

Schlussbericht

zum Vorhaben

Thema:

Recycling von Spanholzwerkstoffen

TV1: Entwicklung einer Recyclingformulierung und Fertigung für Holzspan- und Holzfaserwerkstoffe

TV2: Trennung von Mehrstoffsystemen und Entwicklung eines Recyclingverfahrens für Holzspan- und Holzfaserwerkstoffe

TV3: Herstellung von Demonstratoren aus recycelten Holzspan- und Holzfaserwerkstoffe für modulare Designanwendungen

TV4: Konzeption eines Trennverfahrens von Sperrmüllholzabfällen für das Recycling von Spanholzwerkstoffen

Akronym:

ReSpan

Zuwendungsempfänger:

Teilvorhaben 1: Fraunhofer Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung e.V., Fraunhofer-Institut für angewandte Polymerforschung IAP

Teilvorhaben 2: Hochschule für nachhaltige Entwicklung Eberswalde

Teilvorhaben 3: System 180 GmbH

Teilvorhaben 4: PreZero Holz GmbH

Förderkennzeichen:

Teilvorhaben 1: 2220HV043A

Teilvorhaben 2: 2220HV043B

Teilvorhaben 3: 2220HV043C

Teilvorhaben 4: 2220HV043D

Laufzeit:

01.06.2021 - 31.12.2024

Monat der Erstellung:

03/2025

Veröffentlichung:

25.06.2025

Inhaltsverzeichnis

I.	Kurzbericht.....	4
1.	Aufgabenstellung.....	4
2.	Planung und Ablauf des Vorhabens.....	4
3.	Resümee der wesentlichen Ergebnisse.....	5
a)	Arbeitspakete und Meilensteine.....	5
b)	Zusammenfassung	6
II.	Ausführliche Darstellung der Ergebnisse.....	7
1.	Erzielte Ergebnisse	7
	Arbeitspaket 1: Benchmarkmaterialien und Lastenheft.....	7
	Arbeitspaket 2: Abbauprozess und Aufreinigung	14
	Arbeitspaket 3: Entwicklung des Fertigungsverfahrens	21
	Arbeitspaket 4: Trennung von Mehrstoffsystemen.....	33
	Arbeitspaket 5: Demonstratorherstellung und -prüfung	43
2.	Verwertung	48
a)	Erfindungen/Schutzrechtsanmeldungen.....	48
b)	Wirtschaftliche Erfolgsaussichten nach Projektende	48
c)	Wissenschaftliche und/oder technische Erfolgsaussichten nach Projektende	51
d)	Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit	52
e)	Stand der Erreichung der in der Vorhabenbeschreibung aufgeführten Verwertungsoptionen, Forschungsdaten	52
3.	Erkenntnisse von Dritten	56
4.	Veröffentlichungen	56
ANHANG	57	
	Teilvorhaben 1: Fraunhofer IAP / Forschungsbereich PYCO (2220HV043A)	57
1.	Ziel und Gegenstand des Teilvorhabens	57
2.	Bearbeitete Arbeitspakete	57
	Arbeitspaket 1: Benchmarkmaterialien und Lastenheft	57
	Arbeitspaket 2: Abbauprozess und Aufreinigung	57
	Arbeitspaket 3: Entwicklung des Fertigungsverfahrens	57
	Arbeitspaket 4: Trennung von Mehrstoffsystemen	57
	Arbeitspaket 5: Demonstratorherstellung und –prüfung	57
3.	Wesentliche Ergebnisse des Teilvorhabens	57
	Teilvorhaben 2: Hochschule für nachhaltige Entwicklung Eberswalde (2220HV043B).....	61
1.	Ziel und Gegenstand des Teilvorhabens	61
2.	Bearbeitete Arbeitspakete	61
	Arbeitspaket 1: Benchmarkmaterialien und Lastenheft	61
	Arbeitspaket 2: Abbauprozess und Aufreinigung	61
	Arbeitspaket 3: Entwicklung des Fertigungsverfahrens	61
	Arbeitspaket 4: Trennung von Mehrstoffsystemen	61
	Arbeitspaket 5: Demonstratorherstellung und -prüfung	61
3.	Wesentliche Ergebnisse des Teilvorhabens	61

Teilvorhaben 3: System 180 GmbH (2220HV043C).....	64
1. Ziel und Gegenstand des Teilvorhabens	64
2. Bearbeitete Arbeitspakete.....	64
Arbeitspaket 1: Benchmarkmaterialien und Lastenheft	64
Arbeitspaket 3: Entwicklung des Fertigungsverfahrens.....	64
Arbeitspaket 5: Demonstratorherstellung und -prüfung.....	64
3. Wesentliche Ergebnisse des Teilvorhabens.....	64
Teilvorhaben 4: PreZero Holz GmbH (2220HV043D).....	67
1. Ziel und Gegenstand des Teilvorhabens	67
2. Bearbeitete Arbeitspakete.....	67
Arbeitspaket 3: Entwicklung des Fertigungsverfahrens.....	67
Arbeitspaket 4: Trennung von Mehrstoffsystemen	67
Arbeitspaket 5: Demonstratorherstellung und -prüfung.....	67
3. Wesentliche Ergebnisse des Teilvorhabens.....	67

I. Kurzbericht

1. Aufgabenstellung

Holzspan- und Holzfaserwerkstoffe, wie Span- und MDF (medium density fiber) Platten, gehören zu den wichtigsten Holzwerkstoffen. Die Verwendung von Span- und MDF-Platten anstelle von Vollholz bietet viele Vorteile. Dies macht Holzspan- und Holzfaserwerkstoffe im Allgemeinen zu besonders ressourcenschonenden Werkstoffen. Ein Nachteil ist, dass im Falle von nicht mehr benötigten bzw. beschädigten Holzspan- und Holzfaserwerkstoffen, abgesehen von der thermischen, bisher kaum eine sinnvolle Nachnutzung zur Verfügung steht. Ziel dieses Vorhabens ist es daher, ein Recyclingverfahren für Holzwerkstoffe, im Besonderen für MDF, OSB, Flachpressplatten und Palettenklötze, zu entwickeln.

Diese Werkstoffe bestehen aus einer Holz- und einer Bindemittelkomponente. Bei der Holzkomponente handelt es sich, je nach Werkstoff, um Holzspäne bzw. Holzfasern. Bei der Bindemittelkomponente handelt es sich um synthetische Harze, welche während der Herstellung der Platten zu einem duromeren Kunststoff ausgehärtet werden und ein formstabiler Werkstoff gebildet wird. Dies geschieht während des Pressvorganges thermisch.

Dieses Projekt hat als Ziel, ein Recyclingverfahren zu entwickeln, welches nicht nur Teile, sondern alle Bestandteile der Werkstoffe einer Nachnutzung zuführt. Hierfür ist die schonende Auflösung der Werkstoffe ohne Schädigung der Holzfasern von besonderer Bedeutung. Um dies zu erreichen, wird die chemische Struktur des duromeren Kunststoffs gezielt mit einem geeignetem Recyclingagenz aufgebrochen, welches die Auflösung des Werkstoffverbundes bewirkt. Es soll eine Recyclingformulierung entwickelt werden, welche das in den Werkstoffen enthaltene Duromer nicht vollständig abbaut, sondern dieses in oligomere Teile spaltet, welche näherungsweise einem Harz vor der Aushärtung entsprechen. Die aus dem Zersetzungsprozess erhaltene Recyclingmasse, bestehend aus der Holzkomponente und dem abgebauten Harz soll anschließend in einem weiteren Schritt zu neuen Holzspan- und Holzfaserwerkstoffen verpresst werden. Hierbei sollen idealerweise keine weiteren Bestandteile wie zum Beispiel neue Späne oder neues Harz zugegeben werden, so dass eine vollständige Wiederverwendung möglich wird.

Im Rahmen des Projektes sollen für MDF, OSB, Flachpressplatten und Palettenklötze, optimierte Recyclingformulierungen gefunden werden, welche in unterschiedlichen Fertigungsverfahren zu neuen Werkstoffen verarbeitet werden. Dabei werden die Verfahren dahingehend optimiert, dass aus den unterschiedlichen Recyclingmassen mechanisch hochwertige Werkstoffe erhalten werden.

Ein Großteil der Holzspanwerkstoff- oder -faserplatten wird nach der Herstellung weiteren Verarbeitungsschritten unterzogen, um daraus beispielsweise Möbeloberflächen, Fensterbretter oder Laminatfußböden herzustellen, bei denen Oberflächen der Holzfaser- oder -spanplatten mit Laminaten aus Papier und vorzugsweisen Melaminharzen beschichtet werden. Dies könnten ebenso wie Färbemittel Störstoffe für den zu erforschenden Recyclingprozess sein. Um die Wiederverwendbarkeit der Späne und Partikel zu gewährleisten, muss das Verfahren in der Lage sein, diese Beschichtungen und Störstoffe auszufiltern oder eventuell im Fall von Färbemitteln den Auflösungsprozess von durchgefärbter MDF vom nächsten Durchgang mit beispielsweise Spanplatten zu separieren.

Zudem ist eine Separierung von Spänen in einzelne Fraktionen erforderlich, wenn die Zuordnung in Spanfraktionen für die anschließende Herstellung von Plattenwerkstoffen mit definierten mechanischen Eigenschaften gewünscht ist. Hierauf kann nur verzichtet werden, wenn die Spanform und -größe unerheblich für den nachfolgenden Produktionsprozess sind. Die Herausforderung, die Späne und Partikel der Wiederverwendung zugänglich zu machen, wird insgesamt durch Beschichtungen oder Färbemittel erschwert. Insofern sollte ein Trennverfahren gefunden werden, dass nicht nur unterschiedliche Partikelgeometrien, sondern auch Beschichtungen und Inhaltsstoffe voneinander zu trennen vermag.

Zudem müssen die Materialien, die aus recycelten Werkstoffen neu hergestellt werden, möglichst das Eigenschaftsprofil wie die Ausgangsstoffe innehaben und sich entsprechend weiterverarbeiten lassen.

2. Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Vorhaben wurde entsprechend des in der Planung vorgegeben Ablaufplans durchgeführt. Aufgrund von Fragestellungen/Thematiken, die im Zuge der Projektbearbeitung unvorhersehbar auftraten, erfolgte eine kostenneutrale Verlängerung des Projektes um 13 Monate. Mit der Verlängerung ergab sich folgender Meilensteinplan für das Gesamtprojekt:



Bild 1: angepasster Meilensteinplan

3. Resümee der wesentlichen Ergebnisse

a) Arbeitspakete und Meilensteine

Arbeitspakete (AP) (lt. Planung im Antrag)	Bearbeitungszeitraum (lt. Balkenplan im Antrag)	Zielerreichung
AP 1 - Benchmarkmaterialien und Lastenheft	06/2021 bis 09/2021	Das Arbeitspaket wurde abgeschlossen. Die Anforderungen an die recycelten Span- und Faserwerkstoffe wurden im Lastenheft zusammengetragen, Benchmarkwerkstoffe wurden festgelegt.
AP 2 - Abbauprozess und Aufreinigung	08/2021 bis 05/2024	Verschiedene Solvolyse-Reagenzien wurden hinsichtlich ihrer Wirkung getestet. Dabei konnte die Auswahl zunächst auf drei Reagenzien und schließlich auf ein Reagenz reduziert werden. Mit diesem Reagenz wurden Laborversuche sowie Technikumsversuche durchgeführt. Es konnte Solvolyse-Recycling an Palettenklötzen, Spanplatten sowie an OSB und MDF-Materialien realisiert werden. Sehr umfangreich wurde an dieser Stelle der Spanholzwerkstoff und dessen Recyclingprozess betrachtet. An dem Material erfolgten zudem Arbeiten zur großtechnischen Umsetzung, wobei Schwierigkeiten beim Upscaling auftraten, die näher untersucht und bewertet wurden.
AP 3 - Entwicklung des Fertigungsverfahrens	11/2021 bis 06/2025	Anhand der durchgeführten Untersuchungen konnte exemplarisch der komplette Recyclingprozess im Labormaßstab für alle betrachteten Holzwerkstoffe abgebildet werden. Eine Beurteilung dessen fand anhand von mechanischen Tests an den gefertigten Bauteilen aus recyceltem Material statt. Folglich wurden verschiedene Fertigungsverfahren recherchiert und im Laborversuch umgesetzt. Es fand eine Optimierung der Prozesse mit der dazugehörigen Werkzeugfertigung und Maschineneinrichtung statt.
AP 4 - Trennung von Mehrstoffsystemen	03/2021 bis 02/2025	Es wurden Untersuchungen zur Trennung und Aufreinigung von beschichteten Holzwerkstoffen und Verbundmaterialien durchgeführt und im Anschluss ein entsprechendes Anlagenkonzept erarbeiten sowie die Wirtschaftlichkeit betrachtet.
AP 5 - Demonstratorherstellung und -prüfung	08/2022 bis 12/2024	Im Konsortium wurde ein Demonstrator diskutiert und festgelegt. Zudem erfolgten die Organisation und Besprechung der Fertigung. Aufgrund von Komplikationen musste eine Überarbeitung des Demonstratorkonzeptes innerhalb des Projektes iterativ erfolgen. Es wurde ein Regalsystem ausgewählt und gefertigt.

Meilensteine (M) (lt. Planung im Antrag)	Fälligkeit (lt. Balkenplan im Antrag)	Zielerreichung
M 1 - Festlegung der Benchmarkmaterialien und des Lastenhefts	09/2021	Der Meilenstein wurde planmäßig erreicht.
M 2 - Festlegung der Recyclingformulierung	04/2023	Die Festlegung der Recyclingagentur erfolgte vorfristig (11/2022), folglich wurde der Meilenstein erlangt.
M 3 - Optimierung der Fertigungsverfahren abgeschlossen	06/2024	Der Meilenstein wurde gegenüber der ursprünglichen Planung verschoben und wurde dann aufgrund der kostenneutralen Verlängerung vollständig absolviert.
M 4 - Trennvorrichtung im Labormaßstab erfolgreich abgeschlossen	08/2023	Der Meilenstein wurde zeitversetzt vollständig erreicht.
M 5 - Erfolgreich hergestellte Demonstratoren vollständig geprüft	12/2025	Es konnte die Herstellung und Prüfung eines Demonstrators vollständig umgesetzt werden. Der Meilenstein wurde erlangt.

b) Zusammenfassung

Im Verlaufe der Projektdurchführung konnten alle Arbeitspakete bearbeitet sowie die angestrebten Ziele erlangt werden. Zu Beginn der Projektdurchführung erfolgte die Festlegung eines Lastenhefts für die entsprechenden Materialien. Dies bildete die Grundlage für die Eigenschaftsprofile der Materialien.

Zunächst erfolgte ein Screening von vielen verschiedenen Recyclingagenten, um einen Überblick über Reaktionen, Reaktionszeiten, Materialeigenschaften etc. zu erhalten. Die Solvolyse lässt sich auf alle untersuchten Materialien anwenden und somit ein Zersetzen des Ausgangsmaterials realisieren. Durch viele Versuche konnte eine Recyclingformulierung verifiziert werden, mit der die detaillierten Untersuchungen des Prozesses erfolgten. Mit Hilfe dieser Agentur konnte nach der Solvolyse im Labormaßstab auch das Recycling im Technikumsmaßstab nachgewiesen werden.

Zudem wurden nach dem Zersetzungsprozess, die erneute Einsetzbarkeit der wiedergewonnenen Materialien (Fasern und Späne) umfangreich untersucht. Es fanden ausführliche Untersuchungen an dem Recyclingmaterial selbst (Beschaffenheit, Trocknung der Späne, etc.) sowie eine ausführliche Recherche über die unterschiedlichsten Fertigungsverfahren statt. Anschließend erfolgte die praktische Durchführung der umsetzbaren Fertigungsverfahren und die Optimierung der dazu benötigten Komponenten (Werkzeug, Maschinen). Die daraus resultierenden neu hergestellten Bauteile wurden einer visuellen Beurteilung und einer mechanischen Prüfung, unterzogen. Dadurch konnten die angewendeten Verfahren verifiziert werden. Im Falle von MDF erfolgte die Bestimmung der VOC und der Aldehyd-Emissionen.

Darüber hinaus wurde die Auftrennung der Mehrstoffsysteme und deren Einfluss auf den Recyclingprozess betrachtet. Als Ergebnis dessen konnte beispielhaft eine Anlage, zur Umsetzung der Auftrennung der Mehrstoffsysteme, des Recyclings sowie der anschließenden Wiederverarbeitung der Komponenten zu neuen Werkstoffen konzipiert werden. Außerdem fand auf Grundlage des Anlagenkonzeptes die ausführliche Betrachtung der Kosten sowie der Wirtschaftlichkeit statt.

Am Ende des Projektes erfolgte die Fertigung eines anschaulichen Demonstrators (Regalsystem). Wobei im Vorfeld der Demonstratorfertigung die Planung, die Hochskalierung des Recyclingprozesses, die Herstellung von großen Bauteilen des Holzwerkstoffes sowie deren ausführliche Überprüfung im Fokus standen.

II. Ausführliche Darstellung der Ergebnisse

1. Erzielte Ergebnisse

Arbeitspaket 1: Benchmarkmaterialien und Lastenheft

Gemeinsam wurde ein Lastenheft für das Recycling von Span- und Faserwerkstoffen, die Fertigung von Werkstoffen aus recycelten Span- und Faserplatten sowie die Werkstoffanforderungen anhand von Benchmarkwerkstoffen erarbeitet und die wesentlichen Anforderungen, die im Projekt berücksichtigt werden müssen, festgelegt.

Im Zuge des Lastenheftes erfolgte die Recherche der Kundenanforderungen, die Erstellung eines material- und fertigungstechnisches Eigenschaftsprofils sowie eine Stoffstromanalyse.

Kundenanforderungen

Zur Erörterung der Kundenanforderungen erfolgte eine repräsentative Befragung von Endkunden der System 180 GmbH sowie von Vertriebspartnern, welche System 180 Produkte im Portfolio führen. Themenschwerpunkte hierbei waren Kundenbedürfnisse, Kundenanforderungen, Kreislaufwirtschaft, Motivation, Nutzenerwartungen, Rücknahmesysteme und Zahlungsbereitschaft. Folgende zentralen Ergebnisse können festgehalten werden: Die Entscheidung für nachhaltige Möbel wird maßgeblich durch persönliche Wertorientierung und das Bestreben nach Imageoptimierung beeinflusst. Verbraucher legen zunehmend Wert auf ethische und ökologische Aspekte bei ihrer Kaufentscheidung. Die Mehrheit der Käufer zeigt eine hohe Bereitschaft, längere Lieferzeiten in Kauf zu nehmen und höhere Preise zu zahlen, wenn dies mit nachhaltigen Produktionsweisen einhergeht. Hersteller, die Rücknahmesysteme für gebrauchte Möbel anbieten, stoßen auf breite Zustimmung. Verbraucher erkennen den Mehrwert solcher Systeme zur Förderung eines nachhaltigen Kreislaufsystems.

Formulierung Materialtechnisches Eigenschaftsprofil

Zur Ermittlung des materialtechnischen Eigenschaftsprofil wurden marktübliche, technische Materialanforderungen hinsichtlich Beschaffenheit (physikalische Eigenschaften, Homogenität, Obergrenze Dichtezuwachs, Dickentoleranz) identifiziert. Vorrangig wird ein schwarz durchgefärbtes Material verwendet, dass die Produktnorm EN 14322 erfüllt. Die physikalischen Eigenschaften, an denen sich das Recyclingmaterial orientieren muss, sind in Tabelle 1 dargestellt.

Tabelle 1: Materialtechnische Eigenschaften Mitteldichte Faserplatte (MdF)

Spezifikationen MdF

					Einheit	Prüfnorm
Nennstärke	10	16	19	25	mm	EN 14323
Dickentoleranz	+0,5 - 0,3	+0,5 - 0,3	+0,5 - 0,3	± 0,5	mm	EN 14323
Längen- und Breittoleranz	± 0,5				mm	EN 14323
Längen- und Breittoleranz (Zuschnitte)	± 2,5				mm	EN 14323
Verzug		≤ 2	≤ 2	≤ 2	mm/m	EN 14323
Kantenausbrüche	≤ 10				mm	EN 14323
Kantenausbrüche (Zuschnitte)	≤ 3				mm	EN 14323
Oberflächenfehler (Punkte)	≤ 2				mm ² /m ²	EN 14323
Oberflächenfehler (Längsfehler)	≤ 20				mm/m ²	EN 14323
Verhalten bei Kratzbeanspruchung ²	≥ 1,5				N	EN 14323
Fleckenunempfindlichkeit	≥ 3				Stufe	EN 14323
Rissanfälligkeit	≥ 3				Stufe	EN 14323
Abriebbeständigkeit (Unidekore)	min 2				Klasse	EN 14323
Abriebbeständigkeit (Druckdekore)	min 1				Klasse	EN 14323
Lichtechtheit (Xenon-Bogenlampe)	min 4 Graumaßstab					EN 14323
Mittlere Rohdichte ³	780	770	770	770	kg/m ³	EN 323
Biegefestigkeit ³	32	30	30	28	N/mm ²	EN 310
Biege-Elastizitätsmodul ³	2800	2500	2500	2300	N/mm ²	EN 310
Querkzugfestigkeit ³	0,65				N/mm ²	EN 1319
Formaldehydabgabe	E1 E05 CARB Phase 2 / TSCA Title VI					
Brandverhalten (Euroklasse)	D-s2,d0 gemäß EN 13986 in Abhängigkeit von der Endanwendung (Dicke: ≥ 9 mm / Rohdichte: ≥ 600 kg/m ³)					

Das Material soll zudem auch folgenden Umweltrelevanten Standards entsprechen:

- Erzeugnis gem. REACH-Verordnung EG 1907/2006.
- Umwelt- und Produktdeklaration nach ISO 14025 und EN 15804+A1
- Verleimung Emissionsklasse E1/E05
- Anteil Recyclingholz: Pre-Consumer 40-60%, Durchforstungs- und Restholz 40-60%

und andere Anforderungen bestehen. Wenn beispielsweise ein Holzwerkstoff dauerhaft in einem Gebäude verbaut wird, handelt es sich baurechtlich um ein Bauprodukt. Deren Bedingungen für die Vermarktung im europäischen Binnenmarkt wird in der Bauproduktenverordnung (bis 2013 Bauproduktenrichtlinie) festgelegt. Die Anforderungen von Holzwerkstoffen zur Verwendung im Bauwesen werden nach DIN EN 13986 geregelt. Dazu gehören diverse Produkteigenschaften (u. a. mechanische u. physikalische Eigenschaften) sowie deren Konformitätsbewertung und –kennzeichnung. Darüber hinaus enthält die Norm zahlreiche Verweisungen auf andere Normen, u. a. auch zur Formaldehydabgabe. Der Formaldehydgrenzwert in der Raumluft liegt bei 0,1 ppm (0,124 mg/m³) gemäß DIN EN 13986. Die EN 717-1 regelt das entsprechende Prüfverfahren. Beschichtete und unbeschichtete Holzwerkstoffe dürfen nach der Chemikalien-Verbotsverordnung nicht in den Verkehr gebracht werden, wenn die Formaldehyd-Emission größer als 0,1 ppm ist. Sofern die Holzwerkstoffplatten ausschließlich zum Zwecke einer geeigneten Beschichtung in den Verkehr gebracht werden und sichergestellt ist, dass sie nach der Beschichtung den Grenzwert einhalten, ist dies erlaubt.

Formulierung Fertigungstechnisches Eigenschaftsprofil

Es wurde ein fertigungstechnisches Eigenschaftsprofil für das gewünschte Endprodukt unter Berücksichtigung gängiger Normen formuliert. Es dient als Grundlage für die Entwicklung individueller Verarbeitungsverfahren. Hierzu wurden neben den marktüblichen, technischen Materialanforderungen hinsichtlich Beschaffenheit (physikalische Eigenschaften, Homogenität, Obergrenze Dichtezuwachs, Dickentoleranz) die Bearbeitbarkeit mit Maschinen und Werkzeugen entsprechend bisher eingesetzter Holz-Verarbeitungsverfahren identifiziert. Das Material soll den Anforderungen folgender technischer Fertigungsverfahren genügen:

- Trennenden Fertigungsverfahren
 - Sägen (HSS-Werkzeuge)
 - Fräsen (HS- und HSS-Werkzeuge, DP-Werkzeuge), Vorschub 12 m/min, Drehzahl 15 – 24 Tsd. U/min
 - Bohren (HS- und HSS-Werkzeuge)

- Fügende Fertigungsverfahren
 - Breitflächen Beschichtung von MDF roh (unbeschichtet, geschliffen) mit z.B. Möbellinoleum einseitig/Bulletin Board beidseitig bzw. Naturholz furnier 0,3 mm
 - Schmalflächen Beschichtung mittels Glättung, Verdichtung und Plastifizierung gefräster, meist profilierter Oberflächen durch spanloses thermomechanisches Verfahren (Thermoglätten) mit erhitztem profilanalogem Werkzeug.

Angeichts der Möglichkeit, dreidimensional geformte Werkstoffe zu fertigen und neue Anwendungsgebiete zu erschließen, wurden zusätzliche technischen Anforderungen für das Lastenheft definiert. Dabei wurden bestehende Lösungen identifiziert, die dem technischen Standard von Plattenpressen in Tischlereien für die 3D-Verpressung entsprechen.

Auswahl und Analyse Benchmark-Materialien

In einer Marktrecherche im Sinne der Benchmarkfestlegung, wurde untersucht, welche alternativen, biobasierten Plattenwerkstoffe für den Möbelbau am Markt verfügbar oder in Entwicklung sind und insbesondere eine bessere Ökobilanz als MDF aufweisen. Dabei wurden 25 Materialien verglichen und in Bezug auf Markt-Serienreife, Materialzusammensetzung (z. B. Bindemittelart) sowie physikalische und umweltbezogene Eigenschaften bewertet. Besonders berücksichtigt wurden Kriterien wie Wiederverwertbarkeit, Rückgewinnungspotenzial, vorhandene Zertifikate, Lebenszyklusanalyse (LCA) und EPD. Zudem flossen die Fertigungstauglichkeit sowie sensorische Aspekte wie Oberfläche und Dekorationen in die Bewertung ein.

Stoffstromanalyse

Eine Analyse der Stoffströme in den einzelnen Lebenszyklusphasen wurde unter Differenzierung der Bauteilfertigungs-, Nutzungs-, Nachnutzungsphasen und Entsorgungsstadien erstellt.

Phase 1: Bauteilfertigung

Durch Standardisierung des modularen Bausystems und Optimierung der Bauteilfertigung wird der Verschnitt maximal reduziert. Der Materialabfall beträgt insgesamt 23 %, bestehend aus 13,6 % Verschnitt, 2,8 % Ausschuss und 6,5 % Frässtaub.

Phase 2: Nutzung

Das Produkt ist auf eine Nutzungsdauer von über 20 Jahren ausgelegt. Langlebiges Design, hochwertige Materialien, zeitlose Ästhetik sowie Modularität und Anpassbarkeit sichern eine langfristige Nutzung. Zudem sind zu Repair-, Cross- und Upgrade-Prozesse etablieren.

Phase 3: Nachnutzung

Re-Use, Refurbishment und Remanufacturing sind grundsätzlich möglich. Ein Rücknahmesystem ist einzuführen, um das Material länger im geschlossenen Kreislauf zu halten. Mit dem derzeit verwendeten Material ist dies noch nicht umsetzbar.

Phase 4: Entsorgung

Eine vierstufige Recyclingstrategie entsprechend den Lebensphasen ist möglich. Ziel ist die Schließung des Stoffkreislaufs durch sortenreines Recycling über ein zu etablierendes Rücknahmesystem von System 180 oder eine fachgerechte Entsorgung über gemischte Sammelsysteme Dritter.

Im Arbeitspaket wurden neben den MDF-Platten auch die Palettenklötze näher betrachtet. Die Erstellung des Lastenhefts für Palettenklötze wurden durch den ohne Förderung mitwirkenden Partner Pfeifer Holz Lauterbach GmbH unterstützt. Die Pfeifer Holz Lauterbach GmbH stellte das Anforderungsprofil an Werkstoffe für Palettenklötze zusammen und legte den Fertigungsprozess soweit dies die Geschäftsgeheimnisse zuließen, offen. Hierdurch wird eine vollständige Bewertung der Recyclingfraktionen hinsichtlich der Verwendung als Palettenklotzrohstoff realisiert. Durch den Einblick in den Fertigungsprozess wird zusätzlich die Abschätzung der direkten Einsetzbarkeit der Recyclingfraktionen im etablierten Fertigungsprozess ermöglicht. Für die Herstellung von Palettenklötzen gelten je nach vorgesehener Verwendung Grenzwerte für mechanische und physikalische Kenngrößen. Pfeifer stellt hauptsächlich EPAL-Palettenklötze aus Frischholz wie Fichte und Kiefer her. Die nach Norm (UIC 435-2) festgelegten Grenzwerte und die darüberhinausgehenden von Pfeifer selbst festgelegten Materialanforderungen sind in der Tabelle 2 zusammengefasst.

Tabelle 2: Anforderung nach EPAL/UIC an Palettenklötze

Parameter	Referenzwert nach EPAL/UIC (UIC 435-2)
Dichte [kg/m ³]	600 - 750; Pfeifer: 590 - 650
Quellung [%]	5,20
Wasseranteil [%]	Pfeifer: 8 - 9
Nagelauszug [kN]	5,5 (Verbindung – 3 Nägel)
Querzug [N/mm ²] - Kochquerzug	0,25
Formaldehydemmission [mg/m ³]	0,124 nach EN 717-2 (Beladungsfaktor 0,3 m ² /m ³) Pfeifer: < 0,1 ppm nach UIC 435-2
Schwermetall	Summe (Cd, Pb, Hg, Cr) < 100 ppm

Auch die Spangrößenverteilung stellt für Pfeifer eine relevante Größe dar. Für die verwendeten Späne in Deck- und Mittelschicht sind Min-/Max-Grenzen festgelegt. Mittels Siebanalysen wird die Qualität der verwendeten Rohstoffe überprüft. Mit den aus recyceltem Spanmaterial hergestellten Palettenklötzen sollten die nach der Norm geforderten Kennwerte ebenfalls erreicht werden, damit die Palettenklötze für die Verwendung in EPAL-Paletten eingesetzt werden können.

Durch PreZero Holz wurden Materialien aus bekannter Quelle bereitgestellt, wodurch detaillierte Informationen über die Zusammensetzung verfügbar sind. Darüber hinaus wurde der etablierte Sammlungs- und Aufbereitungsprozess an den Standorten für die Sammlung und Aufbereitung von Holzwerkstoffen erläutert und die technischen Anlagen vorgestellt. In der heutigen Sammlung werden die Holzwerkstoffe gemeinsam erfasst und aufbereitet. Im etablierten Aufbereitungsprozess erfolgt eine Abtrennung von metallischen Werkstoffen. Die Holzwerkstoffe werden im Aufbereitungsprozess gegenwärtig in drei Korngrößen sortiert. Die Korngrößen können, wenn erforderlich, an die Anforderungen des chemischen Recyclings angepasst werden. Durch PreZero Holz wurden die standortbezogenen Rahmenparameter für das projektbezogene Recyclingverfahren zusammengestellt. Dazu gehörten die Akquise der benötigten Werkstoffe in ausreichender Menge und Qualität, die sortenreine Trennung sowie die Definition der Werkstoffe inklusive aller Inhaltsstoffe. Ferner erfolgte zwischen den Projektpartnern eine ausführliche Beratung der (Zulassungs-)Bedingungen für ein chemisches Recyclingverfahren von Spanwerkstoffen und den dazugehörigen Genehmigungsprozess.

Durch das gemeinsam erarbeitete Lastenheft lagen alle Rahmenbedingungen und –parameter für den angestrebten und umgesetzten geschlossenen Prozesskreislauf von Span- und Faserwerkstoffen vor (Bild 2).

Prozesskreislauf



Bild 2: Angestrebter und umgesetzter Prozesskreislauf

In Zuge der Recherchen erfolgte die Erarbeitung einer Übersicht über die etablierten Fertigungsverfahren für Span- und Faserplattenwerkstoffe, der einschlägigen Werkstoffnormen sowie der Werkstoffkategorien und Klassifizierung. Eine Übersicht der wichtigsten Prozessparameter kann der nachfolgenden Tabelle 3 entnommen werden. Diese Übersicht ermöglicht die Einschätzung der Passfähigkeit der recycelten Fraktionen in die Fertigungsprozesse und erlaubt eine Vorabeinschätzung der Werkstoffe. Die umfassende Übersicht wurde über die gesamte Projektlaufzeit in Form eines Nachschlagewerks genutzt.

Ein weiterer Fokus lag dabei auf der potenziellen Entweichung niedermolekularer Verbindungen (VOCs) infolge der Solvolysen mittels Amin-basierter organischer Lösemittel. Hierfür wurden die rechtlichen bzw. normrelevanten Grundlagen recherchiert.

Tabelle 3: Prozessparameter für die Herstellung verschiedener Holzwerkstoffe

Werkstoff	Normen/ Technische Klassen	Fraktionierung/ Faser- bzw. Spangeometrien	Klebstoffe	Streudichte [kg/m³]	Vorverdichtung	Heißpressen
Spanplatte (Flachpress- platte)	P1 – P7 (EN 312) P1 – P3: Allg. und nicht tragende Zwecke wie z.B. Inneneinrichtung u. Möbelbau (P2) P4 – P7: Tragende Zwecke im Trocken- und Feuchtebereich	Deckschicht: Länge: 3-10 mm Breite: k.A. Dicke: 0,1-0,3 mm Mittelschicht: Länge: 8-15 mm Breite: 1,5-4 mm Dicke: 0,25-0,6	UF: Deckschicht: 8-14% Mittelschicht: 4-8% PF: Deckschicht: 8-12% Mittelschicht: 6-9% PUR/PMDI: Deckschicht: 6-8% Mittelschicht: 2-4%	Deckschicht: 60-180 Mittelschicht: 40-180	Durch eine i.d.R. kalte Vorpresse wird das Spanvlies um den Faktor 2-3 in Bezug auf die Vlieshöhe vorverdichtet.	Taktpressen, kontinuierliche Pressen Pressdruck: 1-3,5 MPa (N/mm²) Temperatur: bei Einetagenpressen Pressplatten ca. 220 °C Presszeit bei optimaler Prozesstechnik ca. 5 s/mm
OSB-Platte	OSB/1 – OSB/4 (EN 300) OSB/1: Nicht tragende Zwecke im Trockenbereich OSB/2: Tragende Zwecke im Trockenbereich OSB/3: Tragende Zwecke im Feuchtebereich OSB/4: hochbelastbar im Feuchtebereich	Fraktionierung in Deck- und Mittelschicht. Deckschicht: Späne in Längsrichtung. Mittelschicht: Späne in Querrichtung Länge: 40-80 mm Breite: 4-10 mm Dicke: 0,3-0,8 mm	Deck- und Mittelschicht unterschiedlich. Bei Verwendung von PUR/PMDI: Deckschicht: 3-6% Mittelschicht: 4-10%	30-50	Vorverdichtung relativ gering, da die langen Späne (Strands) bereits strukturorientiert vorliegen. Eine Stahlwalze ist zum Vorpressen ausreichend.	Taktpressen, kontinuierliche Pressen Pressdruck: 1-3,5 MPa (N/mm²) Temperatur: 200 – 220 °C
Strangpress- platte	EN 14755 Vollplatte: ES – Extruded solid ESL – Extruded solid light Röhrenplatte: ET – Extruded tabular	Keine Fraktionierung. Der Prozess stellt geringere Anforderungen an die Spangeometrie als die Flachpressplatte.	Ca. 5% UF	k.A.	Durch die oszillierende Bewegung des Kolbens werden die Späne senkrecht zur Plattenebene ausgerichtet, verdichtet und durch den beheizten Formkanal gedrückt.	Extrusionsprozess in einem vertikal angeordneten, beheizten Formkanal Temperatur: ca. 200 °C

	ETL – Extruded tabular light					
Spanform- teile	k.A. zu technischen Klassen	Keine Fraktionierung. Möglichst gleichbleibende Spanabmessungen	4 – 20% Festharzanteil	k.A.	k.A.	Werzalitverfahren möglich (Verpressung mit Oberflächenbeschichtung)
MDF	DIN EN 622-1 (Allg. Anforderungen Faserplatten) und DIN EN 622-5 (MDF): Typ MDF: Allg. Zwecke für Trockenbereich (einschl. Möbel) Typ MDF.H: Allg. Zwecke für Feuchtbereich Typ MDF.LA: Tragende Zwecke für Trockenbereich Typ MDF.HLS: Tragende Zwecke für Feuchtbereich	Keine Fraktionierung. Faserlänge bei NH: 3,5-6 mm Faserlänge bei LH: 1-1,5 mm	Fasern werden möglichst gleichmäßig benetzt. Bei Verwendung von: UF: 10-12% (Bei HDF und Spezialplatten bis zu 16%) PF: 6-8% PUR/PMDI: 2-6% MF: 10-12%	15 – 30	Das Faservlies wird ca. um das 20-fache seines Ausgangsschütthöhe zusammengepresst bzw. vorverdichtet Pressdruck ca. 1,5 MPa (N/mm ²)	Taktpressen, kontinuierliche Pressen <u>Pressdruck:</u> 1 – 4 MPa (N/mm ²) <u>Temperatur:</u> Ca. 180-220 °C
Faserform- teile	k.A. zu technischen Klassen	Keine Fraktionierung	Thermoplastische Klebstoffe und Kunsthharze (UF, MF, PF etc.) Verbundwerkstoffe mit Polypropylen	k.A.	Teilweise kalte Vorverdichtung zu dünnen Matten, die anschließend im Heißpressprozess 3D- geformt werden.	Herstellung im Nass- und Trockenverfahren

Arbeitspaket 2: Abbauprozess und Aufreinigung

Im ersten Schritt der Bearbeitung des Arbeitspaketes wurden diverse Solvolysen an den drei zur Verfügung gestellten Materialien: Palettenklotz, Spanplatte sowie MDF-Platte (Bild 3) durchgeführt.



Bild 3: Ausgangsmaterial für die untersuchten Abbauprozesse

Zunächst erfolgte die Auswahl von zehn Agenzien aus den Stoffgruppen der Monoamine, Diamine, Aminoalkohole und Alkohole. Die Solvolysen wurden bei Siedetemperatur durchgeführt, die bei den eingesetzten Reagenzien zwischen 78 °C und 204 °C liegt. Es wurden die Art und Weise des Abbaus sowie die Zersetzungszeit (Zeit bis zum Zerfall des Materials) dokumentiert. Anhand dieser ausführlichen Versuchsreihen und den daraus ermittelten Ergebnissen (Bild 4) erfolgte der Rückschluss auf die Machbarkeit sowie die zeitliche Bestimmung der Abbauprozesse.

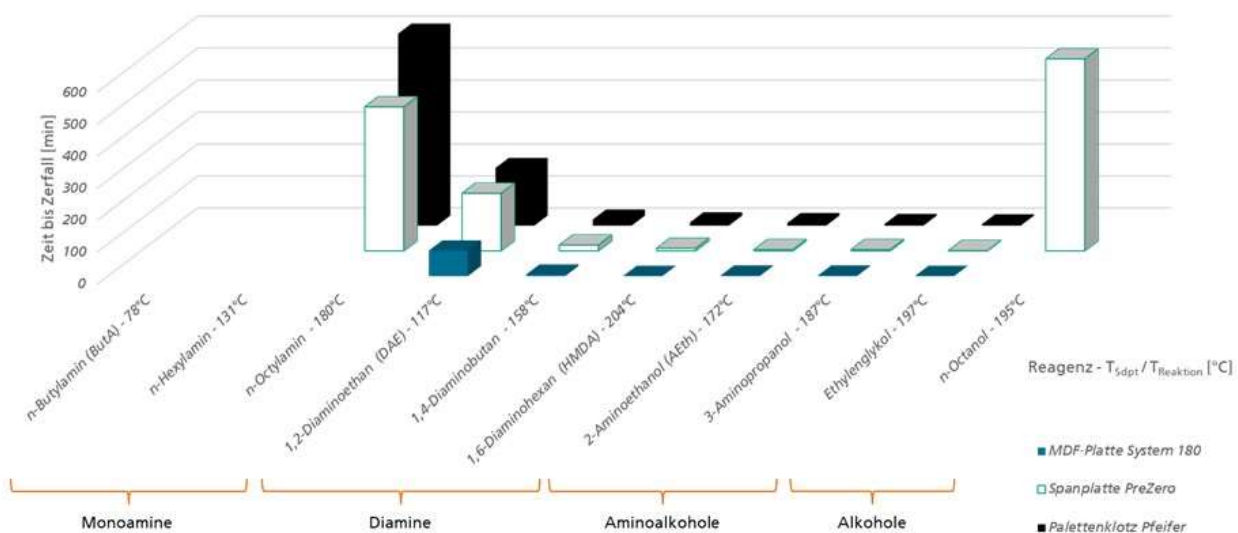


Bild 4: Darstellung der Reagenzien zur Zeit des Zerfalls sowie der unterschiedlichen zersetzten Holzwerkstoffe

Anhand der Ergebnisse wurden drei Agenzien für die weiteren Versuche ausgewählt. Aus der Stoffgruppe der Diamine das 1,2-Diaminoethan (DEA), aus der Stoffgruppe der Aminoalkohole das 2-Aminoethanol (AEth) und aus der Stoffgruppe der Alkohole das Ethylenglykol. Mit den ausgewählten Agenzien erfolgte die Durchführung von Recyclingprozessen im größeren Maßstab (160 g Material und 260 g Recyclingagenz) in einem zwei Liter Kolben unter dem Einsatz eines Rotationsverdampfers. Hierbei wurden die Abbauprozesse, die Aufreinigung inkl. Trocknung des recycelten Materials detailliert untersucht.

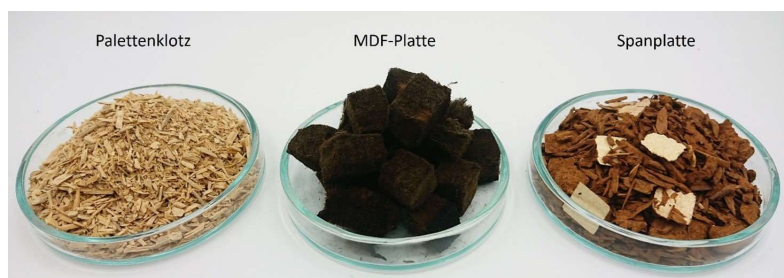


Bild 5: recycelte Holzwerkstoffe

Im Anschluss an die Zersetzung wurde die Wiederverarbeitung der recycelten Materialien zu neuen Holzwerkstoffen untersucht. Zu diesem Zweck wurde ein entsprechendes Tauchkantenwerkzeug konzipiert, hergestellt und der Wärmeeintrag der verwendeten Presse in das Werkzeug und somit an das zu härtende recycelte Spanmaterial ermittelt und dokumentiert (Bild 6).



Bild 6: Puckwerkzeug mit Temperaturmessung und – aufzeichnung in der Heißpresse

Es konnte aus allen drei Chargen der recycelten Holzwerkstoffe mit Hilfe von Temperatur und Druck ein neuer Holzwerkstoff ohne die weitere Zugabe von neuen Spänen oder Klebstoff hergestellt werden. Jedoch wiesen die Materialien visuell betrachtet eine unterschiedliche Festigkeit sowie gegenüber dem Ausgangsprodukt eine farbliche Veränderung auf. Die schwarze Farbe der MDF-Platte geht zum Beispiel durch den durchgeführten Abbauprozess in die braun/grüne Farbgebung über (Bild 7-9).



Bild 7: recycelten Palettenklotzspänen und neu hergestellten Holzwerkstoff

Bild 8: recycelte MDF-Fasern und neu hergestellten Holzwerkstoff

Bild 9: recycelte Späne sowie neu hergestellter Holzwerkstoff

Bei der Durchführung der Versuche zeigte sich zudem, dass der Trocknungsgrad des recycelten Materials ausschlaggebend für die weitere Verarbeitung und somit für die Herstellung neuer Holzwerkstoffe ist. Weist das recycelte Material noch eine erhöhte Konzentration des eingesetzten Reagens auf, so wurde im Herstellungsprozess (Heißpressen) eine starke Emission in Form von austretendem Dampf beobachtet. Erfolgte jedoch eine zu starke Trocknung des wiedergewonnenen Materials, ist eine Wiederverwertbarkeit nur bedingt möglich.

Für die weiteren Beurteilung des Prozesses bzw. zur mechanischen Beurteilung der neu hergestellten Materialien mittels Zugversuchs (Bestimmung der Querkzugfestigkeit) und/oder Biegeversuches bedurfte es der Herstellung größerer Probekörper (ca. 100 mm x 100 mm). Daher erfolgten die Konzipierung sowie Anfertigung eines neuen Tauchkantenwerkzeuges. Das Werkzeug bestand aus einem Rahmen und einem entsprechenden Stempel (Bild 10).

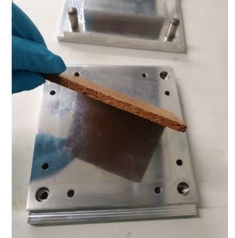


Bild 10: Quadratisches Tauchkantenwerkzeug (110 mm x 110 mm x 20 mm)

Palettenklotz von Pfeifer Holz Lauterbach GmbH

Das Palettenklotzmaterial wurden im Labormaßstab zersetzt und die Späne, nach dem Prozessschritt der Trocknung, wiedergewonnen. Die Beurteilung der Späne und deren Wiederverwendung erfolgte über die erneute Verarbeitung zu Bauteilen und deren mechanische Beurteilung. Die Beurteilung wurde am Fraunhofer IAP-PYCO mittels 3-Punkt-Biegeversuch in Anlehnung an die DIN EN 310 durchgeführt. Dabei wurde

zunächst bei konstanter Temperatur und Druck die Zeit (10 min, 15 min, 20 min, 30 min und 45 min) der Aushärtung variiert. Die Charakterisierung der Bauteile ergab, dass die Erhöhung der Aushärtungszeit eine positive Veränderung auf die mechanischen Kennwerte zur Folge hat. Es konnten höhere spezifische Biegefestigkeiten ab einer Härtung von 30 Minuten ermittelt werden. Darüber hinaus wurden Versuchsreihen zur Analyse von unterschiedlichen Spanvorbehandlungen (Klimaschrankbedingungen) sowie Arbeiten zur Einstellung der geforderten Dichte durchgeführt.

Ergänzend erfolgte der Vergleich von Bauteilen, die aus neuen Spänen und von Bauteilen, die auf Basis von recycelten Spänen hergestellt wurden. Anhand der spezifischen Biegefestigkeit konnte zwischen den Bauteilen kein signifikanter Unterschied (Bild 11) ermittelt werden. Folglich lässt sich darauf schließen, dass die Wiederverwertung mit analogen Eigenschaften realisierbar ist.

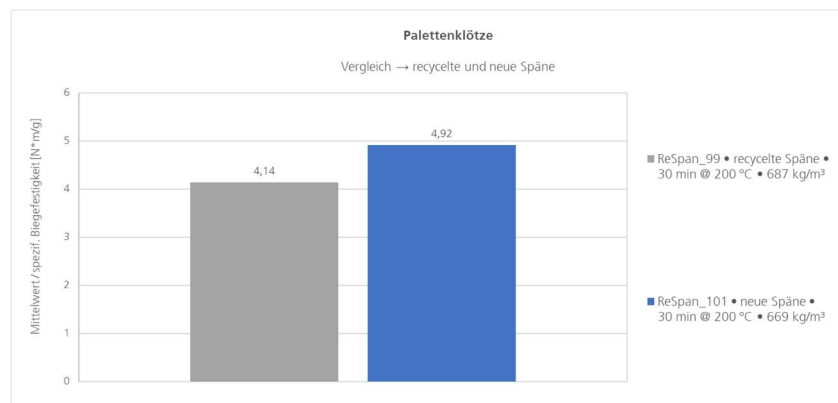


Bild 11: Mittelwert der spezifischen Biegefestigkeiten von Bauteilen mit recycelten und unbehandelten (neuen) Spänen

MDF-Platten von System 180 GmbH

Analog zu den Arbeiten mit den Plattenklötzen wurden die bereitgestellten MDF-Platten ebenfalls zersetzt, die eingesetzten Fasern wiedergewonnen und anschließend zu neuen Bauteilen verarbeitet. Bei der Zersetzung bzw. dem Abbau von MDF-Platten werden hauptsächlich die Faser in Form von Faseragglomeraten (Faserknäul) wiedergewonnen. Diese Faseragglomerate wurden zum einen direkt und zum anderen, nach einem weiteren Verarbeitungsschritt der mechanischen Zerkleinerung, erneut eingesetzt. Dazu wurden die Faseragglomerate vor der Weiterverarbeitung mittels mechanischer Bearbeitung entwirrt, um die Einzelfasern zu erhalten und zu verarbeiten (Bild 12).



Bild 12: Recycelte MDF-Platten → Faseragglomerate (links) und Einzelfasern (rechts)

Die Herstellung von MDF-Platten stellte sich anhand der vorhandenen technischen Möglichkeiten als herausfordernd dar. Die Umsetzung des industriellen Herstellungsverfahrens konnte nicht realisiert werden. Folglich wurden Bauteile mit Hilfe des vorhandenen Tauchkantenwerkzeugs (110 mm x 110 mm) hergestellt und im Anschluss untereinander bewertet. Bei den durchgeführten Versuchsreihen erfolgte die Beurteilung der Härtungszeit, die Dichteeinstellung über die Fläche sowie der Einfluss von Feuchtigkeit (Vorbehandlung im Klimaschrank) auf die mechanischen Eigenschaften (3-Punkt-Biegeversuch). Die Beurteilung ergab das bei der Verwendung von Faseragglomeraten, nur Bauteile mit einer sehr ungleichmäßigen Dichte und somit hohen Abweichungen in der Biegefestigkeit hergestellt werden konnten. Dennoch wiesen die gemessenen Biegefestigkeiten eine positive Tendenz auf. Es konnte bei einer Härtungszeit von 60 Minuten die höchste spezifische Biegefestigkeit im Mittelwert ermittelt werden. Die neu hergestellten Bauteile auf Basis von Einzelfasern, wiesen eine homogenere Dichte als die Bauteile, die aus Faseragglomeraten hergestellt wurden, auf. Ferner wurde festgestellt, dass der Vorbehandlungsschritt im Klimaschrank und somit der Feuchtegehalt der Fasern, ebenfalls einen Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften der recycelten Bauteile hat.

Spanplatten von PreZero Holz GmbH

Zur Durchführung der Recyclingversuche erfolgte die Bereitstellung von zwei Varianten an Spanplattenmaterial. Zum einen das sogenannte „Classic Board“ Material, das aus dem Industrieprozess eines Großkunden stammte und entsprechend Sortenrein und definiert vorliegt und zum anderen Abfallmaterial, was im Folgenden auch als „Abfall/MIX“ bezeichnet wird, dass eine repräsentative Probe aus dem Aufbereitungsprozess der PreZero Holz GmbH darstellt.

Zur detaillierten Betrachtung des Abbauprozesses wurde sich auf den Einsatz einer Recyclingagentur dem Ethanolamin konzentriert. Beide Materialien durchliefen den Zersetzungsprozess. Die Materialien wurden zersetzt und die wiedergewonnenen Späne ohne weiteren Zwischenschritt (Siebung) zur erneuten Bauteilherstellung verwendet. Die ermittelten Dichten und Biegefestigkeiten wiesen deutliche Schwankungen über die Fläche auf. Tendenziell ist jedoch zu sagen, dass höhere Biegefestigkeiten bei den Bauteilen, die auf Basis der „Classic Board“ hergestellt wurden zu verzeichnen waren. Aufgrund der hohen Dichteschwankungen erfolgte die Verbesserung des Fertigungsverfahrens aus recycelten Spänen (AP 3).

Zur weiteren Optimierung der Ergebnisse bzw. des Recyclingprozesses wurde ferner die Beurteilung des Feuchtigkeitseinflusses (Vorbehandlung im Klimaschrank) auf die mechanischen Kennwerte (Bild 13) untersucht. Die Lagerung des recycelten Spanmaterials, bei einer höheren Luftfeuchtigkeit (65 %) im Klimaschrank, wirkt sich negativ auf die Biegefestigkeit der daraus hergestellten Bauteile aus.

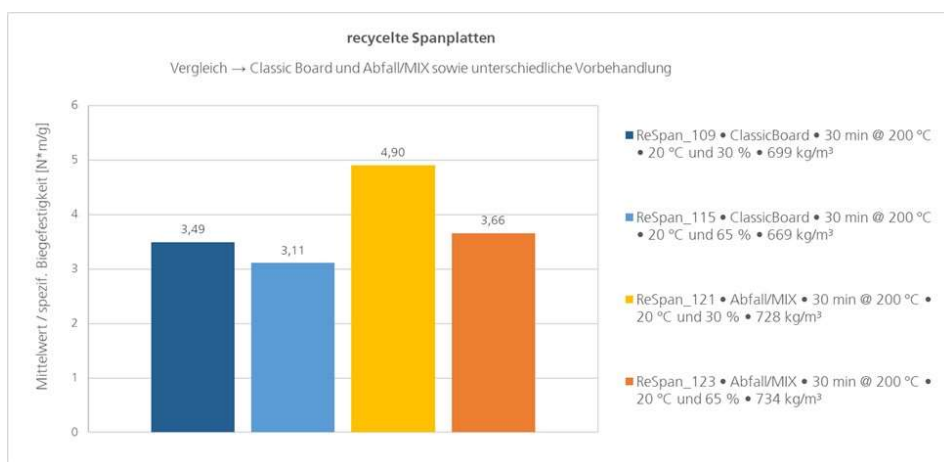


Bild 13: Mittlere spezifische Biegefestigkeit von Spanplatten aus recycelten Spänen

Zudem zeigte sich, dass nicht nur der Trocknungsgrad und der damit einhergehende restliche Amingehalt, sondern auch die Trocknungstemperatur, der wiedergewonnenen Späne einen signifikanten Einfluss (Reaktivität) auf die Weiterverarbeitung zu neuen Bauteilen und deren mechanische Kennwerte ausübt. Dementsprechend erfolgte die Durchführung einer umfassenden Versuchsreihe zur Beurteilung dieser Thematik und deren Einflussnahme auf die Bauteile aus recycelten Spänen.

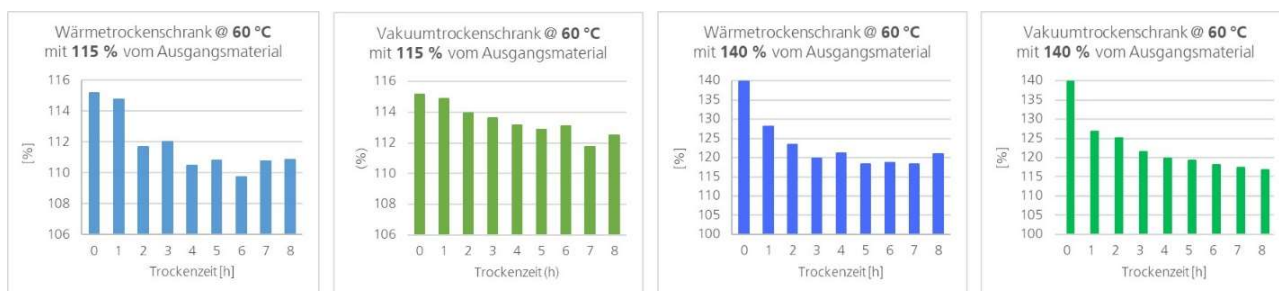


Bild 14: Darstellung des Agenzgehalts im Verlaufe des jeweiligen Trocknungsprozesses bei 60 °C

Neben dem bisher eingesetzten Trockenschrank sowie der Trocknungstemperatur von 100 °C wurden verschiedene Trocknungsmethoden und deren Einflussnahme auf die Reaktivität der Späne mittels Differenzkalorimetrie (DSC) detailliert untersucht. Dazu wurden Späne mit einem Agenzgehalt von 15 % sowie Späne mit einem Agenzgehalt von 40 % hergestellt und anschließend getrocknet sowie analysiert. Es erfolgte die Trocknung in einem Wärmetrockenschrank sowie die Trocknung in einem Vakuumtrockenschrank bei 60 °C bzw. 80 °C. Zur Beurteilung wurden die Späne über einen Zeitraum von acht Stunden getrocknet und im Abstand von einer Stunde der Trocknungsgrad und die Reaktivität bestimmt. Anhand der ermittelten Ergebnisse erfolgt die Festlegung, dass die Trocknung im Wärmetrockenschrank effektiver ist als die

Trocknung im Vakuumtrockenschrank. Des Weiteren lässt sich festhalten, dass sich nach etwa fünf Trocknungsstunden eine Gewichtskonstanz in Material einstellt und somit keine signifikante Veränderung des Agenzgehaltes mehr erfolgt.

Die Reaktivität der Späne verringert sich mit fortschreitender Trocknungsdauer (Bild 15-17). Bei der Bewertung der Versuchsreihe mit 60 °C und mit 80 °C wurden vergleichende Ergebnisse ermittelt. An dieser Stelle wäre jedoch festzuhalten, dass mit der Trocknungstemperatur von 80 °C ein geringerer Agenzgehalt in den Spänen im Verlaufe der Trocknung erreicht werden konnte.

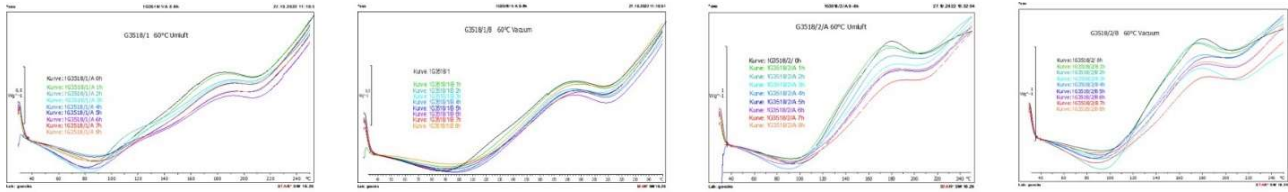


Bild 15: Gemessene DSC-Kurven der getrockneten Späne bei einer Trocknungstemperatur von 60 °C

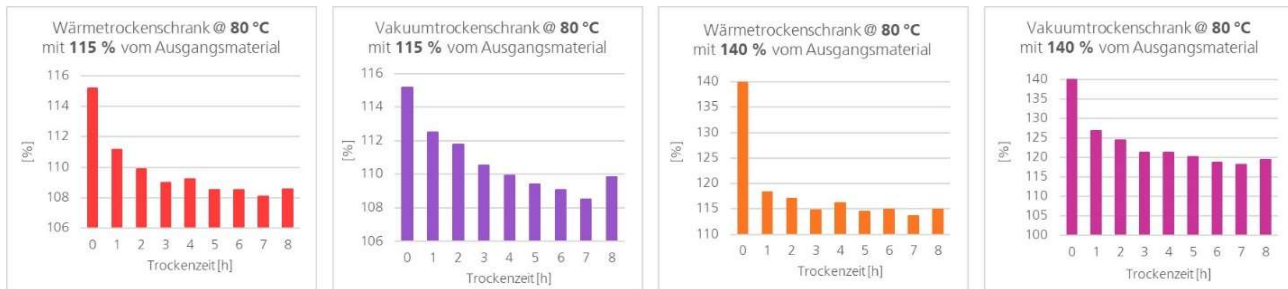


Bild 16: Darstellung des Agenzgehalts im Verlaufe des jeweiligen Trocknungsprozesses bei 80 °C

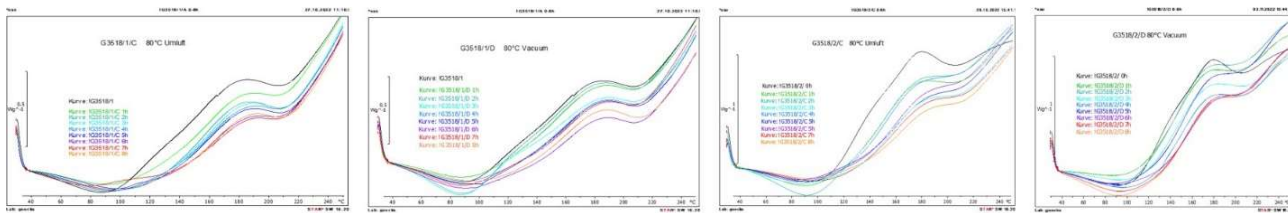


Bild 17: Gemessene DSC-Kurven der getrockneten Späne bei einer Trocknungstemperatur von 80 °C

Erfolgt eine Gegenüberstellung (Bild 18) von allen eingesetzten Temperaturen lässt sich erkennen, dass die Reaktivität der recycelten Späne mit einer Trocknungstemperatur von 80 °C bzw. 100 °C im Vergleich zu 60 °C abnimmt, wobei die Differenz zwischen 60 °C und 80 °C nicht so signifikant ist, wie der Reaktivitätsabfall bei einer Trocknungstemperatur von 100 °C.

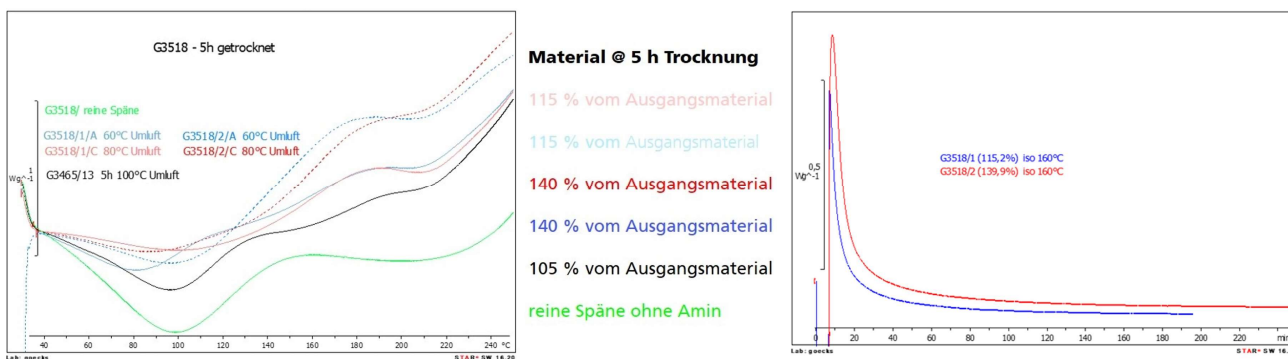


Bild 18: Gegenüberstellung der gemessenen DSC-Kurven von Spanplattenspänen sowie die isotherme @ 160 °

Darüber hinaus weisen die Späne mit einem erhöhten Reagenzgehalt eine verbesserte Reaktivitätskurve auf. Die durchgeführten Messungen zeigen, dass die Reaktion bei einer Temperatur von 160 °C und über einen Zeitraum von etwa 60 Minuten erfolgt. Es wurden daraufhin Bauteile mit einer Härtungstemperatur von 160 °C angefertigt. Jedoch lagen die mechanischen Kennwerte im Vergleich zu den Kennwerten der Bauteile mit einer Härtungstemperatur von 200 °C in einem geringeren Wertebereich.

Wiederholter Recyclingkreislauf von einem Bauteil aus recycelten Spänen

Zusätzlich zu den bisher beschriebenen Versuchen erfolgte die Durchführung einer Versuchsreihe in die Bauteile, die vorher aus recycelten Spänen hergestellt wurden, nochmals dem Recyclingprozess sowie der erneuten Bauteilherstellung zugeführt wurden. Die wiedergewonnenen Späne durchliefen somit zweimal den Recyclingprozess. Im Vergleich konnte zwischen 1 x recycelt und 2 x recycelt kein signifikanter Unterschied verzeichnet werden. Dementsprechend lässt sich ableiten, dass der Recyclingprozess gegebenenfalls mehrmals durchführbar ist, ohne einen negativen Einfluss auf das Material auszuüben.

Versuche im Technikumsmaßstab

Die Hochskalierung des Abbauprozesses erfolgte mit Spanplattenmaterial sowie mit der Recyclingagenz Ethanolamin. Die Skalierung des Verfahrens mittels Taumeltrockner und angeschlossener Rückgewinnung des Recyclingagenz (Bild 19), wobei das Nennvolumen dabei von 2000 ml Labormaßstab auf 500 Liter Technikumsvolumen hochskaliert wurde, konnte erfolgreich umgesetzt werden. Die aus dem Technikumsversuch wiedergewonnenen Späne ließen sich im Anschluss zur erneuten Bauteilherstellung wiederverwenden.

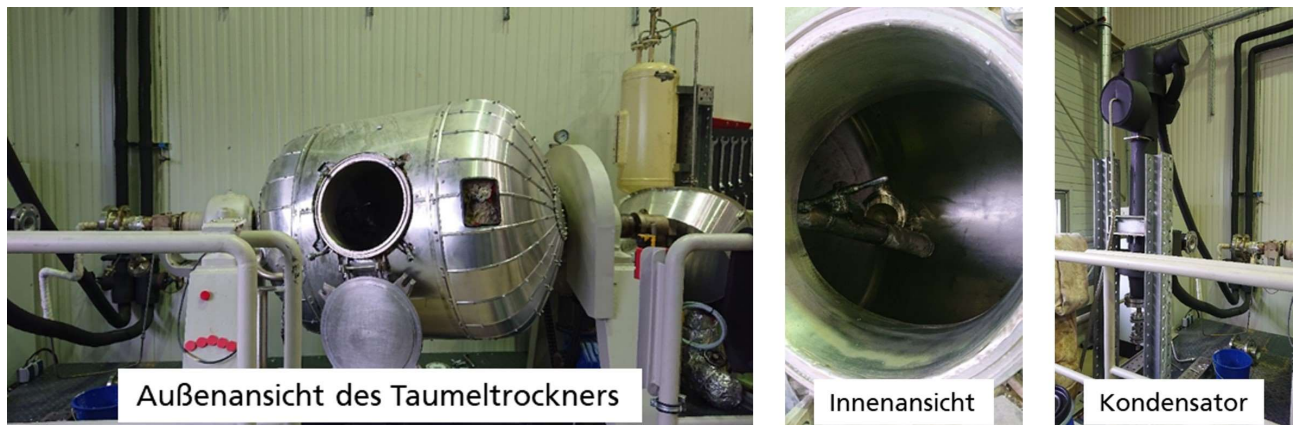


Bild 19: Taumeltrockner am Fraunhofer IAP / PAZ in Schkopau

Im Verlaufe der Projektdurchführung kam es bei der Hochskalierung der Versuche oder im Prinzip bei der Lagerung des Materials, dass im Großversuch hergestellt wurde zu unvorhersehbaren Komplikationen (Rauchentwicklung). Die Ursache dieser Ereignisse war zunächst unklar, folglich wurden zur Ursachenermittlung mehrere Tests durchgeführt. Das Material wurde hinsichtlich des Einflusses von Temperatur sowie des Einflusses metallischer Verunreinigungen (Cu, Fe, Sn, Al) untersucht. Dabei wurde definiert unterschiedliches Metallpulver vor Beginn des Zersetzens und nach dem Zersetzen dem Recyclingprozess zugeführt und anschließend einer Wärmequelle ausgesetzt. Des Weiteren wurde die Entzündbarkeit von entstehenden Gasen überprüft. Es konnte im Zuge der Testreihen keine definierte Rauchentwicklung bzw. Entzündung hervorgerufen werden.

Zukünftig wird empfohlen die recycelten Späne unter Schutzgasatmosphäre abzufüllen und zu lagern.

Parallel zu den Versuchsreihen am Fraunhofer IAP-PYCO wurden in diesem Arbeitspaket ebenfalls Arbeiten zum Recycling an der HNE Eberswalde durchgeführt. Es wurden zur partiellen Lösung von Span- und Faserwerkstoffen verschiedene organische Reagenzien (1,2-Diaminoethan, 1,4-Diaminobutan, 1,6-Diaminohexan, 2-Aminoethanol (Ethanolamin), Ethylenglykol) in Laborversuchen untersucht. Dazu wurden die Bindemittel der Span- und Faserwerkstoffe solvolytisch unter Wärmezufuhr (150 °C) und atmosphärischem Druck im Rotationsverdampfer unter zu Hilfenahme der bereits genannten Reagenzien gelöst. Die aus diesem Verfahren erhaltenen Materialproben wurden im Anschluss im Bildgebenden Verfahren mit Hilfe eines Digital-Mikroskops (Hardware: Leica DVM6 A; Software: Leica Application Suite X (3.0.10.20465)) auf etwaige sichtbare Schädigungen der Faser- und Spanstrukturen untersucht. Bild 20 zeigt exemplarisch Mikroskopie-Aufnahmen von Faser- und Spanproben, die mittels des vom IAP entwickelten Ansatzes unter Verwendung von 1,2-Diaminoethan, 2-Aminoethanol und Ethylenglykol solvolytisch erschlossen wurden. Dabei konnten keine solvolysebedingte und/oder mechanische Strukturschädigungen festgestellt werden, die auf eine spätere Beeinträchtigung der mechanischen Eigenschaften der recycelten Plattenwerkstoffe schließen lassen. Die Solvolyse mit den Aminen führte allerdings zu einer farblichen Veränderung des Materials. Während die Fasern einer schwarz durchgefärbten MDF-Platte sich ins grünliche verfärbten, verfärbten sich die Fasern einer klassischen MDF-Platte von graubraun in ein gelbbraun.



Bild 20: Mikroskopieaufnahmen nach Solvolysen mit den unterschiedlichen Reagenzien

Zur Trocknung/ Aufreinigung des Faser- und Spanmaterials wurden unterschiedliche Methoden getestet:

- Lösemittelabzug im Rotationsverdampfer unter Vakuum und bei erhöhter Temperatur
- Ofentrocknung
- Kombination aus Wärme und schneller Rotation

Die Untersuchungen zur Trocknung/ Aufreinigung des Faser- und Spanmaterials beschränkten sich auf Materialproben, welche zuvor solvolytisch mit 2-Aminoethanol erschlossen wurden. Die Untersuchung hatte zum Ziel das Lösemittel möglichst vollständig aus den Materialproben zu entfernen. Die Materialproben wiesen nach dem solvolytischen Aufschluss und vor dem Abzug im Rotationsverdampfer einen Lösemittelanteil von 100% bezogen auf das darrtrockene Faser- und Spanmaterial auf. Der Abzug erfolgte bei einem Druck von 5-10 mbar und einer Ölbadtemperatur von 75 °C für eine Dauer von ca. 60 Minuten. Der Lösemittelabzug im Rotationsverdampfer gestaltete sich unter den genannten Bedingungen als nicht effizient, sodass der Lösemittelanteil infolgedessen lediglich auf ca. 85 % reduziert werden konnte. Dennoch wurde dieser Prozessschritt aus Praktikabilitätsgründen beibehalten, da auch die Solvolyse schon im Rotationsverdampfer durchgeführt wurde. Der Umstand, dass nur wenig Lösemittel abgezogen werden konnte, ist auf einen vergleichsweise geringen Dampfdruck von 2-Aminoethanol zurückzuführen (172 °C Siedetemperatur bei atmosphärischem Druck). Die Ölbadtemperatur wurde dabei so gewählt, dass eine beginnende Wiedervernetzung des partiell gelösten Bindemittels weitestgehend ausgeschlossen werden konnte. Ein Druck von 5 mbar konnte leider nicht verlässlich im Rundkolben des Rotationsverdampfers erreicht werden, sondern war nur in selten Fällen nach einer zeitlich und technisch aufwändigen Reinigung des Rotationsverdampfers möglich. Daher wurde dem Lösemittelabzug im Rotationsverdampfer entweder mit der Ofentrocknung oder mit der kombinierten Einwirkung von Wärme und Zentrifugalkräften ein weiterer Trocknungsprozess durchgeführt.

Die Ofentrocknung wurde in einem Laborofen (Modell: Memmert UF 110^{PLUS}, Hersteller: Memmert GmbH + Co. KG) bei 75 °C im Umlaufbetrieb für 24 h durchgeführt. Währenddessen wurde in den Ofen kontinuierlich über die gesamte Trocknungszeit Stickstoff eingeleitet. Das hatte einerseits den Abtransport von gasförmigen 2-Aminoethanol aus dem Innenraum des Ofens beschleunigt, andererseits konnte damit durch die einhergehende Sauerstoffverdrängung eine fortschreitende exotherme Reaktion bis hin zur Selbstentzündung ausgeschlossen werden. Nach der 24-stündigen Trocknung wurde weitestgehend eine Gewichtskonstanz erreicht, wobei der Lösemittelanteil bei ca. 46% lag, vgl. Bild 21. Zwischendurch musste das Probenmaterial händisch aufgelockert werden, um der Bildung von Agglomeraten entgegenzuwirken und eine homogene Trocknung sicher zu stellen.

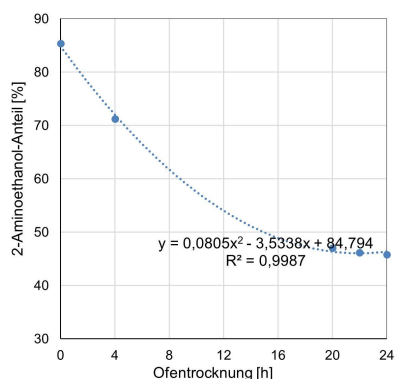


Bild 21: 2-Aminoethanol-Anteil in Abhängigkeit der Zeit während der Ofentrocknung bei 75 °C

Als Alternative zur Ofentrocknung wurde außerdem der Einfluss aus der Kombination von Wärme und Zentrifugalkraft untersucht. Dazu wurde eine alte Waschmaschine umgebaut (Bild 22). Zur Beheizung der Trommel wurde eine 400 Watt Silikonheizmatte auf der Innenseite des Trommelgehäuses befestigt. Sowohl die Drehzahl als auch die Temperatur konnten über entsprechende Bedienelemente gesteuert werden. Analog zur Ofentrocknung wurde in das Trommelgehäuse Stickstoff eingeleitet. Die Agglomerate haben sich, bedingt durch die Rotationsbewegung, deutlich stärker ausgeprägt als bei der Ofentrocknung. Dem konnte durch händisches Auflockern nur schwer und begrenzt entgegengewirkt werden. Die Trocknung in der umgebauten Waschmaschine wurde über einen Zeitraum von 7 Stunden durchgeführt. Die Drehzahl lag bei ca. 1200 U/min. Die Temperatur wurde so eingestellt, dass in der Trommel ca. 75 °C erreicht wurden. Mit einem Lösemittelanteil von ca. 48 % lag dieser etwas höher als bei der Ofentrocknung.

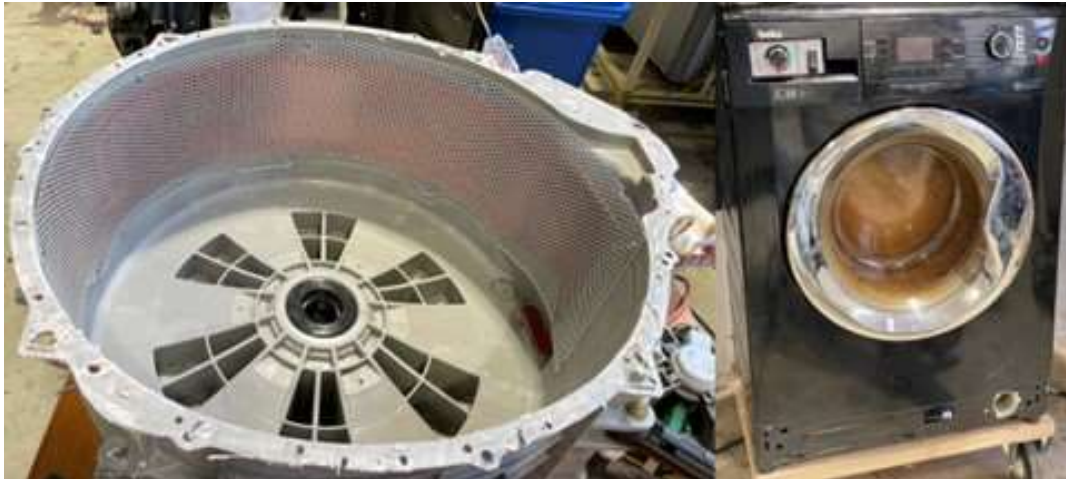


Bild 22: Umgebaute Waschmaschine zur Trocknung des Probenmaterials. Links: Die Silikonheizmatte wurde mit einem Lochblech auf der Innenseite des Trommelgehäuses fixiert. Rechts: Umgebaute und funktionstüchtige „Waschmaschine“ während der Trocknung von MDF-Rezyklat

Arbeitspaket 3: Entwicklung des Fertigungsverfahrens

Es wurde die Wiederverwendbarkeit von drei Materialien (Palettenklotz, MDF-Platte und Spanplatten) betrachtet. Der Recyclingprozess konnte für alle drei Materialien erfolgreich durchgeführt werden. Die Beurteilung der wiedergewonnenen Späne erfolgte durch die Herstellung von neuen Bauteilen und deren mechanische Untersuchung. Dabei fand zunächst die Herstellung von Bauteilen aus Spänen von allen drei Materialien mit Hilfe eines Tauchkantenwerkzeuges statt. An dieser Stelle ist festzuhalten, dass mit dem Tauchkantenwerkzeug eine generelle Aussage über die Wiederverwendung der recycelten Späne getroffen werden kann, aber keine Herstellung im Vergleich zu der industriellen Fertigung umgesetzt wurde. Nach ausführlicher Recherche der industriellen Fertigungsverfahren und deren Abschätzung der Realisierbarkeit sowie nach Beurteilung erster Versuche, wurde sich seitens des Fraunhofer IAPs für eine detaillierte Entwicklung des Fertigungsverfahrens des Werkstoffes der Spanplatte entschieden.

Die ersten gefertigten Bauteile aus recycelten Spanplattenspänen wiesen hohe Schwankungen in der Dichteverteilung auf, folglich wurde die Spanplattenherstellung, in Anlehnung an die industrielle Herstellung, verbessert. Es erfolgte die Festlegung einer Spanplattendicke von 13 mm (Dichte circa 700 kg/m³), das Tauchkantenwerkzeug wurde modifiziert und die recycelten Späne fraktioniert, um beim Fertigungsprozess eine Schichtung zu realisieren. Die zeitintensive Fraktionierung erfolgte mit Hilfe von Laborsieben in vier Fraktionen (Fraktion 1 = < 0,80 mm, Fraktion 2 = 0,80 – 2,00 mm, Fraktion 3 = 2,00 – 3,15 mm und Fraktion 4 = 3,15 – 8,00 mm). Diese Fraktionen werden bei der Fertigung von fein bis grob und dann wieder nach fein (sieben Schichten) geschichtet, Bild 23.



Bild 23: Schichten (fein bis grob) von einer neu hergestellten Spanplatte beim Befüllen des Tauchkantenwerkzeuges

Durch den schichtweisen Aufbau der Bauteile konnte eine homogenere Dichte über die Fläche bei den Bauteilen aus recycelten Spänen erlangt werden, Bild 24.



Bild 24: Bauteil aus recycelten Spanplattenspänen

Mit Hilfe dieses Herstellungsverfahrens erfolgten die Bauteilherstellung zur Untersuchung des Recyclingprozesses und deren Bedingungen (Amingehalt, Trocknung der Späne, Aushärtung).

Ferner fand die Herstellung der Bauteile, aus den recycelten Spänen, die aus den Versuchen im Technikumsmaßstab (V1, V2, V3) gewonnen wurden, mit Hilfe des Tauchkantenwerkzeuges, statt. Zur Beurteilung des Materials und deren Kennwerte wurden die recycelten Späne aus dem Technikumsversuchen wie die Späne aus den Laborversuchen zuerst gesiebt und dann zu neuen Bauteilen verarbeitet. Gegenüber den Laborversuchen konnte das Material aus den Technikumsversuchen nur in drei Fraktionen (< 2,00 mm, 2,00 – 3,15 mm und 3,15 – 8,00 mm) gesiebt werden. Das Abfallmaterial enthielt einen hohen Faseranteil, der sich negativ auf den Siebprozess auswirkte. Die Bauteilherstellung wurde ebenfalls über einen schichtweisen Aufbau (fünf Schichten) realisiert. An dieser Stelle erfolgte die erneute Überprüfung der Härtingszeit, aber auch die Gegenüberstellung des Materials aus den Technikumsversuchen mit dem Material aus den Laborversuchen, Bild 25.

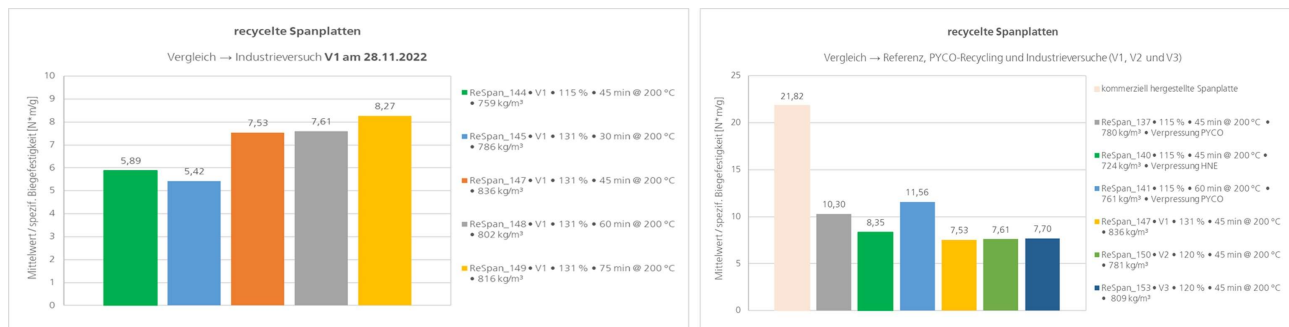


Bild 25: Vergleich unterschiedlicher Bauteile aus den recycelten Spänen des Versuches V1 sowie der Vergleich von recycelten Spänen und den daraus hergestellten Bauteilen aus den Labo- und Technikumsversuchen

Die Beurteilung der gefertigten Bauteile fällt im Vergleich untereinander positiv aus. Im Labor- sowie Technikumsmaßstab wurden Spänen wiedergewonnen, die zur erneuten Bauteilherstellung, ohne die Zugabe von neuen Spänen oder weiteren Klebstoffen, eingesetzt werden konnten. Die Bauteilherstellung fand hierbei komplett ohne die Zugabe von neuen Spänen oder weiteren Klebstoffen, statt. Das beim Zersetzen aufgespaltete Harz bildete zusammen mit dem eingesetzten Reagenz die reaktive Komponente.

Aufgrund des abweichenden Herstellungsverfahrens der kommerziellen Spanplatte gegenüber den eigens hergestellten Bauteilen kann ein direkter Vergleich nur eingeschränkt erfolgen. Zur besseren Beurteilung bzw. Gegenüberstellung mit einer kommerziell gefertigten Spanplatte wird die Fertigung von Spanplattenmaterial im Technikumsmaßstab unter industrienahen Bedingungen angestrebt. Die Fertigung von Spanplattenmaterial im größeren Maßstab stellt zudem die Grundlage bzw. Zuarbeit für die Demonstratorherstellung dar.

Es konnte eruiert werden, dass das Fraunhofer-Institut für Holzforschung, Wilhelm-Klauditz-Institut WKI für Holzwerkstoff- und Naturfaser-Technologien (HNT) über Technologien verfügt, die die Herstellung von Spanplatten in diesem Maßstab ermöglichen. Es wurde ein entsprechender Kontakt hergestellt, Gespräche geführt und ein Versuchstag in den Räumlichkeiten vom Fraunhofer WKI in Braunschweig organisiert und absolviert. Das recycelte Material wurde mittels Siebturm in drei Fraktionen (Fraktion 1 → 0,6 mm – 1,25 mm, Fraktion 2 → 1,25 mm – 3,15 mm, Fraktion 3 → 3,15 mm – 5,00 mm) gesiebt und anschließend zu definierten prozentualen Anteilen (32 %, 43 % und 24 %) wieder zu einer einheitlichen Mischung vermengt und der

Bauteilherstellung zugeführt. Es konnten im Zug des Vorversuchstages zwei Bauteile hergestellt werden. Der Vergleich der nach ausführlicher Charakterisierung festgestellten abweichende Werte, aufgrund der abweichenden Herstellungsverfahren (offenes Verfahren, Härungszeit, etc.), aber auch aufgrund der signifikant unterschiedlichen Bauteildichten, konnte nur bedingt erfolgen. Folglich wurde bestimmt, dass die Versuchsparameter erneut angepasst werden müssen. Die Spannplattenherstellung beim Fraunhofer WKI erfolgte in einem offenen Verfahren und nicht wie in den absolvierten Vorversuchen in einem geschlossenen Verfahren (Tauchkantenwerkzeug). Aus diesem Grund wurde der Herstellungsprozess angepasst und Versuchsreihen zur Festlegung der Pressparameter durchgeführt. Zur Anpassung des Herstellungsprozesses erfolgte zunächst die Konstruktion und Fertigung eines neuen Werkzeuges aus Holz (Bild 26). Das Werkzeug besteht aus einem Rahmen sowie einem Stempel, mit der Möglichkeit einen Temperatursensor in der Mitte des Bauteils zu positionieren.

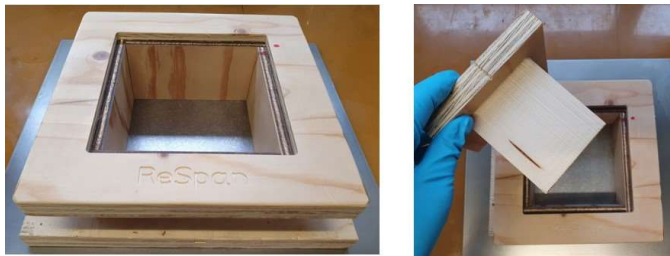


Bild 26: Holzwerkzeug mit Rahmen und passendem Stempel zum Verdichten bzw. Verpressen

Bei der Spanplattenherstellung wurden die recycelten Späne zunächst, inkl. des Temperatursensors, in den Rahmen präpariert und bei Raumtemperatur auf 2,00 cm mit Hilfe des Rahmes und Stempels komprimiert. Anschließend werden Rahmen und Stempel entfernt und das Material mittels Heißpresse auf die vorgegebene Dicke von 1,3 cm (Abstandhalter) über einen definierten Zeitraum gehärtet, Bild 27.

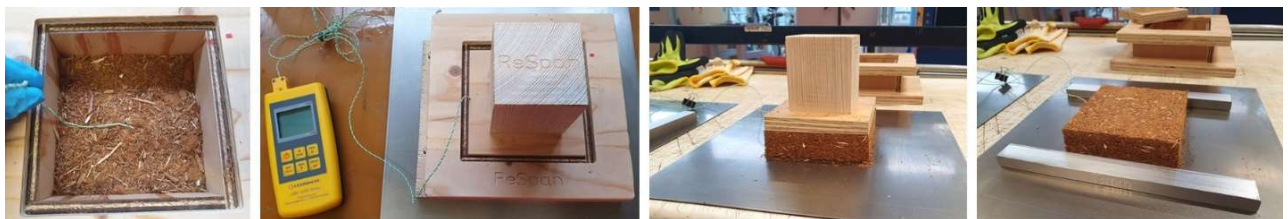


Bild 27: Holzwerkzeug mit präparierten sowie komprimierten Spänen und Abstandshaltern

Die Installation des Temperatursensors und somit die Aufzeichnung der Kerntemperatur erbrachte, im Zusammenhang mit den im Anschluss durchgeführten mechanischen Prüfungen (3-P-B), Aufschluss über die optimalen Härungsbedingungen (35 min @ 200 °C). Mit diesen Erkenntnissen ging es in die Planung der großtechnischen, industriellen Herstellung von Spanplatten aus recycelten Spänen.

Bei der Umsetzung der großtechnischen Fertigung kam es zu unvorhersehbaren Komplikationen und damit einhergehende Verzögerungen. Zudem stand das Fraunhofer WKI zur Fertigung der Spanplatten in ihrem Technikum, nicht mehr zur Verfügung. Demzufolge wurden interne Überlegungen bzgl. der Herstellung von Spanplatten größer als 110 mm x 110 mm und deren praktische Umsetzbarkeit diskutiert, da nur so das Arbeitspaket Demonstratorherstellung und –prüfung bearbeitet werden konnte. Es wurden neue Werkzeuge zur Herstellung größerer Platten besprochen und gefertigt.

Konzeption, Entwicklung und Realisierung von Presswerkzeugen

Für die Anfertigung der neuen Presswerkzeuge wurde auf zwei Teileaspekte eingegangen:

- Werkstoff aus dem Fertigungsverfahren – Stopfen, Extrudieren, Pressen → Plattenware
- Dreidimensional geformte Werkstoffe

Werkstoff aus dem Fertigungsverfahren – Stopfen, Extrudieren, Pressen

Entwurf/Visualisierungen eines Holz-Presswerkzeugs für das horizontal ausgerichtete Stopfverfahren. Von dem ursprünglich benötigten Rohplattenmaß (Breite, Höhe, Tiefe) 500 mm x 16 mm x 500 mm wurde sich in Abstimmung mit dem IAP-PYCO, aufgrund der neuen Pressvorrichtungen (Heißpress) auf das Werkzeugmaß 400 mm x 16 mm x 300 mm geeinigt. Abgeleitet aus den Anforderungen des Fertigungsverfahrens, dass in die Schritte Stopfen, Extrudieren und Pressen unterteilt ist sowie aus bekannten kleineren Pressvorrichtungen



Dreidimensional geformte Werkstoffe

Realisierung eines Aluminium-Presswerkzeugs für das horizontal ausgerichtete Stopfverfahren

24



Bild 30: Aluminium-Presswerkzeug für horizontales Stopfverfahren

Realisierung eines Aluminium-Presswerkzeugs für das vertikal ausgerichtete Stopfverfahren

Nach ersten erfolgreichen Testresultaten mit dem horizontal ausgerichteten Stopfverfahren, wurde das vertikal ausgerichtete Stopfverfahren nur konzeptionell und in Form der technischen Visualisierungen der Werkzeug-Vorrichtung erarbeitet. Aufgrund des eingeschätzten hohen Aufwands in der Handhabung und der Herstellung des Presswerkzeugs mit Kassetteneinrichtungen und Stativen wurde von einer direkten Anfertigung abgesehen. Auch die positive Bewertung der material- und fertigungstechnischen Eigenschaften, unter Berücksichtigung der Herstellung des Demonstrators in AP 5 haben die Fertigung ein Werkzeug für die vertikalen Stopfung nicht gerechtfertigt.

Fertigung von großen Spanplattenmaterialien

Bevor die Herstellung der großen Spanplatten mit den neuen Werkzeugen erfolgen konnte, wurde die Fraktionierung der vorhandenen recycelten Späne im Siebverfahren realisiert. Dazu wurde ein maschineller Siebturm (Bild 31) mit den passenden Sieben entwickelt.

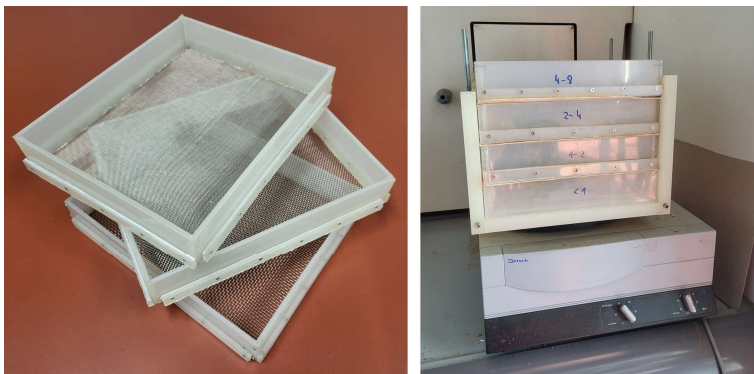


Bild 31: maschineller Siebturm und die angefertigten Siebe

Mit Hilfe der angefertigten Werkzeuge konnten große Platten im offenen und geschlossenen Verfahren (AP 5) in einer speziell umgerüsteten Heißpresse (Typ 275 von Rucks), in Anlehnung an die Versuche im kleinen Maßstab, hergestellt werden, Bild 32.

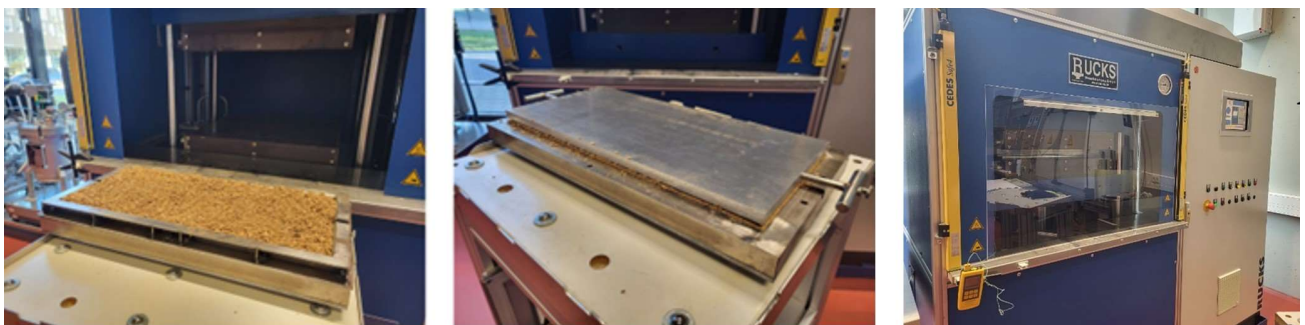


Bild 32: Geschlossenes großes Werkzeug mit recycelten Spänen

Zudem wurde ein Werkzeug gefertigt, welches es ermöglichte, eine 3D-Struktur (Welle) abzuformen. Auch mit diesem Werkzeug konnten Bauteile hergestellt und im Allgemeinen als positiv bewertet werden, Bild 33.



Bild 33: Entformung und Begutachtung des hergestellten Bauteiles

Parallel zu den Arbeiten vom Fraunhofer IAP wurden an der HNE weitere Arbeiten zur Herstellung von Holzwerkstoffplatten aus Span- und Faser-Rezyklatmassen durchgeführt. Im Labormaßstab wurde ein geeignetes Fertigungsverfahren, bestehend aus den Prozessen Zerkleinerung, Solvolyse, Lösemittelentfernung/Trocknung, Aufreinigung, Fraktionierung, Streuung, Vorverdichten und Heißpressen, erprobt. In Versuchen konnten hierbei aus separat gelösten Proben einer Melamin-beschichteten Spanplatte (P2, 19 mm) sowie einer OSB-Platte (OSB/3, 18 mm) erfolgreich kleinformatige Platten mit einer Werkstoffprüfmaschine (TT 28025, Tira GmbH) hergestellt werden.

In einer Machbarkeitsstudie wurde die Fraktionierung der Spangeometrien und die wärmeinduzierte Neuvernetzung der partiell abgebauten duroplastischen Bindemittel untersucht. Dabei wurde festgestellt, dass sich bei geeigneter Formatierung bzw. Vorzerkleinerung melaminharzbeschichteter Möbelspanplatten nach erfolgter Solvolyse und Lösemittelentfernung über eine anschließende Siebung die jeweiligen Spanfraktionen erfolgreich zurückgewinnen lassen, wobei die Beschichtung nahezu als Reinstoff in der obersten Siebfraction verbleibt (Bild 34). Bei OSB-Platten lassen sich nach dem gleichen Prinzip ebenfalls die jeweiligen Spanfraktionen für Deck- und Mittelschichten zurückgewinnen (Bild 35).

Die Menge und Siebmaschenweite der verwendeten Siebe wurde so gewählt, dass die anschließende händische Streuung des Spanvlieses einen fließenden Übergang der unterschiedlichen Fraktionen zuließ, wie er auch durch eine industriell genutzte Windstreuung realisiert wird. Durch das anschließende Heißpressen (200 °C; 0,4 N/mm²) konnten erste kleinformatige Prototypen von Span- und OSB-Platten mit definierten Rohdichteprofilen hergestellt werden (Bild 36).



Bild 34: Abgetrennte Melaminharz-Beschichtung nach Solvolyse von Spanplattenproben



Bild 35: Fraktionierte OSB-Späne nach Solvolyse und Lösemittelabzug



Bild 36: Gestreutes Spanvlies zurückgewonnener Späne mit definiertem Rohdichte-profil

Es ist anzumerken, dass der beim Heißpressen verwendete Druck von knapp 0,4 N/mm² (max. 2,5 kN auf 80 x 80 mm²) deutlich unterhalb des Bereichs lag, der in industriellen Prozessen (1,5 – 4 N/mm²) üblich ist. Dadurch konnte insbesondere in den Mittellagen keine ausreichende Pressverdichtung erreicht werden, wie in Bild 37 zu erkennen ist. Daher wurde im späteren Projektverlauf eine geeignete Laborpresse (Tischpresse Polystat 200T, Servitec Maschinenservice GmbH) beschafft, die eine Presskraft von 200 kN auf einer Fläche von 200 x 200 mm² aufbringen kann. Hiermit konnten die zuvor aufgetretenden Probleme behoben werden. Das Besäumen einer aus Faser- oder Spanrezyklat hergestellten Holzwerkstoffplatte führte infolgedessen zu keinerlei Materialausbrüchen mehr an den Schmalseiten.

	Lösemittel: 2-Aminoethanol	Lösemittel: Ethylenglycol
Ausgangsmaterial: Swiss Krono Dekorspan U566 PE - 19 mm Spanplatte (P2) mit Melamin- harz-Beschichtung (Kristallweiß, Oberfläche PE Perl)		
Ausgangsmaterial: Kronospan OSB3- Standardplatte – 18 mm OSB/3-Platte formaldehydfrei verleimt PE Perl)		

Bild 37: Übersicht der ersten ReSpan-Erzeugnisse durch Umsetzung des Recyclingprozesses im Labormaßstab

Das im Arbeitspaket bereits an Span- und OSB-Platten erprobte Fertigungsverfahren, konnte auch auf die Herstellung von MDF-Platten erfolgreich angewandt werden. Die Prozessparameter sind in Tabelle 4 aufgeführt. Bei der Sichtprüfung sind einzelne kleine Agglomerate aufgefallen. Die Bearbeitbarkeit, wie z. B. Besäumen war uneingeschränkt ohne Materialausbrüche möglich, Bild 38.



Bild 38: Aus Faserrezyklat hergestellte MDF-Platte

Zur Untersuchung der Wiedervernetzung wurden Dynamische Differenz-Kalorimetrie (DSC)-Messungen durchgeführt (Hersteller Netzsch-Gerätebau GmbH, Modell: DSC204 F1 Phoenix). Mit Hilfe der DSC-Messungen wurde die Reaktionsenthalpie der Harnstoff-Formaldehyd (UF)- Harze an Span- und MDF-Platten sowie des Methyldiphenylisocyanat (MDI)-basierten Bindemittels bei den OSB-Platten bestimmt. Je größer die Reaktionsenthalpie desto mehr Wärme wird freigesetzt und desto mehr kovalente Bindungen werden gebildet. Damit steigt mit zunehmender Reaktionsenthalpie auch der Grad der Vernetzung bzw. der Wiedervernetzung.

Im Bild 39 und 40 sind die DSC-Messungen von drei verschiedenen MDF-Rezyklaten bei denen eine unterschiedliche Trocknungstemperatur zugrunde lag (60 °C, 75 °C, 90 °C) sowie von einer Referenzprobe aus nativen Fasern und 10 % UF-Harz (bezogen auf die nativen Fasern) dargestellt. Mit zunehmender Trocknungstemperatur zeigten die Rezyklate eine erhöhte Peaktemperatur. Des Weiteren konnte bei den Rezyklat-Proben eine gegenüber der Referenzprobe deutlich geringere Reaktionsenthalpie festgestellt werden. Dies könnte daraufhin deuten, dass bei der Trocknung bereits eine Vorvernetzung stattfindet und/oder infolge der Solvolyse weniger reaktive Gruppen zur Verfügung stehen. Denkbar ist auch, dass die Referenzprobe lediglich einen höheren UF-Harz-Anteil hatte oder Lösemittelrückstände die Reaktion beeinträchtigen.

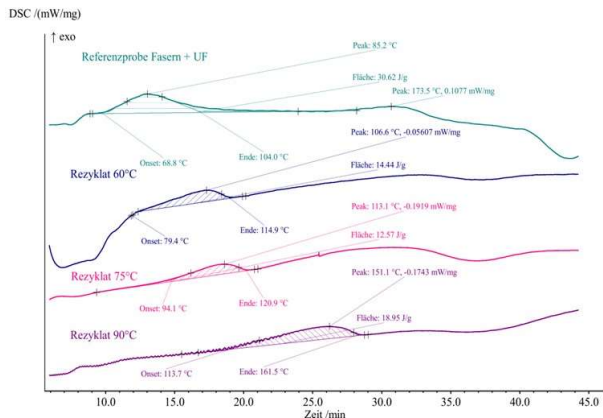


Bild 39: DSC-Messungen mit Kennzeichnung entsprechender Reaktionsenthalpien von MDF-Rezyklaten mit variierender Trocknungstemperatur sowie einer Referenzprobe

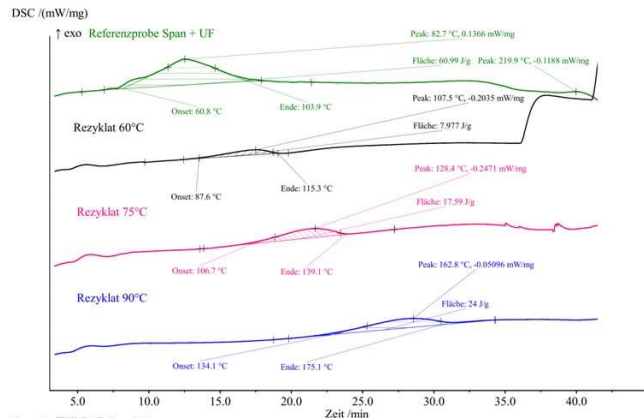


Bild 40: DSC-Messungen mit Kennzeichnung entsprechender Reaktionsenthalpien von Spanplatten-Rezyklaten mit variieren-der Trocknungstemperatur sowie einer Referenzprobe

Die Sachverhalte zur Aushärtereaktion von UF-Harz gebundenen MDF-Rezyklaten lassen sich erwartungsgemäß auch auf UF-Harz gebundene Spanplattenrezyklate übertragen, vgl. Bild 41. Ergänzend zu den DSC-Messungen an den UF-Faser- und -Spanrezyklaten wurden weitere Messungen an UF-Harz-Proben ohne Rezyklat, die mit unterschiedlichen Lösemittelanteilen (0% bis 10% Ethanolamin (2-Aminoethanol)) versetzt wurden, durchgeführt. Infolgedessen wurde die Reaktionsenthalpie sowie Peaktemperatur in Abhängigkeit vom Lösemittelanteil (2-Aminoethanol) bestimmt (Bild 41). Die Ergebnisse zeigen deutlich, dass die Reaktionsenthalpie mit sinkendem Lösemittelanteil ansteigt. Gleichzeitig sinkt die Peaktemperatur mit abnehmendem Lösemittelanteil. Das bedeutet, dass das Lösemittel massiven Einfluss auf die Aushärtereaktion des UF-Harzes hat, indem es die Reaktion sowohl verzögert als auch abschwächt. Da die DSC-Messungen an den UF-Harz-Rezyklaten mit steigender Trocknungstemperatur (und damit eingehender Reduktion des Lösemittels) eine steigende Peaktemperatur zeigte, muss von einer gewissen Alterung des UF-Harzes infolge erhöhter Trocknungstemperaturen ausgegangen werden. Die Lösemittelabhängige Reaktionsenthalpie zeigte dagegen zwischen den UF-Harz-Proben ohne Rezyklat und den UF-Harz-Rezyklat-Proben einen ähnlichen Trend und somit keine Indizien für eine ausgeprägte Vorvernetzung.

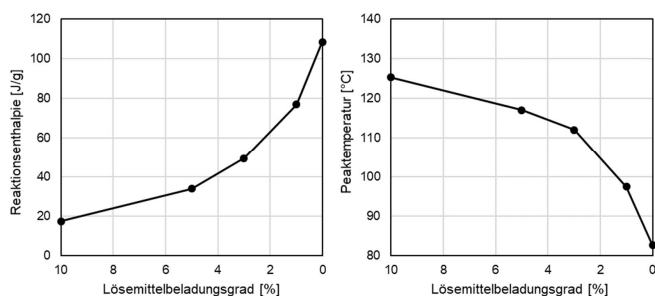


Bild 41: Reaktionsenthalpie und Peaktemperatur in Abhängigkeit des Lösemittelbeladungsgrades (2-Aminoethanol)

Im Gegensatz zu den UF-Harz-gebundenen Rezyklaten konnte bei den mit MDI-gebundenen OSB-Rezyklaten keine erneute Vernetzungsreaktion nachgewiesen werden (Bild 42). Der Peak bei 125 °C wird als endotherme Wasserverdampfung interpretiert.

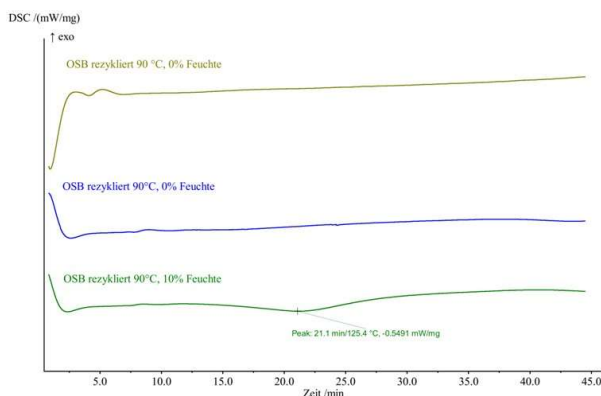


Bild 42: DSC-Messungen von OSB-Rezyklaten

Die Festigkeit wurde mittels Bestimmung der Querkzugfestigkeit nach EN 319 untersucht. Hierfür wurden die Prüfkörper aus Werkstoffplatten geschnitten, die im Labormaßstab nach den in Tabelle 4 dargelegten Prozessschritten und –parameter gefertigt worden sind.

Tabelle 4: Prozessschritte und –parameter für die Prüfplatten zur Festigkeitsuntersuchung

Prozesssschritte	OSB	Spanplatte	MDF
Solvolyse	1h im Rotationsverdampfer bei 150 °C (atmosphärischer Druck) Lösemittel: 2-Aminoethanol (Lösemittel: Ausgangsmaterial --> 1:1)		
Lösemittelabzug	1h im Rotationsverdampfer bei ca. 75 °C und 5-10 mbar		
Zerfasern	nein	nein	ja, mittels Refiner
Ofentrocknung	60 °C, 75°C u. 90 °C	75 °C	60 °C u. 75 °C
Fraktionierung	ja, in Deck- und Mittelschichten		nein
Streuung	separates Einstreuen von Deck- und Mittelschichten		kein separates Einstreuen von Deck- und Mittelschichten, da keine Fraktionierung erforderlich ist
Vorverdichtung	nein	kaltes Vorverdichten	
Heißpressen	mittels Laborpresse (Tischpresse Polystat 200T, Servitec Maschinenservice GmbH) bei 200 °C, 20 min; Pressdruck: unbekannt, da mit Zulagen die Solldicke (7 mm) der Platten eingestellt wurde		
Konditionierung	Lagerung bei 20 °C/ 65% relative Luftfeuchte bis zur Gewichtskonstanz		

Aus den nach Tabelle 4 hergestellten Werkstoffplatten wurden Proben mit einer Grundfläche von 50 x 50 mm² herausgeschnitten und zu Prüfkörpern für die Bestimmung der Querkzugfestigkeit weiterverarbeitet (Bild 43).



Bild 43: Prüfkörper zur Bestimmung der Querkzugfestigkeit in Anlehnung an DIN EN 319

Das Faserrezyklat wurde für die Herstellung der MDF-Platten vor dem Verpressen bei 60 °C oder 75 °C getrocknet, um den für die Solvolyse notwendigen Lösemittelanteil (2-Aminoethanol/ Ethanolamin) zu entfernen bzw. zu verringern. Die Hergestellten MDF-Platten wiesen eine Rohdichte von $0,77 \pm 0,03 \text{ g/cm}^3$ auf. Bei der 60 °C Trocknung variiert die Querkzugfestigkeit stark zwischen den Versuchsserien. Die Ergebnisse zur Querkzugfestigkeit sind in Bild 44 dargestellt. V1 weist mit etwa $0,05 \text{ N/mm}^2$ die geringste Festigkeit auf. V4 zeigt mit $0,43 \text{ N/mm}^2$ im Mittel die höchste Festigkeit. Bei der 75 °C Trocknung sind die Schwankungen zwischen den Versuchsserien deutlich geringer. Die Querkzugfestigkeit ist insgesamt auf einem höheren Niveau, wobei die Festigkeit der V4 nicht ganz erreicht wurde. Die minimale Festigkeit bei der 75 °C Trocknung ist dagegen deutlich höher als bei der 60 °C Trocknung. Die starken Schwankungen bzgl. der Querkzugfestigkeit bei der 60 °C sind auf Probleme während der Trocknung zurückzuführen. Hier wurde das Fasermaterial während der Trocknung nicht oft genug umverteilt, sodass deutliche Unterschiede im Lösemittelgehalt zwischen den hergestellten MDF-Platten resultierten. Die für MDF-Platten erforderliche Mindestfestigkeit von $0,65 \text{ N/mm}^2$ konnte für die aus Faserrezyklat hergestellten Proben nicht erreicht werden.

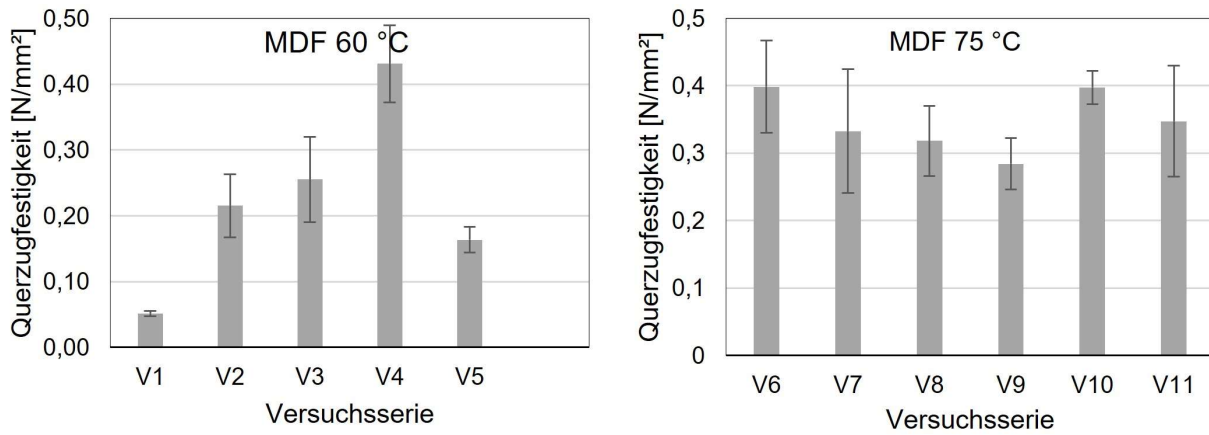


Bild 44: Dargestellt sind die arithmetischen Mittelwerte der Querzugfestigkeit von MDF-Platten, die aus Faserrezyklat hergestellt wurden. Das Faserrezyklat unterlag zur Lösemittelreduktion dabei unterschiedlichen Trocknungstemperaturen: 60 °C und 75 °C.

Die starke Streuung zwischen V1 und V5 wurde genutzt, um die Festigkeit in Abhängigkeit des Lösemittelgehaltes darzulegen. Dabei zeigte sich, dass das Lösemittel, ähnlich wie bei den DSC-Untersuchungen, einen sehr starken Einfluss auf die Ergebnisse hat (Bild 45). Demnach sinkt die Querzugfestigkeit stark mit zunehmenden Lösemittelgehalt.

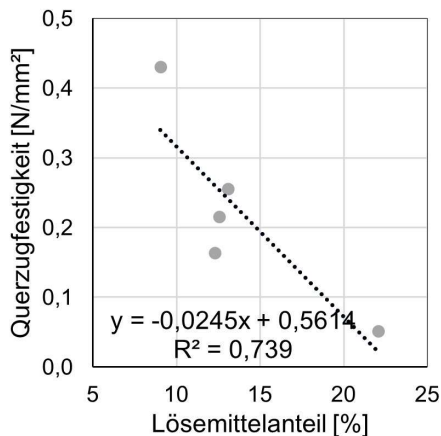


Bild 45: Querzugfestigkeit in Abhängigkeit des Lösemittelanteils von MDF-Platten aus rezykliertem Fasermaterial

Die Querzugfestigkeit von Spanplatten aus rezykliertem Spanmaterial wurde ebenfalls untersucht. Dabei wurden 5 Prüfserien berücksichtigt. Eine Prüfserie bestand aus verpressten nativen Fichtenspänen, die ohne zusätzliches Bindemittel bei 200 °C für 20 Minuten verpresst wurden. Bei zwei Prüfserien wurde als Ausgangsmaterial eine zugekaufte (neue) Spanplatten (P3) verwendet, die rezykliert und wieder verpresst wurde. Zwei weitere Prüfserien bestanden aus einem Mix verschiedenster Spanplattenfragmente, die vom Projektpartner PreZero zur Verfügung gestellt wurden. Die Spanplatten aus den Spanrezyklaten wiesen eine Rohdichte von $0,89 \pm 0,07 \text{ g/cm}^3$ auf. Die Ergebnisse der Querzugfestigkeit der Spanplatte sind im Bild 46 dargestellt.

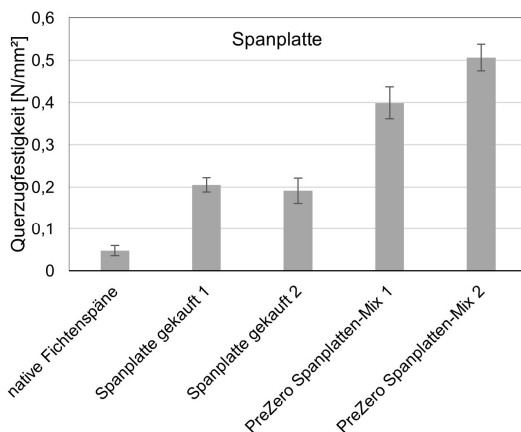


Bild 46: Arithmetischen Mittelwerte von rezyklierten Spanplatten sowie von verpressten nativen Fichtenspänen.

Das Diagramm zeigt die arithmetischen Mittelwerte von rezyklierten Spanplatten sowie von verpressten nativen Fichtenspänen. Die nativen Fichtenspäne zeigen mit ca. 0,05 N/mm² die mit Abstand geringste Querkzugfestigkeit. Dies ist darauf zurückzuführen, dass hier ausschließlich Holzinhaltsstoffe, vor allem Lignin, als Bindemittel wirken. Das verpresste Spanrezyklat der zugekauften Spanplatten zeigte mit jeweils ca. 0,2 N/mm² eine deutlich höhere Festigkeit als die verpressten nativen Fichtenspäne. Die höchste Querkzugfestigkeit zeigten die verpressten Spanrezyklate aus dem Spanplatten-Mix von PreZero mit ca. 0,4 bzw. ca. 0,5 N/mm². Die Ergebnisse zeigen deutlich, dass das Spanrezyklat reaktive UF-Harz-Bindungen beinhalten muss. Des Weiteren konnte nachgewiesen werden, dass es möglich ist, aus rezykliertem Spanmaterial erneut Spanplatten herzustellen, die die geforderte Mindestfestigkeit gemäß DIN EN312 von 0,4 N/mm² für P3 Spanplatten (Dickenbereich 6-13 mm) erfüllen.

Die Querkzugfestigkeit aus verpresstem OSB-Rezyklat zeigte keine hinreichende Festigkeit (Bild 47). Die Mindestfestigkeit von > 0,34 N/mm² für OSB3 mit einer Dicke von 6-9 mm wurde deutlich verfehlt. Ursächlich hierfür ist, dass die MDI-gebundenen OSB-Rezyklate keine erneute Vernetzungsreaktion zulassen. Dies zeigten bereits die DSC-Messungen.

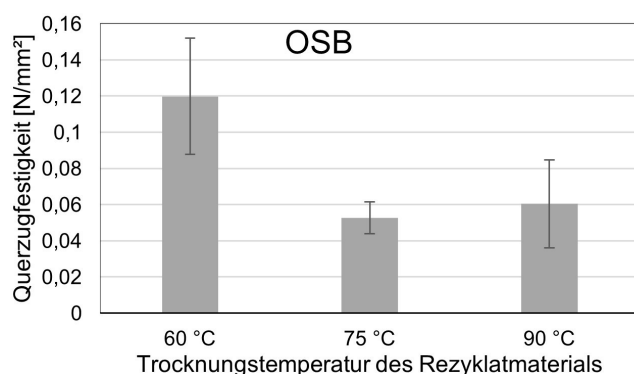


Bild 47: Querkzugfestigkeit von OSB-Rezyklat, das zuvor bei Temperaturen von 60 °C, 75 °C oder 90 °C getrocknet wurde

Für die Untersuchung der Emissionen wurden MDF-Platten nach den in der folgenden Tabelle 5 aufgeführten Parametern hergestellt.

Tabelle 5: Prozessparameter und Platteneigenschaften für Proben zur Emissionsuntersuchung

Prozessparameter					Platteneigenschaften	
Proben-Nr.:	Ausgangsmaterial	Trocknung der MDF-Rezyklate	Presstemperatur [°C]	Presszeit [Minuten]	Lösemittelgehalt [%]	Rohdichte [g/cm ³]
1	MDF-Rezyklat	24 h Ofentrocknung bei 75 °C	140	20	17,80	0,75
2	MDF-Rezyklat		160		17,33	0,83
3	MDF-Rezyklat		180		14,29	0,85
4	MDF-Rezyklat		200		10,65	0,86
5	MDF-Rezyklat	7 h „Schleudertrocknung“ bei 75°C und 1200 U/min	160		18,26	0,73
6	MDF-Rezyklat		180		12,41	0,76
7	MDF-Rezyklat		200		7,84	0,74
8	Verhältnis Rezyklatfaser: Frischfaser 01:03	24 h Ofentrocknung bei 75 °C	180		1,39	0,66
9	Verhältnis Rezyklatfaser: Frischfaser 01:03				8,89	0,72
10	Verhältnis Rezyklatfaser: Frischfaser 03:01				18,10	0,79

Die Emissionsmessungen wurden von der Entwicklungs- und Prüflabor Holztechnologie GmbH durchgeführt. Die Tabelle 6 zeigt die Ergebnisse der Gaschromatographie mit Massenspektrometrie-Kopplung (GC/MS) und die Tabelle 7 zeigt die Ergebnisse der HPLC-Messungen. Demnach sinken die Essigsäureemissionen mit zunehmender Presstemperatur. Essigsäureemissionen aus Holzwerkstoffen sind auf den Abbau von Acetylgruppen in den Hemicellulosen zurückzuführen. Dieser Abbauprozess wird durch verschiedene Faktoren, wie z.B. erhöhter Feuchte und Wärme beschleunigt. Denkbar ist, dass die Acetylgruppen bereits überwiegend, während der Solvolyse und Rezyklat-Trocknung abgebaut worden sind. Während des Pressvorgangs könnte dann ein größerer Anteil der zuvor abgespaltenen Essigsäure durch höhere Presstemperaturen verflüchtigt worden sein. Auffällig ist, dass die Essigsäureemissionen der Proben mit „Schleudertrocknung“ (Probe 5-7) durchweg deutlich geringer ausfallen als bei den Proben mit Ofentrocknung. Wurde das Faserrezyklat mit Frischfasern versetzt (Probe 8-10) führte dies im Vergleich mit den Proben 1-4 (ebenfalls Ofentrocknung, aber 100% Rezyklatbasis) ebenfalls zu einer Reduktion der Essigsäureemissionen.

Tabelle 6: Prüfkammerkonzentration - WOC/ VOC/ SVOC mittels GC/MS in µg/m³

Stoffgruppe	Verbindung	Pro-be 1	Pro-be 2	Pro-be 3	Pro-be 4	Pro-be 5	Pro-be 6	Pro-be 7	Pro-be 8	Pro-be 9	Pro-be 10
Alkohole	Ethanol				5	17	11				
	1-Butanol					47				12	
	1-Pentanol								8		
	1-Methoxy-2-propanol	16									
Aldehyde	n-Pentanal								13	10	
	Hexanal	7				1			47	33	
	Nonanal							1			
Carbonsäuren und Ester	Essigsäure	227	114	114	69	47	47	37	74	90	88
	n-Hexansäure								58		
	3-Methyl-cyclopentylacetat								5		
	Isopropylpalmitat							6			
Kohlenwasserstoffe	Cyclohexan							1			
	n-Heptan					1		1			
	n-Dodecane					1		1			
	1,2,4,5-Tetramethylbenzen		7								
	Aliphatische Kohlenwasserstoffe					1	12	14			
Lactone und andere Sauerstoffverbindungen	Butyrolacton							1			
	Furfural							1			
Sonstige Verbindungen	Butylglykol										5
	1,3 Diazine	5									
nicht identifiziert	< C ₆	7	< 5	< 5				< 5	< 5	< 5	< 5
	C ₆ -C ₁₆	19						1			
	C ₁₆ -C ₂₂	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5		< 5	< 5	< 5

Tabelle 7: Prüfkammerkonzentration - Aldehyde und Ketone mittels HPLC in $\mu\text{g}/\text{m}^3$

Verbindung	Probe 1	Probe 2	Probe 3	Probe 4	Probe 5	Probe 6	Probe 7	Probe 8	Probe 9	Probe 10
Formaldehyd	11	6	4	7	5	5	8	27	11	8
Acealdehyd	220	243	236	253	204	129	140	36	92	162
Aceton	25	24	32	26	50	13	16	55	25	8

Bei der Freisetzung von Formaldehyd ist ein Einfluss der Presstemperatur nicht feststellbar. Stattdessen ist ein Einfluss vom Anteil der Frischfasern auffällig, vgl. Tabelle 7 (Probe 8-10). Mit zunehmendem Anteil von Frischfasern steigt die Freisetzung von Formaldehyd. Dieser Sachverhalt ist darauf zurückzuführen, dass die Frischfasern mit 10 % UF-Harz versetzt wurden. Es ist festzuhalten, dass sich die Formaldehyd-Emissionen von allen untersuchten Proben deutlich unterhalb des nach DIN EN 13986 maximal zulässigen Grenzwerts ($< 0,124 \text{ mg}/\text{m}^3$) befinden.

Arbeitspaket 4: Trennung von Mehrstoffsystemen

Im Rahmen des Projektes wurden Versuchsreihen zur Stofftrennung durchgeführt. Es erfolgten Untersuchungen zur Trennung eines Mehrstoffsystems auf Basis gelöster Proben aus einer Verbundwerkstoffplatte, bestehend aus Spanwerkstoff, Hartfaserplatte, Karton (Wabenplatte), Acryllackbeschichtung, ABS-Kante sowie metallischen Verbindungsmitteln. Bei der Verbundplatte handelte es sich um eine 40 mm dicke Wabenplatte mit Deckschichten aus lackierten Hartfaserplatten und Randbereichen aus Spanwerkstoff mit einer ABS-Bekantung zur Anwendung im Möbelbau. Während der Solvolyse in 2-Aminoethanol (Ethanolamin) bei erhöhter Temperatur (ca. 130°C) löste sich der Acryllack im Lösemittel, die ABS-Kante erweichte und trennte sich ab. Nach Entfernung des Lösemittels und anschließender Trennung mittels Siebung waren Agglomerate aus Spänen und Fasern zu erkennen. Eine erfolgreiche Trennung in sinnvolle Fraktionen zur Wiederverwendung zwecks Span- oder Faserwerkstoffherstellung konnte nicht realisiert werden. Darüber hinaus lag der gelöste Acryllack nun als Feststoff dispergiert im Span-Faser-Gemisch vor.

Folglich wird eine Trennung der Werkstoffe vor der Solvolyse als sinnvoll betrachtet. Die Solvolyse bzw. Trennung von Mehrschichtsystemen mit einer Melamin-Deckschicht, wie sie beispielsweise in Küchenarbeitsplatten eingesetzt wird, konnte hingegen realisiert werden. Nach einer Vorzerkleinerung und der Solvolyse konnte nach Entfernung bzw. Reduktion des Lösemittels die Beschichtung, welche durch die Solvolyse nicht angegriffen wird, mittels Siebung separiert und die Späne fraktioniert werden.

Die durchgeführte Hochskalierung des Recyclingprozesses von Spanplatten in den Industriemaßstab zeigte, dass sich eine vorangegangene Auftrennung des Mehrstoffsystems vor dem Auflösen positiv auf das Recyclat und deren Wiederverwendbarkeit auswirkt. Folglich wurde die Trennung von Mehrstoffsystemen umfassend untersucht.

Baustellenmischabfallsortieranlage PreZero NL, Groningen

Die PreZero Holz verfügt in den Niederlanden über eine moderne Anlage, die mit der Hilfe von Zerkleinerungsverfahren, Sieb- sowie Nahinfrarot (NIR)-Technik in der Lage ist, Baustellenmischabfallfraktionen aufzureinigen und in unterschiedliche Fraktionen zu trennen. Hier werden erfolgreich Siebe der Firma SPALECK GmbH & Co. KG und NIR-Trenntechnik der Firma TOMRA Systems ASA eingesetzt. So kann aus einem Abfallgemisch ein Altholzgemisch mit einer Reinheit von ca. 90 % hergestellt werden. Da die weiterführende Verwendung des Materials keine Trennung innerhalb der verschiedenen Holzfraktionen (bspw. Vollholz, Spanplatte, MDF) benötigt, sieht die Anlage diese Art der Trennung auch nicht vor. Die Anlage beweist jedoch eindrucksvoll, dass auch verunreinigte Holzfraktionen mit der passenden Technik für die Wiederverwendung in Spanplatten vorbereitet werden können. Nicht zu vernachlässigen ist an dieser Stelle die wirtschaftliche Komponente, auf die zu einem späteren Zeitpunkt des Projekts separat eingegangen wird. Die Ergebnisse aus den Niederlanden zeigten allerdings auch, dass es weiterer Technik bedarf, um zwischen den einzelnen Fraktionen innerhalb des Holzgemisches zu trennen. Nur so kann die notwendige Reinheit zu recycelnden Spanplatten erreicht werden, die benötigt wird, um den nachfolgenden chemischen Prozess erfolgreich durchführen zu können.

Technikum STEINERT GmbH, Pulheim

Einen wesentlichen Mehrwert zur Erreichung dieses Ziels brachte dabei der Versuch im Technikum der Firma STEINERT GmbH in Pulheim. Hier wurden verschiedene Versuche mit einem Altholzgemisch durchgeführt, um die einzelnen Bestandteile des Altholzes, Vollholz, Spanplatte und MDF sowie Störstoffe, voneinander zu trennen. Der Fokus lag dabei auf der Abtrennung von Störstoffen, um die Qualität des Produkts zu verbessern und um nachfolgende Prozesse zu schützen. Dafür wurden zweistufig Störstoffe durch NIR-Technik mit HSI-Technologie abgetrennt, sowie ein Scavenger Schritt auf die erste Störstofffraktion angewendet, um das Ausbringen zu verbessern. Der genaue Versuchsbericht ist dem Anhang zu entnehmen. Einen Überblick zum grundsätzlichen Anlagenaufbau schafft das nachstehende Bild 48 .



Bild 48: Technikumsanlage Firma STEINERT GmbH

Die Ergebnisse des Versuchs bei STEINERT beweisen, dass die Sortiertechnik in der Lage ist, einzelne Altholzfraktionen zu sortieren und die Qualität einer reinen Spanplattenfraktion zu verbessern. Der Test hat ergeben, dass folgende Faktoren eine Rolle bei der Reinheit der aussortierten Fraktionen spielen:

- Qualität des Inputmaterials
- Bandbelegung
- Bandgeschwindigkeit
- Materialbeschaffenheit (Beschichtungen etc.)
- Positionierung des Materials auf dem Band (einseitige Detektion)
- Häufigkeit der Sortierung/Anzahl Sortiermaschinen

Eine weitere Erkenntnis des Versuchs ist, dass auch bei doppelter Störstoffsartierung keine 100%ige Reinheit erreicht werden kann, während gleichzeitig ein wesentlicher Gut-Anteil des Materials im Störstoffanteil verbleibt. Dennoch hat sich die Qualität des sortierten Materials gegenüber dem Inputprodukt deutlich verbessert. Ob diese Verbesserung ausreicht, um einen störungsarmen chemischen Auflösungsprozess zu gewährleisten, ist im weiteren Verlauf des Projekts zu prüfen.

Versuchssortieranlage TRETORG GmbH, Berlin

Weitere Erfahrungen konnten bei der Firma TRETORG GmbH in Berlin gesammelt werden. Dort werden NIR-Sortiermaschinen sowie die durch die Firma TOMRA Systems ASA patentierte GAIN-Technologie eingesetzt, um Sperrmüllholz in Massivholz sowie Holzwerkstoffe zu trennen. Anschließend werden die Holzwerkstoffe durch die gleiche Technologie in Spanplatten und Faserplatten getrennt. Es gibt keinen detaillierten Versuchsbericht zu diesem Test, dennoch zeigten sich die Ergebnisse als gut. Die Reinheit des sortierten Materials wirkte erstaunlich hoch und ist den nachstehenden Bildern (Bild 49) zu entnehmen.



Bild 49: Sortierter Massivholzanteile (li) und Holzwerkstoffanteil (re)

Anhand der gewonnenen Erkenntnisse aus den Sortierversuchen im Technikum STEINERT in Pullheim und der Versuchsortieranlage TRETORG in Berlin wurde das Ziel verfolgt, eine geeignete mechanische Sortiertechnik zu konzipieren. In enger Zusammenarbeit mit dem Ingenieurbüro JAPES aus Springe wurde die mechanische Aufbereitung in Kombination mit dem chemischen Solvolyse-Verfahren sowie der anschließenden Wiederverpressung zu neuen Holzwerkstoffen in ein umfassendes Komplettfließbild integriert.

Anlagenkonzept

Nachfolgend werden die Ergebnisse im Anlagenkonzept (Bild 50) dargestellt. Die Erarbeitung erfolgte in Abstimmung mit dem Ing.-Büro Japes GmbH aus Springe. Im Projekt ReSpan wurden die einzelnen, notwendigen Schritte zur Aufbereitung und der Verarbeitung von Altholz zur neuen Holzwerkstoffplatte betrachtet. Der Aufbereitungsprozess ist in diesem Fließschema dargestellt. Der Prozess ist in die folgenden Bereiche gegliedert:

- Gruppe 1 Zerkleinerung
- Gruppe 2 Sortierung
- Gruppe 3 Knetreaktor
- Gruppe 4 Destillation
- Gruppe 5 Reagenz Dosierung
- Gruppe 6 Siebung
- Gruppe 7 Formung
- Gruppe 8 Presse
- Gruppe 9 Sägen
- Gruppe 10 Ab stapelung
- Gruppe 11 Pneumatik
- Gruppe 12 Energieanlage

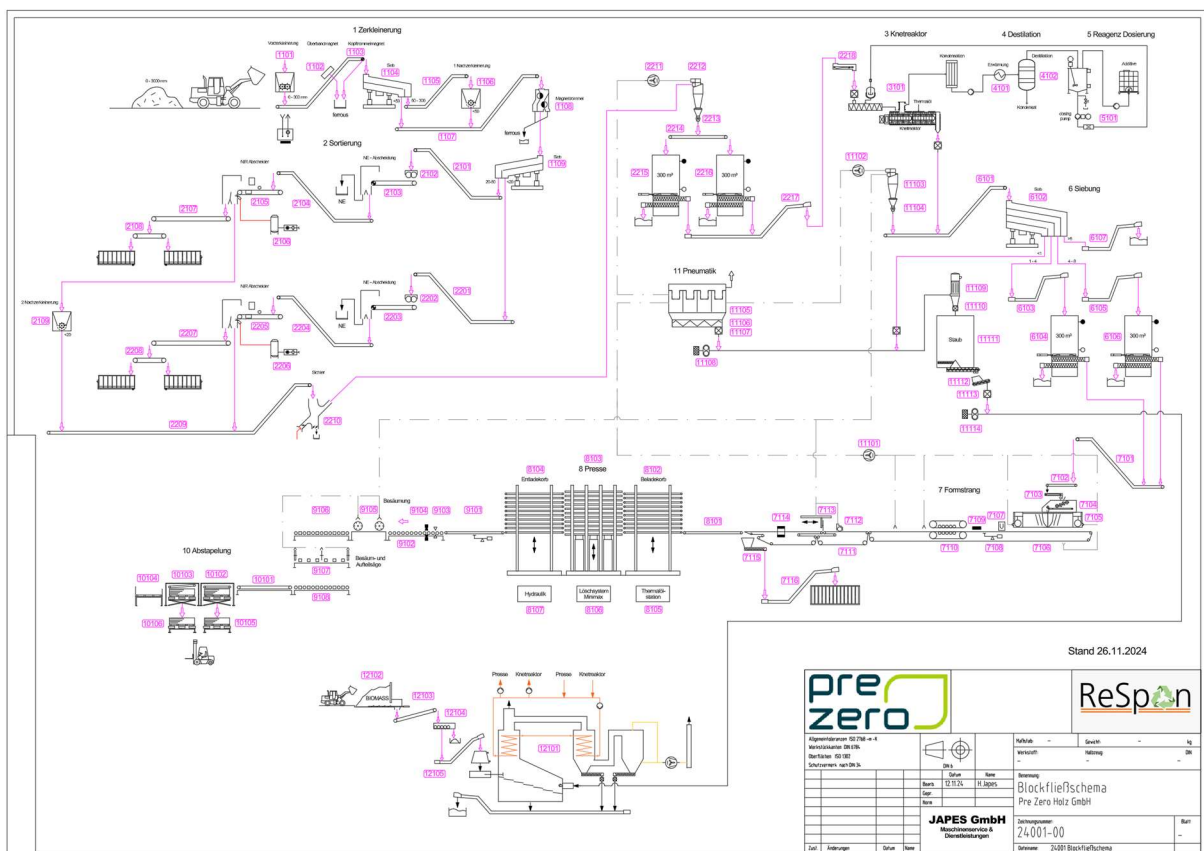


Bild 50: Anlagenkonzept ReSpan (Gesamtfließbild) JAPES GmbH

Gruppe 1 – Zerkleinerung

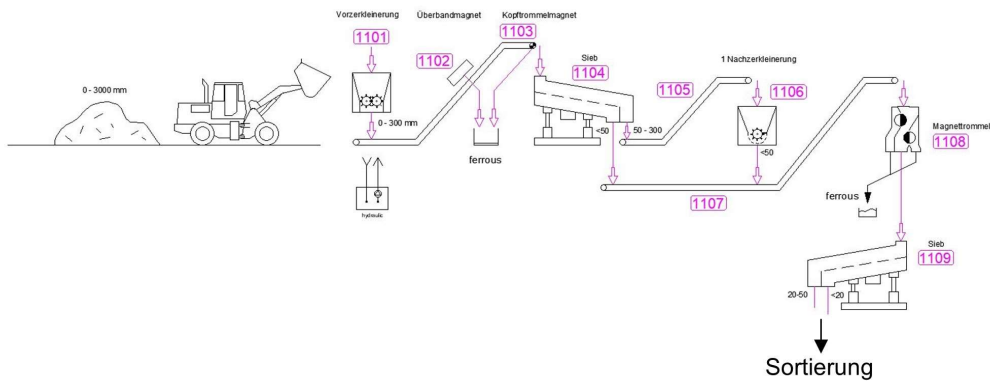


Bild 51: Schematische Darstellung der Zerkleinerung

Zur Aufbereitung des Materials wird das Altholz (Sperrmüll) in einem Wellenbrecher (1101) auf eine Korngröße von 0 – 300 mm zerkleinert. Über einen Gurtförderer (1103) wird das Altholz dem Sieb (1104) zugeführt. Dabei wird mit einem Überbandmagnet (1102) und einer Magnettrommel im Förderer Eisen-Metall aus dem Produktstrom entfernt. Das Sieb trennt den Materialstrom in zwei Fraktionen. Die Körnung < 50 mm wird direkt durch die Magnettrommel (1108) auf das nachgeschaltete Sieb (1109) gegeben. Die Körnung 50 – 300 mm wird in einem Nachzerkleinerer (Shredder) (1106) auf eine Korngröße < 50 mm gebracht und dann auch durch die Magnettrommeln dem zweiten Sieb zugeführt. Dabei werden im Doppelmagnettrommelabscheider weitere Eisenanteile aus dem Produktstrom entfernt. Im zweiten Sieb wird das zerkleinerte Altholz in die Fraktionen < 20 und 20 – 50 mm getrennt. Diese beiden Fraktionen werden dann über Förderer in je einen Sortierstrang gefördert.

Gruppe 2 – Sortierung

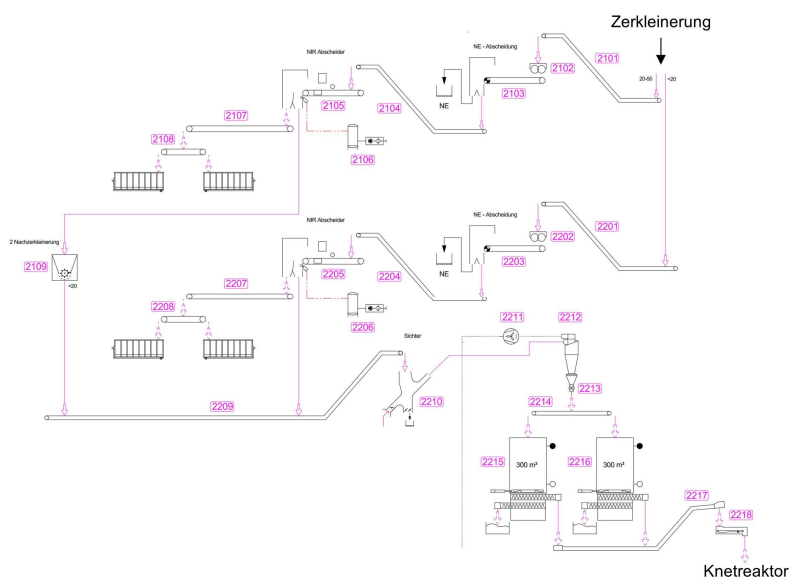


Bild 52: Schematische Darstellung der Sortierung

Die beiden Sortierstränge sind gleich aufgebaut. Durch das getrennte Sortieren der verschiedenen Korngrößen <20 und 20 – 50 mm wird ein sehr hoher Reinheitsgrad an Spanplattenabfällen erreicht. In den **NE-Abscheidern** (Wirbelstromabscheidern) (2103, 2203) wird das Material zunächst über einen Rotationsverteiler (2102, 2202) gleichmäßig über die Breite auf dem Gurtförderer des Wirbelstromabscheiders verteilt.

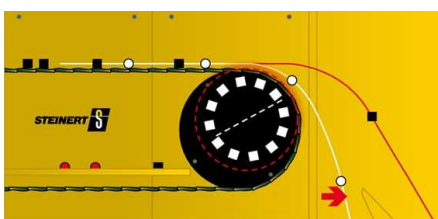


Bild 53: Wirbelstromabscheider Prinzip – Fa. Steinert

Das in der Abwurftrammel vorhandene Permanentmagnetsystem erzeugt durch die Rotation ein hochfrequentes, magnetisches Wechselfeld. Hierdurch entstehen in den leitfähigen NE-Metallen Wirbelströme, die dann ihr eigenes Magnetfeld erzeugen, die dem äußeren Feld entgegenwirken. So werden die NE-Teile aus dem Materialstrom abgelenkt. Dabei wird eine optimale Sortierung durch die richtige Einstellung des exzentrisch in der Abwurfwalze angeordneten Polsystems erreicht. Die NE-Teile werden dann in einem Container aufgefangen. Das Holz wird über einen Förderer an die nächste Sortiereinrichtung übergeben. Das von Metallen gereinigte Material wird nun in **NIR-Abscheidern** (2105, 2205) in Spanplatten und andere Stoffe getrennt. Der NIR (Nahinfrarot)-Abscheider arbeitet in einem für den Mensch nicht sichtbaren Wellenlängenspektrum, mit dem materialtypische Muster nach Anregung mit Licht detektiert werden können. So können kleinste Unterschiede in der chemischen Zusammensetzung der Materialein erkannt werden.

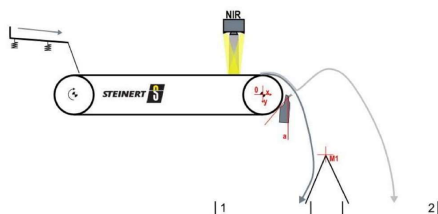


Bild 54: Nahinfrarot (NIR) Abscheider Prinzip – Fa. Steinert

Die NIR-Abscheider lassen sich zusätzlich mit weiteren Systemen zur Erkennung von Störstoffen ausrüsten. So können zum Beispiel über einen Laser Fehlwürfe erkannt werden und durch eine Induktionsspule weitere Metalle detektiert werden. Die vom Sortierer erkannten Störstoffe werden nach der Abwurfwalze im freien Fall durch einen Luftstrahl abgelenkt und als separater Stoffstrom in einen Container gegeben. Die Spanplatten aus der Sortierlinie für die Korngröße 20 – 50 mm werden in einer zweiten Nachzerkleinerung (2109) auf eine Korngröße < 20 gebracht und gemeinsam mit dem Spanmaterial aus der Sortierlinie mit der Korngröße < 20 mm einem Sieb (2210) zugeführt. Im Sieb wird das Material in einen diagonal ausgerichteten Luftstrom gegeben. Dabei wird das Material um ca. 120° umgelenkt. Schwere Teilchen im Materialstrom fallen hierbei nach unten aus dem Sieb in eine Auffangbox. Der Abscheidegrad des Siebs wird durch Regelklappen am Lufteintritt und Grobteilaustritt eingestellt. Das Gutmaterial wird über das pneumatische Transportsystem zur Siloanlage gegeben. Die Rundsilos (2215, 2216) sind so ausgelegt, dass die Sortierung in nur einer Schicht am Tag betrieben werden muss. Vor der Weiterverarbeitung wird das Material gewogen. Das der Reinigung nachgeschaltete Aufschlusssystem wird kontinuierlich über 3 Schichte betrieben.

Gruppe 3 – Knetreaktor (Fotos und Texte - Fa. LIST Technology)

Die Knetrockner mit einer Welle (DISCOTHERM B) und mit zwei Wellen (ORP (Opposite-Rotating Processor)) wurden für die Verdampfung und Trocknung von schwierigen Industrieschlämmen und Destillationsrückständen in der chemischen und verwandten Prozessindustrie entwickelt und bewährt. Bei dieser Art von Kontaktrocknern (indirekt) erfolgt das Verdampfen und Trocknen in einem einzigen Schritt ohne Rückführung von trockenem Material. Da kein Rauchgas verwendet wird, findet eine vollständige Kondensation der Dämpfe statt, und die nicht kondensierbaren Abgase und Gerüche sind minimal.

Die Knetrockner DISCOTHERM B und ORP befinden sich zwischen einfachen Schneckenanlagen mit relativ kleinen Volumen- und Wärmeübertragungsbereichen und herkömmlichen Paddeltrocknern mit größeren Volumina, größerer Wärmeübertragungsfläche, aber ohne Kneteffekt und Selbstreinigung der Wärmeaustauschflächen. Die Knetrockner DISCOTHERM B und ORP kombinieren die effektive Misch- und Knetwirkung von Schneckenaggregaten (spezifische Knetenergie von bis zu 0,25 kWh/kg) mit Kapazitäten und Wärmeübertragungsbereichen, die mit den klassischen Paddeltrocknern oder Tauchscheibentrocknern vergleichbar sind. DISCOTHERM B-Maschinen können sowohl für den kontinuierlichen als auch für den Batch-Betrieb ausgelegt werden. Das Gerät besteht aus einem horizontalen, zylindrischen Gehäuse und einer konzentrischen Rührwelle mit Scheibenelementen senkrecht zur Achse, die periphere Misch-/Knetbalken tragen. Stationäre hakenförmige Stangen, die in die Schale eingelassen sind, interagieren mit den Wellen- und Scheibenelementen und reinigen diese, während sie sich drehen. Die Anordnung der Scheibenelemente, die Misch-/Knetbalken und die Form der statischen Konterhaken verleihen dem Material eine Vorwärtsbewegung des Pfropfenflusses.

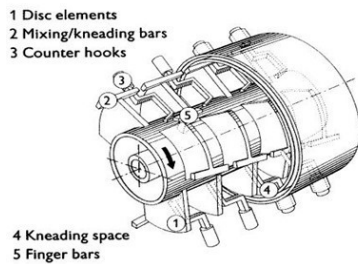


Bild 55: DISCOTHERM B operating Principle

Die Knetmaschinen DISCOTHERM B und Redox arbeiten mit einem Füllstand von 60 bis 80 % des Gesamtvolumens, so dass ein ausreichendes freies Volumen für die Gasabkopplung übrigbleibt. Das Endprodukt ist in der Regel ein rieselfähiges Material. Der durchschnittliche Füllstand in der Anlage wird durch die Höhe eines verstellbaren Wehrblechs beim Auslauf gesteuert. Im Gegensatz zu Schneckenverarbeitungseinheiten ist die axiale Förderleistung unabhängig von der Rührwerksdrehzahl, so dass die Drehzahl zur Optimierung des Wärmeübergangs, der Verweilzeit und der Minimierung des Verschleißes gewählt werden kann. DISCOTHERM B-Geräte für den Dauerbetrieb sind in verschiedenen Größen bis zu 16.500 Litern erhältlich, was einer Wärmeaustauschfläche von 128 m² entspricht. Für den Chargenbetrieb sind 11.000 Liter, was 64 m² entspricht, die aktuelle maximale Größe. Der Gehäusemantel kann ummantelt oder mit einer Schnecke versehen und zusammen mit der Rührwelle und den Scheibenelementen mit Dampf, heißem oder unter Druck stehendem Wasser oder Thermalöl beheizt werden. Bei Bedarf kann die Kühlung mit Wasser, Sole oder Thermalöl erfolgen. Redox-Maschinen sind in erster Linie für den Dauerbetrieb in Größen bis 10.700 Liter mit einer Heizfläche von 72 m² ausgelegt. Die Schale kann ummantelt oder mit Schnecke gewickelt werden, und sowohl die Rührwellen als auch die Scheibenelemente können mit den gleichen Medien wie bei der DISCOTHERM B beheizt oder gekühlt werden.

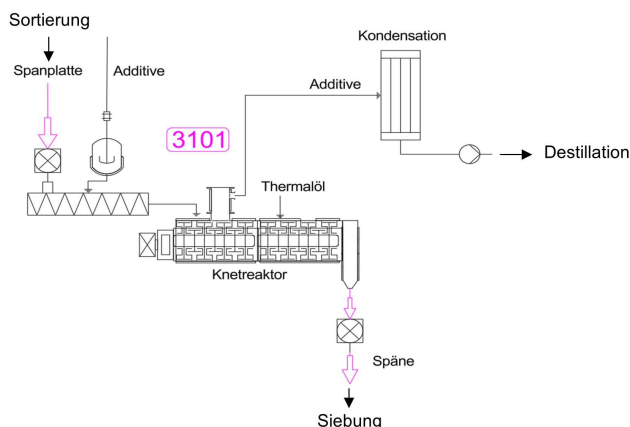


Bild 56: Schematische Darstellung Knetreaktor

Die Trocknung erfolgt in einem Einwellen-Kontaktkneter-Trockner DISCOTHERM B CONTI. Die Trocknung erfolgt unter Atmosphärendruck. Der Trockner wird mit Thermalöl beheizt. Die Dämpfe aus dem Trockner werden vollständig kondensiert. Das Kondensat wird durch einen Dekanter geleitet, um die wässrige und die organische Phase zu trennen. Der körnige trockene Holzspan fließt frei aus dem Trockner und wird in Silos transportiert. Abhängig von der Art der Beheizung und dem Wirkungsgrad des gewählten Heizsystems können bis zu 85 % der für den Betrieb der Anlage benötigten Energie aus der Verbrennung von Sekundärprodukten bereitgestellt werden.

Gruppe 4 – Destillation

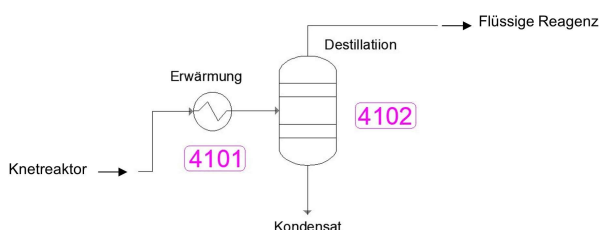


Bild 57: Schematische Darstellung der Destillation

Im Knetreaktor wird das Reagenz beim Erhitzen vom Spanmaterial durch Verdampfung getrennt. Hierbei wird die benötigte Wärme zur Verdampfung vom Thermalöl über den Gehäusemantel des Reaktors und auch durch die Welle an das Spangut übertragen. Bei der Erwärmung entweicht nicht nur das Reagenz, sondern auch teilweise das im Holz vorhandene Wasser. Durch diesen Effekt dient der Knetreaktor gleichzeitig als Trockner für das Spangut. Das aus dem Knetreaktor entweichende Gemisch aus dem Reagenz und dem Wasserdampf wird im Anschluss an den Reaktor in einem Kondensator verflüssigt. Von dort wird es durch eine Pumpe in einem Wärmetauscher (4101) erneut erwärmt. Diese Erwärmung ist so abgestimmt, dass nur das Reagenz verdampft und das Kondensat aus der Spänetrocknung abfließt. Das Reagenz wird anschließend in der Destillation (4102) wieder verflüssigt und erneut der Dosierung zugeführt.

Gruppe 5 – Reagenz Dosierung

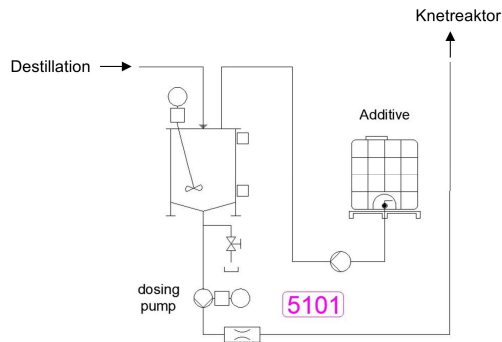


Bild 58: Schematische Darstellung der Dosiermöglichkeit für die Reagenz

Das im Knetreaktor zurückgewonnene Reagenz wird nach der Destillation in den Vorratstank der Dosierung gegeben. Je nach Bedarf wird der Füllstand im Vorratstank über eine separate Pumpe mit Reagenz nachgefüllt. Ziel ist es, möglichst viel Reagenz aus dem Prozess zurückzugewinnen. Je nach benötigter Menge wird das Reagenz dann mit einer Dosierpumpe erneut in die Zuführschnecke zum Knetreaktor gegeben.

Gruppe 6 – Siebung

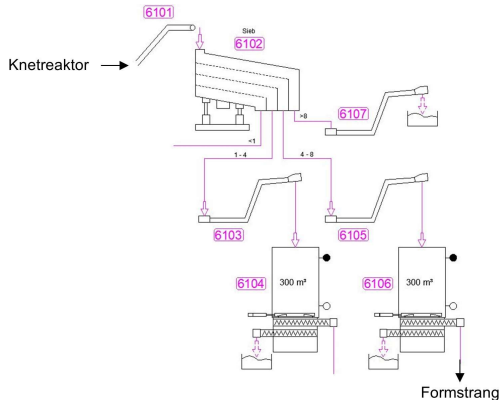


Bild 59: Schematische Darstellung der Siebung

Das im Knetreaktor zurückgewonnene Spanmaterial wird im Anschluss über ein Sieb (6102) gegeben. Dort wird der im Knetreaktor anfallende Staub <1 mm aus dem Gutmaterial ausgesiebt. Der Staub wird in einem Staubsilo gesammelt und zur Erwärmung des Thermalöls im Biomassekessel verbrannt. Die Späne 1-4 mm und 4-8 mm gelangen jeweils über einen Trogkettenförderer in einen Vorratsbunker. Aus diesen Bunkern werden die Späne dann, je nach Anforderung der Formmaschine, dosiert ausgetragen und der Streumaschine zugeführt. Die Späne >8 mm werden aussortiert.

Gruppe 7 – Formstrang

Das über das Steigeband (7101) zugeführte Spanmaterial wird über ein Schwenkband (7103) über die Breite gleichmäßig im Dosierbunker (7104) verteilt. Im Dosierbunker streifen Rückstreifrechen das Spanmaterial in den hinteren Teil des Bunkers, während das Bodenband, auf dem die Späne liegen sich nach vorne in Richtung Abwurfwalze bewegt. So entsteht auf dem Bodenband ein gleichmäßiges Spänevlies. Bei dem Transport der Späne zur Abwurfwalze werden diese über eine Waage gefördert, wodurch die Streumenge kontinuierlich erfasst wird. Je nach Anforderung kann dann über die Geschwindigkeit des Bodenbandes die Streumenge verändert werden. Die Abwurfwalze am Ende des Bodenbandes sorgt für einen gleichmäßigen

Austrag der Späne in die Windstreuakammer. In der Windstreuakammer (7105) werden die Späne zwischen gegenüberliegende Register gestreut. Die Register sind so angeordnet, dass sie das Spanmaterial gleichmäßig in beide Richtungen in die Streuräume blasen. Die Luft für die Register wird im Umluftbetrieb durch Ventilatoren erzeugt. In den Streuräumen verhindern Flugschanfänger, dass großflächige Späne bis ans Ende der Streuräume geblasen werden. In den Streuräumen fallen die schwereren groben Späne direkt nach unten. Während die Feinteile durch die Luft bis ans Ende der Streuräume geblasen werden. So entsteht in der Streustation eine Separierung der Späne in fein, grob und fein. Unterhalb der Streukammern befindet sich das Formband (7106), auf dem sich ein Fördergurt kontinuierlich in Richtung Presse bewegt.

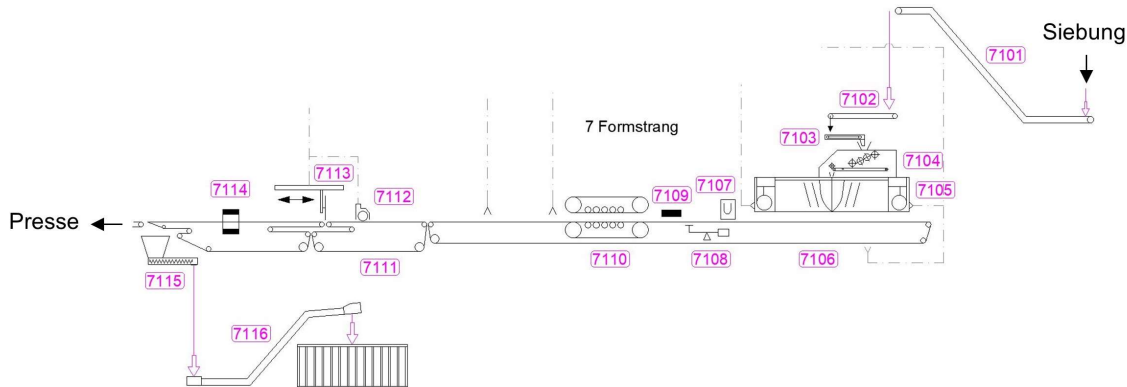


Bild 60: Schematische Darstellung des Formstrangs

Durch die Separierung in der Streustation und der Bewegung des Formbandes entsteht auf dem Formband ein Spänekuchen in dem unten feines, mittig grobes und oben wieder feines Spanmaterial liegt. So erhält die Spanplatte ihre feine Oberfläche. Im Formband ist nach der Streustation eine kontinuierliche Feuchtemessung (7107) angeordnet. Je nach für die Pressung gewünschten Spanfeuchte kann so der Trocknungsprozess im Knetreaktor eingestellt werden. Über eine Waage (7108) im Formband wird das Flächengewicht des Spänekuchens kontinuierlich erfasst. So kann die Streustation, insbesondere der Dosierbunker abhängig von der gewünschten Rohdichte der Fertigplatte eingestellt werden. Ein Magnet (7109) über dem Formband zieht eventuell im Spänekuchen vorhandene Eisenteile aus dem Materialstrom, um die dann folgenden Maschinen zu schützen. Im Anschluss hieran durchläuft der Spänekuchen eine Vorpresse (7110). Diese ist erforderlich, um die Höhe des Kuchens zu reduzieren. So wird in der Presse nur eine geringere Öffnung zwischen den Heizplatten benötigt wodurch die Schließzeiten reduziert werden. Außerdem wird der Spänekuchen durch die Vorverdichtung so stabil, dass dieser die Bandübergänge ohne Beschädigung überqueren kann. Vom Formband wird der Spänekuchen an das Sägen- und Beschleunigungsband (7111) übergeben. Auf dem Band befindet sich als erstes eine Vorbesäumung (7112). In der Vorbesäumung werden die Seiten des Spänekuchens besäumt und der Spänekuchen auf die gewünschte Breite gebracht. Nach der Vorbesäumung wird der Spänekuchen in der Kuchentrennsäge (7113) auf die gewünschte Plattenlänge geschnitten. Dabei fährt die Trennsäge mit gleicher Geschwindigkeit wie das Sägenband in Richtung Presse. Während der Fahrt läuft die Säge quer über den Spänekuchen und teilt diesen auf. Nach dem Trennschnitt fährt die Säge wieder in ihre Ausgangsposition. Der Spänekuchen im Plattenformat befindet sich nun auf dem zweiten Teil des Sägen- und Beschleunigungsbandes. Hier wird dieser in Richtung Presse beschleunigt, um eine ausreichende Lücke zwischen den einzelnen Spänekuchen zu bekommen. Direkt nach der Kuchentrennsäge erkennt die Metallerkennung (7114) Metalle im Spänekuchen. Wenn ein Metall im Kuchen erkannt wird, öffnet automatisch die Fehlschüttung am Ende des Sägen- und Beschleunigungsbandes. Das Spanmaterial fällt dann in die Fehlschüttung (7115) von wo aus es mit dem Trogkettenförderer (7116) in einen Container transportiert wird. Die Fehlschüttung wird dann durch den Operator wieder geschlossen und die Spänekuchen an das Pressenzuführband übergeben.

Gruppe 8 – Presse

Auf dem Pressenzuführband (8101) werden die Spänekuchen so lange gepuffert, bis der Beladekorb (8102) sich in der richtigen Position befindet. Dann wird der Kuchen auf eins der Beladebänder übergeben. Um alle Beladebänder mit einem Spänekuchen füllen zu können, fährt der Beladekorb nach unten in eine Grube. Sind alle Beladebänder gefüllt, fährt der gesamte Beladekorb in die geöffnete Presse (8103). Dabei werden die beim vorangegangenen Pressvorgang gepressten Platten aus der Presse geschoben und in den Entladekorb (8104) übergeben. Der Beladekorb fährt dann wieder zurück, gleichzeitig legen die Beladebänder den Spänekuchen in der Presse ab. Der Beladekorb kann dann erneut gefüllt werden.

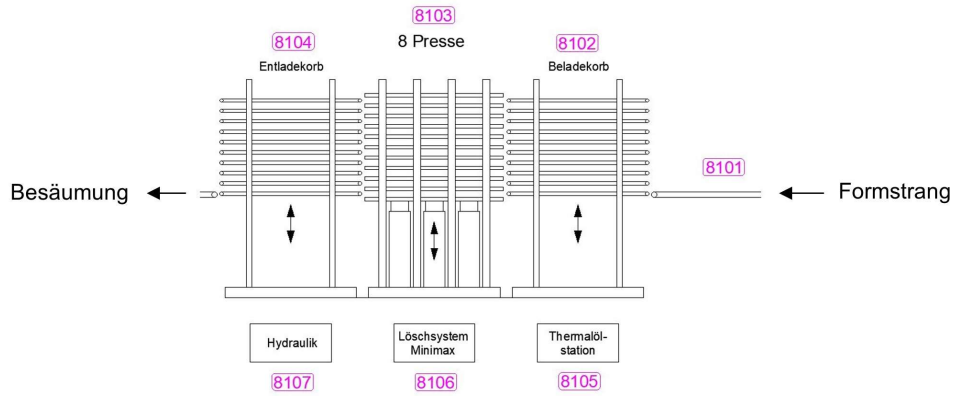


Bild 61: Schematische Darstellung der Presse

In der Presse befinden sich unten die Hydraulikzylinder, die die Heizplatten nach oben zusammendrücken. So wird der Spänekuchen zu einer Spanplatte verpresst. Die einzelnen Heizplatten sind durch eine „Simultane“ verbunden, durch die die Heizplatten immer jeweils den gleichen Abstand voneinander haben. Nach dem Ende des Pressvorganges wird die Presse wieder geöffnet und erneut beladen. Die in den Entladekorb übergebenen Spanplatten werden einzeln an die Fertigplattenwaage übergeben. Dafür bewegt sich der Entladekorb, wie der Beladekorb nach unten in eine Grube. Im Entladekorb befinden sich einzelne Gurtförderer, die die Platten aus der Presse übernehmen und an die Fertigplattenwaage übergeben.

Gruppe 9 – Besäumung

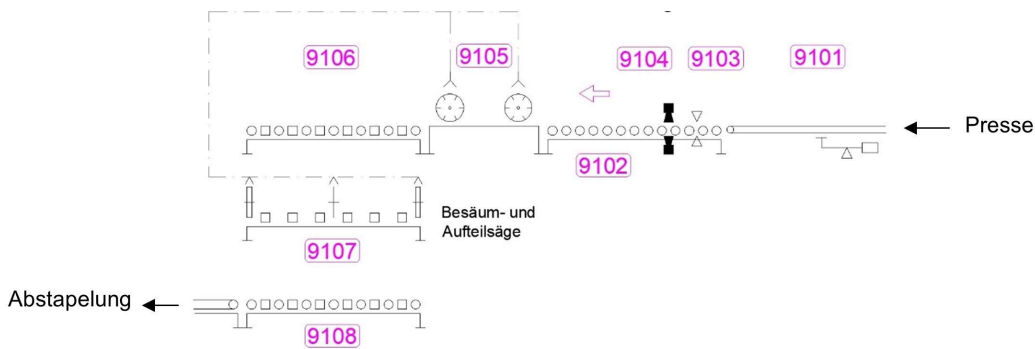


Bild 62: Schematische Darstellung der Besäumung

Auf der Fertigplattenwaage (9101) wird geprüft, ob das Gewicht der Platte den gewünschten Werten entspricht. Diese Werte werden entsprechend der geforderten Plattenrohddichte vorgegeben. Stimmt der Wert nicht, wird die Platte ausgesondert und ein Signal an den Operator gegeben. Von der Fertigplattenwaage wird die Spanplatte auf einen Rollengang (9102) übergeben. In diesem Rollengang ist eine Spalterkennung (9103) und eine Dickennmessung (9104) integriert. In der Besäumung (9105), im Anschluss an den Rollengang, wird die Spanplatte an den Seiten auf die gewünschte Breite geschnitten. Die Besäumer sind dafür mit einem Fräskopf ausgestattet, so dass das abgetrennte Material über eine Absaugung zurück in den Herstellungsprozess gegeben werden kann. Eine Eckstation (9106) zwischen der Seitenbesäumung und der Längsbesäumung übergibt die Spanplatte in Querrichtung an die Besäum- und Aufteilsäge (9107). In der Besäum- und Aufteilsäge werden die Längsseiten der Spanplatten geschnitten und durch einen Mittelschnitt die Platte aufgeteilt. Auch das hier anfallende Spanmaterial wird durch die Absaugung zurück in den Produktionsprozess gegeben. Die Eckstation (9108) nach der Besäum- und Aufteilsäge übergibt die Spanplatte dann in Längsrichtung an die Abstapelung.

Gruppe 10 – Abstapelung

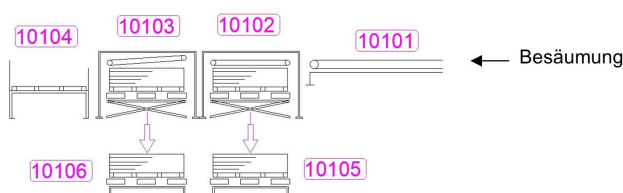


Bild 63: Schematische Darstellung der Abstapelung nach der Besäumung

Die über die Eckstation an das Einlaufband (10101) übergebenen Spanplatten werden in zwei Stapelboxen (10202/10103) auf einer Hebebühne mit Rollengang abgestapelt. Wird das Schwenkband oben in der Abstapelung angehoben, fallen die Spanplatten in die darunterliegende Box. Wird eine Ausschussplatte zugeführt, schwenken beide Bänder nach unten und die Spanplatte durchläuft die Stapelboxen und fällt dann in die Ausschussbox (10104). In den Stapelboxen werden die Spanplatten mit Hilfe von Anschlägen und pneumatischen Puschern auf dem Stapel ausgerichtet. Der Fertige Stapel wird anschließend an die Entnahmerollenbahn übergeben. Von dort wird der Spanplattenstapel mit dem Gabelstapler entnommen und eingelagert.

Gruppe 11 – Pneumatik

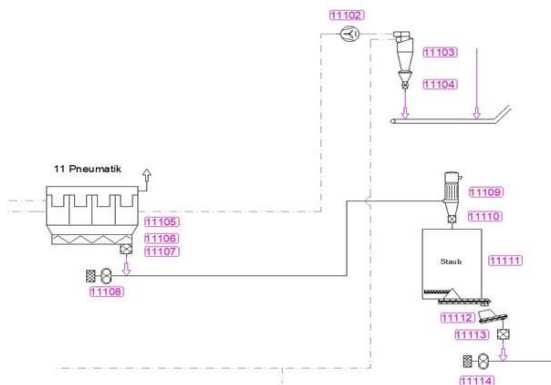


Bild 64: Schematische Darstellung der Pneumatik

Das Pneumatik-System dient zur Entstaubung der gesamten Anlage. Die Absaugung des Formstrangs erfolgt über einen Ventilator, der die Luft direkt in den Filter (11105) fördert. Die Sägen werden vom Ventilator (11102) abgesaugt. Die materialhaltige Luft der Sägen wird durch einen Abscheidezyklon (11103) in den Filter (11104) gegeben. Das im Abscheidezyklon anfallenden Material wird vor dem Sieb zurück in den Produktionsprozess gegeben. Den Staub aus dem Filter transportiert ein Hochdruckgebläse (11108) in das Staubsilo (11111). Von dort wird der Staub in die Staubdosierung (11112) gegeben. Diese trägt den Staub gemäß den Anforderungen aus der Verbrennungsanlage in das Hochdruckgebläse (11114) aus, dass den Staub in den Staubbrenner bläst.

Gruppe 12 – Energieanlage

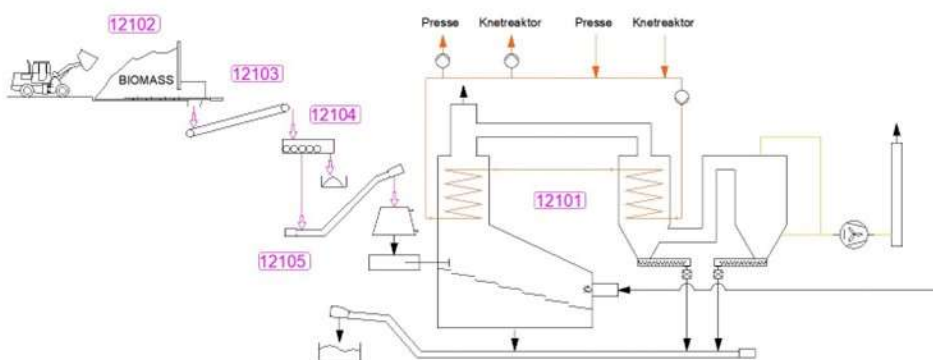


Bild 65: Schematische Darstellung der Energieanlage

Die für den Betrieb der Anlage benötigte Thermalenergie wird in einer Verbrennungsanlage (12101) für Biomasse erzeugt. Die Biomasse wird mit dem Radlader auf einen Schubboden (12102) gebracht. Über den Schubboden wird die Biomasse dosiert über das Förderband (12103) auf ein Scheibensieb (12104) gegeben. Das Scheibensieb sortiert die zu große Stücke aus. Das für die Verbrennung geeignete Material wird in einem Trogkettenförderer (12105) zum Einspeisebunker der Energieanlage gefördert. Von dort gelangt die Biomasse über einen Schieber auf das Feuerrost. Unterhalb des Feuerrosts befindet sich ein Trogkettenförderer zum Abtransport der Asche. Zum Anfeuern und zur Feinregelung wird der Biomassekessel mit dem Staub aus der Produktionsanlage geheizt. Die heißen Gase aus der Verbrennung durchströmen in zwei Stufen eine Rohrschlange, in der das Thermalöl umgewälzt wird. Die Rauchgase werden dann in einem Multizyklon gereinigt und ins Freie gegeben.

Arbeitspaket 5: Demonstratorherstellung und -prüfung

Zur Demonstratorherstellung erfolgte im Konsortium ein informativer Gedankenaustausch, mit ausführlichen Gesprächen zu möglichen Umsetzungsmöglichkeiten. Es wurden verschiedene Möbelstücke besprochen, denkbare Bauteilgrößen abgeschätzt und deren Fertigung diskutiert. Letztendlich wurde als Demonstrator ein Regalsystem (Bild 66 / links) festgelegt.

Im Hinblick auf die Demonstratorherstellung, wurde unter anderem die Skalierung der Laborrecyclingversuche in den Technikumsmaßstab umgesetzt. Hierzu erfolgte in enger Zusammenarbeit mit dem PAZ vom Fraunhofer IAP in Schkopau die Skalierung des Verfahrens. Das Nennvolumen wurde dabei von 2000 Milliliter Labormaßstab auf 500 Liter Technikumsvolumen hochskaliert. Zur Durchführung der Versuche wurde Abfallmixmaterial eines Holzwerkstoffes nach Schkopau geliefert. Die Überführung des Recyclingprozesses in den Technikumsmaßstab (ca. 170 kg recycelte Späne) konnte erfolgreich durchgeführt werden. Aus den recycelten Spänen konnten Spanplattenwerkstoffe im Labormaßstab gefertigt werden. In Anlehnung an diese positiven Erkenntnisse erfolgten Recherchen und Bemühungen, um Möglichkeiten zu eruieren, Spanplattenmaterial unter industriellen Bedingungen und im Großmaßstab herzustellen. Da für die Anfertigung eines repräsentativen Demonstrators (Regalsystem, Bild 66 / links) große Spanplattenmaterialien benötigt wurden.

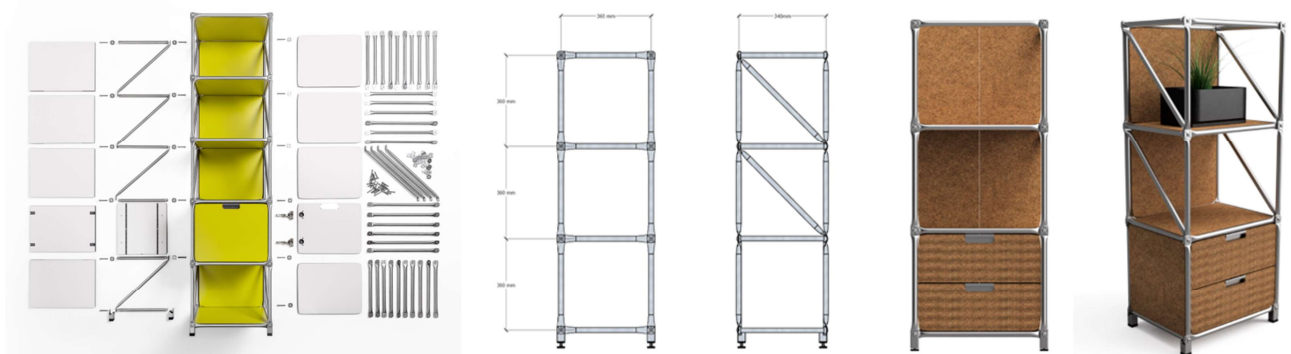


Bild 66: Regalsystem – Erste Entwurf eines Demonstrators

An dieser Stelle wurde das Fraunhofer-Institut für Holzforschung, Wilhelm-Klauditz-Institut WKI für Holzwerkstoff- und Naturfaser-Technologien (HNT) in die Arbeiten eingebunden. Nach entsprechender Kontaktaufnahme konnte ein Versuchstag in den Räumlichkeiten vom Fraunhofer WKI in Braunschweig durchgeführt werden. Der Versuchstag wurde als positiv bewertet. Das recycelte Spanplattenmaterial konnte, maschinell gesiebt und anschließend zu einer Spanplatte verarbeitet werden.

Nach weiteren Arbeitsschritten zur Optimierung der Fertigung erfolgte die Planung zur Herstellung von 22 Spanplatten aus etwa 148 kg recycelten Spänen am Fraunhofer WKI. In dieser Vorbereitungsphase kam es zu einem unvorhergesehenen Brandereignis im Material, dass die komplette „Vernichtung“ des recycelten Spanmaterials zur Folge hatte. Dies hatte wiederum zur Folge, dass zur Realisierung des Demonstrators neues Ausgangsmaterial bereitgestellt und neue großtechnische Recyclingversuche durchgeführt sowie die Plattenherstellung im großmaßstab neu organisiert werden musste. Dies konnte nicht für die komplett benötigte Menge an recyceltem Material realisiert werden, folglich wurde die Festlegung des Demonstrators (Größe des Möbelstückes) überarbeitet und entsprechend angepasst (Bild 66 / rechts). Diese Festlegung musste im Verlaufe des Projekts nochmals an die stark reduzierte Anzahl und die geänderten Formate der Werkstücke angepasst werden, Bild 67.



Bild 67: Entwurf des endgültigen Demonstrators

Im Vorfeld der Spanplattenherstellung für den Demonstrator wurden zur Festlegung des letztendlichen Fertigungsverfahrens umfangreichen vergleichenden material- und fertigungstechnische Eigenschaftsprüfungen durchgeführt.

Diese erfolgten an einer Horizontal-Plattenaufteilsäge und an einem CNC Vier-Achs-Bearbeitungszentrum mit EPS-Automatiktisch & Thermoglätt-Einheit bei abändernden Parametern wie Vorschub, Andruck, Fräsgeschwindigkeit und Thermoglätt-Temperatur, grundsätzlich orientiert am Verfahren für die Herstellung von System 180 Standardkomponenten. Untersucht wurde das Verhalten der Werkstoffe bei Anwendung trennender Fertigungstechniken, wie: Sägen (Wechselzahn), Fräsen (Formatfräser), Bohren (Holzbohrer), und fügender Techniken beschichten, kaschieren, schrauben, klemmen, stecken.

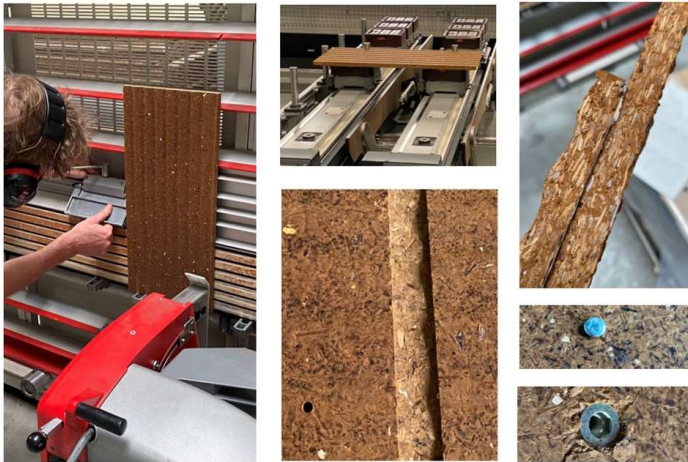


Bild 68: Eigenschaftsprüfungen mittels Aluminium-Presswerkzeug

Darüber hinaus wurden die im AP1 erarbeiteten Anforderungen im Lastenheft dokumentiert. Zur Erbringung der Fertigungsarbeiten, einschließlich Rohzuschnitt, Fräsarbeiten, Thermoglättung und Bohrungen, wurden die maßgeblichen Kriterien für die Herstellung der in der Stahlrohrkonstruktion des Demonstrators eingebauten Auskleidungselemente geprüft und festgehalten.

Zur Festlegung bzw. Optimierung des Fertigungsverfahrens wurden zwei große Spanplattenbauteile aus recycelten Spänen, die sich im Fertigungsverfahren (Holzwerkzeug/ offenes Verfahren oder Aluminiumwerkzeug/geschlossenes Verfahren) unterschieden einer umfangreichen Prüfung unterzogen. Es erfolgte eine detaillierte Untersuchung und Bewertung der Platten. Durch Kantensäumung konnten Werkstoffplatten mit folgenden Maßen erzeugt werden:

- Probe ReSpan_184 (Holzwerkzeug/offen): 350 mm x 250 mm (beidseitig plan)
- Probe ReSpan_185: (Aluminiumwerkzeug/geschlossen) 530 mm x 230 mm (einseitig wellig)

Probe ReSpan_184 (Holzwerkzeug/offen): 350 mm x 250 mm (beidseitig plan)



Bild 69: Eigenschaftsprüfung am Spanplattenbauteil ReSpan_184

Die Probe ReSpan_184 wurde mit einem Holz-Presswerkzeug im offenen Verfahren gefertigt und besteht aus einer inhomogenen, groben Spanplatte mit losen Spänen. Ihre Abmessungen betragen 250 mm x 350 mm bei einer Dichte von 720 kg/m³. Bei der Bearbeitung zeigte sich beim Sägen kein sauberes Schnittbild, Kanten franzten aus und Späne fielen als Abfall an. Das Bohren entsprach weitgehend dem Standard, führte jedoch zu leichten Abplatzungen an den Rändern. Das Fräsen ergab extreme Abplatzungen an den Kanten, die Schmalflächen sehen nach dem Formatieren sehr schlecht aus. Das Eindrehen von Muffen ist nicht möglich. Beim Eindrehen von Spax-Schrauben kam es zu starkem Aufplatzen der Oberfläche, das durch Vorbohren vermieden werden konnte.

Tabelle 8: Eigenschaftsprüfungsprotokoll – ReSpan_184 (offenes Verfahren)

Probe 184	Erzeugt mittels Holz-Presswerkzeug		
Erscheinung	inhomogen, grobe Spanplatte mit losen Spänen		
Oberfläche	plan beidseitig		
Materialstärke	15,7-15,9 mm		
Maße in mm	250x350 mm		
Dichte	720kg/m ³		
	Maschine	Werkzeug	welche Probleme treten auf?
sägen	Striebig	Wechselzahn	Kanten fransen aus, Späne fallen vermehrt als Abfall an
bohren	Rover B7	Holzbohrer 5mm & 10mm	Bohrungen entsprechen weitestgehend dem Standard, Ränder platzen leicht auf
fräsen	Rover B7	WPR_20, Formatfäser	Extremes Abplatzen an den Kanten, die Schmalflächen sehen nach dem Formatieren sehr schlecht aus
Muffe eindrehen	Rover B7	M6 Muffen-Fräser, M6 RAMPA-Muffe	Bereich um Muffe platzt auf, planes Einschrauben ist nicht möglich
Spax eindrehen	Akkuschrauber	2,5 mm Holzbohrer, BIT PZ2, Flachkopfschraube 4x9	starkes Aufplatzen der Oberfläche kann durch Vorbohren vermieden werden
Breitflächen Beschichtung	Oberfläche nicht ausreichend homogen		

Probe ReSpan_185: (Aluminiumwerkzeug/geschlossen) 530 mm x 230 mm (einseitig wellig)

Die Probe ReSpan_185 wurde mit einem Aluminium-Presswerkzeug im geschlossenen Verfahren gefertigt und besteht aus einer feinen, plastisch versiegelten Spanplatte mit gebundenen Spänen. Ihre Abmessungen betragen 230 mm × 530 mm bei einer Dichte von 916 kg/m³. Bei der Bearbeitung zeigte sich beim Sägen ein sauberes Schnittbild, jedoch platzten die Ecken teilweise ab. Das Bohren entsprach weitgehend dem Standard, führte jedoch zu leichten Abplatzungen an den Rändern. Das Fräsen ergab eine überwiegend homogene Fräskante mit vereinzelt Abplatzungen, während die Schmalflächen unauffällig blieben. Das Eindrehen von Muffen verlief problemlos, die Ränder blieben sauber. Beim Eindrehen von Spax-Schrauben kam es zu starkem Aufplatzen der Oberfläche, das durch Vorbohren reduziert werden konnte. Die Beschichtung der Breitflächen mit Möbellinoleum zeigte überzeugende Ergebnisse.

Tabelle 9: Eigenschaftsprüfungsprotokoll – ReSpan_185 – geschlossenes Verfahren

Probe 185	Erzeugt mittels Aluminium-Presswerkzeug		
Erscheinung	homogen, feine Spanplatte mit gebundenen Spänen, Oberflächen plastisch versiegelt		
Oberfläche	wellig einseitig, plan einseitig		
Materialstärke	13,75 -13,55 Berg 11,5-11,3 Tal		
Maße in mm	230x530 mm		
Dichte	916kg/m ³		
	Maschine	Werkzeug	welche Probleme treten auf
sägen	Striebig	Wechselzahn	Schnittbild sieht gut aus, Ecken platzen teilweise ab
bohren	Rover B7	Holzbohrer 5mm & 10mm	Bohrungen entsprechen weitestgehend dem Standard, Ränder platzen leicht auf
fräsen	Rover B7	WPR_20, Formatfäser	Fräskante sieht weitestgehend homogen aus, es sind einige Abplatzungen zu verzeichnen, die Schmalflächen sehen nach
Muffe eindrehen	Rover B7	M6 Muffen Fräser, M6 RAMPA-Muffe	Muffe lässt sich gut eindrehen, Ränder sehen gut aus,
Spax eindrehen	Akkuschrauber	2,5 mm Holzbohrer, BIT PZ2, Flachkopfschraube 4x9	starkes Aufplatzen der Oberfläche kann durch Vorbohren vermieden werden
Breitflächen Beschichtung	Beschichtung mit Möbellinoleum überzeugend		

Die gewonnenen Erkenntnisse tragen zur Optimierung der Materialverarbeitung und Bearbeitungsmethoden bei. Die überzeugenden Ergebnisse wurden mit dem aus Aluminium gefertigten geschlossenen Presswerkzeug erzielt und bildeten die Grundlage für die weitere Entwicklung der Demonstratoren. Da das Aluminium-Werkzeug ausschließlich für die 3D-geformten, welligen Platten vorgesehen war, führten die schlechten Ergebnisse des Holzwerkzeugs dazu, dass für die Herstellung der flachen Werkstoffplatten das Aluminium-Werkzeug mit neuen, planebenen, passgenauen Pressplatten ausgestattet werden musste.

Die Herstellung der acht Spanplatten im geschlossenen Verfahren erfolgte in einer Heißpresse (Pressparameter: 40 min @ 200 °C → Abkühlen @ 25 °C unter Druck) mit folgender Materialzusammensetzung (Fraktionen): zweite Fraktion von 8 mm - 4 mm → 37 %, dritte Fraktion von 4 mm – 2 mm → 26 %, vierte Fraktion von 2 mm - 1 mm → 37 %. Die prozentuale Verteilung der Fraktionen wurde anhand der vorhandenen Spanmenge optimiert.

Die aus recycelten Spänen hergestellten Bauteile wiesen folgenden Parameter auf:

- 540 mm x 256 mm x 16,0 mm → ca. 1630 g → ca. 840 kg/m³ → plan/plan
- 540 mm x 256 mm x 16,8 mm → ca. 1810 g → ca. 900 kg/m³ → wellenartiger Oberfläche

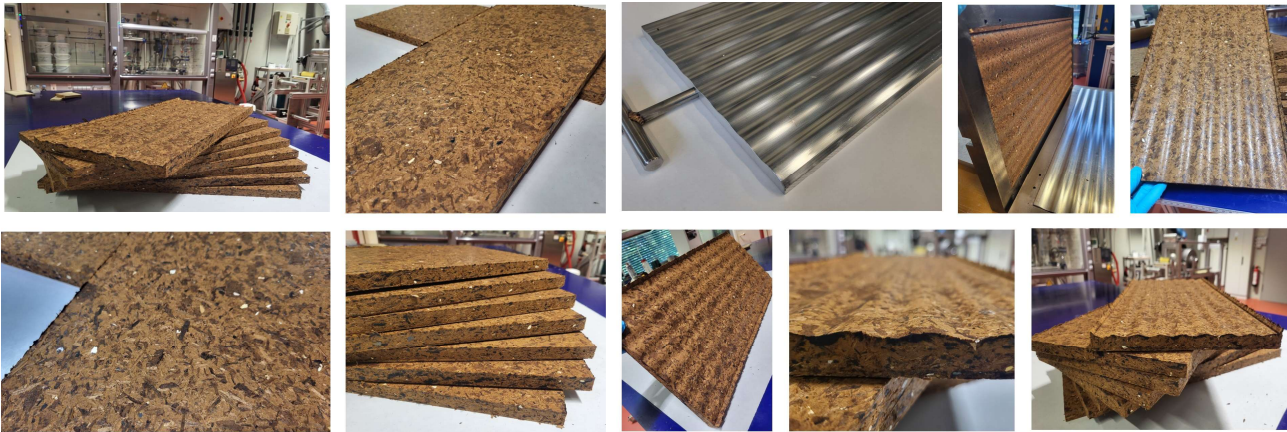


Bild 70: Für den Demonstrator gefertigte Bauteile aus recycelten Spänen.

Die gefertigten Bauteile wurden dann zum Demonstrator weiterverarbeitet. Es ließen sich mittels der beschriebenen trennenden fertigungstechnischen Verfahren folgende Bauteile herstellen:

- Beidseitig flache Bauteile:
 - 4 Einlegeböden 230 mm x 210 mm
 - 2 Seitenverkleidungen 218 mm x 450 mm, mit einseitiger Doppelochreihe
 - 3 Rückverkleidungen 230 mm x 450 mm
- Einseitig gewellte Bauteile
 - 1 Türflügel mit Griff 230 mm x 450 mm

Entsprechend der angewendeten fügenden Fertigungsverfahren (Schrauben und Spannen) sind folgende Beschläge eingebaut worden: Blech Türanschlag, Muffen, Halteplatten, Topfband-Scharniere und ein Griff.



Bild 71: Fertigung Bauteile Demonstrator-Möbel und Einsatz Beschlagstechnik

Durch die verwendeten Fügeverfahren (Schrauben und Klemmen) konnten die Bauteile erfolgreich in die Rahmenstruktur des Demonstrator-Möbels integriert werden. Die Bauteile sind passgenau und formstabil im Rohrrahmen eingefasst. Das Möbelstück ist stabil, und die im Rahmen des Projekts gefertigten Holzwerkstoffbauteile, wie Einlegeböden, Verkleidungen und Türen, sind funktionstüchtig. Der Demonstrator erfüllt in vollem Umfang die Anforderungen an Funktion und Ästhetik.



Bild 72: Einbau der Holzbauteile in Stahlstruktur Demonstrator-Möbel

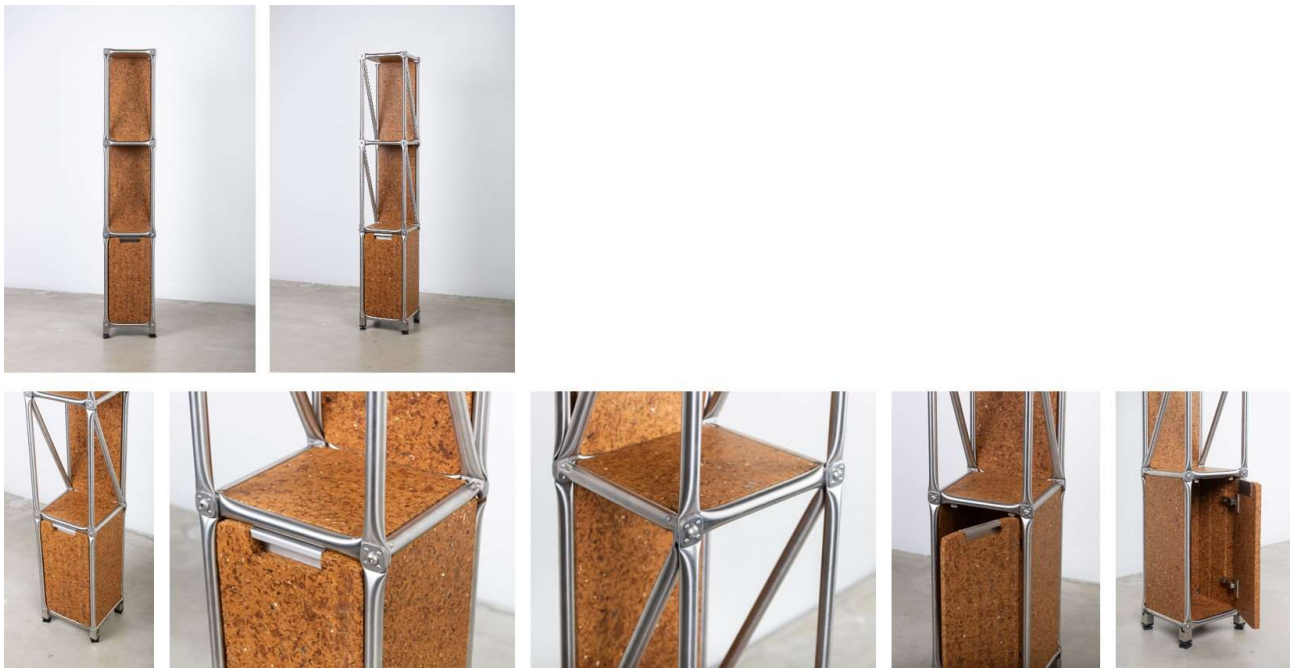


Bild 73: Fertiger Demonstrator

2. Verwertung

a) Erfindungen/Schutzrechtsanmeldungen

Im Konsortium werden keine Schutzrechtsanmeldungen angestrebt.

b) Wirtschaftliche Erfolgsaussichten nach Projektende

Zur Betrachtung der Wirtschaftlichkeit wurden alle Maschinen, die für den Prozess erforderlich sind entsprechend der Nummerierung im Fließschema in einer Maschinenliste erfasst und mit dem Maschineneinkaufspreis bewertet. Außerdem wurden für jeden Bereich die Zusatzkosten wie Transport, Montage und Inbetriebnahme ergänzt. Aus dieser Zusammenfassung ergibt sich folgender Anschaffungspreis für die gesamte Anlage:

Tabelle 10: Darstellung der einzelnen Maschinen und deren Preis

Position / Item			Benennung / Name		Preis / price	Install. Leistung / Instal. Power	Absaugvolumen / Exhaust volume
Level	Group	Number			€	kW	m³/h
Summen					43.727.000	2521,50	0,00
1			Zerkleinerung / Shredding		1.525.000	541	0
2			Sortierung / sorting		3.834.000	428	0
3			Knetreaktor / kneading reactor		5.085.000	200	0
4			Destillation / destillation		330.000	0	0
5			Reagenz Dosierung / reagenz dosing		310.000	15	0
6			Siebung / screening		1.140.000	102	0
7			Formung / shaping		4.278.000	113	0
8			Presse / press		16.030.000	459	0
9			Sägen / sawing		1.685.000	93	0
10			Abstapelung / stacking		1.300.000	61	0
11			Pneumatik / pneumatic		2.410.000	430	0
12			Energieanlage / energy plant		4.000.000	40	0
13			Sonstige Ausrüstung / miscellaneous equipment		1.800.000	40	0

Zur Ermittlung der Personalkosten wurden aus der Erfahrung der notwendige Bedarf angesetzt. Dabei ist davon ausgegangen worden, dass die Zerkleinerung und Sortierung vom Altholz in einer Schicht erfolgt. Die nachfolgenden Prozesse werden kontinuierlich im Dreischichtbetrieb betrieben. Die Darstellung des benötigten Personals sowie deren Kosten sind in Tabelle 11 dargestellt.

Tabelle 11: Darstellung der angenommenen Personalkosten

Personal/Produktion	Personen/ Schicht	Schichten	Bedarf	
Holzplatz/Zerkleinerung	1	2	2	
Knetreaktor, Destillation, Trocknung	1	4	4	
Formung, Presse	1	4	4	
Abstapelung/ Stapler	1	4	4	
Verladung	2	1	2	

Instandhaltung	2	1	2	
Elektriker	2	1	2	
Programmierer	1	1	1	
Springer	2	1	2	
Gesamt:			23	
Personalkosten:	23	6.000	138.000	€/Monat
Verwaltung/Vertrieb	2	1	2	
Personalkosten:	2	8.000	16.000	€/Monat
Monate:		12	1.848.000	€/Jahr

Die für den Aufschluss der Altholz-Spanplatten und Herstellung der neuen Spanplatten erforderliche Energie wurde in Versuchen ermittelt und aus Verbräuchen bestehender Anlagen übernommen. Für die hier beschriebene Altholzaufbereitung wird neben der elektrischen Leistung noch Thermalöl zur Beheizung des Knetreaktors und der Presse benötigt. Das Thermalöl wird in einer Verbrennungsanlage für Biomasse erhitzt. Die Biomasse Anlage wird mit dem Störstoffen aus der Aufbereitung sowie mit dem anfallenden Staub aus der Anlage befeuert. Der Energiebedarf der Anlage ist in folgender Tabelle 12 aufgezeigt.

Tabelle 12: Abgeschätzter Energiebedarf einer möglichen Anlage

Pos.	Benennung	Installierte elektrische Leistung	Betriebs-Leistung	Thermische Leistung	Spezifische Wärmekapazität Thermalöl	Energieträger Menge	Wirkungsgrad Erzeuger	Brennstoff Biomasse 45% feucht Heizwert [kJ/kg]
			75%					9.000
		[kW]	[kW]	[MW]	[kJ/kg*K]	[kg/h]	[%]	[kg/h]
	Summe	2.471,0	1.853,3	2,3				1.082
1	Zerkleinerung	541,0	405,8					
2	Sortierung 1	428,0	321,0					
3	Knetreaktor	200,0	150,0	1,4	2,60	38.769	85%	659
4	Destillation	0,0	0,0	0,3	2,60	8.308	85%	141
5	Reagenz Dos.	15,0	11,3					
6	Siebung	51,0	38,3					
7	Formung	113,0	84,8					
8	Pressen	459,0	344,3	0,6	2,60	6.391	85%	282
9	Sägen	93,0	69,8					
10	Abstapelung	61,0	45,8					
11	Pneumatik	430,0	322,5					
12	Energieanlage	40,0	30,0					
13	Sonstige Ausrüstung	40,0	30,0					

Aus den in Tabelle 12 ermittelten Werten ergibt sich folgende Wirtschaftlichkeit (Tabelle 13):

Tabelle 13: Angenommene Wirtschaftlichkeit für eine möglichen Prozess

Anlagendaten:							
Leistung:	3	t/h atro Holz		Anschaffungskosten	45.000.000	€	
Stunden/Tag	22,8	h/d		Abschreibung Maschinen:	20	Jahre	
Tage/Jahr	330	d/a		Instandhaltung:	10	% von Jahreskosten	
Dichte Produkt:	650	kg/m³		Verschleißteile:	20	% von Jahreskosten	
				Personalkosten:	1.848.000	€/a	
Tagesproduktion:	105	m³/d		Gebäude/Infrast.	10.000.000	€ geschätzt	
Jahresproduktion:	34.726	m³/a		Abschreibung Gebäude:	25	Jahre	
				Darlehen Zinz:	4	%	

Produktpreis				Aufwendungen			
Herstellerepreis:	300 - 500	€/m³		Abschreibung Maschinen	2.250.000	€/a	
Herstellerepreis erf.	480	€/m³		Instandhaltung:	225.000	€/a	
				Verschleißteile:	450.000	€/a	
				Personal:	1.848.000	€/a	
				Abschreibung Gebäude:	400.000	€/a	
				Zinsen:	2.200.000	€/a	
				Versicherung		€/a	
				FuE		€/a	
Jahreserlös/Umsatz:	16.668.553,85	€/a		Gesamt:	7.373.000	€/a	

Produkt-Einsatzstoffe	Anteil	Jahres-menge		Preis		Jahrespreis	
Frischholz:	0%	0	t/a		€/t atro	0	€/a
Alholz:	100%	22.572	t/a	0,00	€/t atro	0	€/a
Leim (auf atro Holz):	0%	0	t/a		€/t	0	€/a
Emulsion (auf atro Holz):	0%	0	t/a		€/t	0	€/a
Reaktor (auf Atro Holz):	10%	2.257	t/a	3.000,00	€/t	6.771.600	€/a
Härter (auf Leim):	0%	0	t/a		€/t	0	€/a
Wasser (auf atro Holz):	0%	0	t/a		€/t	0	€/a
Verpackung:			t/a	2,50	€/t Holz	56.430	€/a

Produkt-Nebenkosten							
Strom		13.943.85	kWh/a	0,10	€/kWh	1.394.385	€/a
Gas			Nm³/a	0,05	€/m³	0	€/a
Wasser:			m³/a	0,10	€/m³	0	€/a
Biomasse		8.144	t/a	0,00	€/t	0	€/a
Gesamt:						8.222.415	€/a

Betriebsergebnis							
Gesamtumsatz:	16.668.553,85	€/a		Gesamtkosten:	15.595.415	€/a	
Ertragssteuer:	20	%		Einzelkosten:	449	€/m³	
EBITDA:	3.723.139	€/a		(Gewinn vor Zinsen, Steuern und Abschreibung)			
Jahresgewinn: (EBIT)	1.073.139	€/a		(Gewinn vor Zinsen und Steuern)			
Steuern:	214.628	€/a					
Nettogewinn:	858.511	€/a					
ROI:	24	%					
Amortisation:	15	Jahre					

Die Tatsache, dass die Beschaffung des Altholzes hier im Ansatz kostenneutral angesetzt wurde, ist wirtschaftlich ein großer Vorteil. Die Hauptkosten entstehen durch das Reagenz zu dem Aufschluss der Spanplattenstücke, dessen Preis bei größeren Abnahmemengen auf etwa 3.000 €/t angesetzt wird.

Die Amortisationszeit ist ein zentraler Faktor für die Rentabilität des Projekts. Indem die solvolytisch aufgeschlossenen Späne in bestehende Herstellungsprozesse integriert werden, können die Investitionskosten für Maschinen und Gebäude durch Mitnutzung signifikant gesenkt werden. Dies könnte die Amortisationszeit deutlich verkürzen und das Projekt attraktiver machen.

Es wäre zu klären, inwieweit die mit dem Reagenz behandelten Späne tatsächlich mit dem Leim in bestehenden Produktionsprozessen kompatibel sind.

Neben den Kosten und der Amortisation könnten auch technische Herausforderungen auftreten, wie die Anpassung der bestehenden Produktionslinien oder die Entwicklung eines geeigneten Leim-Systems, das die speziellen Eigenschaften der behandelten Späne berücksichtigt.

Die Nutzung von Altholz für die Spanplattenproduktion und Energieerzeugung trägt zur Ressourcenschonung und Abfallvermeidung bei. Dies könnte auch positive Auswirkungen auf das Unternehmensimage und die Marktstellung haben, insbesondere in einem zunehmend umweltbewussten Markt.

Insgesamt bietet die Wiedernutzung der aufbereiteten Späne ein vielversprechendes Potenzial zur Nachhaltigkeit und Ressourcenschonung. Eine sorgfältige Planung und weitere Forschung sind jedoch unerlässlich, um die praktische Anwendbarkeit gesichert zu realisieren.

c) Wissenschaftliche und/oder technische Erfolgsaussichten nach Projektende

Die Projektpartner verwerten die erlangten Ergebnisse für Publikationen und Konferenzbeiträge sowie für weitere Arbeiten im Bereich des Recyclings von Holzwerkstoffen.

Die konkreten Verwertungspläne können den Erfolgskontrollberichten der einzelnen Projektpartner entnommen werden.

d) Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit

Fraunhofer nutzt zur Verwertung der Projektergebnisse grundsätzlich sämtliche Transferpfade wie Ausgründungen, Lizenzierung/Übertragung, Transfer über Köpfe oder Veröffentlichungen. Hierbei verfolgt Fraunhofer eine aktive Patentpolitik und meldet schutzrechtsfähige Ergebnisse im Rahmen der rechtlichen Möglichkeiten und der wirtschaftlichen Vertretbarkeit national und ggf. auch international an.

Im konkreten Vorhaben werden schutzrechtsfähige Ergebnisse für solche Länder angemeldet, in denen eine künftige Verwertung ermöglicht bzw. gegen (unberechtigte) Dritte abgesichert werden soll. Die im Vorhaben zu erwartenden geschützten und/oder ungeschützten Ergebnisse werden vorzugsweise - vorbehaltlich gesonderter Vereinbarungen - im Rahmen sachlich, zeitlich oder örtlich konkretisierter Lizenzvereinbarungen mit den häufig international tätigen Verbundpartnern und deren weltweiten Konzerngesellschaften verwertet.

Daneben ergänzen die Ergebnisse des Vorhabens den Pool an Background-IP von Fraunhofer, das für künftige Auftragsforschungsvorhaben relevant und im Rahmen gesondert vereinbarter Background-Lizenzen an nationale, europäische und internationale Vertragspartner verwertet werden kann. Die Ergebnisse des Vorhabens können insofern die Basis für weitere Aufträge aus der Wirtschaft bilden und deren konkrete Umsetzung in neue Produkte oder Verfahren unterstützen.

Abschließend kommt eine isolierte Lizenzierung oder Übertragung der Ergebnisse an Dritte ohne Projektbezug, z.B. auch an Ausgründungen, in Betracht. Der Fokus liegt hier bei nationalen und europäischen Interessenten, beschränkt sich aber nicht auf diesen Kreis.

Ungeachtet der Möglichkeit, die Ergebnisse des Vorhabens im Wege der Lizenzierung oder Übertragung an Dritte oder im Rahmen einer Ausgründung zu verwerten, dienen die Ergebnisse des Vorhabens der Anschlussfähigkeit und Stärkung weiterer Forschungs- und Entwicklungsvorhaben von Fraunhofer.

Gleiches gilt für die HNE Eberswalde.

Die Industriepartner streben ebenso wie die Forschungseinrichtungen Folgeprojekte (national und international) im Bereich des Holzrecyclings an. Dafür werden gegenwärtig neue Fördermöglichkeiten und Projektpartner gesucht.

Zusätzlich erfolgt eine Vorstellung der Projektergebnisse im Rahmen von Messen, um die Sichtbarkeit der Projektpartner im Bereich Holzwerkstoffrecycling zu erhöhen.

e) Stand der Erreichung der in der Vorhabenbeschreibung aufgeführten Verwertungsoptionen, Forschungsdaten

Die in der Vorhabensbeschreibung aufgeführten Verwertungsperspektiven (Tabelle 14) gelten weiter. Die Industrie und Forschungspartner halten weiter daran fest, unter der Berücksichtigung der kommerziellen Verfügbarkeit, der Marktsituation, der Markttrends sowie der Produktakzeptanz.

Tabelle 14: konkretisierter Verwertungsplan aus der Vorhabensbeschreibung

Verwertungs-kategorie	Zeithorizont	Verwertung	Nutzen/Notwendigkeit	Instrumente	Akteur *
Wirtschaftliche Erfolgsaussichten	Kurzfristig (1 Jahr)	Markteinführung des Recyclingverfahrens für Spanplatten	- Sicherung vorhandener und Schaffung neuer Arbeitsplätze in Deutschland - Steigerung von Ertrag und Umsatz - Verbesserung der Recyclingquote	- Patente, Schutzrechte, Lizenzen - Messepräsentation - Internetauftritt - Vorstellung bei bisherigen Kunden - Veröffentlichung in Industriezeitschriften	PreZero Erwarteter Umsatz (3 a): 155 T€
		Markteinführung von Palettenklötzen aus recycelten Produktionsresten	- Sicherung vorhandener und Schaffung neuer Arbeitsplätze in Deutschland - Steigerung von Ertrag und Umsatz - Senkung der Rohstoffkosten	- Patente, Schutzrechte, Lizenzen - Messepräsentation - Internetauftritt - direkte Vorstellung bei bisherigen Kunden - Veröffentlichung in Industriezeitschriften	Pfeifer Erwarteter Umsatz (3 a): 100 T€
		Markteinführung von Produkten mit recycelten durchgefärbten MDF-Platten.	- Sicherung vorhandener und Schaffung neuer Arbeitsplätze in Deutschland - Steigerung von Ertrag und Umsatz - Senkung der Rohstoffkosten	- Patente, Schutzrechte, Lizenzen - Messepräsentation - Internetauftritt - direkte Vorstellung bei bisherigen Kunden - Veröffentlichung in Industriezeitschriften	System 180 Erwarteter Umsatz (3 a): 250 T€
		Akquisition neuer Entwicklungsaufträge aus der Industrie	- Sicherung vorhandener und Schaffung neuer Arbeitsplätze in Deutschland - Nutzen für verschiedene Anwendergruppen, -industrien	- Patente, Schutzrechte, Lizenzen - Wissenschaftliche Veröffentlichung - Verbreitung der Ergebnisse - Messepräsentation - Konferenzbeiträge	- Fraunhofer IAP - HNE Eberswalde
	Mittelfristig (1-4 Jahre)	Entwicklung/Markteinführung des Recyclings für weitere Spanholzwerkstoffe	- Sicherung vorhandener und Schaffung neuer Arbeitsplätze in Deutschland - Steigerung von Ertrag und Umsatz - Verbesserung der Recyclingquote	- Patente, Schutzrechte, Lizenzen - Messepräsentation - Vorstellung bei bisherigen Kunden - Veröffentlichung in Industriezeitschriften	PreZero Erwarteter Umsatz (3 a): 185 T€
		Entwicklung/Markteinführung von Palettenklötzen aus Rezyklatmassen aus anderen Industriezweigen (z.B. Möbelindustrie)	- Sicherung vorhandener und Schaffung neuer Arbeitsplätze in Deutschland - Steigerung von Ertrag und Umsatz - Funktionale Vorteile gegenüber Konkurrenzlösungen/-technologien - Verbesserung der Wettbewerbssituation - Senkung der Rohstoffkosten	- Patente, Schutzrechte, Lizenzen - Verbreitung der Ergebnisse - Messepräsentation - Vorstellung bei bisherigen Kunden - Veröffentlichung in Industriezeitschriften	Pfeifer Erwarteter Umsatz (3 a): 150 T€
		Weiterentwicklung der MDF-Platten für neue Produkte unter Verwendung der freieren Formgestaltung	- Sicherung vorhandener und Schaffung neuer Arbeitsplätze in Deutschland - Steigerung von Ertrag und Umsatz - Funktionale Vorteile gegenüber Konkurrenzlösungen/-technologien	- Patente, Schutzrechte, Lizenzen - Verbreitung der Ergebnisse - Einschaltung von Multiplikatoren - Anwenderkonferenzen, - Messepräsentation	System 180 Erwarteter Umsatz (3 a): 300 T€

Verwertungs-kategorie	Zeithorizont	Verwertung	Nutzen/Notwendigkeit	Instrumente	Akteur *
			• Verbesserung der Wettbewerbssituation	• Vorstellung bei bisherigen Kunden • Veröffentlichung in Industriezeitschriften	
		• Aufbauende öffentlich-geförderte Anschlussprojekte	• Sicherung vorhandener und Schaffung neuer Arbeitsplätze in Deutschland • Nutzen für verschiedene Anwendergruppen, -industrien	• Wissenschaftliche Veröffentlichung • Verbreitung der Ergebnisse • Messepräsentation • Konferenzbeiträge	• Fraunhofer IAP • HNE Eberswalde (Aktivitäten werden einzeln und gemeinsam durchgeführt)
Wirtschaftliche Erfolgsaussichten (Fortsetzung)	Langfristig (über 4 Jahre)	• Schaffung und Vermarktung einer Produktfamilie von Rezyklatmassen für Werkstoffe mit gezielten Eigenschaftsprofilen	• Sicherung vorhandener und Schaffung neuer Arbeitsplätze in Deutschland • Steigerung von Ertrag und Umsatz • Funktionale Vorteile gegenüber Konkurrenzlösungen/-technologien • Verbesserung der Wettbewerbssituation • Vorbereitung von Marktpotenzialen	• Patente, Schutzrechte, Lizenzen • Verbreitung der Ergebnisse • Einschaltung von Multiplikatoren • Anwenderkonferenzen, • Messepräsentation • Vorstellung bei bisherigen Kunden • Veröffentlichung in Industriezeitschriften	• PreZero Erwarteter Umsatz (3 a): 200 T€
		• Schaffung und Vermarktung einer Produktlinie aus recycelten Spanholzwerkstoffen	• Sicherung vorhandener und Schaffung neuer Arbeitsplätze in Deutschland • Steigerung von Ertrag und Umsatz • Funktionale Vorteile gegenüber Konkurrenzlösungen/-technologien • Verbesserung der Wettbewerbssituation • Vorbereitung von Marktpotenzialen	• Patente, Schutzrechte, Lizenzen • Verbreitung der Ergebnisse • Einschaltung von Multiplikatoren • Anwenderkonferenzen, • Messepräsentation • Vorstellung bei bisherigen Kunden • Veröffentlichung in Industriezeitschriften	• System 180 Erwarteter Umsatz (3 a): 500 T€
		• Schaffung einer Technologieplattform das Recycling von Spanholzwerkstoffen	• Sicherung vorhandener und Schaffung neuer Arbeitsplätze in Deutschland • Steigerung von Ertrag und Umsatz • Funktionale Vorteile gegenüber Konkurrenzlösungen/-technologien • Ausbau der wissenschaftlichen Expertise	• Wissenschaftliche Veröffentlichung • Verbreitung der Ergebnisse • Messepräsentation • Konferenzbeiträge	• Fraunhofer IAP • HNE Eberswalde (Aktivitäten werden einzeln und gemeinsam durchgeführt)
Wissenschaftliche und/oder technische Erfolgsaussichten	Kurzfristig (1 Jahr)	• Kompetenzausbau im Bereich des Recyclings von Spanholzwerkstoffen	• Schaffung von Know-how zur Kompetenzerhaltung • Steigerung der wissenschaftlichen Konkurrenzfähigkeit • Heranbildung von wissenschaftlichen Nachwuchs	• Verstetigung der Aktivität im Bereich Recycling • Vorlesungen • Fachvorträge	• Fraunhofer IAP • HNE Eberswalde
		• Kompetenzausbau im Bereich des Trennens von Mehrsystemen	• Schaffung von Know-how zur Kompetenzerhaltung • Steigerung der wissenschaftlichen Konkurrenzfähigkeit • Heranbildung von wissenschaftlichen Nachwuchs	• Verstetigung der Aktivität im Bereich Recycling • Vorlesungen • Fachvorträge	• HNE Eberswalde

Verwertungs-kategorie	Zeithorizont	Verwertung	Nutzen/Notwendigkeit	Instrumente	Akteur *
		Nutzen der Kompetenz und weiterer Kompetenzausbau in Bezug auf die Solvolyse von Duromeren	- Schaffung von Know-how zur Kompetenzerhaltung - Steigerung der wissenschaftlichen Konkurrenzfähigkeit - Heranbildung von wissenschaftlichen Nachwuchs	- Verstetigung der Aktivität im Bereich Solvolyse und Recycling von Duromeren - Vorlesungen - Fachvorträge	Fraunhofer IAP
Wissenschaftliche und/oder technische Erfolgsaussichten (Fortsetzung)	Mittelfristig (1-4 Jahre)	Erweiterung des chemischen Verständnisses zum Recycling und Transfer in andere Duromerklassen und Anwendungen	- Ergänzung der Material- und Werkstoffkompetenz - Erschließung des Nutzungs- und Anwendungspotenzials - Transfer zu weiteren Nutzergruppen - Steigerung der wissenschaftlichen Konkurrenzfähigkeit - Schaffung von Know-how	- Weiterführende Aktivitäten ausgehend bzw. aufbauend auf den erzielten Ergebnissen - Veröffentlichungen - Messepräsentationen; PR-Maßnahmen - Fachvorträge	- Fraunhofer IAP - HNE Eberswalde
		Auf-/Ausbau der Kompetenzen im Bereich Holzwerkstoffe	- Erschließung des Nutzungs- und Anwendungspotenzials - Transfer zu weiteren Nutzergruppen - Steigerung der wissenschaftlichen Konkurrenzfähigkeit - Schaffung von Know-how	- Weiterführende Aktivitäten ausgehend bzw. aufbauend auf den erzielten Ergebnissen - Veröffentlichungen - Messepräsentationen; PR-Maßnahmen - Fachvorträge	Alle Partner
	Langfristig (über 4 Jahre)	Förderung des Einsatzes von Recyclingverfahren für duomere Werkstoffe	- Transfer zu weiteren Nutzergruppen - Verbesserte Zusammenarbeit mit Firmen, Netzwerken, Forschungsstellen und Transferstellen - Erschließung neuer Anwendungspotenziale	- Weiterführende Aktivitäten im Bereich nachwachsende Rohstoffe - Bekanntmachung und stetige Berücksichtigung in Arbeitskreisen und Netzwerken (z.B. BAV, BVSE, VHI)	Alle Partner
Wissenschaftliche oder wirtschaftliche Anschlussfähigkeit	Kurzfristig (1 Jahr)	Angewandte Forschung zur Erweiterung des Anwendungspotentials	Folgeprojekte	Akquise- und PR-Methoden	Alle Partner (insbesondere Forschungspartner)
		Ausdehnung der Anwendung / des Marktes	Überzeugende Darstellung des Nutzens gegenüber Kunden und Partnern	- Adressdatenbanken - Internetauftritte - Aktive Ansprache bekannter Unternehmen am Standort Deutschland	Alle Partner (insbesondere Industriepartner)
	Mittelfristig (1-4 Jahre), aber auch darüber hinaus	Förderung des Einsatzes von Holz in modernen Werkstoffen	- Folgeprojekte - Verstetigung der Aktivitäten	- Publikation und Verbreitung der Ergebnisse - Aktive Mitwirkung in Netzwerken	Alle Partner

3. Erkenntnisse von Dritten

Mit dem assoziierten Partner Pfeifer Holz Lauterbach GmbH erfolgte in Kooperation, die Bearbeitung des Materials Palettenklotz. Es ermöglichte der Pfeifer Holz Lauterbach GmbH die Erweiterung ihres Know How im Bereich Recycling und Wiederverwendbarkeit. Wobei zusätzlich die Ergebnisse des Recyclings von Spanplatten mit eingeflossen sind. Die dazu durchgeführten Arbeiten wurden unter Punkt 1 mit aufgeführt.

4. Veröffentlichungen

Eine Veröffentlichung der im Projekt erzielten Ergebnisse erfolgt in Form von Präsentationen des Institutes. Die Ergebnisse werden unter anderem im Zuge der Institutsseminarreihe am Fraunhofer IAP im März 2025 von Dr. Mathias Köhler präsentiert.

Eine Veröffentlichung seitens der HNEE befindet sich zum Zeitpunkt der Erstellung des Abschlussberichts in einem Reviewprozess eines wissenschaftlichen Online-Journals. Des Weiteren wurden Abschlussarbeiten an Studierende vergeben, deren Ergebnisse Hochschulöffentlich präsentiert wurden.

Zudem erfolgt die Erläuterung der Projektergebnisse anhand des Demonstrators als Ausstellungsstück bei Messen und steht zur Präsentation gegenüber Interessiert jederzeit nach Absprache zur Verfügung.

ANHANG

Teilvorhaben 1: Fraunhofer IAP / Forschungsbereich PYCO (2220HV043A)

1. Ziel und Gegenstand des Teilvorhabens

Das Ziel dieses Teilvorhabens bestand in der Entwicklung einer Recyclingformulierung bzw. die Entwicklung eines Recyclingverfahrens, welches nicht nur Teile, sondern alle Bestandteile der Holzwerkstoffe einer Nachnutzung zuführt. Die chemische Struktur des duromeren Kunststoffes soll gezielt mit einem geeigneten Recyclingagenz aufgebrochen werden. Das Aufbrechen bewirkt die Auflösung des Werkstoffverbundes, ohne die Späne zu schädigen. Die entstehende Recyclingpulpe sollte dabei erneut reaktiv gegenüber einer thermischen Vernetzung sein und somit eine erneute Verarbeitung möglich machen. Hierfür sollte eine Recyclingformulierung entwickelt werden, welche das in den Werkstoffen enthaltene Duromer nicht vollständig abbaut, sondern dieses in oligomere Teile spaltet, welche näherungsweise einem Harz vor der Aushärtung entsprechen. Das überschüssige Recyclingagenz sollte anschließend wieder entfernt und die Holzkomponente und dem abgebauten Harz anschließend in einem weiteren Schritt zu neuen Holzspan- und Holzfasern wieder verpresst werden. Hierbei sollen idealerweise keine weiteren bzw. neuen Bestandteile wie Späne oder Harz zugegeben werden, so dass eine vollständige Wiederverwendung realisiert wird. Dazu müssen sich verschiedene Recyclingagenzien, der Recyclingprozess an sich, aber auch die Wiederverwertung inkl. Entwicklung eines Fertigungsverfahrens von neuen Holzwerkstoffen sowie die Überprüfung der mechanischen Eigenschaften detailliert angesehen werden.

2. Bearbeitete Arbeitspakete

Arbeitspaket 1: Benchmarkmaterialien und Lastenheft

Arbeitspaket 2: Abbauprozess und Aufreinigung

Arbeitspaket 3: Entwicklung des Fertigungsverfahrens

Arbeitspaket 4: Trennung von Mehrstoffsystemen

Arbeitspaket 5: Demonstratorherstellung und -prüfung

3. Wesentliche Ergebnisse des Teilvorhabens

Arbeitspaket 1: Benchmarkmaterialien und Lastenheft

Es erfolgte die Sammlung und Bewertung der Benchmarkmaterialien. Zudem wurde die Erstellung des Lastenheftes koordiniert. Aus den Anforderungen an Holzwerkstoffe, den Fertigungsverfahren und den etablierten Abfallentsorgungsprozessen ergaben sich zentrale Anforderungen an den chemischen Recyclingprozess, die im Projekt berücksichtigt werden müssen.

- Die Wirtschaftlichkeit des Recyclingverfahrens wird maßgeblich durch die notwendigen Prozessschritte und den benötigten Zeit- und Energiebedarf für das Recycling und die Aufreinigung beeinflusst.
- Die Wirtschaftlichkeit hängt auch von der Skalierbarkeit (größtechnische Umsetzung) des Recyclingverfahrens ab.
- An Holzwerkstoffe, insbesondere, wenn diese im Innenraum eingesetzt werden, werden hohe Anforderungen an die Emission von Inhaltsstoffen gestellt. Dies betrifft nicht nur die Emission von Formaldehyd, sondern auch zahlreicher weiterer Verbindungen.
- Die Fertigung von Holzwerkstoffen ist industriell etabliert. Daher sollten die recycelten, reaktiven Spanfraktionen direkt in etablierten Fertigungslinien eingesetzt bzw. verarbeitet werden können.
- Holzwerkstoffe sind bereits umfassend standardisiert. Die neu hergestellten Holzwerkstoffe aus recycelten Span- und Faserwerkstoffen, sollten sich idealerweise entsprechend in die Holzwerkstoffkategorien mit den resultierenden Anforderungsprofilen einordnen lassen. Dies würde die Einführung des Recyclingverfahrens erleichtern und einen direkten Markteinstieg ermöglichen, ohne neue Kategorien oder Anwendungsfelder erschließen zu müssen.

Arbeitspaket 2: Abbauprozess und Aufreinigung

Am Fraunhofer IAP wurden zu Projektbeginn zehn Agenzien (Monoamine, Diamine, Aminoalkohole und Alkohole) ausgewählt, mit deren in der Siedehitze eine Solvolyse von den drei Materialien (Palettenklotz, Spanplatte sowie MDF-Platte) untersucht wurde. Die drei Materialien wurden von den anderen Projektpartnern zur Verfügung gestellt. Anhand dieser ersten ausführlichen Versuchsreihen und den daraus ermittelten Ergebnissen erfolgte der Rückschluss auf die Machbarkeit sowie die zeitliche Bestimmung der Abbauprozesse. Im Folgenden wurden drei Agenzien für die weiteren Versuche ausgewählt. Mit den ausgewählten Agenzien erfolgte die Durchführung von Recyclingprozessen im größeren Maßstab unter dem Einsatz eines Rotationsverdampfers. Hierbei wurden unter anderem die Abbauprozesse, die Aufreinigung inkl. Trocknung des recycelten Materials detailliert untersucht. Im Anschluss erfolgte die Wiederverarbeitung der recycelten Materialien zu neuen Holzwerkstoffen. Zu diesem Zweck wurde ein entsprechendes Tauchkantenwerkzeug konzipiert und angefertigt.

Palettenklotz von Pfeifer Holz Lauterbach GmbH

Das Palettenklotzmaterial wurden im Labormaßstab zersetzt und die Späne, nach dem Prozessschritt der Trocknung, wiedergewonnen. Die Beurteilung der Späne und deren Wiederverwendung erfolgte über die erneute Verarbeitung zu Bauteilen und deren mechanische Prüfung. Die Prüfung wurde im Forschungsbereich PYCO mittels 3-Punkt-Biegeversuch (3-P-B) in Anlehnung an die DIN EN 310 durchgeführt. Die mechanische Beurteilung der Bauteile ergab, dass die Erhöhung der Aushärtungszeit eine positive Veränderung auf die mechanischen Kennwerte zur Folge hat. Ergänzend erfolgte der Vergleich von Bauteilen, die aus neuen Spänen und von Bauteilen, die auf Basis von recycelten Spänen hergestellt wurden. Anhand der spezifischen Biegefestigkeit konnte zwischen den Bauteilen kein signifikanter Unterschied ermittelt werden. Folglich lässt sich darauf schließen, dass die Wiederverwertung mit analogen Eigenschaften realisierbar ist.

MDF-Platten von System 180 GmbH

Analog zu den Arbeiten „Plattenklotz“ wurden die bereitgestellten MDF-Platten ebenfalls zersetzt, die eingesetzten Fasern wiedergewonnen und anschließend zu neuen Bauteilen verarbeitet. Bei der Zersetzung bzw. dem Abbau von MDF-Platten werden hauptsächlich die Faser in Form von Faseragglomeraten (Faserknäul) wiedergewonnen. Diese Faseragglomerate wurden zum einen direkt und zum anderen, nach einem weiteren Verarbeitungsschritt der mechanischen Zerkleinerung, erneut eingesetzt. Dazu wurden die Faseragglomerate vor der Weiterverarbeitung mittels mechanischer Bearbeitung entwirrt, um die Einzelfasern zu erhalten und zu verarbeiten. Bei den durchgeführten Versuchsreihen erfolgte die Beurteilung der Härungszeit, die Dichteeinstellung über die Fläche sowie der Einfluss von Feuchtigkeit (Vorbehandlung im Klimaschrank) auf die mechanischen Eigenschaften (3-P-B). Die Beurteilung ergab das bei der Verwendung von Faseragglomeraten, nur Bauteile mit einer sehr ungleichmäßigen Dichte und somit hohen Abweichungen in der Biegefestigkeit hergestellt werden konnten. Es konnte bei einer Härungszeit von 60 Minuten die höchste spezifische Biegefestigkeit im Mittelwert ermittelt werden. Die neu hergestellten Bauteile auf Basis von Einzelfasern, wiesen eine homogenere Dichte als die Bauteile, die aus Faseragglomeraten hergestellt wurden, auf. Ferner wurde ermittelt, dass der Vorbehandlungsschritt im Klimaschrank und somit der Feuchtegehalt der Fasern, ebenfalls einen Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften der recycelten Bauteile hat.

Spanplatten von PreZero Holz GmbH

Die bereitgestellten Materialien konnten erfolgreich zersetzt und der weiteren Verarbeitung zugeführt werden. An dieser Stelle wurden Untersuchung zum Feuchtigkeitsgehalt im Material und deren Einflussnahme auf die Härtung untersucht und beurteilt. An dieser Stelle wurde sich bei der Durchführung auf eine Recyclingagentur dem Ethanolamin konzentriert. Zur weiteren Optimierung der Ergebnisse bzw. des Recyclingprozessen eine umfassende Versuchsreihe in Bezug auf die Trocknung der Späne nach dem Zersetzungsprozess durchgeführt. Es zeigte sich, dass zum einen die Trocknungstemperatur, aber auch der Trocknungsgrad den wiedergewonnenen Spänen einen signifikanten Einfluss (Reaktivität) auf die Weiterverarbeitung zu neuen Bauteilen und deren mechanische Kennwerte hat. Anhand der ermittelten Ergebnisse erfolgt die Festlegung, dass die Trocknung im Wärmetrockenschrank effektiver ist als die Trocknung im Vakuumtrockenschrank. Es lässt sich festhalten, dass sich nach etwa fünf Trocknungsstunden eine Gewichtskonstanz im Material einstellt und somit keine signifikante Veränderung des Agenzgehaltes mehr erfolgt. Die Reaktivität der Späne verringert sich mit fortschreitender Trocknungsdauer. Unter Berücksichtigung aller Ergebnisse und

Einflussnahmen stellt eine Trocknungstemperatur von 80 °C ein Optimum dar. Darüber hinaus wurde bei der Härtung der recycelten Späne zu einem neuen Spanwerkstoff eine Härtungstemperatur von 200 °C ermittelt.

Wiederholter Recyclingkreislauf von einem Bauteil aus recycelten Spänen

Zusätzlich zu den bisher beschriebenen Versuchen erfolgte die Durchführung einer Versuchsreihe in der Bauteile, die vorher aus recycelten Spänen hergestellt wurden, nochmals dem Recyclingprozess zugeführt wurden. Die wiedergewonnenen Späne durchliefen somit zweimal dem Recyclingprozess und die Bauteilherstellung. Im Vergleich konnte zwischen 1 x recycelte und 2 x recycelt kein signifikanter Unterschied verzeichnet werden. Folglich lässt sich der Recyclingprozess gegebenenfalls mehrmals durchführen, ohne einen negativen Einfluss auf das Material auszuüben.

Versuche im Technikumsmaßstab

Die Hochskalierung des Recyclingprozesses erfolgte in Zusammenarbeit mit einem weiteren Forschungsbereich des Fraunhofer IAPs dem PAZ in Schkopau. Durch intensive Gespräche und Organisation unsererseits konnte in Zusammenarbeit die Skalierung umgesetzt werden. Die Hochskalierung des Abbauprozesses erfolgte mit Spanplattenmaterial sowie mit der Recyclingagentur Ethanolamin. Die Skalierung des Verfahrens erfolgte mittels Taumeltrockner und angeschlossener Rückgewinnung des Recyclingagente, wobei das Nennvolumen dabei von 2000 Milliliter Labormaßstab auf 500 Liter Technikumsvolumen hochskaliert wurde. Die wiedergewonnenen Späne ließen sich im Labormaßstab zur erneuten Bauteilherstellung wiederverwenden.

Jedoch kam es bei der Hochskalierung in den Technikumsmaßstab zu unvorhersehbaren Komplikationen. Das Material (recycelte Späne) aus den ersten drei Versuchen wurde vor der geplanten Weiterverarbeitung über einen Zeitraum von sechs Monaten, zur Absolvierung der Vorversuche, gelagert. Hier ereignete sich erst bei der Lagerung in offenen Fässern eine Wärmeentwicklung im Material selbst, die zu einer Rauchentwicklung führte. Die daraus resultierende Rauchentwicklung war Anlass das Material zu wässern (unreaktiv). Beim vierten durchgeführten Versuch im Technikumsmaßstab kam es direkt nach dem Zersetzungsprozess, beim Abfüllen der recycelten Späne zur Rauchentwicklung. Das Material wurde daraufhin ebenfalls unbrauchbar gemacht. Zur generellen Ursachenermittlung wurden eine Vielzahl an Tests durchgeführt. Das Material wurde hinsichtlich des Einflusses von Temperatur sowie des Einflusses metallischer Verunreinigungen (Cu, Fe, Sn, Al) untersucht. Dabei wurde definiert unterschiedliches Metallpulver vor Beginn des Recyclingprozesses und nach dem Zersetzen des Materials dem Prozess zugeführt und anschließend einer Wärmequelle ausgesetzt. Zudem wurde die Entzündbarkeit von entstehenden Gasen untersucht. Es konnte im Zuge der Testreihe keine definierte Rauchentwicklung bzw. Entzündung hervorgerufen werden. Dennoch wird empfohlen zukünftig die recycelten Späne unter Schutzgasatmosphäre abzufüllen und zu lagern.

Arbeitspaket 3: Entwicklung des Fertigungsverfahrens

Im Rahmen des Projektes wurde sich mit der Wiederverwendbarkeit und Verarbeitung von drei Materialien (Palettenklotz, MDF-Platte und Spanplatten) beschäftigt. Der Recyclingprozess konnte für alle Materialien erfolgreich durchgeführt werden. Die Beurteilung der wiedergewonnenen Späne erfolgte durch die Herstellung von Bauteilen aus recycelten Spänen und deren mechanische Untersuchung. Die Bauteilherstellung fand mit Hilfe eines Tauchkantenwerkzeuges (Puck sowie Quadrat) statt. Mit Hilfe des Tauchkantenwerkzeug konnte eine generelle Aussage über die Wiederverwendung der recycelten Späne für alle drei Materialien getroffen, aber es konnte keine Herstellung im Vergleich zu der industriellen Fertigung umgesetzt werden. Nach ausführlicher Recherche der industriellen Fertigungsverfahren und deren Abschätzung der Realisierbarkeit, wurde sich seitens des Fraunhofer IAPs für eine detaillierte Entwicklung des Fertigungsverfahrens auf den Werkstoff der Spanplatte fokussiert.

Hierzu erfolgte zunächst die Modifizierung des Spanplattenaufbaus und der damit einhergehenden aufwendigen Fraktionierung der recycelten Späne vor der erneuten Bauteilherstellung mit dem Tauchkantenwerkzeug. Die mit dieser Methode hergestellten Spanplattenbauteile wiesen eine ausreichende mechanische Festigkeit auf, so dass der Recyclingprozess sowie die Fertigung als positiv bewertet wurden.

Folglich wurde die Hochskalierung der Recyclingversuche und letztendlich auch der Bauteilherstellung im Großmaßstab durch das Fraunhofer IAP realisiert. Dazu gehörten die Organisation und Begleitung der Zersetzungsversuche einer großen Spanplattenabfallmenge am PAZ in Schkopau sowie die Eruiierung des Fraunhofer WKI zur Herstellung großer Spanplatten aus recycelten Spänen. Es erfolgten die intensiven Absprachen, die Vorbereitungen, die Durchführung und letztendlich die Auswertung des an dem

Vorversuchstagen hergestellten Material. Ergebnis der Auswertung war, dass die Spannplattenherstellung beim Fraunhofer WKI im offenen Verfahren und nicht wie in den Vorversuchen am Fraunhofer IAP im geschlossenen Verfahren (Tauchkantenwerkzeug) erfolgt. Aus diesem Grund wurde der Herstellungsprozess angepasst und umfassende Versuchsreihen zur Festlegung der Pressparameter durchgeführt. Zur Durchführung wurde ein neues Werkzeug aus Holz konstruiert und gefertigt.

Mit den erlangten Erkenntnissen ging es in die Planung der großtechnischen, industriellen Herstellung von Spanplatten aus recycelten Spänen am Fraunhofer WKI durch das Fraunhofer IAP. An dieser Stelle kam es zu unvorhersehbaren Komplikationen und damit einhergehende Verzögerungen. Letztendlich stand ab diesem Zeitpunkt das Fraunhofer WKI zur Fertigung der Spanplatten in ihrem Technikum, nicht mehr zur Verfügung.

Aus diesem Grund wurden intensive Überlegungen bzgl. der Herstellung von Spanplatten größer als 110 mm x 110 mm und deren praktische Umsetzbarkeit diskutiert. Da nur so das Arbeitspaket „Demonstratorherstellung und –prüfung“ vollständig bearbeitet werden konnte.

Zusammen mit der System 180 GmbH wurden neue Werkzeuge zur möglichen Herstellung größerer Platten am Fraunhofer IAP besprochen und letztendlich gefertigt. Parallel dazu erfolgte seitens Fraunhofer IAP die Prüfung der Realisierbarkeit der Spanvorbereitung (Fraktionierung) sowie deren Härtung (Heißpressverfahren) im Großmassstab. Es wurde ein maschineller Siebturm mit den entsprechenden Sieben entwickelt und gebaut sowie die Heißpresse (Typ 275 von Rucks) mit einer Pressfläche von 600 mm x 600 mm speziell umgerüstet. Mit den geschaffenen Möglichkeiten konnten Späne im Großmassstab fraktioniert und mit den Werkzeugen der System 180 GmbH große Bauteile im offenen und geschlossenen Verfahren sowie Bauteile mit 3D-Struktur gefertigt werden. Mit dem so angepassten Fertigungsverfahren konnten Bauteile aus recycelten Spänen für alle angesetzten Prüfungen und auch Bauteile aus recycelten Spänen für den Demonstrator hergestellt werden.

Arbeitspaket 4: Trennung von Mehrstoffsystemen

In den durchgeführten Spanplattenversuchen und der damit einhergehenden Wiederverwendung des Materials, erfolgte durch die Fraktionierung des Recyclingmaterials eine praktische Trennung von nicht geeigneten Anteilen (Faserfilz, zu große Holzstücke, Beschichtungen) von geeigneten Anteilen, welches zur erneuten Bauteilherstellung verwendet wurde.

Generell zeigte sich, dass sich eine vorangegangene Auftrennung des Mehrstoffsystems vor dem Auflösen positiv auf das Recyclat und deren Wiederverwendbarkeit auswirkt.

Folglich untersuchte die PreZero Holz GmbH die Trennung von Mehrstoffsystemen und erstellte anhand der gewonnenen Erkenntnisse ein entsprechendes Anlagenkonzept. Dieses Konzept wurde ausführlich mit dem Fraunhofer IAP besprochen und abgestimmt. Darüber hinaus lieferte das Fraunhofer IAP wichtige Kennwerte für die Beurteilung der Wirtschaftlichkeit.

Arbeitspaket 5: Demonstratorherstellung und –prüfung

Im Konsortium wurden die Umsetzungsmöglichkeiten eines anschaulichen Demonstratorbauteils fortwährend über den gesamten Projektzeitraum diskutiert und letztendlich ein Demonstrator festgelegt. Im Hinblick, auf die im Projektverlauf geplante Demonstratorherstellung, wurde die Skalierung der Laborrecyclingversuche in den Technikumsmaßstab angestrebt und unsererseits umgesetzt.

Die ausführliche Beschreibung der absolvierten Arbeiten, durchgeführten Versuchsreihen und deren Ergebnisse erfolgten im Arbeitspaket 4.

Im Anschluss daran und unter Berücksichtigung der Ergebnisse erfolgte zusammen mit System 180 GmbH, nach ausführlicher Rücksprache, die Festlegung des realisierbaren Demonstrators und deren Fertigungsweise. Die kompletten Arbeiten zur Fertigung der großen Bauteile aus recycelten Spänen wurden am Fraunhofer IAP durchgeführt. Die Arbeiten umfassten die zeitintensive Siebung des noch vorhandenen recycelten Spanmaterials (15 kg) in die entsprechenden Fraktionen, Abwiegen und Mischung der festgelegten Fraktionen für das jeweilige Bauteile, die Werkzeugvorbereitung (Trennmittel), das gleichmäßige Befüllen des Werkzeuges, Herstellung der Bauteile sowie die anschließende Bereitstellung der Bauteile an die System 180 GmbH zur Fertigung des Demonstrators.

Teilvorhaben 2: Hochschule für nachhaltige Entwicklung Eberswalde (2220HV043B)

1. Ziel und Gegenstand des Teilvorhabens

Das Ziel dieses Teilvorhabens bestand in der Entwicklung und Optimierung von Trennverfahren für Mehrstoffsysteme in Holzspan- und Holzfaserwerkstoffen, um eine möglichst verlustfreie Wiederverwendung der Holzbestandteile zu ermöglichen. Dabei sollten Beschichtungen, Färbemittel und andere Störstoffe gezielt entfernt oder separiert werden, ohne die Holzstruktur zu beschädigen. Ziel war eine schonende und wirtschaftliche Trennung der Bestandteile zu realisieren, um eine möglichst hohe Materialausbeute bei minimaler Schädigung der Holzstruktur gewährleisten zu können.

Das Teilvorhaben umfasste die Erforschung und Evaluierung unterschiedlicher Trennverfahren für die Separierung von Holzbestandteilen aus MDF-, Span- und OSB-Platten sowie anderen Holzfaserwerkstoffen. Dabei werden insbesondere folgende Aspekte adressiert:

- Trennung von Beschichtungen und Anstrichstoffen: Untersuchung der Abtrennung von Möbelfolien, Laminaten und Lackanhaftungen vor und nach der Solvolyse.
- Separierung von Störstoffen: Entfernung von Farbstoffen und anderen Fremdstoffen, um die Wiederverwertbarkeit der Holzspäne und -fasern zu maximieren.
- Fraktionierung der Holzbestandteile: Auftrennung der Späne in unterschiedliche Größen- und Dichteklassen, um eine gezielte Weiterverarbeitung zu ermöglichen.

Hierbei wurden Siebtechniken als Trennverfahren getestet und für den Einsatz in einem Recyclingprozess optimiert. Die entwickelten Verfahren dienten als Grundlage für die Bereitstellung hochwertiger Recyclingmassen, die in den weiteren Arbeitspaketen zu neuen Holzwerkstoffen verarbeitet wurden.

Des Weiteren stand die Entwicklung eines Recyclingverfahrens für Holzspan- und Holzfaserwerkstoffe im Fokus des 2. Teilvorhabens. Dazu wurden die Prozessschritte Zerkleinerung, Solvolyse, Lösemittelentfernung/Trocknung, Aufreinigung, Fraktionierung, Streuung, Vorverdichten und Heißpressen im Labormaßstab an verschiedenen Holzwerkstoffen erprobt. Die daraus entstandenen Erzeugnisse wurden u.a. hinsichtlich folgender Eigenschaften geprüft und evaluiert:

- Bestimmung der Wiedervernetzbarkeit anhand von DSC-Messungen
- Prüfung der Querkzugfestigkeit nach EN 319
- Bestimmung der VOC und Aldehyd-Emissionen (inkl. Formaldehyd) nach DIN EN 16516:2020-10

2. Bearbeitete Arbeitspakete

Arbeitspaket 1: Benchmarkmaterialien und Lastenheft

Arbeitspaket 2: Abbauprozess und Aufreinigung

Arbeitspaket 3: Entwicklung des Fertigungsverfahrens

Arbeitspaket 4: Trennung von Mehrstoffsystemen

Arbeitspaket 5: Demonstratorherstellung und -prüfung

3. Wesentliche Ergebnisse des Teilvorhabens

Arbeitspaket 1: Benchmarkmaterialien und Lastenheft

In der ersten Projektphase wurden normative, rechtliche und prozesstechnologische Grundlagen für Span- und Faserplatten erarbeitet. Dabei entstand ein Nachschlagewerk, das Anforderungen an Herstellung, mechanische Eigenschaften und Emissionsverhalten dokumentiert. Ein Schwerpunkt lag auf der möglichen Freisetzung flüchtiger organischer Verbindungen (VOCs) durch Solvolyse mit Amin-basierten Lösemitteln. Baurechtlich gelten Holzwerkstoffe als Bauprodukte, deren Vermarktung durch die Bauproduktenverordnung geregelt ist. Anforderungen für den Einsatz im Bauwesen sind in DIN EN 13986 festgelegt, einschließlich mechanischer Eigenschaften und Formaldehydgrenzwerte (max. 0,124 mg/m³ Raumluft gemäß DIN EN 13986)

Arbeitspaket 2: Abbauprozess und Aufreinigung

Im zweiten Arbeitspaket wurden verschiedene organische Reagenzien zur solvolytischen Lösung von Span- und Faserwerkstoffen unter Wärmezufuhr (150 °C) und atmosphärischem Druck getestet. Die analysierten Materialproben zeigten keine strukturellen Schädigungen, jedoch kam es zu farblichen Veränderungen.

Zur Trocknung und Aufreinigung des Materials wurden drei Methoden untersucht:

- Lösemittelabzug im Rotationsverdampfer (unter Vakuum und erhöhter Temperatur) – ineffizient, da nur eine Reduktion des Lösemittelanteils auf 85 % erreicht wurde.
- Ofentrocknung (75 °C, 24 h, mit Stickstoff) – führte zu einer besseren Entfernung des Lösemittels (Reduktion auf 46 %), erforderte jedoch manuelles Auflockern der Proben.
- Kombination aus Wärme und Zentrifugalkräften mittels umgebauter Waschmaschine (bei 75 °C, 1200 U/min, 7 h, mit Stickstoff) – erzielte ähnliche Ergebnisse wie die Ofentrocknung (48 % Lösemittelanteil), führte aber zu verstärkter Agglomeratbildung.

Arbeitspaket 3: Entwicklung des Fertigungsverfahrens

Im 3. Arbeitspaket wurde ein Verfahren zur Herstellung von Holzwerkstoffplatten aus recycelten Span- und Faserplatten im Labormaßstab entwickelt und getestet. Dazu wurden Prozesse wie Zerkleinerung, Solvolyse, Lösemittelentfernung, Fraktionierung, Streuung und Heißpressen untersucht. Dabei konnten Kleinformaten von recycelten MDF-, Span- und OSB-Platten erfolgreich hergestellt werden.

Zur Untersuchung der Wiedervernetzbarkeit wurden DSC-Messungen durchgeführt. Dabei zeigte sich, dass die Reaktionsenthalpie des UF-Harzes mit sinkendem Lösemittelanteil anstieg, was auf eine Verzögerung der Aushärtung durch das Lösemittel hindeutet. Eine erneute Vernetzungsreaktion bei MDI-gebundenen OSB-Rezyklaten konnte nicht nachgewiesen werden.

Die Festigkeit der recycelten Plattenwerkstoffe wurde durch Querzugfestigkeitsmessungen bestimmt. MDF-Proben aus Faserrezyklat erreichten nicht die erforderliche Mindestfestigkeit von 0,65 N/mm², wobei die Festigkeit stark vom Lösemittelgehalt abhing. Für Spanplatten aus recyceltem Material hingegen konnte nachgewiesen werden, dass die geforderte Mindestfestigkeit für P3-Spanplatten von über 0,4 N/mm² erreicht werden kann. Die OSB-Platten aus Rezyklat zeigten keine ausreichende Festigkeit, was mit der fehlenden Wiedervernetzung des MDI-Bindemittels zusammenhängt.

Emissionsmessungen ergaben, dass die Essigsäureemissionen mit steigender Presstemperatur sanken, während Formaldehyd-Emissionen vom Frischfaseranteil beeinflusst wurden. Alle Formaldehyd-Emissionen lagen nach DIN EN 13986 deutlich unterhalb des zulässigen Grenzwerts von 0,124 mg/m³.

Arbeitspaket 4: Trennung von Mehrstoffsystemen

Die Untersuchung zur Trennung eines Mehrstoffsystems aus einer Verbundwerkstoffplatte zeigte, dass sich während der Solvolyse in Ethanolamin bei 130 °C der Acryllack im Lösemittel löste und die ABS-Kante erweichte und abtrennte. Nach Lösemittelentfernung und Siebung blieben jedoch Agglomerate aus Spänen und Fasern zurück, sodass keine erfolgreiche Fraktionierung zur Wiederverwendung möglich war. Zudem lag der gelöste Acryllack als Feststoff dispergiert im Materialgemisch vor. Bei einer melaminharzbeschichteten Möbelspanplatte konnte nach der Solvolyse und dem Lösemittelabzug eine stoffliche Trennung mittels Siebung realisiert werden.

Arbeitspaket 5: Demonstratorherstellung und -prüfung

Im Rahmen dieses Arbeitspakets wurde seitens System 180 ein Regal, das dreidimensional geformte Spanplatten aus Holzspanrezyklaten beinhaltet, hergestellt. Bei der Herstellung konnte hinsichtlich der Bearbeitbarkeit kein signifikanter Unterschied zu herkömmlichen Spanplatten festgestellt werden. Die Prüfung des Demonstrators ergab keinerlei funktionseinschränkungen. Im Vergleich mit einer Bausweise aus kommerziell erhältlichen Spanplatten fiel ein deutlich höheres Gewicht auf. Die verwendeten Spanplatten weisen eine höhere Dichte auf. Die Oberflächenqualität hinsichtlich Rauigkeit war sehr gut, wobei die Farbgebung etwas dunkler, bräunlicher gewesen ist als herkömmliche, rohe Spanplatten.

Zusammenfassung

- Es wurde ein Nachschlagewerk erarbeitet, das Informationen zu normativen, rechtlichen und prozess-technologischen Grundlagen für Span- und Faserplatten bereitstellt.
- Unter verschiedenen getesteten Reagenzien konnte der Nachweis erbracht werden, dass 2-Aminoethanol (Ethanolamin) geeignet ist, um Span- und Faserplatten solvolytisch zu lösen.

- Bzgl. der Aufreinigung bzw. Reduktion des Lösemittels (2-Aminoethanol) konnten mit einer klassischen Ofentrocknung sowie einer alternativen Trocknungsmethode bestehend aus der kombinierten Einwirkung von Wärme und Zentrifugalkräften der Lösemittelgehalt im Faser- und Spanmaterial auf unter 50% gesenkt werden.
- Mit DSC-Messungen konnten für UF-Harz gebundene Faser- und Spanrezyklate eine Wiedervernetzbarkeit nachgewiesen werden, wobei eine Reaktionsverzögerung mit zunehmendem Lösemittelgehalt beobachtet werden konnte. Bei Rezyklaten aus MDI-gebundenen OSB-Platten ist dagegen keine Wiedervernetzung möglich.
- Emissionsmessungen zeigten an MDF-Proben aus rezykliertem Fasermaterial, dass die Einhaltung des Formaldehydgrenzwertes kein Problem darstellt.
- Die Untersuchung der Trennung eines Mehrstoffsystems hat leider gezeigt, dass eine Fraktionierung nach der Solvolyse für die Wiederverwendung einer Verbundplatte ungeeignet ist. Die stoffliche Trennung bei einer melaminharzbeschichteten Möbelspanplatte konnte dagegen erfolgreich nach der Solvolyse und dem Lösemittelabzug realisiert werden.
- Die Demonstratorherstellung (Regal aus rezyklierter Spanplatte) verlief erfolgreich. Nach einer Prüfung konnten keinerlei Funktionseinschränkungen festgestellt werden.

Teilvorhaben 3: System 180 GmbH (2220HV043C)

1. Ziel und Gegenstand des Teilvorhabens

Im Rahmen des Projekts wurden verschiedene modulare Design-Anwendungen für die entwickelten recycelten Holzspan- und Faserwerkstoffe untersucht. Der Fokus lag insbesondere auf ihrer Nutzung als flacher oder formbarer Holzersatzwerkstoff für Möbel. Dabei spielten sowohl die material- als auch die fertigungstechnischen Eigenschaften eine entscheidende Rolle.

Im Teilvorhaben der System 180 GmbH lag der Schwerpunkt insbesondere auf der Anwendung im Möbelbereich. Die Arbeiten umfassten folgende Aspekte:

- Definition des Lastenhefts, einschließlich der Formulierung mechanischer und fertigungstechnischer Anforderungsprofile, der Analyse von Kundenanforderungen sowie einer Stoffstromanalyse
- Entwicklung eines Fertigungsverfahrens durch die Herstellung von Presswerkzeugen und eine iterative Prüfung der im Projektverlauf erzeugten Materialproben
- Konzeptionierung der Demonstrator-Werkstücke sowie eines Demonstrator-Möbels
- Herstellung der Demonstratoren und Analyse ihrer Performance

2. Bearbeitete Arbeitspakete

Arbeitspaket 1: Benchmarkmaterialien und Lastenheft

Arbeitspaket 3: Entwicklung des Fertigungsverfahrens

Arbeitspaket 5: Demonstratorherstellung und -prüfung

3. Wesentliche Ergebnisse des Teilvorhabens

Arbeitspaket 1: Benchmarkmaterialien und Lastenheft

Zur Ableitung eines Lastenheftes wurden durch die System 180 GmbH in der Projektanfangsphase Kundenanforderungen, ein material- und fertigungstechnisches Eigenschaftsprofil sowie eine Stoffstromanalyse erarbeitet.

Kundenanforderungen

Zur Erörterung der Kundenanforderungen erfolgte eine repräsentative Befragung von Endkunden der System 180 GmbH sowie von Vertriebspartnern, welche System 180 Produkte im Portfolio führen. Themenschwerpunkte hierbei waren Kundenbedürfnisse, Kundenanforderungen, Kreislaufwirtschaft, Motivation, Nutzenerwartungen, Rücknahmesysteme und Zahlungsbereitschaft. Die Nachhaltigkeitsumfrage erfolgte durch schriftliche Fragebögen und telefonische Interviews im Zeitraum vom 05.08.2021 bis 15.09.2021.

Formulierung Materialtechnisches Eigenschaftsprofil

Zur Ermittlung des materialtechnischen Eigenschaftsprofil wurden marktübliche, technische Materialanforderungen hinsichtlich Beschaffenheit (physikalische Eigenschaften, Homogenität, Obergrenze Dichtezuwachs, Dickentoleranz) identifiziert.

Formulierung Fertigungstechnisches Eigenschaftsprofil

Es wurde ein fertigungstechnisches Eigenschaftsprofil für das gewünschte Endprodukt unter Berücksichtigung gängiger Normen formuliert. Es dient als Grundlage für die Entwicklung individueller Verarbeitungsverfahren (AP 3). Hierzu wurden neben den marktüblichen, technischen Materialanforderungen hinsichtlich Beschaffenheit (physikalische Eigenschaften, Homogenität, Obergrenze Dichtezuwachs, Dickentoleranz) die Bearbeitbarkeit mit Maschinen und Werkzeugen entsprechend bisher eingesetzter Holz-Verarbeitungsverfahren identifiziert.

Auswahl und Analyse Benchmark-Materialien

In einer Marktrecherche im Sinne der Benchmarkfestlegung, wurde untersucht, welche alternativen, biobasierten Plattenwerkstoffe für den Möbelbau am Markt verfügbar oder in Entwicklung sind und insbesondere eine bessere Ökobilanz als MDF aufweisen. Dabei wurden 25 Materialien verglichen und in

Bezug auf Markt-Serienreife, Materialzusammensetzung (z. B. Bindemittelart) sowie physikalische und umweltbezogene Eigenschaften bewertet. Besonders berücksichtigt wurden Kriterien wie Wiederverwertbarkeit, Rückgewinnungspotenzial, vorhandene Zertifikate, Lebenszyklusanalyse (LCA) und EPD. Zudem flossen die Fertigungstauglichkeit sowie sensorische Aspekte wie Oberfläche und Dekorationen in die Bewertung ein. Es wurden entsprechende Materialmuster beschafft, darunter das derzeit verwendete Standardmaterial der System 180 GmbH (schwarz durchgefärbte MDF-Platte). Diese wurden den Forschungspartnern Fraunhofer IAP-PYCO und HNEE für ihre Untersuchungen in AP2 und AP4 sowie für die Entwicklung des Fertigungsverfahrens in AP3 zur Verfügung gestellt.

Stoffstromanalyse

Eine Analyse der Stoffströme in den einzelnen Lebenszyklusphasen wurde unter Differenzierung der Bauteilfertigungs-, Nutzungs-, Nachnutzungsphasen und Entsorgungsstadien erstellt. Letztere wurden in insgesamt vier Stufen beschrieben, in denen das Material dem angestrebten Recyclingprozess zugeführt und damit der Stoffkreislauf zyklisch geschlossen werden könnte.

Arbeitspaket 3: Entwicklung des Fertigungsverfahrens

System 180 GmbH den Partnern IAP-PYCO und HNEE Material zur Verfügung gestellt und stand während deren vorbereitenden Arbeiten beratend zur Seite.

Im Arbeitspaket 3 wurden seitens der System 180 GmbH für, dass Fertigungsverfahren der Holzwerkstoffe aus den Recyclingmassen neue Presswerkzeuge bzw. -formen angefertigt. Hinzu wurden für möglich zukünftige Fertigungsansätze, in Abstimmung mit dem IAP-PYCO, weitere Pressformen visuell entwickelt. Hierbei sollen die unterschiedlichen Fertigungsverfahren/Methoden – Stopfen, Extrudieren, Pressen – untersucht werden, um die bestmögliche Verfahrensweise für die Materialherstellung zu bestimmen. Aufgrund der Änderungen im Fertigungsansatz und den veränderten Formatvorgaben mussten die ursprünglichen Entwürfe der Presswerkzeuge seitens der System 180 GmbH mehrmals verworfen und entsprechend angepasst werden.

Konzeption, Entwicklung und Realisierung von Presswerkzeugen

Für die Anfertigung der neuen Presswerkzeuge wurde entsprechend der Vorhabensbeschreibung auf zwei Teilaspekte eingegangen:

- Werkstoff aus dem Fertigungsverfahren – Stopfen, Extrudieren, Pressen → Plattenware
- Dreidimensional geformte Werkstoffe

Werkstoff aus dem Fertigungsverfahren – Stopfen, Extrudieren, Pressen

Entwurf/Visualisierungen eines Holz-Presswerkzeugs für das horizontal ausgerichtete Stopfverfahren. Von dem ursprünglich benötigten Rohplattenmaß (Breite, Höhe, Tiefe) 500 mm x 16 mm x 500 mm wurde sich in Abstimmung mit dem IAP-PYCO, aufgrund der neuen Pressvorrichtungen (Heißpress) auf das Maß 400 mm x 16 mm x 300 mm geeinigt. Abgeleitet aus den Anforderungen des Fertigungsverfahrens, dass in die Schritte Stopfen, Extrudieren und Pressen unterteilt ist, sowie aus bekannten kleineren Pressvorrichtungen (100 mm x 100 mm) aus dem bisherigen Bestand des IAP-PYCO, wurde hierfür eine handliche Pressvorrichtung aus Holz konzipiert entwickelt und gefertigt worden.

Dreidimensional geformte Werkstoffe

Entwurf/Visualisierung eines Aluminium-Presswerkzeugs zur Erzeugung von dreidimensional geformten Werkstoffen wurden für den Teilschritt des Stopfens zwei Ansätze verfolgt, die jeweils eine unterschiedliche Dichte des Werkstoffs herbeiführen sollen. Diese führten zur Konzeption von zwei unterschiedlichen Vorrichtungen und Werkzeuganordnungen mit den Maßen 545 mm x 253 mm (Breite x Tiefe). Eine Vorrichtung für ein horizontal ausgerichtetes Stopfverfahren und eine Vorrichtung für ein vertikal ausgerichtetes Stopfverfahren. Mittels der vertikalen Anordnung, mit Kassettenvorrichtungen und Stativen, sollte eine dichtere Vorstopfung und damit eine höhere Homogenität der Werkstoffplatte erzielt werden.

Realisierung eines Aluminium-Presswerkzeugs für das horizontal ausgerichtete Stopfverfahren

Basierend auf dem oben abgebildeten visuellen Entwurf und angepasst an das am IAP-PYCO übliche Stopfverfahren mit horizontal ausgerichtetem Stopfen wurde das Presswerkzeug zur Herstellung dreidimensional geformter Werkstoffe entwickelt. Es verfügt über horizontal ausgerichtete Pressplatten, die

aus einseitig gewellten Aluminiumplatten bestehen und die Maße 544,4 mm × 16 mm × 252,4 mm (Breite × Höhe × Tiefe) aufweisen.

Realisierung eines Aluminium-Presswerkzeugs für das vertikal ausgerichtete Stopfverfahren

Nach ersten erfolgreichen Testresultaten mit dem horizontal ausgerichteten Stopfverfahren, wurde das vertikal ausgerichtete Stopfverfahren nur konzeptionell und in Form der technischen Visualisierungen der Werkzeug-Vorrichtung erarbeitet. Aufgrund des eingeschätzten hohen Aufwands in der Handhabung und der Herstellung des Presswerkzeugs mit Kassettenvorrichtungen und Stativen wurde von einer direkten Anfertigung abgesehen. Auch die positive Bewertung der material- und fertigungstechnischen Eigenschaften, unter Berücksichtigung der Herstellung des Demonstrators in AP 5 haben die Fertigung ein Werkzeug für die vertikalen Stopfung nicht gerechtfertigt.

Arbeitspaket 5: Demonstratorherstellung und -prüfung

Zur Prozess Optimierung des Fertigungsverfahrens und der genutzten Press-Werkzeuge wurden durch die System 180 GmbH umfassende material- und fertigungstechnische Eigenschaftsprüfungen an den zwei zur Verfügung gestellten Spanplatten durchgeführt. Die Prüfungen wurden, die im AP1 erarbeiteten Anforderungen im Lastenheft dokumentiert. Entsprechend der Ergebnisse wurde festgelegt, dass die Spanplatten aus recycelten Spänen für den Demonstrator im geschlossenen Verfahren hergestellt werden.

Auf dieser Basis konnte der Demonstrator erfolgreich konzipiert und schließlich die Konstruktionszeichnungen der Komponenten erstellt werden. Der Demonstrator wurde in Abhängigkeit von der Qualität, Anzahl und den Formaten der verfügbaren Werkstücke entwickelt. Aufgrund der sich ändernden Parameter war es notwendig, den Entwurf kontinuierlich anzupassen. In der letzten Phase musste der ursprüngliche Entwurf des Demonstrators an die stark reduzierte Anzahl und die geänderten Formate der Werkstücke angepasst werden.

Herstellung eines Demonstrators

Für die Herstellung des Demonstrators standen für die Verarbeitung zur Verfügung:

- 7 Werkstoffplatten beidseitig flach, Maße 530 mm x 230* mm, Stärke 16 mm
 - 1 Werkstoffplatte einseitig gewellt Maße 530 mm x 230* mm, Stärke 16 mm
- *Endmaß nach Säumung

Aus diesen Werkstoffplatten, für sich selbst schon Demonstratoren für flache und dreidimensionale Projektergebnisse, ließen sich mittels der beschriebenen trennenden fertigungstechnischen Verfahren folgende System 180 Bauteile entsprechend den Standardparametern herstellen:

- Beidseitig flache Bauteile:
 - 4 Einlegeböden 230 mm x 210 mm
 - 2 Seitenverkleidungen 218 mm x 450 mm, mit einseitiger Doppelochreihe
 - 3 Rückverkleidungen 230 mm x 450 mm
- Einseitig gewellte Bauteile
 - 1 Türflügel mit Griff 230 mm x 450 mm

Entsprechend der angewendeten fügenden Fertigungsverfahren (Schrauben und Spannen) sind die beschriebenen Beschläge wie: Blech Türanschlag, Muffen, Halteplatten, Topfband-Scharniere und ein Griff eingebaut worden.

Durch die verwendeten Füge-Techniken (Schrauben und Klemmen) konnten die Bauteile erfolgreich in die Rahmenstruktur des Demonstrator-Möbels integriert werden. Die Bauteile sind passgenau und formstabil im Rohrrahmen eingefasst. Das Möbelstück ist stabil, und die im Rahmen des Projekts gefertigten Holzwerkstoffbauteile, wie Einlegeböden, Verkleidungen und Türen, sind funktionstüchtig. Der Demonstrator erfüllt in vollem Umfang die Anforderungen an Funktion und Ästhetik.

Teilvorhaben 4: PreZero Holz GmbH (2220HV043D)

1. Ziel und Gegenstand des Teilvorhabens

Ziel des Teilvorhabens der PreZero Holz ist die Konzeption eines Trennverfahrens von Sperrmüllholzabfällen für das Recycling von Spanholzwerkstoffen. Dafür unterstützt die PreZero Holz zunächst bei der Beschaffung und der Definition der Inputmaterialien. Weiterhin berät Sie zu den Rahmenbedingungen für einen chemisches Recyclingverfahren von Spanwerkstoffen. Darüber hinaus unterstützt die PreZero Holz bei der Entwicklung eines Fertigungsverfahrens, beispielsweise durch die Koordination zur Definition von limitierenden Faktoren bei dem Arbeitsschutz und dem Umgang mit Gefahrenstoffen im Bereich Vorbereitung zum Recycling (Trennverfahren). Hierbei stehen eine Integration des Recyclingprozesses in die branchenüblichen Arbeitsabläufe und die Anwendbarkeit der Recyclingagentur vor Ort im Fokus. Abschließend wird die Wirtschaftlichkeit und der nötige Investitionsbedarf der vorbereitenden Maßnahmen zum Recycling von PreZero Holz in Abstimmung mit den anderen Projektpartnern ermittelt.

2. Bearbeitete Arbeitspakete

Arbeitspaket 3: Entwicklung des Fertigungsverfahrens

Arbeitspaket 4: Trennung von Mehrstoffsystemen

Arbeitspaket 5: Demonstratorherstellung und -prüfung

3. Wesentliche Ergebnisse des Teilvorhabens

Arbeitspaket 3: Entwicklung des Fertigungsverfahrens

Die PreZero Holz hat sich mit den anderen Projektpartnern zum potenziellen Fertigungsverfahren ausgetauscht sowie ihr Fachwissen im Bereich Siebverfahren, Presstechnik und bestehende Kontakte aus der Industrie in das Projekt mit eingebracht. Zur Umsetzung des Teilvorhabens unterstützte die PreZero Holz zunächst bei der Beschaffung und der Definition der Inputmaterialien. Weiterhin trat Sie beratend zu den Rahmenbedingungen für einen chemisches Recyclingverfahren von Spanwerkstoffen mit auf. Darüber hinaus unterstützte die PreZero Holz bei der Entwicklung eines Fertigungsverfahrens, beispielsweise durch die Koordination zur Definition von limitierenden Faktoren bei dem Arbeitsschutz und dem Umgang mit Gefahrenstoffen im Bereich Vorbereitung zum Recycling (Trennverfahren). Hierbei standen die Integration des Recyclingprozesses in die branchenüblichen Arbeitsabläufe und die Anwendbarkeit der Recyclingagentur vor Ort im Fokus.

Während des Projektverlaufes ergab sich eine sehr angespannte Situation auf dem Altholzmarkt. Die befürchtete Energieknappheit zog eine enorme preisliche Verschiebung mit sich, die dazu geführt hat, dass hohe Altholzmengen, aufgrund der hohen zu erzielenden Stromerlöse, in vielen Fällen thermisch verwertet worden sind und eine Sortierquote zur Steigerung der stofflichen Verwertung rückläufig war.

Arbeitspaket 4: Trennung von Mehrstoffsystemen

Die Trennung von Mehrstoffsystemen vor Beginn des Auflösungsprozesses wirkt sich positiv auf die Wiederverwendbarkeit der Recyclingspäne aus. Aus diesem Grund stellte die Weiterentwicklung des mechanischen Trennungsprozesses eine signifikante Aufgabe für die PreZero Holz dar. Es wurden verschiedene Versuche dazu bei bestehenden oder neuen Kontakten aus der Industrie durchgeführt:

- Baustellenmischabfallsortieranlage PreZero NL, Groningen
- Technikum STEINERT GmbH, Pulheim
- Versuchssortieranlage TRETORG GmbH, Berlin

Anhand der gewonnenen Erkenntnisse aus den Sortierversuchen wurde das Ziel verfolgt, eine geeignete mechanische Sortiertechnik zu konzipieren. In enger Zusammenarbeit mit dem Ingenieurbüro JAPES aus Springe wurde die mechanische Aufbereitung in Kombination mit dem chemischen Solvolyse-Verfahren sowie der anschließenden Wiederverpressung zu neuen Holzwerkstoffen in ein umfassendes Komplettfließbild integriert.

Es wurde ein detailliertes Anlagenkonzept (Bild 50) erarbeitet. Der Prozess ist in die folgenden Bereiche gegliedert:

- Gruppe 1 Zerkleinerung
- Gruppe 2 Sortierung
- Gruppe 3 Knetreaktor
- Gruppe 4 Destillation
- Gruppe 5 Reagenz Dosierung
- Gruppe 6 Siebung
- Gruppe 7 Formung
- Gruppe 8 Presse
- Gruppe 9 Sägen
- Gruppe 10 Abstapelung
- Gruppe 11 Pneumatik
- Gruppe 12 Energieanlage

Im Rahmen des Projektes erfolgte eine ausführliche Beschreibung des Anlagenkonzeptes und der grafischen Darstellung der 12 Gruppen.

Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Abschließend wurde die Wirtschaftlichkeit und der nötige Investitionsbedarf der vorbereitenden Maßnahmen zum Recycling von PreZero Holz in Abstimmung mit den anderen Projektpartnern ermittelt. Es erfolgte die detaillierte Durchführung einer Wirtschaftlichkeitsbetrachtung (inkl. Maschinen und auch Personalkosten). Die Grundlage dafür bildete die von PreZero Holz in der Zusammenarbeit mit der JAPES GmbH erstellte Komplettfließbild und deren Daten.