ist also eine innovative Maßnahme zur Erhöhung der Ressourceneffizienz in der Bioökonomie und hilft mit, Umweltschutz, Recyclingrate und Nachhaltigkeit zu stärken. Zum Teil sind also Nachhaltigkeit, Ressourceneffizienz und Bioökonomie zumindest in diesem Bereich tatsächlich Jacke wie Hose.

Literaturverzeichnis

- ABDERRAZAK, H.; SOFIEN, B.; FATEN, F. und ABDELMAJID, J., 2016. Development and Performance Evaluation of Thermal Insulation Materials Composed of Textile Waste in Terms of Moisture Properties Resulting from Absorption and Diffusion of Humidity. *Journal of Fashion Technology and Textile Engineering*, 4:1, 2-10.
- AUSTROPAPIER-VEREINIGUNG DER ÖSTERREICHISCHEN PAPIERINDUSTRIE GEMEINSAM MIT DEM FACHVERBAND DER PAPIERINDUSTRIE, 2018. Über Papier. Lexikon der Papierindustrie-Doppelfalzzahl. Verfügbar unter: <http://www.austropapier.at/ueber-papier/lexikon/> [abgerufen am 18.01.2018]
- BACON, F.C.; HOLLAND, W.R. und BACON, J.D., 2004. Water-resistant plywood substitutes made from recycled carpets or textiles. US Patent, US20040224589 A1.
- BÄR, G., 2007. Entwicklung der Blattformation durch gezielte Mahlung und Faserstoffzusammensetzung als Voraussetzung zur Reduktion der flächenbezogenen Masse zellstoffhaltiger grafischer Papiere. PTS-Forschungsbericht.
Verfügbar unter:
https://www.ptspaper.com/fileadmin/PTS/PTSPAPER/06_Forschung/Dokumente/Forschungsprojekte/AiF_14371.pdf [abgerufen am 23.08.2017]
- BARBERO-BARRERA, M.M.; POMBO, O. und NAVACERRADA, M.Á., 2016. Textile fibre waste bindered with natural hydraulic lime. *Composites Part B: Engineering*, 94, 26-33.
- BARTL, A. und MARINI, I., 2008. Altkleiderrecycling. Beitrag 3. Abfallforschungstage 2008, Abfalltagung mit wissenschaftlichem Schwerpunkt, 4.-5. Juni 2008, Hannover.
Verfügbar unter: <http://www.wasteconsult.net/files/downloads/2008-03%20-%20Bartl%20%20Altkleiderrecycling.pdf> [abgerufen am 21.07.2017]
- BARTL, A., 2009. Recycling und Wiederverwendung von Fasern aus Abfällen. *Österreichische Wasser-und Abfallwirtschaft*, 61, 71-16.
- BARTL, A., 2011a. Textile Waste. In: Letcher, T. und Vallero, D., Hrsg. *Waste: A Handbook for Management*. Academic Press, 167-180.

- BARTL, A., 2011b. Wissenschaftliche Untersuchungen zur stofflichen Verwertung der textilen Restfraktion durch mechanische Verfahrensschritte und Entwicklung eines geschlossenen Gesamtkreislaufes. In: Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, Hrsg. Schriftenreihe Berichte aus Energie und Umweltforschung, 06/2011.
- BAUMANN, W. und HERBERG-LIEDTKE, B., 1994. Papierherstellung und Papierveredelung. In: Papierchemikalien. Heidelberg: Springer Verlag, 55-98.
- BOSSHARD, H.H., 1975. Holzkunde: Band 3: Aspekte der Holzbearbeitung und Holzverwertung. Basel: Springer Verlag.
- BUNDESANSTALT FÜR ARBEITSSCHUTZ UND ARBEITSMEDIZIN, 2010. Handlungsanleitung zur guten Arbeitspraxis, Textilrecycling – Tätigkeiten mit Gefahrstoffen und biologischen Arbeitsstoffen beim Recycling von Textilabfällen. 2., überarbeitete Auflage. Dortmund. Verfügbar unter:
<https://www.baua.de/DE/Angebote/Publicationen/Kooperation/Textilrecycling.html?blob=publicationFile> [abgerufen am 30.08.2017]
- BUNDESMINISTERIUM FÜR LAND-UND FORSTWIRTSCHAFT, UMWELT UND WASSERWIRTSCHAFT, 2017. Bundes-Abfallwirtschaftsplan 2001, 2011 und 2017. Verfügbar unter: <https://www.bmlfuw.gv.at/greentec/bundes-abfallwirtschaftsplan.html> [abgerufen am 04.03.2017]
- COATES, M.W.; KIERZKOWSKI, M.H.; GIBBONS, P.J. und EIDEN, A.J., 2011. Nonwoven textile made from short fibers. Europäisches Patent, EP 2370623 A1.
- CORDES, A.; BEDARFF, I.; HEINDL, U. und KREUDER, G., 2000. Herstellung von Produkten aus Altschuhen, -leder und -textilien. Deutsches Patent, DE 19849608 A1.
- COWAN, J.C. und THRASH, T., 1982. Method of recovering polyester fibers and cellulosic powder from polyester/cotton textile waste. US Patent, US4345039 A.
- DAVE, M. und BINDER, T., 2009. Method for recycling used clothes and domestic textile. Internationales Patent, WO 2009148302 A1.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG, 2004. DIN EN 622-3:2004-07. Faserplatten - Anforderungen - Teil 3: Anforderungen an mittelharte Platten; Deutsche Fassung EN 622-3:2004. Berlin: Beuth Verlag.

DOMENIG, M., 2001. Nicht gefährliche Abfälle in Österreich, Materialien zum Bundes-Abfallwirtschaftsplan 2001. Umweltbundesamt. Monographie, Bd. M-140.

DÖRN, K., 2014. Geschäft mit Altkleidern: Eine Tonne bringt 400 Euro. In: Thüringische Landeszeitung online, 02.06.2014.

Verfügbar unter: <http://www.tlz.de/web/zgt/suche/detail/-/specific/Geschaeft-mit-Altkleidern-Eine-Tonne-bringt-400-Euro-584839415> [abgerufen am 22.11.2017]

DUNKY, M.; NIEMZ, P., 2002. Holzwerkstoffe und Leime: Technologie und Einflussfaktoren. Heidelberg: Springer Verlag.

ELGES, W., 1996a. Verfahren zum Recyceln von Textilfaserprodukten und Herstellung von Dämmwolle zur Wärmedämmung an Dächern und Fassaden mittels Blasversatzverfahren. Deutsches Patent, DE 4436337 A1.

ELGES, W., 1996b. Verfahren zum Recyceln von Naturtextilfaserprodukten und zur Herstellung von Speichertextilstreu als Ersatzstoff für Ton zur Wasser- und Nährstoffspeicherung in Kulturerden. Deutsches Patent, DE4432613 A1.

EUROPÄISCHE UNION, 2017. Richtlinie 2008/98/EG über Abfälle, Richtlinie 2008/98/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 19. November 2008, Amtsblatt der Europäischen Union. Verfügbar unter:

<http://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=LEGISSUM:ev0010> [abgerufen am 10.09.2017]

FACHPORTAL CHEMIE.DE, 2018. Lexikon: Polyethylenterephthalat.

Verfügbar unter: <http://www.chemie.de/lexikon/Polyethylenterephthalat.html> [abgerufen am 14.09.2018]

FAIRWERTUNG, 2015. Rund um den Globus gefragt - Thesen zum Export von Secondhand-Kleidung. Altkleider-Blog, 01.06.2015. Verfügbar unter:

<https://www.fairwertung.de/blog/blog.8/index.html> [abgerufen am 12.10.2017]

- FRICKE, K.; BAHR, T.; THIEL, T. und KUGELSTADT, O., 2008. Ressourceneffizientes Handeln in der Abfallwirtschaft, Energie aus Abfall-, Biomasse- und Ersatzbrennstoffverwertung. 69. Symposium des ANS e.V. Göttingen, 16. und 17. September 2008. Hrsg.: Arbeitskreis für die Nutzbarmachung von Siedlungsabfällen e.V., Weimar.
- GINDL-ALTMUTTER, W., 2015. Vorlesungsunterlagen zur VO Naturfaserrohstoffe. Universität für Bodenkultur Wien.
- GRIFFITH, R.E. und GRIFFITH, S.T., 2001. Fibre reinforced thermoplastic composite. Internationales Patent, WO 2001032405 A1.
- GRUBER, E., 2011. Pflanzenaufschluss (Grundlagen der Zellstoffherstellung). Duale Hochschule BW, 5. Verfügbar unter:
<http://www.gruberscript.net/05Holzzusammensetzung.pdf> [abgerufen am 10.09.2018]
- GU, Y., 2008. Textilrecycling in Deutschland. Studienarbeit im Auftrag des Bundesverbands für Sekundärrohstoffe und Entsorgung e.V.. Institut für Aufbereitung und Recycling, RWTH-Aachen.
- GULICH, P., 2009. Textile waste management in Germany & developments in textile recycling technology. Vortrag im Rahmen des T-Pot Workshop Technical Textiles & Textile Recycling, Chemnitz, 30.11- 04.12.2009. Verfügbar unter:
http://www.t-pot.eu/docs/Workshops/STFI_09_Gulich_Recycling0212.pdf [abgerufen am 04.06.2017]
- HASENKAMP, P., 2013. Der Streit um die Altkleider. Müll und Abfall- Fachzeitschrift für Abfall- und Ressourcenwirtschaft, 11, 565.
- HEMERSAM, R., 1976. Lightweight fibre-board contg. organic textile fibre flocks - and mechanical wood pulp with water glass binder, improving strength. Deutsches Patent, DE2533007A1.
- HOLZFORSCHUNG AUSTRIA, 2017. Katalog geprüfte/zugelassene Baustoffe, Mitteldichte Faserplatte. Verfügbar unter:
<https://www.dataholz.eu/baustoffe/faserwerkstoffe/mitteldichte-faserplatte.htm>
[abgerufen am 03.01.2018]

- HUANG, Y.; GUOHUA, J. und WENQI, Z., 2015. Waste fiber textile recycling method. Chinesisches Patent, CN 105014824 A.
- HUBER, B. und STEIN, G., 1995. Verfahren zur Verwertung von Reststoffen enthaltend cellulosische Fasern und aus synthetischen Polymeren. Deutsches Patent, DE4333547 A1.
- HUMANANOVA, 2017. Columns-Textile recycling information sheet. Verfügbar unter: <http://www.humananova.org/en/columns/0/5/textile-recycling-information-sheet/> [abgerufen am 02.08.2017]
- JIXING, P., 1989. Die Erfindung und Entwicklung der Papierherstellung. In: Wissenschaft und Technik im alten Chin , 167-173. Basel: Birkhäuser Verlag.
- KOLLMANN, F., 1955. Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe: Band 2: Holzschutz, Oberflächenbehandlung, Trocknung und Dämpfen, Veredelung, Holzwerkstoffe, spanabhebende und spanlose Holzbearbeitung, Holzverbindungen. 2. Auflage. Berlin-Heidelberg: Springer Verlag.
- KOROLKOW, J., 2015. Konsum, Bedarf und Wiederverwendung von Bekleidung und Textilien in Deutschland. Studienarbeit im Auftrag des Bundesverbands für Sekundärrohstoffe und Entsorgung e.V.. Institut für Aufbereitung und Recycling, RWTH-Aachen. Verfügbar unter: https://www.bvse.de/images/pdf/Leitfaeden-Broschueren/150914_Textilstudie_2015.pdf [abgerufen am 03.02.2017]
- KREISLAUFWIRTSCHAFTSGESETZ vom 24. Februar. 2012. Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen (Kreislaufwirtschaftsgesetz - KrWG). Verfügbar unter: <https://www.gesetze-im-internet.de/krwg/KrWG.pdf> [abgerufen am 25.08.2017]
- KRÜGER, G., 1976. Lignin – seine Bedeutung und Biogenese. Chemie in unserer Zeit 10, 1, 21-29.
- LAROCHE, R. und MOREL, A., 1996. Tearing, defibrillating machine for the recycling of textile materials. Europäisches Patent , EP 0740001 A1.

LEITHNER, R.; TAMASI, L. und ENDRES, G., 2001. Zusammenfassender Abschlussbericht über das Verbundprojekt: Integrierter Umweltschutz in der Textilindustrie - Teilvorhaben 1: Betriebsintegrierte, umweltfreundliche Verwertung von Textilstäuben unter Nutzung ihres Wärmeinhalts. Verfügbar unter:

<http://www.cleaner-production.de/fileadmin/assets/29407 - Abschlussbericht.pdf>

[abgerufen am 15.12.2017]

LENZING AG, Weltfasermarkt 2016.

Verfügbar unter: <http://www.lenzing.com/investoren/equity-story/weltfasermarkt.html>

[abgerufen am 05.01.2018]

LOTTNER, U., 2013. Gebrauchte Kleidung mit Haustextilien in Bayern- Situationsbeschreibung und Ausblick. Bayerisches Landesamt für Umwelt, Hrsg.

LUNDAHL, A.; FANGUEIRO, R.; SOUTINHO, F. und DUARTE, F., 2010. Waste Fibre Reinforced Ecocomposites. Materials Science Forum, 636-637, 1415-1420.

MATERIAL ARCHIV Bildungsnetzwerk, 2018. Polyesterfasern. Verfügbar unter:

<http://www.materialarchiv.ch/#/detail/553/polyesterfasern> [abgerufen am 13.09.2018]

MAYER, H., 2013. T-Shirts, Jeans und Blusen: So viel Wasser steckt in unserer Kleidung. In: Statistisches Bundesamt, Hrsg. STATmagazin: Umwelt 06/2013.

Verfügbar unter:

https://www.destatis.de/DE/Publikationen/STATmagazin/Umwelt/2013_06/UGR2013_06.html [abgerufen am 24.10.2017]

MILDING, E.; HOLM, U. und LAMMERS, G., 1996. Nonwoven material comprising a certain proportion of recycled fibres originating from nonwoven and/or textile waste. Internationales Patent, WO 1996006222 A1.

MOREL, A., 1984. Shredding machine for recycling textile fibers and method. US Patent, US 4484377 A.

MURRAY, J.J.; FROST, J.D. und WANG, Y., 2000. Behavior of a sandy silt reinforced with discontinuous recycled fiber inclusions. Transportation Research Record, 1714, 9-17.

- MUTHU, S.S., 2014. Assessing the Environmental Impact of Textiles and the Clothing Supply Chain. Woodhead Publishing.
- NAUJOCK, H.J., 2013. Aufbereitung der Faserstoffe (Halbstoffe). In: Blechschmidt, J., Hrsg. Taschenbuch der Papiertechnik. Leipzig: Carl Hanser Verlag.
- NIEMZ, P.; BAUM, S.; JUNGHANS, K.; BÄCHLE, F. und SONDEREGGER, W., 2006. Holzphysik (Skript zur Vorlesung). ETH Zürich Research Collection.
- N.N., 2016. Was Second-Hand-Kleidung für Afrika bedeutet. In: Wiener Zeitung Online, 01.08.2016. Verfügbar unter:
http://www.wienerzeitung.at/nachrichten/wirtschaft/international/835163_Was-Altkleider-fuer-Afrikas-Wirtschaft-bedeutet.html [abgerufen am 13.10.2017]
- NÓBREGA, M. M. S.; CAVALCANTI, W. S.; CARVALHO, L. H. und DE LIMA, A. G. B., 2010. Wasseraufnahme in ungesättigten Polyester-Verbundwerkstoffen verstärkt mit Caroo-Fasergewebe: Modellierung und Simulation. Materialwissenschaft und Werkstofftechnik, 41, 300-305.
- ÖPULA, 2018. Kleidersammlung - Fragen & Antworten. ÖPULA Rohstoff-Recycling Ges.m.b.H., Groß-Enzersdorf.
Verfügbar in: <http://www.oepula.at/index.php/kleidersammlung/fragen-antworten> [abgerufen am 14.09.2018]
- PATT, R., KORDSACHIA, O. und FEHR, J., 2006. European hardwoods versus Eucalyptus globulus as a raw material for pulping. Wood Science and Technology 40, 1, 39-48.
- PECINA, H., 1993. Betrachtungen über natürliche Faserbindungen und ihre Beeinflussbarkeit – ein Überblick. Holzforschung und Holzverwertung, 45, 69-72.
- PETER, M., 2012. Altkleidersammlung-ein gemeinwohlorientiertes Angebot zur vollständigen Verwendung und Verwertung. In: Urban, A. und Halm, G., Hrsg. Herausforderungen an eine neue Kreislaufwirtschaft. Schriftenreihe des Fachgebietes Abfalltechnik, Universität Kassel. Kassel University Press GmbH, 49-62.
- PFUNDSTEIN, M.; GELLERT, R.; SPITZNER M.H. und RUDOLPHI, A., 2007. Dämmstoffe: Grundlagen, Materialien, Anwendungen. Berlin: Walter de Gruyter Verlag.

RATH, H., 1963. Lehrbuch der Textilchemie: einschl. der textil-chemischen Technologie. Zweite neubearbeitete Auflage. Berlin-Heidelberg: Springer Verlag.

ROWE, R.G., 2000. Textile recycling machine. US Patent, US 6061876 A.

SANDER, P., 2015. Altkleider als Abfall? Verfügbar unter:

<https://www.umweltrechtsblog.at/blog/blogdetail.html?newsID={5381423C-60B9-11E7-9671-08606E681761}> [abgerufen am 30.10.2017]

SANDERMANN, W., 1988. Die Kulturgeschichte des Papiers. Berlin-Heidelberg: Springer Verlag.

SCHWALBE, C.G., 1932. Papier. In: Liesegang, R.E., Hrsg. Kolloidchemische Technologie: Ein Handbuch kolloidchemischer Betrachtungsweise in der chemischen Industrie und Technik. Berlin-Heidelberg: Springer Verlag, 210-237.

SPATT, M., 2001. Werkstoffportrait Holzwerkstoffe, Serie 3. Teil. Zuschnitt Zeitschrift über Holz als Werkstoff und Werke in Holz, 4, 28-29.

STATISTISCHES BUNDESAMT, 2017. Aufkommen an Haushaltsabfällen: Deutschland, Jahre, Abfallarten.

Verfügbar unter: <https://www-genesis.destatis.de/genesis/online/data> [abgerufen am 03.04.2017]

SVEHLA, J. und WINTER, B., 2013. Stand der Technik von Anlagen der Span- und Faserplattenindustrie, Beschreibung von Anlagen in Österreich und Luxemburg. Report REP-0438. Umweltbundesamt, Wien.

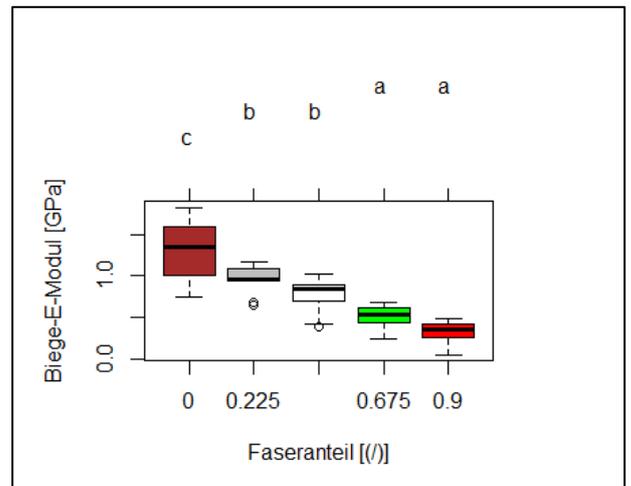
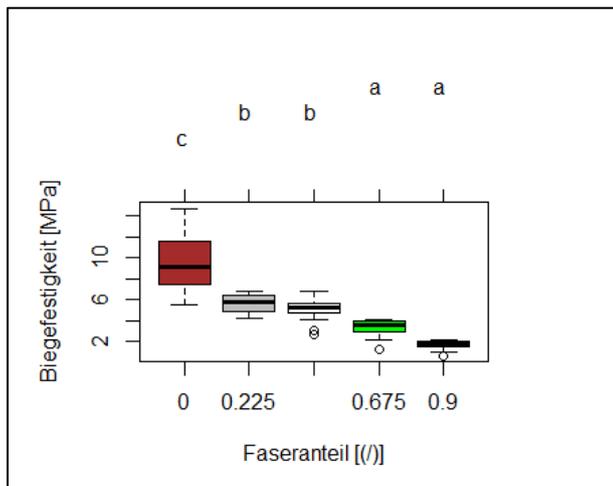
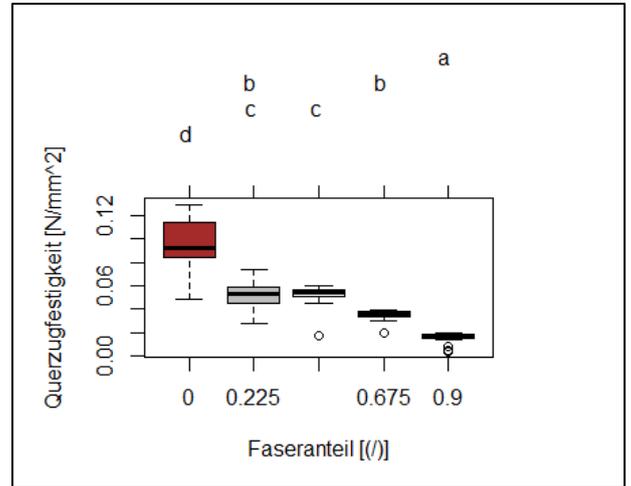
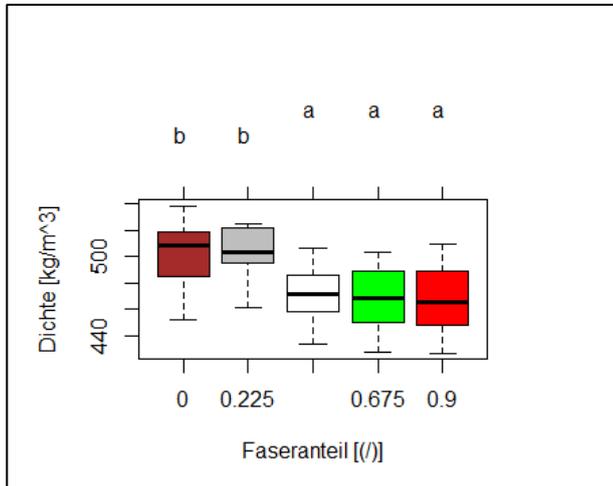
WANG, Y., 2006. Utilization of Recycled Carpet Waste Fibers for Reinforcement of Concrete and Soil. In: Wang, Y., Hrsg. Recycling in Textiles. Cambridge: Woodhead Publishing Ltd.

WIELAND, H.; MÖLLER, F. und BOCKISCH, F.J., 2007. Wärmetechnische und technologische Aspekte von Dämm- und Werkstoffen aus nachwachsenden Rohstoffen. Landbauforschung Völkenrode 1, 57, 87-93.

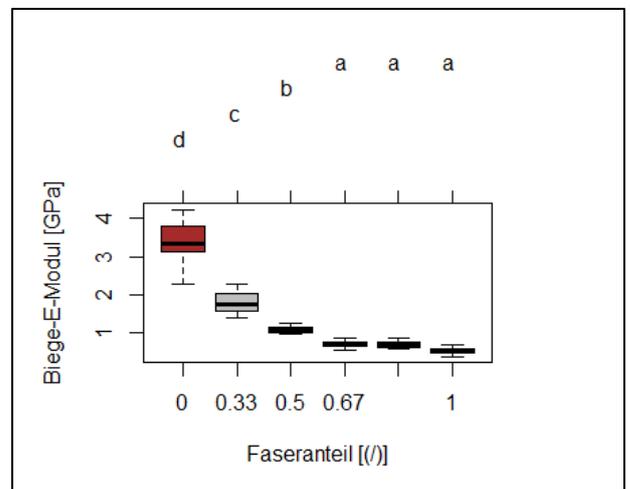
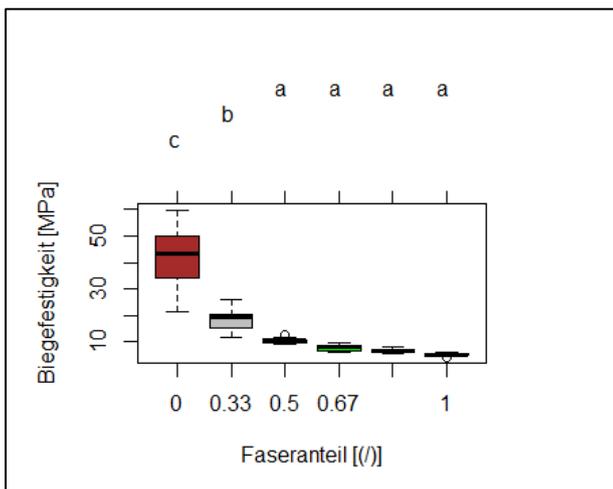
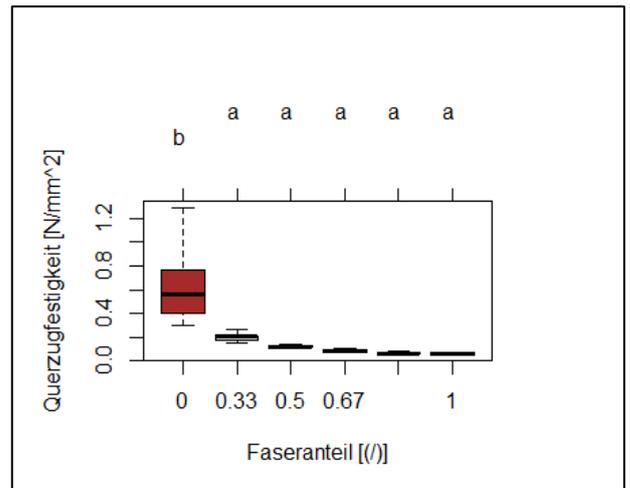
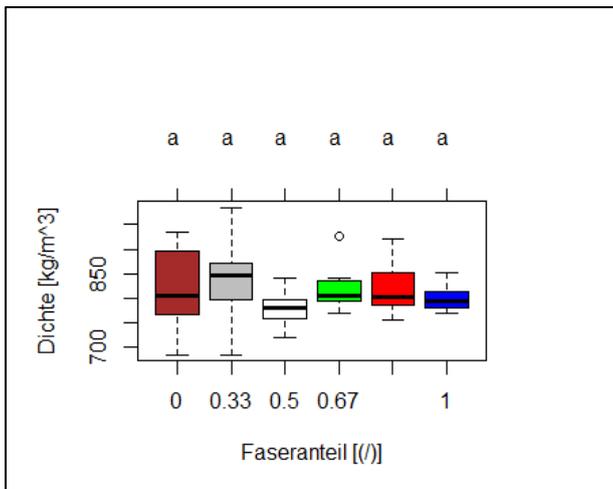
Anhang

Tukey Test-(Multipler Mittelwertvergleich)

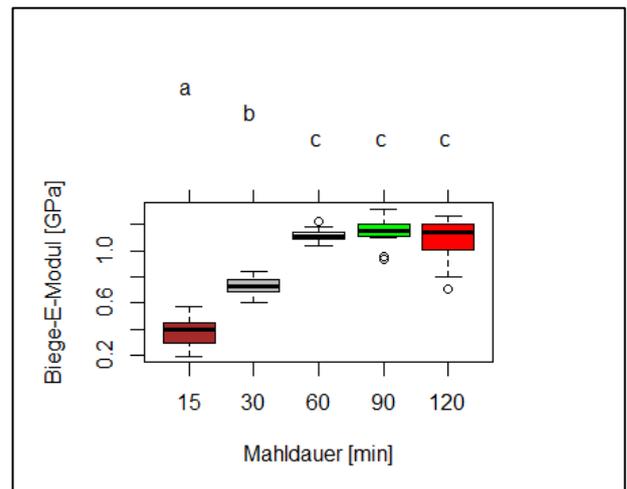
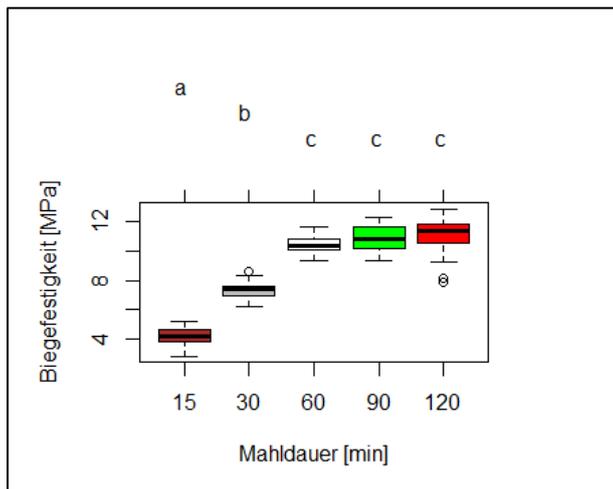
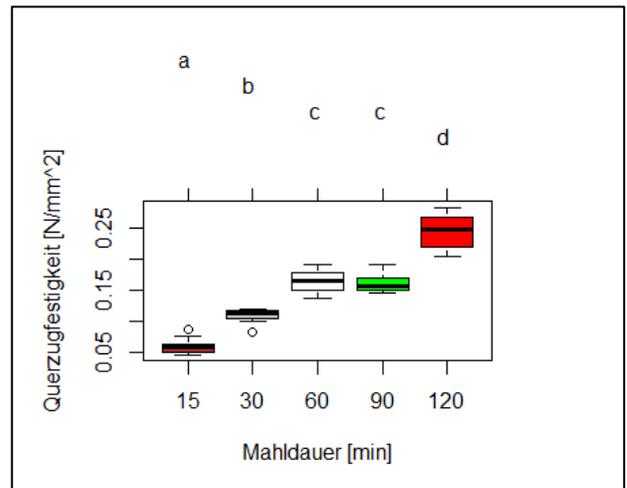
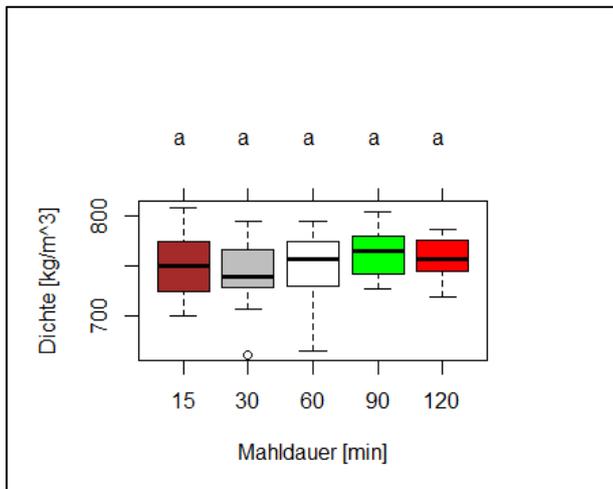
A1: UL-MDF im Trockenverfahren



A2: Mittelharte Faserplatte im Nassverfahren (MB)



A3: Mittelharten Faserplatten (MB) mit unterschiedlicher Mahldauer



A4: „Handsheets“ Papier aus Baumwoll-Alttextilien

