Schlussbericht „Optidämm“

Thema:

Anpassung der Produktionsparameter für Holzfaserdämmstoffe an eine veränderte Holzartenzusammen-setzung zur Optimierung der Produkteigenschaften (OptiDämm)

Zuwendungsempfänger:

Georg-August-Universität Göttingen

Förderkennzeichen:

2218WK56X3

Laufzeit:

01.10.2020 bis 31.10.2024

Monat der Erstellung:

02/2025

Gefördert durch:

Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit

aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages mit Mitteln des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) und des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) über die Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) als Projektträger für den Waldklimafonds unterstützt. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

I. Ziele

Der naturnahe Waldumbau zur Anpassung der Wälder an den Klimawandel führt zu einer erhöhten Biodiversität und veränderten Holzartenzusammensetzung. Damit ändert sich die Rohstoffverfügbarkeit für die Holzwerkstoffindustrie. Das Angebot der bisher hauptsächlich zur Erzeugung von Holzfaserdämmstoffen eingesetzten Fichte wird in Zukunft zunehmend eingeschränkt und die Preise für das Fichtenholz werden steigen.

Nach Angaben eines Herstellers von Holzfaserdämmstoffen führt die Verwendung von alternativ zur Fichte eingesetzten Holzarten wie Kiefer, Lärche, Buche und Eiche bei der industriellen Herstellung von Holzfaserdämmstoffen zu Problemen im Produktionsprozess und zu Festigkeitseinbußen der Platten. Bei extraktstoffreichen Holzarten, wie Kiefer, Lärche, und Eiche kann dies (unter anderem) auf die schlechtere Verklebung zurückzuführen sein. Das Ziel des Projektes war deshalb die Aufklärung der Mechanismen, auf die diese Probleme zurückzuführen sind, und damit die Anpassung des Produktionsprozesses an eine veränderte Holzartenzusammensetzung. Ein Fokus sollte dabei auf dem Einfluss der Holzart und ihrer Inhaltsstoffe auf die Wirkung der gängigen isocyanat-basierten Bindemittel (polymeres Diphenylmethandiisocyanat, pMDI) liegen. Daraus könnten sich auch für alternative Baumarten Nutzungsmöglichkeiten für geringwertige Sortimente und Sägenebenprodukte der Schnittholzproduktion ergeben. Dies erlaubt es den Herstellern von Holzfaserdämmstoffen, ihre Rohstoffbasis zu verbreitern und auf die Veränderungen zu reagieren, die sich durch den Waldumbau und damit aus der Anpassung an den Klimawandel ergeben. Somit könnte ihre Versorgung mit geeigneten Rohstoffen weiterhin garantiert werden und die Wettbewerbsfähigkeit von Holzfaserdämmstoffen gegenüber nicht nachhaltig erzeugten Dämmmaterialien wie Mineralwolle und Polystyrol erhalten bleiben bzw. langfristig gesteigert werden. Im Vergleich zu den genannten konventionellen Dämmmaterialien würde ein erhöhter Einsatz von Holzfaserdämmstoffen im Zuge der Gebäudedämmung darüber hinaus zu einer Erhöhung der Kohlenstoffspeicherung führen und damit in mehrfacher Weise dem Klimawandel entgegenwirken.

1. Aufgabenstellung

Die Aufgabe des Forschungsvorhabens war die Ermittlung der Ursachen und verfahrenstechnischen Hintergründe für Festigkeitsabnahmen von starren, druckfesten Holzfaserdämmplatten bei Verwendung „alternativer“ Hölzer (Kiefer, Lärche, Buche und Eiche) im Vergleich zum Einsatz von Fichtenholz. Darauf aufbauend sollte das Herstellungsverfahren von Holzfaserdämmplatten, das für die Verwendung von Fichte optimiert ist, an die alternativen Holzarten angepasst werden. Die produzierten Dämmstoffe sollten ähnlich gute physikalisch-mechanische Eigenschaften aufweisen wie Holzfaserdämmplatten aus Fichtenfasern.

Die Eigenschaften von Holzfaserdämmplatten werden durch verschiedene Parameter, die sich auf das Holz zurückführen lassen, bestimmt. So unterscheiden sich die Holzarten hinsichtlich ihrer Anatomie (z.B. Dichte, Fasermorphologie) und insbesondere ihrer Holzinhaltsstoffe. Letztere können die Wirkung der konventionell zur Dämmplattenherstellung verwendeten Bindemittel auf Basis von Isocyanaten (polymeres Diphenylmethandiisocyanat, pMDI) beeinflussen. Darüber hinaus entstehen beim hydro-thermischen Holzaufschluss im Refiner Abbauprodukte, die die Reaktion des Bindemittels in vielfältiger Weise beeinflussen können. Ein Ziel des Vorhabens war deshalb die Bestimmung der Fasermorphologie und der statistischen Faserlängenverteilung in Abhängigkeit von der Holzart. Weiterhin lag ein Schwerpunkt bei der Analyse der Inhaltsstoffe und Abbauprodukte (einschließlich pH-Wert) sowie deren Wechselwirkung mit dem Bindemittel (pMDI). Weiterhin sollten andere Bindemittelsysteme auf isocyanat- bzw. PU-Basis untersucht werden; diese ergaben aber keine Verbesserungen der Eigenschaften der Dämmplatten im Vergleich zum pMDI, das beispielsweise auch für mitteldichte Faserplatten (MDF) eingesetzt wird. Andere Fasereigenschaften, wie z. B. die Schüttdichte, sollten ebenfalls bestimmt werden. Des Weiteren war der Einfluss der Holzart auf die physikalisch-mechanischen Eigenschaften der daraus hergestellten Dämmstoffplatten zu bestimmen. Diese Untersuchungen sollten zeigen, wie die Holzart den Herstellungsprozess der Dämmstoffplatten beeinflusst und welche Parameter entsprechend angepasst werden müssen.

2. Stand der Technik

Für Holzfaserdämmplatten werden in der Regel in der Industrie anfallendes Restholz und Industrieholz aus der Durchforstung genutzt. Dieses wird zu Hackschnitzeln verarbeitet und dann mit Hilfe verschiedener Aufschlussverfahren zerfasert. Am gängigsten ist hierbei das Defibratorverfahren nach Asplund mit einer feststehenden und einer rotierenden Mahlscheibe. Das Defibratorverfahren nutzt eine thermische Vorbehandlung mit Wasserdampf bei 160 bis 180 °C. Unter einem Druck von 8 - 12 bar entsteht sog. Thermo-Mechanical-Pulp-(TMP)-Fasermaterial. Vorerwärmung und Zerfaserung sind dabei in einem einzelnen Aggregat kombiniert und finden in einem kontinuierlichen Prozess statt. In Abhängigkeit von Zeit und

Dampfdruck im Vorwärmer, dem Abstand der Mahlscheiben voneinander, dem Zerfaserungsdruck, der Rohstoffart und Rohstofffeuchte sowie der Drehzahl und dem Zustand der Zerfaserungsscheiben entstehen Faserstoffe verschiedener Qualitäten. Üblicherweise werden die nassen Fasern bei der MDF-Herstellung direkt nach der Zerfaserung beleimt. Beim heute üblichen Trockenverfahren werden sie allerdings z.T. auch erst getrocknet und dann in einem Fallschacht oder einer entsprechenden Beleimeinrichtung (z.B. dem Evojet der Fa. Dieffenbacher) beleimt, dann zu einer Matte gestreut und unter Wärme und Sattdampf zu Platten gepresst. Für Holzfaserdämmstoffe werden in der Regel pMDI (polymeres Diphenylmethandiisocyanat) oder Präpolymere auf Basis von MDI verwendet. Dabei entsteht durch die Reaktion von MDI mit Wasser Polyharnstoff als Reaktionsprodukt; es können aber auch kovalente Bindungen zu Zellwandbestandteilen gebildet werden. Durch diese chemischen Verbindungen erreicht pMDI deutlich festere Bindungen als Harnstoff-Formaldehydharze, welche den Verklebungseffekt allein durch Adhäsion und mechanische Verzahnung erreichen. Außerdem ist pMDI feuchtebeständig und formaldehydfrei (Krug 2010).

Der Prozess sowie die Platteneigenschaften werden sowohl durch die Anatomie als auch durch die Extraktstoffe der verwendeten Holzart beeinflusst. Die zu untersuchenden Holzarten unterscheiden sich z. B. hinsichtlich ihrer Rohdichte. Diese hängt hauptsächlich von der Menge der Zellwandsubstanz ab und liegt zwischen 470 kg/m³ (Fichte) und 720 kg/m³ (Buche). Während die Fichte nur 2% Extraktstoffe beinhaltet, weist die Kiefer bereits 4% und die Lärche bis zu 10% auf, wobei auch die Art der Extraktstoffe in den Baumarten sehr unterschiedlich ist. So enthält Kiefernholz vor allem Terpene (auch Harze), Lärchenholz viel Arabinogalactan (van de Kuilen und Schaffrath 2014) und Eichenholz Tannine (Roffael und Rauch 1974).

Im Unterschied zu anderen Holzwerkstoffen wirkt sich bei Faserplatten die Anatomie der Ursprungspflanzen unmittelbar auf die Morphologie der Partikel aus, weil bei der Herstellung von TMP die Holzzellen bevorzugt entlang der Mittellamelle getrennt werden. Dies gilt auch, wenn es sich bei den entstehenden technischen Fasern nicht um anatomische Einzelfasern (Tracheiden, Libriformfasern) handelt, sondern überwiegend um Faserbündel (Benthien 2017). Für die Qualität des Endproduktes sind insbesondere Länge, Durchmesser, Oberflächenstruktur und Zellwanddicke der Fasern entscheidend (Lampert 1966). Die Zellwanddicke bestimmt die Kompressibilität und damit den Anteil der Fasern, die zusammengedrückt als flaches Band und nicht röhrenförmig in der Platte vorliegen. Entscheidend für die Faserausbeute ist der Sklerenchymanteil, weshalb bisher fast ausschließlich Nadelhölzer genutzt werden, da der Sklerenchymanteil bei diesen größer ist als bei Laubhölzern (Deppe und Ernst 1996).

Aus Untersuchungen an Spanplatten ist seit längerem bekannt, dass die Klebfestigkeit von pMDI holzarten-abhängig ist (z.B. Johns et al. 1982; Bao et al. 1999). Die Gründe hierfür sind unklar. Es wird u.a. vermutet, dass eine unterschiedliche Anzahl kovalenter Bindungen (Urethanbrücken) zwischen Klebstoff und Holz gebildet wird (Das et al. 2007). Dies kann z.B. auf eine Reaktion zwischen Klebstoff und holzartenspezifischen Inhaltsstoffen zurückzuführen sein. Auf Faserplatten hat die chemische Zusammensetzung des Holzes einen noch größeren Einfluss als auf andere Holzwerkstoffe, weil aufgrund der hohen Feuchte und Temperatur im Defibrator Holzbestandteile abgebaut und entsprechende Abbauprodukte ebenso wie Extraktstoffe im Prozesswasser gelöst werden. Bei der anschließenden Trocknung lagern sich diese Stoffe dann auf der Faseroberfläche ab, sofern sie nicht verdampfen. Die Holzart kann die Verklebung außerdem über den pH-Wert (und die Pufferkapazität) beeinflussen. Dieser wirkt sich nicht nur auf die Aushärtungsgeschwindigkeit von Kondensationsharzen (Dunky und Niemz 2002), sondern auch auf die Stabilität wässriger Isocyanat-Emulsionen aus (Pizzi 2016). Der pH-Wert der Fasern hängt dabei sowohl von dem des ursprünglichen Holzes ab als auch von der Menge organischer Säuren (Ameisen- u. Essigsäure), die während des Aufschlusses abgespalten werden (Ohlmeyer et al. 2012). Darüber hinaus können hydrophobe Harz- und Fettsäuren die Benetzbarkeit (Dunky und Niemz 2002) und Wasseraufnahmefähigkeit (Waangard und Granados 1967) des Holzes verringern. Dementsprechend sind auch die Eindringung des Klebstoffes in das Holz und die Klebstoffverteilung in der Holzwerkstoffplatte holzartenabhängig (Gruver et al. 2008).

3. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Es bestand eine Zusammenarbeit mit der Arbeitsgruppe Holzwerkstoff- und Naturfaser-Technologien des Fraunhofer-Instituts für Holzforschung Wilhelm-Klauditz-Institut (WKI). Als Unterauftragnehmer im Projekt lieferte das WKI die Fasern, die im TMP-Verfahren hergestellt wurden. Darüber hinaus fand ein intensiver wissenschaftlicher Austausch mit dem WKI statt.

Die Erstellung der Aufnahmen am Mikro-Computertomographen (µCT) erfolgte in der Abt. Holzphysik des Instituts für Holzwissenschaften der Universität Hamburg. Aus diesem Kontakt hat sich eine intensive, noch andauernden Zusammenarbeit ergeben, die auch in Zukunft fortgeführt wird.

II. Ergebnisse

1. Erzielte Ergebnisse

1.1 Untersuchungen zur Fasergeometrie bei unterschiedlichen Mahlscheibenabständen

Zunächst wurde der Einfluss des Mahlscheibenabstandes im Refinerprozess auf die erzielte Fasergeometrie (Faserlänge) untersucht. Die untersuchten Holzfasern wurden am Fraunhofer-Institut für Holzforschung Wilhelm-Kaulitz-Institut (Braunschweig, Deutschland) hergestellt. Entrindete Stämme von Fichte (*Picea abies* L.), Lärche (*Larix decidua* Mill.), Kiefer (*Pinus sylvestris* L.), Rotbuche (*Fagus sylvatica* L.) und Stieleiche (*Quercus robur* L.) wurden von Hand gespalten und mit einem Trommelhacker (120X400H2WT, Klöckner KG, Hirtscheid, Deutschland) zerkleinert. Die erhaltenen Hackschnitzel wurden in einem 12-Zoll-Refiner (Andritz AG, Wien, Österreich) im TMP-Verfahren (thermomechanical pulp) zerfasert. Der Refiner arbeitete mit einer Umdrehungszahl von 3000 Umdrehungen pro Minute (Tabelle 1). Die Hackschnitzel jeder Baumart wurden bei einer Temperatur von 155 °C und einem Druck von 5,5 bar für 5 min gekocht und anschließend jeweils bei Mahlscheibenabständen von 0,2 mm, 0,4 mm, 0,6 mm und 0,8 mm zerfasert.

Tabelle 1: Aufschlussbedingungen im Refinerprozess

Parameter	Einstellungen
Umdrehung [U/min]	3000
Druck [kPa]	550
Temperatur [°C]	155
Verweilzeit [min]	5
Feuchtigkeitsgehalt der Fasern nach Herstellung [%]	15 - 20

Die charakteristischen Längenwerte der Fasern wurden mit einem statischen scannerbasierten Verfahren bestimmt (Bütün Buschalsky et al. 2024). Die Fasern wurden auf einem Scanner (Perfection V850 Pro, Epson, Suwa, Japan) von Hand gleichmäßig verteilt und mit einer Auflösung von 1200 dpi erfasst (Silverfast 8, LaserSoft Imaging, Kiel, Deutschland). Die erhaltenen Scans wurden mit der Software FibreShape Pro (IST AG, Vilters, Schweiz) gemäß ISO 9276 (DIN ISO 9276-2, 2018) ausgewertet. Die Auflösung und der Algorithmus erlaubten eine minimale Partikellänge und -dicke von 53,41 µm und 16,78 µm, was zu einem Schwellenwert für die Dehnung (Verhältnis von Dicke zu Länge) von 0,32 führt, der für eine eindeutige Fasererkennung erforderlich ist. Für jede Variante wurden drei Messungen mit 0,25 (± 0,01) g durchgeführt, und die angegebenen Daten stellen den Mittelwert der längengewichteten geodätischen Länge dar. Die Schüttdichte wurde einmal pro Variante nach DIN EN ISO 17828 (2016) bestimmt.

Die Ergebnisse zeigten, dass die Zerfaserung der Nadelhölzer Fichte, Kiefer und Lärche insgesamt längere Fasern (geodätische Länge) ergibt als die untersuchten Laubhölzer Buche und Eiche. Dabei wurden alle Partikel als „Fasern“ gewertet, die vom der Software FibreShape Pro erkannt wurden. Hierbei kann es sich um einzelne „anatomische“ Fasern, aber vor allem auch um Faserbündel und Faserbruchstücke handeln.

Tabelle 2: Ergebnisse der Untersuchung der geodätischen Längen von Lärche [µm]

		Mahlscheibenabstände in mm			
		0,2	**0,4**	**0,6**	**0,8**
Perzentile	**0**	53,4	53,4	53,4	53,4
	5	275,4	422,2	347,3	313,4
	10	**475,8**	**863,7**	**840,3**	**735,7**
	50	**1774,5**	**3085,2**	**3811,6**	**3619,2**
	90	**4698,1**	**8106,4**	**18775**	**14904,7**
	95	6212,4	12921,6	26312,9	21990,7
	100	19155,9	29073,9	35685,9	32778

Bei einer Betrachtung der kleineren Mahlscheibenabstände von 0,2 mm und 0,4 mm konnte die Unterschiede zwischen den Nadel- und Laubholzfasern noch nicht eindeutig erkannt werden, da die Zerfaserung der Hackschnitzel mehr Staub und sehr kurze Holzfasern produzierte, wodurch die Ergebnisse aller Holzarten teilweise relativ nah beieinander lagen. Erst bei den größeren Mahlscheibenabständen von 0,6 mm und 0,8 mm wurde deutlich, dass die Proben der Nadelhölzer längere Fasern enthalten. So wird beim 90 % Perzentil mit einem Mahlscheibenabstand von 0,8 mm bei der Fichte ein Wert von 24320 µm und bei der Kiefer

ein Wert von 24944 µm ausgegeben. Diese Werte verringerten sich im 90 % Perzentil beim Mahlscheibenabstand von 0,6 mm auf 16987 µm bei der Fichte und auf 16345 µm bei der Kiefer. Die Faserlängen der Lärche (Tabelle 2) zeigten im Vergleich zu Fichte und Kiefer besondere Auffälligkeiten, da bei der Lärche bei der Betrachtung der 10 %-, 50 %- und 90 %-Perzentile eine besondere Abweichung bei der untersuchten Probe mit dem Mahlscheibenabstand von 0,8 mm auftrat. Das 10 % Perzentil gab bei 0,6 mm einen Wert von 840 µm aus, hingegen bei 0,8 mm nur 736 µm. Die Werte des Medians (50 %-Perzentil) zeigten einen ähnlichen Trend, denn dort lag der Wert für 0,6 mm Scheibenabstand bei 3812 µm, jedoch wurden bei 0,8 mm nur 3619 µm gemessen. Sehr deutlich wird dies beim 90 % Perzentil, da sich bei einem Mahlscheibenabstand von 0,6 mm ein Wert von 18775 µm ergab, hingegen der Wert für 0,8 mm nur bei 14905 µm lag.

Bei einem Mahlscheibenabstand von 0,8 mm zeigte die Buche die geringste Faserlänge von 6788 µm, die im Vergleich zur Kiefer (24944 µm) nur etwa ein Viertel von dieser Länge betrug, während sich für die Eiche mit 12109 µm fast die doppelte Länge der Buchenfasern ergab. Bei den Laubhölzern zeigten sich besonders bei den 90 % Perzentilen der Buche Auffälligkeiten, da sich die Werte bei den Mahlscheibenabständen von 0,4 mm, 0,6 mm und 0,8 mm kaum voneinander unterschieden (Tabelle 3). Bei den Medianwerten (50 %-Perzentil) waren die Längen sogar ab dem Mahlscheibenabstand von 0,4 mm (1279 µm) rückläufig bis zu einem Wert von 1061 µm bei einem Abstand von 0,8 mm.

Tabelle 3: Ergebnisse der Untersuchung der geodätischen Längen von Buche [µm].

		Mahlscheibenabstände in mm			
		0,2	**0,4**	**0,6**	**0,8**
Perzentile	**0**	53,4	53,4	53,4	53,4
	5	133,0	94,2	106,8	110,5
	10	**234,8**	**164,2**	**200,0**	**197,2**
	50	**977,8**	**1278,6**	**1121,5**	**1061,0**
	90	**4151,8**	**6318,4**	**6353,6**	**6788,4**
	95	5410,0	8548,3	9162,0	10280,0
	100	17248,5	21210,8	24358,3	23905,3

Vergleicht man die Ergebnisse anhand der unterschiedlichen Mahlscheibenabstände fällt auf, dass bei einem **Mahlscheibenabstand von 0,2 mm** die 10 % Perzentile der Laubbaumarten Buche und Eiche ähnliche Werte, um 250 µm, aufwiesen (Abbildung 1). Die Werte der Nadelhölzer unterschieden sich im Vergleich dazu deutlich. Diese besaßen mit der Kiefer als kleinsten Wert bei 435 µm bis zur Fichte mit 527 µm als größten Wert teilweise im Mittel fast doppelt so lange Holzfasern als die Laubhölzer. Dieser Trend zeigte sich auch bei der Betrachtung des Medians (50 %-Perzentil). Während die Faserlängen der Buche und Eiche unter 1 mm lagen, zeigten die Nadelholzfasern Werte von etwa 1800 µm, welches ähnlich dem Ergebnis des 10-%-Perzentils, etwa der doppelten Länge der Laubholzfasern entspricht. Das 90 %-Perzentil der Eiche lag bei 3327 µm, das der Buche bei 4152 µm. Die Werte der Nadelholzfasern lagen bei 4183 µm (Fichte), 4491 µm (Kiefer) und 4698 µm (Lärche).

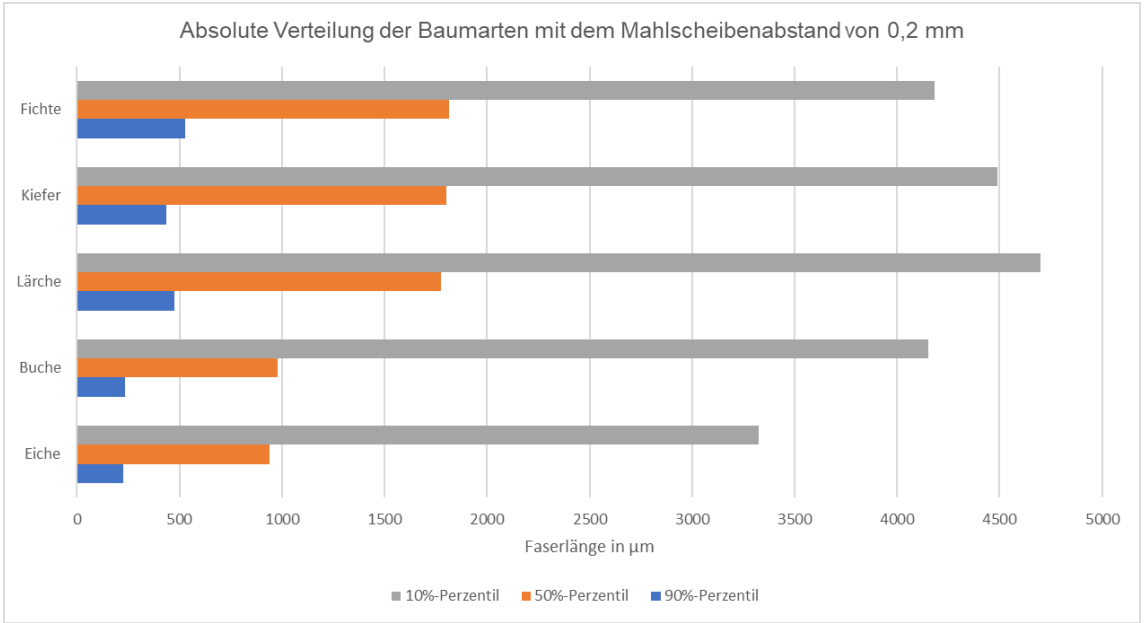


Abbildung 1: Geodätische Länge der Fasern (in µm) bei einem Mahlscheibenabstand von 0,2 mm anhand des 10 %-,50-%- und 90 % Perzentils.

Das 10%-Perzentil zeigte bei einem **Mahlscheibenabstand von 0,4 mm** für die Laubhölzer Faserlängen von 164 µm (Buche) bzw. 220 µm (Eiche) (Abbildung 2) und für die Nadelhölzer von 465 µm (Fichte), 367 µm (Kiefer) und 864 µm (Lärche). Damit wies die Lärche um mehr als 600 µm längere Fasern auf als die Laubholzfasern. Der Median (50%-Perzentil) der Buche und Eiche lag zwischen 1,2 mm bis 1,4 mm, der der Fichte und Kiefer wies Werte um die 2300 µm auf, während die Lärche mit 3085 µm deutlich höhere Medianwerte zeigte. Das 90 %-Perzentil der Buche lag um 6400 µm und das der Eiche bei 5745 µm. Bei den Nadelhölzern lagen die Werte bei 7054 µm (Fichte), 8106 µm (Lärche) und 8363,3 µm (Kiefer).

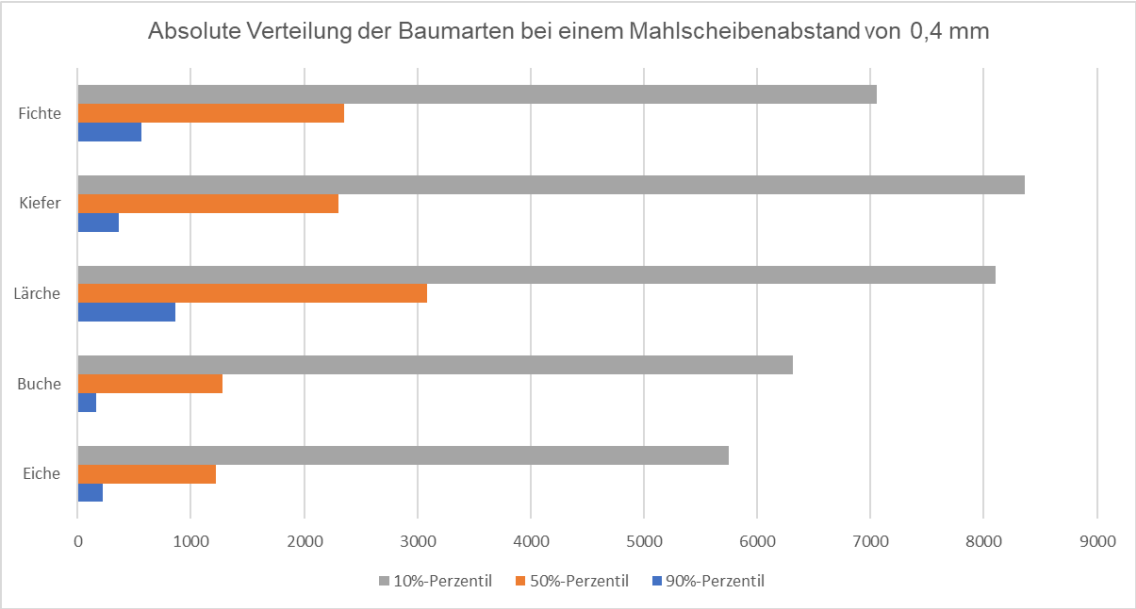


Abbildung 2: Geodätische Länge der Fasern (in µm) bei einem Mahlscheibenabstand von 0,4 mm anhand des 10 %- ,50 %- und 90 % Perzentils.

Bei einem **Mahlscheibenabstand von 0,6 mm** wurde die kürzesten Holzfasern im 10 % Perzentil bei der Eiche (179 µm) gemessen, gefolgt von der Buche (200 µm). Die Nadelhölzer zeigten einen ähnlichen Trend wie bei einem Mahlscheibenabstand vom 0,4 mm: Fichte (692 µm), Kiefer (367 µm), Lärche (840 µm). Am Median wies die Buche eine Faserlänge von rund 1100 µm und die Eiche von 1617 µm auf. Die Medianlängen der Nadelhölzer lagen bei 2975 µm (Fichte), 3420 µm (Kiefer) und 3812 µm (Lärche) und damit über den Werten der Laubhölzer. Das 90 %-Perzentil der Buche lag bei etwa 6200 µm, das der Eiche bei 8387 µm, während die 90 % Perzentile der Nadelholzfasern mit 16978 µm (Fichte), 16345 µm (Kiefer) und besonders bei Lärche mit 18775 µm deutlich größer waren (Abbildung 3).

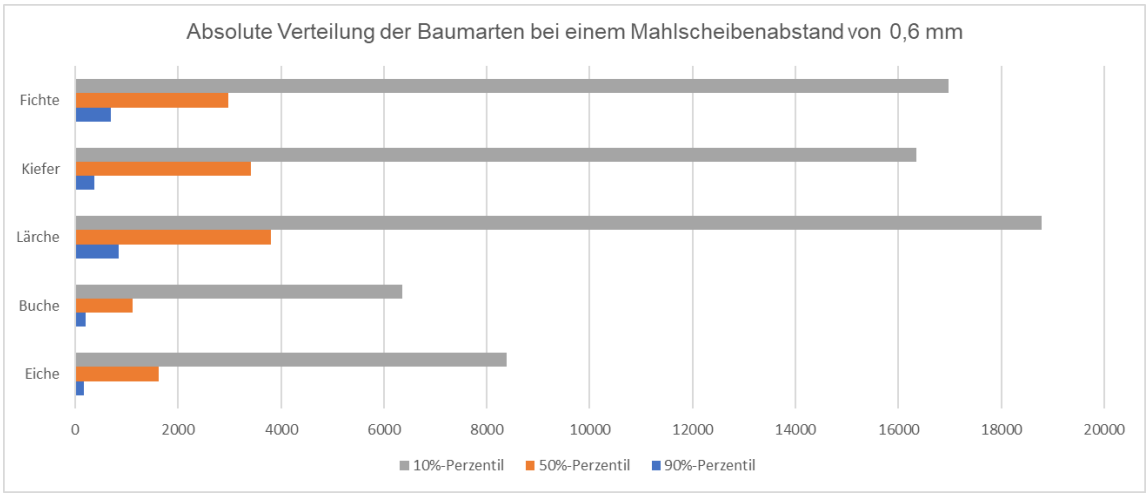


Abbildung 3: Geodätische Länge der Fasern (in µm) bei einem Mahlscheibenabstand von 0,6 mm anhand des 10 %-,50 %- und 90 % Perzentils.

Für den **Mahlscheibenabstand von 0,8 mm** betrug das 10 %-Perzentil der Laubholzfasern 197 µm (Buche) und 267 µm (Eiche) und die der Nadelhölzer 832 µm (Fichte), 557 µm (Kiefer), 736 µm (Lärche). Die Medianlängen lagen bei 1061 µm (Buche) und etwa 2000 µm (Eiche), sowie für die Nadelholzfasern bei

4220 µm (Fichte), 3917 µm (Kiefer) und 3619 µm (Lärche). Im Vergleich zum geringsten gemessenen Wert (Buche), werden bei der Fichte also etwa 4-mal so lange Holzfasern gemessen. Die Faserlängen der 90 %-Perzentile lagen bei 6788 µm (Buche), 12109 µm (Eiche), sowie für die Nadelholzfasern bei 24320 µm (Fichte), 24944 µm (Kiefer), 14905 µm Lärche (Abbildung 4).

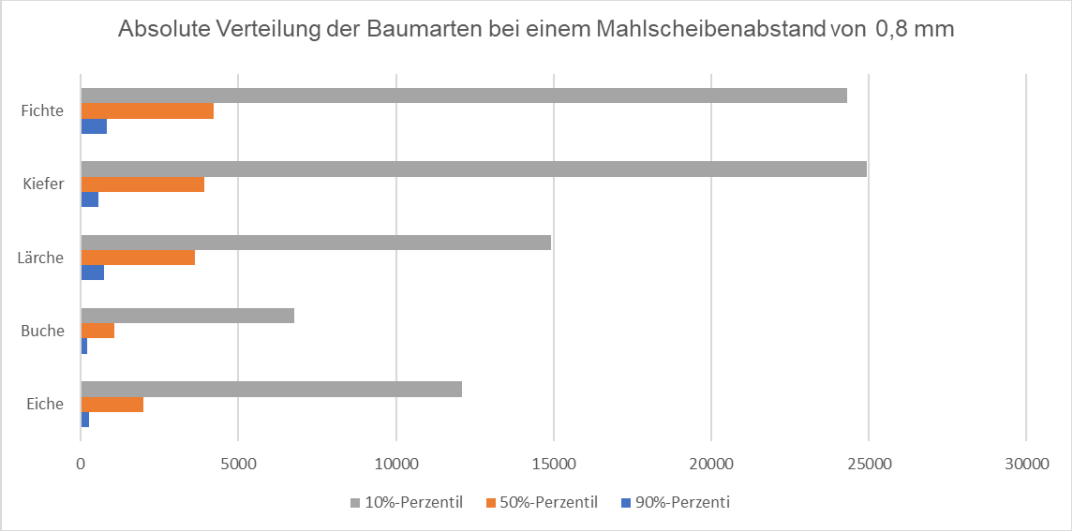
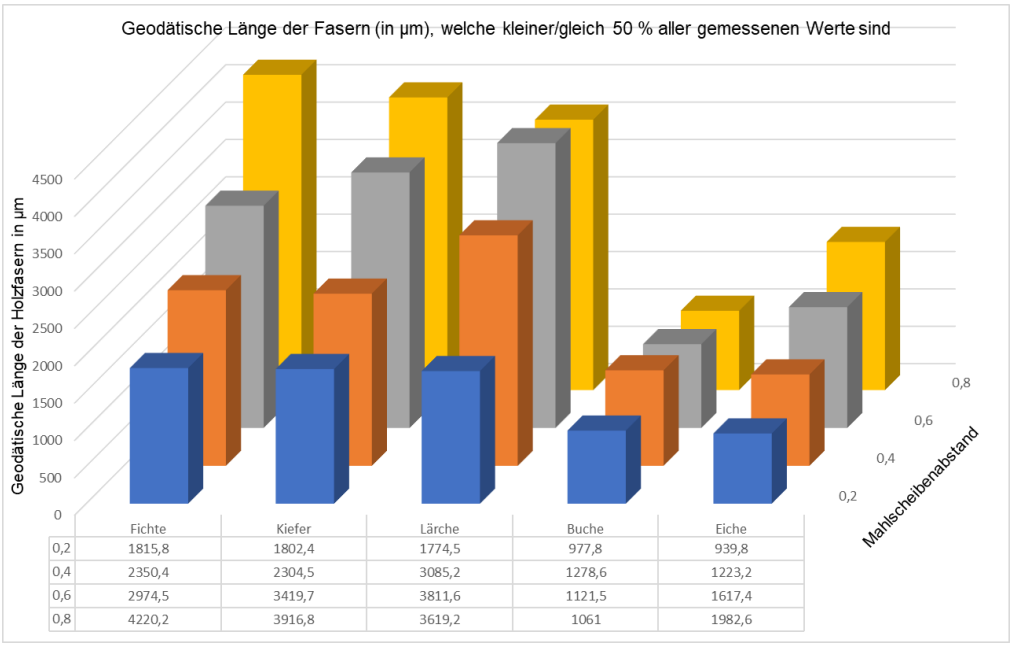


Abbildung 4: Geodätische Länge der Fasern (in µm) bei einem Mahlscheibenabstand von 0,8 mm anhand des 10 %-,50 %- und 90 % Perzentils.

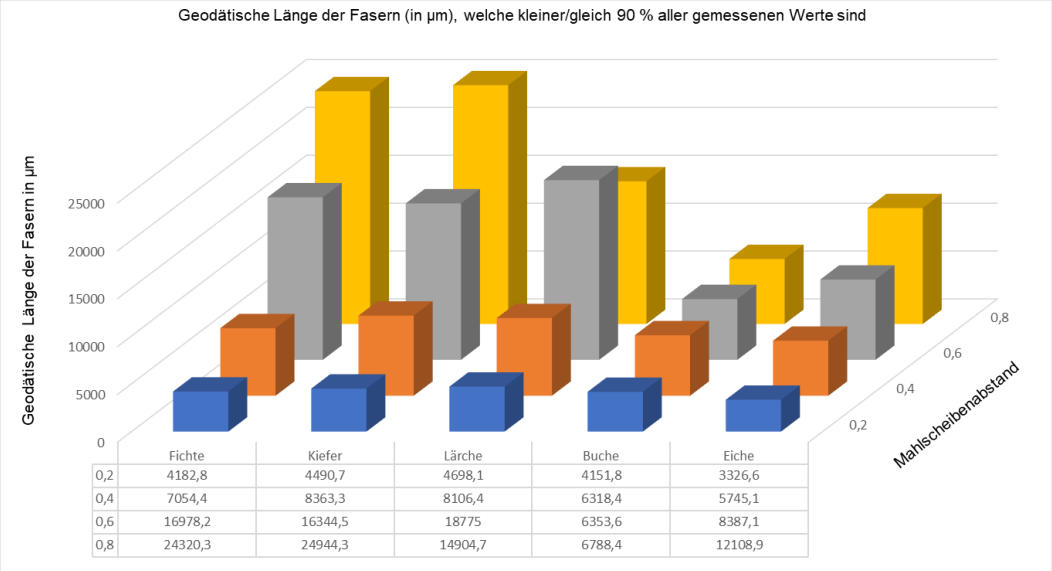
Der Vergleich der 50-%-Perzentile zeigte, dass die Längen der Holzfasern im Allgemeinen mit zunehmendem Mahlscheibenabstand ansteigen (Abbildung 5). Dies galt für Fichte und Kiefer für alle Mahlscheibenabstände. Die Lärche wies demgegenüber bereits bei Mahlscheibenabständen von 0,4 und 0,6 mm deutliche längere Faser als die Fichten- und Kiefernfasern auf, während die Längen der Lärchenfasern bei 0,8 mm Abstand sogar gegenüber dem Abstand von 0,6 mm etwas abnahmen und unter denen der Fichten- und Kiefernfasern lagen. Die jeweiligen Längen der Laubholzfasern waren deutlich geringer als die der Nadelholzfasern. Im Falle der Buchenfasern kam es zu keiner einheitlichen Längenzunahme mit steigendem Mahlscheibenabstand. Besonders die bei 0,6 und 0,8 mm Abstand hergestellten Buchenfasern waren erheblich kürzer als die entsprechenden Eichenfasern.



	Fichte	Kiefer	Lärche	Buche	Eiche
0,2	1815,8	1802,4	1774,5	977,8	939,8
0,4	2350,4	2304,5	3085,2	1278,6	1223,2
0,6	2974,5	3419,7	3811,6	1121,5	1617,4
0,8	4220,2	3916,8	3619,2	1061	1982,6

Abbildung 5: Medianwerte (50-%-Perzentil) der geodätischen Länge der Fasern (in µm) in Abhängigkeit des Mahlscheibenabstands.

Die 90%-Perzentile der geodätischen Länge der Fasern zeigten eine ähnliche Tendenz wie die Medianwerte (Abbildung 6). Im Allgemeinen nahm die Länge der Holzfasern mit zunehmendem Mahlscheibenabstand zu. Auffallend war wiederum, dass bei der Lärche die Faserlängen bei einem Mahlscheibenabstand von 0,6 mm größer waren als bei 0,8 mm. Auch bei der Buche nahm die Faserlänge ab einem Mahlscheibenabstand von 0,4 mm kaum noch zu.



	Fichte	Kiefer	Lärche	Buche	Eiche
0,2	4182,8	4490,7	4698,1	4151,8	3326,6
0,4	7054,4	8363,3	8106,4	6318,4	5745,1
0,6	16978,2	16344,5	18775	6353,6	8387,1
0,8	24320,3	24944,3	14904,7	6788,4	12108,9

Abbildung 6: 90-%-Perzentile der geodätischen Länge der Fasern (in µm) in Abhängigkeit des Mahlscheibenabstands.

Um eine Vergleichbarkeit von Nadel- und Laubholzfasern hinsichtlich der Eigenschaften von Holzfaserdämmstoffen bei annähernd gleichen Faserlängen zu ermöglichen, wurden im Folgenden die Nadelholzfasern mit einem Mahlscheibenabstand von 0,4 mm und die Laubholzfasern mit einem Mahlscheibenabstand von 0,6 mm hergestellt. Diese Abstände ergaben ähnliche geodätische Faserlängen bei den 90%-Perzentilen der Eichenfasern, während die Längen der Buchenfasern deutlich unter denen der Nadelholzfasern lagen. Dagegen liegen die Medianlängen der beiden Laubhölzer, insbesondere der Buche, deutlich unter denen der Nadelholzfasern.

1.2 Einfluss der chemischen Bestandteile der Faserstoffe

1.2.1 Chemische Bestandteile der Faserstoffe

Zunächst sollte untersucht werden, ob chemische Bestandteile der Faserstoffe, die „alternativ“ zu Fichtenholz eingesetzt werden (Kiefer, Lärche, Buche und Eiche), einen Einfluss auf die Bindemittel und damit auf die Eigenschaften der Holzfaserdämmstoffplatten (HFDP) haben. Die Faserstoffe wurden wie unter 1.1 beschrieben hergestellt. Die Hackschnitzel aller Holzarten wurden mit den gleichen Einstellungen (Tabelle 1) in einem Pilotanlagen-Refiner (Andritz AG, Wien, Österreich) zerfasert, lediglich der Scheibenspalt unterschied sich zwischen Nadelholz (0,4 mm) und Laubholz (0,6 mm). Bei den chemischen Bestandteilen kann es sich einerseits um natürliche Extraktstoffe der Hölzer oder um Abbauprodukte handeln, die beim hydro-thermischen Holzaufschluss im Refiner freigesetzt werden. Bei diesen Abbauprodukten sollte es sich überwiegend um Bestandteile der Hemicellulosen handeln, die aufgrund der hydrolytischen Spaltung freigesetzt wurden. Die Untersuchung der chemischen Bestanteile sollte es, in Kombination mit weiteren Untersuchungen, ermöglichen, den Einfluss auf die bei der Herstellung eingesetzten Bindemittel zu ermitteln und diese zu optimieren. Es wurden deshalb zunächst 6-stündige Heißwasserextraktionen der im Refiner erzeugten Fasern vorgenommen. Die Massenanteile der Heißwasserextrakte der untersuchten Holzarten (Tabelle 4) lagen in aus der Literatur bekannten Bereichen (Fengel und Wegener 1983). Die höchsten Gehalte an Extraktstoffen wurden für Lärchenfaser (12,7 %) und Eichenfaser (10,6 %) ermittelt. Bei der Lärche können die hohen Gehalte vor allem auf Arabinogalactane, bei der Eiche auf wasserlösliche Gerbstoffe zurückgeführt werden (Fengel und Wegener 1983). Die niedrigsten Extraktstoffgehalte wurden bei der Fichte (4,9 %) festgestellt. Zur Bestimmung der Zellwandpolymere wurden die Faserstoffe nach der Heißwasserextraktion mit Cyclohexan-Ethanol (2:1) extrahiert, um extraktstofffreies Zellwandmaterial herzustellen.

Die Bestimmung der Lignin-, Holocellulose- und α-Cellulosegehalte erfolgte nach Sluiter et al. (2011). Zur Ligninbestimmung wurden die Fasern mit 72%-iger Schwefelsäure unter Hitzeinfluss versetzt, was eine Auflösung der Polysaccharide zur Folge hatte. Die erhaltene Suspension wurde über einen Glasfaserfilter mit heißem demi. Wasser abfiltriert, bis zur Neutralität gewaschen und bei 103°C getrocknet. Die ermittelten Ligningehalte zeigten bekannte Unterschiede zwischen den Laub- und Nadelhölzern (Fengel und Wegener 1983); die Ligningehalte der Laubhölzer lagen um 22%, die der Nadelhölzer bei 27-30 %.

Der Gehalt der Fasern an Holocellulose wurde nach Wise et al. (1946) ermittelt. Dazu wurden die extrahierten Fasern mehrmals in einer essigsauren Lösung mit Natriumchlorit versetzt und so das Lignin oxidativ entfernt. Nach der Behandlung wurden die Fasern mit Eiswasser und anschließend mit Aceton gewaschen. Die Holocellulosegehalte, die sich aus den Anteilen der Cellulose und der Hemicellulosen zusammensetzen, verhielten sich komplementär zu den Ligningehalten, d.h. die Laubhölzer, die weniger Lignin enthielten, wiesen höhere Holocellulosenanteile (um 79 %) als die Nadelhölzer (70-74 %) auf.

Zur Bestimmung der α-Cellulose wurden die Holocellulosefasern mit Natronlauge (17.5 %-ig) versetzt und 2 h stehen gelassen, um die Hemicellulosen und andere Cellulosebestandteile in Lösung zu bringen (Tappi T 203 cm-22, 2022). Im Anschluss wurden die Fasern filtriert und sukzessive mit Natronlauge (17.5 %-ig), Essigsäure (10 % ig), Aceton und demi. Wasser (bis zu pH 7) gewaschen. Der Anteil der α-Cellulose an der Holocellulose lag zwischen 70-75 % und war bei den Fichten- und Kiefernfasern etwas höher als bei den drei anderen Faserarten. Bezogen auf die Holocellulose sollten die natürlichen Anteile der α-Cellulose im intakten Holz bei etwa 60 % (Laubholz) bis 64 % (Nadelholz) liegen (die Laubhölzer haben einen höheren Hemicellulosenanteil), unter der Annahme, dass der Celluloseanteil unabhängig von der Holzart bei etwa 45 % liegt. Die höheren gemessenen Anteile der α-Cellulose in den Fasern können auf den Abbau der Hemicellulosen beim Aufschlussprozess im Refiner zurückzuführen sein.

Tabelle 4: Übersicht der prozentualen Massenanteile der Zellwandpolymere und Heißwasserextraktstoffe der untersuchten Reinsortimente (der Anteil an α-Cellulose bezieht sich auf die Holocellulose bzw. die extraktstofffreien Fasern)

Holzart	Heißwasser-extrakte [%]	Lignin [%]	Holocellulose (HO) [%]	α-Cellulose in HO [%]	α-Cellulose in Fasern [%]
Buche	6,8 ± 0,4	22,5 ± 0,2	79,8 ± 1,1	71,0 ± 0,8	56,7
Eiche	10,6 ± 1,1	21,3 ± 0,3	78,6 ± 1,6	70,7 ± 2,3	55,6
Fichte	4,9 ± 0,3	27,1 ± 0,6	74,0 ± 0,8	75,2 ± 1,8	55,6
Kiefer	7,3 ± 0,4	29,1 ± 0,5	72,1 ± 1,4	73,2 ± 1,2	52,8
Lärche	12,7 ± 0,9	30,5 ± 0,2	69,8 ± 1,6	71,1 ± 0,7	50,0

Die pH-Wertbestimmung der Heißwasserextrakte zeigte, dass diese etwas saurer waren als die in der Literatur angegebenen Werte (Fengel und Wegener 1983). Dabei wiesen die Extrakte der Nadelhölzer etwas niedrigere pH-Werte auf als die Laubhölzer (Tabelle 5). Dies könnte darauf zurückzuführen sein, dass bei dem Aufschluss im Refiner von den Nadelhölzern größere Mengen an Essigsäure und andere organische Säuren abgespalten wurden. Die freigesetzten Säuren könnten die Aushärtung der isocyanatbasierten Bindemittel beschleunigen.

Tabelle 5: pH-Werte der Extraktstofflösung nach 6-stündiger Heißwasserextraktion im Soxhlet-Extraktor (Tappi T 264 cm-97, 1997)

Holzart	Buche	Eiche	Fichte	Kiefer	Lärche
pH-Wert ± SD	4,3 ±0,2	3,9 ±0,4	3,6 ± 0,3	3,5 ± 0,3	3,6 ± 0,4

Weiterhin wurden die äquivalenten Gehalte der Gesamtzucker nach der der DNS-Methode bestimmt (Wood et al. 2012). Zur Herstellung der DNS-Lösung wurden 16 g NaOH in 700 ml demineralisiertem Wasser gelöst. Zu der Lösung wurden 10 g DNS (3,5-Dinitrosalicylsäure), 300 g Kalium-Natrium-Tartrat und 8 g Natriumdisulfit unter Rühren hinzugefügt und durch Erhitzen auf 80 °C vollständig in Lösung gebracht. Die erhaltene Lösung wurde mit demi. Wasser auf 1 l aufgefüllt. Die in den Soxhletextrakten enthaltenen reduzierenden Zucker wurden mithilfe einer Glucose-Standardlösung quantifiziert. Dazu wurden 100 mg in 100 ml demi. Wasser gelöst und durch entsprechende Verdünnung der Standardlösung wurden Lösungen mit den Konzentrationen 0,2, 0,4, 0,6 und 0,8 g/l hergestellt. Zu 1 ml von jeder Zuckerlösung (Standard- und Extraktstofflösung) wurden 3 ml DNS-Lösung gegeben und vermischt. Nach 15 min im kochenden Wasserbad wurden jeweils 4 ml demi. Wasser hinzugefügt und die Lösung im Eisbad auf Raumtemperatur abgekühlt. Im einem Spektrophotometer wurde die die Absorption bei 550 nm aufgenommen (Wasser diente zur Nullwertbestimmung), anhand der Absorptionen der Standardlösungen eine Eichgrade erstellt und die Glucoseäquivalente der Extraktstoffe berechnet.

Wie in Abbildung 1 zu erkennen ist, wiesen die Buchen- und Fichtenfasern die geringste Menge an Glucoseäquivalenten auf (etwa 1,2 g l^{-1}), Eiche und Kiefer lagen gleichauf mit etwa 3,7 g l^{-1}, während die Lärchenfasern deutlich höhere Glucoseäquivalente enthielten (7,2 g l^{-1}). Hierbei ist zu bedenken, dass bei der DNS-Bestimmungsmethode alle reduzierenden Zucker erfasst werden, also nicht nur Monosaccharide. Da jeweils gleiche Wassermengen zur Extraktion verwendet wurden, kann die ermittelte Menge mit dem prozentualen Anteil der Heißwasserextrakte verglichen werden. Die Mengen an Glucoseäquivalente entsprachen in ihrer Abfolge der Menge der Heißwasserextrakte, waren aber nicht proportional zueinander. Dennoch kann aus den Ergebnissen geschlossen werden, dass es sich bei einem großen Teil der Heißwasserextrakte um Abbauprodukte der Polysaccharide der Zellwand handelt, insbesondere um die der Hemicellulosen.

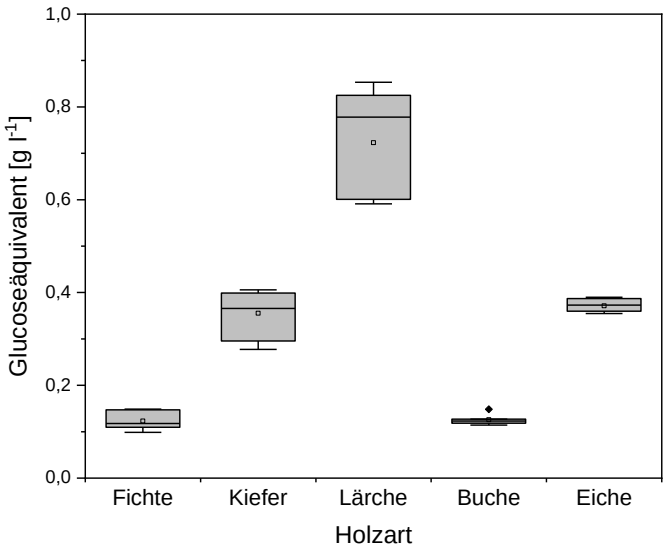


Abbildung 7: Durch Heißwasserextraktion erhaltene Zuckermenge als Glucoseäquivalent bestimmt nach der DNS-Methode (Wood et al. 2012)

Die Untersuchungen der Heißwasserextraktlösungen mittels HPLC zeigten zwar je nach Holzart unterschiedliche Anteile an Mono- und Disacchariden (z. B. für Buchen- und Eichenfasern, Abbildung 8). Wie auch die DNS-Methode zeigt, scheinen diese jedoch nur in sehr geringen Mengen in der Lösung vorhanden zu sein. Abschätzungen zufolge liegt die maximale Konzentration bei 0,5 mg ml^{-1} (Peaks des Disaccharids Cellobiose bei einer Retentionszeit von 7 min in Abbildung 8).

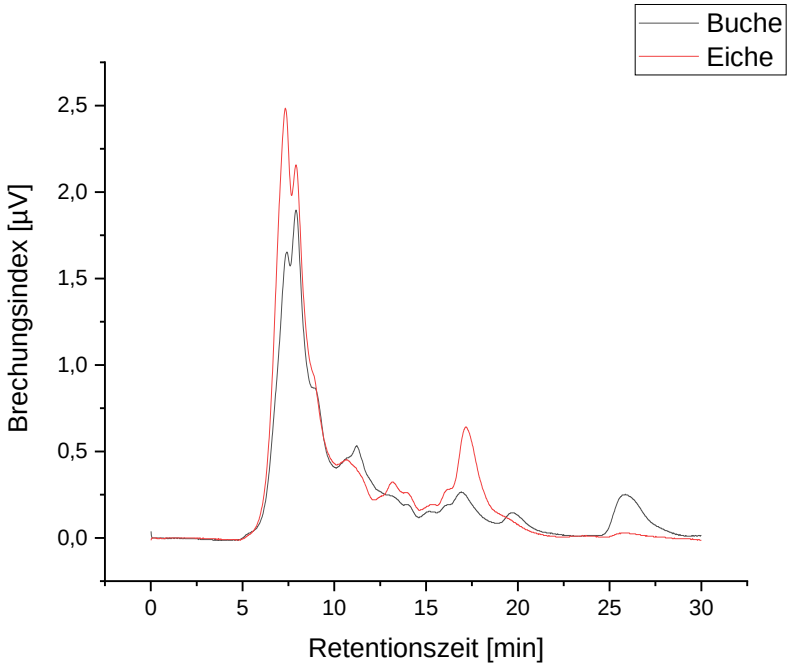


Abbildung 8: Darstellung der HPLC-Chromatogramme der Heißwasserextrakte von Buche und Eiche (40 µl Injektionsvolumen, 0,6 ml/min Durchflussrate, Phenomenex Rezex RPM-Monosaccharid Säule und Phenomenex Cartridge Guard Vorsäule)

In Anbetracht der Tatsache, dass eine 6-stündige Extraktion unter Rückfluss nur geringe Mengen nachweisbarer Zucker aufkonzentrierte, erscheint ein möglicher Einfluss derselben auf die Härtungsreaktion während des Heißdampfprozesses in einer kontinuierlichen Anlage gering.

Weiterhin wurde der Einfluss der Extraktstoffe auf die Aushärtungsreaktion des Isocyanatbindemittels (pMDI) untersucht. Zunächst wurde die Wärmeentwicklung bei der Aushärtungsreaktion des Bindemittels mit Hilfe der Dynamischen Differenzkalorimetrie (DSC) bestimmt. Dabei wurde die Reaktionswärme zu Beginn der Reaktion (Onset), deren Höhepunkt (Peak), deren Ende (Offset) sowie die Gesamtwärmeentwicklung (Fläche der Kurve) ermittelt. Für die Untersuchungen wurden ein DSC 200 F3 Maia Kalorimeter, verschließbare Hochdrucktiegel und das Auswerteprogramm Proteus Analysis (Netzsch Gerätebau GmbH & Co. KG, Selb) verwendet.

Die Proben wurden in einem 50-ml-Becherglas mit einem Glasstab gemischt. Dazu wurden 1 ± 0,1 g pMDI mit einer Präzisionswaage eingewogen. Anschließend wurden 2,5 %ige und 5,0 %ige wässrige Lösungen mit einem Massenanteil von 10 % bezogen auf das Bindemittel zugegeben und insgesamt 20,0 ± 0,1 mg der Gesamtmischung mit einer Pasteurpipette (3 ml) in den Hochdrucktiegel überführt. Nach dem Verschließen des Tiegels wurde dieser in das Kalorimeter eingesetzt und die DSC-Messung gestartet. Die Heizrate während der Messung betrug 10 K min-1. Pro Extraktstoff und Konzentration wurden 6 Messungen durchgeführt.

1.2.2 Einfluss der chemischen Bestandteile der Faserstoffe auf die Aushärtung des Bindemittels

Zur Bewertung des Einflusses der Extraktstoffe auf die Aushärtungsreaktion wurden als Kontrolle die charakteristischen Werte der Fichtenextrakte gewertet, da Fichtenholz für viele Holzfaserdämmstoffhersteller die wichtigste Rohstoffquelle darstellt. Wie an den Werten in Tabelle 5 zu erkennen ist, haben keine der Extrakte eine klare Abnahme der Aushärtungsreaktion des pMDI bewirkt. Auch ein Einfluss der zugegebenen Menge an Extraktstoffen ist nicht zu erkennen. So bewirkte die Zugabe von 2,5 % Eichenfasernextrakt zwar eine Abnahme der Gesamtwärmeentwicklung (Fläche), bei Zugabe von 5.0 % Eichenextrakt war die Wärmefreisetzung aber höher als bei Zugabe beider Mengen an Fichtenextrakt.

Tabelle 6: Charakteristische Werte der DSC-Untersuchung für die Härtungsreaktion von pMDI in Anwesenheit verschiedener Extraktstoffe bei Konzentrationen von 2,5 % und 5,0 % (Mittelwerte ± Standardabweichung, n = 6)

Fasertyp	**2,5 % Zumischung**			
	Fläche [J g^{-1}] ± SD	Onset [°C] ± SD	Peak [°C] ± SD	End [°C] ± SD
Buche	862,0 ± 18,0	113,9 ± 1,2	133,9 ± 2,7	147,7 ± 2,2
Eiche	836,0 ± 6,0	112,7 ± 2,2	132,6 ± 2,5	146,1 ± 2,5
Fichte	849,7 ± 11,6	114,2 ± 1,5	133,6 ± 2,9	145,0 ± 1,7
Kiefer	848,1 ± 19,3	114,2 ± 1,6	132,6 ± 2,7	146,4 ± 3,4
Lärche	855,2 ± 17,2	115,3 ± 1,6	132,9 ± 2,7	145,8 ± 2,1
	5.0 % Zumischung			
	Fläche [J/g] ± SD	Onset [°C] ± SD	Peak [°C] ± SD	End [°C] ± SD
Buche	840,6 ± 18,0	113,4 ± 2,1	131,6 ± 3,2	149,3 ± 2,1
Eiche	861,9 ± 18,9	115,5 ± 2,8	132,4 ± 2,8	146,5 ± 2,8
Fichte	853,8 ± 20,2	115,8 ± 3,0	133,5 ± 4,1	145,6 ± 2,9
Kiefer	876,6 ± 11,2	114,9 ± 2,8	132,6 ± 3,0	147,1 ± 3,1
Lärche	843,7 ± 24,1	114,6 ± 2,5	131,9 ± 2,5	147,3 ± 2,8

Einen ähnlichen Hinweis auf den Einfluss der Extraktstoffe auf die Aushärtungsreaktion des Bindemittels sollte die Gelierzeitmessung ergeben. Die Gelierzeit ist definiert als die Zeit, die eine zur Vernetzung fähige Substanz unter Temperatureinfluss benötigt, um eine gelartige Konsistenz zu erreichen. Der Klebstoff verliert am sogenannten Gelpunkt durch die Ausprägung eines vorläufigen dreidimensionalen Netzwerkes seine Fließfähigkeit (Dunky und Niemz, 2002).

Zur Bestimmung der Gelierzeit wurde das als Ölbadmethode bekannte Verfahren verwendet. Hierzu wurden 20,00 ± 0,01 g der Bindemittelmischung und ein entsprechend dimensionierter Rührfisch in ein Reagenzglas mit 20 mm Durchmesser gegeben. Das mit der Bindemittelmischung gefüllte Reagenzglas wurde in einem mit Thermoöl gefüllten Becherglas mit einem Magnetheizrührer (RH Basic 2, der Firma IKA aus Staufen) auf 100 °C erhitzt und die Rotationsgeschwindigkeit des Magneten auf 400 rpm eingestellt. Die Gelierzeit wurde als der Zeitpunkt bestimmt, an dem sich der Rührfisch nicht mehr drehte und von der gelartigen Masse fixiert wurde. Die Gelierung wurde bei jeder Messung zusätzlich manuell mittels Glasrührstab überprüft. Es wurden drei Wiederholungen durchgeführt (n = 3).

Wie bei den DSC-Untersuchungen kann auch für die Gelierreaktion von pMDI der Zusatz von Fichtenfaserextrakten als Referenzreaktion angesehen werden, da Fichtenholz für viele Holzfaserdämmstoffhersteller die wichtigste Rohstoffquelle darstellt. Eine Zugabe von 2,5 % Fichtenextrakt führte zu längeren Gelierzeiten als die Zugabe der anderen Holzfaserextrakte. Bei Zugabe von 5,0 % Extraktlösung ergaben sich kürzere Gelierzeiten für Eichen- und Kiefernextrakte und längere Gelierzeiten für Buchen- und Lärchenextrakte als bei den Fichtenextrakten (Tabelle 7). Die Verlängerung der Gelierzeit bei Zusatz von Eichen- und Kiefernextrakten lag aber innerhalb der Standardabweichung. Damit zeigte die Zugabe von Extraktstoffen zum Bindemittel keine nennenswerte Behinderung der Aushärtereaktion im Vergleich zur Zugabe von Fichtenfaserextrakten. Ein ähnliches Bild ergab sich bei der Zugabe des Kochwassers der Hackschnitzel vor der Herstellung der Fasern im Refiner.

Tabelle 7: Gelierzeiten für die Härtungsreaktion von pMDI in Anwesenheit verschiedener Extraktstoffe bei Konzentrationen von 2,5 % und 5,0 % (Mittelwerte ± Standardabweichung, n = 3)

Fasertyp	Gelierzeit ± SD [s]	
	2,5 % Zumischung	5,0 % Zumischung
Buche	413 ± 35	404 ± 53
Eiche	414 ± 73	389 ± 63
Fichte	431 ± 37	395 ± 32
Kiefer	381 ± 76	385 ± 56
Lärche	394 ± 53	417 ± 36

1.3 Herstellung von Holzfaserdämmstoffplatten in einer Heißluft-Heißdampf-Pilotanlage

1.3.1 Herstellung des Fasermaterials und Analyse der Fasergeometrie

Ziel dieser Untersuchung war es, die mechanischen und physikalischen Eigenschaften von Holzfaserdämmstoffplatten (HFDP) aus Fasern verschiedener Laub- und Nadelholzarten zu untersuchen, die in einem Refiner durch thermo-mechanischen Aufschluss hergestellt wurden. Starre HFDP mit einer Rohdichte von 100 kg m^{-3} für in einem Trockenverfahren mit Heißdampf hergestellt. Das dazu verwendete Fasermaterial wurde am Fraunhofer WKI in Braunschweig hergestellt. Entrindete Stämme von Fichte (*Picea abies* L.), Lärche (*Larix decidua* Mill.), Kiefer (*Pinus sylvestris* L.), Rotbuche (*Fagus sylvatica* L.) und Stieleiche (*Quercus robur* L.) wurden von Hand gespalten und mit einem Häcker (120X400H2WT, Klöckner KG, Hirtscheid, Deutschland) zerkleinert. Die Hackschnitzel aller Holzarten wurden mit den gleichen Einstellungen (Tabelle 1) in einem Pilotanlagen-Refiner (Andritz AG, Wien, Österreich) zerfasert, lediglich der Scheibenspalt unterschied sich zwischen Nadelholz (0,4 mm) und Laubholz (0,6 mm). Diese Unterscheidung wurde aufgrund von Voruntersuchungen getroffen (Imken et al. 2022, 2024). Die nach EN ISO 17828 (2016) bestimmten Schüttdichten (n = 1 pro Holzart) der erhaltenen Faserstoffe waren bei den Laubholzfaserstoffen (Buche, Eiche) höher als die der drei Nadelhölzer Fichte, Kiefer und Lärche (Tabelle 8). Die höchsten Schüttdichten wurden für Eiche (29,9 kg m^{-3}) und Buche (29,2 kg m^{-3}) ermittelt. Lärchenfasern wiesen den niedrigsten Wert auf (18,1 kg m^{-3}) (Tabelle 8). Dies könnte auf den höheren Anteil an kleinen Partikeln in den Laubholzfasern zurückzuführen sein, die die Hohlräume zwischen längeren Fasern ausfüllen (Suchsland und Woodson 1991, Imken et al. 2021). Die Schüttdichte könnte einen großen Einfluss auf die Festigkeitseigenschaften von HFDP haben, die im Allgemeinen mit abnehmender Schüttdichte der Fasern zunehmen, insbesondere wenn der Verdichtungsgrad gering ist (Suchsland und Woodson 1991).

Die Fasergeometrie wurde wie unter 1.1 beschrieben bestimmt. Die Analyse wurde nach der längenbasierten Gewichtung (Q1) durchgeführt und die präsentierten Daten zeigen die geodätische Länge. Dabei ergab sich, dass selbst bei einem größeren Scheibenspalt die mittlere geodätische Länge bei den Laubhölzern immer noch kleiner war als bei den Nadelhölzern. Um eine ähnliche mittlere geodätische Länge zu erreichen, wurde deshalb für die Laubhölzer ein größerer Scheibenspalt (0,6 mm) als für die Nadelhölzer (0,4 mm) gewählt (Imken et al. 2021). Es ergaben sich große Unterschiede zwischen den Holzarten in Bezug auf die nach der längenbasierten Gewichtung (Q1) ermittelten Faserlängen und die Anzahl der analysierten Partikel (Tabelle 8). Betrachtet man den Median (50%-Quantil), so hatten Fichte und Lärche die längsten Fasern, gefolgt von Buche, Kiefer und Eiche (Tabelle 8). Es werden anspruchsvollere Methoden benötigt, um Fasern und Faserbündel in ihrer dreidimensionalen Komplexität, einschließlich Verzweigung und Spleißen, zu erfassen. Die Rohdatenanalyse der nach EN ISO 17828 (2016) erfassten Werte zeigte, dass ein sehr großer Teil des Materials aufgrund von Verzweigungen nicht bewertet werden konnte. Lediglich Aussagen über Werte wie Länge, Dicke, Krümmung und die daraus abgeleiteten Parameter scheinen die resultierenden mechanischen Eigenschaften der Platten nicht ausreichend zu beschreiben.

Tabelle 8: Schüttdichte [kg m^{-3}], längengewichtete (Q1) Faserlänge [µm] und Partikelanzahl der Faseranalyse

Holzart	**Fichte**	**Kiefer**	**Lärche**	**Buche**	**Eiche**
Schüttdichte [kg m^{-3}]	20,9	19,1	18,1	29,2	29,9
Faserlänge (Q1)					
Unteres Quartil [µm]	108	101	122	104	76
Median [µm]	409	254	397	271	124
Oberes Quartil [µm]	1,724	703	1,095	710	415
Max. Länge [µm]	29.074	27.488	16.847	34.991	27.486
Partikelanzahl	109.241	102.798	57.426	78.629	127.451

1.3.2 Herstellung der Dämmstoffplatten und ihrer mechanischen und hygrischen Eigenschaften

In einem industrienahen Versuch wurden starre Holzfaserdämmstoffplatten im Trockenverfahren mit polymerem Diphenylmethandiisocyanatharz (I-Bond WFI 4370, Huntsman, Everberg, Belgien) als Bindemittel hergestellt. Die aufgetragenen Klebstoffmengen betrug 5 Gew.-% pMDI bezogen auf die Trockenmasse der Fasern. Die Beleimung erfolgte mit Hilfe einer Drehtrommel und anschließender Homogenisierung in einem Luftwirbler. Der Austrag feiner Partikel während dieser Prozesse ist möglich, wurde aber nicht weiter untersucht. Die Mischung aus Fasern und Klebstoffen wurde von Hand in einen Rahmen gestreut und mit einer hydraulischen Vorpresse bei 0,28 N mm-2 verdichtet. Die Ausrichtung der Fasern konnte durch diese manuelle Streuung kaum beeinflusst werden. Zur Aushärtung von pMDI (Heißdampf-Injektion) wurde ein im Eigenbau hergestelltes Heißdampf-Heißluft-Aggregat (Euring et al. 2015) über 120 s mit einer kontrollierten Soll-Kerntemperatur von 140 °C verwendet, was zu einem Pressfaktor von 3 s mm-1 führte. Ein Pressdruck konnte für diesen Arbeitsschritt nicht angegeben werden, da es sich um eine handgefertigte Box mit einer vorgegebenen Dickeneinstellung handelte, die von Hand geschlossen wurde. Jede Variante der Platten wurde in drei Wiederholungen hergestellt und hatte die Abmessungen 650 mm × 650 mm × 40 mm und eine Zielrohdichte von 100 kg m^{-3}.

Zur Bestimmung der mechanischen und hygrischen Eigenschaften wurden die hergestellten Platten nach den folgenden Normen und Vorgaben in geeignete Probengrößen und -mengen geschnitten und nach der Konditionierung auf Druckfestigkeit, Querzugfestigkeit, Wasseraufnahme und Wärmeleitfähigkeit geprüft. Zur Bestimmung der mechanischen Eigenschaften wurde die Universalprüfmaschine (ZwickRoell Zmartpro, ZwickRoell, Ulm, Deutschland) mit einer 10 kN Kraftmessdose verwendet. Abweichend von den Normen zur Bestimmung der physikalisch-mechanischen Eigenschaften wurden alle Proben vor jeder Messung bei 20 ± 2 °C und 65 ± 5 % RH konditioniert. Zur Beurteilung der Druckfestigkeit wurde eine Druckkraft senkrecht zur Oberseite des Probekörpers mit einer konstanten Geschwindigkeit von 10 mm min^{-1} aufgebracht und die Kraft gemessen, die einer 10%igen Kompression entspricht. Die Probenabmessungen betrugen 50 mm x 50 mm x Plattendicke [mm] (5 Probekörper pro Platte, n = 15; EN 826 (DIN EN 826, 2013). Die Querzugfestigkeit wurde senkrecht zur Plattenebene an Proben mit den Abmessungen 50 mm x 50 mm x Dicke [mm] gemessen. Die Zugkraft wurde mit einer konstanten Geschwindigkeit von 10 mm min^{-1} aufgebracht (5 Probekörper pro Platte, n = 15; DIN EN 1607 (2013)). Die Wasseraufnahme wurde über einen Zeitraum von 24 h an Probekörpern mit den Abmessungen 200 mm x 200 mm x Plattendicke [mm] ermittelt. Das Wasser wurde in einen Behälter gefüllt, bis die Unterseite des Probekörpers 10 ± 2 mm unter dem Wasserspiegel lag (2 Probekörper pro Platte, n = 6; DIN EN 1609 (2013)). Als Vergleichsmaßstab dienten Standard-Schwellenwerte für Wanddämmplatten nach DIN 4108-10 (DIN 4108-10 2015).

Die tatsächlichen Rohdichten der HFDP wurden als Mittelwert aller gemessenen Probekörper ermittelt und zeigten nur geringe, nicht signifikante Unterschiede (Tabelle 9). Als Gründe für die Abweichungen von der Zielrohdichte sind Verluste bei der manuellen Aufgabe der Fasern während des Streuvorgangs oder falsche Feuchtemessungen zu nennen, die zu weiteren falschen Dichteberechnungen führten.

Tabelle 9: Arithmetisches Mittel und Standardabweichung (StD) der Rohdichte [kg m^{-3}] von HFDP aus den verschiedenen mit 5 Gew.-% pMDI hergestellten Fasertypen

Holzart	Dichte [kg m^{-3}]	STD
Fichte	92,1	5,4
Kiefer	91,5	8,3
Lärche	99,6	3,8
Buche	97,7	3,9
Eiche	105,8	6,6

Von den Platten aus den fünf Faserarten (Abbildung 9) wiesen Fichte (34,3 kPa) und Buche (32,1 kPa) die höchste Druckfestigkeit auf, gefolgt von Kiefer (28,0 kPa), Eiche (21,5 kPa) und Lärche (20,7 kPa) (Abbildung 9). Die beiden Laubholzarten und die drei Nadelholzarten wiesen untereinander sehr unterschiedliche Werte auf, so dass keine allgemeine Unterscheidung zwischen den Festigkeiten von Laubholz- und Nadelholzplatten getroffen werden konnte. Die Platten aus Lärche und Eiche wiesen die geringste Druckfestigkeit auf (Abbildung 9). Dies stimmt mit einer früheren Studie (Imken et al. 2022) überein, die die geringe Druckfestigkeit von Birkenfasern auf die höhere Rohdichte im Vergleich zu den anderen geprüften Fasern zurückführte (was eine Erklärung für die geringen Werte der Eiche wäre). Unsere Untersuchungen widerlegen jedoch diese Annahme, da HFDP aus Buchenfasern eine sehr hohe Druckfestigkeit aufwiesen, obwohl Buchenfasern die zweithöchste Schüttdichte hatten. Im Gegensatz zu unseren Untersuchungen fand Eichhorn (2017) keine unterschiedlichen Druckfestigkeiten zwischen HFDP aus Buchen- und Eichenfasern. Der Autor berichtete eine Druckfestigkeit von 26,3 kPa für starre HFDP aus Buche und Eiche mit einer Dichte von 100 kg m^{-3}, was zwischen den Werten

für Platten aus Buche und Eiche in dieser Studie liegt. In derselben Studie wurde der große Einfluss der Plattendichte deutlich. Aus Buchenfasern hergestellte Platten mit einer Dichte von 115 kg m^{-3} wiesen eine Druckfestigkeit von 37,3 kPa auf (Eichhorn 2017). Mehrere Hersteller gaben eine deutlich höhere Druckfestigkeit von 50 kPa für industriell hergestellte starre mit einer Dichte von 110-115 kg m^{-3} aus Nadelholzfasern an (GUTEX 2020, PAVATEX 2023, STEICO 2023) (Tabelle 10).

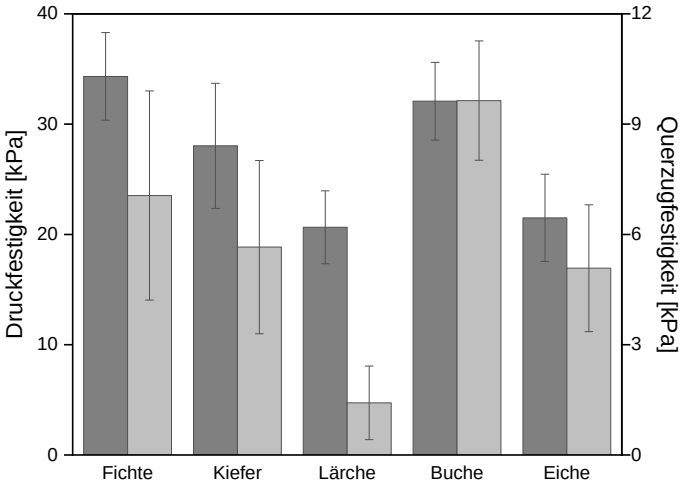


Abbildung 9: Arithmetisches Mittel und Standardabweichung (n=15) der Druckfestigkeit (5 a; linke Skala, dunkelgraue Balken) und der Querzugfestigkeit (5 b; rechte Skala, hellgraue Balken) von HFDP aus den verschiedenen mit 5 Gew.-% pMDI hergestellten Fasertypen.

Tabelle 10: Marktübersicht über industriell hergestellte HFDP mit vergleichbaren Dichtebereichen und entsprechenden Eigenschaften (GUTEX 2024, SOPREMA 2023, STEICO 2024)

Eigenschaft	GUTEX Thermosafe	PAVATEX Pavatherm	STEICO Therm dry
Dichte [kg m^{-3}]	110	115	110
Druckfestigkeit [kPa]	50	50	50
Querzugfestigkeit [kPa]	5	4	10
Wasseraufnahme [kg m^{-2}]	2	n.a.	1
Wärmeleitfähigkeit [W $(mK)^{-1}$]	0.039	0.038	0.037
Brandklasse	E	E	E

Der höchste Wert der Querzugfestigkeit (QZ) für die starren Platten betrug 9,6 kPa für Buche und der niedrigste Wert 1,4 kPa für Lärche (Abbildung 9). In einer früheren Studie lag die QZ für starre Platten mit einer Dichte von 100 kg m^{-3} aus Buchenfasern bei 3,7 kPa, für solche aus Fichtenfasern bei 10,5 kPa und für Platten aus Eichenfasern bei 5,5 kPa (Eichhorn 2017). Während der Wert für Buchenplatten nur ein Drittel des hier berichteten Wertes betrug, war der Wert für Fichtenplatten eineinhalb Mal so hoch und der für Eichenholz in beiden Studien fast gleich hoch. Diese Unterschiede können auf unterschiedliche Prozessbedingungen zurückgeführt werden, insbesondere auf den Mahlspalt bei der Faserherstellung, der die Länge und Geometrie der Fasern beeinflusst (Imken et al. 2021). Die Zerfaserungsbedingungen (Tabelle 1) wurden auf der Grundlage von Erkenntnissen aus einer früheren Studie (Imken et al. 2021) festgelegt, während Eichhorn (2017) sie nicht angab. Eine frühere Studie mit einem Mahlspalt von 0,6 mm ergab einen QZ von 6,0 kPa für Dämmstoffe aus Fichtenfasern (Imken et al. 2022). Beide Werte sind etwas niedriger, aber vergleichbar mit denen hier. Die Hersteller gaben QZ zwischen 4 und 10 kPa für starre Platten mit einer Dichte von 110-115 kg m^{-3} an (GUTEX 2020, PAVATEX 2023a, STEICO 2023a) (Tabelle 10). Von den fünf untersuchten Faserarten wiesen die Platten aus Buche, Fichte, Kiefer und Eiche vergleichbare Werte zu diesem industriellen Referenzbereich auf, während die Platten aus Lärchenfasern niedrigere Werte zeigten (Abbildung 9).

Die Wasseraufnahme der HFDP nach 24 Stunden zeigte eine sehr große Schwankung zwischen 0,7 kg m^{-2} (Lärche) und 7,4 kg m^{-2} für die Kiefernplatten (Abbildung 10). Im Gegensatz zu anderen Studien, die für vergleichbare Laubholzplatten eine signifikant höhere Wasseraufnahme festgestellt haben (Zabihzadeh 2010, Imken et al. 2022, Eichhorn 2017), konnten keine generellen Aussagen über Unterschiede zwischen dem Wasseraufnahmeverhalten der drei Nadelholz- und der beiden Laubplatten gemacht werden. Einerseits zeigten die Fichten-, Lärchen- und Buchenplatten signifikant niedrigere Werte als die Eichen- und Kiefernplatten. Eine sehr hohe Wasseraufnahme von Kiefernplatten wurde auch in einer weiteren

Versuchsreiche beobachtet, bei der die Fasern fraktioniert und starre Dämmstoffplatten mit ähnlicher Dichte in einer Heißpresse hergestellt wurden (1.4). Andere Studien berichteten über eine ähnliche Wasseraufnahme wie bei den Kiefernplatten für Fichten- (Eichhorn 2017) und für Birkenplatten (Imken et al. 2022). Die Wasseraufnahme handelsüblicher Produkte lag aufgrund der Verwendung von Hydrophobierungsmitteln im Bereich von 1-2 kg m^{-2} oder wurde nicht auf diese Eigenschaft geprüft (Tabelle 10).

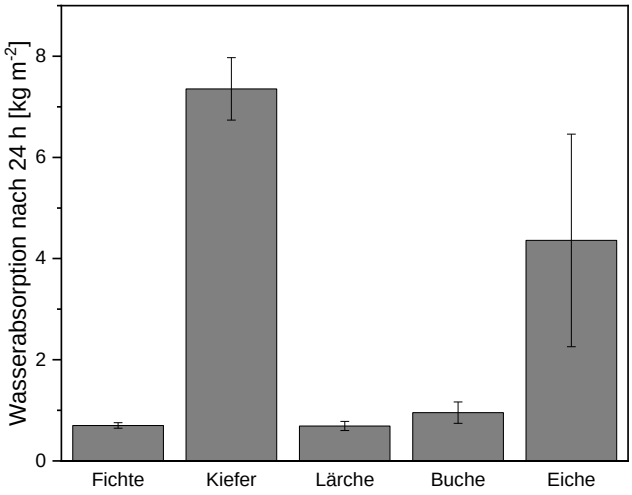


Abbildung 10: Arithmetisches Mittel und Standardabweichung (n=12) der Wasserabsorption nach 24 Stunden von HFDP aus den verschiedenen Fasertypen, die mit 5 Gew.-% pMDI hergestellt wurden.

1.3.3 Brandverhaltens der Dämmstoffplatten

Es wurde weiterhin untersucht, ob sich aus der Verwendung unterschiedlicher Holzarten Änderungen im Brandverhalten der HFDP ergeben. Dazu wurde die Entflammbarkeit der Platten anhand der Rußkegelhöhe bei einer Beflammungszeit von 15 s nach DIN EN ISO 11925-2 (2024) bestimmt (Abbildung 11). Die Rußkegelhöhe der Platten unterschied sich nicht signifikant und reichte von 9,3 cm (Lärche) bis 10,2 cm (Buche). Damit erfüllten alle Platten den Grenzwert der Feuerwiderstandsklasse E (DIN EN 13501-1 (2010)). Im Gegensatz zu früheren Studien, die von geringeren Rußkegelhöhen bei Nadelholzplatten berichteten (Imken et al. 2022, Eichhorn 2017), wurden hier kein genereller Unterschied im Brandverhalten zwischen Laub- und Nadelholzplatten festgestellt. Zwar waren die Rußkegel der Platten aus Fichte und Lärche etwas weniger hoch, aber die Rußkegelhöhe der Kiefernplatten lag zwischen der der Buchen- und Eichenplatten (Abbildung 11). Der Zusatz von Flammschutzmitteln könnte die Entflammbarkeit verringern. Allerdings ergab eine frühere Studie, dass HFDP aus Birkenholz die Norm nicht erfüllte, unabhängig davon, ob Flammschutzmittel zugesetzt wurden oder nicht (Sable et al. 2015). Kommerzielle Produkte mit ähnlichen Dichten und Anwendungsbereichen sind in die Feuerwiderstandsklasse E eingestuft (Tabelle 10) und enthalten bis zu 6 Gew.-% Ammoniumsalze als Flammschutzmittel.

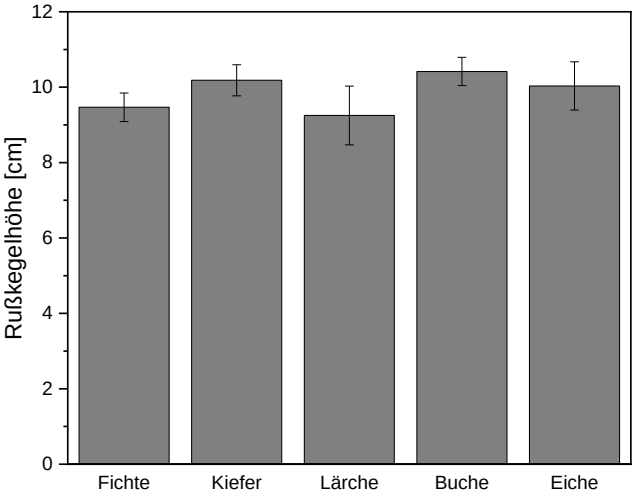


Abbildung 11: Arithmetisches Mittel und Standardabweichung (n=6) der Rußkegelhöhe von HFDP aus den verschiedenen mit 5 Gew.-% pMDI hergestellten Fasertypen.

1.3.4 Wärmeleitfähigkeit der Dämmstoffplatten

Die Wärmeleitfähigkeit wurde nach DIN EN 12667 (2001) mit einem Wärmeleitfähigkeitsmessgerät (HFM 446 Lambda Eco Medium, Netzsch-Gerätebau GmbH, Selb, Deutschland) bei einer mittleren Probentemperatur

von 20 °C bestimmt (∆ T 10 K; Heizrate 1 K min^{-1}; Trockenluftspülung 15 l min^{-1}). Es wurde ein Druck von 0,5 kPa aufgebracht, um einen gleichmäßigen Oberflächenkontakt zwischen den Sensorplatten und den Prüfkörpern zu gewährleisten. Die Stabilitätskriterien entsprachen der Norm ASTM C518 (2021), wobei das Messintervall auf 60 s mit 15 aufeinanderfolgenden Messpunkten geändert wurde. Die Probekörper wiesen Dimensionen von 200 mm x 200 mm x Plattendicke [mm] auf. Alle Proben wurden vor jeder Messung auf 20 ± 2 °C und 65 ± 5 % RH konditioniert und hatten einen durchschnittlichen Feuchtigkeitsgehalt von 8 - 9 %. Pro Platte wurden zwei Proben bei 3 Platten (n = 6) gemessen. Den höchsten Wärmeleitfähigkeitswert (Abbildung 12) wiesen die Eichenplatten (0,044 W $(mK)^{-1}$) und den niedrigsten die Fichten- und Buchenplatten (0,042 W $(mK)^{-1}$) auf. Die relativ hohen Werte der Eichenplatten könnten auf die höheren Rohdichten der Ausgangsplatten zurückzuführen sein (Tabelle 9). Verschiedene Studien berichten über eine abnehmende Wärmeleitfähigkeit von Dämmplatten mit abnehmender Dichte (Kawasaki et al. 1998, Sonderegger und Niemz 2009). Dies könnte anhand der vorliegenden Daten bestätigt werden, auch wenn die Unterschiede marginal sind. Die unterschiedlichen Plattendichten könnten auch der Grund sein, warum im Gegensatz zu früheren Ergebnissen (Imken et al. 2022) kein Zusammenhang zwischen der Wärmeleitfähigkeit und der Schüttdichte der Fasern (Tabelle 8) erkennbar war.

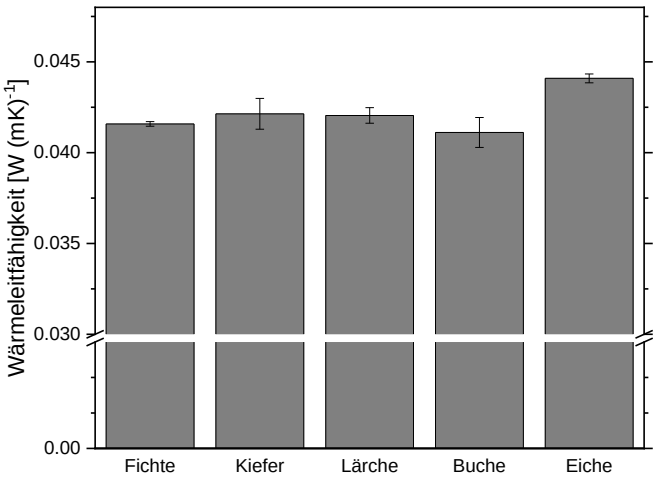


Abbildung 12: Wärmeleitfähigkeit von HFDP aus den verschiedenen Fasertypen, die mit 5 Gew.-% pMDI hergestellt wurden (n = 2 pro Variante).

Sable et al. (2015) berichteten über Wärmeleitfähigkeiten im Bereich von 0,040-0,043 W $(mK)^{-1}$ für HFDP mit Rohdichten von 102-120 kg m^{-3}, die allerdings ausschließlich aus Birkenfasern in einem Nassverfahren hergestellt wurden. Diese Werte passen recht gut zu den hier ermittelten Werten für Fichten- und Buchenfaserplatten (0,042 W $(mK)^{-1}$). Industrielle Hersteller von HFDP geben Wärmeleitfähigkeiten zwischen 0,037-0,038 W°$(m\ K)^{-1}$ für starre Platten mit einer Dichte von 110-115 kg m^{-3} an (Tabelle 10).

1.3.5 Untersuchung der Mikrostruktur und Porosität der Dämmstoffplatten mittels Mikro-Computertomographie (µ-CT)

Die HFDP wurden außerdem mittels Computertomographie analysiert, um ihre Porosität zu bestimmen. Dazu wurde ein Probekörper (ca. 50 mm x 50 mm x Plattendicke) aus einer Platte jeder Holzart geschnitten und mit dem CT-Gerät (CT Duo Alpha, ProCon X-Ray, Sarstedt, Deutschland) am Fraunhofer WKI gescannt. Die Proben wurden auf einen rotierenden Scantisch gelegt und mit einem Klebeband fixiert, wie in Abbildung 13 dargestellt.

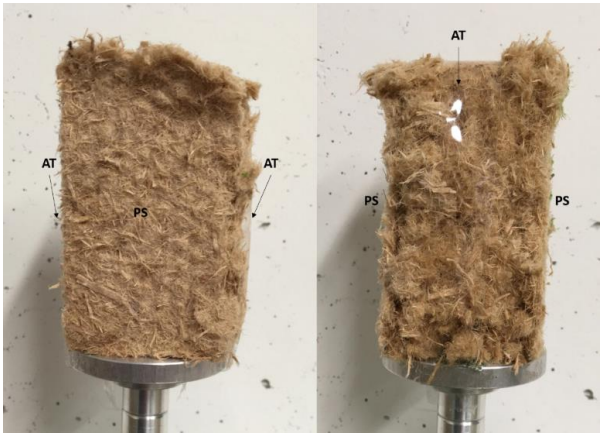


Abbildung 13: Probenvorbereitung und Platzierung auf dem Drehtisch für die CT-Datenerfassung; PS= Pressfläche, AT= Klebeband zur Fixierung

Die Scans wurden entweder als Axial- oder als Helix-Scans bei zwei verschiedenen Röntgenenergien durchgeführt (Röhrenparameter: Spannung 125 kV, Strom 120 µA oder 70 kV und 300 µA). Die resultierende räumliche Auflösung betrug ca. 38 µm / Voxelkante. Die Rohprojektionsdaten wurden mit der Software Xray Office (Fraunhofer, EZRT, Fürth, Deutschland) rekonstruiert, dann in VG Studio Max (Volume Graphics, Heidelberg, Deutschland) für ein erstes visuelles Datenscreening importiert und wieder als DICOM-formatierte Bildserie exportiert. Die Bildverarbeitung und -analyse wurde mit Avizo 2021.2 (Thermo Fisher Scientific, Hillsboro, Oregon, USA) durchgeführt.

Die Teilvolumina der Proben wurden wie in Abbildung 14 dargestellt extrahiert, wobei eine Untersuchungsgröße von 38 mm (1000 Voxel) x 38 mm (1000 Voxel) x Plattendicke angestrebt wurde. Diese Abmessungen mussten jedoch für mehrere Proben angepasst werden, um strukturelle Defekte oder Verformungen auszuschließen. Die Plattendicke wurde zwischen den Pressflächen definiert, wobei Randbereiche mit Pressmustern oder fransigen Kanten ausgeschlossen wurden.

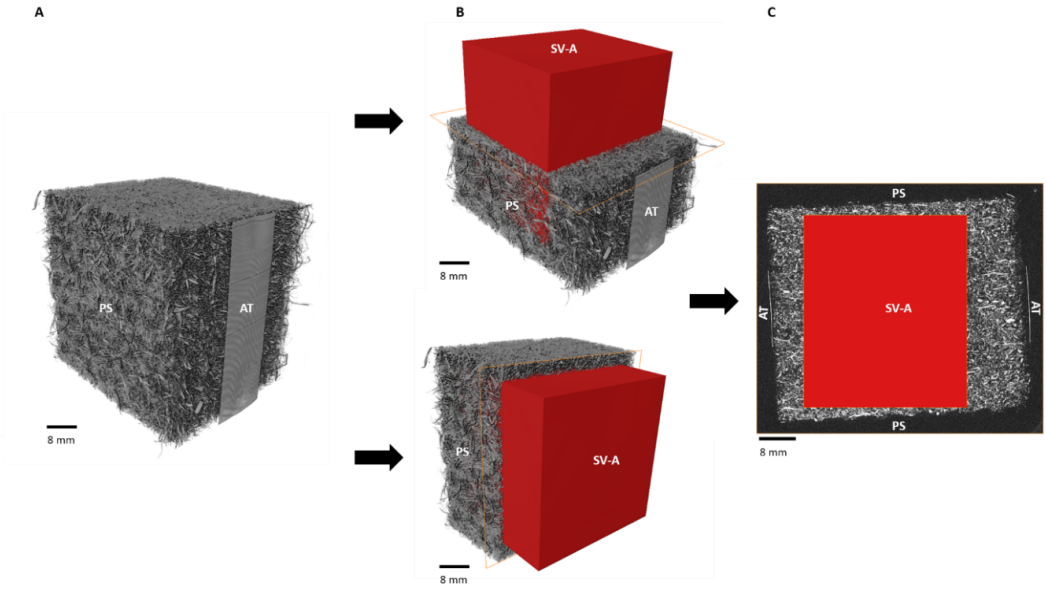


Abbildung 14: Visualisierung von Fichte pMDI 5 Gew.-%-Platten; A: Rekonstruierte CT-Daten mit räumlichen Markierungen; B: Exemplarische Definition von Teilvolumina innerhalb des 3D-Datensatzes; C: Exemplarische 2D-Visualisierung der Definition von Proben-Teilvolumina; PS= Pressfläche, AT= Klebeband zur Fixierung, SV-A (rot)= Teilvolumen zur Analyse.

Die extrahierten Teilvolumina der Proben wurden mit dem Medianfilter bearbeitet, um einen Glättungseffekt zu erzielen und Hintergrundrauschen zu reduzieren. Die Medianfilterung erfolgte durch eine scheibenweise 2D-Verarbeitung, wobei die Orientierung der Pressfläche als Berechnungsgrundlage diente. Die Segmentierung der gefilterten Daten erfolgte mit dem Avizo Auto-Thresholding-Algorithmus unter Verwendung der Faktorisierungsmethode auf der Grundlage des Otsu-Kriteriums (Otsu 1979). Die daraus resultierenden binären Bilder enthielten gelabelte Voxel, die das Holzfasermaterial repräsentierten, und ungelabelte Hohlraum-Voxel, die anhand der Grauwerteigenschaften (GW) bestimmt wurden (Abbildung 15).

Mit der quantitativen Analyse der Binärbilder sollte die Porosität (Φ) der HFDP bestimmt werden. Die Porosität wurde als der Anteil des Hohlraumvolumens in der Faserplatte definiert. Es wurde eine Pixelzählung für das segmentierte Holzfasermaterial und den nicht markierten Hohlraum auf einer 2D-Scheibenbasis durchgeführt. Dies geschah durch den Querschnitt der HFDP, von einer Pressfläche zur anderen. Nach Gleichung 1 wurde die Porosität jeder Scheibe als prozentuales Verhältnis aller Pixel (∑pixall) zu den Pixeln des Hohlraums (∑pixv) berechnet.

Eine Analyse der GW-Verteilung wurde durchgeführt, um die Variation der räumlichen Orientierung innerhalb der Teilvolumina der Probe zu untersuchen. Daher wurde das GW-Intensitätsintegral auf einer 2D-Scheibenbasis für jede Dimension (XY-Scheiben, ZY-Scheiben, ZX-Scheiben) berechnet. Die sich daraus ergebenden Werte stellten die Summe der GWs für jedes Schichtbild dar und boten ein Profil über jede Dimension des Teilvolumens der Probe. Da CT-Daten keine Dichtekalibrierung für GW bieten, wurde der Median der summierten GW aller Schichten pro Dimension zur Standardisierung verwendet. Die sich daraus ergebenden Diagramme zeigen die Abweichung der GWs jedes Schichtperzentils vom Median der GW aller Schichten der jeweiligen Dimension, der als 100 % definiert ist. Da die Anzahl der Scheiben pro Abmessung je nach Plattendicke und Probenintegrität variierte, wurde die mittlere Scheibe der untersuchten Abmessung als neutraler Punkt festgelegt (Scheibennummer 0).

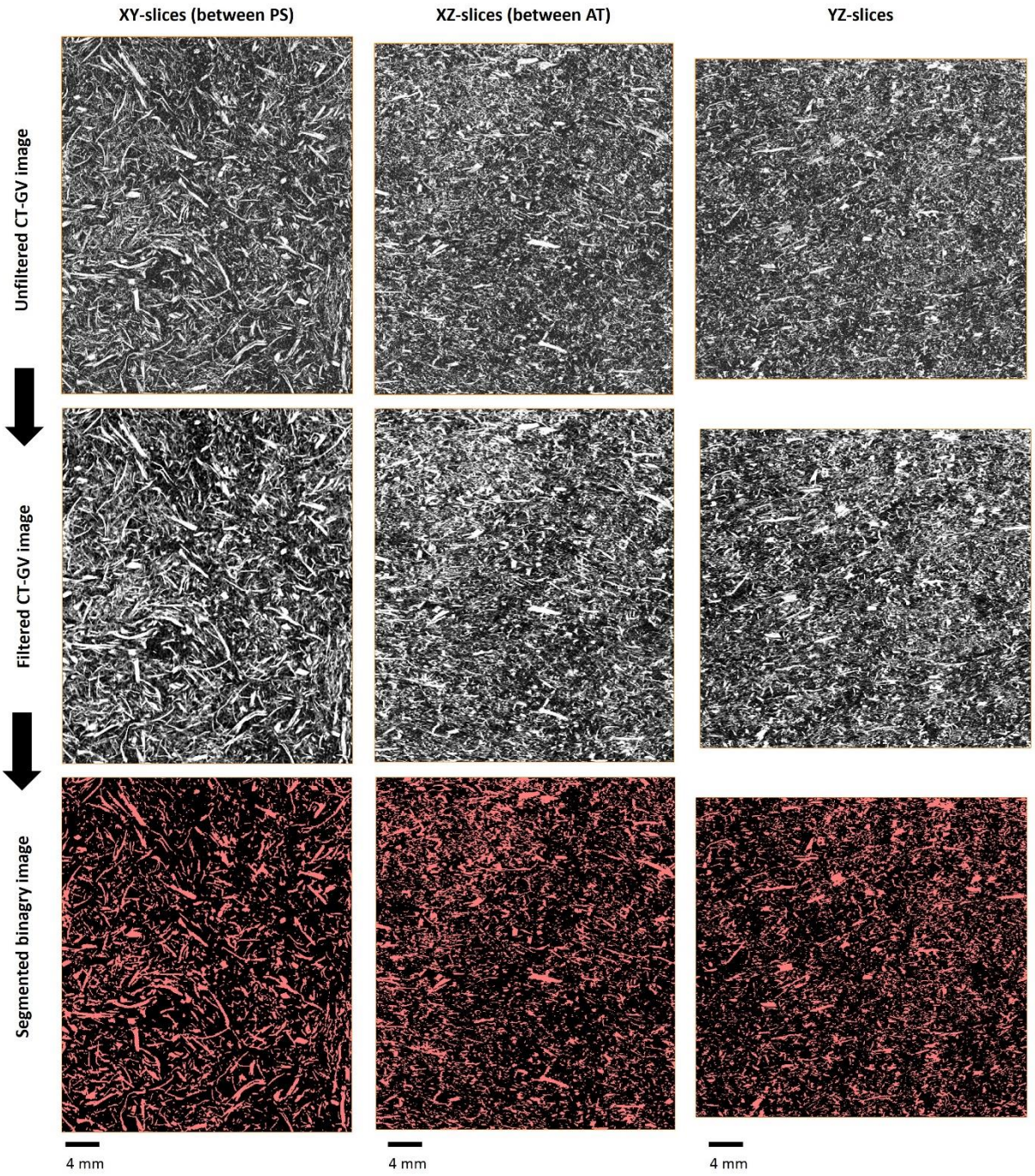


Abbildung 15: Beispielhafte Visualisierung des Segmentierungsprozesses für pMDI (5 Gew.-%)-gebundene Fichtenplatten PS= Pressfläche, AT= Klebstoff.

Die mittels Computertomographie (CT) ermittelten mittleren Porositätswerte der HFDP reichten von 75 % (Lärche) bis 91 % (Eiche) (Abbildung 16). Zum Vergleich wurden die Porositäten der Platten mit einer Zieldichte von 100 kg m^{-3} (Tabelle 11) auf der Basis der mittleren Holzdichten der jeweiligen Holzarten nach DIN 68364 (2003) berechnet. Der Vergleich zeigt, dass die mittels CT ermittelten Werte in einem realistischen Bereich liegen. Die größte Abweichung war bei den aus Lärchenfasern hergestellten Platten zu verzeichnen (9,7 %). Die visuelle Bewertung der segmentierten Teilvolumina der Proben ergab außerdem, dass die dargestellte Faserstruktur für die strukturelle Integrität der WFIB verantwortlich sein könnte und zur Zuverlässigkeit der Ergebnisse beiträgt.

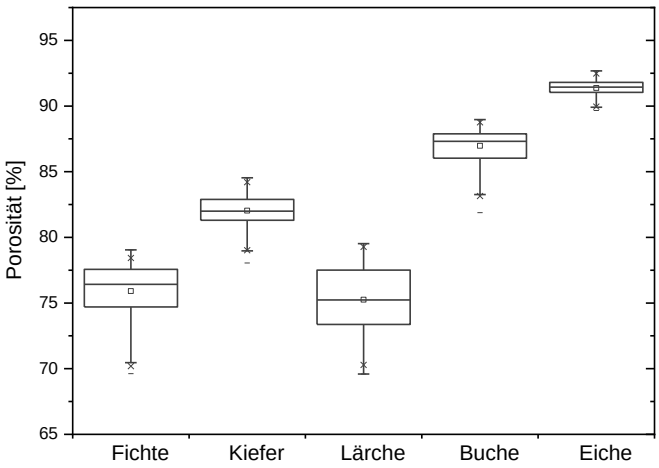


Abbildung 16: Porosität von HFDP aus den verschiedenen Fasertypen, die mit 5 Gew.-% pMDI hergestellt wurden; die Datensätze enthalten die 2D-Porositätswerte eines Scans/eines Teilvolumens der Probe, Schicht für Schicht.

Tabelle 11: Mittlere Dichten [kg m^{-3}] nach DIN 68364 (2003) der verschiedenen Holzarten (Massivholz) und dichtebasiert berechnete Porositäten für die pMDI-verleimten HFDP (Solldichte 100 kg m^{-3})

Holzart	Mittlere Dichte [kg m^{-3}]	Berechnete Porosität
Fichte	460	78
Kiefer	520	81
Lärche	600	83
Buche	710	86
Eiche	710	86

Abbildung 17 zeigt beispielhaft die Visualisierung von Fichten- und Buchen-HFDP. Die eingesetzte CT-Untersuchungsmethode mit einer Auflösung von 38 µm pro Voxelkante ermöglichte eine durchgängige und aussagekräftige Untersuchung des gesamten Plattenquerschnitts und nicht nur die Untersuchung kleiner Teile bestimmter Regionen in der Plattenmitte oder an den Plattenrändern. Nach den Erfahrungen mit holzspanbasierten Werkstoffen (Plinke et al. 2018) konnten jedoch einzelne Fasern aufgrund ihrer geringen Größe mit dieser Auflösung nicht identifiziert werden. Faserbündel und Poren zwischen den Faserbestandteile waren deutlich sichtbar. Da jedoch einzelne Fasern und kleine Partikel (≤ 38 µm) nicht erkannt werden konnten, wurde die Porosität möglicherweise überschätzt. Die vorgeschlagene Verzerrung betraf alle untersuchten Partikel/Späne gleichermaßen und ermöglichte es, die Ergebnisse miteinander in Beziehung zu setzen und die bei ähnlicher Auflösung gewonnenen Porositätsdaten als zuverlässig zu betrachten. Da jedoch Staubpartikel, die kleiner als 500 µm sind, häufiger in Laubholzfasern vorkommen (Imken et al. 2021), könnte die Unterschätzung der Porosität bei Laubholzproben größer sein als bei Nadelholzproben.

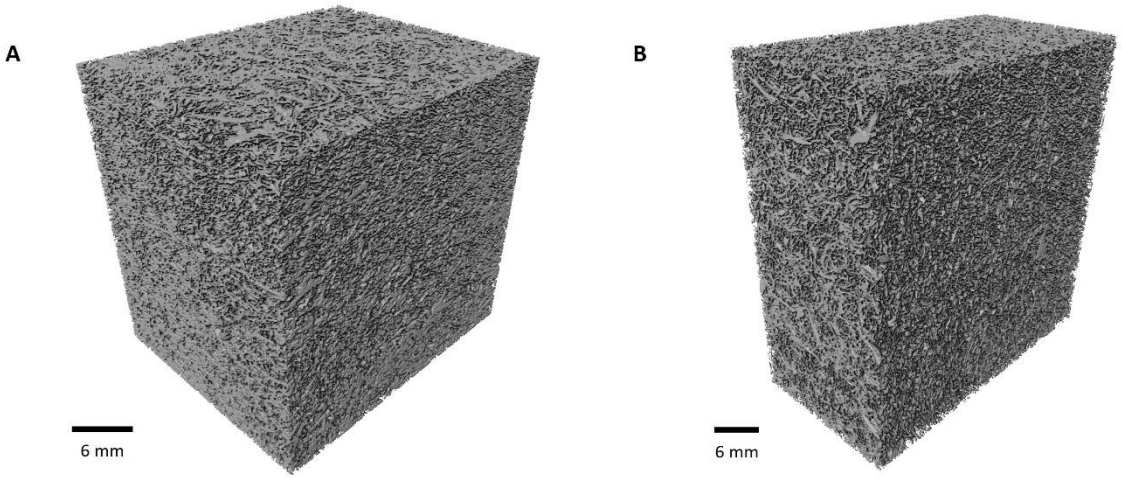


Abbildung 17: Beispielhafte Visualisierung der strukturellen Integrität von segmentierten Teilvolumina der Probe. A: HFDP aus Fichte; B: HFDP aus Buche, beide hergestellt mit 5 Gew.-% pMDI

Die Daten wiesen auf eine tendenziell geringere Porosität der Nadelholz-HFDP im Vergleich zu entsprechenden Laubholzplatten hin. Die statistische Analyse ergab signifikante Unterschiede zwischen allen getesteten Kollektiven. Der Grund dafür könnte in der hohen Anzahl von Werten pro Kollektiv liegen, da die 2D-schnittweise Berechnung ein Porositätsprofil mit über 1000 Porositätswerten pro Teilvolumen der Probe ergab. Es ist bekannt, dass die verwendeten statistischen Testverfahren bei einem derartigen Stichprobenumfang eine höhere Tendenz zum Alpha-Fehler aufweisen (Dormann 2013). Zudem wurden alle Porositätsdatenwerte für jedes Kollektiv aus einem Probenteilvolumen gewonnen. Insgesamt konnten die erwarteten Korrelationen zwischen Porosität und Schüttdichte der Ausgangsfasern sowie zwischen Porosität und mechanischen Eigenschaften nicht direkt bestätigt werden. Die Platten aus den beiden Laubhölzern wiesen aber eine höhere Schüttdichte und Porosität als die der Platten aus Nadelhölzern auf.

Um eine schlüssige Aussage über die Korrelation von CT-Daten und Wärmeleitfähigkeit treffen zu können, erwiesen sich weitere Untersuchungen zur räumlichen Orientierung und zum Fasersensor als notwendig. Da die CT-Daten den gesamten Querschnitt der HFDP abdeckten, war es möglich, das Grauwert-(GW)-Profil mittels Intensitätsintegralrechnung zu untersuchen. Abbildung 18 zeigt beispielhafte GW-Profile für Fichte und Buche HFDP über alle Dimensionen. Es wurde eine Normalisierung auf den mittleren GW verwendet, da die CT-Daten keine Kalibrierung für den GW bieten. Im Allgemeinen weisen HFDP aufgrund ihres Herstellungsverfahrens, das zu einer geringen Verdichtung führt, ein homogenes Rohdichteprofil auf. Das für viele Holzwerkstoffe übliche U-förmige Dichteprofil tritt daher nicht auf (Boehme 1992). Die beobachteten Schwankungen von ± 15 % des mittleren GW über die Teilvolumina der Probe und das Fehlen eines U-förmigen Kurvenverlaufs spiegeln ein homogenes Rohdichteprofil wider und zeigen, dass die typischen HFDP-Eigenschaften reproduziert wurden.

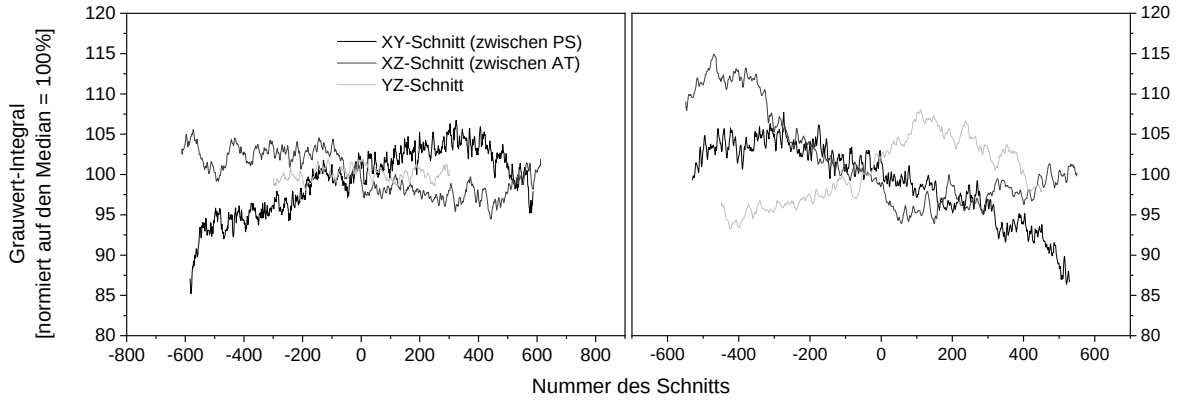


Abbildung 18: Beispielhafte Grauwertprofile für Fichten- und Buchen-HFDP über alle Dimensionen berechnet als Intensitätsintegral normiert auf den Median Grauwert der jeweiligen Dimension; PS= Pressfläche, AT= Klebeband zur Fixierung.

Aus den Untersuchungen ergab sich, dass in weiteren Untersuchungen die Ursachen für die unterschiedlichen Eigenschaften der verschiedenen HFDP unter besonderer Berücksichtigung der Faserfraktionen und der Fasergeometrie über die Standardparameter hinaus untersucht werden sollten. Deshalb sollte eine Absiebung der Fasern in definierte Größenklassen und eine CT-Analyse mit höherer Auflösung erfolgen, die die Möglichkeit bietet, die Anordnung der Faserbündel im dreidimensionalen Raum zu bestimmen. Diese Untersuchungen wurden in Zusammenarbeit mit der Universität Hamburg durchgeführt, die CT-Aufnahmen anfertigte. Sie werden im Folgenden beschrieben und sind zum Zeitpunkt der Erstellung dieses Berichts noch nicht abgeschlossen.

Die Ergebnisse lassen den Schluss zu, dass HFDP aus allen untersuchten Holzarten zufriedenstellende Eigenschaften für die praktische Anwendung aufweisen. HFDP aus Buchenfasern zeigten bessere Eigenschaften als solche aus Eichenfasern und waren mit denen aus Nadelholzfasern vergleichbar.

1.4 Herstellung von Holzfaserdämmstoffplatten aus fraktionierten Fasern in einer Heißpresse

1.4.1 Herstellung des Fasermaterials und Analyse der Fasergeometrie

Ziel war es, den Einfluss unterschiedlicher Faserfraktionen und Faserabmessungen auf die mechanischen und hygrischen Eigenschaften sowie die Wärmeleitfähigkeit von HFDP aus den verschiedenen Holzarten zu untersuchen. Da die Verwendung eines Heißdampfprozesses im Trockenverfahren zu einem inhomogenen Transport des Bindemittels und von Extraktstoffen innerhalb der Platten führen könnte und die Platten teilweise eine etwas inhomogene Struktur aufwiesen, wurden die HFDP in den nachfolgenden Versuchsserien in einer Heißpresse hergestellt. Dieses Vorgehen wurde auch durch die Anschaffung einer modernen Heißpresse und eines Flugmischers zur Faserstoffbeleimung durch die Abteilung Holzbiologie und Holzprodukte (Universität Göttingen) motiviert. Dabei wurde der für den Wärmetransport in das Plattenninnere erforderliche Dampfstoß

durch Aufsprühen von Wasser auf die Oberfläche der vorgepressten Faservliese vor dem Pressen erzeugt. Die verwendeten Holzfasern wurden wie unter 1.1 beschrieben im Refiner (Tabelle 1) des Fraunhofer WKI bei Mahlscheibenabständen von 4 mm für Nadelholz und 0,6 mm für Laubholz hergestellt (Brinker et al. 2025).

Um den Einfluss unterschiedlicher Größenverteilungen der Faserstoffe zu untersuchen, wurden diese in einer Taumelsiebmaschine (Allgaier Werke GmbH, Uhingen, Deutschland) mit zwei Siebeinsätzen mit Maschenweiten von 2 mm und 0,4 mm in einem einstufigen Verfahren getrennt. Die Fraktion kleiner als 0,4 mm wurde als Staub verworfen. Insgesamt standen drei Varianten für die Herstellung von Dämmplatten zur Verfügung, die als ungesiebt, grob (durch das 2 mm-Sieb zurückgehalten) und fein (durch das 0,4 mm-Sieb zurückgehalten) bezeichnet wurden.

Die Schüttdichte der Faserstoffe wurde einmal pro Variante nach DIN EN ISO 17828 (2016) bestimmt. Die Fichtenfasern wiesen insgesamt die niedrigsten Schüttdichten auf, während die Eichenfasern mit Ausnahme der Feinfraktion die höchsten Schüttdichten aufwiesen (Tabelle 12). Bei den gesiebten Fraktionen nahm die Schüttdichte mit der Faserfeinheit zu. Während die ungesiebten Varianten einen nahezu konstanten Anstieg der Rohdichte in der Reihenfolge Fichte, Kiefer, Lärche, Buche und Eiche zeigten, ergab die Analyse der Fraktionen eine Aufteilung der Population in die beiden Untergruppen Nadelholz und Laubholz. Die Schüttdichten der Laubhölzer übertrafen die der Nadelhölzer in allen für die Plattenherstellung verwendeten Varianten deutlich, aber auch bei der ausgeschiedenen Staubfraktion, die den 0,4 mm Siebeinsatz passierte.

Tabelle 12: Schüttdichte und Anteil (in Klammern) der verschiedenen Faserfraktionen (eine Probe pro Variante)

Holzart	**Schüttdichte [kg m^{-3}] (Anteil [%])**			
	Ungesiebt	**Grob**	**Fein**	**Staub**
Fichte	13,3	11,9 (53)	15,0 (32)	38,9 (15)
Kiefer	16,9	14,3 (55)	18,1 (33)	39,7 (12)
Lärche	18,7	14,3 (42)	16,5 (37)	40,3 (21)
Buche	22,7	16,9 (33)	28,5 (45)	58,8 (22)
Eiche	24,1	19,1 (32)	26,8 (43)	70,8 (24)

Ein Vergleich der prozentualen Anteile der Fraktionen je Holzart ergab, dass die Lärche in Bezug auf den Anteil der Grob- und Feinfraktionen zwischen Nadel- und Laubhölzern liegt. Außerdem wurde festgestellt, dass sie in Bezug auf die Staubmenge mit Buche und Eiche vergleichbar ist. Die vorliegenden Werte stimmen tendenziell mit der Literatur überein. Mehrere Studien haben gezeigt, dass der Refineraufschluss bei Laubholz kleinere Partikel erzeugt als bei Nadelholz, was zu höheren Schüttdichten führt (Imken et al. 2021, Brombacher 2015, Park et al. 2001), was auf die jeweiligen besonderen Gewebetypen (Benthien et al. 2017) und die damit verbundenen Rohdichten zurückzuführen ist. Bei der Betrachtung verschiedener Untersuchungen ist zu beachten, dass ein direkter Vergleich der absoluten Werte, sei es Schüttdichte oder Faserabmessungen, nicht sinnvoll ist, da selbst kleinste Unterschiede in der Faserherstellung einen großen Einfluss auf die Eigenschaften der resultierenden Partikelgeometrien und Platteneigenschaften haben können (Imken et al. 2021, DIN EN 12667 2001). Imken et al. (2024) verwendeten die gleichen Anlagen und Mahlbedingungen wie in dieser Studie und erhielten sehr unterschiedliche Schüttdichten (Fichte 20,9 kg m^{-3}, Kiefer 19,1 kg m^{-3}, Lärche 19,1 kg m^{-3}, Buche 29,2 kg m^{-3}, Eiche 29,9 kg m^{-3}) und Faseranteile. Die Ursachen waren nicht mehr nachvollziehbar.

Die branchenübliche visuelle und taktile Prüfung (Benthien et al. 2014) durch mehrere Personen vermittelte den Eindruck, dass in der Taumelsiebmaschine ein Trennungsprozess der Fasern stattgefunden hatte. Splitter und große Faserbündel wurden vor allem in den ungesiebten und groben Fraktionen gefunden (Abbildung 19). Buche und Eiche schienen mehr gekräuselte und verzweigte Fasern als lineare und unverzweigte Fasern zu enthalten, und ihre Oberflächen fühlten sich rauer an als die des Nadelholzes.

Abbildung 19: Fotos der Ursprungsfasern („ungesiebt“) von Kiefer und Eiche sowie der beiden Siebfraktionen „grob“ und „fein“ und des als „Staub“ deklarierten Ausschussmaterials

Zur Analyse der Faserabmessungen wurden charakteristischen Längenwerte der Fasern mit einem statischen scannerbasierten Verfahren bestimmt und mit der Software FibreShape Pro (IST AG, Vilters, Schweiz) gemäß ISO 9276 (DIN ISO 9276-2 2018) ausgewertet (Bütün Buschalsky et al. 2024, Brinker et al. 2025). Hierbei ergab sich, dass der Trennungsprozess mit der Taumelsiebmaschine nicht zu einer scharfen Fraktionierung führte, sondern eher als eine holzartenabhängige Verschiebung der Dimensionsverteilungsdichte beschrieben werden kann. Fasern können durch gegenseitige Verknäuelung verfilzen und agglomerieren (Benthien et al. 2014, Plinke et al. 2012), statische Aufladung durch Reibung kann die Trennung behindern und außerdem wird oft nach der Breite und nicht nach der Länge gesiebt (Plinke et al. 2012). Die dargestellten mittleren Verteilungsdichten gingen von einer Faserlänge von 400 µm aus, um eventuelle Staubreste optisch herauszufiltern und den Kurvenverlauf zu glätten (Abbildung 20). Außerdem hatte der feinste Siebeinlass während der Trennung die gleiche Maschenweite. Als besonders interessant erwies sich der Bereich zwischen 400 - 5000 µm, in dem große Unterschiede in der Siebeffizienz beobachtet wurden.

Anhand der Kurvenverläufe lässt sich feststellen, dass Buche und Eiche sowie Kiefer und Lärche durch die Siebung annähernd gleich getrennt wurden. Die Laubhölzer zeigten fast keine Veränderung in der Faserlängenverteilung mit dem Schwerpunkt um 1000 µm und hatten die höchsten Anteile an Zählungen um diesen Punkt (53 - 57 % für Buche und 51 - 61 % für Eiche) aller Arten. Dies könnte auf das krause und sperrige Erscheinungsbild des Fasermaterials zurückzuführen sein, das nicht gut durch die Siebe ging und viel Feinmaterial zurückhielt. Der Anteil der ungesiebten Lärchen- und Kiefernfasern um den Schwerpunkt bei 1000 µm lag bei 25 % bzw. 30 %. Der Anteil um 1000 µm sank in der Grobfraktion auf 20 % (Lärche) bzw. 19 % (Kiefer) und erreichte in den jeweiligen Feinfraktionen mit 7 % (Lärche) bzw. 6 % (Kiefer) seine Minimalwerte. Eher lineare und unverzweigte Fasern könnten die vergleichsweise guten Trennungsergebnisse erklären. Fichte stellt einen ausgeprägten Subtyp dar mit 32 - 33 % Faseranteil in der Nähe des Schwerpunkts um 1000 µm in der ungesiebten und feinen Variante und einem deutlich höheren Wert von 46 % in der groben Fraktion. Bereits bei der Absiebung wurde beobachtet, dass das Fichtenmaterial auf dem 2-mm-Sieb zur Verklumpung neigte und schwer zu trennen war. Alle Erklärungen für mögliche Gründe sind spekulativ, da damit verbundene Merkmale wie Verzweigung oder Kräuselung mit der Software nur schwer oder gar nicht zu erfassen und zu beschreiben waren.

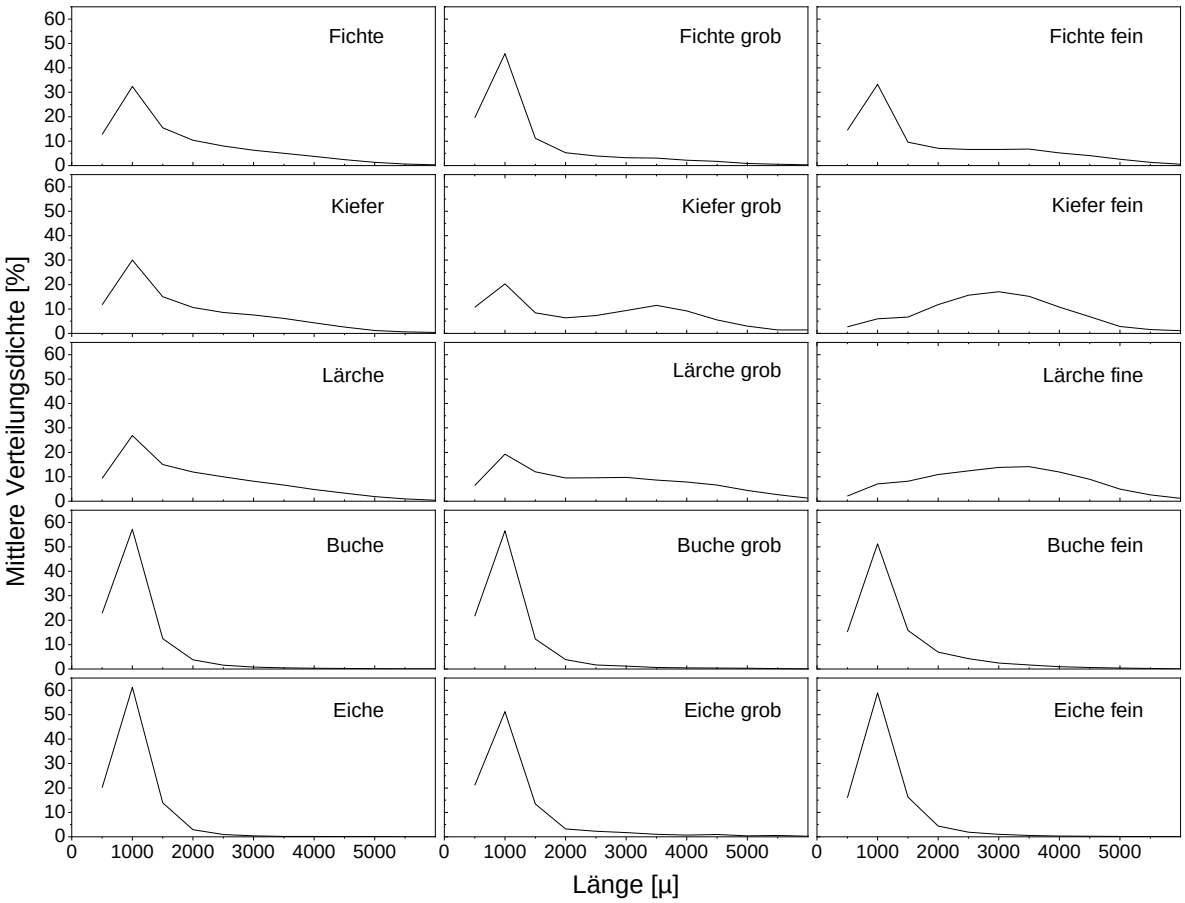


Abbildung 20: Mittlere Verteilungsdichte über die Länge [µm] (q1) von 400 bis 5000 µm

Die Quantilsauswertung für die längeren und strukturell wichtigen Fasern (Soprema et al. 2009) wurde erst ab einer Länge von 1500 µm durchgeführt, um diese Unterschiede zu kompensieren. Der mittlere Faseranteil für die Klasse 1500 µm bis maximale Länge (Tabelle 13) betrug über alle Varianten hinweg 12,4 (± 2,9) %, was die Daten besser vergleichbar macht.

Tabelle 13: Quantilanalyse der Faserlänge [µm] (Q1) ausgehend von 1500 µm der verschiedenen Holzarten und Fraktionen (3 Proben pro Variante)

Quantil	Länge [µm] Fichte			Länge [µm] Kiefer			Länge [µm] Lärche		
	Ungesiebt	Grob	Fein	Ungesiebt	Grob	Fein	Ungesiebt	Grob	Fein
10 %	1672	1708	1794	1697	1982	1880	1696	1837	1894
50 %	2598	2892	3098	2650	3312	2938	2640	3124	3142
90 %	4400	5692	4912	4280	5752	4411	4330	5091	4673
100 %	24296	24125	12660	25471	22060	11870	21474	18307	10530

Quantil	Länge [µm] Buche			Länge [µm] Eiche		
	Ungesiebt	Grob	Fein	Ungesiebt	Grob	Fein
10 %	1570	1600	1607	1550	1680	1569
50 %	2008	2183	2189	1851	2925	1999
90 %	3746	5006	3865	3114	5850	3543
100 %	14267	13480	8318	15234	15311	8752

Die Auswertungen stimmen mit der vorhandenen Literatur überein und bestätigen erneut, dass die Mahlung von Nadelhölzern längere Fasern erzeugt und weniger Staub erzeugt als die von Laubhölzern - selbst, wenn ein kleinerer Mahlscheibenspalt für die Laubhölzer verwendet wird (Benthien et al. 2017, Imken et al. 2021, 2022, 2024, Ohlmeyer et al. 2015). Bei allen Holzarten waren die Längen innerhalb jedes Quantils (mit Ausnahme des 100 %-Quantils) der Grob- und Feinfraktion größer als die des ungesiebten Materials. Dieses Phänomen kann auf die Ausschleusung von linearen, unverzweigten und schlanken Fasern zurückgeführt werden, die die Siebmaschen passierten und anschließend in die Staubfraktion aufgenommen wurden.

Auffällig ist auch, dass die Untergruppen der Laubhölzer, Buche und Eiche, recht ähnliche Werte aufweisen und sich hauptsächlich in den Anteilen der Längenklassen bzw. deren Verteilungsdichte q1 unterscheiden (Abbildung 20).

Die HFDP wurden im Trockenverfahren mit einer industrieüblichen Menge von 5 Gew.-% polymerem Diphenylmethan-Diisocyanat-Harz (pMDI, I-Bond WFI 4370, Huntsman International LLC, Salt Lake City, USA), bezogen auf die Fasertrockenmasse, hergestellt. Vor dem Auftragen des Bindemittels hatten die Fasern einen Feuchtigkeitsgehalt von 11-12 %. Das Bindemittel wurde auf die Fasern aufgesprüht und dabei in einem Pflugscharmischer (FKM 130 D, Gebr. Lödige Maschinenbau GmbH, Paderborn, Deutschland) durchmischt. Die beleimten Fasern wurden von Hand in einem Rahmen von 55 cm x 55 cm x 30 cm und das Faservlies in einer hydraulischen Kaltpresse (HP-S 20, Gottfried Joos Maschinenfabrik GmbH & Co. KG, Pfalzgrafenweiler, Deutschland) bei 200 kPa vorverdichtet. Nach beidseitiger Beaufschlagung der Faservliese mit 25 g Wasser zur Erzeugung eines Dampfstoßes wurden sie in eine Heißpresse (HP-S 250, Gottfried Joos Maschinenfabrik GmbH & Co. KG, Pfalzgrafenweiler) gepresst, auf 30 mm verdichtet, um eine Solldichte von 110 kg m^{-3} zu erreichen und bei 200 °C ausgehärtet. Pro Variante wurden drei Dämmplatten hergestellt.

Die tatsächlich erreichten Rohdichten der Holzfaserdämmplatten (HFDP) wichen von der angestrebten Rohdichte von 110 kg m^{-3} ab (Tabelle 14). Dies ist zum einen dadurch zu erklären, dass der Feuchtegehalt der Fasern schwer zu bestimmen ist, da nur Stichproben mit geringer Fasermasse zur Bestimmung herangezogen wurden. Wird für den Feuchtegehalt ein niedrigerer Wert als der tatsächliche Wert ermittelt, führt dies zu Plattendichten unterhalb der Solldichte. Andererseits führten die unterschiedlichen Faserzusammensetzungen trotz der Vorpressung der beleimten Faservliese zu einem unterschiedlichen Ausbreitungsverhalten beim Heißpressen und damit zu unterschiedlichen Plattenabmessungen, die auch die resultierenden Dichten beeinflussten. Die mechanischen Festigkeitswerte wurden daher dichtekorrigiert, um die geringen Schwankungen auszugleichen.

Tabelle 14: Dichte der HFDP aus den verschiedenen Holzarten und Fraktionen (arithmetisches Mittel (± Standardabweichung), 3 Platten pro Variante)

Holzart	**Dichte [kg m^{-3}]**		
	Ungesiebt	**Grob**	**Fein**
Fichte	97,9 (± 3,0)	99,6 (± 3,3)	94,6 (± 3,1)
Kiefer	106,8 (± 1,3)	107,1 (± 2,2)	104,6 (± 2,2)
Lärche	105,5 (± 1,3)	106,0 (± 0,6)	106,1 (± 0,3)
Buche	106,5 (± 2,8)	106,7 (± 1,5)	108,5 (± 2,7)
Eiche	103,4 (± 1,5)	103,6 (± 0,4)	108,3 (± 3,3)

Die Rohdichteprofile der HFDP wurden aufgenommen, da sie zur Erklärung ihres Eigenschaftsprofils dienen können. Zu ihrer Aufnahme wurde ein Densityprofiler (GreCon GmbH, Alfeld, Deutschland) verwendet. Die Proben (50 mm × 50 mm × Plattendicke [mm]) wurden vor jeder Messung bei 20 ± 2 °C und 65 ± 5 % r.F. auf eine konstante Masse konditioniert. Es wurden stichprobenartig Profile für alle Varianten gemessen, aber nur die charakteristischen Profile aller drei Varianten von Fichte (charakteristisch für Nadelholz) und Buche (charakteristisch für Laubholz) werden dargestellt. Die Proben wurden so in das Gerät eingelegt, dass das Dichteprofil über die gesamte Dicke der Platte aufgezeichnet wurde. Der Röntgenstrahl hat eine Höhe von 35 mm und eine Breite von 100 µm; der Dichtewert ist daher der Mittelwert über diese vertikale Ebene.

1.4.2 Rohdichte und Rohdichteprofile der Dämmstoffe

Die Dichteprofile wiesen je nach Variante unterschiedliche Merkmale auf (Abbildung 21). Nadelholzplatten zeigten tendenziell ein Gefälle mit höheren Dichten im oberen Bereich der Prüfkörper. Im Gegensatz dazu wiesen die Laubholzplatten ein symmetrischeres Profil mit einer etwas geringeren Dichte in der Mitte der Platte auf. Insgesamt zeigten alle Proben einen deutlich geringeren Dichteunterschied in der Mitte der Platte als Platten mit höherer Dichte wie MDF. Die Unterschiede im Dichteprofil lassen sich durch die unterschiedlichen Schüttdichten der Fasern erklären (Tabelle 12). Eine geringere Schüttdichte, wie die von Nadelholzfasern, führt nach dem Streuen zu einem dickeren Faservlies als das der Laubholzfasern, die eine höhere Schüttdichte aufweisen. Aus diesem Grund ist der Verdichtungsweg bei Nadelholzfasern größer und die Bretter sind bereits auf der Oberseite ausgehärtet, wenn die Presse von oben beschickt wird, wobei die Verdichtung nach unten hin geringer ausfällt. Bei Laubholzfasern ist der Verdichtungsweg kürzer und die Verdichtung ist gleichmäßiger über die Plattendicke verteilt. Außerdem ist davon auszugehen, dass die Wärmeübertragung zur Plattenmitte hin bei den dickeren Nadelholzvliesen (geringere Dichte) langsamer ist und daher an den Außenseiten höhere Temperaturen erreicht werden. Dies begünstigt eine schnelle Aushärtung zu Beginn des Pressens (Verdichtung). Es zeigte sich auch die Tendenz, dass die Dichtegradienten der Nadelholzplatten umso ausgeprägter waren, je niedriger die Schüttdichte der Variante war. So war der Gradient bei den groben Fasern am größten, gefolgt von den ungesiebten und feinen Fasern.

Da die HFDP für die universelle Verwendung in Innenräumen, wie z. B. als Wanddämmung (DIN 4108-10 2015), konzipiert wurden, können sie mit den drei vergleichbaren Industrieprodukten in Tabelle 10 verglichen werden.

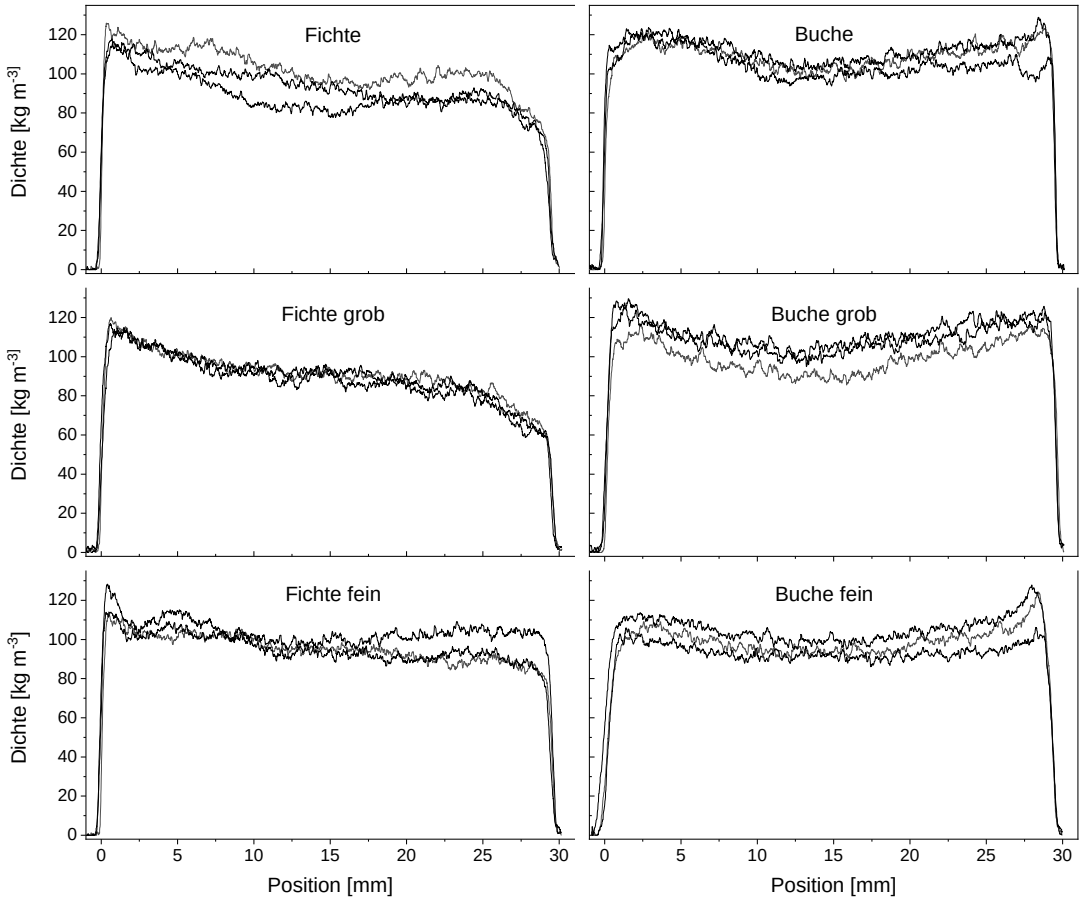


Abbildung 21: Rohdichteprofile der Plattenvarianten aus ungesiebten, groben und feinen Fichten- und Buchenfasern.

1.4.3 Mechanische und hygrische Eigenschaften der Dämmstoffplatten

Die mechanischen und hygrischen Eigenschaften der HFDP wurden wie unter 1.3.2 beschrieben bestimmt (Brinker et al. 2025). Folgende Prüfkörperanzahlen wurden dabei verwendet: Druckfestigkeit - 8 Probekörper pro Platte, n = 24; Querzugfestigkeit - 8 Probekörper pro Platte, n = 24; Wasseraufnahme - 2 Probekörper pro Platte, n = 6. Die Festigkeitsmittelwerte wurden einer Dichtekorrektur unterzogen, indem die Rohdaten der einzelnen Probekörper auf die Solldichte (110 kg m-3) bezogen wurden. Im Falle der Wasseraufnahme wurde dies nicht durchgeführt.

Die höchsten Mittelwerte für die dichtekorrigierte Druckfestigkeit erreichten Kiefer „ungesiebt“ (50,0 kPa) und „fein“ (52,5 kPa) und die niedrigsten die Buche „grob“ (18,6 kPa) und „fein“ (17,4 kPa) (Abbildung 22). Fichte und Lärche lagen etwa gleichauf, während Eiche etwas höhere Werte als Buche erreichte. Die Grundannahme dieser Untersuchung war, dass die Größenverteilung der Fasern der verschiedenen Holzarten einen wichtigen Einfluss auf die Eigenschaften von HFDP hat. In Bezug auf die Druckfestigkeit wurde angenommen, dass ein höherer Anteil an längeren Fasern zu einer höheren Druckfestigkeit führt. Dies wurde durch die Tatsache bestätigt, dass die Verwendung der drei Nadelholzarten zu höheren Druckfestigkeiten führte als die der Laubhölzer. Entgegen der Hypothese ergaben jedoch die Feinfraktionen höhere Druckfestigkeiten als die Grobfraktionen (außer Buche). Die Buchen- und Eichenfasern sowie die Kiefern- und Lärchenfasern wiesen sehr ähnliche mittlere Verteilungsdichten auf (Abbildung 20). Dies spiegelte sich nur teilweise in den Druckfestigkeiten wider, da Buchen- und Eichenfasern ähnliche Druckfestigkeiten aufwiesen, während die Festigkeiten von Platten aus Kiefern- und Lärchenfasern leicht unterschiedlich waren.

Die wenigen verfügbaren Literaturquellen reichen von der Bestätigung des Verhältnisses zwischen Buche und Eiche (Eichhorn 2017) bis zu deutlich höheren Werten bei der Verwendung von Buchenfasern (Imken et al. 2024). Ein ähnliches Phänomen divergierender Werte ist bei Nadelholzarten zu beobachten (Imken et al. 2024). Dies unterstreicht die große Abhängigkeit der Messwerte von selbst kleinen Unterschieden und Abweichungen in allen Schritten der Herstellungsprozesse, vom Faseraufschluss bis zum Plattenprodukt. Der industriell definierte Grenzwert von 50 kPa wurde bei allen drei Vergleichsprodukten (Tabelle 10) von HFDP aus ungesiebten und feinen Kiefernfasern überschritten. Die Druckfestigkeiten lassen sich recht gut mit der Faserlängendichteverteilung q1 (Abbildung 20) und den drei Siebklassen erklären. Besonders deutlich wurde

dies bei Kiefer und Lärche, deren Aufteilung in Fraktionen am stärksten ausgeprägt war und eindeutig dem gleichen Verlauf der Festigkeitswerte folgte (ungesiebt > grob < fein).

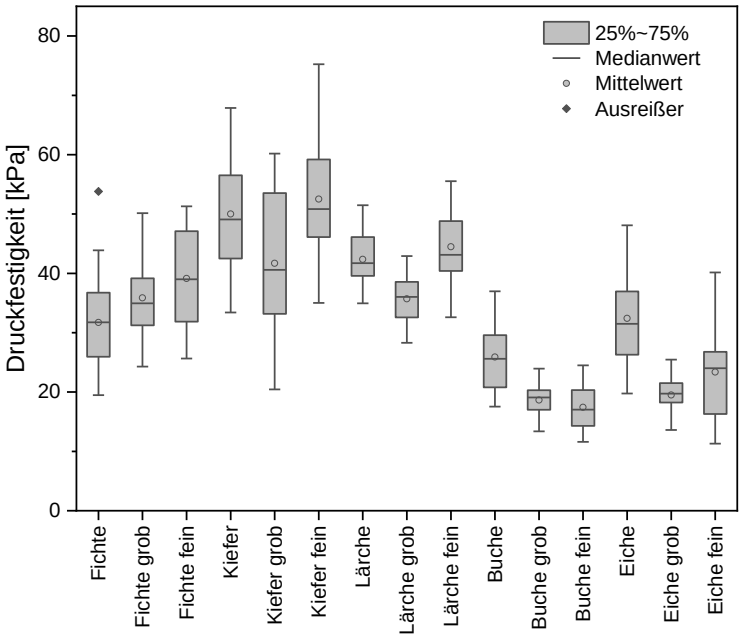


Abbildung 22: Druckfestigkeit der HFDP aus den verschiedenen Holzarten und -fraktionen (24 Proben aus 3 Platten pro Variante)

Bei den Laubhölzern fällt auf, dass sich die Siebung offenbar negativ auf die Druckfestigkeit und die Querzugfestigkeitt auswirkt (Abbildung 22, Abbildung 23), denn die Werte für die Grob- und Feinfraktion lagen unter denen des ungesiebten Materials. Die mittlere Querzugfestigkeit (QZ) der ungesiebten Buche (7,8 kPa) und Eiche (7,8 kPa) war deutlich höher als die aller anderen Varianten (und Holzarten). Die höheren Werte der ungesiebten Buche und Eiche könnten auf die beobachteten verzweigten und rauen Fasern zurückzuführen sein, die sich möglicherweise wie ein Klettverschluss ineinander verhaken und diese Fähigkeit durch das Sieben verlieren. Eine hohe Oberflächenrauhigkeit der Fasern kann ebenfalls zur QZ der Platten beitragen (Wenderdel et al. 2013). Die niedrigsten QZ-Werte wurden für die Lärchenvarianten „ungesiebt“ (3,2 kPa), „grob“ (2,4 kPa) und „fein“ (3,9 kPa) beobachtet, mit Ausnahme der Eiche „grob“ (3,2 kPa), die mit den von Imken et al. (2024) berichteten Ergebnissen vergleichbar waren. Die QZ der industriellen HFDP reicht von 5 - 10 kPa (Tabelle 10) und konnte in dieser Studie mit Fichte („grob“, „fein“), Kiefer („ungesiebt“, „grob“) sowie Buche und Eiche („ungesiebt“) erreicht werden.

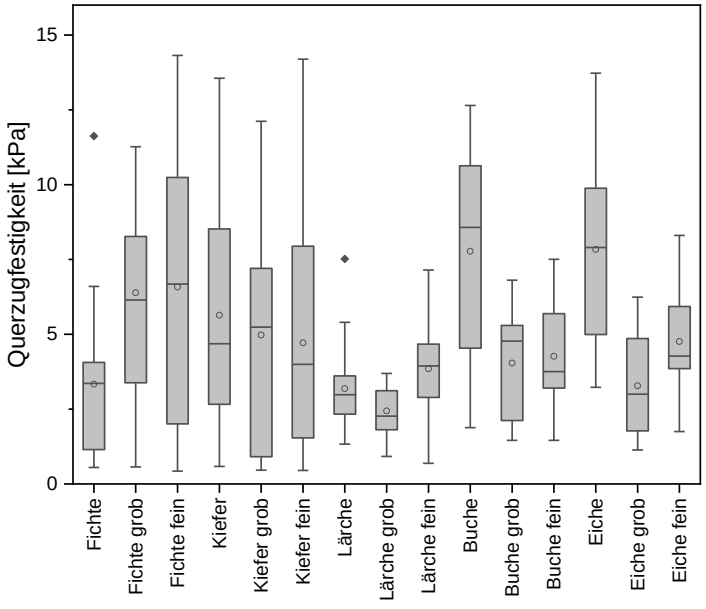


Abbildung 23: Querzugfestigkeit der HFDP aus den verschiedenen Holzarten und Fraktionen (arithmetisches Mittel (Kreis), Median (Linie), Standardabweichung (Whisker) und Ausreißer (Karo), 24 Proben aus 3 Platten pro Variante)

Die Wasseraufnahme zeigte eine große Bandbreite von 1,2 kg m^{-2} (Fichte „ungesiebt“) bis 14,2 kg m^{-2} (Buche „ungesiebt“), wobei die Laubhölzer und die Kiefer die höchste Aufnahme zeigten (Abbildung 24). Im Vergleich zu früheren Studien (Eichhorn 2017, Imken et al. 2022, 2024) wurden die Zusammenhänge zwischen der Aufnahme von Fichten-, Kiefern- und Lärchenplatten bestätigt, während für Buchen- und Eichenplatten kein klarer Trend erkennbar war. Während bei den Nadelhölzern die Ergebnisse für die drei Fraktionen ähnlich waren, unterschieden sich die Fraktionen bei Buche und Eiche. Bei den Laubholzplatten wiesen die Platten aus der Grobfraktion die geringste Aufnahme auf. Eine Erklärung für dieses Phänomen wäre spekulativ. Die chemische Zusammensetzung der Holzfasern könnte ein Grund für das Wasseraufnahmeverhalten sein. Nadelhölzer haben im Allgemeinen einen höheren Ligningehalt und einen geringeren Gehalt an Hemicellulosen als Laubhölzer, wobei die Hemicellulosen in Laubhölzern mehr Xylane enthalten als die Hemicellulosen in Nadelhölzern (Fengel und Wegener 1983). Dementsprechend lag der Ligningehalt der verwendeten ungesiebten Fasern bei 22,2 % für Buche, 21,9 % für Eiche, 28,5 % für Fichte, 29,4 % für Kiefer und 30,0 % für Lärche. Ein geringerer Lignin- und höherer Hemicellulosengehalt mit mehr Xylanen in Laubhölzern führt zu einer größeren Affinität für Wasser (Zhang et al. 2011). Die Wasseraufnahme von Fichten-HFDP war deutlich geringer als die von Kiefern-HFDP. Allerdings sind sowohl der Ligningehalt als auch der Gehalt und die Art der Hemicellulosen sehr ähnlich (Fengel und Wegener 1983). Dies deutet darauf hin, dass die Unterschiede in der Wasseraufnahme nicht (hauptsächlich) durch die chemische Zusammensetzung der Fasern erklärt werden können (in Kapitel 1.2.2 wurde auch gezeigt, dass die Extraktstoffe keinen nennenswerten Einfluss auf die Aushärtung des Bindemittels pMDI hatten). Darüber hinaus befindet sich das absorbierte Wasser in HFDP hauptsächlich zwischen den Fasern und nicht in den Zellwänden oder Zelllumina. Die Wasseraufnahme in die Poren (zwischen den Fasern) sollte von der chemischen Zusammensetzung weniger beeinflusst werden. Neben der chemischen Zusammensetzung des Holzgewebes selbst hat das TMP-Verfahren einen großen Einfluss auf die wasserbezogenen Eigenschaften von Faserplatten. Ein höherer Refinerdruck kann die Quellung und Absorption verringern (Krug und Kehr 2001). Material und Prozess stehen in Wechselwirkung, so dass die Ergebnisse nicht generell vorhergesagt werden können (Benthien et al. 2017, Erbreich 2004, Weigl 2011). Die Datenblätter der Hersteller geben für HFDP, die wasserabweisende Mittel wie Paraffine enthalten, Werte von 1-2 kg m^{-2} an (Tabelle 10).

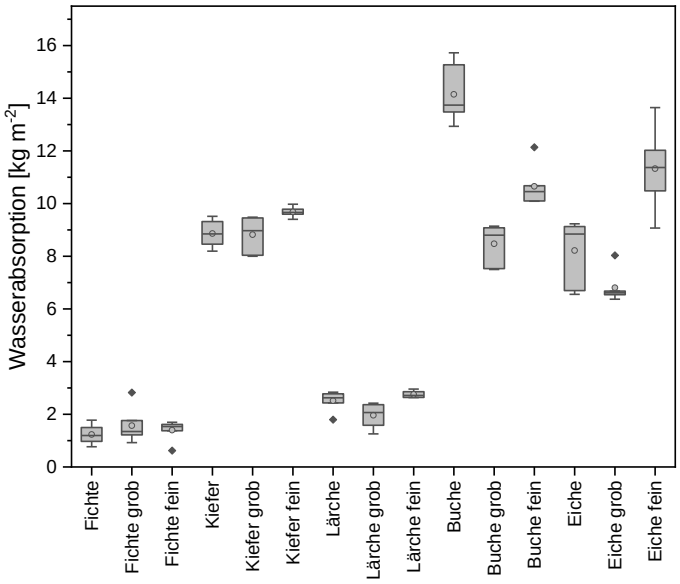


Abbildung 24: Wasseraufnahme der HFDP aus den verschiedenen Holzarten und Fraktionen (arithmetisches Mittel (Kreis), Median (Linie), Standardabweichung (Whisker) und Ausreißer (Karo), 2 Proben aus 3 Platten pro Variante)

1.4.4 Wärmeleitfähigkeit der Dämmstoffplatten

Die Wärmeleitfähigkeit wurde wie unter 1.3.4 nach DIN EN 12667 (2001) mit einem Wärmestrommessgerät (HFM 446 Lambda Eco Medium, Netzsch-Gerätebau GmbH, Selb, Deutschland) beschrieben gemessen. Die Probekörper für die Messungen senkrecht zur Plattenebene (z-Richtung) wurden mit 200 mm x 200 mm x Plattendicke [mm] bemessen. Für die Bestimmung der Leitfähigkeit in Plattenebene (xy-Richtung) wurden 150 mm lange Streifen auf Plattendicke geschnitten, um 90 ° um die Längsachse gedreht, zu Proben mit den Abmessungen 150 mm x 150 mm x 30 mm zusammengefügt und an den schmalen Kanten mit einem dünnen Klebeband umwickelt. Pro Platte wurden zwei Proben für die Messung in z-Richtung (n = 6) und eine Probe für die Messung in Plattenebene (n = 3) verwendet; EN 12667 (DIN EN 12667 2001). Die ermittelten Mittelwerte wurden nicht um die Dichte korrigiert.

Die Mittelwerte für die Wärmeleitfähigkeit (Abbildung 25) hatten ihr Minimum bei Lärche „fein“ (41,3 mW mK^{-1}) und ihr Maximum bei Eiche „grob“ (45,1 mW mK^{-1}), wobei der Bereich mit einer früheren Studie vergleichbar ist (Imken et al. 2024). In einer anderen Studie wurde ein Durchschnittswert von 40 mW mK^{-1} für

Industrieplatten angegeben (Brombacher 2015), während die Datenblätter einen Wertebereich von 37-39 mW mK^{-1} angeben (Tabelle 10). Es ist zu beachten, dass die Industrie in der Regel bei einer Platten-Mitteltemperatur von 10 °C misst, während die Tests in dieser Studie bei 20 °C durchgeführt wurden, was zu einer höheren Leitfähigkeit führt. Die höhere Mitteltemperatur wurde in dieser Studie gewählt, weil die erforderliche Konditionierung zu lange gedauert hätte (die Proben wurden bei 20 °C und 65 % relativer Luftfeuchtigkeit vorkonditioniert) und die große Anzahl von Messungen schwer zu bewältigen gewesen wäre. Die Norm DIN EN 13171 (2015) lässt verschiedene Temperaturen zu, wenn die Messgeräte geeignet sind. Die statistische Auswertung ergab, dass Platten aus der Grobfaserfraktion tendenziell die höchsten und solche aus der Feinfaserfraktion die niedrigsten Wärmeleitfähigkeitswerte aufweisen, wobei die Platten aus ungesiebten Fasern dazwischen liegen (Abbildung 25b). Insbesondere die groben Eichenfaserplatten zeigten den stärksten Effekt, d.h. die höchste Wärmeleitfähigkeit. Es gab auch einen deutlichen Unterschied zwischen den untersuchten Nadel- und Laubholz-HFDP. In dem hier untersuchten Dichtebereich (etwa 100 kg m^{-1}) sollte eine höhere Plattendichte zu einer höheren Wärmeleitfähigkeit führen. Obwohl es mit Ausnahme von Fichte „fein“ und Lärche „grob“ keine großen Unterschiede in den Plattendichten gab (Tabelle 15), waren die Wärmeleitfähigkeiten von Buchen- und Eichenplatten deutlich höher als die der Nadelhölzer Fichte, Kiefer und Lärche (Abbildung 25b).

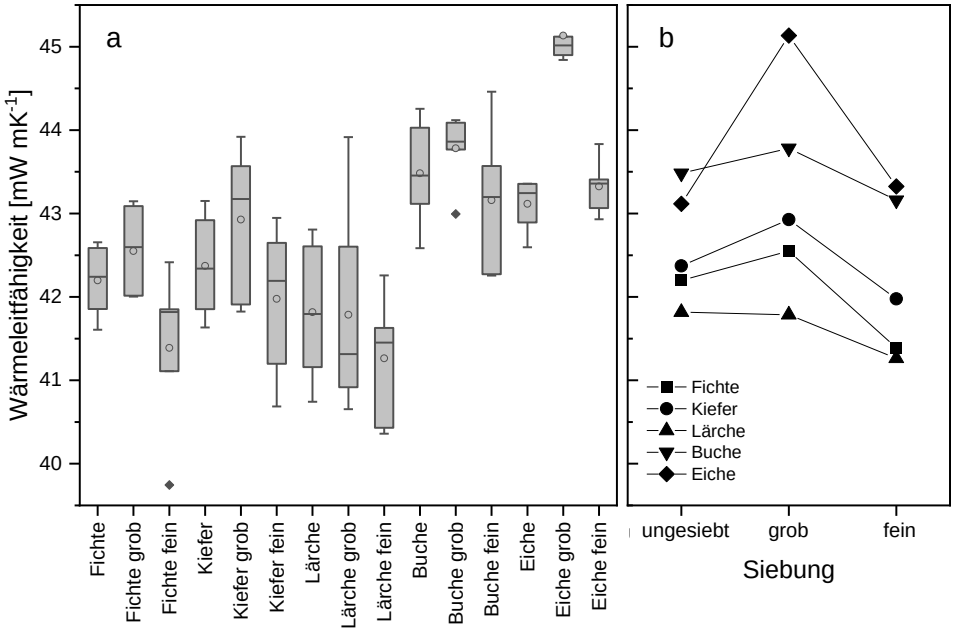


Abbildung 25: Wärmeleitfähigkeit des WFIB aus den verschiedenen Holzarten und -fraktionen (arithmetisches Mittel (Kreis), Median (Linie), Standardabweichung (Whiskers) und Ausreißer (Karo), 2 Proben aus 3 Platten pro Variante). a) Box-Plot, b) Interaktionsplot

Tabelle 15: Dichte der Probekörper zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit (in z-Richtung) aus den verschiedenen Holzarten und -fraktionen (arithmetisches Mittel (± Standardabweichung), 3 Platten pro Variante)

Holzart	**Dichte [kg m^{-3}]**		
	Ungesiebt	**Grob**	**Fein**
Fichte	102.9 (± 4.5)	101.4 (± 3.3)	97.7 (± 3.8)
Kiefer	102.6 (± 6.5)	106.0 (± 3.9)	104.8 (± 4.4)
Lärche	103.5 (± 5.7)	98.9 (± 8.3)	104.1 (± 5.6)
Buche	106.5 (± 2.3)	105.4 (± 4.9)	104.1 (± 7.0)
Eiche	102.8 (± 5.1)	105.5 ± (1.8)	111.1 (± 8.9)

Da die Wärmeleitfähigkeit stark von der Ausrichtung der Fasern beeinflusst wird (Kain et al. 2026), wurde sie auch in Richtung der Plattenebene (xy) gemessen. Die Verhältnisse der Wärmeleitfähigkeit in z-zu-xy-Richtung sind in Tabelle 16 dargestellt. Holzfasern leiten im Allgemeinen fast doppelt so viel Wärme entlang der Faser wie quer zur Faser; daher ist eine maximale Orientierung in Richtung der Plattenebene wichtig (Heinrich und Hering 2003). Ein Verhältnis von 1 würde somit einer isotropen Wärmeleitung in alle Richtungen entsprechen; je niedriger das Verhältnis, desto mehr werden die Fasern als in der xy-Ebene orientiert

angesehen. Die berechneten Quotienten lagen zwischen 0,67 für Fichte „ungesiebt“, was eine relativ gut orientierte Probe darstellen würde (hoher Anteil an in der xy-Ebene orientierten Fasern), und den Platten der Feinfraktionen von Fichte und Eiche (0,81).

Tabelle 16: Die Quotienten der Wärmeleitfähigkeit in z-zu-xy-Richtung der verschiedenen Plattenproben (die Wärmeleitfähigkeit in xy-Richtung wurde nur einmal gemessen)

Holzart	Quotienten der Wärmeleitfähigkeit		
	Ungesiebt	Grob	Fein
Fichte	0,67	0,69	0,81
Kiefer	0,74	0,75	0,73
Lärche	0,72	0,70	0,76
Buche	0,79	0,74	0,80
Eiche	0,78	0,73	0,81

Mit Ausnahme der Kiefernfaserplatten war das Wärmeleitfähigkeitsverhältnis der Platten aus groben Fasern immer niedriger als das der Feinfaserplatten. Dies würde bedeuten, dass die groben Fasern stärker in der xy-Ebene orientiert sind als die feinen Fasern. In dieser Hinsicht sollten die Platten aus groben Fasern weniger Wärme in z-Richtung leiten als die Platten aus feinen Fasern (und aus ungesiebten Fasern). Die gemessenen Wärmeleitfähigkeiten (Abbildung 25) zeigen jedoch, dass dies nicht der Fall ist. Dies kann entweder darauf zurückzuführen sein, dass der Quotient die Orientierung der Fasern und Partikel nicht direkt widerspiegelt oder dass die höhere Wärmeleitfähigkeit auf einen höheren Anteil an dicken, langen Fasern und Shives in der Fasermischung, insbesondere in der groben Faserfraktion, zurückzuführen ist. Im Gegensatz dazu haben kürzere und dünnere Fasern kleinere wärmeleitende Querschnitte und weniger Kreuzungspunkte pro Faser mit anderen Fasern, über die Wärme übertragen werden kann. Weitere Untersuchungen zeigen, dass die untersuchten Fasern einen hohen Anteil an Shives aufweisen, wie auch in den Fotos (Abbildung 19) zu sehen ist. Dicke, lange Fasern und Shives könnten lokal als starke Wärmebrücken wirken oder die Porosität und damit die Gesamtleitfähigkeit der Platte beeinflussen (Sackey und Smith 2010). Die Ergebnisse legen nahe, dass Platten mit längeren Fasern nach dem Pressen eine bevorzugte Ausrichtung in der xy-Ebene aufweisen und dass kürzere und dünnere Fasern zu einer isotroperen Struktur und zu einer erhöhten Wärmeübertragung in Plattendickenrichtung (z-Richtung) führen. Wenn unsere Annahmen zuträfen, würde der letztgenannte Effekt eine größere Rolle spielen als der erstgenannte. Hinsichtlich der Wärmeleitfähigkeit würden alle hergestellten Platten nach der deutschen Norm DIN 4108-4 (2020) für die Verwendung als Dämmung zugelassen.

Zur statistischen Analyse wurden die ermittelten Daten zur Druckfestigkeit, Querzugfestigkeit, Wasseraufnahme und Wärmeleitfähigkeit auf Normalverteilung geprüft. In einigen Fällen führten die strengeren Tests (Shapiro-Wilk-Test, Anderson-Darling-Test) zu einer Ablehnung der Normalverteilung. Dennoch kann, vor allem aufgrund der Ergebnisse des Kolmogorov-Smirnov-Tests, davon ausgegangen werden, dass die Werteserien normalverteilt sind, zumal die Stichprobengrößen mit $n < 30$ relativ klein sind. In Verbindung mit dem Ergebnis des Levene-Tests, das zeigt, dass in allen Testfällen Varianzhomogenität angenommen werden kann, ist es daher angemessen, die ANOVA anzuwenden. Die ANOVA mit Freiheitsgraden, F-Werten und t-Werten, die auf dem Signifikanzniveau 0,05 getestet wurden, ergab, dass alle Haupteffekte hoch signifikant sind (Tabelle 17). Nur der Interaktionseffekt der Wärmeleitfähigkeit wird als nicht signifikant zurückgewiesen.

Tabelle 17: Ergebnisse der zweifaktoriellen Varianzanalyse (2-way-ANOVA)

		Druckfestigkeit		Querzugfestigkeit		Wasserabsorption		Wärmeleitfähigkeit	
Haupteffekt / Interaktion	DF	F-Wert	Prob>F	F-Wert	Prob>F	F- Wert	Prob>F	F- Wert	Prob>F
Holzart	4	198,26	2,48E-91	10,16	8,11E-8	592,99	6,51E-56	31,36	2,40E-15
Siebung	2	28,68	2,56E-12	7,98	4,07E-4	42,19	5,29E-13	15,27	2,73E-6
Interaktion	8	10,00	1,17E-12	10,06	1,02E-12	25,81	1,20E-18	2,01	0,056*
Model	14	66,60	1,09E-92	10,22	1,76E-19	190,20	1,44E-52	12,08	4,67E-14

*nicht-signifikant (bei Signifikanzlevel 0,05)

Darüber hinaus zeigt das Interaktionsdiagramm für die Wärmeleitfähigkeit einen annähernd parallelen Verlauf der Linien im Diagramm (Abbildung 25b), Dies deutet eindeutig darauf hin, dass es nur schwache Wechselwirkungen gibt.

Schlussfolgernd lässt sich feststellen, dass die Fraktionierung von Kiefern- und Lärchenfasern sowie von Buchen- und Eichenfasern zu vergleichbaren Ergebnissen führte. Bei Kiefer und Lärche nahm der Anteil der Partikel um den Schwerpunkt von 1000 µm von der ungesiebten über die grobe zur feinen Variante ab, während bei Buche und Eiche fast keine Veränderung zu beobachten war. Im Gegensatz dazu neigte Fichte zur Agglomeration, was zu einem deutlich höheren Anteil kleiner Partikel innerhalb der Grobfraktion führte. Das gleiche Muster der Faserlängenverteilungsdichte bei Kiefer und Lärche spiegelt sich auch in ähnlichen Druckfestigkeiten wider.

Der Siebvorgang (Fraktionierung) hatte eine Abnahme der Druckfestigkeit und der Querzugfestigkeit von Buchen- und Eichenplatten zur Folge. Bei allen Holzarten außer Buche war die Druckfestigkeit der Platten aus der groben Faserfraktion tendenziell niedriger als die der Platten aus der feinen Faserfraktion. Bei der Querzugfestigkeit ergab sich kein so einheitliches Bild, Die Wasseraufnahme hängt offensichtlich hauptsächlich von der Holzart und weniger von der Dichte der Faserlängenverteilung ab (insbesondere bei Nadelhölzern), Fichten- und Lärchenplatten wiesen eindeutig die geringste Wasseraufnahme auf, während die Wasseraufnahme von Kiefernplatten in der gleichen Größenordnung lag wie die der Laubholzplatten. Generell wiesen Platten aus groben Fasern eine höhere Wärmeleitfähigkeit auf als solche aus feinen Fasern, wobei die Platten aus ungesiebten Fasern dazwischen lagen. Unabhängig von der Siebung zeigten die Laubholzplatten (Buche, Eiche) eine höhere Wärmeleitfähigkeit als die drei Arten von Nadelholzplatten (Fichte, Kiefer, Lärche).

1.5 Untersuchung der Holzfaserdämmstoffplatten aus fraktionierten Fasern mittels Mikro-Computertomographie (µ-CT)

Um den Einfluss der Faserstruktur der unter 1.4 hergestellten Holzfaserdämmplatten aus fraktionierten Fasern zu untersuchen, wurden diese mittels Mikro-Computertomographie (µ-CT) charakterisiert. Aufgrund der Komplexität dieses Vorhabens wurde viel Zeit in die Methodenentwicklung investiert. Von den fünf im Rahmen des Projektes untersuchten Holzarten sind die Dämmstoffe aus Kiefernfasern noch zu segmentieren. Auch nach Ablauf des Projekts wurden und werden weiterhin die Wärmeleitfähigkeiten und mechanischen Eigenschaften der HFDP aller Holzarten und Fraktionen (aus 1.4) simuliert. Dies erlaubt Rückschlüsse auf den Zusammenhang zwischen Faserstruktur und -zusammensetzung und den in 1.4 untersuchten Platteneigenschaften.

Die Mikrostruktur von HFDP der zwei Nadelholzarten Kiefer und Lärche sowie der zwei Laubholzarten Buche und Eiche wurde mittels µ-CT und Bildanalysesoftware (Avizo, Thermo Fisher Scientific, Hillsboro, Oregon, USA und Dragonfly 3D World, Comet Technologies Canada Inc., Montreal, Canada) sowie numerischer Berechnungssoftware (GeoDict2023, math2market GmbH) untersucht, um Zusammenhänge zwischen den gewonnenen Messergebnissen und den mikrostrukturellen Eigenschaften ableiten zu können. Dazu wurden CT-Aufnahmen von Probekörpern, die aus dem Dämmmaterial entnommen wurden, angefertigt und durch eine Segmentierung in 3D-Modelle überführt, welche eine computergestützte Berechnung von Materialeigenschaften ermöglichten. Von besonderer Bedeutung waren hierbei die Bestimmung der Porosität (Anteil des Hohlraumvolumens in der Faserplatte) und die Berechnung der Faserorientierungstensoren, da diese beiden Parameter einen großen Einfluss auf die Dämmeigenschaften der Platten haben. Darüber hinaus sollten auf Basis der erstellten Materialmodelle und unter Verwendung der bestimmten Faserorientierungen die Wärmeleitfähigkeiten sowie die Druckfestigkeiten der unterschiedlichen Dämmstoffvariationen simuliert und den realen Messergebnissen gegenübergestellt werden.

1.5.1 µCT-Aufnahmen

Aus den hergestellten Platten der Holzarten Fichte, Lärche, Buche und Eiche wurden jeweils drei Probekörper mit den Abmessungen 10 mm x 10 mm x Plattendicke in mm sorgfältig mit einer ungezahnten Trennscheibe entnommen und dreidimensionale µCT-Aufnahmen an der Universität Hamburg angefertigt. Alle Scans wurden als Helixscans mit einer Röhrenspannung von 70 kV bei einer Stromstärke von 70 µA und einer Belichtungszeit von 1,2 s aufgenommen. Diese Parameter lieferten Aufnahmen mit einer hohen Schärfe und ermöglichten den notwendigen Kontrastunterschied zwischen Holzsubstanz und Luft, der für eine eindeutige Trennung erforderlich ist. Um die für die Berechnungen notwendige Auflösung von ca. 10 µm pro Voxelkantenlänge zu erreichen, mussten die erstellten Scans in zwei Hälften aufgenommen und anschließend zusammengefügt werden. Dieses sogenannte Stitching der beiden gescannten Bereiche wurde an der Universität Hamburg mit der Software Avizo durchgeführt. Insbesondere bei den hier vorliegenden Faserwerkstoffen mit vergleichsweise hoher Porosität stellte dieser Schritt eine besondere Herausforderung dar.

Abweichend von der im Projektantrag beschriebenen Vorgehensweise wurde kein Kontrastmittel (mit höherer Dichte) zur Identifikation einzelner Fasern verwendet, um deren Lage und Orientierung bestimmen zu können. Stattdessen konnte die Segmentierung durch den Einsatz moderner Deep-Learning-Algorithmen (2D-Attention-Unet) durchgeführt und es konnten lokal aufgelöste sowie gemittelte Orientierungstensoren für das gesamte gescannte Probenvolumen durch numerische Verfahren (Star-Length-Algorithmus) bestimmt werden. Neu war, dass bei der Segmentierung zwischen faserartigem und spanartigem Material unterschieden wurde. Dies ermöglichte eine getrennte Betrachtung beider Komponenten.

1.5.2 Segmentierung - Vorarbeiten

Die Segmentierung des Fasermaterials wurde mit Hilfe von DeepLearning-Methoden mit der Software Dragonfly 3D World durchgeführt. Dazu wurden zunächst die Rohdatensätze der zusammengesetzten 3D-µCT-Scans in das Programm importiert und so beschnitten, dass keine Fasern mehr aus dem Volumen herausragten und somit glatte bzw. ideale Seitenflächen entstanden. Die zugeschnittenen Volumina hatten jeweils eine Größe von 668 x 668 x 2900 Voxel (~ 6,68 mm x 6,68 mm x 29 mm). Bei der Weiterverarbeitung der CT-Scandaten wurden keine mathematischen Filter auf die CT-Datensätze angewendet, um die durch Training erlernte Segmentierung innerhalb einer Holzart übertragen zu können.

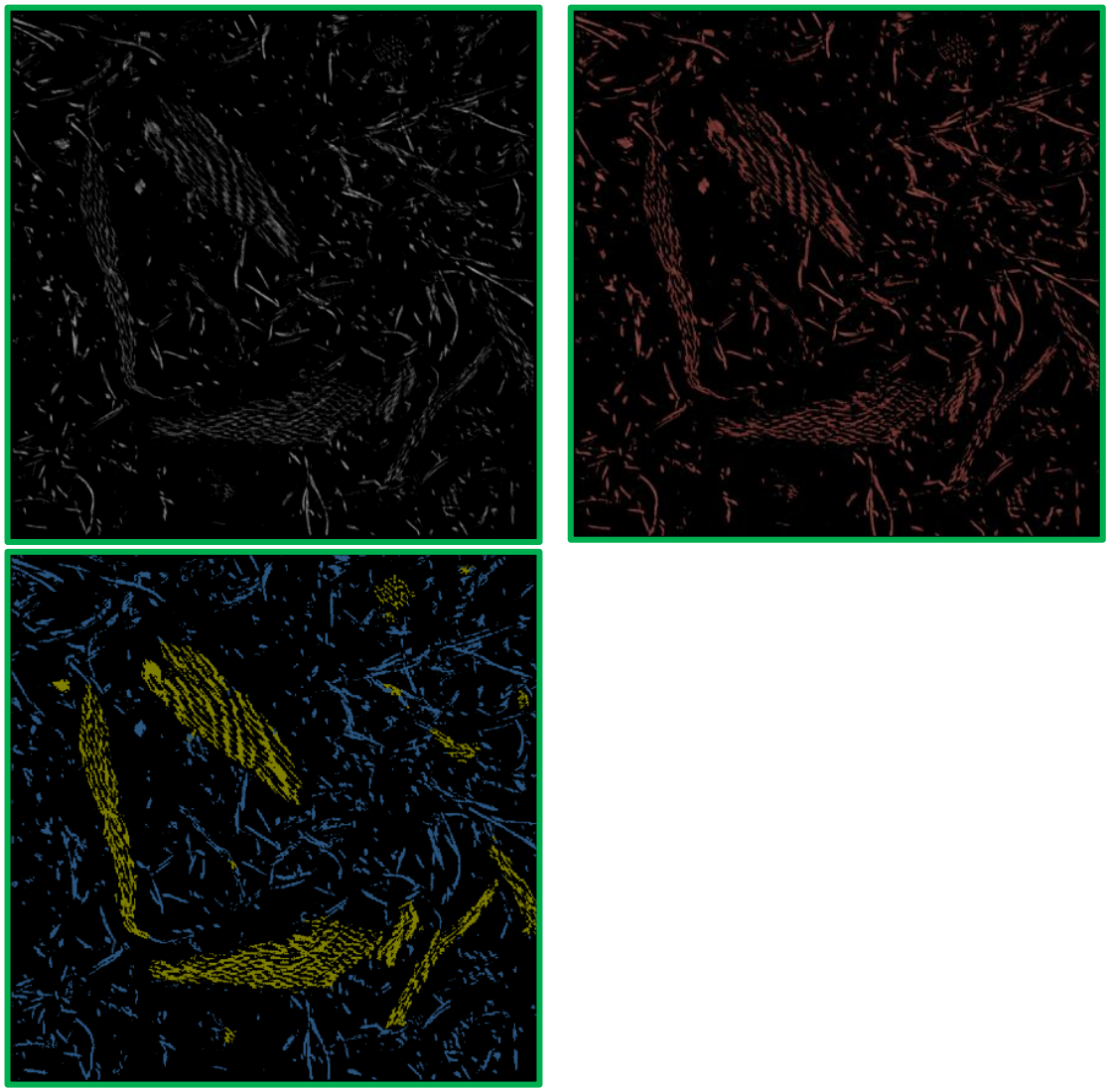


Abbildung 26: Original CT-Aufnahme (links oben), Segmentierung einer Trainingsfolie nach Otsu (rechts oben), Segmentierung mittels DeepLearning angewandt (links unten); Holzart: Lärche – ungesiebt

Entlang der z-Achse (in Richtung der Plattendicke) eines Scans für jeweils eine Holzart wurden gezielt zweidimensionale Folien für das Training des Deep-Learning-Ansatzes extrahiert, auf denen zunächst eine Grundsegmentierung in Feststoff (Holzsubstanz) und Porenraum (Luft) mittels Otsu-Schwellwert-Kriterium durchgeführt wurde. Die Otsu-Schwellenwerte wurden manuell minimal angepasst, um das Ergebnis zu optimieren. Anschließend wurde das in den Trainingsfolien vorhandene Fasermaterial und die Luft im Porenraum mit den entsprechenden Werkzeugen über die Software Dragonfly 3D World pixelweise manuell markiert, wobei innerhalb des Fasermaterials in zwei Gruppen - faserartig und spanartig - unterschieden wurde (siehe Abbildung 26). Aus den markierten Folien wurden die Trainings-, Validierungs- und Testpatches für das maschinelle Lernen erstellt.

Für jede Holzart wurden auf diese Weise Trainingsdatensätze vorbereitet, trainiert und anschließend auf die vollständigen Datensätze angewendet. Es ist anzumerken, dass die Unterscheidung zwischen faserartigem und spanartigem Material nicht objektiv erfolgen kann, da kein einheitliches Kriterium definiert werden kann, wann es sich um faserartiges oder spanartiges Material handelt. Maßgebliches Kriterium für die Unterscheidung ist die Materialstruktur bzw. die Morphologie des Materials. Zusätzlich wurde eine Untergrenze für die Größe von spanartigem Fasermaterial festgelegt. Diese wurde empirisch ermittelt und liegt

bei einem Volumen von 0,002 mm³. Alle als spanartig erkannten Voxel oder Voxelkonglomerate, die dieses Volumen unterschritten, wurden manuell entfernt und in einem weiteren Schritt dem Fasermaterial zugeordnet.

1.5.3 Segmentierung – DeepLearning

Das endgültige DeepLearning-Verfahren basierte auf 2D-Attention-Unets mit Tiefen von sechs bis sieben Ebenen und wurde auf einem Computer mit einer leistungsstarken CPU und Nvidia GPU (RTX 3070) durchgeführt. Vor der Festlegung auf dieses Netz wurden weitere Ansätze (Netzstrukturen) wie ein 2D-, ein 2,5D- und ein 3D-Unet mit jeweils unterschiedlichen Netztiefen und Trainingsdaten getestet. Insbesondere beim 3D-Netz konnten aufgrund des begrenzten Grafikkartenspeichers trotz kleinstmöglicher Batchgröße nur vergleichsweise kleine Patches verarbeitet werden, so dass in diesem Fall trotz enormer Rechenzeiten entgegen den Erwartungen nur unbefriedigende Ergebnisse erzielt wurden. Beim 2,5D- und 3D-Ansatz begrenzte die verwendete Hardware die mögliche Netztiefe oder schränkte die Patchgröße ein. Tiefere Netze mit möglichst großen Patches und einem einfacheren 2D-Trainingsdatensatz zeigten bessere Segmentierungsergebnisse als Netze mit geringerer Netztiefe, kleineren Patches und höherdimensionalen Trainingsdatensätzen. Das 2D-Attention-Netz erlaubte bei den gewählten Netztiefen die Verarbeitung von Patches der Größe 128 Pixel x 128 Pixel oder mehr. Damit konnten ausreichend große Bereiche während des Trainings erfasst und verarbeitet werden. Um die Trainingsdatensätze zu erweitern, ohne weitere Trainingsfolien vorgeben zu müssen, wurden zusätzlich Augmentierungen eingesetzt. Dabei wurden auf Basis der manuell erstellten Patches zusätzliche Patches durch horizontales und vertikales Flipping sowie durch Rotationen erzeugt. Eine Batch-Normalisierung wurde nicht durchgeführt, um eine Übertragbarkeit auf weitere Scans der gleichen Baumart zu ermöglichen.

1.5.4 Ergebnisse – Segmentierung

Alle CT-gescannten Proben wurden auf Basis der beschriebenen Methoden in die drei ROIs (Regions of Interest) „Porenraum“, „faserartiges Material“ und „spanartiges Material“ segmentiert. Abbildung 27 (links) zeigt beispielhaft ein Segmentierungsergebnis anhand einer Draufsicht auf die Oberseite einer Faserdämmstoffprobe, anhand derer exemplarisch das Vorkommen und die Lage von grobem, spanartigem Material (bunt) innerhalb des Faserdämmstoffs deutlich wird. Das faserartige Material wurde hierzu grau eingefärbt; alle Luftvoxel wurden auf transparent gesetzt. In Abbildung 27 (rechts) ist zusätzlich ein Span und dessen Stirnfläche vergrößert dargestellt. Anhand dieser Darstellungen werden die enormen Größen- und insbesondere Dickenunterschiede zwischen faserartigem und spanartigem Material deutlich. Auch die für die Deep-Learning-basierte Erkennung charakteristische Struktur, die im Inneren der spanartigen Partikeln sichtbar ist, ist im rechten Teil der Abbildung gut zu erkennen.

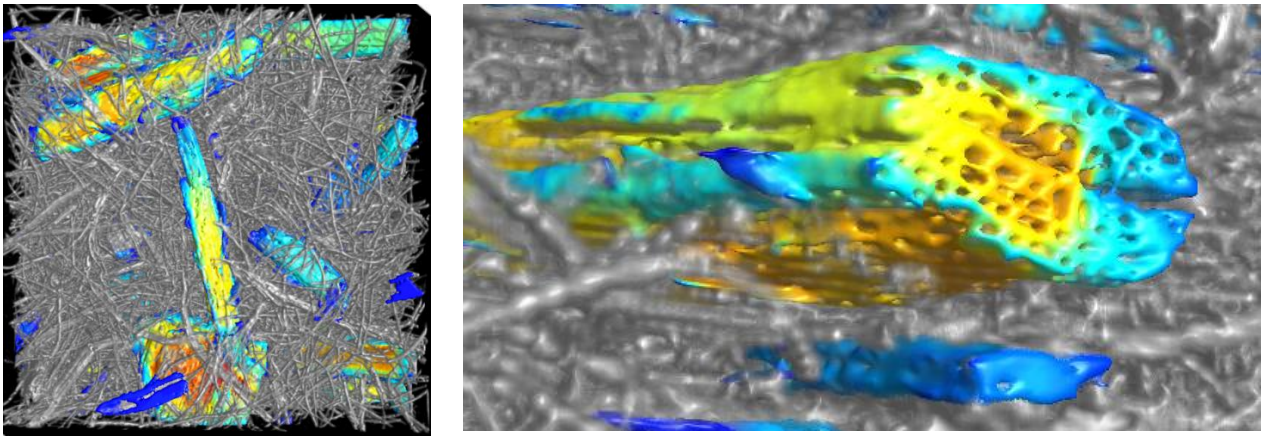


Abbildung 27: Links: Draufsicht auf die Probenoberseite mit segmentierten spanartigen Partikeln, Rechts: Stark vergrößerte Darstellung (spanartig: Einfärbung nach lokalem Dickenprofil; faserartig: grau gefärbt)

In Abbildung 28 ist exemplarisch für die beiden Holzarten Lärche und Buche und deren jeweilige Fraktionierung (ungesiebt, grob, fein) ein segmentiertes Modell dreidimensional dargestellt. Die Segmentierung der Platten aus der Feinfraktion der Eiche wird noch erstellt. Analog dazu werden in Abbildung 29 die beiden Holzarten Fichte und Eiche gezeigt. Für Lärche und Fichte ist das spanartige Material gelb, für Buche und Eiche orange markiert. Das faserige Material ist in allen Fällen blau eingefärbt. Die Darstellungen lassen vermuten, dass in der Grobfraktion ein höherer Anteil an spanartigen Partikeln enthalten ist, dass diese Partikel aber auch in der Feinfraktion vorhanden sind. Dies entspricht den Ergebnissen aus Abschnitt 1.4.1 (Abbildung 20) und zeigt wiederum, dass eine klare Fraktionierung entsprechend der Siebmaschenweite nicht stattgefunden hat. Unterschiede im Span- und Fasergehalt zwischen den Holzarten Lärche und Buche sind bei der Feinfraktion zu erkennen.

Anhand dieser Rekonstruktionen konnte für alle Proben eine Abschätzung des prozentualen Anteils an Faser- und Spanmaterial getroffen sowie die Porosität, das heißt der relative Anteil an Porenraum für jede CT-gescannte Probe, bestimmt werden.

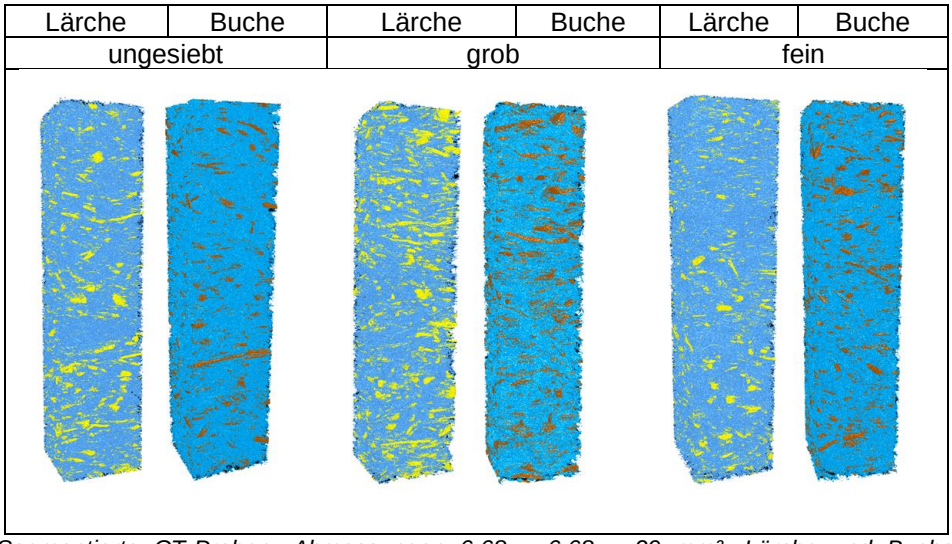


Abbildung 28: Segmentierte CT-Proben, Abmessungen 6,68 x 6,68 x 29 mm³, Lärche und Buche, ohne und mit Fraktionierung (blau: faserartig, gelb/orange: spanartig)

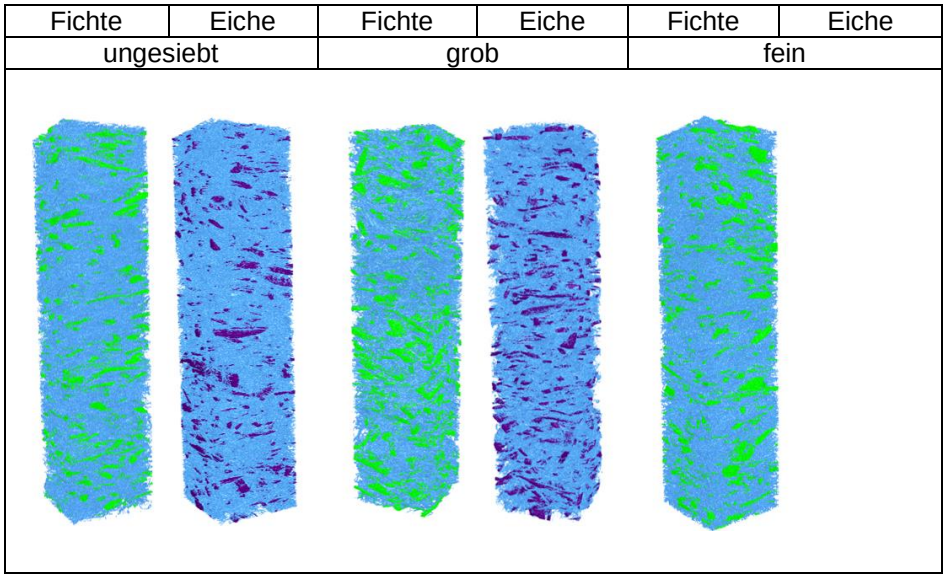


Abbildung 29: Segmentierte CT-Proben, Abmessungen 6,68 x 6,68 x 29 mm³, Fichte und Eiche, ohne und mit Fraktionierung (blau: faserartig, grün/lila: spanartig)

Sowohl die Kenntnis der Porosität, der relativen Materialanteile als auch insbesondere der Faserorientierungen tragen zum Verständnis der thermischen und mechanischen Eigenschaften der Holzfaserplatten bei. Abbildung 30 zeigt das Ergebnis der ermittelten Porosität. Die Streuung der Porosität über die untersuchten Proben einer Faserdämmplatte ist gering und liegt im Bereich von < +-1 Prozent.

Es fällt auf, dass die ermittelten Porositäten sowohl zwischen den Holzarten als auch zwischen den verschiedenen Fraktionierungsvarianten sehr ähnlich sind und im Bereich von 82 bis 85 % liegen. Damit unterscheiden sich die Ergebnisse deutlich von denen in Kapitel 1.3.5 (Abbildung 16), wo die Porositäten der Laubholzvarianten signifikant höher waren als die der Nadelholzvarianten. Die Porosität aller Holzarten und Fraktionierungsvarianten könnte deshalb so ähnlich sein, da alle Hölzer die gleiche Reindichte (von etwa 1500 kg m^{-3}) aufweisen.

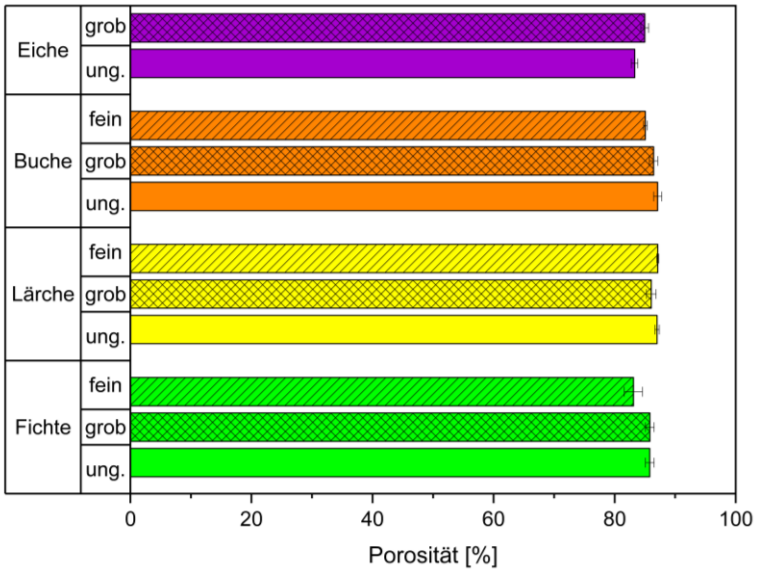


Abbildung 30: Porosität (Anteil des Porenraums zwischen den Fasern und in den Lumen)

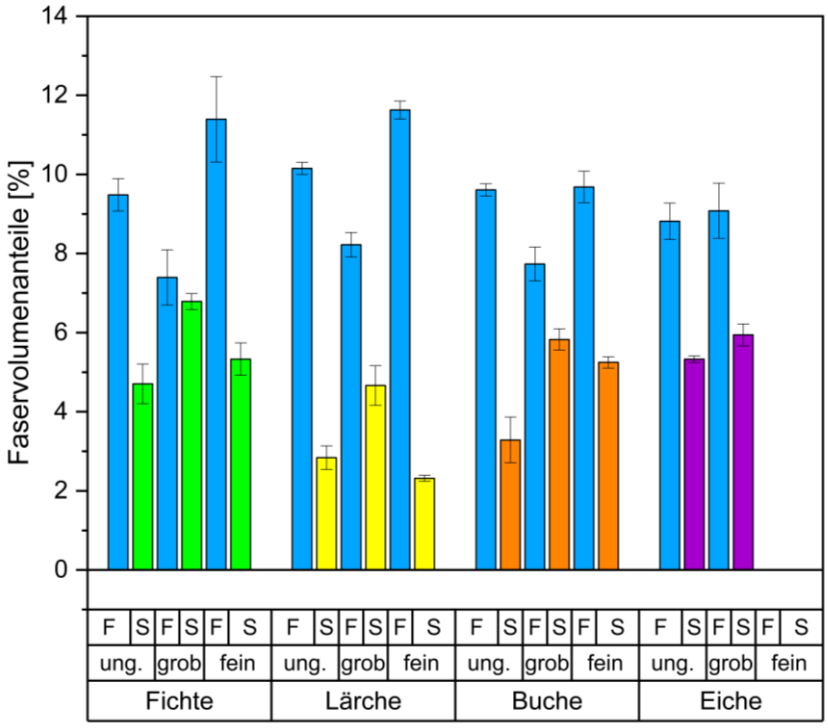


Abbildung 31: Faservolumenanteile faserartig (F), spanartig (S)

Der ermittelte Faservolumenanteil für die beiden untersuchten Holzarten und die drei Fraktionierungen sind in Abbildung 31 dargestellt.

Es ist zu erkennen, dass der Anteil an spanartigen Partikeln (S) bei der Grobfraktionierung bei allen Holzarten erwartungsgemäß am höchsten ist (bei der Eiche stehen die Ergebnisse noch aus). Bei der Lärche liegt zwischen der Grob- und der Feinfraktion ein Faktor von etwa zwei. Der Span- und Faseranteil (F) der ungesiebten Fraktion der Holzart Lärche liegt erwartungsgemäß zwischen den beiden Anteilen der Siebungen, jedoch näher an dem der Feinfraktion. Proben der Feinfraktion der Holzart Buche enthalten auffallend hohe Anteile an kleinspanigem Material.

1.5.5 Ergebnisse – Orientierung der faserartigen und spanartigen Partikel

In einem weiteren Schritt wurden die Orientierungstensoren für das Faser- und Spanmaterial berechnet. Die Berechnung der Orientierungstensoren erfolgte in vier gleich großen Blöcken entlang der z-Achse und wurde für die beiden Materialkomponenten Faser (F) und Späne (S) getrennt durchgeführt, um im weiteren Verlauf die beiden Fasertypen getrennt analysieren zu können (Abbildung 32). Durch die blockweise Analyse konnte abgeschätzt werden, ob die Orientierungen über die Plattendicke variieren. Das Ergebnis aus einer Orientierungsanalyse eines Blockes wird in Abbildung 32 rechts dargestellt. Die Matrixeinträge der

Hauptkomponenten in x- und y-Richtung zeigen keinen großen Unterschied, während der Wert der z-Komponente deutlich kleiner ist. Die Größenordnung dieser Orientierung ist typisch für das faserige Material der Laubhölzer.

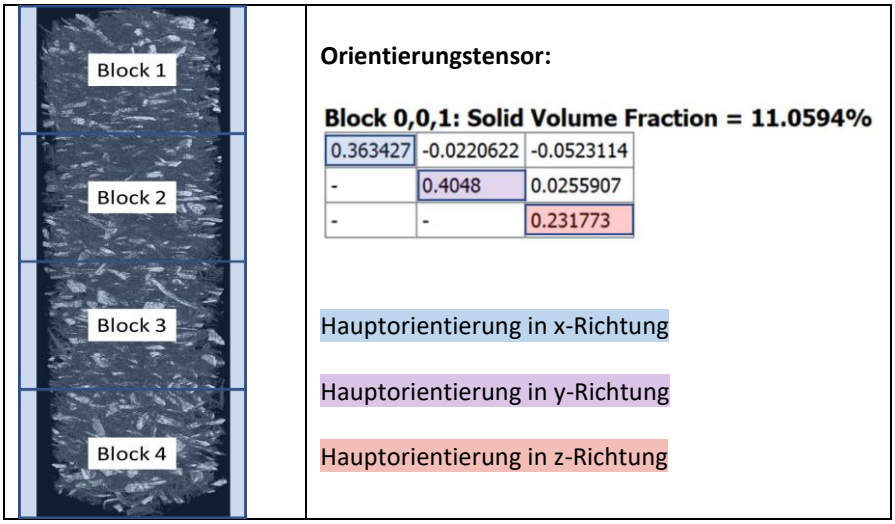


Abbildung 32: links: Blockweise Analyse der Orientierungen, rechts: Orientierungstensor eines Blockes

Abbildung 33 zeigt den Betrag der Komponente des Orientierungstensors in z-Richtung für die Holzarten Fichte, Lärche, Buche und Eiche (außer der Feinfraktion) über die Fraktionen ungesiebt, grob und fein für faserartiges und spanartiges Material. Für alle Fraktionierungsvarianten konnte festgestellt werden, dass die spanartigen Partikel eine geringere Orientierung in z-Richtung der Platte aufweisen als das faserartige Material. Die Größenordnung dieser Werte entspricht in etwa auch der Orientierung des spanartigen Materials, die in Abbildung 27 links zu sehen ist.

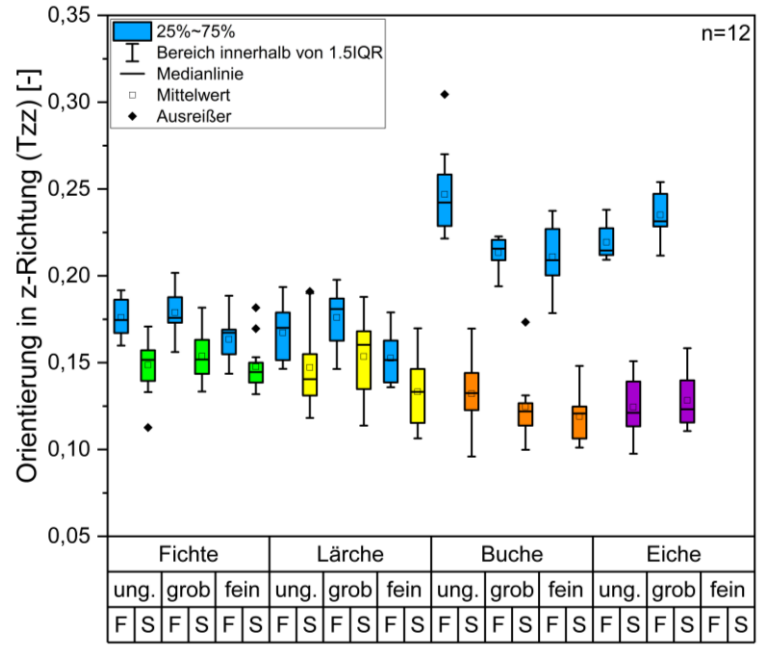


Abbildung 33: Komponente des Orientierungstensors in z-Richtung (Tzz); n=12

Auffallend ist, dass die Anteile an faserartigem Material der Laubholzarten Buche und Eiche nicht die starke Anisotropie (bevorzugte Orientierung in Plattenebene) aufweisen, die der Faseranteil der Holzarten Fichte und Lärche zeigt. Dies könnte auf kürzere Fasern oder auf die spezifische Fasermorphologie der Buchen- und Eichenfasern (ggf. auch der Laubholzfasern allgemein) zurückzuführen sein. Grundsätzlich wird die Gesamtorientierung des Materials stärker durch das faserige Material bestimmt, da die relativen Anteile der Fasern deutlich größer sind. Zwischen den Fraktionen ungesiebt, grob und fein zeigt sich für die Holzarten Kiefer, Lärche und Buche, dass jeweils die Mittelwerte der Feinfraktion die geringste und die der Grobfraktion die stärkste Orientierung in z-Richtung aufweisen. Dieses Ergebnis korreliert mit dem Ergebnis der Wärmeleitfähigkeitsmessungen. Allerdings zeigt sich auch, dass die in Kapitel 1.4.4 gemachte Annahme, dass der Quotient der Wärmeleitfähigkeiten in x-y- und z-Richtung (Tabelle 16) einen Hinweis auf die Faserorientierung gibt, anzuzweifeln ist. Grundsätzlich wird die Gesamtorientierung des Materials stärker

durch das faserartige Material bestimmt, da die relativen Anteile der Fasern in allen Modellen (Varianten) deutlich größer sind.

In Abbildung 33 ist das Ergebnis der Orientierungsberechnungen des Faseranteils anhand von zwei Schnitten durch die xy-Ebene zur genaueren Betrachtung visualisiert. Die Farben zeigen die lokale Orientierung des Fasermaterials in Bezug auf die z-Achse (d.h. in Richtung der Plattendicke). Eine rote Färbung bedeutet eine Orientierung senkrecht zur Plattendicke. In diesem Fall liegen die Fasern nahezu horizontal in der xy-Plattenebene. Eine dunkelblaue Färbung bedeutet, dass die Fasern in einem Winkel von 45° oder weniger zur z-Achse liegen.

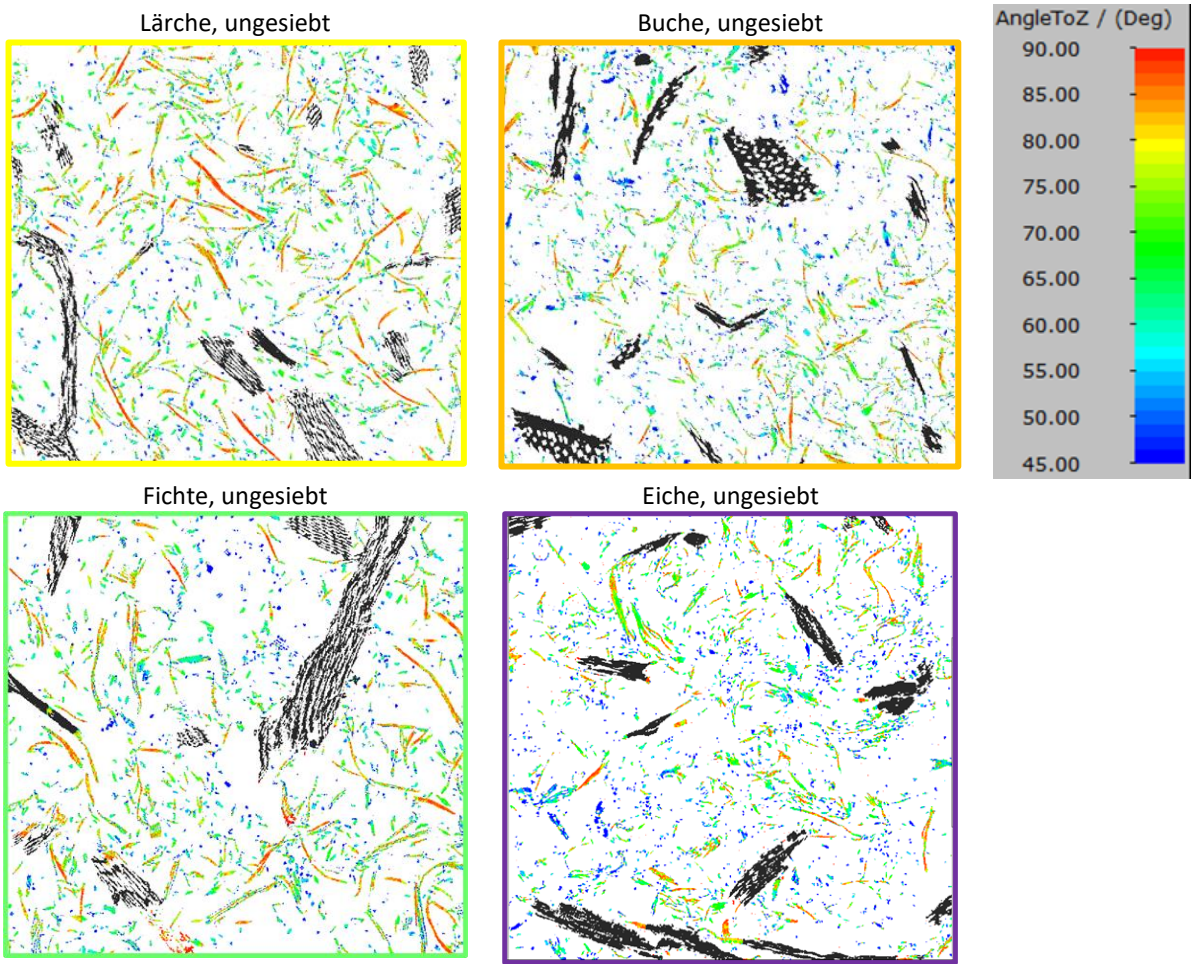


Abbildung 34: Lokale Faserorientierungen des faserartigen Anteils (Schnitte durch xy-Ebene)

Anhand dieser Darstellungen wird der morphologische Unterschied zwischen den Nadel- und Laubholzplatten und den daraus berechneten Orientierungsfeldern erkennbar. Im Gegensatz zur Fichte und Lärche, bei der deutlich mehr längere und stärker in der xy-Ebene orientierte Fasern vorhanden sind, treten bei der Buche und Eiche deutlich mehr kürzere Fasern auf, von denen ein größerer Anteil weniger horizontal in der Plattenebene liegt. Zusätzlich wird deutlich, dass das spanartige Material der beiden Laubholzvarianten erwartungsgemäß dickere Zellwände besitzt, als spanartiges Material der Nadelhölzer.

1.5.6 Ausblick – Simulation Wärmeleitfähigkeit

Durch numerische Berechnungen anhand von Wärmeleitfähigkeitssimulationen soll gezeigt werden, inwiefern sich die verschiedenartige Fasermorphologie von Nadel- und Laubholzdämmstoffen, die Fraktionierung sowie die unterschiedliche Orientierung der Fasern auf die Wärmeleiteigenschaften der Dämmstoffe auswirken. Die Wärmeleitfähigkeit aller generierten Modelle wird mit der numerischen Materialberechnungssoftware GeoDict der Firma Math2market GmbH berechnet und modelliert. Dazu werden die Wärmeleitfähigkeiten für die Holzsubstanz und die Luft für jedes Modell vorgegeben, wobei zu beachten ist, dass Holz in Faserlängsrichtung eine höhere Wärmeleitfähigkeit besitzt als quer zur Faser. Diese Vorgabe kann umgesetzt werden, da das zuvor dargestellte Orientierungsfeld jeder Probe bei der Berechnung des Wärmestroms durch die Software berücksichtigt werden kann.

Abbildung 35 zeigt beispielhaft einen Schnitt durch die verschiedenen Richtungen einer Probe (Lärchendämmstoff, Grobfraktion). Dargestellt ist die lokale Wärmestromdichte in Watt pro Quadratmeter bei angelegtem Temperaturgradienten in z-Richtung. Hohe Wärmestromdichten werden insbesondere durch Fasern mit einer stärkeren Orientierung in z-Richtung erreicht.

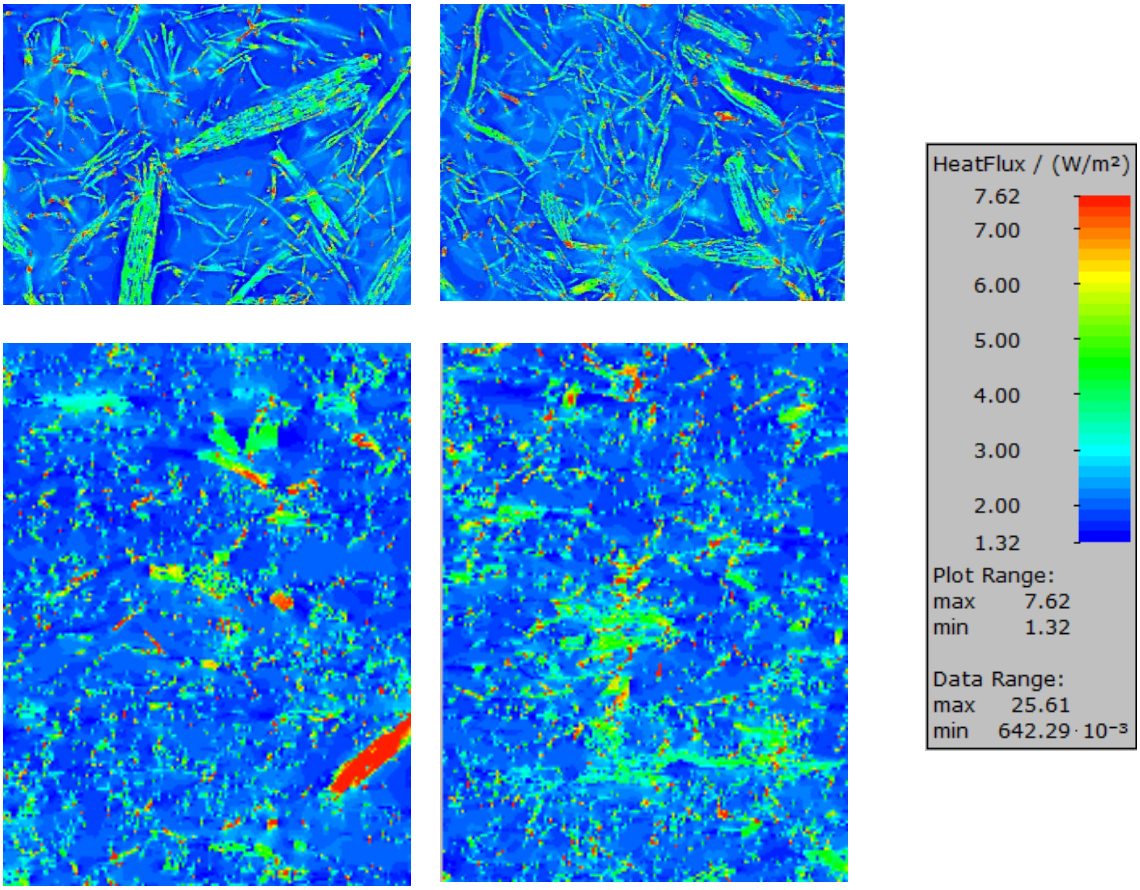


Abbildung 35: Exemplarische Darstellungen der Wärmestromdichte (oben: Draufsichten xy-Schnitt, unten: Seitenansicht xz- und yz-Schnitt), Lärche, grob

Weithin sollte es die entwickelte Methodik erlauben, die mechanischen Eigenschaften der Dämmstoffe abhängig von ihrer Mikrostruktur zu simulieren.

1.6 Herstellung von Holzfaserdämmstoffplatten aus Fasermischungen in einer Heißpresse

1.6.1 Herstellung von Holzfaserdämmstoffplatten und deren mechanischen und hygrischen Eigenschaften

In den vorangegangenen Untersuchungen wurden Holzfaserdämmstoffplatten (HFDP) aus jeweils sortenreinen Fasern hergestellt und deren Eigenschaften untersucht. Viele Hersteller in Deutschland verwenden überwiegend Fichtenholz zur Herstellung von HFDP. Deshalb sollte untersucht werden, ob die Beimischung bestimmter Holzsortimente die Produktion behindert und die Festigkeiten reduziert. Es wurde angenommen, dass evtl. die Zumischung von Kiefern-, Lärchen- oder Eichenholz aufgrund eines höheren Anteils an Extraktstoffen oder einer speziellen Fasergeometrie zu Problemen führen könnte. Deshalb wurden Fasermischungen auf Basis von Fichtenfasern mit jeweils 10, 20 und 30 Masseprozent Kiefer-, Lärchen- und Eichenfasern in einer Pilotanlage mit einem thermomechanischen Aufschlussverfahren (TMP) wie in Kapitel 1.1 beschrieben erzeugt. Dazu wurden Hackschnitzel von Kiefer, Lärche und Eiche jeweils im Verhältnis von 1:9, 2:8 und 3:7 Massenprozent gemischt und mit den gleichen Einstellungen wie oben (Tabelle 1) in einem Pilotanlagen-Refiner (Andritz AG, Wien, Österreich) bei einem Scheibenspalt von 0,6 mm zerfasert. Aus den erhaltenen Fasermischungen wurden dann HFDP mit Solldichten von 110 kg m^{-3}, 140 kg m^{-3} und 170 kg m^{-3} wie unter 1.4 beschrieben hergestellt, wobei pro Variante drei Dämmplatten erzeugt wurden. Entsprechend den vorangehenden Untersuchungen (1.3.2, 1.4.3) wurden die mechanischen und hygrischen Eigenschaften sowie die Wärmeleitfähigkeiten der HFDP bestimmt.

Im Vergleich zu den vorangehenden Untersuchungen verlief die Herstellung der HFDP nicht bei allen Varianten problemlos. Besonders die Plattenvarianten, die Eichenfasen enthielten, sind in einer größeren Zahl bei der Herstellung gebrochen. Von den 27 Platten, die pro zugemischter Holzart hergestellt wurden, zerbrachen 7 Platten mit Eichenfasern, davon 3 mit 10 % Eichenfasern und 4 mit 30 % Eichenfasern. Eine Platte, die 30 % Lärchenfasern enthielt, zerbrach ebenfalls. Deshalb sind einige der Eigenschaften der Platten, die Eichenfasern enthielten, mit Vorsicht zu betrachten, da für die Varianten teilweise nur eine Platte zur Verfügung stand.

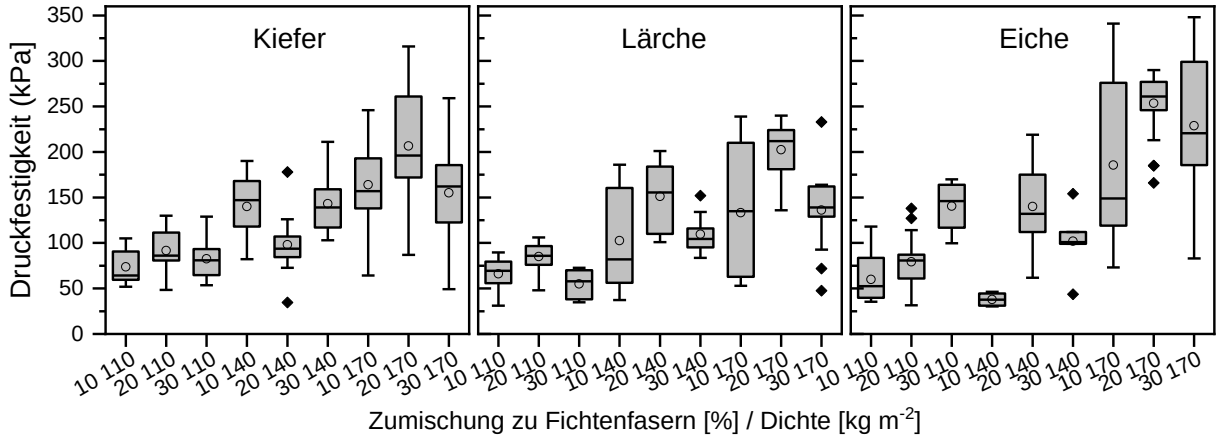


Abbildung 36: Druckfestigkeit der HFDP aus Mischungen verschiedener Holzarten bei Dichten von 110 kg m^{-2}, 140 kg m^{-2} und 170 kg m^{-2} (arithmetisches Mittel (Kreis), Median (Linie), Standardabweichung (Whisker) und Ausreißer (Karo).

Insgesamt zeigte sich bei allen drei Zumischungsvarianten eine Zunahme der Druckfestigkeit mit steigender Dichte (Abbildung 36), die so erwartet wurde. Im Vergleich zu der vorangehenden Untersuchung (1.4), bei der nur Fasern jeweils einer Holzart verwendet wurden, zeigten sich in allen Fällen bei einer Dichte von 110 kg m^{-2} höhere Druckfestigkeiten der Mischungen mit Werten um 75 kPa. In der vorangegangenen Untersuchung (1.4) lagen die Festigkeiten bei den Platten aus Nadelholzfasern um 40-50 kPa und bei den Laubholzfasern um 20 kPa. Die Gründe für die deutlich höheren Druckfestigkeiten konnten nicht ermittelt werden.

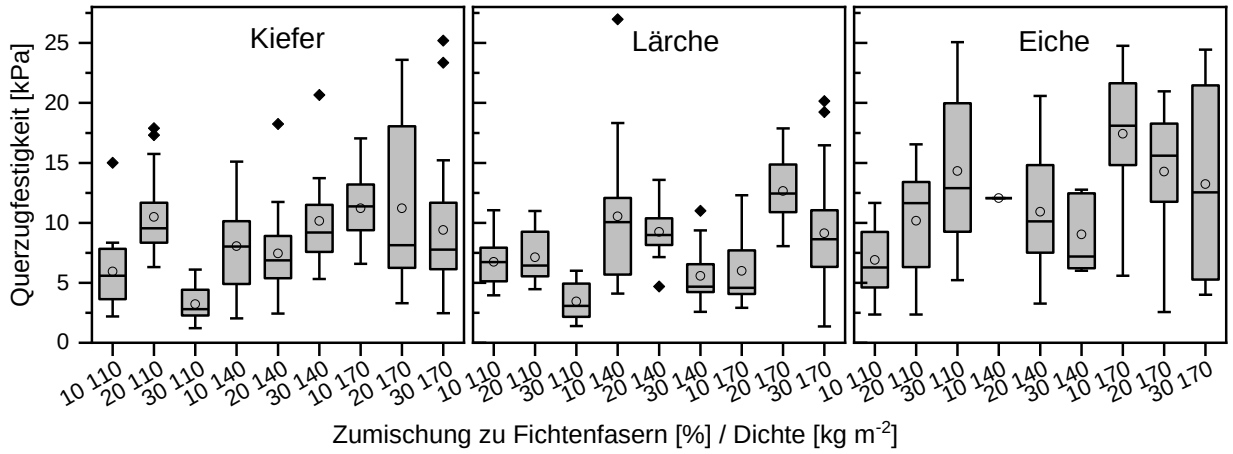


Abbildung 37: Querzugfestigkeit der HFDP aus Mischungen verschiedener Holzarten bei Dichten von 110 kg m^{-2}, 140 kg m^{-2} und 170 kg m^{-2} (arithmetisches Mittel (Kreis), Median (Linie), Standardabweichung (Whisker) und Ausreißer (Karo).

Die Werte für die Querzugfestigkeiten der einzelnen Plattenvarianten variierten sehr stark und es ließ sich kaum eine einheitliche Tendenz erkennen (Abbildung 37). Die erwartete Zunahme der Querzugfestigkeit mit steigender Dichte ist nicht nachweisbar. Auch ein direkter Einfluss der Holzarten ist nicht erkennbar. Zwar schienen die Platten, die Eichenfasern enthielten, im Mittel eine höhere Querzugfestigkeit über alle Varianten aufzuweisen, dies widerspricht aber der Tatsache, dass viele der Platten nach der Herstellung zerbrachen, also nur eine sehr geringe innere Festigkeit aufwiesen.

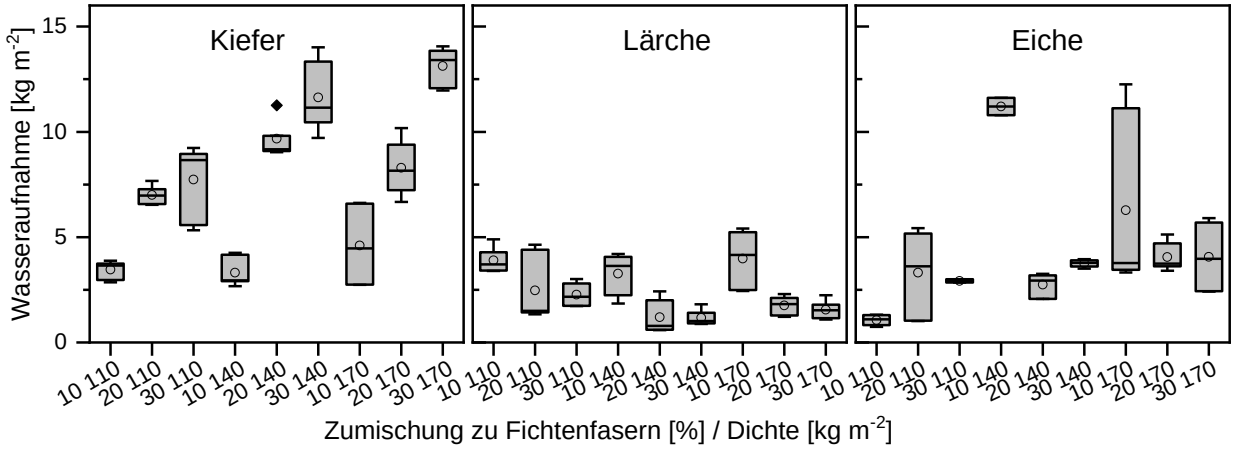


Abbildung 38: Wasseraufnahme der HFDP aus Mischungen verschiedener Holzarten bei Dichten von 110 kg m^{-2}, 140 kg m^{-2} und 170 kg m^{-2} (arithmetisches Mittel (Kreis), Median (Linie), Standardabweichung (Whisker) und Ausreißer (Karo).

Hinsichtlich der Wasseraufnahme über 24 h ergaben sich prinzipielle Ähnlichkeiten zu den Ergebnissen des vorangegangenen Versuches (1.4) mit den Platten aus den reinen Holzarten (Abbildung 38). Im vorangegangenen Versuch wiesen alle Varianten der Platten aus reinen Fichten- und Lärchenfasern Wasseraufnahmen unter bzw. um 3 kg m^{-2} auf, während die Aufnahmen der Platten aus Fasern der Holzarten Kiefer, Buche und Eiche überwiegend über 8 kg m^{-2} lagen (1.4). Die hohe Wasseraufnahme der Kiefernplatten spiegelten sich auch in denen der Platten der Kiefern-Mischsortimente wider. Dabei war eine stetige Zunahme der Wasseraufnahme mit der Zunahme der Anteile an Kiefernfasern zu beobachten. Demgegenüber nahm die Wasseraufnahme bei den Platten aus Lärchen-Mischsortimenten mit steigendem Anteil an Lärchenfasern ab und war bei Anteilen von 20 und 30 % deutlich geringer als die der entsprechenden Kiefernvarianten, wobei die Wasseraufnahmen der Varianten bei 10 %iger Beimischung von Kiefern- bzw. Lärchenfasern in etwa gleich waren. Bei den Lärchenvarianten war die relative Wasseraufnahme bei den Dichten von 140 und 170 kg m^{-2} geringer. Die Varianten der Platten mit Beimischung von Eichenfasern zeigten im Durchschnitt etwas höhere Wasseraufnahmen als die Platten aus Lärchen-Mischsortimenten. Jedoch waren die Wasseraufnahmen der Platten aus Eichensortimenten geringer als die der reinen Platten im vorangehenden Versuch. Allerdings muss wie auch bei den vorangehenden Versuchen bedacht werden, dass teilweise nur wenige Wiederholungen durchgeführt werden konnten, da es zum Ausfall der Platten nach direkt nach der Herstellung kam.

Vergleicht man die Beimischung der beiden Nadelholzfasern Kiefer und Lärche, so könnte der deutlich unterschiedliche Einfluss auf Unterschiede in der Fasergeometrie und der chemischen Zusammensetzung zurückzuführen sein. Allerdings zeigte die mittlere Verteilungsdichte über die Länge (q1) von 400 bis 5000 µm (Abbildung 20) in der vorangegangenen Untersuchung keine deutlichen Unterschiede zwischen Fichten- und Lärchenfasern. Der Gehalt an wasserlöslichen Extraktstoffen war bei der Lärche sogar höher, was gegen eine niedrigere Wasseraufnahme spricht.

1.6.2 Wärmeleitfähigkeit der Dämmstoffplatten

Die Wärmeleitfähigkeit bei einer mittleren Probentemperatur von 20 °C (∆ T 10 K) zeigte unabhängig von der Holzart und Faservariante eine lineare Korrelation mit der Plattendichte mit einem Korrelationskoeffizienten R nach Bravais-Pearson von 0,94437 (Abbildung 39). Diese Beziehung ist aus der Literatur bekannt.

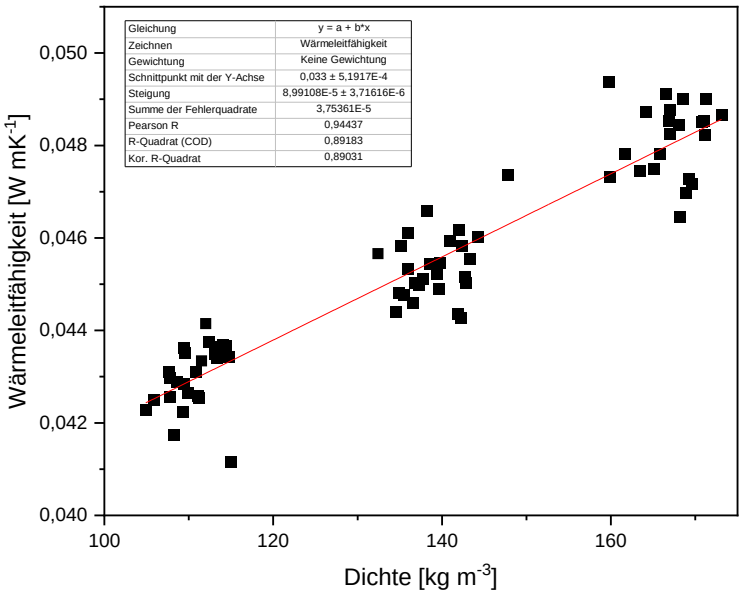


Abbildung 39: Korrelation der Wärmeleitfähigkeit mit der Plattendichten aus dem Zumischungsversuch.

Die vorangehenden Untersuchungen (1.4) hatten ergeben, dass HFDP, die rein aus Laubholzfasern (Buche, Eiche) bestehen, eine etwas höhere Wärmeleitfähigkeit aufweisen. Bei den Platten aus Fasermischungen ließ sich kein direkter Einfluss der Holzart und der Zusammensetzung der Fasermischung auf die Wärmeleitfähigkeit erkennen (Abbildung 40). Dies könnte auf den relativ geringen Teil der Laubholzfasern (Eiche) bis maximal 30 %, die unterschiedlichen Dichten der Probekörper und auf die zum Teil sehr geringe Zahl an Messungen zurückzuführen sein. Hier müssten die Versuche mit einer insgesamt deutlich größeren Zahl an Probekörpern pro Variante wiederholt werden.

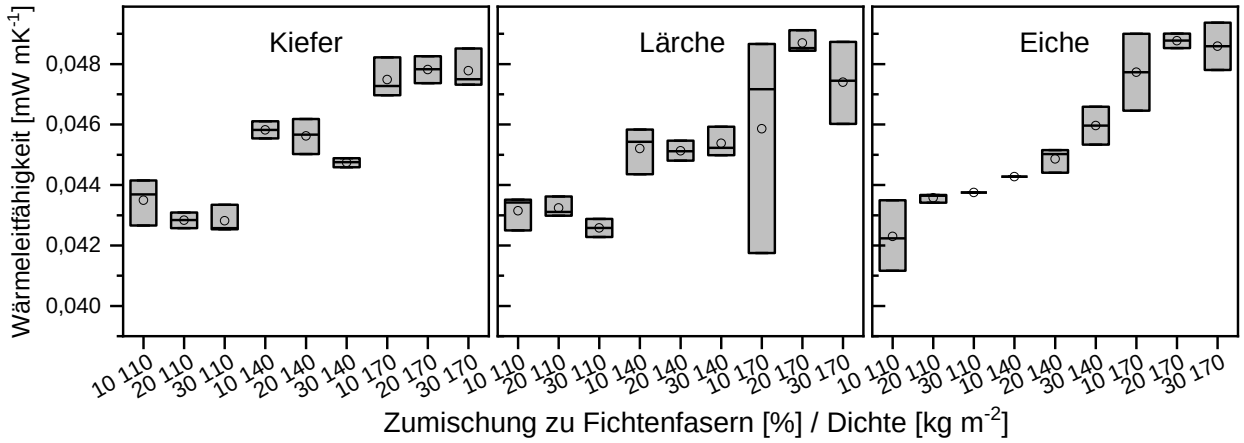


Abbildung 40: Wärmeleitfähigkeit der HFDP aus Mischungen verschiedener Holzarten bei Dichten von 110 kg m^{-2}, 140 kg m^{-2} und 170 kg m^{-2} (arithmetisches Mittel (Kreis), Median (Linie), Standardabweichung (Whisker) und Ausreißer (Karo).

Es lässt sich abschließend feststellen, dass hinsichtlich der mechanischen Eigenschaften kaum Aussagen über den Einfluss der Beimischung von Fasern der drei Holzarten Kiefer, Lärche und Eiche zu einem höheren Fichtenfaseranteil getroffen werden können. Es ist jedoch anzumerken, dass die Beimischung von Eichenfasern zu einem hohen Anteil an Plattenversagen (Zerbrechen) unmittelbar nach der Herstellung führte, während Platten aus reinen Eichenfasern und verschiedenen Fraktionen daraus im vorangegangenen Versuch problemlos hergestellt werden konnten. Hinsichtlich der Wärmeleitfähigkeit konnte die bekannte Tatsache bestätigt werden, dass sie mit zunehmender Dichte ansteigt. Es konnten aber keine Aussagen über den Einfluss der Holzarten und der Fasermischung auf die Wärmeleitfähigkeit gemacht werden.

Die interessantesten Ergebnisse zeigten sich bei der Wasseraufnahme. Hier zeigte sich insbesondere bei der Zugabe von Kiefernfasern eine stetige Zunahme der Wasseraufnahme mit steigendem Kiefernanteil. Ob diese Zunahme auf die spezielle Fasergeometrie oder auf die chemische Zusammensetzung der Fasern zurückzuführen ist, konnte nicht geklärt werden.

1.7 Fazit

Die Faseranalyse des vom Fraunhofer WKI hergestellten Fasermaterials zeigte, dass sich je nach Einsatz von Nadel- oder Laubholz unterschiedliche Fasergeometrien und Größenverteilungen in Abhängigkeit vom Mahlspalt des Refiners ergaben. Da die geodätische Länge der Laubholzfasern jeweils deutlich geringer war als die der Nadelholzfasern, wurde für die Nadelhölzer ein Mahlspalt von 0,4 mm und für die Laubhölzer ein Mahlspalt von 0,6 mm gewählt. Um den Einfluss verschiedener Faserfraktionen zu ermitteln, wurde das Fasermaterial in eine Grob- (Siebmaschenweite > 2 mm), Fein- (> 0,4 mm) und Staubfraktion (< 0,4 mm) getrennt und jeweils aus der Grob- und Feinfraktion der verschiedenen Holzarten Holzfaserdämmplatten (HFDP) mit einer Zielrohdichte von 110 kg m^{-3} hergestellt. Die Abtrennung der Staubfraktion sollte Aufschluss über deren Einfluss auf die mechanischen und hygrischen Eigenschaften, sowie auf die Wärmeleitfähigkeit geben. Ein Vergleich der mittleren Verteilungsdichte der Faserlängen ergab drei Gruppen, wobei sich Kiefern- und Lärchenfasern sowie Buchen- und Eichenfasern über die Fraktionen „ungesiebt“, „grob“ und „fein“ sehr ähnlich verhielten.

Entgegen der Ausgangshypothese konnte kein Einfluss der chemischen Inhaltsstoffe, d.h. der natürlichen Extraktstoffe der Holzarten und der beim Refinerprozess entstehenden Abbauprodukte, sowie der im Kochwasser gelösten Stoffe auf das Aushärtungsverhalten des verwendeten Bindemittels nachgewiesen werden.

Aus reinen Fasern aller Holzarten und -fraktionen konnten HFDP mit einer Zielrohdichte von 100-110 kg m^{-3} sowohl im Heißluft-Heißdampf-Verfahren als auch in der Heißpresse problemlos hergestellt werden, wobei die Ergebnisse hinsichtlich der mechanischen und hygrischen Eigenschaften der nach den beiden Verfahren hergestellten Platten nicht einheitlich waren. Tendenziell waren bei den in der Heißpresse hergestellten Platten die Druckfestigkeiten derjenigen aus Nadelholz höher; die Platten aus Feinmaterial tendierten zu höheren Druckfestigkeiten als diejenigen aus Grobmaterial.

Während HFDP aus Fichten- und Lärchenfasern bei allen Fraktionierungen eine niedrige Wasserabsorption aufwiesen (etwa zwischen 0,5 und 3 kg m^{-2}), lag diese bei allen Kiefer- Laubholzvarianten deutlich höher (etwa zwischen 6 und 14 kg m^{-2}).

Hinsichtlich der Wärmeleitfähigkeit zeigte sich, dass diese bei den Laubholzplatten aus Buche und Eiche signifikant höher war als bei den Nadelholzplatten aus Fichte, Kiefer und Lärche. Die Gründe hierfür könnten in einer stärkeren Ausrichtung der faserartigen Partikel in Richtung der Plattendicke (z-Richtung) liegen, die mit Hilfe der Mikro-Computertomographie (µ-CT) und der Segmentierung der Faserpartikel nachgewiesen werden konnte.

Die Beimischung von Fasermaterial aus Kiefer, Lärche und Eiche in Anteilen von 10, 20 und 30 % zu Fichtenfasern führte dazu, dass insbesondere bei Beimischung von Eichenfasern, in geringerem Umfang auch bei Lärchenfasern, keine HFDP hergestellt werden konnten und diese nach dem Pressvorgang in der Heißpresse zerfielen. Die Gründe hierfür sind nicht nachvollziehbar, zumal die Herstellung der Platten aus reinen Eichenfasern unproblematisch war. Die erreichten Festigkeitswerte waren dagegen deutlich zu hoch und daher nicht nachvollziehbar. Es ist daher geplant, den Versuch zu wiederholen. Auffallend war jedoch, dass die HFDP mit Kiefernfaserzusatz tendenziell eine deutlich höhere Wasseraufnahme aufwiesen als die Platten mit Lärchen- und Eichenfaserzusatz.

Ein Ziel des Projektes war es herauszufinden, warum es bei der industriellen Herstellung von HFDP bei einigen Holzchargen zu Problemen kommt und die Dämmstoffe nicht die üblichen Eigenschaften aufweisen. Es wurde vermutet, dass Lärchenholz einen negativen Einfluss auf die Verklebung oder die Ausbildung der Plattenstruktur hat. Ein solcher Einfluss des Lärchenholzes konnte jedoch nicht nachgewiesen werden. Der letzte Versuch deutete eher auf einen negativen Einfluss von Eichenholz hin, was aber noch genauer zu untersuchen ist.

Die in Kapitel 1.5 entwickelten Methoden zur Segmentierung der Fasern in HFDP und zur Simulation der Dämmstoffeigenschaften stellen ein wichtiges Werkzeug zur Vorhersage (Simulation) und Erklärung der Eigenschaften von HFDP dar. Sie bilden daher einen zentralen und wichtigen Teil der Projektergebnisse. Das Verfahren nutzt moderne Deep-Learning-Algorithmen. Es hat den Vorteil, dass kein Kontrastmittel (mit höherer Dichte) verwendet werden muss, um einzelne Partikel (Fasern oder Späne) zu identifizieren und ihre Position und Orientierung zu bestimmen. Damit stellt es ein wichtiges Werkzeug für die Analyse von Holzwerkstoffen dar, das auch für zukünftige Forschungsarbeiten genutzt werden kann.

1.8 Zitierte Literatur

ASTM C518 (2021) Standard Test Method for Steady-State Thermal Transmission Properties by Means of the Heat Flow Meter Apparatus.

Bao, S.; Daunch, W.A.; Sun, Y.; Rinaldi, P.L.; Marcinko, J.J.; Phanopoulos, C. (1999): Solid state NMR studies of polymeric diphenylmethane diisocyanate (PMDI) derived species in wood. The Journal of Adhesion 71(4): 377-394.

Benthien JT, Heldner S, Ohlmeyer M. (2017) Investigation of the interrelations between defibration conditions, fiber size and medium-density fiberboard (MDF) properties. Eur J Wood Wood Prod 75:215–32. https://doi.org/10.1007/s00107-016-1094-2.

Benthien JT, Heldner S, Seppke B, Bähnisch C, Ohlmeyer M. (2014) Innovativer Ansatz zur Bestimmung der Faserlänge : automatisierte und reproduzierbare Methode zur Vermessung von Faserstoff entwickelt. Holz-Zentralblatt 41:1000.

Boehme C (1992) Die Bedeutung des Rohdichteprofils für MDF. Eur. J. Wood Prod. 50(1):18–24

Brinker, S. Ahrens, C., Gurnik, M., Mayer AK, Mai C. (2025) Influence of screened fibre fractions on the properties of insulation panels made of different wood species. Wood Mat. Sci. Eng. https://doi.org/10.1080/17480272.2025.2452206

Brombacher V. (2015) Untersuchungen zur Optimierung von Holzfaserdämmstoffen in Abhängigkeit von Rohstoff, Herstellverfahren und Aufschlussbedingungen. ETH Zurich. https://doi.org/10.3929/ETHZ-A-010580551.

Bütün Buschalsky, F. Y.; Imken, A. A. P.; Adamopoulos, S.; Ahmed, S. A.; Plinke, B. & Mai, C. (2024) Geometric changes of TMP fibres due to thermo-hydrolytic disintegration of waste MDF evaluated by three fibre analysers. Wood Material Science & Engineering, pp. 1-9. DOI: https://doi.org/10.1080/17480272.2024.2383357

Das, S.; Malmberg, M.J.; Frazier, C.E. (2007): Cure chemistry of wood/polymeric isocyanate (PMDI) bonds: Effect of wood species. International Journal of Adhesion & Adhesives 27: 250-257.

Deppe, H.J.; Ernst, K. (1996): MDF-Mitteldichte Faserplatten. Leinfelden-Echterdingen: DRW-Verlag. 200 S.

DIN 4108-10 (2015) Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden_- Teil_10: Anwendungsbezogene Anforderungen an Wärmedämmstoffe_- Werkmäßig hergestellte Wärmedämmstoffe 2015. https://doi.org/10.31030/2361801.

DIN 4108-4 (2020) Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden_- Teil_4: Wärme- und feuchteschutztechnische Bemessungswerte. https://doi.org/10.31030/3188939.

DIN 68364 (2003) Properties of wood species - Density, modulus of elasticity and strength, Beuth Verlag GmbH, Berlin

DIN EN 12667 (2001) Wärmetechnisches Verhalten von Baustoffen und Bauprodukten_- Bestimmung des Wärmedurchlasswiderstandes nach dem Verfahren mit dem Plattengerät und dem Wärmestrommessplatten-Gerät_- Produkte mit hohem und mittlerem Wärmedurchlasswiderstand; Deutsche Fassung EN_12667:2001 2001. https://doi.org/10.31030/9057707.

DIN EN 13171 (2015) Wärmedämmstoffe für Gebäude_- Werkmäßig hergestellte Produkte aus Holzfasern_(WF)_- Spezifikation; Deutsche Fassung EN_13171:2012+A1:2015 n.d.

DIN EN 13501-1 (2010) Klassifizierung von Bauprodukten und Bauarten zu ihrem Brandverhalten - Teil 1: Klassifizierung mit den Ergebnissen aus den Prüfungen zum Brandverhalten von Bauprodukten; Deutsche Fassung EN 13501-1:2007+A1:2009

DIN EN 1607 (2013) Wärmedämmstoffe für das Bauwesen_- Bestimmung der Zugfestigkeit senkrecht zur Plattenebene; Deutsche Fassung EN_1607:2013 2013. https://doi.org/10.31030/1952095.

DIN EN 1609 (2013) Wärmedämmstoffe für das Bauwesen_- Bestimmung der Wasseraufnahme bei kurzzeitigem teilweisem Eintauchen; Deutsche Fassung EN_1609:2013 2013. https://doi.org/10.31030/1952097.

DIN EN 826 (2013) Wärmedämmstoffe für das Bauwesen_- Bestimmung des Verhaltens bei Druckbeanspruchung; Deutsche Fassung EN_826:2013 2013. https://doi.org/10.31030/1956633.

DIN EN ISO 11925-2 (2024) Prüfungen zum Brandverhalten - Entzündbarkeit von Produkten bei direkter Flammeneinwirkung - Teil 2: Einzelflammentest (ISO/DIS 11925-2:2024); Deutsche und Englische Fassung prEN ISO 11925-2:2024

DIN EN ISO 17828 (2016) Biogene Festbrennstoffe_- Bestimmung der Schüttdichte (ISO_17828:2015); Deutsche Fassung EN_ISO_17828:2015 2016.

DIN ISO 9276-2 (2018) Darstellung der Ergebnisse von Partikelgrößenanalysen - Teil 2: Berechnung von mittleren Partikelgrößen/-durchmessern und Momenten aus Partikelgrößenverteilungen (ISO 9276-2:2014)

Dormann CF (2013) Parametrische Statistik. Verteilungen, maximum likelihood und GLM in R. Statistik und ihre Anwendungen. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg

Dunky, M.; Niemz, P. (2002): Holzwerkstoffe und Leime. Technologie und Einflussfaktoren. 1. Aufl. Berlin: Springer. 954 S.

Eichhorn SC (2017) Development of novel polyurethane bonded wood fibre insulation materials of low density.

Erbreich M. Die Aufbereitung und Wiederverwendung von Altholz zur Herstellung von Mitteldichten Faserplatten (MDF) (2004). Dissertation at the University of Hamburg, https://ediss.sub.uni-hamburg.de/bitstream/ediss/610/1/Dissertation.pdf

Euring M, Kirsch A, Kharazipour A (2015) Hot-Air/Hot-Steam Process for the Production of Laccase-Mediator-System Bound Wood Fiber Insulation Boards. BioResources 10(2), 3541-3552

Fengel, D. Wegener, G (1983) Wood – Chemistry, Ultrastructure, Reactions. De Gruyter

Gruver, T.M.; Brown, N.R.; Cionni, J.S.; McCracken, T.S.; Nicola, W.J.; Takah, T. (2008): Effects of selected wood species and moisture content on PMDI resin application and panel properties. Wood and Fiber Science 40(2): 242-247.

GUTEX (2024) Technical Datasheet GUTEX Thermosafe homogen https://shop.gutex.de/media/38/44/3d/1717682486/1460_GUTEX_Thermosafe-homogen-TDB_de.pdf (accessed July 22, 2024).

Heinrich H, Hering B. (2003) Untersuchung der Verwendung von Holz als Dämmstoff zur Wärme- und Schalldämmung im Baubereich. Abschlussbericht zum Forschungsauftrag im Auftrag der Struktur- und Genehmigungsdirektion Süd Forschungsstelle für Waldökologie und Forstwirtschaft Rheinland-Pfalz

Imken AAP, Baechle L, Brinker S, Kraft R, Plinke B, Aderhold J, Meinlschmidt, p, Mai, C (2024) Investigation of various hardwood and softwood fibres for the usage in wood-fibre insulation panels. Wood Mater Sci Eng 19(6): 1180-1191 https://doi.org/10.1080/17480272.2024.2312443.

Imken AAP, Kraft R, Mai C. (2022) Production and characterisation of wood-fibre insulation boards (WFIB) from hardwood fibres and fibre blends. Wood Mater Sci Eng 17:802–8. https://doi.org/10.1080/17480272.2021.1958919.

Imken AAP, Plinke B, Mai C. (2021) Characterisation of hardwood fibres used for wood fibre insulation boards (WFIB). Eur J Wood Wood Prod 79:915–24. https://doi.org/10.1007/s00107-021-01698-y.

Johns, W.E.; Maloney, T.M.; Saunders, J.B.; Huffaker, E.M.; Lentz, M.T. (1982): The effect of species and moisture content on the bonding efficiency of polymeric mdi icocyanate. Proceedings of the sixth Washington State University particleboard symposium. Pullman, Washington. S. 71-95.

Kain G, Charwat-Pessler J, Barbu M-C, Plank B, Richter K, Petutschnigg A. (2016) Analyzing wood bark insulation board structure using X-ray computed tomography and modeling its thermal conductivity by means of finite difference method. J Compos Mater 50:795–806. https://doi.org/10.1177/0021998315581511.

Krug D, Kehr E. (2001) Einfluss des Aufschlussdruckes bei der Faserstoffherstellung auf die Quellungsvergütung von MDF. Holz als Roh- und Werkstoff 59, S. 342-343

Krug, D. (2010): Einfluss der Faserstoff-Aufschlussbedingungen und des Bindemittels auf die Eigenschaften von mitteldichten Faserplatten (MDF) für eine Verwendung im Feucht- und Außenbereich. Dissertation. Universität Hamburg; Fakultät für Mathematik, Informatik und Naturwissenschaften. 293 S.

Lampert, H. (1966): Faserplatten – Rohstoffe – Verfahren zur Herstellung – Eigenschaften. Dissertation. Technische Universität Dresden; Fakultät für Technologie. VEB Fachbuchverlag Leipzig. 453 S.

Ohlmeyer M, Benthien J, Heldner S, Seppke B. (2015) Effects of Refining Parameters on Fibre Quality Measured by FibreCube. International Panel Products Symposium 2015At: Llandudno, North Wales, UK

Olmeyer, M.; Vagt, J.; Schöler, M.; Hasch, J. (2012): Untersuchung über den Einfluss des Produktionsprozesses auf die Entstehung von VOC-Emissionen aus Mitteldichten Faserplatten (MDF). Arbeitsbericht aus dem Institut für Holztechnologie und Holzbiologie, Thünen-Institut, Nr. 2014/4.

Otsu N (1979) A Threshold Selection Method from Gray-Level Histograms. IEEE Trans. Syst., Man, Cybern. 9(1):62–66

Park B-D, Kim YS, Riedl B. (2001) Effect of wood-fiber characteristics on medium density fiberboard (MDF) performance. J Korean Wood Sci Technol 29:27–35.

Pizzi, A. (2016): Synthetic adhesives for wood fibers and composites: chemistry and technol-ogy. In: Belgacem, N.; Pizzi, A. (edt.): Lignocellulosic fibers and wood handbook. S. 247-273.

Plinke B, Bittner F, Endres H-J (2018) Messung der Dichteverteilung in Holzpartikelwerkstoffen in drei Dimensionen mit Computertomographie. [Density distribution in wood particle-based materials in three

dimensions using computed tomography]. In: Wagenführ A (ed) Tagungsband des 18. Holztechnologischen Kolloquiums, pp 208–217

Plinke B, Schirp A, Weidenmüller I. (2012) Methoden der Holzpartikelgrößenmessung - Von der technologischen Fragestellung zur aussagefähigen Statistik. Holztechnologie 4, 11-17

Roffael E, Bär G, Behn C, Dix B. (2009) Einfluss der Aufschlusstemperatur auf die morphologischen Eigenschaften von TMP aus Kiefernholz. Eur J Wood Wood Prod 67:119–20. https://doi.org/10.1007/s00107-008-0278-9.

Roffael, E.; Rauch, W. (1974): Extraktstoffe in Eiche und ihr Einfluss auf die Verleimbarkeit mit alkalischen Phenol-Formaldehydharzen. Holz als Roh- und Werkstoff 32(5): 182-187.

Sable I, Grinfelds U, Vikele L, Rozenberga L, Zeps M, Luguza S (2015) Thermal Insulation from Hardwood Residues. IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 96:12027

Sackey EK, Smith GD. (2010) Characterizing macro-voids of uncompressed mats and finished particleboard panels using response surface methodology and X-ray CT. Holzforschung 64:343–52. https://doi.org/10.1515/hf.2010.052.

Sluiter, A., Hames, B., Ruiz, R., Scarlata, C., Sluiter, J., Templeton, D., Crocker D. (2011) Determination of Structural Carbohydrates and Lignin in Biomass. Laboratory Analytical Procedure (LAP), Technical Report NREL/TP-510-42618, Version 07.08.2011

SOPREMA (2023) Technical Datasheet PAVATEX PAVAWALL LIGHT. https://www.pavatex.de/fileadmin/produkt/Produktinformationen/Pavatex/PI_PAV_PAVAWALL_LIGHT.pdf (accessed July 22, 2024).

STEICO (2024) Technical Datasheet STEICO therm dry. https://www.steico.com/fileadmin/user_upload/importer/downloads/4028b6097384810e0174961f5b304bbf/STEICOtherm_dry_TM_de_i.pdf (accessed July 22, 2024).

Suchsland O, Woodson GE (1991) Fiberboard manufacturing practices in the United States. Forest Products Research Society, Madison, Wis. USA

Tappi T 203 cm-22 (2022) Alpha-, beta- and gamma-cellulose in pulp, TAPPI, Peachtree Corners, USA

Tappi T 264 cm-97 (1997) Preparation of wood for chemical analysis. TAPPI, Peachtree Corners, USA

Van de Kuilen, J.-W.; Schaffrath, J. (2014): Möglichkeiten der Verklebung verschiedener Holzarten und Untersuchungen zur Verwendbarkeit als Brettschichtholz. Schlussbericht für das IGF-Vorhaben 17284 N der Forschungsvereinigung iVTH – Internationaler Verein für Technische Holzfragen. Technische Universität München.

Waangard, F.W.; Granados, L.A. (1967): The effect of extractives on water vapor sorption by wood. Wood Sci. Technol. 1:253-277.

Weigl M. (2011) Alteration of wood properties due to industrial processing Dissertation at the BOKU University, Vienna, https://www.researchgate.net/profile/Martin-Weigl-Kuska/publication/235779709_Veranderung_von_Holzeigenschaften_durch_industrielle_ProzesseAlteration_of_wood_properties_due_to_industrial_processing_Eingereicht_von/links/09e415137132f92aa5000000/Veraenderung-von-Holzeigenschaften-durch-industrielle-ProzesseAlteration-of-wood-properties-due-to-industrial-processing-Eingereicht-von.pdf (accessed July 24, 2024).

Wenderdel C, Hesse E, Krug D, Hänsel A, Niemz P. (2013) Influence of surface roughness of wood fibres on properties of medium density fibreboards, Pro Ligno 9 (4).

Wise L.E., Murphy, M., D’Addies A.A. (1946) Chlorite holocellulose, its fractionation and bearing on summative wood analysis and on studies on the hemicellulose. Paper Trade Journal 122(29: 11-19

Wood, IP, Elliston A, Ryden P, Bancroft I, Roberts IN, Waldron KW (2012) Rapid quantification of reducing sugars in biomass hydrolysates: Improving the speed and precision of the dinitrosalicylic acid assay. Biomass & Bioenergy, 44:117-121

Zabihzadeh SM (2010) Water uptake and flexural properties of natural filler/HDPE composites. BioResources 5(1):316–323

Zhang Y, Hosseinaei O, Wang S, Zhou Z. (2011) Influence of Hemicellulose Extraction on Water Uptake Behavior of Wood Strands. Wood Fiber Sci 244–50.

1. Verwertung

Die erzielten Ergebnisse bilden eine gute Grundlage für weitere Forschungsarbeiten. Bislang wurden die Ergebnisse zu den im Heißluftverfahren und in der Heißpresse hergestellten Holzfaserdämmplatten (HFDP) in zwei wissenschaftlichen Publikationen veröffentlicht (siehe unten). Die Ergebnisse werden den beteiligten Industriepartnern vorgestellt und mit ihnen diskutiert. Grundsätzlich zeigen die Ergebnisse, dass Holzfaserdämmplatten auch aus Laubholz hergestellt werden können. Damit wäre eine wirtschaftliche Verwertung der Ergebnisse möglich. Allerdings war die Wärmeleitfähigkeit der Holzfaserdämmstoffe aus den Laubhölzern Buche und Eiche höher als die der Platten aus den untersuchten Nadelhölzern. Prinzipiell wäre auch eine Fraktionierung des im Refiner erzeugten Fasermaterials wirtschaftlich umsetzbar, wenn eine der Faserfraktionen für andere Zwecke genutzt werden könnte. Ursprünglich wurde davon ausgegangen, dass die Grobfraktion für die Herstellung von HFDP besser geeignet ist als die Feinfraktion. Die Untersuchungen in Kapitel 1.4 haben jedoch zu einem gegenteiligen Ergebnis geführt. Das bedeutet, dass die Feinfraktion am besten für die Herstellung von Dämmplatten geeignet ist und die Grobfraktion z.B. für Pflanzsubstrate im Gartenbau verwendet werden könnte (ein FNR-Projekt, das derzeit in Zusammenarbeit mit der Hochschule Osnabrück bearbeitet wird). Die Versuche zur Beimischung von Kiefern, Lärchen- und Eichenfasern zu Fichtenfasern, die hauptsächlich in der Holzwerkstoffindustrie verwendet werden, haben leider nicht wie gewünscht funktioniert und sollen daher wiederholt werden. Dies würde wertvolle Erkenntnisse über den möglichen Einfluss "kritischer" Holzarten in Mischungen mit Fichtenfasern liefern.

Aus wissenschaftlicher Sicht ist insbesondere die Entwicklung eines Verfahrens zur Auswertung der Mikro-Computertomographie sehr vielversprechend und wird intensiv weiterverfolgt. Die entwickelte Methodik zur Segmentierung des gescannten Fasermaterials mittels Deep-Learning-Algorithmen stellt ein wertvolles Werkzeug zur Simulation von Materialeigenschaften wie mechanische Eigenschaften und Wärmeleitfähigkeit dar. Sie bietet damit die Möglichkeit, gezielt Fasermorphologien im Refiner zu erzeugen und damit die Herstellung von HFDP zu optimieren, die Methodik ist aber auch universell auf andere Materialien übertragbar. Hierin ist ein Schwerpunkt zukünftiger Forschungsarbeiten zu sehen.

2. Erkenntnisse von Dritten

Uns sind keine Ergebnisse bekannt, die sich speziell mit den Projektinhalten befassen. Es wurden jedoch Ergebnisse zur Herstellung von flexiblen Dämmmatten aus den im Projekt hergestellten Fasern und Bikofasern auf Basis von Polymilchsäure veröffentlicht:

Cárdenas-Oscanoa, A. J.; Tene Tayo, L.; Huang, C.; Huang, C.; Euring, M. (2024) Wood-fiber insulation boards (WFIB) produced with hardwood and softwoods species and polylactic acid (PLA) fibers as a binder. Wood Material Science & Engineering, https://doi.org/10.1080/17480272.2024.2407400

3. Veröffentlichungen

Bisher wurde zwei wissenschaftliche Publikationen zu Projektinhalten veröffentlicht:

Imken AAP, Baechle L, Brinker S, Kraft R, Plinke B, Aderhold J, Meinlschmidt, p, Mai, C (2024) Investigation of various hardwood and softwood fibres for the usage in wood-fibre insulation panels. Wood Mater Sci Eng 19(6): 1180-1191 https://doi.org/10.1080/17480272.2024.2312443.

Brinker, S. Ahrens, C., Gurnik, M., Mayer AK, Mai C. (2025) Influence of screened fibre fractions on the properties of insulation panels made of different wood species. Wood Mat. Sci. Eng. https://doi.org/10.1080/17480272.2025.2452206

Es ist weiterhin geplant, 2-3 wissenschaftliche Originalartikel über die Ergebnisse zur Mikro-Computertomographie und der Segmentierung der Faserpartikel in referierten Fachzeitschriften zu veröffentlichen. Darüber hinaus ist eine zusammenfassende Veröffentlichung in einer populären Fachzeitschrift (Holzzentralblatt) geplant.