

DISS. ETH Nr. 22713

**Untersuchungen zur Optimierung von Holzfaserdämmstoffen in Abhängigkeit von Rohstoff, Herstellverfahren und Aufschlussbedingungen**

Abhandlung zur Erlangung des Titels  
Doktor der Wissenschaften der ETH Zürich  
(Dr. sc. ETH Zürich)

vorgelegt von

Volker Brombacher

Dipl. Forstw., Technische Universität Dresden  
geboren am 31.08.1971 in Lörrach (Deutschland)

Angenommen auf Antrag von

Referent:	Prof. Dr. Ing. habil. Dr. h.c. P. Niemz
Korreferent:	Prof. Dr. I. Burgert
Korreferent:	Prof. Dr. nat. techn. Dr. h.c. A. Teischinger

2015

## **Vorwort**

Die vorliegenden Ergebnisse entstanden während meiner Forschungstätigkeit vom März 2010 bis Februar 2015 als externer Doktorand der Arbeitsgruppe Holzphysik am Institut für Baustoffe der ETH Zürich.

Mein grösster Dank gilt Herrn Prof. Dr. Ing. habil. Dr. h.c. Peter Niemz, der meine Forschungsarbeit betreut hat und mich stets unterstützt, positiv gefordert und in vielen Gesprächen und Fachdiskussionen beraten hat. Ebenfalls gilt Herrn Martin Brettenthaler, Delegierter des Verwaltungsrates und CEO der Pavatex SA, sehr grosser Dank. Durch seine Unterstützung wurde diese externe Dissertation überhaupt möglich. Bei Herrn Prof. Dr. I. Burgert und Herrn Prof. Dr. nat. techn. Dr. h.c. A. Teischinger möchte ich mich für das Interesse an meiner Arbeit und die Übernahme des Korreferats herzlich bedanken.

Die während dieser Arbeit bearbeiteten Projekte wurden unterstützt durch die Pavatex SA, für die ich in diesem Zeitraum als Leiter Technologiecenter gearbeitet habe. Zudem wurden die Arbeiten durch das Bundesamt für Umwelt; Fonds zur Förderung der Wald- und Holzforschung, Abteilung Wald (Projekt Nr. 2010.10) sowie das Bundesamt für Berufsbildung und Technologie; Kommission für Technik und Innovation KTI (Projekt Nr. 14019.1 PFIW-IW) gefördert. Für diese wichtige Unterstützung möchte ich mich ganz besonders bedanken.

Bei allen Mitarbeitern der Arbeitsgruppe Holzphysik bedanke ich mich für die sehr angenehme und hilfreiche Atmosphäre, die mir als Externem entgegengebracht wurde. Für die sehr grosse Hilfe bei der Projektausführung, der Entstehung der Prüfaufbauten und Geräte sowie der fachlichen Unterstützung bedanke ich mich bei Franco Michel im Besonderen.

Beim allen Mitarbeitern des Arbeitsgebietes Holzwerkstoffe unter der Leitung von Dr. rer. nat. D. Krug am IHD Dresden bedanke ich mich für die Faserstoffherstellung im Technikum, besonderer Dank gilt Herrn Marco Mäbert. Zudem bedanke ich mich bei Herrn Dr. W. Scheiding für die Durchführung der thermischen Behandlung. Für die Hilfe bei der statistischen Auswertung bedanke ich mich bei Herrn PD Dr. D. Mandallaz. Bei allen Dämmstoffherstellern bedanke ich mich für die freundliche Unterstützung mit Probenmaterial. Nicht zuletzt bedanke ich mich bei meiner Familie und insbesondere meiner Frau Leonie für das Lektorat und die grosse Unterstützung im Allgemeinen.

Volker Brombacher

## Kurzfassung

Die Reduktion des Heizenergieverbrauchs von Gebäuden durch Isolationen wird zunehmend wichtiger. Holzfaserplatten bieten neben herkömmlichen Materialien aus Mineralfasern oder organischen Schäumen eine Alternative und erfreuen sich zunehmender Marktakzeptanz. Während bei den etablierten Dämmstoffen die hygrothermischen Eigenschaften systematisch optimiert wurden, fehlt dies für Holzfaserplatten weitgehend. Erstes Ziel dieser Arbeit war deshalb die systematische Untersuchung der hygrothermischen Eigenschaften von Holzfaserplatten und der Vergleich mit anderen Faserdämmstoffen. Der Schwerpunkt lag dabei auf der Wärmeleitfähigkeit. Ein weiteres Ziel war die Untersuchung der Auswirkung des Rohmaterials, da die bisherige Materialgrundlage aus Fichten / Tannenhölzern zunehmender Verknappung unterliegt und theoretische Grundlagen für den Einsatz anderer Hölzer fehlen. Ein drittes Ziel der Arbeit war die Erarbeitung theoretischer Grundlagen zum Vergleich der Herstellverfahren von Holzfaserdämmplatten hinsichtlich der hygrothermischen Eigenschaften. Die Untersuchungen erfolgten an industriell hergestellten Holzfaserprodukten und Vergleichsmaterialien im Rohdichtebereich von 43 - 290 kg/m<sup>3</sup> sowie an Materialkombinationen. Zudem wurden industrielle Holzfaserstoffe aus Fichten, Kiefern und Buchenholz untersucht und es erfolgte die labortechnische Herstellung von Holzfaserstoffen aus Fichtenholz. Anhand der Ergebnisse wurde anschliessend ein vorhandenes Modell zur Bestimmung der Wärmeübertragung für Holzfasern angepasst, validiert und Handlungsoptionen zur Optimierung von Holzfaserdämmstoffen erarbeitet.

Die Ergebnisse zeigten jeweils eine sehr starke Abhängigkeit von der Materialdichte, zudem lagen deutliche Unterschiede in der Materialfeuchte vor. Holzfaserprodukte wiesen höhere Rohdichten und höhere Ausgleichsfeuchten auf als Mineralfaserplatten. Mit Sorptionswerten von im Mittel 7-9 % lagen Holzfaserprodukte deutlich höher als Mineralfasern mit maximal 2 % und damit einher gingen auch höhere Werte der Wärmeleitfähigkeit. Proben aus dem Nassverfahren hatten technologisch bedingt höhere Dichten als Proben der vergleichbaren Produkttypen aus dem Trockenverfahren. Flexible Holzfaserdämmstoffe wiesen nur leicht höhere Rohdichten auf als Vergleichsproben aus Steinwolle oder Glaswolle. Das Quellungs- und Schwindverhalten der Holzfaserproben unterschied sich nach dem Herstellverfahren. Nur bei Proben aus dem Nassverfahren erfolgte die Quellung in Abhängigkeit von der Produktionsrichtung. Die Ergebnisse der Dickenquellung waren unabhängig vom Herstellverfahren und stiegen bei allen Proben mit zunehmender Rohdichte an. Der Diffusionswiderstand stieg mit zunehmender Dichte ebenfalls an, war für den Durchgang senkrecht zur Probe jedoch nicht richtungsunabhängig. Auch die Wärmeleitfähigkeit war bestimmt als Funktion der Rohdichte, zusätzlich erhöhte sie sich mit zunehmender Dicke und Temperatur. Die Materialkombinationen zeigten beim Feuchtetransportverhalten die gleichen Gesetzmässigkeiten wie die Einzelmaterialien. Bei der Wärmeübertragung hatten die Randlagen mehr Einfluss

als die mittleren Lagen. Die Ergebnisse der industriellen Holzfaserstoffe variierten nach Holzart und Herstellbedingungen wenig. Mit der Zerfaserung erfolgte eine Egalisierung der holzartenspezifischen Unterschiede des Ausgangsmaterials wie beispielsweise in Bezug auf die Dichte und die Materialfeuchte. Im Vergleich mit Mineralfasern zeigte sich, dass Holzfaserstoffe aus deutlich weniger homogen aufgeschlossenen Fasern bestehen und daneben auch Faserbündel und Bruchstücke vorhanden sind, was zu erhöhter Wärmeleitfähigkeit des Faserverbundes aus Holzfaserstoffen im Vergleich zu Mineralfasern beiträgt. Bei den labortechnisch hergestellten Faserstoffen reduzierte sich mit zunehmendem Zerfaserungsdruck die Partikelgrösse und die Schüttdichte stieg an. Die gewählten Verweilzeiten im Kocher hatten keine Auswirkung auf die Schüttdichte. Mit zunehmendem Zerfaserungsdruck nahm der Feuchtegehalt der Faserstoffe ab, da durch die Temperaturzunahme mehr Hemizellulosen abgebaut wurden. Die Werte der Wärmeleitfähigkeit waren dadurch nur unmittelbar durch Zerfaserungsbedingungen bestimmt und durch die Zunahme der Schüttdichte und die Abnahme der Materialfeuchte bei steigendem Zerfaserungsdruck lagen entgegengesetzt wirkende Zusammenhänge hinsichtlich der Wärmeleitfähigkeit vor.

Die Simulation der Wärmeleitfähigkeit anhand des Modells und den experimentell ermittelten Parametern führte mit Ausnahme der Werte für Buchen- und Kiefernfasern zu guten Übereinstimmungen mit den gemessenen Werten. Das gewählte Modell kann unter bestimmten Voraussetzungen für verlässliche Modellierungen der Wärmeleitfähigkeit verwendet werden. Mit zunehmender Fasergrösse und zunehmender Probenrohddichte nahm die Genauigkeit des Modells jedoch ab. Für Fasern bis 2 mm Durchmesser und Probenrohddichten bis  $150 \text{ kg/m}^3$  waren die Übereinstimmungen zufriedenstellend. Beim Wärmetransport aus Luftanteil, Faseranteil und Strahlungsanteil zeigte sich der starke Einfluss des Luftanteils innerhalb der Fasermatrix, der bei einer Rohddichte von  $120 \text{ kg/m}^3$  bei 54 % lag. Mit steigender Rohddichte nahm der Anteil stetig ab und lag bei der Rohddichte von  $200 \text{ kg/m}^3$  noch bei 43 %. Der Anteil der Faser an der Wärmeübertragung war deutlich geringer. Er lag bei  $80 \text{ kg/m}^3$  bei 5 % und stieg an bis auf 37 % bei  $200 \text{ kg/m}^3$  und war abhängig von der Faserdicke, der Wärmeleitfähigkeit der Einzelfaser und der Dichte der Einzelfaser. Der Strahlungsanteil war abhängig von der Faseremissivität, der Faserreindichte und der Dickenverteilung der Fasern und nahm von 55 % bei  $40 \text{ kg/m}^3$  ab auf 20 % bei  $200 \text{ kg/m}^3$ .

Die Ergebnisse dieser Arbeit zeigen, dass die bisher auf Fichten- und Kiefernholzern beschränkte Materialbasis für Holzfaserplatten auf Buchenholz ausgeweitet werden kann. Es zeigte sich weiter, dass bei der Faserstoffherstellung durch die Variation des Drucks im Vorwärmer die hygrothermischen Eigenschaften von Holzfaserplatten beeinflusst werden. Schliesslich zeigte sich, dass das gewählte Modell zur Optimierung der Wärmeleitfähigkeit von Holzfaserdämmstoffen für Fasern bis ca. 2 mm Durchmesser verwendet werden kann.

## Abstract

The decrease of energy consumption for buildings by building insulation faces a growing importance. Woodfibre boards are increasingly used as an alternative for typical insulation materials e.g. mineral fibre or organic foams. In the past the hygrothermal properties have been systematically optimized for typical insulations, but for woodfibre boards this has not been done yet. Therefore the first aim of this work was to gain systematic knowledge on the possibilities to optimize hygrothermal properties of woodfibres compared to typical fibre insulations with focus on thermal conductivity. Second aim was to investigate the influence of different tree species, in view of a decreasing material supply for spruce wood and little theoretical knowledge for beech- and pinewood raw materials. A third aim of this work was to establish theoretical knowledge for hygrothermal properties depending on different production technologies. The scientific work was done on industrial woodfibres, standard fibre products and material combinations for product densities from 43 - 290 kg/m<sup>3</sup>. In addition, industrially produced woodfibres made from spruce, beech and pine wood were tested and fibres from spruce wood were produced at laboratory scale. Based on the results an existing thermal conduction model was adapted, validated and options for optimizations discussed.

The results on thermal conductivity indicate a dominating influence of material density, in addition the materials showed different material moisture contents. Sorption was significantly higher (7-9 %) for woodfibers compared to mineral fibers (2 %) and consequently the thermal conductivity was higher. Wet-processed samples showed higher densities compared to dry-processed samples for adequate product types. Wood fibre mats possessed higher densities compared to mats from mineral wool. Swelling and shrinking were different depending on production technology. Only wet-processed boards showed higher swelling in production direction compared to swelling perpendicular to the production direction. For all samples swelling increased with increasing density. The vapour diffusion resistance increased with the board density independently of the direction of diffusion. Thermal conductivity was determined by board density and increased with board thickness and sample temperature additionally. Material combinations featured the same principles in moisture transportation behaviour as single materials. Thermal conductivity was stronger influenced by the outer layers compared to core layers. Industrially produced wood fibres were hardly influenced by tree species and terms of production. The defibrating partly equalised differences from the raw material e.g. density and moisture content. Compared to mineral fibres wood fibres were less uniform and less sufficiently separated after defibration which influenced the thermal conductivity. Wood fibres produced at laboratory scale showed decreasing particle sizes and increasing bulk densities according to increasing pressure at the preheating unit. Different exposure times in the preheating unit showed no impact to the bulk density. Fibre moisture content decreased by increasing pressure at defibrating as a consequence of increasing loss

of hemicelluloses with increasing defibration temperatures. Thus the results of thermal conductivity were related only indirectly to the defibration process conditions. With increasing pressure at the defibration the bulk density increased while the moisture content decreased, hence a contrary relation for reducing the thermal conductivity was observed.

The heat transfer modelling by using experimental data was in good agreement with the experimental results only for spruce wood fibres. The selected model is applicable for modelling heat transfer in a wood fibre matrix. With increasing fibre diameter the modelling showed less agreement. Fibre sizes up to 2 mm diameter and densities up to  $150\text{kg/m}^3$  showed good agreement. The heat transfer modelling as a result of transportation by air, fibres and radiation showed with a contribution of 54 % a strong influence of the air. By increasing the density the conductivity by air decreased and was at a density of  $200\text{ kg/m}^3$  at 43 %. The effect on conductivity by mass heat transfer was lower. At  $80\text{kg/m}^3$  it was at 5 % and increased up to 37 % at  $200\text{ kg/m}^3$ . The fibres itself influenced the heat transfer depending on fibre thickness, fiber conductivity and density. The share of radiation was depending on fiber emissivity, fibre density and the distribution of the fibre thickness and decreased from 55 % at  $40\text{ kg/m}^3$  to 20 % at  $200\text{ kg/m}^3$ .

The results of this work provide additional knowledge to extend the existing material supply for wood fibres (e.g. spruce and pine wood) by beech wood. Further it was shown that the hygrothermal properties of wood fibre boards can be significantly influenced by the variation of steam pressure during the defibration process. Finally, the thermal conductivity model was proven to be applicable for the optimization of thermal conductivity of wood fibre insulating materials up to a particle diameter of max. 2 mm.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1	Motivation und Arbeitshypothesen	1
1.2	Aufgabe und Zielsetzung	2
<b>2</b>	<b>Stand des Wissens und der Technik</b>	<b>4</b>
2.1	Holzfasstoffherstellung	4
2.2	Faserplattenherstellung	7
2.2.1	Plattenherstellung im Nassverfahren	9
2.2.2	Plattenherstellung im Trockenverfahren	11
2.2.3	Zusatzstoffe	14
2.3	Produkte und Anwendungsgebiete	16
2.4	Hygrothermische Einflussgrößen	18
2.4.1	Wärmetransport	18
2.4.2	Wärmespeicherung	28
2.4.3	Feuchtaufnahme und -speicherung	31
2.4.4	Feuchtetransport	36
<b>3</b>	<b>Material und Methoden</b>	<b>39</b>
3.1	Übersicht	39
3.2	Materialien und deren Herstellung	40
3.2.1	Industrielle Holzfasstoffplatten und Dämmstoffe	40
3.2.2	Holzfasstoffe	42
3.3	Experimentelle Untersuchungen	49
3.3.1	Messgeräte	49
3.3.2	Rohdichte / Schüttrohdichte	50
3.3.3	Rohdichteprofil senkrecht zur Plattenebene	50
3.3.4	Porosimetrie	51
3.3.5	Morphologie	52
3.3.6	Chemische Analyse	54
3.3.7	Feuchtaufnahme	54
3.3.8	Feuchtetransport	58
3.3.9	Wärmeleitfähigkeit	62
3.4	Modellierung der Wärmeleitfähigkeit	64
<b>4</b>	<b>Ergebnisse und Diskussion</b>	<b>68</b>
4.1	Industrielle Holzfasstoffplatten und Dämmstoffe	68
4.1.1	Rohdichte / Rohdichteprofil	68
4.1.2	Feuchtaufnahme	72

4.1.3	Feuchtetransport .....	80
4.1.4	Wärmeleitfähigkeit.....	86
<b>4.2</b>	<b>Holzfaserstoffe .....</b>	<b>92</b>
4.2.1	Schüttdichte.....	92
4.2.2	Porosimetrie .....	96
4.2.3	Morphologie.....	97
4.2.4	Chemische Analyse.....	106
4.2.5	Feuchteaufnahme .....	107
4.2.6	Wärmeleitfähigkeit.....	110
<b>4.3</b>	<b>Modellierung der Wärmeleitfähigkeit .....</b>	<b>117</b>
<b>5</b>	<b>Synthese.....</b>	<b>124</b>
5.1	Abschliessende Diskussion und Zusammenfassung .....	124
5.2	Handlungsoptionen und Ausblick.....	130
<b>6</b>	<b>Verzeichnisse.....</b>	<b>132</b>
6.1	Literatur.....	132
6.2	Tabellen.....	136
6.3	Abbildungen .....	137
<b>7</b>	<b>Anhang .....</b>	<b>144</b>
7.1	Verwendete Messgeräte .....	144
7.2	Aufnahmen industrieller Holzfaserdämmstoffe – Ober- und Unterseite.....	145
7.3	Publikationsliste.....	146
7.3.1	Publikationen.....	146
7.3.2	Konferenzpublikationen.....	147

# 1 Einleitung

## 1.1 Motivation und Arbeitshypothesen

Die Reduktion des Energieverbrauchs für Gebäudeheizungen ist im Zusammenhang mit der Energiewende sehr wichtig. Der prozentuale Anteil des Energieverbrauchs für Raumwärme am inländischen Gesamtenergiekonsum ist bedeutend und lag im Jahr 2013 bei 34 % (Kemmler, Piégsa et al. 2013). Sowohl für Neubauten als auch für bestehende Gebäude werden die nationalen Vorgaben an den maximalen Transmissionswärmeverlust von Bauteilen laufend erhöht und die Förderanreize für zusätzliche Dämmmassnahmen vergrössert (Vogel 2014). Ein grosses Potential für Isolationsmaterialien zur Dämmung der Gebäudehülle ist entstanden.

Dämmstoffe aus Holzfasern gewinnen damit ebenfalls zunehmend an Bedeutung. Der Markt für Holzfaserdämmstoffe ist insbesondere in den vergangenen 20 Jahren stetig gewachsen. Seit 2004 ist der Markt in Deutschland für Holzfaserdämmstoffe und Wärmedämmverbundsysteme mit Dämmplatten aus Holzfasern jährlich um durchschnittlich 11,9 Prozent gestiegen und beträgt damit mehr als das Zehnfache der jährlichen Steigerung des Bruttoinlandsproduktes Deutschlands von im Mittel 1,1 Prozent (VHD 2013). Als Baustoffe aus dem nachwachsenden Rohstoff Holz weisen sie zudem positive Eigenschaften in Bezug auf Nachhaltigkeit, CO<sub>2</sub> Speicherung und Entsorgung auf.

In allgemeinen Studien zur Energieeffizienz und zum Einsatz von Dämmstoffen, wie beispielsweise der Metastudie Dämmstoffe – Produkte - Anwendungen (Sprengard, Treml et al. 2013), kommen Holzfaserdämmstoffe bisher jedoch nur untergeordnet vor. Systematische Untersuchungen wie beispielsweise für Mineralfaserdämmstoffe (Zeitler 2000) oder Textilien (Freudenberg 2002) liegen kaum vor. Der Stand des Wissens begrenzt sich meist auf die Standardwerke von Lampert (Lampert 1967) und Kollmann (Kollmann 1955) sowie Arbeiten von Sonderegger und Niemz (Sonderegger und Niemz 2006, Sonderegger und Niemz 2009, Sonderegger und Niemz 2012). Aus dem Bereich der Holzwerkstoffe liegen zahlreiche Untersuchungen an mitteldichten Faserplatten (MDF) und Spanplatten vor. So hat beispielsweise Suchsland umfangreiche Untersuchungen zu Herstellung und Eigenschaften von Holzwerkstoffen unternommen (Suchsland und Xu 1992) und Deppe und Ernst legten Erkenntnisse zu Materialeigenschaften von MDF in Abhängigkeit der Faserstoffgüte vor. (Deppe und Ernst 1996). Zudem hat beispielsweise Krug (Krug 2010) systematische Untersuchungen zur Auswirkung der Zerkleinerungsbedingungen auf die Eignung von MDF-Platten für die Verwendung im Feucht- und Aussenbereich angestellt. Arbeiten zu den Einflussfaktoren der Eigenschaften von Holzfaserplatten, wie beispielsweise in den sechziger bis siebziger Jahren des vergangenen Jahrhunderts an Spanplatten durchgeführt, fehlen weitgehend.

Durch das Marktwachstum erfolgte in der jüngeren Vergangenheit parallel dazu ein technologischer Wandel bei der Herstellung von Holzfaserplatten. Zusätzlich zum bewährten Nass-

verfahren produzieren Anlagen nach dem Trockenverfahren oder stellen Dämmprodukte auf Produktionsanlagen für Holzwerkstoffe her. Neuartige Anlagen zur Herstellung von Holzfaserdämmstoffen kamen hinzu.

Bei herkömmlichen Dämmstoffen führte der stetige Anstieg der Wärmeschutz- und Energieeinsparverordnungen zu verschiedenen Konzepten der Reduzierung der Wärmeleitfähigkeit. Neben Untersuchungen zur optimalen Fasergrösse beispielsweise bei Mineralfaserplatten (Zeitler 2000) und zur optimalen Porosität (Du, Fan et al. 2009) erfolgten auch Weiterentwicklungen bei Materialkombinationen, beispielsweise durch Zugabe von nanoporösen Stoffen. Bei organischen Produkten wie etwa Hartschäumen kommen verstärkt Infrarot-Trübungsmittel zum Einsatz, um den Anteil der Wärmeübertragung durch Strahlung zu reduzieren und bei Polyurethan-Dämmstoffen erfolgte zunehmend der Einsatz neuartiger Zellgase mit reduzierter Wärmeleitfähigkeit (Sprengard, Treml et al. 2013).

Für Holzfaserdämmstoffe liegen bislang keine theoretischen Ansätze zur Optimierung vor und die Auswirkungen der Rohstoffauswahl auf die Platteneigenschaften sind bisher kaum erforscht. Zudem ist nicht bekannt, ob die Zerfaserungsparameter bei der Faserstoffherstellung die Eigenschaften von Holzfaserdämmstoffen beeinflussen können, so wie das beispielsweise für MDF-Platten durch Krug untersucht worden war (Krug 2010). Unter Berücksichtigung des Stands der Technik und der technologischen Ausgangslage für die Herstellung von Holzfaserdämmstoffen wurden deshalb folgende Arbeitshypothesen aufgestellt:

- Durch die Rohstoffauswahl bzw. die Holzartenwahl kann die Fasermorphologie beeinflusst und damit verbesserte Eigenschaften von Holzfaserdämmstoffen erzielt werden.
- Die unterschiedlichen Herstellverfahren führen dazu, einzelne oder mehrere Eigenschaften von Holzfaserdämmstoffen zu verändern und können damit für Optimierungen gezielt verwendet werden.
- Durch die gezielte Auswahl von Parametern der Aufschlussbedingungen für Holzfaserstoffe können die Eigenschaften von Holzfaserdämmplatten optimiert werden.

## **1.2 Aufgabe und Zielsetzung**

In einem ersten Schritt wurden deshalb industriell gefertigte Holzfaserdämmstoffe in Abhängigkeit des Herstellverfahrens untersucht. Zusätzlich wurden die Proben mit Mineralfaserdämmstoffen verglichen und Materialwerte von Dämmstoffkombinationen gemessen. In einem weiteren Schritt wurden industriell hergestellte Holzfaserstoffe aus drei unterschiedlichen Holzarten untersucht. Schliesslich erfolgte im Labor die experimentelle Herstellung von Holzfaserstoff unter Variation ausgewählter Zerfaserungsparameter. Die untersuchten Eigenschaften sind für den Einsatz der Werkstoffe bauphysikalisch von besonderer Bedeutung. Die Kennwerte wurden rechnerisch und experimentell bestimmt.

Erstes Ziel dieser Arbeit ist die Analyse und der Vergleich bauphysikalisch relevanter Einflussgrößen von industriellen Produkten aus unterschiedlichen Herstellungsverfahren. Zweites Ziel dieser Arbeit ist es, Ansätze zur Reduktion der Wärmeleitfähigkeit von Holzfaserdämmstoffen umfassend zu beurteilen und die wesentlichen Transportvorgänge für Holzfaserdämmstoffe zu analysieren. Zudem sollen die Auswirkungen der Hygroskopizität beurteilt und holzartenspezifische Unterschiede ermittelt werden. Die Auswirkungen der Zerfaserungsbedingungen auf die Materialfeuchte und die Wärmeleitfähigkeit sollen zusätzlich untersucht werden. Anhand einer Modellierung der Wärmeleitfähigkeit sollen Handlungsoptionen zur Optimierung aufgezeigt werden. Dazu erfolgten folgende Arbeiten:

- Untersuchung industriell hergestellter Holzfaserdämmstoffe und Vergleichsprodukte verschiedener Hersteller
- Untersuchung von Materialkombinationen aus unterschiedlichen Dämmstoffen
- Untersuchungen zur Herstellung von Faserstoffen mit gezielt veränderter Struktur durch Steuerung des Zerfaserungsprozesses (Fasergeometrie, Sorptionsverhalten der Fasern)
- Untersuchungen zur Hygroskopizität von Holzfaserstoffen in Abhängigkeit des Zerfaserungsprozesses
- Untersuchung der Beziehungen zwischen Faserstoffgeometrie, Schüttdichte und Wärmeleitfähigkeit
- Einfluss der Faserfraktionen auf die Wärmeleitfähigkeit
- Einfluss einer zusätzlichen Wärmebehandlung von Faserstoff
- Untersuchungen zum Anteil der Wärmestrahlung und Wärmeleitung am Gesamtwärmedurchgangskoeffizient durch Simulation der Übertragungsvorgänge

## 2 Stand des Wissens und der Technik

### 2.1 Holzfaserstoffherstellung

Als biologisches Polymer besteht Holz im Wesentlichen aus der Gerüstsubstanz Cellulose, Hemicellulose und der verbindenden Substanz Lignin. Die Holzstruktur und die Holzeigenschaften werden durch die Holzarten und die Wachstumsbedingungen charakterisiert. Zwischen Nadel- und Laubhölzern bestehen strukturelle Unterschiede. Während Nadelhölzer zwei Zellarten – Tracheiden (Wasserleitung und mechanische Festigkeit) und Parenchymzellen (Nähr- und Aufbaustofftransport) - aufweisen, bestehen Laubhölzer aus mehr Zellarten, wie Libriform-Fasern (mechanische Festigkeit), Tracheen (Wasserleitung), Tracheiden und Parenchymzellen (Lüttge, Kluge et al. 1994). In Abbildung 2.1 sind die Dichte, Grösse und Zellbestandteile ausgewählter Holzarten dargestellt.

	Nadelhölzer (gemässigte Zone)			Laubhölzer (gemässigte Zone)			Laubhölzer (Tropen)	
	<i>Abies alba</i>	<i>Picea abies</i>	<i>Pinus sylvestris</i>	<i>Fagus sylvatica</i>	<i>Quercus robur</i>	<i>Populus spec.</i>	<i>Ochroma lagopus</i>	<i>Tectonia grandis</i>
<b>Dichte</b> [g/cm <sup>3</sup> ]	0.32-0.41-0.71	0.30-0.43-0.64	0.30-0.49-0.86	0.49-0.68-0.88	0.39-0.65-0.93	0.40	0.05-0.13-0.41	0.44-0.63-0.82
<b>Zellgrössen</b>								
<b>Tracheiden</b>								
Länge [mm]	3.4-4.3-4.6	1.7-2.9-3.7	1.4-3.1-4.4	0.6-1.3	0.6-1.6	0.7-1.6	1.1-2.2-3.6	0.7-1.4
Durchmesser [µm]	25-50-65	20-30-40	10-30-50	15-20	10-30	20-40		
<b>Gefässe</b>								
Länge [mm]				300-700	100-400	500		
Durchmesser [µm]				5-100	10-400	20-150	130-200	50-370
<b>Zellanteile</b> (durchschnittlich)								
<b>Tracheiden</b> [%]	90.4	95.3	93.1	37.4	44.3*/58.1**	61.8	4.0	66.3
<b>Gefässe</b> [%]				31.0	39.5*/57.7**	26.9	3.0-4.5	11.6
Längsparenchyme [%]		1.4-5.8	1.4-5.8	4.6	4.9		74	11.6
Markstrahlen [%]	9.6	4.7	5.5	27	16.2*/29.3**	11.3	17.0-19.0	15.5
* enge Jahrringe								
** weite Jahrringe								

Abbildung 2.1: Dichte, Grösse und Zellbestandteile ausgewählter Holzarten aus (Fengel und Wegener 2003)

Ziel der Holzfaserstoffherstellung ist die mechanische Trennung der verholzten Bestandteile des Rohstoffes durch Schneiden, Mahlen und Quetschen unter gleichzeitiger Einwirkung von Wasser und Wärme (Autorenkollektiv 1988). Dieser komplexe Vorgang wird beeinflusst durch das Rohmaterial (Holzarten, Rindenanteil, Lagerdauer der Hackschnitzel) und die hydrothermischen sowie die mechanischen Bedingungen. Idealerweise werden die Holzfasern durch Abscheren der sie verbindenden Mittellamelle getrennt. Dafür wird während der Vorbehandlung das Lignin unter Einfluss von Druck erweicht. Bei der industriellen Herstellung entstehen in Abhängigkeit des Drucks und der Verweilzeit im Vorwärmer Fasern, Faserbündel und Faserbruchstücke. Durch die Zerfaserung erfolgt eine enorme Vergrösserung der Holzoberfläche auf bis zu 10 m<sup>2</sup>/g (Lampert 1967). In Abhängigkeit der Zerfaserungsbedingungen ist die Faseroberfläche sehr klebeaktiv. Die Glasübergangstemperatur des Lignins liegt im Bereich von 140 °C (Goring 1963). Unterhalb dieser Bedingungen erfolgt der Aufschluss der Hackschnitzel teils in der Mittellamelle und teils in den Zellwandschichten (Pri-

märwand, S<sub>1</sub> und S<sub>2</sub>-Wand) was zu einer starken Fibrillierung mit einem hohen Anteil an hydrophilen Oberflächen führt. Oberhalb dieses Temperaturniveaus erfolgt die Zerfaserung mehrheitlich in der Mittellamelle und führt zu weniger fibrilliertem und damit chemisch weniger aktivem Faserstoff. Ein Zellwandmodell und eine rasterelektronenmikroskopische Aufnahme von Holzfaserstoff sind in der folgenden Abbildung dargestellt.

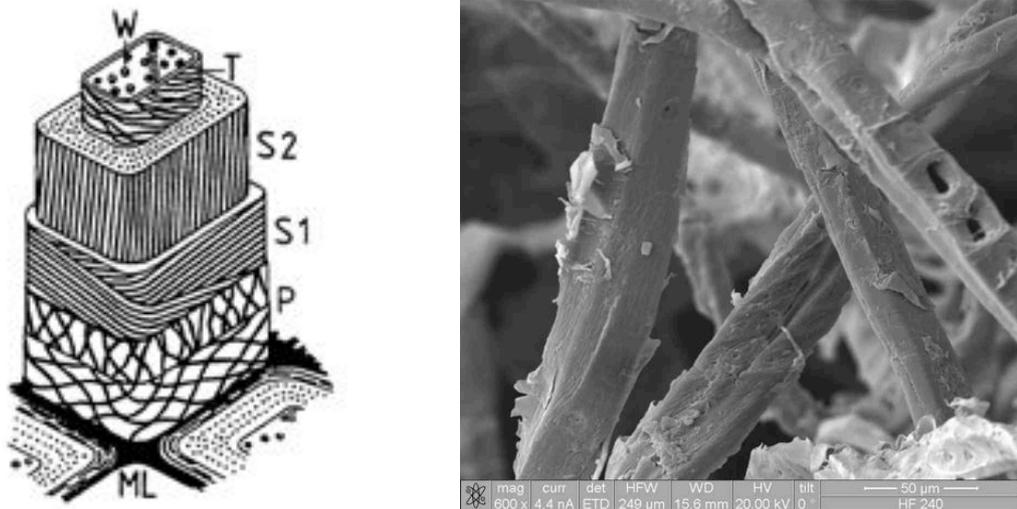


Abbildung 2.2: Zellwandmodell (Fengel und Wegener 2003). (ML) Mittellamelle, (P) Primärwand, (S1) Sekundärwand, (S2) Sekundärwand, (T) Tertiärwand, (W): Warzenschicht (links); REM Aufnahme Faserstoff (rechts).

Die industrielle Herstellung von Faserstoff ist in der Literatur beschrieben, im Fachbuch von Kollmann (Kollmann 1955) oder Lampert (Lampert 1967) finden sich detaillierte Beschreibungen des technologischen Vorgangs. Zunächst wird das Rohholz in Hackgut zerkleinert oder es werden Hackschnitzel direkt aus der Sägeindustrie verwendet. Den Hackschnitzeln werden unerwünschte Fremdpartikel entzogen, je nach Produkthanforderung kommen ausschliesslich entrindete Hackschnitzel zum Einsatz. Danach erfolgt die eigentliche Zerfaserung im kontinuierlichen Prozess (Defibrator-Verfahren) oder in diskontinuierlichen Abläufen (z.B. Dampfexplosions-Verfahren, Basler Verfahren, Biffar Verfahren etc.). Je nach Anforderung und Produktionsbedingungen kann der Faserstoff auch einer Nachmahlung (Raffination) unterzogen werden. Die Zerfaserung ist für die Eigenschaften des Holzfaserstoffes bestimmend und für die späteren Produkteigenschaften mitbestimmend. In der heutigen industriellen Praxis erfolgt die Faserstoffherstellung fast ausschliesslich thermomechanisch im sogenannten Defibratorverfahren (vgl. Abbildung 2.3 und 2.4).

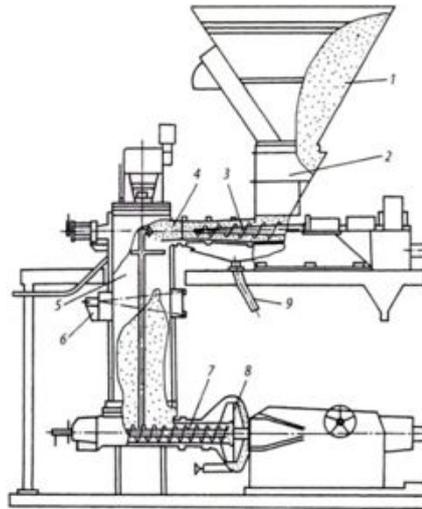


Abbildung 2.3: Defibrator nach Lampert in (Dunky und Niemz 2002) (1) Hackschnitzelbunker, (2) Hackschnitzelrinne, (3) Speiseschnecke, (4) Hackschnitzelpfropfen, (5) Vorwärmer, (6) Füllstandregelung, (7) Förderschnecke, (8) Mahlscheibe, (9) Wasserabführung

Beim Defibratorverfahren werden folgende Bauarten von Refinern unterschieden:

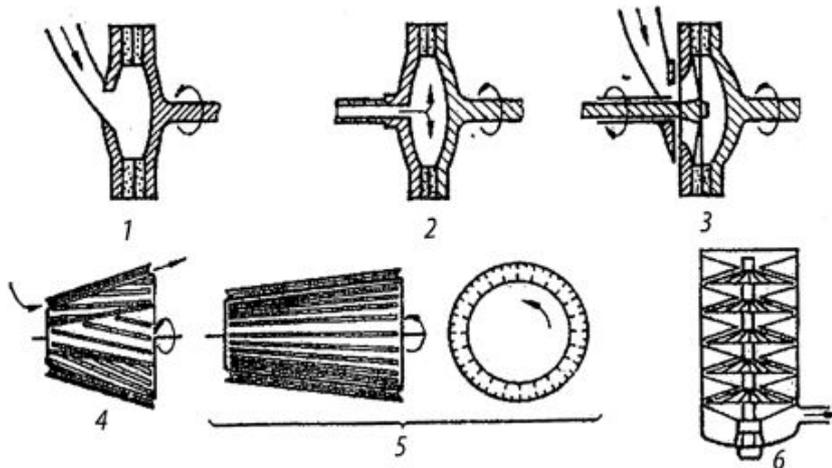


Abbildung 2.4: Verschiedene Zerfaserungsaggregate (Autorenkollektiv 1988) (1) Refiner nach Voith, Sprout Waldron u.a. mit einer beweglichen Scheibe, (2) Southerland-Refiner mit Hohlachse, (3) Bauer-Refiner mit zwei beweglichen Scheiben, (4) Clafin Refiner, (5) Hydrorefiner, (6) Fritz-Refiner mit 10 vertikal angeordneten Scheiben

Die Faserstoffgüte hängt dabei von den folgenden Einflussgrößen ab (Dunky und Niemz 2002):

- Zeit und Dampfdruck im Vorwärmer
- Zerfaserungsdruck
- Abstand der Zerfaserungsscheiben
- Drehzahl und Zustand der Zerfaserungsscheiben
- Rohstoffart und -feuchte

Für einen optimalen Aufschluss der Fasern aus Laub- und Nadelhölzern stehen unterschiedlich profilierte Zerfaserungsscheiben zur Verfügung. Die Schüttdichte der Fasern beträgt je nach Aufschlussgrad 15-40 kg/m<sup>3</sup> (Dunky und Niemz 2002).

Das Masonite- oder Dampfexplosionsverfahren erzeugt die Fasern durch plötzlichen Druckabfall (vergl. Abbildung 2.5). Durch Öffnen eines Ventils entspannt sich der aufgebaute Überdruck explosionsartig und separiert die zugeführten Hackspäne in Faserbündel und Fasern. Dabei hat die Randleibung der geschlitzten Ventilplatte einen wesentlichen Einfluss auf die Zerfaserung (Dunky und Niemz 2002). Durch die Entwicklung der kontinuierlich arbeitenden hydro-mechanischen Verfahren hat dieses Verfahren jedoch keine grosse Verbreitung in der industriellen Produktion.

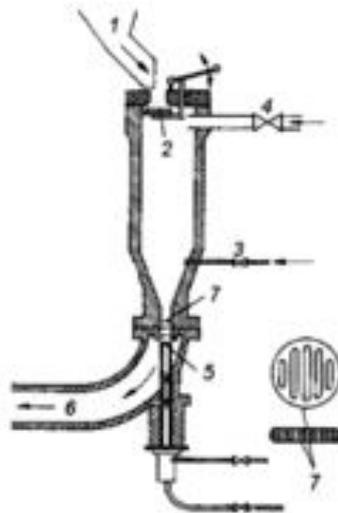


Abbildung 2.5: Masonite Verfahren (Dunky und Niemz 2002) (1) Hackschnitzelzuführung, (2) Einlassventil, (3) Dampfventil, (4) Hochdruckdampfventil, (5) Bodenventil, (6) Faserstoff-Transportleitung, (7) geschlitzte Platte

Zudem bestehen Verfahren des chemischen Holzaufschlusses, wie z.B. das Biffar-Verfahren oder das Sulfitverfahren, die für Holzfasernstoffe ebenfalls eine geringe industrielle Bedeutung haben. Zur Herstellung von Holzfasernstoffe werden zzt. vor allem Nadelhölzer eingesetzt. Ihre Hauptvorteile liegen in der guten Verfügbarkeit für die Industrie durch die Verwendung von Sägewerk-Resthölzern und die erzeugbare Faserqualität, die den fertigen Platten in Anbetracht der geringen Rohdichte eine hohe Festigkeit verleiht.

## 2.2 Faserplattenherstellung

Die Herstellung von Holzfasernplatten reicht weit in die Vergangenheit zurück. Bereits mit dem Beginn der Papierherstellung geht die Anwendung von sehr dicken, plattenförmigen Papiersorten als Wandverkleidung einher (Kollmann 1955). Die eigentliche Faserplattenindustrie entstand im 20. Jahrhundert. Im Jahr 1926 gründete W.H. Mason in den USA die Masonite Corporation, die den massgeblichen Teil der industriellen Entwicklung zur Holzfasernplattenherstellung beigetragen hat (Kollmann 1955). Die Entwicklung der Mason-Kanone ermög-

lichte die Verarbeitung von Hackschnitzeln zu Fasern, Faserbündeln und Faserbruchstücken. Durch anschliessendes Heisspressen ohne Bindemittelzusätze wurden die ersten Faserplatten aus Holzfasern hergestellt. 1931 wurde die kontinuierliche Zerfaserung oder Defibrierung von Hackschnitzeln unter Dampf und Druck bei 170-175 °C von Arne Asplund entwickelt und in einen industriellen Prozess überführt (Paulitsch 1989). Das Zerfasern von Holz oder anderen ligno-zellulosehaltigen Rohstoffen ist bis heute das Kernstück der Faserplattentechnologie.

Die ersten Produkttypen waren zunächst die im sogenannten Nassverfahren hergestellten Hartfaserplatten (Hardboard) sowie einfache Isolationsplatten. Holzfaserstoff wird dafür in beheizten Etagenpressen zu Platten mit einer Rohdichte von 750 kg/m<sup>3</sup> bis zu über 1000 kg/m<sup>3</sup> gepresst. Damit stellten sie damals den ersten homogenen, industriell hergestellten Holzwerkstoff dar. Je nach Herstellverfahren gibt es heute neben Hartfaserplatten auch mitteldichte Faserplatten (MDF), die fast ausschliesslich im sogenannten Trockenverfahren in kontinuierlichen Anlagen gefertigt werden und im Rohdichtebereich zwischen 400 kg/m<sup>3</sup> und 700 kg/m<sup>3</sup> liegen. Zudem werden poröse Faserplatten bis zu einer Rohdichte von ca. 230 kg/m<sup>3</sup> (Softboard) und Holzfaserdämmstoffe im Rohdichtebereich unterhalb von porösen Faserplatten hergestellt. Nach EN 316 (DIN-EN-316 2009) werden Holzfaserprodukte nach Rohdichteklassen unterschieden, die in Tabelle 2.1 aufgeführt sind:

Tabelle 2.1: Einteilung Faserplatten nach Rohdichten (DIN EN 316)

<b>Plattentyp</b>	<b>Bezeichnung</b>	<b>Rohdichte [kg/m<sup>3</sup>]</b>
poröse Platten	SB	230 - 400
mittelharte Platten geringer Dichte	MBL	400 - 560
mittelharte Platten hoher Dichte	MBH	560 - 900
harte Faserplatten	HB	über 900

Eine aktuelle Übersicht der Herstelltechnologien für Holzfaserdämmplatten ist in Abbildung 2.6 dargestellt.

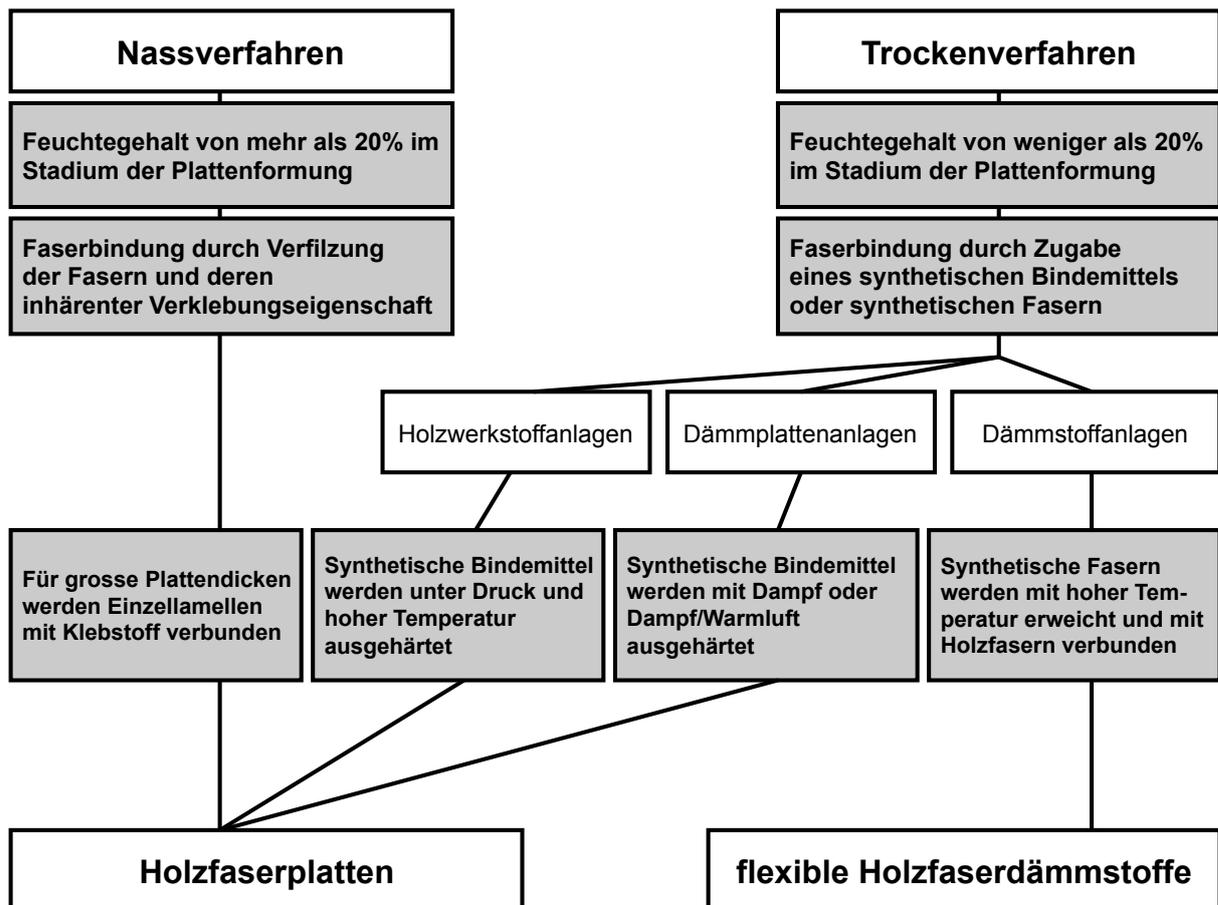


Abbildung 2.6: Übersicht Holzfaserdämmplattenherstellung

Nach DIN EN 316 werden die Herstellverfahren nach der massebezogenen Faserfeuchte zum Zeitpunkt der Vliesbildung unterschieden:

- Nassverfahren 20 % und mehr
- Trockenverfahren 10 bis 20 %
- (Halbtrockenverfahren) 12 bis 45 %

### 2.2.1 Plattenherstellung im Nassverfahren

Bei der Herstellung im sogenannten Nassverfahren werden die thermomechanisch aufgeschlossenen Fasern mit Wasser vermischt. Die Stoffsuspension wird anschliessend kontinuierlich auf einer Langsiebmaschine (vergl. Abbildung 2.7) entwässert und gleichzeitig zu einem Faservlies geformt (Lampert 1967). Dabei wird der Wassergehalt durch Schwerkraft, Unterdruck und Walzenpressen stark gesenkt. Die Entwässerungsgeschwindigkeit wird dabei beeinflusst durch die Fasergrösse (Mahlgrad) sowie die Temperatur der Stoffsuspension, da die Viskosität des Wassers mit steigender Temperatur abnimmt.

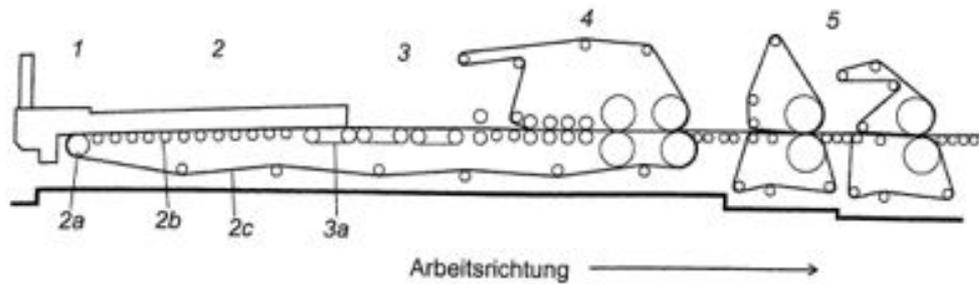


Abbildung 2.7: Langsiebmaschine (Autorenkollektiv 1988). (1) Stoffauflauf, (2) Registerpartie, (2a) Brustwalze, (2b) Rollenbahn, (2c) Langsieb, (3) Saugpartie, (3a) Sauger mit perforiertem Band/Tuch, (4) Gautschpartie (Vorpresse), (5) Presspartie (Walzenpresse)

Die Trockensubstanz der Faserstoffsuspension im Stoffauflauf liegt bei 2-4 %, nach der Formung und Sedimentierung auf der Langsiebmaschine besitzt das Faservlies einen Trockengehalt von 25-50 %. Die Temperatur der Suspension liegt bei 30-60 °C. Das anfallende Siebwasser kann wiederverwendet werden. Der Faserkuchen in einer Dicke von 2-35 mm wird dann in Mehretagen- oder Einetagentrocknern bei 150-170 °C (max. 250 °C) auf eine Plattenfeuchte von 3-8 % (Trockengehalt 92-97 %) getrocknet. Zugegebene Bindemittel werden ebenfalls im Trockner gehärtet. Anschließend wird die Faserplatte auf Format geschnitten, profiliert und für größere Dämmplattendicken schichtverklebt. Für spezielle Plattentypen können auch unterschiedliche Platten miteinander kombiniert oder funktionale Schichten eingefügt werden. Im Nassverfahren können aktuell Holzfasерplatten im Rohdichtebereich von ca. 110-300 kg/m<sup>3</sup> produziert werden.

Bei der Vliesbildung im Nassverfahren strebt man eine starke Faserfibrillierung mit maximaler Oberflächenaktivität der Fasern an. Durch den Aufschlussprozess kann die Faseroberfläche so weit vergrößert werden, dass beim späteren Trocknen des Faserkuchens die holzeigenen Bindekräfte (vor allem Lignin) und die Bildung von Wasserstoffbrückenbindungen an den Carboxygruppen der Cellulose zur inhärenten Festigkeit beitragen. Zusätzlich verankern sich die Fasern bei der Formung und Entwässerung mechanisch untereinander, was zu einer Verfilzung der Faserstruktur führt (Lampert 1967).

Die Zugabe von Klebstoffen ist nicht notwendig, kann jedoch erfolgen, um die Festigkeitseigenschaften zusätzlich zu erhöhen. Weitere Zusätze, z.B. Hydrophobierungsmittel, können hinzugegeben werden, um besondere Eigenschaften zu erzielen oder zu verbessern. Abbildung 2.8 zeigt das Verfahren in schematischer Darstellung (Pavatex 2012).

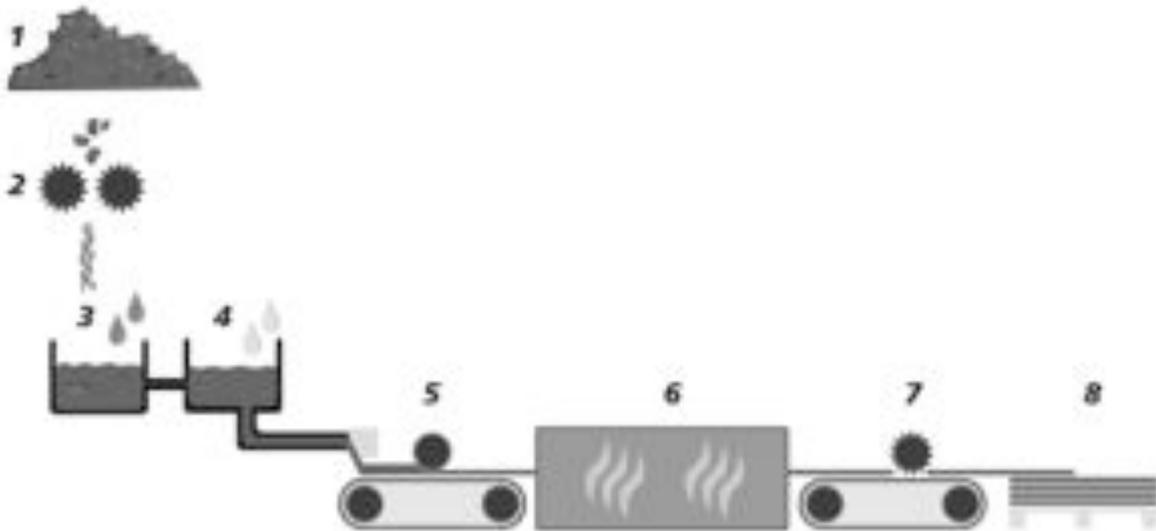


Abbildung 2.8: Holzfaserdämmstoffherstellung im Nassverfahren. Schematische Darstellung (Pavatex 2012). (1) Rohmaterial (Hackgut), (2) Zerkleinerung, (3) Stoffsuspension, (4) Zugabe von Hilfsstoffen (Bindemittel), (5) Entwässerung und Formung (Langsiebmaschine), (6) Trocknung, (7) Endbearbeitung (Lagenverklebung, Zuschnitt, Profilierung), (8) Verpackung

### 2.2.2 Plattenherstellung im Trockenverfahren

Zur Herstellung im Trockenverfahren werden die Fasern direkt nach dem Aufschlussprozess auf die Restfeuchte getrocknet (Lempfer und Berns 2013). Das erfolgt im heißen Luftstrom (Lufttemperatur bei Trocknereingang bis 180 °C) und benötigt aufgrund der grossen Faser-oberfläche nur kurze Zeit. Die Verweildauer der Fasern in der Trocknungsphase (Rohrtrockner) beträgt je nach Anlagenkapazität 3-5 Sekunden. Anschliessend werden die Fasern vom Luftgemisch getrennt. Bindemittel und Zusätze werden entweder direkt im Zerkleinerungsprozess vor dem Trocknungsstrom (Blow-Line) oder nach der Trocknung (Ringmischer) zugegeben. Dabei kommen herkömmliche Klebstoffe der Holzwerkstoffindustrie (Urea-, Melamin- und Phenolharze sowie Isocyanate) zum Einsatz (Dunky und Niemz 2002). Mit den beleimten Fasern wird ein Vlies hergestellt. Danach erfolgt die Kalibrierung auf die später gewünschte Plattendicke, anschliessend wird der Klebstoff zur Aushärtung gebracht. Da Fasern im Gegensatz zu Spänen nicht rieselfähig sind, kommt der Vliesbildung eine wesentliche Bedeutung innerhalb der Plattenherstellung zu. Es bestehen einerseits pneumatische Systeme (Feltersysteme, vergl. Abbildung 2.9), andererseits rein mechanische Systeme (vergl. Abbildung 2.10), die zzt. industriell mehrheitlich zum Einsatz kommen. Nach der Vliesbildung erfolgt die Aushärtung des Bindemittels, anschliessend werden die Rohplatten konfektioniert.

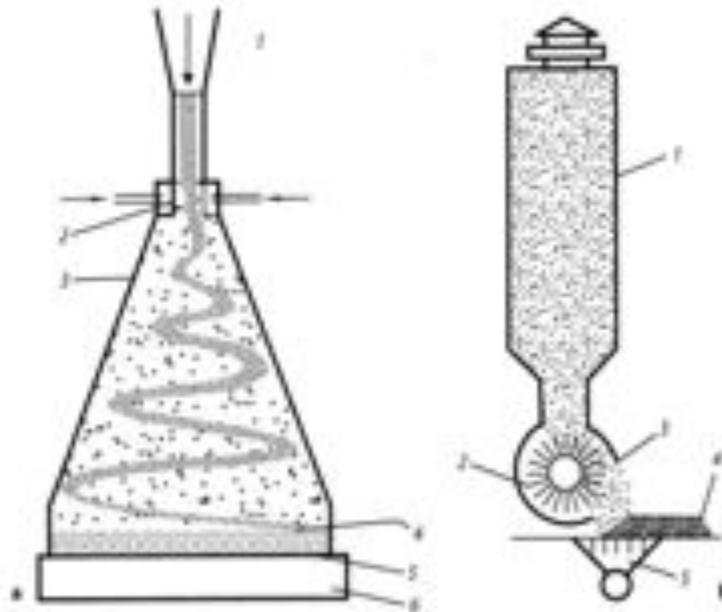


Abbildung 2.9: Pneumatische Vliesbildung (Autorenkollektiv 1988)

a) Pendistor (Fa. Fläkt), (1) Faserzuführung mit Luftstrom, (2) Blaskästen mit Steuerluftstrahl, (3) Faserstoff, (4) Faservlies, (5) Langsieb, (6) Saugkasten  
 b) Felter nach Weyerhäuser, (1) Felterschicht für Faserstoff, (2) Bürstenwalze, (3) Metallsieb, (4) Faservlies, (5) Absaugung

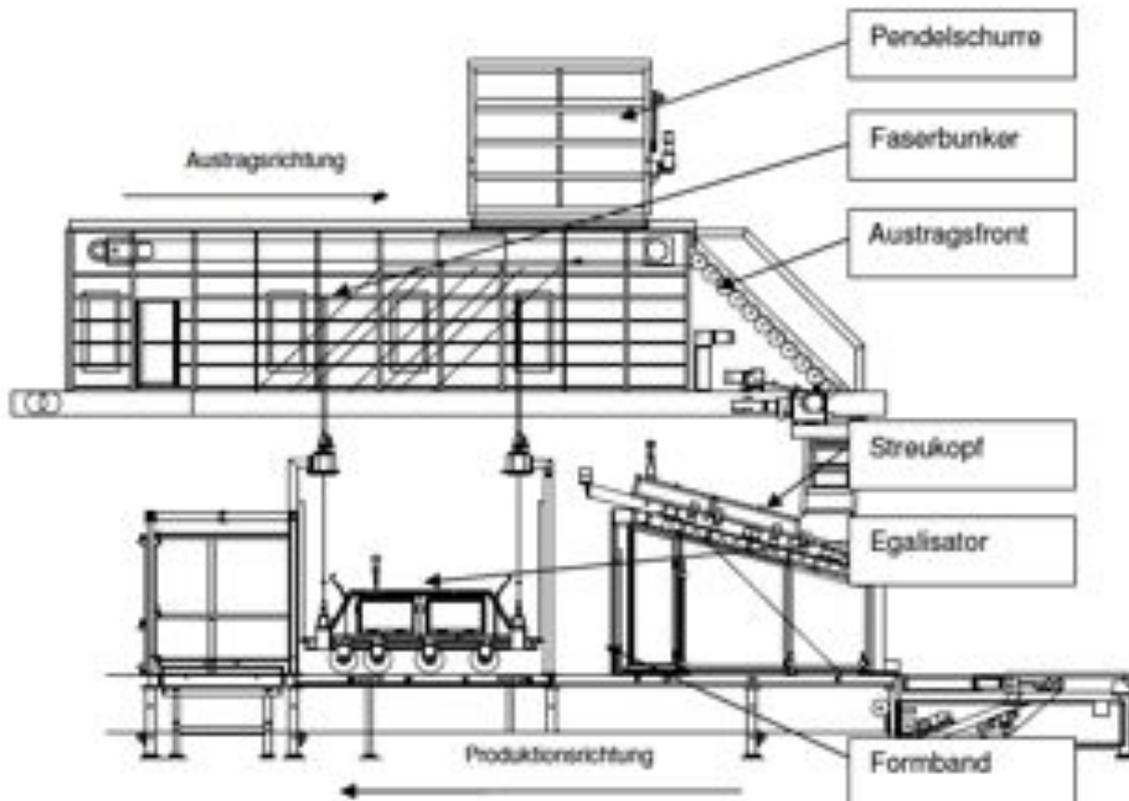


Abbildung 2.10: Mechanische Vliesbildung (Lempfer und Berns 2013)

Die Produktionstechnologie im Trockenverfahren wurde differenziert weiterentwickelt. Derzeit bestehen für die Herstellung von Holzfaserverprodukten folgende Varianten:

### **Herstellung auf Holzwerkstoffanlagen**

Kontinuierliche oder etagenweise arbeitende Pressenanlagen die vornehmlich in der Holzwerkstoffindustrie zum Einsatz kommen, fertigen auch sogenannte bautechnische MDF-Platten. Dabei handelt es sich um MDF-Produkte mit niedriger Rohdichte bis zu einem derzeitigen Minimum von ca.  $190 \text{ kg/m}^3$  und poröser Plattenstruktur. Durch geeignete Zusätze wie etwa Hydrophobierungsmittel oder Brandschutzmittel werden die Platten für den Einsatz im Baubereich ausgerüstet. Aktuell können auf bestehenden Anlagen Plattendicken bis ca. 120 mm produziert werden.

### **Herstellung auf speziellen Trockenanlagen**

Auf neuartigen Trockenanlagen, speziell für poröse Holzfaserplatten, wird der Faserkuchen aus beleimten Fasern in einer Reaktionszone mit Dampf, heisser Luft oder einem Gemisch aus beidem durchströmt um das Bindemittel auszuhärten. Es kommen Bindemittel mit einer niedrigen Reaktionstemperatur ab ca.  $70^\circ \text{C}$  zum Einsatz. Anschliessend können die Platten nach einer Auskühlphase direkt konfektioniert werden. Aktuell können mit derartigen Anlagen plattenförmige Produkte mit einer Rohdichte von minimal  $80 \text{ kg/m}^3$  und einer Dicke von maximal 300 mm hergestellt werden. Abbildung 2.11 zeigt das Verfahren schematisch.



Abbildung 2.11: Holzfaserdämmstoffherstellung auf speziellen Trockenanlagen. Schematische Darstellung (Pavatex 2012). (1) Rohmaterial (Hackgut), (2) Zerkaserung, (3) Faserstofftrocknung, (4) Faserstoffbeleimung, (5) Vliesbildung, (6) Aushärtung, (7) Endbearbeitung (Zuschnitt, Profilierung) und Verpackung

### **Herstellung von flexiblen Holzfaserdämmstoffen**

Bei der Herstellung von flexiblen Holzfaserdämmstoffen im Trockenverfahren werden nach der Faser Trocknung Kunstfasern (Polyolefine) beigemischt. Aktuell sind Beimischungen von 6-9 % (massebezogen) üblich. Anschliessend wird die Mischung über eine Formstraße zu einem endlosen Strang geformt, der einem Durchströmungstrockner zugeführt wird. Im

Trockner kommt es bei Trocknungstemperaturen von 70-180 °C zur Vernetzung des Faser- gemischs durch Erweichen der äusseren Materialsichten der Zweikomponenten- Kunstfasern. Aktuell können mit solchen Anlagen Rohdichten von ca. 40-120 kg/m<sup>3</sup> herge- stellt werden.

### **2.2.3 Zusatzstoffe**

Holzfasernplatten werden nicht nur für Produkte im Innenausbau und Möbelbau eingesetzt, sie finden auch Anwendung im Hochbau für die Gebäudehülle als Dämmung und als nicht- tragende Platten. Daraus ergeben sich unterschiedliche Anforderungen an die Produkteigen- schaften, die zum Teil nur durch zusätzliche Stoffe (Kleber, Hilfsstoffe, Oberflächenbehand- lungen etc.) erfüllt werden können. Zum Einsatz kommen:

- Klebstoffe zur Erhöhung der mechanischen Festigkeit und zur Verklebung von Platten- lagen
- Thermoplastische Bindefasern zur Vernetzung der Fasern
- Hydrophobierungsmittel zum Schutz vor Feuchteschäden und für die Wasserdichtigkeit
- Oberflächenbeschichtungen zur Erhöhung der Haftfestigkeit für weitere Beschichtun- gen oder zur Oberflächenverfestigung
- Holzschutzmittel gegen Insekten und Pilzbefall
- Brandhemmende Stoffe zur Erreichung erhöhter Brandklassen
- Hilfsstoffe

### ***Klebstoffe***

Klebstoffe werden im Nass- und Trockenverfahren eingesetzt. Abbildung 2.12 zeigt eine Übersicht gängiger Klebstoffe für Holzwerkstoffe.

Typ	Spanplatte P1 - P7	Faserplatte HB	MDF	Sperrholz PLW	Konstruktionsvollholz HLB	MH	Furnier	Möbel
UF	x		x	x	(x)	x	x <sup>a</sup>	x <sup>a</sup>
mUF	x <sup>b</sup>		x					
MF/MUF	x <sup>c</sup>		x	x	x	x		
MUPF	x		x	x				
PF/P	x	x	x	x				
RF					x			
PMDI	x		x		x			
PVAc		x <sup>d</sup>				x	x	x
hist.nat.BM								x
nat.BM	x		x	x				
anorg.BM	x	x <sup>d</sup>	x <sup>e</sup>					
Aktivierung		x	x					
UF : Harnstoff-Formaldehyd-Leimharz mUF : melaminverstärkte UF-Leime MF/MUF : Melamin- bzw. Melamin-Harnstoff-Formaldehyd-Leimharz; der Einsatz von MF-Harzen ist nur bei Absichtung mit UF-Harzen gegeben MUPF : Melamin-Harnstoff-Phenol-Formaldehyd-Leimharz PF/P : Phenol- bzw. Phenol-Harnstoff-Formaldehyd-Leimharz RF : Resorcin-(Phenol-)Formaldehyd-Leimharz PMDI : Polymethylen-diisocyanat PVAc : Polyvinylacetatleim hist.nat.BM : historische, natürliche Bindemittel, z.B. Stärke-, Glutin- oder Kaseinleime nat.BM : neuere, natürliche Bindemittel (Tannin, Lignin, Kohlehydrate) anorg.BM : anorganische Bindemittel: Zement, Gips Aktivierung : Aktivierung holzeigener Bindemittel								
P1-7 : Spanplatten nach EN 312 HB : Hartfaserplatte nach EN 622-2 MDF : Mitteldichte Faserplatte nach EN 622-5; je nach Plattenart und Einsatzbereich werden unterschiedliche Bindemittel eingesetzt PLW : Sperrholz nach EN 636; die Bindemittelauswahl richtet sich je nach Klasse der Wasserfestigkeit HLB : konstruktiver Holzleimbau MH : Massivholzplatten nach ÖNORM B 3021 bis B 3023 Furnierung : Furnierung bzw. Kaschierung von Spanplatten Möbel : Möbelherstellung								

Abbildung 2.12: Übersicht der Einsatzgebiete verschiedener Bindemittel für Holzwerkstoffe aus (Dunky und Niemz 2002) ergänzt durch (DIN-EN-312 2010) für Spanplatten und eigene Angaben für Faserplatten. (a) Teilweise Pulverleime, (b) Platten mit reduzierter Dickenquellung, (c) nur als MUF+PMDI möglich, (d) zur Verklebung einzelner Plattenschichten, (e) spezielle Herstellverfahren

Dadurch, dass beim Nassverfahren das Bindemittel in die wässrige Phase (Stoffsuspension) dosiert wird, werden Kleber aus der Papier- und Kartonherstellung in geringen Mengen (1-5 %) verwendet. Zum Einsatz gelangen Phenolharze und künstliches Latex (Styrol-Butadiencopolymer) sowie noch vereinzelt Bitumen (Hartbitumen), die als wässrige Dispersionen oder Emulsionen der Stoffsuspension zugegeben werden. Die Verklebung erfolgt durch Hitzeeinwirkung und Feuchtigkeitsentzug während der Trocknung. Zudem werden Bindemittel auf natürlicher Basis eingesetzt (z.B. modifizierte Weizenstärke).

Beim Trockenverfahren wird in der Regel Harnstoffharz als Klebstoff eingesetzt. Mineralische Bindemittel können auch eingesetzt werden, so hat z.B. Scheiding den Einsatz von Wasserglas zur Herstellung von Holzfaserverplatten untersucht (Scheiding 1998). Teilweise kommen auch Melamin- oder Phenolharze zum Einsatz. Isocyanate finden vor allem in den zuvor beschriebenen, speziellen Trockenanlagen Anwendung, da sie aufgrund ihrer niedrigen Reaktionstemperatur in den Aushärteeinheiten vorteilhaft eingesetzt werden können. Weitere Vorteile bieten das sehr gute Benetzungsverhalten und das gute Eindringvermögen in die Faseroberfläche (Dunky und Niemz 2002), was zum effektivem Einsatz des Bindemittels führt (3-5 %). Untersuchungen neueren Datums zeigten darüber hinaus auf, dass Enzyme zur Aktivierung der holzeigenen Bindekräfte für die Herstellung von Holzfaserdämmplatten im Labormassstab geeignet sein können (Euring 2008).

### ***Bindefasern***

Flexible Holzfaserdämmstoffe enthalten zusätzliche Fasern einerseits zur Vernetzung, andererseits zur Verstärkung der Fasermatrix. Für die Verklebung der Fasermatrix werden Zweikomponenten-Kunstfasern eingesetzt, deren äussere Hülle im Herstellprozess thermisch aktiviert wird. Aktuell werden 6–9 Masseprozent zugegeben. Natürliche Fasern (Hanf, Flachs etc.) können zur Verbesserung der Dämmstoffeigenschaften zugegeben werden.

### ***Hydrophobierungsmittel***

Als Hydrophobierungsmittel zum Schutz vor Feuchteschäden und für ausreichende Wasserdichtigkeit werden Paraffine (0,2-2 %) eingesetzt. Vereinzelt kommen auch Silikone zum Einsatz. Die Dosierstellen liegen entweder direkt bei der Zerkleinerung (Mahlgehäuse oder Förderschnecke) oder in der Stoffsuspension (Nassverfahren) bzw. nach der Fasertrocknung (Trockenverfahren).

### ***Holzschutzmittel***

Als Holzschutzmittel werden verschiedene Präparate mit fungizider und insektizider Wirkung in Anteilen von 0,5-4 % bezogen auf die Trockenmasse eingesetzt.

### ***Brandhemmende Stoffe***

Als Flammenschutzmittel für Holzfaserdämmstoffe kommen meist Ammoniumsalze starker Säuren zum Einsatz. Der für die Erreichung bestimmter Brandklassen erforderliche Anteil liegt gemäss Herstellerangaben bei 8-20 Masse %.

### ***Hilfsstoffe***

Als Hilfsstoffe dienen vor allem Materialien innerhalb des Herstellprozesses. Während im Nassverfahren Materialien zur Steuerung der chemischen Abläufe im Prozesswasserkreislauf zum Einsatz kommen (Natriumhydroxid zur Steuerung des pH-Wertes, Aluminiumsulfat zur Flockung der Stoffsuspension, Polymere zur Flockung der Stoffsuspension, Trennmittel für Siebbänder), werden im Trockenverfahren v.a. Trennmittel (anionische Tenside) verwendet, um die Verschmutzung der Transport- und Siebbänder zu minimieren.

## **2.3 Produkte und Anwendungsgebiete**

Aktuell kommen Holzfaserplatten neben den üblichen Anwendungen im Innenausbau und Möbelbau in den Teilen Dach, Wand und Boden der Gebäudehülle zum Einsatz (vergl. Abbildung 2.13). Teilweise bestehen je nach Hersteller Spezialprodukte für besondere Anwen-

dungsbereiche wie beispielsweise hochdruckfeste Platten für die Anwendung unter Gussasphalt (Bergmann 2003).



Abbildung 2.13: typische Anwendungsgebiete von Holzfaserdämmplatten (Pavatex 2014). (1) Aufsparrendämmung, (2) Unterdeckplatten bzw. Dämmplatten für vorgehängte Fassaden, (3) Zwischensparrendämmung bzw. Holzrahmendämmung, (4) Luft- und Körperschalldämmung im Boden, (5) raumseitige Dämmung von Aussenwänden, (6) Dämmplatten für Wärmedämmverbundsysteme, (7) Flachdachdämmung

Während direkt nach der industriellen Umsetzung der Faserplattentechnologie ab 1910 zunächst mehrheitlich harte Platten im Möbel-, Karosserie- und Waggonbau verwendet wurden, verzeichneten kurz darauf auch poröse Faserplatten starken Zuwachs. Schon 1948 wurden Holzfaserplatten als Isoliermaterial in der Baustoffliteratur genannt (Schaffner 1948) und bereits 1951 entfiel etwa die Hälfte der installierten Produktionskapazität in Höhe von etwa 2,2 Millionen Tonnen auf poröse Faserplatten bzw. Isolierplatten (Kollmann 1955). Ab Mitte des zwanzigsten Jahrhunderts lagen Standardwerke zur Verwendung von Holzfaserplatten im Bauwesen (Poniatowski, Wierzbicki et al. 1959) und (Zollinger 1954) bzw. deren Handhabung (Zollinger 1955) vor.

Heute sind poröse Faserplatten in den wesentlichen nationalen, europäischen und internationalen Produktnormen enthalten und geregelt. Während EN 316 (DIN-EN-316 2009) die Produktion und die Einteilung der Herstelltechnologie beinhaltet, legt EN 622-4 (DIN-EN-622-4 2010) die Mindestanforderungen in Abhängigkeit der Anwendungsarten fest. Für werkmäßig hergestellte Dämmstoffe aus Holzfasern regelt die Dämmstoffnorm EN 13171 (DIN-EN-13171 2012) Mindestanforderungen, die Prüfnormen und Kennzeichnungsvorgaben. Damit gliedern sich Holzfaserprodukte gleichwertig in die Reihe der herkömmlichen Dämmstoffe

wie z.B. Mineralfaserdämmstoffe oder Polystyrol­dämmstoffe ein. In zahlreichen Ländern bestehen zudem nationale Anwendungsnormen mit Mindestanforderungen für Holz­faserplatten. Abbildung 2.14 zeigt beispielhaft die Mindestanforderungen für Holz­faserplatten in Deutschland gemäss DIN 4108-10 (DIN-4108-10 2008).

Anwendungsgebiet	Kurzzeichen	Bezeichnungsschlüssel									
		Grenzabmasse für Dicke	Dimensionsstabilität bei definierten Temperatur- und Feuchtebedingungen	Druckspannung oder Druckfestigkeit	Zugefestigkeit senkrecht zur Plattenebe	Wasseraufnahme bei kurzzeitigem teilweisen Eintauchen	Dynamische Steifigkeit	Zusammen­drückbarkeit	Längenbezogener Strömungs­widerstand		
		$T_i$	$DS(TH)_i$	$CS(10/Y)_i$	$Tr_i$	$W_{s_i}$	$Sd_i$	$CP_i$	$AFr_i$		
Dach, Decke	DAD	dk	T2	-	-	-	-	-	-	AFr5	
		dg	T2	-	CS(10/Y)10	-	-	-	-	AFr5	
		dm	T3	-	CS(10/Y)20	-	-	-	-	-	
		ds	T3	-	CS(10/Y)100	-	WS2.0	-	-	-	
	DAA	dh	T3	DS(70,-)2	CS(10/Y)70	TR7.5	WS1.0	-	-	-	
		ds	T3	DS(70,-)2	CS(10/Y)100	TR7.5	WS1.0	-	-	-	
	DUK		keine genormte Anwendung								
	DI	DZ	dk	T2	-	-	-	-	-	-	AFr5
			zg	T3	-	CS(10/Y)20	TR2.5	-	-	-	AFr5
		DEO	dg	T2	-	CS(10/Y)10	-	-	-	-	-
			dm	T3	-	CS(10/Y)20	-	-	-	-	-
			ds	T4	-	CS(10/Y)100	-	-	-	-	-
		DES	sh	T5	-	-	-	-	≤SD50	CP5	-
			sg	T6	-	-	-	-	≤SD50	CP2	-
	Wand	WAB	dk	T2	-	-	-	WS2.0	-	-	AFr5
dg			T2	-	CS(10/Y)10	-	WS2.0	-	-	AFr5	
dm			T3	-	CS(10/Y)20	-	WS2.0	-	-	-	
ds			T3	-	CS(10/Y)100	-	WS2.0	-	-	-	
WAA		keine genormte Anwendung									

Abbildung 2.14: Mindestanforderungen für Holz­faserplatten nach DIN 4108-10 (Tabelle auszugsweise dargestellt)

Zudem besteht eine Informationsschrift des Verbandes-Holz­faser­dämmstoffe zum Stand der Technik mit Eigenschaften, Anforderungen und Anwendung von Holz­faser­dämmstoffen (Förster 2007).

## 2.4 Hygrothermische Einflussgrößen

Wärmeübertragung und –speicherung sowie Wasseraufnahme und -transport sind wesentliche Einflussgrößen für Holz­faser­dämmstoffe. Sie entstehen als Folge von Temperaturunterschieden an der Gebäudehülle und sind abhängig von der Struktur des Holzes bzw. der Holzfasern und der Zeit. Die Übertragungsvorgänge unterscheiden sich zudem bei festen, flüssigen oder gasförmigen Medien. Holz­faser­platten bestehen strukturell betrachtet aus Fasern unterschiedlicher Form, Grösse und Anordnung sowie Hohlräumen in unterschiedlicher Ausprägung und Grösse. Dadurch entstehen zahlreiche Übergangs- und Grenzflächenvorgänge innerhalb des Dämmstoffsystems.

### 2.4.1 Wärmetransport

Wärmeenergie ist die Energie, die molekular in der Materie enthalten ist. Wärmetransport ist die Übertragung der Energie zwischen Stoffen, die sich direkt berühren. Die Energie wird dabei durch die Schwingungen der Atome übertragen (Wesche 1996). Dämmstoffe sind inhomogene, stark poröse Materialien mit luft- oder gasgefüllten Hohlräumen, die Wärmeüber-

tragungen stark verringern. Der Transport von Wärmeenergie verläuft stets in Richtung des Temperaturgradienten und erfolgt durch drei unterschiedliche Übertragungsformen:

- Wärmeleitung
- Wärmestrahlung
- Konvektion

### **Wärmeleitung**

Wärmeleitung erfolgt unmittelbar zwischen benachbarten Molekülen und ist damit abhängig von der Materialstruktur. Feste und massive Stoffe besitzen ein sehr dichtes Gefüge und leiten Wärme sehr gut. Poröse Stoffe mit geringer Rohdichte leiten Wärme schlechter weiter (Wesche 1996). Die Wärmeleitung eines Stoffes ist definiert durch die Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$   $W/(m \cdot K)$ . Die Wärmeleitfähigkeit ist der Wärmestrom  $\Phi$ , der durch einen Würfel mit 1 m Kantenlänge bei einem Temperaturunterschied von 1K in einer Stunde fließt (Wesche 1996). Bei der vereinfachten Betrachtung der Wärmeleitung durch einschichtige Bauteile berechnet sich die Wärmeleitfähigkeit nach (2.1):

$$Q = \frac{A \cdot t}{d \cdot \lambda} (\Theta_1 - \Theta_2) \quad (2.1)$$

mit:

$Q$ = transportierte Wärmemenge	[J]
$A$ = Querschnittsfläche	[m <sup>2</sup> ]
$t$ = Zeit	[s]
$d$ = Schichtdicke	[m]
$\lambda$ = Wärmeleitfähigkeit	[W/(mK)]
$\Theta$ = Temperatur	[°C]

Abbildung 2.15 zeigt eine Übersicht der Wärmeleitfähigkeit ausgewählter Baustoffe in Abhängigkeit der Rohdichte (Porosität).

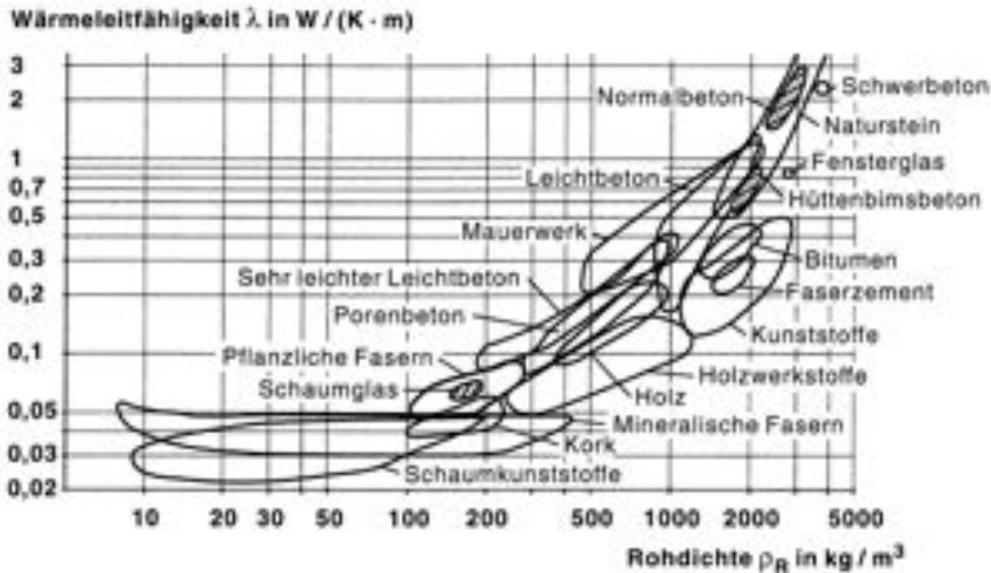


Abbildung 2.15: Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  in Abhängigkeit der Rohdichte für ausgewählte Baustoffe (Wesche 1996)

Bei porösen, mineralischen Baustoffen wird die Wärmeleitfähigkeit durch den Anteil an Volumeneinschlüssen (Poren) und deren Grösse stark beeinflusst (vergl. Abbildung 2.16)

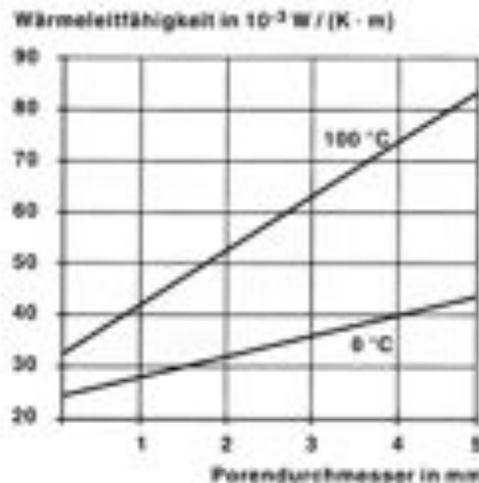


Abbildung 2.16: Abhängigkeit der Porenluft-Wärmeleitfähigkeit von Porendurchmesser und Temperatur bei mineralischen Dämmstoffen (Wesche 1996)

Mit zunehmender Porosität (Porenanteil) sinkt die Wärmeleitfähigkeit, da die Wärmeleitfähigkeit von Gasen deutlich geringer ist als die von festen oder flüssigen Stoffen. Die Wärmeleitfähigkeit von Luft liegt unter Normalbedingungen (20 °C) bei 0,026 W/(mK) (Kuchling 2004). Im Gegenzug steigt mit zunehmendem Porenanteil die Hygroskopizität und damit steigt wiederum die Wärmeleitfähigkeit. Dieser Zusammenhang wurde bereits durch Kollmann für Holzfaserplatten aufgezeigt. Er ermittelte für Holzfaserplatten einen Anstieg der Wärmeleitfähigkeit von 1,15 % je Gewichtsprozent Wassergehalt (Kollmann 1955). Auch neuere Untersuchungen, z.B. von Sonderegger, haben das bestätigt (Sonderegger und Niemz 2009).

Abbildung 2.17 zeigt die Wärmeleitfähigkeit einer Holzfaserplatte in Abhängigkeit des Feuchtegehaltes anhand neuerer Untersuchungen.

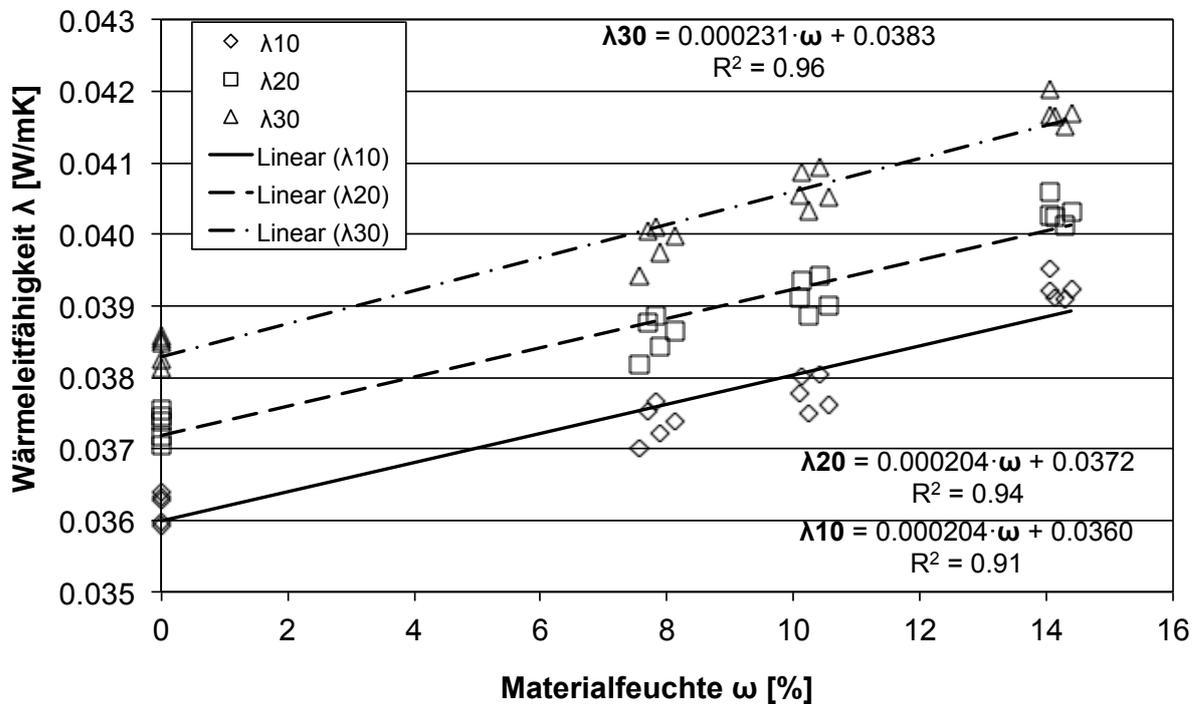


Abbildung 2.17: Wärmeleitfähigkeit einer Holzfaserplatte ( $130 \text{ kg/m}^3$ ) in Abhängigkeit von der Feuchte (Sonderegger und Niemz 2012)

Bei allen Faserdämmstoffen ist die Wärmeleitfähigkeit zudem sehr stark abhängig von der Faserstruktur und deren Orientierung. Für Holzfasern kann angenommen werden, dass die gleichen Abhängigkeiten wie bei Holz gelten. Durch die nicht ausgerichtete Anordnung der Fasern im Plattenverbund wird die Richtungsabhängigkeit jedoch stark abgeschwächt. Abbildung 2.18 veranschaulicht die Wärmeleitfähigkeit für Vollholz, Holzwolle-Leichtbauplatten und Faserplatten in Abhängigkeit der Rohdichte und für Vollholz zusätzlich in Abhängigkeit der Faserrichtung.

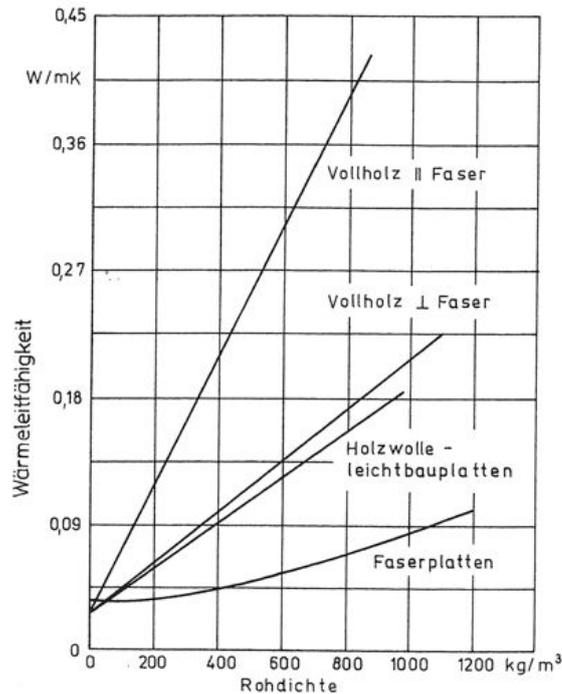


Abbildung 2.18: Wärmeleitfähigkeit von Faser- und Holzwolleplatten senkrecht zur Plattenebene im Vergleich zu Vollholz und Holzwolle-Leichtbauplatten (Nach Kollmann und Malmquist in (Niemz 1993)).

Die Wärmeübertragung bei Vollholz parallel zur Faserrichtung ist im unteren Rohdichtebe-  
reich (bis 200 kg/m<sup>3</sup>) nach Niemz (Niemz 1993) etwas doppelt so gross wie senkrecht zur  
Faserrichtung. Bei Faserplatten ist die Wärmeleitfähigkeit senkrecht zur Plattenebene bis zu  
diesem Rohdichtebereich nahezu konstant und steigt ab ca. 400 kg/m<sup>3</sup> an.

### Wärmestrahlung

Die elektromagnetische Strahlung, die ein Körper abgibt, wird als Wärmestrahlung bezeich-  
net. Sie ist abhängig von der Temperatur und der Oberflächenbeschaffenheit des Körpers.  
Wärmestrahlung ist nicht an Materie gebunden (Lutz, Jenisch et al. 2002). Jeder Körper  
nimmt aus der Umgebung Strahlung auf (Absorption) und gibt Strahlung an seine Umgebung  
ab (Emission) (Hohmann, Setzer et al. 2004). Die Strahlung, die an der Oberfläche auftritt,  
wird entweder reflektiert, absorbiert oder durchgelassen. Dabei bestehen folgende Zusam-  
menhänge:

- Reflexionsgrad:  $\rho = \frac{\text{reflektierte Strahlung}}{\text{auftreffende Strahlung}}$
- Absorptionsgrad:  $\alpha = \frac{\text{absorbierte Strahlung}}{\text{auftreffende Strahlung}}$
- Transmissionsgrad:  $\tau = \frac{\text{durchgelassene Strahlung}}{\text{auftreffende Strahlung}}$

Die von einem Körper ausgestrahlte Energie wird stets in das Verhältnis zur Abstrahlung eines Körpers gesetzt, der bei der Temperatur T die höchstmögliche Energiemenge abstrahlt („schwarzer Strahler“). Die spektrale, spezifische Ausstrahlung eines schwarzen Strahlers ist nach (2.2) durch das Planck'sche Strahlungsgesetz gegeben:

$$M = c_1 \cdot \frac{\lambda^{-5}}{\left(\exp\frac{c_2}{\lambda T} - 1\right)} \quad (2.2)$$

mit:

$M$ = spektrale spezifische Ausstrahlung		$[W/m^3]$
$c_1$ = 1. Planck'sche Strahlungskonstante	$= 2 \cdot \pi \cdot c^2 \cdot h = 3,7415 \cdot 10^{-16}$	$[W/m^2]$
$c_2$ = 2. Planck'sche Strahlungskonstante	$= c \cdot \frac{h}{k} = 1,4388 \cdot 10^{-2}$	$[mK]$
$c$ = Lichtgeschwindigkeit im Vakuum	$= 2,9979 \cdot 10^8$	$[m/s]$
$h$ = Planck'sches Wirkungsquantum	$= 6,625 \cdot 10^{-34}$	$[Js]$
$k$ = Boltzmann-Konstante	$= 1,3805 \cdot 10^{-23}$	$[J/K]$
$\lambda$ = Wellenlänge		$[m]$
$T$ = Temperatur		$[K]$

Die spektrale spezifische Ausstrahlung ist temperaturabhängig, zudem ist sie nicht gleichmässig auf alle Wellenlängen der Strahlung verteilt. Sie steigt von kleinen Wellenlängen ausgehend mit zunehmender Wellenlänge an, um dann wieder abzunehmen (vergl. Abbildung 2.19).

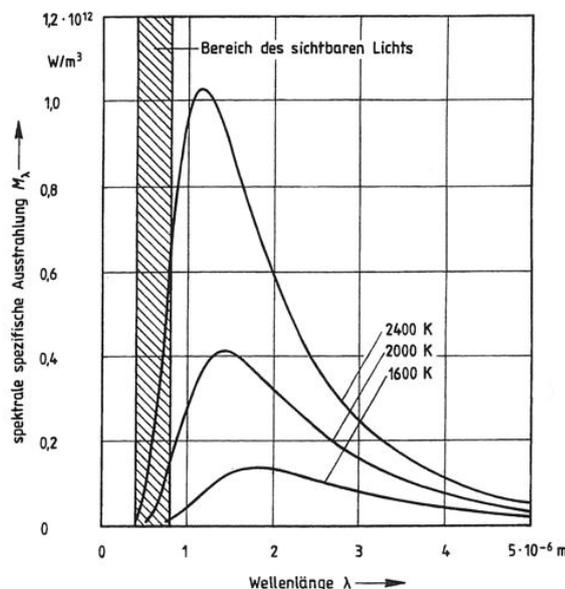


Abbildung 2.19: Spektrale spezifische Ausstrahlung der Strahlung des schwarzen Strahlers nach dem Planck'schen Gesetz (Lutz, Jenisch et al. 2002).

Für die Gesamtemission ist die Fläche unter dem Kurvenverlauf bestimmend. Durch das Stefan-Boltzmann'sche Gesetz der Gesamtstrahlung ergibt sich nach (2.3):

$$M_S = C_S \cdot \left(\frac{T}{100}\right)^4 \quad (2.3)$$

mit:

$$\begin{aligned} C_S &= \text{Strahlungskonstante des Schwarzen Strahlers} &= \sigma \cdot 10^8 & \quad [\text{W}/(\text{m}^2\text{K}^4)] \\ \sigma &= \text{Stefan-Boltzmann-Konstante} &= 5,6698 \cdot 10^{-8} & \quad [\text{W}/(\text{m}^2\text{K}^4)] \\ T &= \text{absolute Temperatur} &= 273,15 + \Theta [^\circ\text{C}] & \quad [\text{K}] \end{aligned}$$

Das Verhältnis des Emissionsverhaltens eines realen Körpers zu der eines schwarzen Körpers ist nach (2.4) dessen Emissionsgrad  $\varepsilon$  :

$$\varepsilon = \frac{C}{C_S} \quad (2.4)$$

mit:

$$\begin{aligned} C_S &= \text{Strahlungskonstante des schwarzen Körpers} &= 5,67 & \quad [\text{W}/(\text{m}^2\text{K}^4)] \\ C &= \text{Strahlungskonstante eines beliebigen Körpers} &= \varepsilon \cdot C_S & \quad [\text{W}/(\text{m}^2\text{K}^4)] \end{aligned}$$

In Tabelle 2.2 sind Emissionsgrade unterschiedlicher Materialien exemplarisch aufgeführt.

Tabelle 2.2: Emissionsgrad verschiedener Oberflächen (nach E.Schmidt, Eckert und Reinders in (Lutz, Jenisch et al. 2002))

Oberfläche	Emissionsgrad
Silber, poliert	0,03
Kupfer, poliert	0,04
Kupfer, schwarz oxydiert	0,82
Aluminium, walzblank	0,05
Eisen, blank geätzt	0,16
Eisen, geschmirlgelt	0,26
Eisen, stark korrodiert	0,85
Glas	0,88
Linoleum	0,88
Papier	0,89
Holz	0,91
Mörtel, Putz, Beton	0,93
Ziegel	0,93
Dachpappe	0,93
Aluminiumbronzeanstrich	0,40
Ölfarbenanstrich, schwarz, matt	0,97
Ölfarbenanstrich, schwarz, glänzend	0,88
Ölfarbenanstrich, weiss	0,89
Heizkörperlack	0,93

In der Praxis sind stets mehrere Körper mit Ihrer unterschiedlichen Oberflächentemperatur durch Wärmestrahlung im Austausch. Neben der Geometrie bestimmt auch die Lage der Körper zueinander den Austausch. Vereinfacht kann der Wärmestrom durch Strahlung zwischen zwei parallelen, gleich grossen, ebenen Flächen nach (2.5) berechnet werden:

$$\phi = C_{1,2} A \left[ \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \quad (2.5)$$

mit:

$\phi$	= Strahlungsstrom	[W]
$C_{1,2}$	= Strahlungsaustauschkonstante	[W/(m <sup>2</sup> K <sup>4</sup> )]
A	= Fläche	[m <sup>2</sup> ]
T1, T2	= absolute Temperatur der Oberfläche 1 bzw. 2	[K]
C1, C2	= Strahlungskonstante des Körpers 1 bzw. 2	[W/(m <sup>2</sup> K <sup>4</sup> )]
Cs	= Strahlungskonstante des schwarzen Körpers	[W/(m <sup>2</sup> K <sup>4</sup> )]

Die Strahlungsaustauschkonstante ist von den Emissionsgraden der Oberflächen abhängig:

$$C_{1,2} = \frac{C_s}{\frac{1}{\epsilon_1} + \frac{1}{\epsilon_2} - 1} \quad (2.6)$$

mit:

$\epsilon_1, \epsilon_2$  = Emissionsgrad der Oberfläche 1 bzw. 2

Nach Hohmann (Hohmann, Setzer et al. 2004) ist dabei wichtig, dass bei der langwelligen Wärmestrahlung die Farbe der Oberfläche unbedeutend ist und lediglich blanke, metallische Oberflächen ( $\epsilon \approx 0,05$ ) und nichtmetallische Oberflächen ( $\epsilon \approx 0,90-98$ ) deutlich zu unterscheiden sind. Bei kurzwelliger Strahlung hingegen (z.B. Sonneneinstrahlung) spielt die Farbe eine entscheidende Rolle. Dunkle Flächen absorbieren kurzwellige Strahlung stärker und erwärmen sich deshalb auch stärker. Bei Dämmstoffen wurde das durch die Verwendung von grauen oder schwarzen Zusätzen als Strahlungs-Trübungsmittel umgesetzt, um die Wärmeleitfähigkeit zu senken. Wie in Abbildung 2.20 dargestellt, konnte beispielsweise bei expandiertem Polystyrol (EPS) dadurch der Wert der Wärmeleitfähigkeit bei gleichbleibender Rohdichte um ca. 3 mW/mK gesenkt werden (Sprengard, Treml et al. 2013).

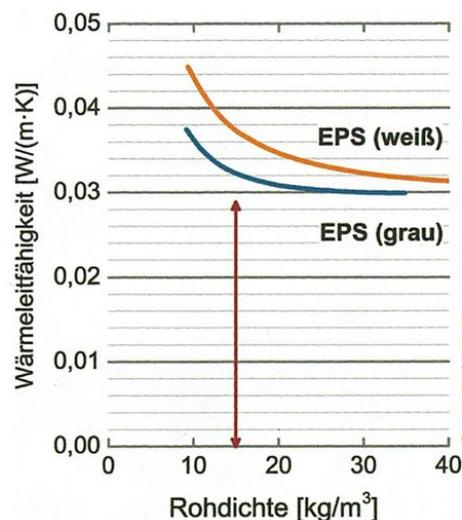


Abbildung 2.20: Reduktion der Wärmeleitfähigkeit durch Strahlungs-Trübungsmittel am Beispiel EPS (Sprengard, Treml et al. 2013)

In Faserdämmstoffen kann der Anteil der Strahlungsübertragung am Gesamtwärmedurchgang bis zu 35 % betragen (Kaemmerlen, Asllanaj et al. 2010).

### **Konvektion**

Konvektion ist die Wärmeübertragung durch Mitführung in beweglichen Medien (Gase, Luft, Flüssigkeiten) und wird berechnet nach (2.7):

$$\Phi_c = \omega A c_p (\theta_1 - \theta_2) \quad (2.7)$$

mit:

$\Phi$	= konvektiver Wärmestrom	[W]
$\omega$	= Geschwindigkeit der Strömung	[m/s]
$A$	= durchströmte Querschnittsfläche	[m <sup>2</sup> ]
$c_p$	= spezifische Wärmekapazität	[J/kg/K]
$\theta_1 - \theta_2$	= Temperaturunterschied zwischen den Messstellen	[K]

Die Moleküle tragen dabei den Energiegehalt mit sich und geben diesen beim Wärmeaustausch zwischen Gasen oder Flüssigkeiten und einer angrenzenden Oberfläche ab. Konvektion wird entweder durch Dichteunterschiede als Folge von Temperaturunterschieden erzeugt (freie Konvektion) oder durch mechanische Hilfsmittel wie beispielsweise Pumpen erzeugt (erzwungene Konvektion). Luftströmungen entstehen im Dämmstoff selbst oder in vorhandenen Luftschichten ausserhalb der Dämmstoffstruktur. Einflussgrössen für den konvektiven Wärmetransport sind zum Beispiel nach Freudenberg (Freudenberg 2002):

- Temperaturdifferenz
- Hohlraumgrösse innerhalb der Struktur
- Gasdruck

Konvektion kann für die Wärmeübertragung bei Dämmstoffen vernachlässigt werden, wenn durch deren Einbausituation freie Konvektion zwischen Bauteilschichten konstruktiv verhindert wird oder die Dämmstoffstruktur selbst durch geschlossenzellige Poren Konvektion verhindert. Theoretische Arbeiten belegen die untergeordnete Rolle des konvektiven Wärmetransportes bei Dämmstoffen mit Faserstruktur. So schätzt beispielsweise Elsner (Elsner, Fischer et al. 1993) bei Einhaltung bestimmter Parameter (Rayleigh-Zahl < 10<sup>3</sup> und Nusselt-Zahl = 1) den Einfluss als vernachlässigbar klein ein. Nach Koglin (Koglin 1967) ist der Anteil der Konvektion bei Raumtemperatur erst ab einer Porengrösse > 8 mm spürbar.

### **Kombinierter Wärmetransport**

Die gesamte Wärmeübertragung durch einen Stoff (Wärmeleitfähigkeit eines Stoffes) ist stets die Summe der drei Transportarten. Bei Dämmstoffen wird die Wärmeleitfähigkeit von folgenden Faktoren beeinflusst (Wesche 1996) und (Freudenberg 2002):

- Verwendete Feststoffe
- Gefügebau der Feststoffe
- Porosität oder Dichte
- Leitfähigkeit der Feststoffe
- Art und Aufbau der Gaseinschlüsse
- Gasdruck in den Poren
- Strahlungseigenschaften und Oberflächeneigenschaften des Gefüges
- Luftdichtigkeit des Gefüges
- Feuchtigkeit und Temperatur des Baustoffes

Abbildung 2.21 zeigt eine Übersicht der Wärmeleitfähigkeit ausgewählter Dämmstoffe (Friedrich und Wirries 2015).

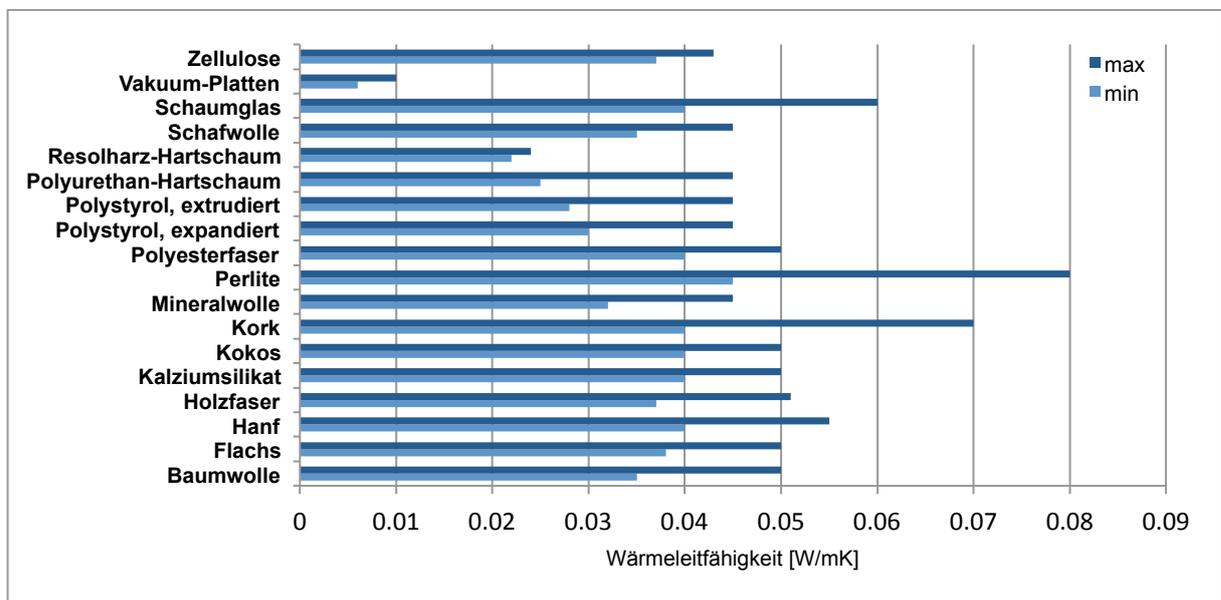


Abbildung 2.21: Übersicht der Wärmeleitfähigkeit von Dämmstoffen. Teilweise aus (Friedrich und Wirries 2015)

Konvektiver Wärmetransport kann entweder materialbedingt durch geschlossene Poren bzw. durch geschlossene Deckschichten oder anwendungsbedingt durch luftdichte Einbausituationen in vielen Fällen vernachlässigt werden. Bei Faserdämmmaterialien besteht damit der Wärmetransport aus kombinierter Wärmestrahlung und Wärmeleitung. Durch die ungeordnete Faserausrichtung, die Fasergröße und die Porosität entsteht ein komplexes Gefüge. Zu-

sätzlich bestehen Holzfasern selbst aus einer Struktur mit festen Bestandteilen und Hohlräumen.

Es bestehen Arbeiten zur Modellierung des kombinierten Wärmetransportes bei Fasermaterialien. So hat beispielsweise Du (Du, Fan et al. 2009) ein Modell zur optimalen Porenverteilung in Faserdämmstoffen der Textiltechnik erstellt und kam, in Abhängigkeit der Parameter Faserdicke und Faseremissivität, bei einer inhomogenen Porenverteilung, insbesondere mit geringeren Porengrößen in den Dämmstoffrandzonen, zu den besten Ergebnissen. Kaemmerlen (Kaemmerlen, Asllanaj et al. 2010) konnte anhand experimenteller Untersuchungen und Simulationen an einem Holzfaserdämmstoff mit einer Rohdichte von  $170 \text{ kg/m}^3$  nachweisen, dass der Strahlungsanteil am Gesamtenergiedurchgang zu vernachlässigen ist. Manohar (Manohar und Kochhar 2012) erstellte ein Modell zur Ermittlung des kombinierten Wärmetransportes in Faserdämmstoffen anhand von Kokosnussfasern und Zuckerrohrfasern im Rohdichtebereich von  $40\text{-}80 \text{ kg/m}^3$ . Er konnte feststellen, dass mit abnehmender Rohdichte der Strahlungsanteil am Gesamttransport zunimmt. Arbeiten von Sonderegger (Sonderegger und Niemz 2012) bestätigen diesen Zusammenhang auch für Holzfaserdämmplatten (vergl. Abbildung 2.22).

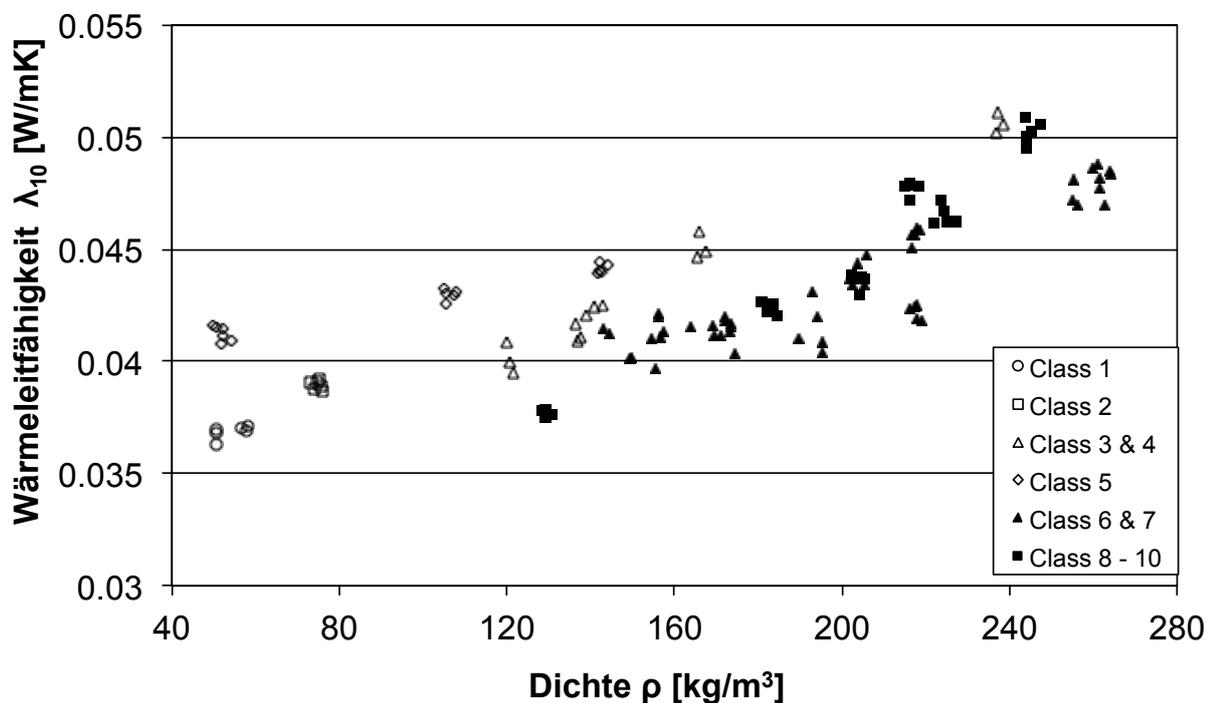


Abbildung 1.22: Wärmeleitfähigkeit in Abhängigkeit der Dichte (Sonderegger und Niemz 2012)

#### 2.4.2 Wärmespeicherung

Im Gegensatz zur Wärmedämmung ist bei der Wärmespeicherung eine gute Wärmeleitung erwünscht, da Wärmeenergie möglichst schnell aufgenommen werden soll. Die spezifische Wärmekapazität wird meist zum Vergleich verschiedener Baustoffe herangezogen. Das

stoffbezogene Mass der Wärmeaufnahme wird als spezifische Wärmekapazität bezeichnet. Die spezifische Wärmekapazität eines Stoffes ist die Wärmemenge, die benötigt wird, um 1 kg dieses Stoffes um 1 K zu erwärmen und berechnet sich nach (2.8).

$$C = \frac{Q}{m \cdot \Delta T} \quad (2.8)$$

mit:

$C$	= spezifische Wärmekapazität	[kJ/(kg·K)]
$Q$	= Wärmemenge	[kJ]
$m$	= Masse	[kg]
$\Delta T$	= Temperaturdifferenz	[K]

Die Eigenschaft Wärme zu speichern ist abhängig von der Materialrohichte und der Materialstruktur. Tabelle 2.3 enthält typische Werte für die spezifische Wärmekapazität (Wesche 1996).

Tabelle 2.3: Typische Werte der spezifischen Wärmekapazität (teilweise nach (Wesche 1996))

Material	C [kJ/(kg·K)]
Stahl	0,45
Aluminium	0,9
Luft	1,0
Beton	0,88
Holz (darrtrocken)	1,3
Holzfaserplatten (u = 7-9 %)	1,7 – 2,3
Holz (u = 100 %)	2,8
Wasser	4,2

Bei Holzfaserdämmplatten ist das Verhältnis aus Wärmeleitfähigkeit und der spezifischen Wärmekapazität vorteilhaft im Vergleich zu mineralischen Dämmstoffen, da ihr C-Wert höher liegt. Dadurch werden im Einbauzustand Temperaturschwankungen geringer und das Material wirkt bauphysikalisch ausgleichend. Insbesondere bei Bauteilen mit geringem Flächen-gewicht (z.B. Holzbauteile) wirkt sich die Materialeigenschaft der Holzfaser positiv auf das Temperaturverhalten aus. In der Praxis ist die Wärmespeicherzahl aussagekräftiger. Die volumenbezogene Wärmespeicherzahl beschreibt, wie -viel Wärmeenergie benötigt wird, um 1 m<sup>3</sup> eines Stoffes um 1 K zu erhöhen. Die Wärmespeicherzahl ist das Produkt aus Materialrohichte und der spezifischen Wärmekapazität und berechnet sich nach (2.9) (Hohmann, Setzer et al. 2004).

$$S = \rho \cdot C \quad (2.9)$$

mit:

$S$	= Wärmespeicherzahl	[kJ/(m <sup>3</sup> ·K)]
$\rho$	= Rohdichte	[kg/m <sup>3</sup> ]
$C$	= spezifische Wärmekapazität	[kJ/(kg·K)]

Für eine qualitative Beurteilung der Wärmespeicherung eines Baustoffes ist die Betrachtung des sogenannten wirksamen Speichervermögens vorteilhafter. Ein hohes wirksames Speichervermögen haben Bauteilschichten mit:

- einer hohen spezifischen Wärmekapazität,
- einer hohen Materialrohichte
- einer hohen Wärmeleitfähigkeit

Damit Baustoffe mit einer hohen spezifischen Wärmekapazität wirksam werden können, sollten sie möglichst nah an der Innenoberfläche der Bauteile liegen. Typische Werte für die spezifische Wärmekapazität und die Wärmespeicherzahl sind in Tabelle 2.4 angegeben:

Tabelle 2.4: Wärmespeicherzahl unterschiedlicher Materialien (Kuchling 2004)

Material	Rohdichte [kg/m <sup>3</sup> ]	C [kJ/(kg·K)]	S [kJ/(m <sup>3</sup> ·K)]
Wasser	1000	4.2	4200
Stahl	7800	0.45	3510
Beton	2400	0.88	2112
Holz (Fichte) darrtrocken	330-680	1.6	528-1088
poröse Holzfaserplatte	55-240	1.9-2.45	104.5-588
Mineralfasern	20-150	0.6-1	12-150

Die Temperaturleitfähigkeit gibt die Reichweite einer an der Oberfläche erfolgten Temperaturänderung in die Tiefe des Materials an und dient der Beschreibung der Geschwindigkeit des Energietransportes. Die Temperaturleitzahl ist das Verhältnis des Wärmedämmvermögens und des Wärmespeichervermögens. Mit abnehmender Temperaturleitzahl steigt der sommerliche Hitze- und der winterliche Kälteschutz. Nach (2.10) gilt:

$$\alpha = \frac{\lambda}{c \cdot \rho} \quad (2.10)$$

sowie nach (2.11)

$$\alpha = \frac{\lambda}{S} \quad (2.11)$$

mit:

$\alpha$	= Temperaturleitfähigkeit	[m <sup>2</sup> /s]
$\lambda$	= Wärmeleitfähigkeit	[W/(m·K)]
$C$	= spezifische Wärmekapazität	[kJ/(kg·K)]
$\rho$	= Rohdichte	[kg/m <sup>3</sup> ]

### 2.4.3 Feuchteaufnahme und -speicherung

#### Sorption

Als hygroskopisches und kapillarporöses Material besitzt Holz die Fähigkeit, Feuchtigkeit aus der Umgebung in Form von Wasserdampf aus der Luft aufzunehmen, zu speichern und wieder abzugeben. Die Feuchteaufnahme erfolgt nach Niemz (Niemz 1993) in vier Phasen, von denen die ersten drei infolge Sorption und die letzte durch Kapillarkräfte erfolgt (vergl. Abbildung 2.23).

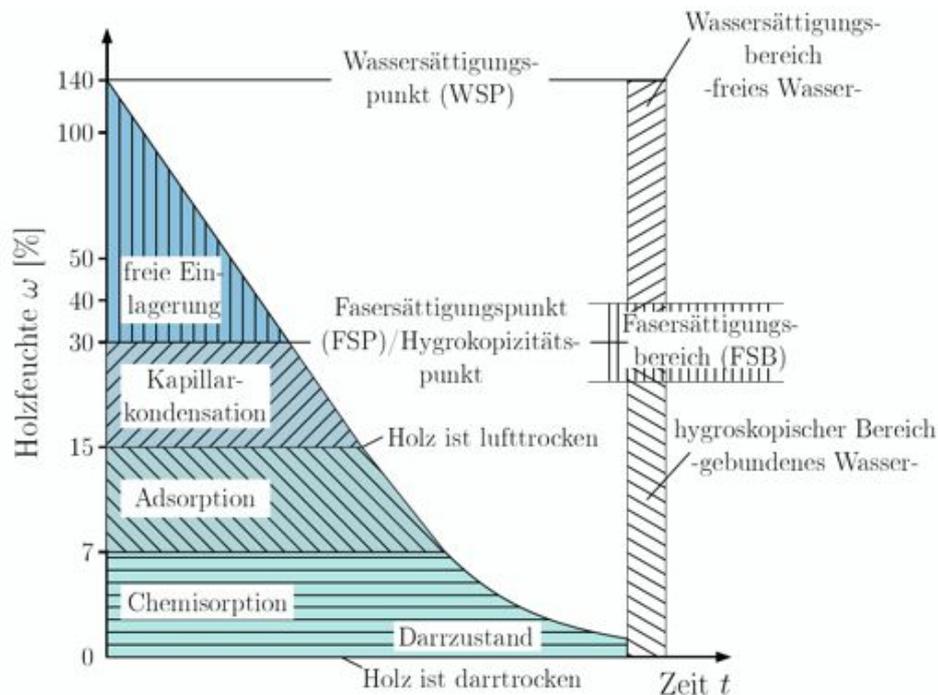


Abbildung 2.23: Bindungsarten von Wasser im Holz (Niemz 1993)

In der ersten Phase der Feuchteaufnahme, der Chemisorption im Feuchtebereich von 0 bis ca. 6 %, werden die Wasserstoffmoleküle über Wasserstoffbrücken zwischen benachbarten Zelluloseketten eingelagert. Dabei sind die freien Nebervalenzen der Hydroxylgruppen in den amorphen Bereichen des Zellulosegerüsts von grosser Bedeutung. Die Chemisorption beginnt entsprechend dem Zellwandaufbau in den amorphen Bereichen der Mizellen. In der zweiten Phase, der Adsorptionsphase im Feuchtebereich von 6 bis ca. 15 %, wird das Wasser in den Poren angelagert. Die Anziehung entsteht dabei durch van der Waals- oder elektrostatische Kräfte, es bildet sich eine Wasserschicht an der Poreinnenwand. In der dritten Phase, der Kapillarkondensation zwischen 15 % bis zum Fasersättigungsbereich, kondensiert der Wasserdampf bereits vor der Sättigung, da der Sättigungsdruck über den Wasserminenken geringer ist als über einer ebenen Fläche. Nach (2.12) gilt:

$$p_r = p_e \cdot e^{-\frac{2\sigma \cdot \rho_D \cdot \vartheta}{\rho_e \cdot \rho_{FL} \cdot r}} \quad (2.12)$$

mit:

- $p_r$  = Sättigungsdruck über den Kapillaren
- $p_e$  = Sättigungsdruck über ebenen Flüssigkeitsoberflächen
- $\rho_D$  = Dampfdichte
- $r$  = Kapillarradius
- $\sigma$  = Oberflächenspannung
- $\vartheta$  = Benetzungswinkel
- $\rho_{FL}$  = Flüssigkeitsdichte

Mit zunehmendem Feuchtegehalt lagert sich Wasser in die intermizellaren und interfibrillaren Hohlräume ein. Oberhalb des Fasersättigungsbereiches treten keine weiteren Quell- und Schwinderscheinungen auf. Der Fasersättigungsbereich bezeichnet den höchstmöglichen Gehalt an gebundenem Wasser im Ausgleichszustand in wassergesättigter Luft (Niemz 1993). Der exakte Fasersättigungspunkt einer Holzart wird häufig nach dem Hailwood-Horrobin-Modell berechnet (Hailwood und Horrobin 1946), erstmals wurde ein Model durch Brunauer, Emmet und Teller (Brunauer, Emmett et al. 1938), das sogenannte BET-Model, entwickelt. Es bestehen jedoch zahlreiche Modelle zur mathematischen Beschreibung der Sorption. Nach Hering (Hering 2011) lässt sich der Verlauf der Sorptionsisothermen nach (2.13) beschreiben:

$$U(\omega) = \frac{\varphi}{A+B \cdot \varphi + C \cdot \varphi^2} \quad (2.13)$$

mit:

- $u$  = Feuchtegehalt [kg/kg<sup>-1</sup>]
- $\varphi$  = relative Luftfeuchte [%]
- A,B,C = Koeffizienten einer linearen Regression mit quadratischem Polynomansatz, ermittelt aus den Sorptionsmessdaten

In der vierten Phase, der freien Einlagerung ab ca. 30 % bis zum Wassersättigungspunkt, wird Wasser in den Zellhohlräumen eingelagert. Holzfeuchten über dem Fasersättigungsbe- reich können durch Wasserlagerung erreicht werden. Abbildung 2.24 zeigt schematisch die fortschreitende Wassereinlagerung in einer Pore bei steigendem Wassergehalt nach Rose (Rose 1965) in (Lutz, Jenisch et al. 2002)

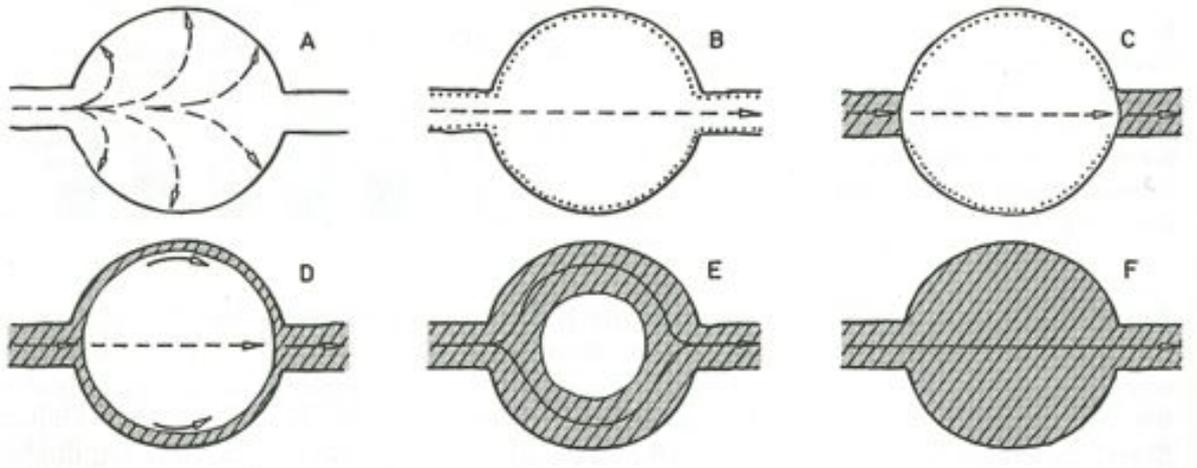


Abbildung 2.24: Schematische Darstellung der fortschreitenden Wassereinlagerung nach Rose (Rose 1965) aus (Lutz, Jenisch et al. 2002) mit (A) trockene Pore, (B) Pore mit belegten Molekülschichten, (C) Kapillarkondensation, (D) Sorbatschicht an der Poreinnenwand, (E) Strömungsschicht, (F) gesättigte Pore.

Bei gleich bleibenden Sorptionsbedingungen stellt sich in Abhängigkeit der folgenden Faktoren ein Gleichgewichtszustand ein:

- relative Luftfeuchtigkeit
- Temperatur
- Luftdruck
- chemischer und struktureller Aufbau des Holzes

Der Feuchtegehalt in Abhängigkeit von der relativen Luftfeuchte und der Temperatur wird am Beispiel von Sitka-Fichte (*Picea sitchensis*) exemplarisch gezeigt (vergl. Abbildung 2.25).

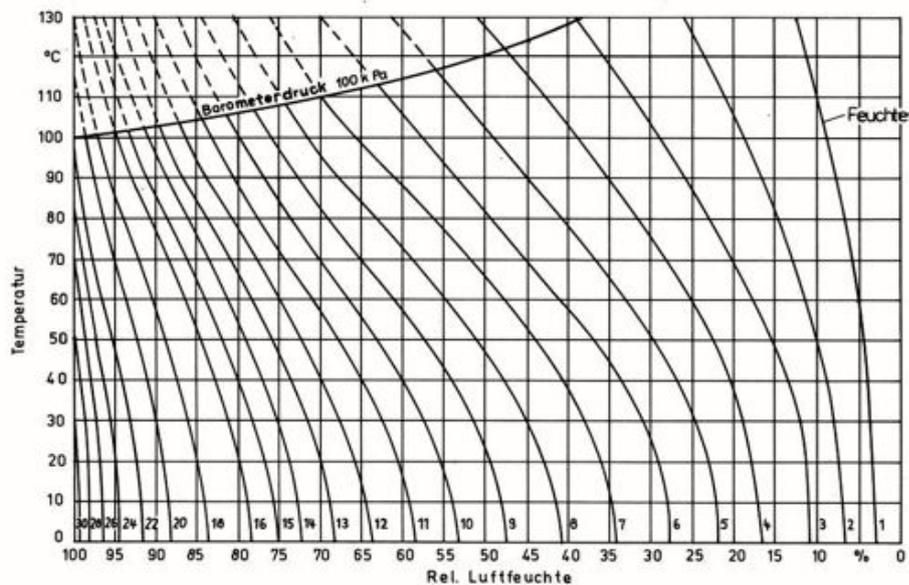


Abbildung 2.25: Hygroskopisches Gleichgewicht von Sitka-Fichte (Niemz 1993)

Der Holzfeuchtegehalt dient als Kenngrösse zur Beurteilung des Wassergehaltes und wird berechnet nach (2.14):

$$u = \frac{m_u - m_0}{m_0} \cdot 100 \quad (2.14)$$

mit:

$u$	= Holzfeuchte	[%]
$m_u$	= Masse der Probe im feuchten Zustand	[kg]
$m_0$	= Masse der Probe im darrtrockenen Zustand	[kg]

Die Feuchteaufnahme beeinflusst neben der Festigkeit auch die thermischen Eigenschaften (Wärmeleitfähigkeit, Wärmespeicherung) sowie das Quell- und Schwindverhalten von Holz. Die Berechnung der feuchtebezogenen Dichte erfolgt nach (2.15):

$$\rho_u = \frac{m_u}{V_u} \quad (2.15)$$

mit:

$\rho_u$	= Rohdichte bei Holzfeuchte $\omega$	[kg/m <sup>3</sup> ]
$m_u$	= Masse bei Holzfeuchte $\omega$	[kg]
$V_u$	= Volumen bei Holzfeuchte $\omega$	[m <sup>3</sup> ]

### Quellung und Schwinden

Eine direkte Folge der Feuchteaufnahme bzw. -abgabe ist das Quell- und Schwindverhalten. Bei der Aufnahme von Feuchtigkeit bis zum Erreichen des Fasersättigungspunktes (FSP) kommt es dabei zu einem Ausdehnen der Zellwand (Quellung). Durch Feuchteabnahme erfolgt eine Volumenkontraktion (Schwindung) (Niemz 1993).

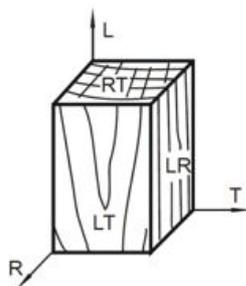


Abbildung 2.26: Richtungen des Quellens und Schwindens bei Holz mit (L) Longitudinal, (R) Radial und (T) Tangential (Niemz 2003).

Zur Beurteilung des Quell- und Schwindverhaltens werden das Quell- und Schwindmass ermittelt. Dabei bezieht sich das Quellmass auf den Darrzustand und das Schwindmass auf den maximal gequollenen Zustand. Für die linearen Dimensionsänderungen werden die maximalen und linearen Quell- und Schwindmasse sowie die Volumenquell- und Schwindmasse wie folgt berechnet (Niemz 1993).

Die maximale Quellung  $q$  einer Probenabmessung bezogen auf die minimale Abmessung im darrtrockenen Zustand wird berechnet nach (2.16):

$$q_{max} = \frac{l_{max} - l_{min}}{l_{min}} \cdot 100 \quad (2.16)$$

mit:

$q_{max}$	= maximales Quellmass	[%]
$l_{max}$	= maximale Abmessung im feuchten Zustand	[mm]
$l_{min}$	= minimale Abmessung im darrtrockenen Zustand	[mm]

Das lineare Quellmass  $q$  ist die Massänderung bei Zunahme des Feuchtegehaltes  $u_1$  auf  $u_2$  bezogen auf den darrtrockenen Zustand  $u_0$ , ermittelt nach (2.17):

$$q = \frac{l_{u2} - l_{u1}}{l_{min}} \cdot 100 \quad (2.17)$$

mit:

$q$	= Quellmass	[%]
$l_{u1}$	= Abmessung beim Feuchtegehalt $u_1$	[mm]
$l_{u2}$	= Abmessung beim Feuchtegehalt $u_2$ wobei $u_2 > u_1$	[mm]
$l_{min}$	= Abmessung im darrtrockenen Zustand	[mm]

Die differentielle Quellung  $q$  ist das Quellmass je Feuchtigkeitsänderung nach (2.18):

$$q = \frac{l_F - l_T}{l_0 \cdot (u_F - u_T)} \cdot 100 \quad (2.18)$$

mit:

$q$	= differentielle Quellung	[%/%]
$l_F$	= Abmessung bei Gleichgewichtsfeuchte im Feuchtklima	[mm]
$l_T$	= Abmessung bei Gleichgewichtsfeuchte im Trockenklima	[mm]
$u_F - u_T$	= Feuchtedifferenz zwischen Feucht- und Trockenklima	[%]
$l_0$	= Abmessung im darrtrockenen Zustand	[mm]

und gibt damit eine baupraktisch wertvolle Kenngrösse an, da sie Auskunft über die Dimensionsänderung gibt. Tabelle 2.5 zeigt die maximalen und differentiellen Quellmasse verschiedener Holzarten.

Tabelle 2.5: Maximale und differentielle Quellmasse verschiedener Holzarten (DIN-52184 1979)

Holzart	maximales Quellmass $q_{max}$ [%]			differentielles Quellmass $q$ [%/%]	
	longitudinal	radial	tangential	radial	tangential
Fichte	0.2-0.4	3.7	8.5	0.19	0.36
Kiefer	0.2-0.4	4.2	8.3	0.19	0.36
Buche	0.2-0.6	6.2	13.4	0.20	0.41
Eiche	0.3-0.6	4.6	10.9	0.18	0.34

Für Holzfaserstoff können die gleichen Sorptionsvorgänge angenommen werden. Durch die grössere Oberfläche des Holzfaserstoffs bestehen jedoch Unterschiede in der Geschwindigkeit.

#### 2.4.4 Feuchtetransport

Der Feuchtetransport durch den Dämmstoff erfolgt durch Diffusion und Flüssigwassertransport:

##### **Diffusion**

Der Feuchtetransport durch Diffusion findet überwiegend unterhalb der Fasersättigung des Holzes statt. Dabei werden Wassermoleküle im Gaszustand transportiert. Der Massenstrom erfolgt stets von Stellen mit grösserer zu kleinerer Wasserdampfkonzentration. Der Dampfdiffusionsprozess durch das Dampfdruckgefälle ist unter stationären Bedingungen durch das erste Fick'sche Gesetz nach (2.19) definiert.

$$J = -D \cdot \nabla c \quad (2.19)$$

mit:

$J$	= Flussvektor	$[\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}]$
$D$	= Diffusionskoeffizient	$[\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}]$
$\nabla c$	= Konzentrationsgradient entgegen der Diffusionsrichtung	$[\text{mol} \cdot \text{m}^{-4}]$

Für einen eindimensionalen Transport unter instationären Bedingungen gilt das zweite Fick'sche Gesetz nach (2.20):

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \cdot \left( D \cdot \frac{\partial c}{\partial x} \right) \quad (2.20)$$

mit:

$D$	= Diffusionskoeffizient	$[\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}]$
$c$	= Konzentrationsgradient	$[\text{mol} \cdot \text{m}^{-3}]$
$t$	=Zeit	$[\text{h}]$
$x$	=Diffusionsrichtung	$[\text{m}]$

In der Baupraxis wird als Kenngrösse zur Beschreibung der Dichtigkeit eines Stoffes gegenüber der Wasserdampfdiffusion die Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl  $\mu$  verwendet. Die dimensionslose Grösse beschreibt den Faktor der Massenstromdichte gegenüber ruhender Luft und lässt sich nach DIN EN ISO 12572 (DIN-EN-ISO-12572 2001) bestimmen.

Bei Holz verlaufen die Diffusionsprozesse nicht nur im Zellinnern, sondern auch durch Diffusion von gebundenem Wasser (Siau 1984). Obwohl nach Siau der Diffusionskoeffizient nicht konstant, sondern stark von der Holzfeuchtigkeit und der Temperatur abhängig ist, kann nach Vanek und Teischinger (Vanek und Teischinger 1989) bei isothermen Bedingungen mit dem Fick'schen Gesetz eine hinreichend genaue Näherung des Diffusionsstromes berechnet

werden. Die nachfolgende Abbildung 2.27 zeigt ein Feuchtetransportmodell (Frandsen, Damkilde et al. 2007) mit den zeitabhängigen Prozessen beim Feuchtetransport in Faserrichtung durch Zellwände und die Bewegung von Wasserdampf an der Grenze von Luft zu Holz mit resultierender Sorption und Diffusion von gebundenem Wasser.

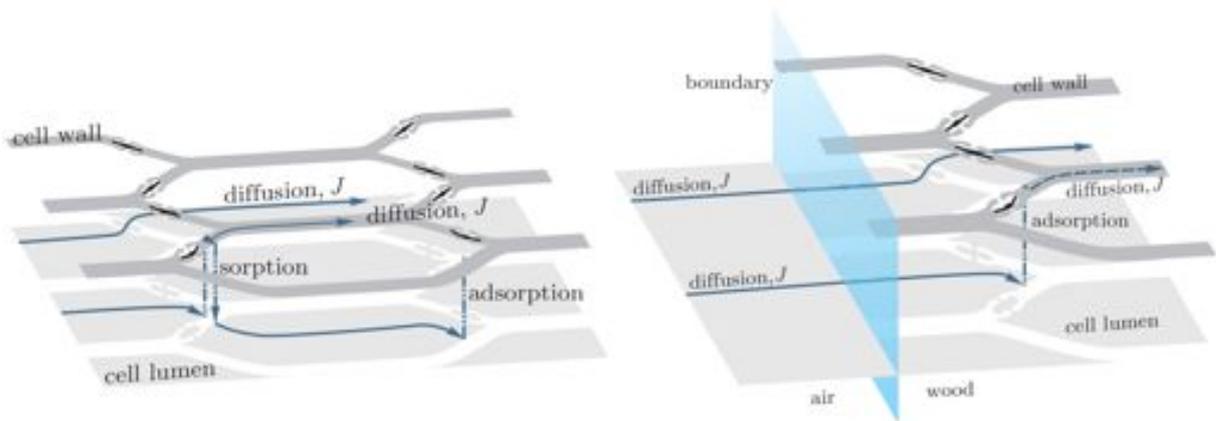


Abbildung 2.27: Multi-Fick'sches Feuchtetransportmodell (Frandsen, Damkilde et al. 2007). Zeitabhängige Prozesse beim Feuchtetransport durch Zellwände (links); Bewegung von Wasserdampf an der Grenze von Luft zu Holz mit resultierender Sorption und Diffusion von gebundenem Wasser (rechts).

### Flüssigwassertransport

Für den Wassertransport oberhalb der Fasersättigung sind hauptsächlich die Kapillarkräfte verantwortlich. Diese entstehen durch die spezifische Kraftwirkung an der Flüssigkeitsoberfläche und werden als Grenzflächenspannung bzw. Oberflächenspannung bezeichnet (Lutz, Jenisch et al. 2002). Die Größe der Grenzflächenspannung hängt von den Kräfteinwirkungen zwischen den jeweiligen Molekülen oder Atomen der beiden durch die Grenzfläche getrennten Stoffe ab und ist baupraktisch betrachtet nur in geringem Mass abhängig von der Temperatur.

Zur Charakterisierung und Quantifizierung dieser Kräfte wird als Kenngröße der Wasseraufnahmekoeffizient verwendet. Dieser kann nach (DIN-EN-ISO-15148 2002) bei teilweisem Eintauchen der Probe in Wasser bestimmt und anhand der aufgenommenen Wassermenge über den Querschnitt der Probe bezogen auf die Wurzel der Zeit bestimmt werden (2.21).

$$w = \frac{\Delta m}{\Delta \sqrt{t}} \quad (2.21)$$

mit:

$w$	= Wasseraufnahmekoeffizient	$[\text{kg}/(\text{m}^2\text{h}^{0.5})]$
$m$	= flächenbezogene Wasseraufnahme	$[\text{kg}/\text{m}^2]$
$t$	= Saugzeit	$[\text{h}]$

Tabelle 2.6 zeigt die Klassifizierung der Saugfähigkeit von verschiedenen Baustoffen (Hohmann, Setzer et al. 2004):

Tabelle 2.6: Klassifizierung des Saugverhaltens von Baustoffen (Hohmann, Setzer et al. 2004)

<b>Saugfähigkeit</b>	<b>Wasseraufnahmekoeffizient</b> $w$ [kg/(m <sup>2</sup> h <sup>0,5</sup> )]
wassersaugend	$w \geq 2,0$
wasserhemmend	$0,5 < w < 2,0$
wasserabweisend	$w \leq 0,5$

In Tabelle 2.7 werden für ausgewählte Baustoffe Wasseraufnahmekoeffizienten angegeben (Hohmann, Setzer et al. 2004):

Tabelle 2.7: Wasseraufnahmekoeffizienten ausgewählter Baustoffe teilweise (Hohmann, Setzer et al. 2004)

<b>Baustoff</b>	<b>Rohdichte</b> $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	<b>Wasseraufnahmekoeffizient</b> $w$ [kg/(m <sup>2</sup> h <sup>0,5</sup> )]
Vollziegel	1700	22
Porenbeton	650	10
Beton	2170	2
Kalksandstein	1650	13
Gipskarton	900	60
Holzfaserverplatte (hydrophobiert)	180	0.3

Eine automatisierte Prüfmethode zur Bestimmung des Wasseraufnahmekoeffizienten unter Berücksichtigung des gesamten Messbereichs wurde in Plagge (Plagge, Grunewald et al. 2005) beschrieben.

### 3 Material und Methoden

#### 3.1 Übersicht

Die experimentellen Arbeiten erfolgten an industriell hergestellten Holzfaserdämmplatten und Dämmstoffen aus Mineralfasern, die von unterschiedlichen Herstellern zur Verfügung gestellt worden waren. Ferner wurde industriell hergestellter Holzfaserstoff aus unterschiedlichen Holzarten untersucht, der bei den Herstellern jeweils direkt aus dem Produktionsprozess entnommen worden war. Zudem erfolgten Arbeiten an labortechnisch hergestelltem Holzfaserstoff, der unter variablen Zerfaserungsbedingungen auf einer Versuchsanlage hergestellt worden war. Mit diesem Material erfolgten zusätzlich Untersuchungen zur Auswirkung einer Wärmebehandlung. Schliesslich wurde mit den Holzfaserstoffen Prüfkörper zur Messung der Wärmeleitfähigkeit hergestellt. Tabelle 3.1 zeigt die Untersuchungen im Überblick.

Tabelle 3.1: Übersicht zur Materialauswahl und den experimentellen Untersuchungen

Untersuchungen	Materialien		
	Industrielle Dämmstoffe und Dämmstoffkombinationen	Industrielle Faserstoffe	Experimentelle Faserstoffe und zusätzlich thermisch behandelte Faserstoffe
<b>Rohdichte</b>	Für Dämmstoffe die wesentliche Eigenschaft, da Materialkennwerte wie beispielsweise die Wärmeleitfähigkeit in enger Abhängigkeit dazu stehen.		
	nach EN 1602		
<b>Schüttdichte</b>	Liefert Informationen zur Packungsdichte der Fasermatrix, der Fasergrösse und der Faserreindichte		
		Nach selbst entwickeltem Verfahren	Nach selbst entwickeltem Verfahren
<b>Rohdichteprofil</b>	Liefert Informationen über Randflächeneffekte, die Platteneigenschaften beeinflussen können, wie beispielsweise die Wärmeleitfähigkeit		
	Senkrecht zur Plattenebene		
<b>Porosimetrie</b>	Zeigt Veränderungen der Porengrösse und deren Anzahl durch die Zerfaserung im Vergleich zum Ausgangsmaterial (Holzart) auf		
		Mit Quecksilber Druck-Porosimetrie	
<b>Morphologie</b>	Ergibt Erkenntnisse zu Fasergrösse und Form sowie der Qualität der Zerfaserung		
		Anhand mikroskopischer Bilder und REM Bilder sowie mittels optischer Partikelanalyse	Anhand mikroskopischer Bilder und REM Bilder sowie mittels optischer Partikelanalyse
<b>Chemische Analyse</b>	Zeigt Veränderungen der Anteile an Holzbestandteilen auf		
			An zusätzlich thermisch behandelten Proben
<b>Feuchteaufnahme</b>	Zeigt die Veränderung der Hygroskopizität		
	Anhand Sorptionsisothermen und der Sorptionsgeschwindigkeit sowie der Quellung und des Schwindens	Anhand Sorptionsisothermen	Anhand Sorptionsisothermen

<b>Feuchtetransport</b>	Zeigt die Auswirkung der Herstellverfahren		
	Wasserdampf-Diffusionsmessung		
<b>Wärmeleitfähigkeit</b>	Zeigt die Auswirkungen von Rohstoff, Herstellverfahren und Aufschlussbedingungen		
	Senkrecht zur Plattenebene	An selbst hergestellten Probekörpern	An selbst hergestellten Probekörpern

Die Auswahl der industriell hergestellten Materialien erfolgte, um grundlegende Zusammenhänge bezüglich der Abhängigkeiten der Wärmeleitfähigkeit zur Rohdichte und dem Quellschwindverhalten aufzuzeigen. Die Ergebnisse wurden mit Werten von Mineralfaserdämmstoffen verglichen, da diese Dämmstoffe die grösste strukturelle Ähnlichkeit aufweisen. Sie bestehen ebenfalls aus einzelnen, gebundenen Fasern und ihre Wärmeleitfähigkeit beruht auf den gleichen Übertragungsvorgängen. Im Gegensatz dazu sind geschlossenzellige, poröse Dämmstoffe wie z.B. expandierte Polystyrolämmstoffe (EPS), die zwar vergleichbare Anwendungen aufweisen, strukturell mit den Faserdämmstoffen nicht vergleichbar, und werden daher nicht zu Vergleichszwecken herangezogen. Die Untersuchungen der Materialkombinationen erfolgten aus baupraktischen Überlegungen, da in der Praxis Dämmmaterialien häufig frei kombiniert werden und die Summe Ihrer Leistungen oftmals nur rechnerisch ermittelt wird. Laborplatten, hergestellt nach dem Nassverfahren, dienten für vergleichende Untersuchungen mit industriellen Produkten. Die Untersuchungen an Holzfaserstoffen aus unterschiedlichen Holzarten erfolgten, um die Auswirkungen der Holzarten auf die Schüttdichten, die Materialfeuchten und die Wärmeleitfähigkeiten im Zusammenhang mit den industriellen Zerfaserungsbedingungen aufzuzeigen. Mit den Untersuchungen an laborteknisch hergestellten Holzfaserstoffen sollten Erkenntnisse zum Einfluss der Zerfaserungsbedingungen auf Schüttdichte und Sorptionsverhalten untersucht werden. Zusätzlich sollten diese mit den industriellen Proben verglichen werden.

## 3.2 Materialien und deren Herstellung

### 3.2.1 Industrielle Holzfaserplatten und Dämmstoffe

Tabelle 3.2 zeigt die ausgewählten Materialien, die sowohl in der Herstelltechnologie als auch der Zusammensetzung variieren. Insgesamt 34 industriell gefertigte, handelsübliche Dämmstoffe bzw. -platten von acht unterschiedlichen Herstellern wurden gewählt. Davon waren 22 Holzfaserprodukte, zwei Mischprodukte aus Holzfasern und Hanf sowie zehn Mineralfaserprodukte, darunter ein Spezialprodukt mit Beimischung aus nanoporösen Partikeln. Zehn Holzfaserplatten entstammen dem sogenannten Nassverfahren, elf Holzfaserplatten dem sogenannten Trockenverfahren und fünf wurden auf Dämmstoffanlagen hergestellt um die Unterschiede des Herstellverfahrens untersuchen zu können. Zusätzlich erfolgte die Auswahl der Produkte in dem für Dämmstoffe relevanten Rohdichtebereich (40 – 290 kg/m<sup>3</sup>). Oberhalb dieses Rohdichtebereiches spielt die Wärmeleitfähigkeit der Produkte nur noch

eine untergeordnete Rolle. Letztlich wurden auch Produkte mit gleicher Rohdichte im üblichen Dickenbereich von 5 – 60 mm ausgewählt, um die Dickenabhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit zu untersuchen.

Tabelle 3.2: Übersicht der verwendeten, industriell gefertigten Dämmstoffe

<b>Industrielle Dämmstoffe</b>						
<b>Nr.</b>	<b>Hersteller</b>	<b>Bezeichnung</b> [Produktname]	<b>Dämmstofftyp</b>	<b>Dicke</b> [mm]	<b>Rohdichte</b> [kg/m <sup>3</sup> ]	
1	1	1.1	Pavaflex	Holzfaserdämmung	30	53
2		1.2	Pavatherm 40	Holzfaserplatte	40	149
3		1.3	Pavatherm 60	Holzfaserplatte	60	151
4		1.4	Pavapor	Holzfaserplatte	17	155
5		1.5	Pavatherm combi	Holzfaserplatte	60	184
6		1.6	Pavaboard	Holzfaserplatte	40	216
7		1.7	Pavaboard	Holzfaserplatte	60	217
8		1.8	Isorooft	Holzfaserplatte,	20	249
9		1.9	Isorooft	Holzfaserplatte	35	249
10		1.10	Isorooft	Holzfaserplatte	60	243
11	2	2.1	Thermoflex	Holzfaserdämmung	50	68
12		2.2	Thermosafe	Holzfaserplatte	60	119
13		2.3	Multitherm	Holzfaserplatte	60	153
14		2.4	Thermowall	Holzfaserplatte	60	156
15		2.5	Ultratherm	Holzfaserplatte	60	177
16		2.6	Thermowall gf	Holzfaserplatte	60	203
17		2.7	Multiplex-top	Holzfaserplatte	35	214
18	3	3.1	Holzflex standard	Holzfaserdämmung	50	49
19		3.2	HDP Q11 stand.	Holzfaserplatte	60	124
20		3.3	HDP Q11protect	Holzfaserplatte	60	144
21		3.4	UD Q11 protect	Holzfaserplatte	60	200
22	4	4.1	Steico Universal	Holzfaserplatte	35	290
23	5	5.1	Isonat chanvre	Holzfaser/Hanf dämmung	40	48
24		5.2	Isonat plus	Holzfaser/Hanf dämmung	35	58
25	6	6.1	Dämmplatte 1	Steinwoll dämmung	50	43
26		6.2	Dämmplatte 3	Steinwoll dämmung	55	58
27		6.3	Prima plus	Steinwoll dämmung	60	150
28		6.4	Mega	Steinwoll dämmung	60	185
29	7	7.1	PB F Extra	Glaswoll dämmung	30	52
30		7.2	PB M 032	Glaswoll dämmung	25	58
31		7.3	PB M 035	Glaswoll dämmung	25	59
32		7.4	Thermo plus	Glaswoll dämmung	30	60
33		7.5	Isoflat	Glaswoll dämmplatte	35	111
34	8	8.1	Spaceloft	Mineralfaser-Dämmvlies	5	150

Die Holzfaserdämmplatten bzw. die Holzfaser/Hanf dämmplatten (Probe: 1.1; 2.1; 3.1; 5.1; 5.2) waren jeweils aus Holzfasern (Kiefer), ca. 8 % Bindefasern (Polyolefinfasern) und ca. 10 % Brandschutzmittel (Ammoniumpolyphosphat) zusammengesetzt. Die Dämmplatten aus dem Nassverfahren enthielten Holzfasern (Fichte/Tanne) sowie maximal 2.5 % Klebstoff (Po-

lyvinylacetat) zur Lagenverklebung und maximal 1 % Hydrophobierungsmittel (Paraffin). Die Dämmplatten des Trockenverfahrens bestanden aus Holzfasern (Fichte/Tanne), maximal 4 % Klebstoff (PMDI) und maximal 1 % Hydrophobierungsmittel (Paraffin). Die Mineralfaserdämmstoffe waren aus Mineralfasern (Steinwollefasern, Glaswollefasern), bis zu 10 % Klebstoffen (Phenol-Formaldehydharze) sowie Hydrophobierungsmittel zusammengesetzt. Zusätzlich wurde der Feuchtetransport und die Wärmeleitfähigkeit auch an Materialkombinationen ermittelt. Die untersuchten Eigenschaften sind bauphysikalisch für den Einsatz der Werkstoffe von besonderer Bedeutung. Praktisch werden oft Materialkombinationen verschiedener Werkstoffe eingesetzt, für die gesamte Bauteilbetrachtung jedoch lediglich theoretisch ermittelte Deklarationswerte verwendet. Für die Materialkombinationen wurden jeweils Einzelplatten ohne Verklebung übereinandergelegt und unter leichtem Anpressdruck in die Messapparatur für die Diffusionsmessung und das Wärmeleitfähigkeitsmessgerät eingebaut. Kombinationsaufbauten wurden jeweils aus Holzfaserdämmplatten unterschiedlicher Rohdichte ( $120\text{-}290\text{ kg/m}^3$ ) auf der Aussenseite und Holzfaserdämmstoffen bzw. einem Hochleistungsdämmstoff als Mittellage erstellt. Abbildung 3.1 zeigt beispielhaft zwei Prüfkörper.



Abbildung 3.1: Prüfkörper Materialkombinationen mit Holzfaserdämmstoff (links) und Hochleistungsdämmstoff (rechts) als Mittellage

### 3.2.2 Holzfaserstoffe

#### ***Holzfaserstoffe aus industrieller Produktion***

Tabelle 3.3 zeigt die untersuchten Holzfaserstoffe aus industrieller Herstellung. Die Faserstoffe wurden jeweils der Regelproduktion entnommen. Der Faserstoff aus dem Nassverfahren war zusätzlich im Technikum des Herstellers mit einem Stromrohtrockner technisch getrocknet worden.

Tabelle 3.3: Übersicht der verwendeten Holzfaserstoffe und deren Herstellbedingungen

<b>Industrielle Holzfaserstoffe</b>					
<b>Nr.</b>	<b>Bezeichnung</b>	<b>Holzart, Herkunft</b>	<b>Mahlscheibe [Zoll]</b>	<b>Aufschlussdruck [bar]</b>	<b>Aufschlusszeit [min]</b>
1	Fichte P	Fichte/Tanne, Industrie-Restholz, Nassverfahren	45	3-4	4
2	Fichte G	Fichte /Tanne, Industrie-Restholz, Trockenverfahren	45	8	2
3	Kiefer	Kiefer, Rundholz, Dämmmattenverfahren	45	8	2
4	Buche	Buche, Rundholz, Dämmmattenverfahren	45	8	2

Zusätzlich wurde industrieller Holzfaserstoff (Typ Fichte P) im Technikum des Herstellers mit Farbpigmenten vermischt, um den Einfluss der veränderten Emissivität zu ermitteln. Dazu wurde das Material in einem Trommelmischer gemischt. Die Farbpigmente wurden zunächst mit Wasser gemischt und anschliessend mit Düsen auf den sich im Mischer befindlichen Fasernstoffe gesprüht.

Tabelle 3.4: Übersicht Holzfaserstoffe mit Farbpigmenten

<b>Industrielle Holzfaserstoffe mit Pigmenten</b>				
<b>Nr.</b>	<b>Bezeichnung</b>	<b>Holzart, Herkunft</b>	<b>Pigment [Typ]</b>	<b>Menge [% , atro]</b>
1	Fichte P/S1	Fichte/Tanne, Industrie-Restholz, Nassverfahren	Schwarz, IR transparent	20
2	Fichte P/S2	Fichte /Tanne, Industrie-Restholz, Trockenverfahren	Schwarz, IR reflektierend	23
3	Fichte P/W1	Kiefer, Rundholz, Dämmmattenverfahren	Weiss	60

#### **Labortechnisch hergestellter Holzfaserstoff**

Mit einer kontinuierlich arbeitenden Defibrator-Laboranlage (Laboranlage 12-1CP, Fa. Andritz) wurde experimentell Holzfaserstoff unter definierten Bedingungen hergestellt. Ausgangsmaterial für die Versuche war Rundholz (Zopfdurchmesser 10-24 cm) aus einem 35- bis 45-jährigen Fichtenbestand (*Picea abies* L.) des Reviers Ullersdorf im Forstamt Dresden (Dresdner Heide, Deutschland) das unmittelbar vor den Versuchen eingeschlagen, entrindet

und zu Hackschnitzeln aufbereitet wurde. Der Feuchtegehalt der Hackschnitzel betrug ~ 130 % (darrgewichtsbezogene Holzfeuchte). Vor der Zerfaserung erfolgte die Sichtung der Hackschnitzel mit einem Schwingsieb. Dabei wurde die Nutzfraktion mit einer Siebmaschenweite von > 3 mm und < 25 mm separiert. Die Schüttrohdichte der Nutzfraktion betrug ca. 135 kg/m<sup>3</sup> und war damit vergleichbar mit industriell hergestellten Hackschnitzeln. Aus diesem Hackgut wurden nach dem thermo-mechanischen Verfahren Holzfasern hergestellt (vergl. Abbildung 3.2). Die Anlage verfügt über einen Defibrator mit einer Mahlscheibengrösse von 12 Zoll, einer maximalen Umdrehung von 3000 U/min und einer Leistung in Abhängigkeit des Materials und den Zerfaserungsbedingungen von ca. 80 kg/h. Die Faser Trocknung erfolgte direkt nach der Blasleitung (Blowline) in einem Stromrohr Trockner bei Temperaturen von 120 °C (Eingang) bis 70 °C (Ausgang) auf Feuchtegehalte von 6 bis 10 %. Die Herstellung ist vergleichbar zum grosstechnischen Aufschluss in industriellen Anlagen und erfolgte ohne Zusatz von Bindemitteln oder anderen Additiven.



Abbildung 3.2: Laborrefineranlage IHD (links); Detailansicht Kocher mit Sichtfenstern (rechts)

Die Anlage befindet sich am Institut für Holztechnologie Dresden gGmbH (IHD). Die Versuche wurden in insgesamt zwei Versuchsreihen durchgeführt.

Der Aufschlussdruck (Druck im Kocher) wurde in den Stufen 4, 8, 12 und 16 bar variiert. Für die Verweilzeit wurden drei Stufen (1-2, 3-4 und 5-6 min) gewählt. Der Abstand der Mahlscheiben (Mahlspace) während der Zerfaserung wurde von 0.15 bis 0.3 mm in 0.05 mm-Schritten variiert. Tabelle 3.5 zeigt die Versuchsvarianten.

Tabelle 3.5: Übersicht der Versuchsvarianten bei der experimentellen Faserstoffherstellung

Experimentelle Holzfaserstoffe					
Nr.	Bezeichnung	Aufschlussdruck [bar]	Verweilzeit [min]	Mahlspalt [mm]	zusätzliche Thermische Behandlung
1	F 120	4	1-2	0,15	185° (1h, 2h, 3h)
2	F 121	4	3-4	0,15	
3	F 122	4	3-4	0,20	
4	F 123	4	5-6	0,15	
5	F 124	8	1-2	0,20	3h (160°,175°185°)
6	F 125	8	3-4	0,20	
7	F 126	8	5-6	0,20	
8	F 127	12	1-2	0,25	
9	F 129	12	3-4	0,25	
10	F 130	12	3-4	0,20	
11	F 131	12	5-6	0,25	
12	F 132	16	1-2	0,30	
13	F 133	16	3-4	0,30	
14	F 134	16	3-4	0,20	
15	F 135	16	5-6	0,30	

Die Variante F 125 stellt dabei eine Referenzvariante zu den industriell hergestellten Holzfaserstoffen dar. Diese Variante ist für die Beurteilung der Übertragbarkeit der Versuchsergebnisse vom Labormassstab auf einen späteren grosstechnischen Massstab besonders hervorzuheben, da die Herstellparameter (Aufschlussdruck und Verweilzeit) aktuell im industriellen Massstab zur Anwendung kommen. Für die experimentelle Herstellung der Faserstoffe wurde ein höherer Energiebedarf für die Dampferzeugung, eine Reduzierung der Holzausbeute sowie schlechtere Festigkeitseigenschaften durch kürzere Faserlängen in Kauf genommen.

Zusätzlich wurden die Varianten F 122 und F 125 einer thermischen Behandlung unterzogen. Die Behandlung erfolgte in einer Thermokammer des Typs MAHILD MH 2000 TMT (vergl. Abbildung 3.3). Damit können unter Normaldruck thermische Modifikationen mit bis 250 °C erfolgen. Das nutzbare Volumen beträgt ca. 0,5 m<sup>3</sup>. Mit der Anlage können nach einem patentierten Verfahren neben Schnittholz auch flächige und schüttfähige Materialien thermisch behandelt werden (Scheidung 2014).



Abbildung 3.3: Thermokammer mit Beschickungsmaterial (links); Holzfaserstoff vor der Beschickung in die Thermokammer. Ohne obere Abdeckung (rechts) (Scheidung 2014)



Abbildung 3.4: Prozessverlauf anhand eines Beispiels des Messprotokolls (Scheidung 2014)

Die Probe F 122 wurde jeweils bei einer Temperatur von 185 °C für 1h, 2h sowie 3h behandelt. Die Probe F 125 wurde jeweils 3h bei 160°, 175° und 185° behandelt.

### **Labortechnisch hergestellte Prüfkörper**

Zur Messung der Wärmeleitfähigkeit wurden aus den Faserstoffen einheitliche Prüfkörper hergestellt, um den losen Faserstoff in die Messeinrichtung einbauen zu können. Die Herstellung erfolgte im Technikum eines Herstellers (Nassverfahren) und im Technikum des IHD (Trockenverfahren), hauptsächlich jedoch im Labor der Gruppe Holzphysik / ETH Zürich nach einem selbst entwickelten Verfahren. Tabelle 3.6 zeigt eine Übersicht der hergestellten Prüfkörper.

Tabelle 3.6: Übersicht der Prüfkörper aus Holzfasernstoffen

Labortechnisch hergestellte Prüfkörper				
Nr.	Typ	Inhaltstoffe, Zusätze	Rohdichte [kg/m <sup>3</sup> ]	Dicke [mm]
1	Nassverfahren	Industrielle Fichtenfasern <sub>7</sub>	169	18 – 38
2	Nassverfahren	Industrielle Fichtenfasern <sub>7</sub>	120	27 – 46
3	Nassverfahren	Industrielle Kiefernfasern	127	43 – 53
4	Nassverfahren	Industrielle Buchenfasern	133	44 – 54
5	Trockenverfahren	Experimentelle Fichtefasern	150	60
6	Eigenes Laborverfahren	Industrielle Fichtenfasern	60 - 180	60
7	Eigenes Laborverfahren	Industrielle Kiefernfasern	60 - 80	60
8	Eigenes Laborverfahren	Industrielle Buchenfasern	60 - 80	60
9	Eigenes Laborverfahren	Experimentelle Fichtefasern	60 - 80	60

Im Technikum des Herstellers (Pavatex S.A.) wurde das Nassverfahren in einzelnen Arbeitsschritten nachgestellt. Nach dem Herstellen der Stoffsuspension und der Zugabe aller Additive und Hilfsstoffe erfolgte die Formgebung in einem Entwässerungskasten (500 x 500 mm). Die Entwässerung erfolgte anschliessend gravimetrisch und durch manuelles Gautschen des Faserkuchens. Zuletzt wurden die Proben mit einer Laborpresse gepresst. Anschliessend wurden die Faserplatten in einem Laborofen darrgetrocknet (vergl. Abbildung 2.5).



Abbildung 2.5: Entwässerungskasten für Stoffsuspension (links), Laborpresse (rechts) im Technikum Pavatex S.A.

Im Technikum des IHD wurde der Trockenverfahrensprozess nachvollzogen. Der experimentell hergestellte Faserstoff wurde in einem Trommelmischer mit Bindemittel vermischt (4 %, atro) und anschliessend in einen Formkasten gegeben. Der Formkasten wurde dann mit einem Heissluft/Dampfgemisch durchströmt und das Bindemittel ausgehärtet. Als Bindemittel wurde ein marktübliches pMDI (Desmodur 1520 A20, Bayer Material Science AG) verwendet.



Abbildung 3.6: Faserstoffbeleimung im Trommelmischer (links); Formkasten für Plattendurchströmung (rechts) am IHD

Die Herstellung der Prüfkörper im eigenen Laborverfahren erfolgte mit einer eigens dafür entwickelten Vorrichtung (vergl. Abbildung 3.7). Der Faserstoff konnte damit ohne weitere Zusatzstoffe oder Kleber geformt und im Wärmeleitfähigkeitsmessgerät gemessen werden, um somit Ergebnisse ohne zusätzliche Einflüsse zu erhalten. Dafür wurde ein formgebender Rahmen mit den gleichen Innenmassen wie die Prüfkörpergrösse (500 x 500 mm) erstellt. In diesen Rahmen wurde der lose Faserstoff in der für die Zieldichte notwendigen Menge eingebracht. Für eine gleichmässige Einbringung des Faserstoffs wurde eine pneumatische Einrichtung entwickelt, die Fasern über einen Luftstrom ansaugt und in den Formkasten einbläst, ohne dabei eine Separierung nach der Fasergrösse zu bewirken.



Abbildung 3.7: Einrichtung zur Prüfkörperherstellung ohne Bindemittel (links); Faserstoffkuchen vor der Verdichtung (rechts)

Anschliessend wurde der befüllte Rahmen in eine Universalprüfmaschine (Zwick/Roell BZ1-MMZ100-ZW03 mit einer Kraftmessdose mit 100 kN maximalem Prüfdruck) eingebaut und der Faserstoff mit einem auf das Rahmeninnenmass angepassten Stempel weggesteuert auf die Zieldicke von 60 mm verdichtet (vergl. Abbildung 3.8). Nach Erreichen der Zieldicke wurde der Pressdruck für mindestens zehn Minuten aufrecht erhalten. Die so hergestellten Laborplatten wurden dann nach Lagerung im Normalklima in das Wärmeleitfähigkeitsmessgerät eingebaut.



Abbildung 3.8: Einrichtung zur Plattenformung ohne Bindemittel (links); Faserstoff mit Druckstempel und halb geöffneten Formkasten (rechts)

Das Verfahren ermöglichte es, Faserstoffe unter reproduzierbaren Bedingungen zu Prüfkörpern zu formen und deren Wärmeleitfähigkeit ohne Nebeneinflüsse wie beispielsweise Klebstoff oder hydrophobierende Zusätze zu messen. Die zum Teil beachtliche Eigenfestigkeit der Prüfkörper war dabei ein für die Durchführung der Messungen positiver Nebeneffekt (vergl. Abbildung 3.9).



Abbildung 3.9: Prüfkörper nach der Herstellung (links); Prüfkörper im Wärmeleitfähigkeitsmessgerät eingebaut (rechts).

### 3.3 Experimentelle Untersuchungen

#### 3.3.1 Messgeräte

Für die grundlegenden Ermittlungen (Länge, Breite, Dicke, Masse, Feuchtegehalt) der Prüfkörper und Materialien wurden folgende Messgeräte verwendet:

- Eine elektronische Messwaage (Mettler-Toledo AE200) mit einer Messgenauigkeit von einem Milligramm.
- Ein Längenmesser (Mitutoyo) mit einer Messgenauigkeit von einem hundertstel Millimeter.
- Dickenmessgeräte (Mitutoyo IT-014UT) mit einer Messgenauigkeit von einem hundertstel Millimeter.
- Ein Klimaschrank (Feutron KPK 200)

### 3.3.2 Rohdichte / Schüttrohichte

Die Rohdichte der Prüfkörper erfolgte in Anlehnung an EN 1602 (EN-1602 2013). Für die Ermittlung der Schüttdichte der losen Faserstoffe wurde eine experimentelle Einrichtung entwickelt, um eine homogene und agglomerationsfreie Schüttung der Faserstoffe im Messbehälter zu erhalten. Dafür wurde ein mechanisches Schwingsieb mit einem Schüttkasten ergänzt (vergl. Abbildung 3.10). Aus diesem Schüttkasten wurde das Prüfmaterial (Faserstoffe) unter definierten Bedingungen in den Messzylinder gestreut. Die Ergebnisse wurden in Anlehnung an (IHD-FHIS-281) ermittelt.



Abbildung 3.10: Schwingesieb mit Schüttkasten und Messzylinder für die Schüttdichtemessung

### 3.3.3 Rohdichteprofil senkrecht zur Plattenebene

An einer Auswahl der industriell hergestellten Dämmstoffe wurde die Verteilung der Rohdichte über die Materialdicke (Rohdichteprofil) ermittelt. Die Messungen erfolgten mit einem La-

bor-Rohdichteprofilmessgerät (Grecon DAX 5000) anhand kleiner Proben (50 x 50mm) in Lieferdicke.



Abbildung 3.11: Labor-Rohdichteprofilmessgerät Grecon DAX 5000 (links); Probenkörper (rechts)

Die erzeugte Gammastrahlung wird dabei auf einen Strahl fokussiert und durchdringt die Probe parallel zur Plattenoberfläche. Die weiteren Messungen erfolgen in geringen Abständen. Das beim Durchgang durch die Probe geschwächte Signal wird nach dem Austritt aus dem Probenkörper von einem Detektor erfasst und ausgewertet. Die individuellen Rohdichtewerte ergeben in ihrer Gesamtheit eine Rohdichteprofilkurve der untersuchten Probe über den Plattenquerschnitt.

### 3.3.4 Porosimetrie

An drei Holzfasernstoffen wurde die Porosität ermittelt. Mit der Quecksilber-Druckporosimetrie erfolgten an Fichten-, Kiefer- und Buchenfaserstoff Messungen der Porosität und der Porengrößenverteilung. Der Vorteil der Quecksilber-Druckporosimetrie im Vergleich zur Gas-Absorption (Wasserdampf,  $N_2$ , oder Helium) liegt für hygroskopische Materialien darin, dass das Prüfmaterial mittels Absorption und kapillarer Leitung keine Feuchte aufnimmt (Plötze und Niemz 2011). Mit Druck wird Quecksilber in die Poren des Prüfmaterials eingebracht, das Volumen korreliert dabei mit dem Porenvolumen und der benötigte Druck mit der Porengröße. Nicht zugängliche Poren und Poren mit Radius kleiner als 1,8 nm können nicht gemessen werden (Plötze und Niemz 2011). Für Faserstoffe mit Bestandteilen aus Fasern, Faserbündeln und Faserbruchstücken und die durch die thermo-mechanische Zerkleinerung erfolgte Vergrößerung der Holzoberfläche wurde angenommen, dass der Anteil an nicht messbaren Volumina sehr gering ist und damit keine Überschätzung des Anteils an kleineren Poren vorliegt. Die Porosität ist definiert nach (3.1):

$$n = 1 - \frac{\rho}{\rho_s} \quad (3.1)$$

mit:

$n$	= Porosität	[%]
$\rho$	= Rohdichte bei Normalklima	[g/cm <sup>3</sup> ]
$\rho_s$	= Reindichte	[g/cm <sup>3</sup> ]

Die Rohdichte des Fasermaterials wurde mit einem Pycnometer (GeoPyc 1360 MICROMERITICS) ermittelt. Die Bestimmung der Reindichte erfolgte ebenfalls mit einem Pycnometer (AccuPyc 1330) mit Helium als Verdrängungsgas.

### 3.3.5 Morphologie

#### ***Mikroskopische Bilder***

Von den industriell und experimentell hergestellten Faserstoffen wurden mit einem Auflichtmikroskop Bilder erstellt. Um auch die farblichen Unterschiede der Faserstoffe darstellen zu können, erfolgten die Aufnahmen mit jeweils identischer Beleuchtung. Die Aufnahmen erfolgten mit einem Stereomikroskop (Leica M 165C)

#### ***Rasterelektronische Bilder***

Von Fichten-, Kiefern- und Buchenfaserstoffen sowie Mineralfaserstoffen erfolgten rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen für visuelle Einschätzungen der Fasergrösse und Fasermorphologie. Verwendet wurde ein Dual Beam Gerät (FEI, Quanta 200, 3D).

#### ***Partikelanalyse***

Die Faserstoffe wurden einer Partikelanalyse unterzogen. Neben der klassischen Siebanalyse durch mechanische Siebung und der Ermittlung der Siebrückstände zur Erstellung einer Siebkennlinie wurde zusätzlich ein optisches Partikelanalyzesystem der dynamischen digitalen Bildverarbeitung nach ISO 13322-2 (ISO-13322-2 2006) eingesetzt (Retsch 2014). Das Prinzip des Verfahrens beruht auf der Analyse einer Partikel-Wasser-Suspension. Die Suspension wird dabei während des Abfließens von einem Mischbehälter in einen Auffangbehälter in einer speziellen Zelle mit einer Digitalkamera fotografiert und anhand der gewonnenen Bildpunkte vermessen. Abbildung 3.12 zeigt das Partikelanalyzesystem und ein Beispielbild.

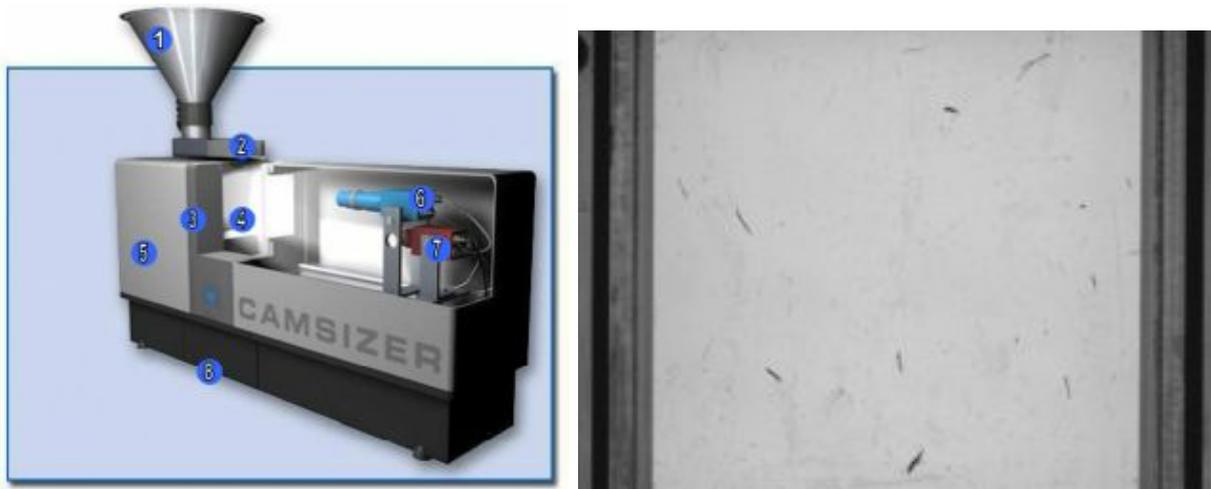


Abbildung 3.12: Optisches Partikelanalysesystem (Retsch 2014) mit (1) Einfülltrichter, (2) Dosierrinne, (3) Flächenbeleuchtungseinheit, (4) Messschacht, (5) Trichter- und Rinnenhardware, (6) Kamera, (7) Zoom-Kamera; (8) Auffangbehälter (links); Beispielbild, Fichtenfaserstoff (rechts)

Die Suspension wird zunächst in einem Mischbehälter vorbereitet, wobei durch spezielle Mischwerkzeuge die vollständige Durchmischung der Dispersion sichergestellt wird, ohne die Partikel durch zusätzlich eingetragene Scherkräfte zu deformieren. Danach wird der Behälter kontrolliert entleert und das Partikel-Wasser-Gemisch durch den Messschacht (Flow Cell) geleitet. In der Zelle wird der Volumenstrom unterhalb des Sichtfensters durch die Veränderung des Rohrquerschnittes von kreisförmig ( $\varnothing$  23 mm) auf rechteckig (Höhe 4 mm, Breite 77 mm) auseinandergezogen, womit eine Überlagerung der Partikel nahezu ausgeschlossen wird. Eine Digitalkamera (Bildrate ca. 60 Bilder/sec) erzeugt vom vorbeifließenden Volumenstrom Bilder. Die Abmessungen der Partikel werden durch die Auszählung der Bildpunkte (Pixel) ermittelt. Auf diese Weise werden die Partikellänge und die Partikelfläche bestimmt und daraus die Partikelbreite (oder Partikeldicke) berechnet. Folgende Kenngrößen können erfasst werden:

$$x_{area} = \sqrt{\frac{4A}{\pi}} \quad (3.2)$$

mit:

$x_{area}$  = Partikeldurchmesser, berechnet aus der Flächenmessung der Partikelprojektion [mm]

Weitere Parameter sind:

- $x_c$  = Maximale Sehne senkrecht zur Messrichtung; Die kürzeste aller gemessenen maximalen Sehnen  $x_c$  einer Partikelprojektion
- $x_{c \min}$  = Breite; Partikeldurchmesser bestimmt aus der kleinsten aller maximalen Sehnen eines Partikels
- $x_{Fe}$  = *Feret-Durchmesser* Abstand zweier Tangenten, die senkrecht zur Messrichtung an den Partikel angelegt werden. Der über alle Richtungen ermittelte Feret-Durchmesser eines konvektiven Partikels ist gleich dem Durchmesser eines Kreises mit dem gleichen Umfang.

$x_{Fe\ max}$  = Länge; Partikeldurchmesser bestimmt aus dem längsten Feret-Durchmesser aller gemessenen Feret-Durchmesser eines Partikels  
 $x_{Fe\ min}$  = Breite; Partikeldurchmesser bestimmt aus dem kleinsten Feret-Durchmesser aller gemessenen Feret-Durchmesser eines Partikels

und:

$$x_{str} = \frac{A}{x_{Ma}} \quad (3.3)$$

mit:

$x_{str}$  = Länge; Partikelgröße, berechnet aus der Fläche der Partikelprojektion dividiert durch den Durchmesser (Martin-Durchmesser) jeder Partikelprojektion.  
 $x_{Ma}$  = Martin-Durchmesser; Länge des Durchmessers durch den Flächenschwerpunkt in Messrichtung.

Das System ermöglicht eine Dimensionsunterteilung der geometrischen Eigenschaften (Länge, Breite/Dicke) in Teilbereiche vorzunehmen, ähnlich der Abstufung in Siebmaschenweiten einer Siebanalyse (z.B. Luftstrahlsiebanalyse). Die erfassten Partikel werden nach ihrer Größe in diese Bereiche eingeordnet und daraus die Häufigkeitsverteilung der Gesamtprobe bezüglich der jeweiligen Eigenschaften berechnet.

Eine am IHD entwickelte Software ermöglicht es, aus den Häufigkeitsverteilungen von fünf Messungen, die für eine Analyse notwendig sind, eine Siebkennlinie zu errechnen. Aus der Kennlinie werden die mittlere Korngröße ( $K_m$ ) und das Korngrößenintervall ( $\Delta K$ ) berechnet. Die prozentuale Verteilung des Staub-, Feinst-, Fein- und Grobanteils wird anhand der vom Nutzer festgelegten Grenzen berechnet. Ebenso ist es möglich, den Schlankheitsgrad der Partikel aus der Partikellänge und der Partikelbreite (oder Partikeldicke) zu errechnen.

### 3.3.6 Chemische Analyse

Am thermisch behandelten, experimentell hergestellten Faserstoff erfolgte zusätzlich eine chemische Analyse der wesentlichen Holzbestandteile. Die Bestimmung des Extraktstoffgehalts in Ethanol-Benzen erfolgte nach TAPPI T 204 (TAPPI-T-204-cm-97 1997). Der Gesamtgehalt an Extraktstoffen wurde nach TAPPI T 264 (Heisswasserextraktion) bestimmt (TAPPI-T-264-cm-07 2007). Nach TAPPI T 212 erfolgte die Bestimmung des Extraktstoffgehaltes in Natrium-Hydroxid (TAPPI-T-212-om-02 2002). Der Ligningehalt wurde nach TAPPI T 222 ermittelt (TAPPI-T-222-om-02 2002). Der Bestimmung des Gesamtgehalts an Kohlenhydraten (Holocellulose) wurde nach der Methode Poljak mit Peressigsäure durchgeführt. Der Zellulosegehalt wurde nach Kürschner und Hoffer bestimmt.

### 3.3.7 Feuchteaufnahme

#### **Sorption**

Das Sorptionsverhalten wurde an Proben bei 20 °C und 35, 50, 65, 80 sowie 93 % relativer Luftfeuchte mittels Darmmethode bestimmt. Die Materialfeuchte wurde nach Klimatisierung bis zur Gleichgewichtsfeuchte bei Ad- und Desorption nach DIN 52183 (DIN-52183 1993)

ermittelt. Die Prüfkörper waren je nach Probenmaterial unterschiedlich. Die plattenförmigen Proben wurden auf stabförmige Prüfkörper zugeschnitten (vergl. Abbildung 2.14). An den gleichen Prüfkörpern erfolgten auch die Messungen zum Quell-Schwindverhalten. Die losen Faserstoffproben wurden vor der Sorptionsmessung in Glasschalen jeweils bis zur Ausgleichsfeuchte im Klimaschrank gelagert.

### **Sorptionsgeschwindigkeit**

Die Sorptionsgeschwindigkeit wurde in Anlehnung an die Norm DIN EN ISO 15148 (DIN-EN-ISO-15148 2002) berechnet. Der Versuchsaufbau zur Berechnung der Sorptionsgeschwindigkeit entspricht dem Aufbau der Diffusionsmessung, die in Kapitel 2.3.8 beschrieben ist. Im Gegensatz zur Diffusionsmessung wurden nur die Prüfkörper (vergl. Abbildung 3.13) gewogen.



Abbildung 3.13: Massenbestimmung des Prüfkörpers

Die Sorptionsgeschwindigkeit wurde durch die Ermittlung der Probenmasse in regelmässigen Abschnitten bis zum Erreichen einer linearen Feuchteauf- bzw. -abnahme ermittelt. Nach Erreichen des linearen Bereiches mit einer Gewichtsveränderung innerhalb von 24 Stunden von maximal 0.1 % wurde die Messung beendet und am gleichen Prüfkörper die Diffusionsmessung begonnen. Da für die Diffusionsmessung selbst keine vorgängige Bestimmung der Sorptionsgeschwindigkeit notwendig ist, konnte die Messung der Sorptionsgeschwindigkeit an den gleichen Proben zuvor erfolgen. In Vorversuchen hatte sich gezeigt, dass die Feuchteauf- und -abnahme sehr schnell erfolgt. Deshalb wurde die Massenänderung der Prüfkörper am ersten und zweiten Tag insgesamt vier Mal gemessen und an den folgenden Tagen jeweils um eine Messung reduziert. Die gesamte Messung verlief sieben Tage. Von Haas (Haas 1998) hatte im Rahmen von Untersuchungen zur Heisspressung von Holzwerkstoffmatten bereits ein Verfahren zur Messung der Sorptionsgeschwindigkeit an

Furnieren angewandt, was für die Anwendung an Faserplatten jedoch als nicht geeignet beurteilt wurde.

Die Differenz  $\Delta m_t$  zwischen der Masse bei jeder Wägung und der Ausgangsmasse bezogen auf die wasseraufnehmende Fläche wird nach (3.4) berechnet und zur Wurzel der Zeit  $\sqrt{t}$ , angegeben.

$$\Delta m_t = \frac{m_t - m_i}{A} \quad (3.4)$$

mit:

$m_t$	= die Masse des Probenkörpers zur Zeit t	[kg]
$m_i$	= die Ausgangsmasse zur Zeit $t_0$	[kg]
$A$	= die wasseraufnehmende Fläche des Probekörpers	[m <sup>2</sup> ]

Die Steigung der linearen Trendlinie entspricht dem Wasseraufnahmekoeffizienten von dampfförmigen Wasser  $A_w$ , nach (3.5).

$$A_w = \frac{\Delta m_{t_f} - \Delta m_{t_i}}{\sqrt{t_f} - \sqrt{t_i}} \quad (3.5)$$

mit:

$A_w$	= Wasseraufnahmekoeffizienten (dampfförmig)	[kg/(m <sup>2</sup> ·s <sup>1/2</sup> )]
$\Delta m_{t_f}$	= $\Delta m$ auf der Geraden zur Zeit $t_f$	[kg/m <sup>2</sup> ]
$\Delta m_{t_i}$	= $\Delta m$ auf der Geraden zur Zeit $t_i$	[kg/m <sup>2</sup> ]
$t_f$	= Prüfdauer	[s]
$t_i$	= Referenzzeit	[s]

Aus dem Quotienten des Wasseraufnahmekoeffizienten  $A_w$  und der Rohdichte  $\rho$  wird die dichtebereinigte Sorptionsgeschwindigkeit  $a_w$  nach (3.6) berechnet.

$$a_w = \frac{A_w}{\rho} \quad (3.6)$$

Dabei ist:

$a_w$	= dichtebereinigte Sorptionsgeschwindigkeit	[kg/(m <sup>2</sup> ·s <sup>1/2</sup> )·m <sup>3</sup> /kg Holz]
$A_w$	= Wasseraufnahmekoeffizient	[kg/(m <sup>2</sup> ·s <sup>1/2</sup> )]
$\rho$	= Rohdichte des Prüfkörpers vor der Messung (20°C/65% r. LF)	[kg/m <sup>3</sup> ]

### Quell-Schwindverhalten

Die Messung des Quell- und Schwindverhaltens wurde in Anlehnung an die Normen DIN 52184 (DIN-52184 1979) und DIN EN 318 (EN-318 2002) durchgeführt. Aus der Gesamtheit der industriellen Dämmstoffe wurden sieben Plattentypen ausgewählt. Aus den Faserplatten wurden Prüfkörper mit den Abmessungen 400 × 20 mm × Plattendicke hergestellt und an-

schliessend bis zur Massenkonstanz im Normalklima bei 20 °C und 65 % rel. Luftfeuchte gelagert (vergl. Abbildung 3.14).

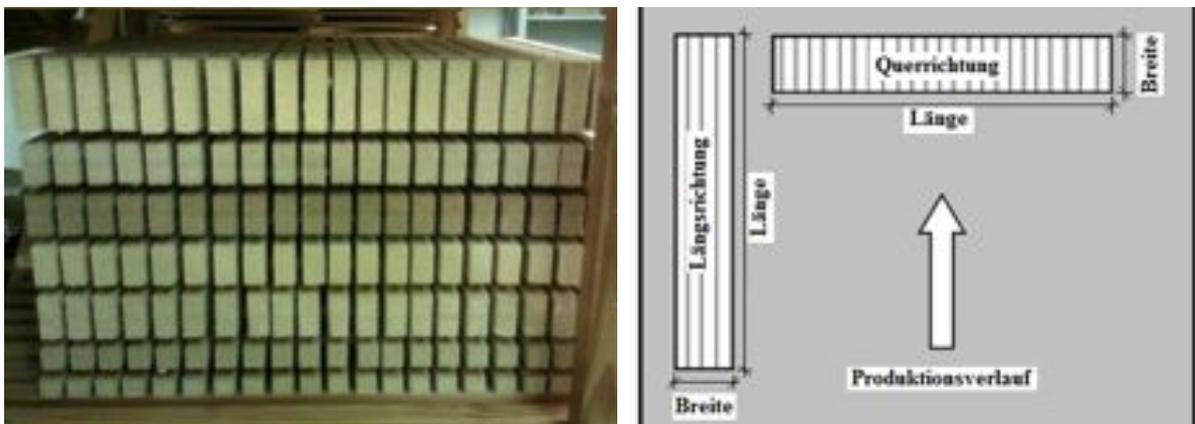


Abbildung 3.14: Prüfkörper zur Ermittlung des Quell- Schwindverhaltens (links); Zuschnittbild der Proben (rechts)

Pro Produkttyp wurden 20 Prüfkörper hergestellt, jeweils die Hälfte der Prüfkörper wurde in Richtung des Produktionsverlaufes (längs) und quer zum Produktionsverlauf (quer) entnommen. Insgesamt wurden zehn Messungen der Prüfkörperdimension bei verschiedenen Klimastufen durchgeführt, nachdem die Prüfkörper jeweils bis zu Massenkonstanz (Massenänderung  $<0.1\%$  innerhalb 24 Stunden) gelagert worden waren. In der ersten Messung wurden die Prüfkörper vom Normalklima auf 35 % rel. Luftfeuchte getrocknet. Danach wurden die Prüfkörper mit bis 95 % rel. Luftfeuchte befeuchtet (Adsorption) um sie anschliessend wieder bis 35 % rel. Luftfeuchte zu trocknen (Desorption). Die Adsorptionsmessungen erfolgten bei 35, 50, 65, 80 und 95 % relativer Luftfeuchtigkeit, die Desorption bei 95, 85, 65, 50 und 35 % relativer Luftfeuchtigkeit. Nach Abschluss der Messung wurden die Prüfkörper darrgetrocknet. Eine Einzelmessung bestand aus der Ermittlung der Masse, der Längenmessung ( $l$ ), der Dickenmessung ( $d$ ) und der Breitenmessung ( $b$ ) an der jeweils gleichen Messstelle wie in Abbildung 3.15 dargestellt.

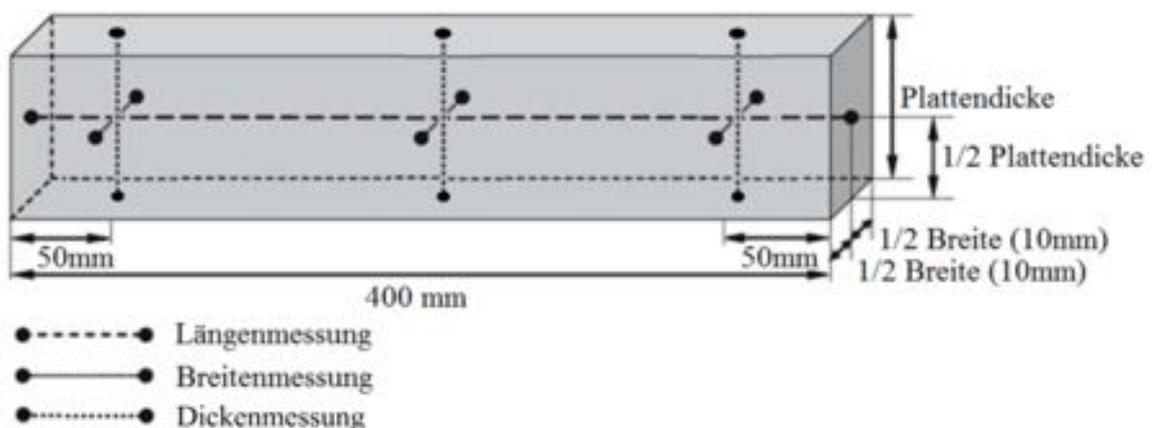


Abbildung 3.15: Messstellen am Prüfkörper

Um Oberflächenunebenheiten der porösen Faserplatten ausgleichen zu können, wurde das Dickenmessgerät modifiziert und ein runder Taster mit 20 mm Durchmesser eingebaut. Mit den Messergebnissen wurden die linearen Dimensionsänderungen ( $\alpha_{l,b}$ ,  $\beta_{l,d,b}$ ), sowie die maximalen ( $\alpha_{l,d,b \max}$ ,  $\beta_{l,d,b \max}$ ) und differentiellen ( $q_{l,d,b}$ ) Dimensionsänderungen bestimmt. Zusätzlich wurden die Quellungskoeffizienten ( $l, d, b$ ) bestimmt. Da die Prüfkörper erst nach Abschluss der Quellung darrgetrocknet wurden und durch das Quellen bei hohen Luftfeuchten ein irreversibler Vorgang („spring back“ der verdichteten Fasern und Partikel) stattfindet, wurde  $l_0$  unter Annahme einer konstanten differentiellen Quellung zwischen 0 und 95 % rel. LF nach (3.7) berechnet.

$$l_0 = l_{65} - \frac{\omega_{65}}{\omega_{95} - \omega_{65}} \cdot (l_{95} - l_{65}) \quad (3.7)$$

mit:

$l_{65}$	= Dicke der Probe bei 65 % rel. Luftfeuchte	[mm]
$l_{95}$	= Dicke der Probe bei 95 % rel. Luftfeuchte	[mm]
$\omega_{65}$	= Holzfeuchte bei 65 % rel. Luftfeuchte	[ % ]
$\omega_{95}$	= Holzfeuchte bei 95 % rel. Luftfeuchte	[ % ]

Die Bestimmung der Darrmasse und die Berechnung der Materialrohichte erfolgte nach DIN 52182 (DIN-52182 1976), die des Feuchtegehaltes nach DIN 52183 (DIN-52183 1993).

### 3.3.8 Feuchtetransport

Die Messung der Wasserdampf-Diffusion erfolgte in Anlehnung an die Norm DIN EN ISO 12572 (DIN-EN-ISO-12572 2001). Die Prüfkörper wurden bei gleichbleibender Temperatur einer Wasserdampf-Partialdruckdifferenz ausgesetzt. Über die Massenänderung pro Zeit kann die Wasserdampf-Diffusion bestimmt werden. Für die Prüfkörper wurden jeweils sechs kreisförmige Materialproben mit 140 mm Durchmesser in Materialdicke vorbereitet und jeweils dampfdicht auf ein Glasgefäß mit 140 mm Durchmesser und einer Höhe von 100 mm aufgesetzt. Die Lagerung erfolgte im Normalklima. Die Abdichtung der Glasgefäße erfolgte mit Gummimanschetten (Materialdicke 1 mm) mit einem Innendurchmesser von 139 mm und einer Höhe von 55 mm. Durch den Wasserdampf-Partialdruckunterschied zwischen dem Innern des Glasgefäßes und der Umgebung (Prüfraum mit Normalklima) entsteht ein Dampfdiffusionsstrom in Richtung des Partialdruckgefälles durch den Prüfkörper. Es wurden jeweils drei Prüfkörper mit einer im Verhältnis zum Normalklima sehr niedrigen Luftfeuchte im Prüfgefäß (Dry-Cup) und einer im Verhältnis zum Normalklima sehr hohen Luftfeuchte im Prüfgefäß (Wet-Cup) geprüft. Der benötigte Wasserdampf-Partialdruckunterschied von 65 zu 0 % und 65 zu 100 % rel. Luftfeuchte wurde mit einem Trocknungsmittel (Silikagel) für 0 % rel. Luftfeuchte im Prüfgefäß und mit vollentsalztem Wasser für 100 % rel. Luftfeuchte bis

15 mm ±5 mm unterhalb des Glasrandes aufgefüllt. Das stellt eine Abweichung der Prüfbedingungen gemäss der Prüfnorm dar, die ein Klima mit 23 °C ± 0.5 und 50 % rel. Luftfeuchte und ein Wasserdampf-Partialdruckunterschied von 50 % (50/0 %) im Wet-Cup-Versuch bzw. von 43 % (50/93 %) im Dry-Cup-Versuch vorsieht. Sonderegger (Sonderegger und Niemz 2009) hatte jedoch nachgewiesen, dass unter den zuvor genannten Prüfbedingungen Ergebnisse erreichbar sind, die nicht unzulässig abweichen.

Abbildung 3.16 zeigt das Prinzip der Dry- und Wet-Cup-Versuche mit den entgegengesetzten Diffusionsrichtungen und den Prüfaufbau der Versuche im Klimaraum.

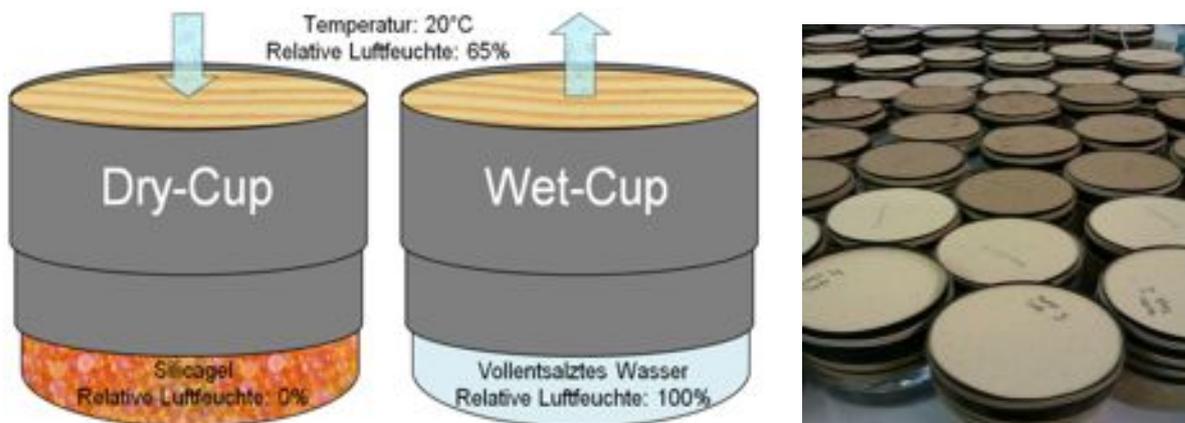


Abbildung 3.16: Prüfaufbau Dry-Cup Wet-Cup (Schmid 2010)

Durch periodisches Wiegen der Prüfkörper kann die Wasserdampf-Diffusionsstromdichte bestimmt werden. Dazu muss ein stationärer Zustand erreicht werden. Er gilt als erreicht, sobald die Massenänderung je Zeiteinheit an fünf aufeinander folgenden Messungen bei maximal ± 10 % der Prüfkörpermasse liegt (DIN-EN-13183-1 2002).

Die Wägungen erfolgten während einer Dauer von insgesamt sieben Tagen. Vor Beginn und nach Abschluss der Messung wurde der Prüfkörper separat gewogen, um über die Darmmasse die Materialrohddichte vor, und den Feuchtegehalt vor und nach der Messung zu bestimmen. Die Bestimmung der Darmmasse und die Berechnung der Materialrohddichte erfolgten nach DIN EN 13183-1 (DIN-EN-13183-1 2002). Die Bestimmung der Massenänderung je Zeiteinheit  $\dot{m}_{10}$  zwischen den einzelnen aufeinander folgenden Wägungen erfolgte (3.8):

$$\dot{m}_{10} = \frac{m_2 - m_1}{t_2 - t_1} \quad (3.8)$$

mit:

$\dot{m}_{10}$	= Massenänderung je Zeiteinheit für eine Einzelbestimmung	[kg/s]
$m_1$	= Masse der Prüfanordnung zur Zeit t1	[kg]
$m_2$	= Masse der Prüfanordnung zur Zeit t2	[kg]
$t_1; t_2$	= Zeiten der Wägung	[s]

Abbildung 3.17 zeigt die Regressionsgerade der Masse und Zeit der einzelnen  $\dot{m}_{10}$ -Werte am Beispiel eines Prüfkörpers beim Dry-Cup-Versuch. Anhand der Steigung der Geraden durch die  $\dot{m}_{10}$ -Werte im linearen Bereich (G) kann die Wasserdampf-Diffusionsstromdichte berechnet werden.

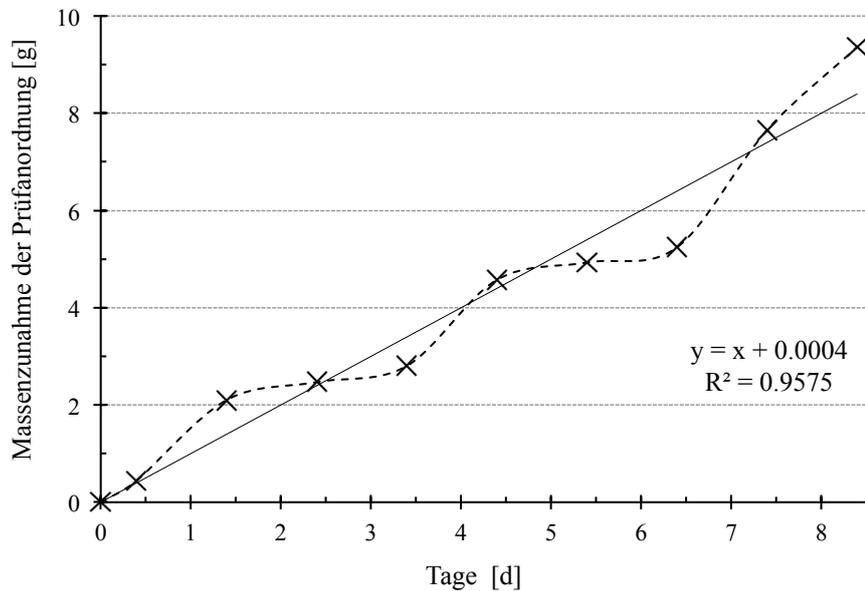


Abbildung 3.17: Regressionsgerade der Masse und Zeit der einzelnen  $\dot{m}_{10}$ -Werte

Die Wasserdampf-Diffusionsstromdichte  $g$  gibt die Wasserdampfmenge an, welche unter der Wirkung des Dampfdruckgefälles pro Zeit in Diffusionsrichtung durch die Prüffläche diffundiert (3.9):

$$g = \frac{G}{A} \quad (3.9)$$

mit:

$g$	= Wasserdampf-Diffusionsstromdichte	[kg/(m <sup>2</sup> · s)]
$G$	= $\dot{m}_{10}$	[kg/s]
$A$	= Mittelwert der freien oberen und unteren Prüffläche	[m <sup>2</sup> ]

Neben der Diffusionsstromdichte wird folgend der Wasserdampfdiffusions-Durchlasskoeffizient, der die Dampfdruckdifferenz mit einbezieht, gebildet. Dieser wird aus dem Quotienten der Steigung  $G$  und der Dampfdruckdifferenz zwischen beiden Seiten des Prüfkörpers bezogen auf die Prüffläche nach (3.10) berechnet.

$$W = \frac{G}{A \cdot \Delta p_v} \quad (3.10)$$

mit  $\Delta p_v$  aus (3.11)

$$\Delta p_v = p_{sat1} - p_{sat2} \quad (3.11)$$

wobei bei Temperaturen über 0 °C  $p_{sat1/2}$  nach (3.12) berechnet wird.

$$p_{sat1/2} = \varphi \cdot 610.5 \cdot e^{\frac{17.269 \cdot \theta}{237.3 + \theta}} \quad (3.12)$$

mit:

$W$	= Wasserdampfdiffusions-Durchlasskoeffizient	[kg/(m <sup>2</sup> ·s·Pa)]
$\Delta p_v$	= Dampfdruckdifferenz (Dry-Cup 1519.02, Wet-Cup 817.93)	[Pa]
$p_{sat1}$	= Dampfdruck im Prüfgefäß	[Pa]
$p_{sat2}$	= Dampfdruck im Klimaraum	[Pa]
$\varphi$	= relative Luftfeuchte der Prüfgefäße (0, 100) bzw. Klimaraums (65)	[%]
$\theta$	= Temperatur im Klimaraum (20)	[°C]

Bei hochdurchlässigen Stoffen mit einem  $s_d$ -Wert  $\leq 0.2$  m ist der Widerstand der Luftschicht zwischen der Unterseite des Prüfkörpers und dem Trocknungsmittel bzw. der gesättigten Lösung bei der Berechnung von  $W$  zu berücksichtigen (DIN-EN-ISO-12572 2001). Die Berechnung des korrigierten Durchlasskoeffizient  $W_c$  erfolgt nach (3.13):

$$W_c = \frac{1}{\frac{A \cdot \Delta p_v}{G} \cdot \frac{d_a}{\delta_a}} \quad (3.13)$$

mit:

$W_c$	= korrigierter Wasserdampfdiffusions-Durchlasskoeffizient	[kg/(m <sup>2</sup> ·s·Pa)]
$d_a$	= Dicke der Luftschicht	[m]
$\delta_a$	= Wasserdampfdiffusions-Leitkoeffizient der Luft	[kg/(m·s·Pa)]

$$\delta_a = \frac{0.083 \cdot p_0}{R_v \cdot T \cdot p} \cdot \left( \frac{T}{273} \right)^{1.81} \quad (3.14)$$

mit:

$\delta_a$	= Wasserdampfdiffusions-Leitkoeffizient der Luft, 2.076·10 <sup>-10</sup>	[kg/(m·s·Pa)]
$p_0$	= Atmosphärendruck, 1013.25	[hPa]
$R_v$	= spezifische Gaskonstante für Wasserdampf, 461.5	[Nm/(kg·K)]
$T$	= Temperatur von im Klimaraum	[K]
$p$	= mittlerer Luftdruck im Klimaraum	[Pa]

Die Wasserdampf-Diffusionswiderstandszahl  $\mu$  ist der dimensionslose stoffspezifische Kennwert der Diffusionsmessung nach (3.15):

$$\mu = \frac{\delta_a}{\delta_{Bs}} \quad (3.15)$$

mit  $\delta_{Bs}$

$$\delta_{Bs} = W_c \cdot d \quad (3.16)$$

mit:

$\mu$	= Wasserdampf-Diffusionswiderstandszahl	[-]
$\delta_{Bs}$	= Wasserdampfdiffusions-Leitkoeffizient des Baustoff	[kg/(m·s·Pa)]
$d$	= mittlere Dicke des Prüfkörpers	[m]

Mit der Wasserdampf-Diffusionswiderstandszahl  $\mu$  multipliziert mit der Materialdicke kann die wasserdampf-diffusionsäquivalente Luftschichtdicke berechnet werden.

Die Diffusionsmessung der Materialkombinationen erfolgte mit dem gleichen Versuchsaufbau. Im Gegensatz zu den Messungen der Einzelmaterialien war die Dauer bis zum Erreichen des linearen Bereiches mit 14 Tagen doppelt so lang. Die Schichtung erfolgte wie bei der Wärmeleitfähigkeitsmessung ebenfalls ohne Klebstoff.

### 3.3.9 Wärmeleitfähigkeit

Die Messungen der Wärmeleitfähigkeit wurden mit einem Einplatten-Wärmeleitfähigkeitsmessgerät durchgeführt (Lambda-Messtechnik 2006). Die Versuchsdurchführung erfolgte nach ISO 8302 (ISO-8302 1991). Eine Messung besteht jeweils aus drei Einzelmessungen bei 10, 20 und 30 °C Probenmitteltemperatur und einer Temperaturdifferenz von 10 °C. Mit den Messwerten wird anschliessend die Wärmeleitfähigkeit bei 10 °C [ $\lambda_{10.reg}(T)$ ] sowie die Veränderung der thermischen Leitfähigkeit mit steigender Temperatur pro Kelvin ( $\Delta\lambda(T)/K$ ) anhand (3.17) bestimmt.

$$\lambda_{(T)} = \lambda_{10.reg(T)} + \Delta\lambda_{(T)/K} \cdot (T - 10) \quad (3.17)$$

mit:

$T$	= Temperatur	[°C]
$\lambda_{(T)}$	= Wärmeleitfähigkeit bei der Temperatur T	[W/(m·K)]
$\lambda_{10.reg(T)}$	= Wärmeleitfähigkeit bei 10 °C anhand der linearen Regression	[W/(m·K)]
$\Delta\lambda_{(T)/°C}$	= Veränderung der Wärmeleitfähigkeit pro Kelvin	[W/(m·K)]

Die Messung erfolgt in Abständen von 30 Sekunden, bis sich ein eindimensionales stationäres Temperaturfeld ausgebildet hat. Die Messungen an den Proben wurden jeweils beendet, wenn sich der  $\lambda_{10}$ -Wert innerhalb einer Stunde um weniger als um 1 % veränderte. Die gesamte Messdauer variierte je nach Probe, mit abnehmender Materialdicke und spezifischer Wärmekapazität des Prüfkörpers verkürzt sich die Messdauer. Für die industriell hergestellten Proben lag sie zwischen 12 und 24 Stunden, für die labortechnisch hergestellten Platten jeweils zwischen 6 und 12 Stunden. Abbildung 3.18 zeigt die Messfläche und das Messgerät mit einer eingebauten Probe.

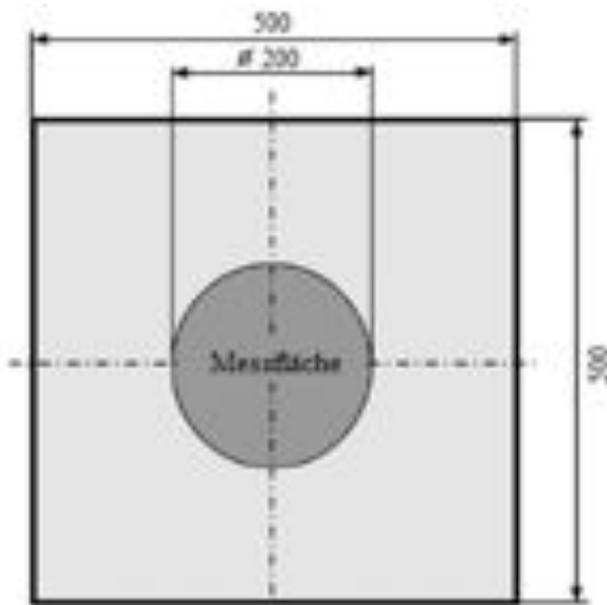


Abbildung 3.18: effektive Messfläche des Prüfgerätes (Lambda-Messtechnik 2006) (links), Wärmeleitfähigkeitsmessgerät mit eingebauter Probe (rechts).

Die tatsächliche Messfläche des Prüfgerätes ist eine Kreisfläche in der Mitte der Probe (200 mm Durchmesser). Die Bereiche ausserhalb der Messfläche dienen der Abschirmung des Temperaturfeldes. Um Messfehler zu verhindern, wird mit den aussen liegenden Kühlringen die Probenschmalfläche abgekühlt, so dass sich die durch die Raumtemperatur bedingte erhöhte Randstirnflächentemperatur nicht ins Innere des Prüfkörpers ausbreiten kann (vergl. Abbildung 3.19). Ist die Messtemperatur niedriger als die Umgebungstemperatur, verhindern die in die Randbereiche der Messplatten integrierten Temperiererringe (Kühlringe) das Eindringen von Luftfeuchte in die Messzone.

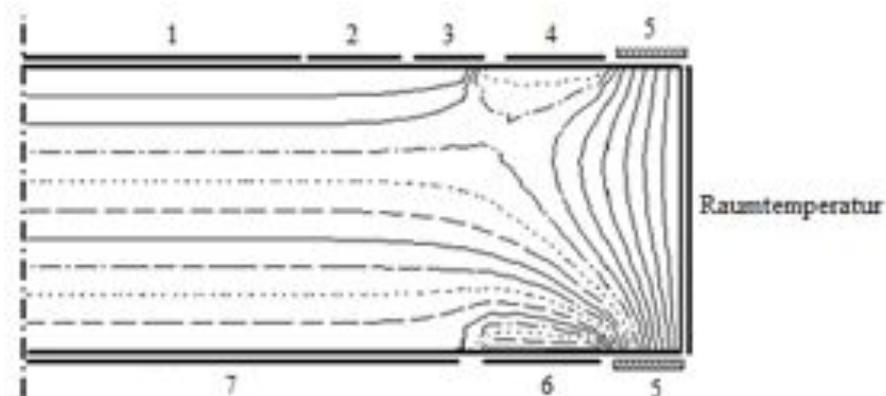


Abbildung 3.19: Temperaturfeld in der Probe bei der mittleren Temperatur (15 °C) der  $\lambda_{10}$ -Messung mit (1) Messfläche, (2) Schutzheizring 1 (20 °C), (3) Schutzheizring 2 (15 °C), (4) Kühlring (10 °C), (5) Isolation, (6) Kühlring (0 °C), (7) untere Messplatte (10 °C)

Die Querwärmeströme zwischen der Messfläche und den Temperiererringen werden mit Thermoelementen gemessen durch Regelung ausgeglichen.

Das Messgerät befand sich im Normalklima (20 °C / 65 % rel. Luftfeuchte). Die Proben für die Wärmeleitfähigkeitsmessung wurden auf die Masse von 500×500 mm zugeschnitten und jeweils im Normalklima (20 °C / 65 % rel. Luftfeuchte) bis zur Massenkonstanz gelagert. Die Messung der Materialkombinationen wurde nicht bei 10, 20 und 30 °C, sondern bei einer mittleren Temperatur von 20 °C durchgeführt. Bedingt durch die hohen Querschnitte (bis 160 mm), konnte das eindimensionale stationäre Temperaturfeld trotz Korrektur der Querwärme nicht immer erreicht werden, was dann zwangsläufig zum Messabbruch führte. Die Schichtung der Materialkombinationen erfolgte wie bei den Diffusionsmessungen ohne Klebstoff. Bei den Faserplatten mit einer Materialrohichte unter 60 kg/m<sup>3</sup> war der Standardprüfdruck von 2.5 kN/m<sup>2</sup> deutlich zu hoch, da sich unter diesem Druck die Platten bis auf zwei Drittel der Materialdicke verdichteten. Er wurde deshalb auf 0.25 kN/m<sup>2</sup> reduziert.

### **3.4 Modellierung der Wärmeleitfähigkeit**

Für die Modellierung der Wärmeübertragung in porösen Dämmstoffen durch die Kopplung der Übertragungsvorgänge Strahlung, Strömung und Leitung durch Matrix aus Fasern und Poren sind zahlreiche Modellierungsansätze bekannt. So hat zum Beispiel Du (Du, Fan et al. 2009) die optimale Porenverteilung an Faserdämmstoffen untersucht und dabei festgestellt, dass bis zu einer Porosität von 0.992 der Wärmeübergang durch Strömung vernachlässigt werden kann. Für Holz hat Hunt (Hunt, Gu et al. 2008) ein Modell für Holzzellen bis zum Fasersättigungspunkt entwickelt. Kaemmerlen (Kaemmerlen, Asllanaj et al. 2010) untersuchte die Strahlungs- und Leitungsübergänge an porösen Faserplatten aus Kiefernholz mit einer Rohdichte von ca. 170 kg/m<sup>3</sup> und stellte fest, dass der Anteil der Wärmeübertragung durch Strahlung vernachlässigbar klein ist.

Für die Modellierung wurde das Modell von Manohar (Manohar und Kochhar 2012) übernommen und mit den Ergebnissen der experimentellen Untersuchungen verwendet. Das Modell behandelt die Übertragungsvorgänge innerhalb der Fasermatrix stark vereinfacht als Summe aus Wärmeleitung des Gasanteils (Luft), Wärmeleitung des Faseranteils und der Wärmestrahlung. Die Validierung der theoretischen Ergebnisse mit Messungen anhand Proben aus Kokosnusssfasern und Zuckerrohrfasern zeigte maximale Abweichungen zwischen 0,04 % und 6.27 %. Das legte nahe, dass auch für Holzfasern eine hinreichend genaue Übereinstimmung der theoretischen und experimentellen Ergebnisse erzielbar ist.

Für den Gasanteil legt das Modell dabei den Zusammenhang zwischen dem Faseranteil und dem Luftanteil eines Probekörpers mit der Dicke  $t$ , der Fläche  $A$  und dem Temperaturgradienten  $\Delta T$  zugrunde. Die Wärmeleitfähigkeit des Volumens ist damit der Quotient aus dem Temperaturgradienten und der Probendicke multipliziert mit der Probenfläche und der Wärmeleitfähigkeit der Luft. Das ist auch für einen porösen Körper gültig, bei dem mit zunehmender Rohdichte der Luftanteil sinkt bzw. der Faseranteil ansteigt und die Extreme bei voll-

ständigem Faseranteil (keine Luft) und vollständigem Luftanteil (keine Fasern) liegen. Somit kann für den Luftanteil bei gleichbleibender Temperatur ( $\lambda = 0.026$ ,  $20\text{ °C}$ ) eines Probenkörpers nach (3.18) angenommen werden:

$$\lambda_{\text{Luft}} = \frac{-0.026}{p_s} p + 0.026 \quad (3.18)$$

mit:

$p_s$	= Dichte des Fasermaterials	[kg/m <sup>3</sup> ]
$p$	= Dichte des Probekörpers	[kg/m <sup>3</sup> ]

Für die Modellierung des Faseranteils wird angenommen, dass die Wärmeübertragung senkrecht zur Faser und an den Faserberührungspunkten erfolgt. Die Fasern sind dabei liegend und zufällig in x-y Richtung der Ebene in Schichten angeordnet, wobei das Modell für die Faseranordnung zur Vereinfachung nur zwei Extremfälle zu Grunde legt: Im ersten Fall eine jeweils um  $90^\circ$  gedrehte Stapelung der Fasern innerhalb einer Schicht mit Punktkontakten an denen die Wärmeübertragung von Faser zu Faser erfolgt. Im zweiten Fall wird eine parallele Faseranordnung der Schichten angenommen (vergl. Abbildung 3.20) bei der die Wärmeübertragung über Linienkontakte erfolgt. Die Faserschichten sind dabei zu einer Hälfte in eine Richtung angeordnet und die andere Hälfte liegt um  $90^\circ$  gedreht vor.

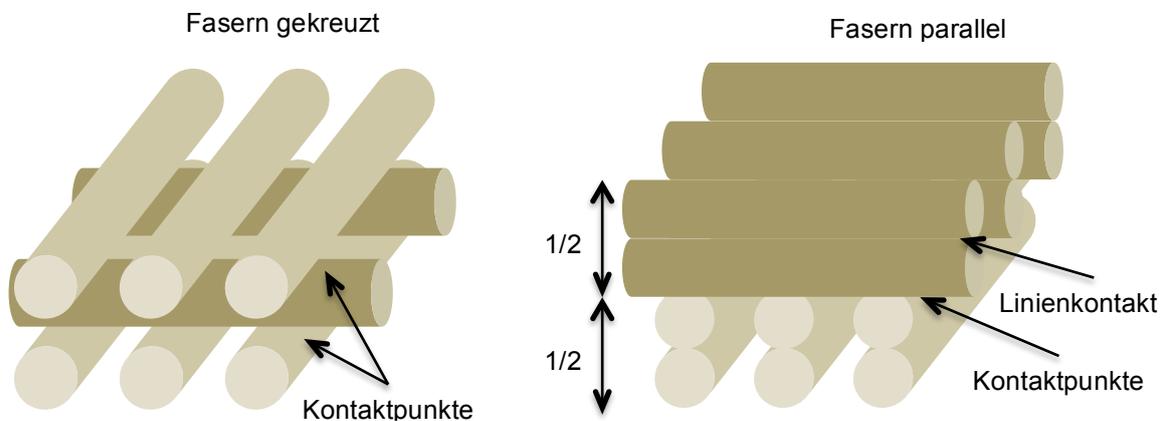


Abbildung 3.20: Vereinfachte Darstellung der Modellierung des Faseranteils (Manohar und Kochhar 2012)

Diese Vereinfachung wurde gewählt, weil die Verteilung der Faserdurchmesser an den untersuchten Fasern sehr eng war. 80 % der Faserdicken lagen im Bereich zwischen 0.12-0.32 mm für Kokosfasern und 0.24-0.36 mm für Zuckerrohrfasern, was zur Annahme führte, dass die Anzahl der Fasern und nicht die Faserdicke ausschlaggebend ist. Aufgrund der Erkenntnisse aus anderen Arbeiten konnte zudem vorausgesetzt werden, dass die Anordnung der Fasern in x-y Richtung normalverteilt ist und eine 50 % Verteilung der Fasern in x-Richtung bzw. y-Richtung eine hinreichend genaue Einschätzung der Faseranordnung darstellt. Somit

wurde für die kreuzweise (3.19) bzw. gestapelte Anordnung der Fasern (3.20) folgender Zusammenhang angenommen:

$$\lambda_{\text{Fasern-kreuzweise}} = \frac{16\lambda_s p^2}{\pi p_s^2 \left[ 3 + \frac{L}{D \left( \frac{4pL}{p_s \pi D} - 1 \right)} \right]} \quad (3.19)$$

$$\lambda_{\text{Fasern-gestapelt}} = \frac{16\lambda_s p t}{\pi^2 p_s t + \frac{\pi p_s^2 D}{p} \left[ 3 + \frac{L}{D \left( \frac{4pL}{p_s \pi D} - 1 \right)} \right]} \quad (3.20)$$

mit:

$\lambda_s$	= Wärmeleitfähigkeit der Faser quer zur Faserrichtung	[W/mK]
$p_s$	= Dichte des Fasermaterials	[W/mK]
$p$	= Dichte des Probenkörpers	[W/mK]
$L$	= Faserlänge	[m]
$D$	= Faserdurchmesser	[m]
$t$	= Probendicke	[m]

Aus den beiden Werten für  $\lambda_{\text{Fasern-kreuzweise}}$  und  $\lambda_{\text{Fasern-gestapelt}}$  wird anschliessend der Mittelwert gebildet.

Für die Wärmeübertragung durch Strahlung wird ebenfalls stark vereinfacht angenommen, dass für jede opake Faser innerhalb der Matrix die Transmission der Wärmestrahlung gleich null ist und damit jede Faser ein Strahlungsschild innerhalb der Strahlungsrichtung des Probenkörpers innerhalb des Temperaturgefälles zwischen den beiden Wärmeplatten darstellt.

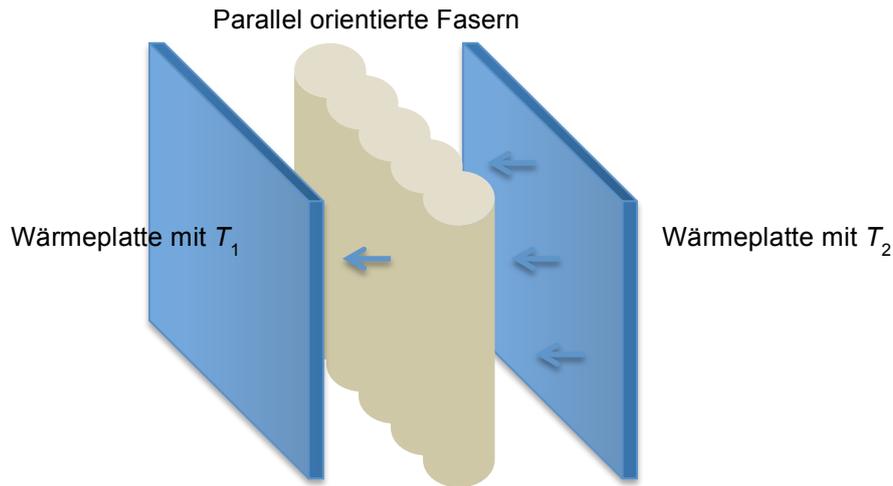


Abbildung 3.21: Vereinfachte Darstellung der Wärmeübertragung durch Strahlung (Manohar und Kochhar 2012)

Damit wird für die Wärmeübertragung durch Strahlung nach (3.21) angenommen:

$$\lambda_{\text{Strahlung}} = \frac{\sigma(T_2^4 - T_1^4)t}{(\Delta T)\left(\frac{2}{\varepsilon} - 1\right) \left\{ 1 + \frac{4pt}{p_s \pi} \left( \frac{D_1 + \frac{P_2}{P_1} D_2 + \frac{P_3}{P_1} D_3 + \dots + \frac{P_i}{P_1} D_i + \dots + \frac{P_n}{P_1} D_n}{D_1^2 + \frac{P_2}{P_1} D_2^2 + \frac{P_3}{P_1} D_3^2 + \dots + \frac{P_i}{P_1} D_i^2 + \dots + \frac{P_n}{P_1} D_n^2} \right) \right\}} \quad (3.21)$$

mit:

$\sigma$	= Stefan-Boltzmann-Konstante	
$T$	= Temperatur	[K]
$t$	= Probendicke	[m]
$\Delta T$	= Temperaturdifferenz	[K]
$\varepsilon$	= Emissivität	
$p$	= Dichte des Probenkörpers	[W/mK]
$p_s$	= Dichte des Fasermaterials	[W/mK]
$D$	= Faserdurchmesser	[m]
$P$	= prozentualer Anteil des Faserdurchmessers	

Anschließend werden die Einzelwerte für Luftleitung, Faserleitung und Strahlungsübertragung addiert. Für die Modellierung wurden Daten der eigenen Untersuchungen verwendet. Faserdicke und Häufigkeit wurden der Partikelanalyse entnommen. Die Reindichte wurde aus den Ergebnissen der Porosimetrie entnommen.

## 4 Ergebnisse und Diskussion

### 4.1 Industrielle Holzfaserplatten und Dämmstoffe

#### 4.1.1 Rohdichte / Rohdichteprofil

Die ausgewählten Dämmstoffe und -platten wiesen stark unterschiedliche Rohdichten in Abhängigkeit des Materials und der Herstellverfahren auf. Während die Dämmstoffe aus Holzfasern und Hanf sowie Stein- und Glaswolle im Rohdichtebereich von 40-70 kg/m<sup>3</sup> lagen, hatten die plattenförmigen Produkte aus Holzfasern und Steinwolle Rohdichten im Bereich von 110-290 kg/m<sup>3</sup>. Die geringste Rohdichte hatte ein Produkt aus Steinwolle mit 42,5 kg/m<sup>3</sup>. Die höchste Rohdichte wies eine Holzfaserdämmplatte aus dem Nassverfahren mit 290,3 kg/m<sup>3</sup> auf. Bei Holzfaserdämmplatten ist erkennbar, dass der Rohdichtebereich bei Platten aus dem Nassverfahren (148,5-289,3 kg/m<sup>3</sup>) insgesamt höher liegt als bei Platten aus dem Trockenverfahren (119,2-213,9 kg/m<sup>3</sup>). Abbildung 4.1 zeigt eine Übersicht der Rohdichtebereiche der industriell gefertigten Dämmstoffe gemäss Tabelle 3.2 (ohne Mineralfaserdämmvlies).

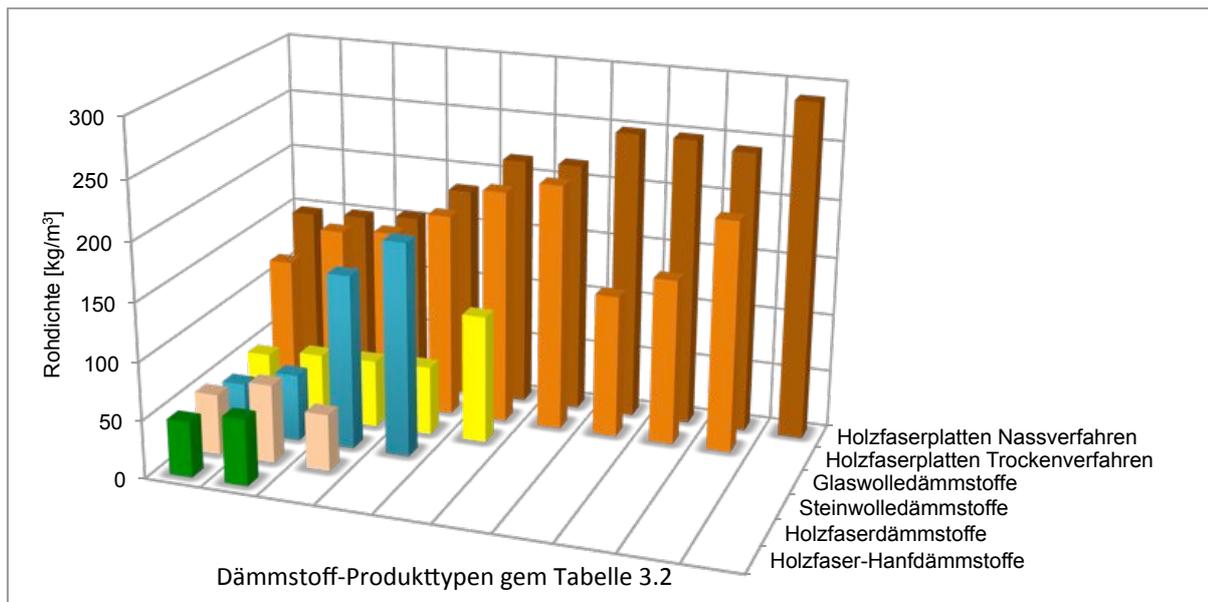


Abbildung 4.1: Rohdichtebereiche der industriell gefertigten Dämmstoff-Produkttypen

Der unterschiedliche Rohdichtebereich für Platten aus dem Nass- und Trockenverfahren ist begründet durch die Herstelltechnologie. Die einzelnen Produkttypen orientieren sich an baupraktischen und normativen Mindestanforderungen wie z.B. in DIN 4108-10 (DIN-4108-10 2008). Im Trockenverfahren werden mit durchschnittlich 30 kg/m<sup>3</sup> geringeren Rohdichten die gleichen Mindestanforderungen der Anwendungsklassen erreicht. Untersuchungen zum Tragverhalten von Holzfaserplatten als aussteifende Bepunktung von Holztafeln (Gebhardt 2012) ergaben ebenfalls, dass Plattentypen aus dem Trockenverfahren mit geringeren Raumgewichten die Festigkeiten von Plattentypen aus dem Nassverfahren erreichen. Der

Grund dafür liegt im Verfahren selbst, bei dem die getrockneten Fasern pneumatisch zu einer Matte geformt werden, um dann ohne grössere Pressdrücke zur Platte geformt werden. Zudem erfolgt der Einsatz eines Bindemittels mit sehr gutem Benetzungsverhalten (PMDI) was zu einer hohen Effizienz des Bindemittels führt. Im Gegenzug erfolgt im Nassverfahren während der Mattenformung gleichzeitig die Entwässerung mit hohen Pressdrücken, was zu einer starken Verdichtung der Fasermatrix und folglich einer erhöhten Rohdichte der Platte führt. Da die Wärmeleitfähigkeit mit der Materialdichte stark korreliert, wie für Holzfaserdämmplatten zum Beispiel von Sonderegger aufgezeigt wurde (Sonderegger und Niemz 2012), ergibt sich dadurch ein Vorteil für das Trockenverfahren, da mit geringerem Materialeinsatz und damit geringerer Rohdichte gleiche Werte der Wärmeleitfähigkeit erzielt werden, oder bei gleichbleibender Rohdichte geringere Werte der Wärmeleitfähigkeit erzielt werden. Dadurch, dass mit abnehmender Rohdichte der Anteil der Strahlung am Gesamtwärmeübergang zunimmt, kann dieser Vorteil nur für den Rohdichtebereich gelten, in dem die Strahlung als Übertragungsfunktion vergleichsweise unbedeutend ist. Kaemmerlen hatte diesen Bereich bei Rohdichten ab  $180 \text{ kg/m}^3$  angegeben (Kaemmerlen, Asllanaj et al. 2010). Zwischen Holzfaserdämmstoffen und den Holzfaser-Hanf dämmstoffen bestehen keine wesentlichen Unterschiede der Rohdichte. Bei den Glas- bzw. Steinwoll dämmstoffen mit höheren Rohdichten ( $110,7\text{-}184,6 \text{ kg/m}^3$ ) handelt es sich um Produkte für Spezialanwendungen (Wärmedämmverbundsysteme, Flachdach) mit speziell verdichteten Oberflächen oder erhöhter Druckfestigkeit.

An den industriellen Dämmstoffen wurde neben der Rohdichte auch das Rohdichteprofil ermittelt. Das Rohdichteprofil gibt Auskunft über die Rohdichteverteilung senkrecht zur Plattenrichtung und damit auch über den Wärmetransport im eingebauten Zustand der Produkte, da durch unterschiedliche Rohdichten in Richtung des Wärmestroms aufgrund unterschiedlicher Strukturen (z.B. Randzonenverdichtungen) Unterschiede in der Gesamtwärmeübertragung der Stoffe entstehen können (Zeitler 2000). Nachfolgend werden zunächst Dämmstoffe im Rohdichtebereich  $40\text{-}70 \text{ kg/m}^3$  verglichen (vergl. Abbildung 4.2)

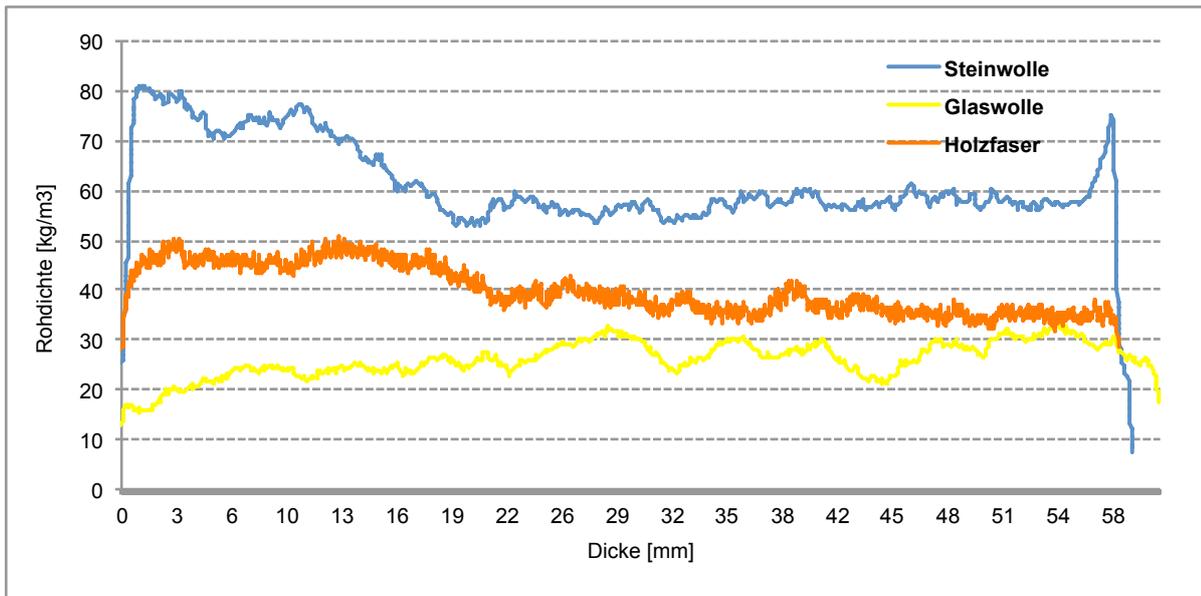


Abbildung 4.2: Rohdichteprofil eines Steinwollgedämmstoffs,  $61 \text{ kg/m}^3$ , eines Glaswollgedämmstoffs,  $26 \text{ kg/m}^3$  und eines Holzfaserdämmstoffs,  $59 \text{ kg/m}^3$

Die Rohdichteprofile der Dämmstoffe aus Holzfasern, Glasfasern und Steinwolle zeigen keine wesentlichen Unterschiede. Materialunabhängig ist die Rohdichteverteilung im Profil gleichmässig und darauf zurückzuführen, dass die Herstellung für alle drei Produkte nach gleichem Prinzip erfolgt. Das Fasermaterial wird entweder beleimt oder mit Bindefasern gemischt, anschliessend geformt bzw. gelegt und dann thermisch zur Bindung gebracht. Das Profil der Steinwollgedämmung zeigt an den Plattenoberflächen jeweils einen Ausschlag nach oben (im Bild links) bis zu etwa einem Drittel der Plattendicke (20mm). Das resultiert vermutlich aus einer leicht abweichenden Faserlegung im Produktionsprozess und kennzeichnet die Plattenunterseite. Wie in Abbildung 4.3 dargestellt, zeigen Holzfaserdämmplatten mit Rohdichten ab  $120 \text{ kg/m}^3$  jedoch deutliche Unterschiede:

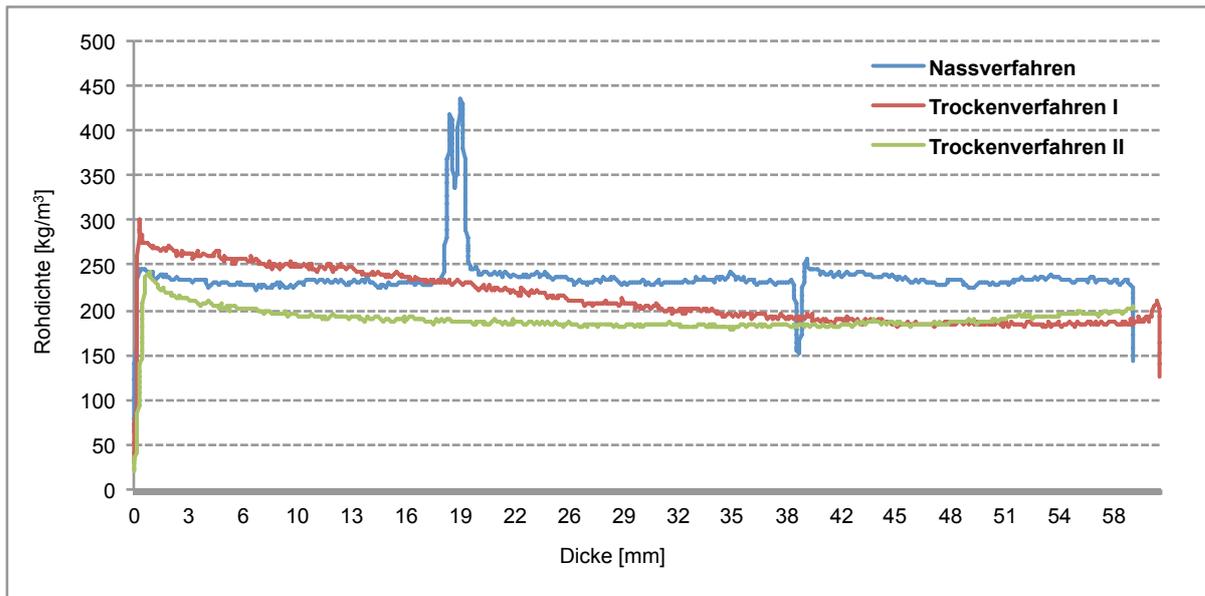


Abbildung 4.3: Rohdichteprofil einer Holzfaserdämmplatte Nassverfahren,  $243 \text{ kg/m}^3$  einer Holzfaserdämmplatte Trockenverfahren Hersteller I,  $213 \text{ kg/m}^3$  und einer Holzfaserdämmplatte Trockenverfahren Hersteller II,  $190 \text{ kg/m}^3$

Die deutlichen Ausschläge bei der Probe aus dem Nassverfahren resultieren daraus, dass es sich bei der Probe um eine aus insgesamt drei Einzellamellen (ca. 20 mm) zusammengesetzte Platte handelt. Verfahrensbedingt ist das für Gesamtdicken ab 30 mm notwendig und erfolgt entweder mit einer vollflächigen oder streifenförmigen Klebstoffschicht. Bei der gemessenen Probe handelte es sich um eine linienförmige Verleimung. Während der starke Ausschlag auf über  $400 \text{ kg/m}^3$  nach der ersten Lamellenschicht durch den Klebstoff (PVAc) begründet ist, zeigt der Ausschlag nach unten am Übergang von der zweiten zur dritten Lamelle den klebstofffreien Übergang mit einem kleineren Ausschlag der Rohdichte aufgrund der technologisch typischen Randzonenverdichtung auf der Plattenunterseite (Entwässerung des Faserstoffs auf der Siebpartie). Dieses Resultat ist zufällig und entstand durch den Probenkörperzuschnitt. Die beiden Proben aus dem Trockenverfahren unterscheiden sich ebenfalls. Während Typ I ein asymmetrisches Profil aufweist, zeigt Typ II ein symmetrisches Dichteprofil. Dieser Unterschied ist ebenfalls verfahrensbedingt. Für Typ I erfolgt die Durchströmung des Faserkuchens mit einem Dampf/Luft Gemisch zur Aushärtung des Bindemittels aus einer Richtung (von unten nach oben, in der Abbildung des Rohdichteprofiles von links nach rechts), für Typ II erfolgt die Durchströmung gleichzeitig von beiden Seiten. Das zeigt sich in der Abweichung vom Mittelwert bei Typ I, der in den äussersten Bereichen bis zu  $300 \text{ kg/m}^3$  erreicht und bis zur Dicke von 24 mm stetig abnimmt und dann unterhalb des Mittelwertes von  $213 \text{ kg/m}^3$  bis zu einer minimalen Dichte von  $180 \text{ kg/m}^3$  abnimmt. Bei Typ II ist die Abweichung nach unten vom Mittelwert ( $136 \text{ kg/m}^3$ ) lediglich minimal mit  $126 \text{ kg/m}^3$ . Die Abweichung nach oben an den Probenaussenseiten ist mit  $163 \text{ kg/m}^3$  bzw.  $171 \text{ kg/m}^3$  gering und das Dichteprofil kann als symmetrisch bezeichnet werden.

Das Verdichtungsverhalten des Faserkuchens vor der eigentlichen Formfixierung in der Aushärteeinheit kann nur teilweise mit dem Verhalten anderer Holzwerkstoffe verglichen werden, da die dort vorhandenen Pressdrücke fehlen. Trotzdem muss davon ausgegangen werden, dass die aufeinanderfolgenden Prozesse Verdichtung, Relaxation und Retardation wie in von Haas beschrieben (Haas 1998) auch im Dämmstoffverfahren vorhanden sind. Insbesondere der beschriebene Verdichtungsprozess, bei dem die untersuchten Späne selbst an den Berührungspunkten durch den Pressdruck verdichtet werden, ist aber im Dämmstoffverfahren aufgrund der fehlenden Pressdrücke stark reduziert. Es muss daher davon ausgegangen werden, dass die Fasern selbst durch die Verdichtung des Faserkuchens lediglich verformt und nicht verdichtet werden. Anhand von Verdichtungskurven für Spanplatten hatte von Haas (Haas 1998) zudem gezeigt, dass der Einfluss der Feuchte mit zunehmender Temperatur (20, 80, 110 und 140°C) ansteigt. Da in den Dämmplattenverfahren bei Temperaturen von 70-100 °C gearbeitet wird, liegt der Unterschied in den Rohdichteprofilen vermutlich daran, dass im Verfahren I (einseitige Bedampfung/Durchströmung) die einseitige Feuchtezunahme im Faserkuchen zu einer asymmetrischen Verdichtung führt. Im Verfahren II hingegen erfolgt die Feuchtezunahme beidseitig und infolge dessen auch zu einer beidseitigen Verdichtung der Randzonen.

#### **4.1.2 Feuchteaufnahme**

##### ***Sorption***

Die Feuchteaufnahme in Abhängigkeit vom Herstellverfahren wurde an insgesamt sieben industriell hergestellten Holzfaserplatten untersucht. Die Proben waren aus zwei Plattentypen aus dem Trockenverfahren und fünf Plattentypen aus dem Nassverfahren entnommen worden und wiesen Rohdichten von minimal 108 kg/m<sup>3</sup> (Trockenverfahren) bzw. 127 kg/m<sup>3</sup> (Nassverfahren) und maximal 193 kg/m<sup>3</sup> (Trockenverfahren) bzw. 264 kg/m<sup>3</sup> (Nassverfahren) auf. Damit repräsentierten sie den aktuellen Rohdichtebereich der Herstellverfahren. Zunächst wurden die Proben bis zur Massekonstanz im Normalklima (20 °C / 65 % rel. Luftfeuchte) gelagert. Die Ausgleichsfeuchten der Proben erreichten Werte von 10 % bis zu 11.1 %. Anschliessend wurden an den Proben auch Sorptionsisothermen für die Feuchtaufnahme und -abgabe ermittelt, da abweichende Ergebnisse erwartet worden waren. Allgemein liegen die Werte unterhalb der Literaturwerte von Fichtenrohholz bzw. Kiefernholz mit ca. 12 % (Niemz 1993). Abbildung 4.4 zeigt die Feuchtegehalte der Proben in Abhängigkeit der Dichte bei Normalklima sowie bei Feuchteaufnahme (Adsorption) und Feuchteabgabe (Desorption).

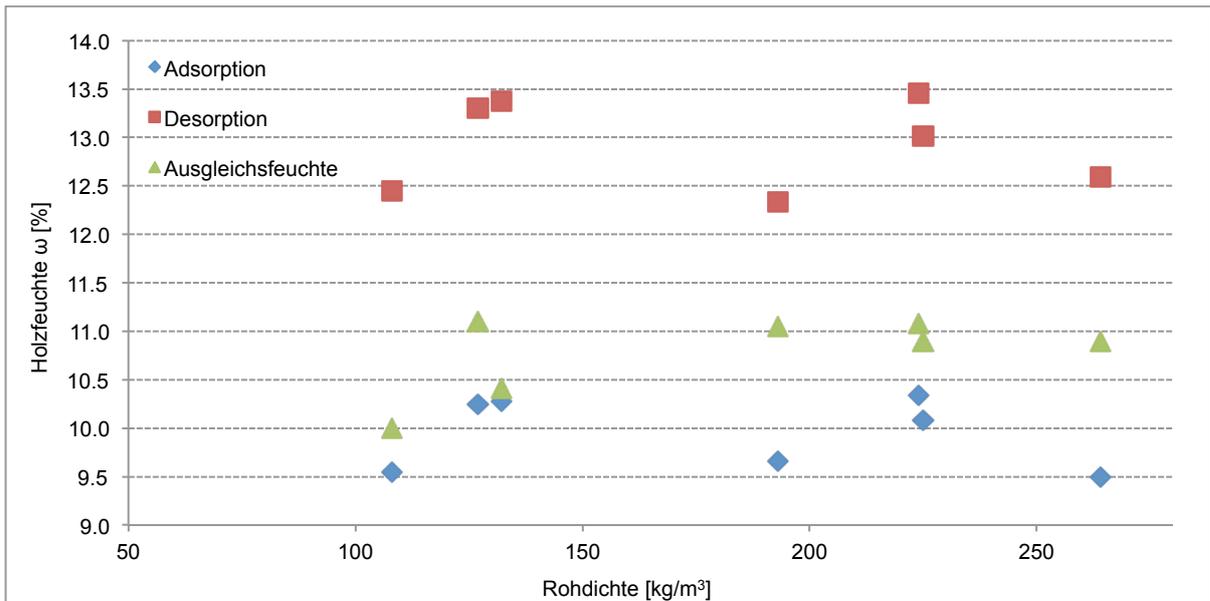


Abbildung 4.4: Feuchtegehalte von Holzfaserplatten unterschiedlicher Rohdichte bei 20 °C und 65 % rel. Luftfeuchte, Adsorption und Desorption

Zusätzlich wurde auch die Feuchtaufnahme von Mineralfaserplatten ermittelt. Abbildung 4.5 zeigt die Materialfeuchten (20 °C / 65 % rel. Luftfeuchte) von Holzfaserdämmplatten, Steinwolleplatten und Glaswolleplatten..

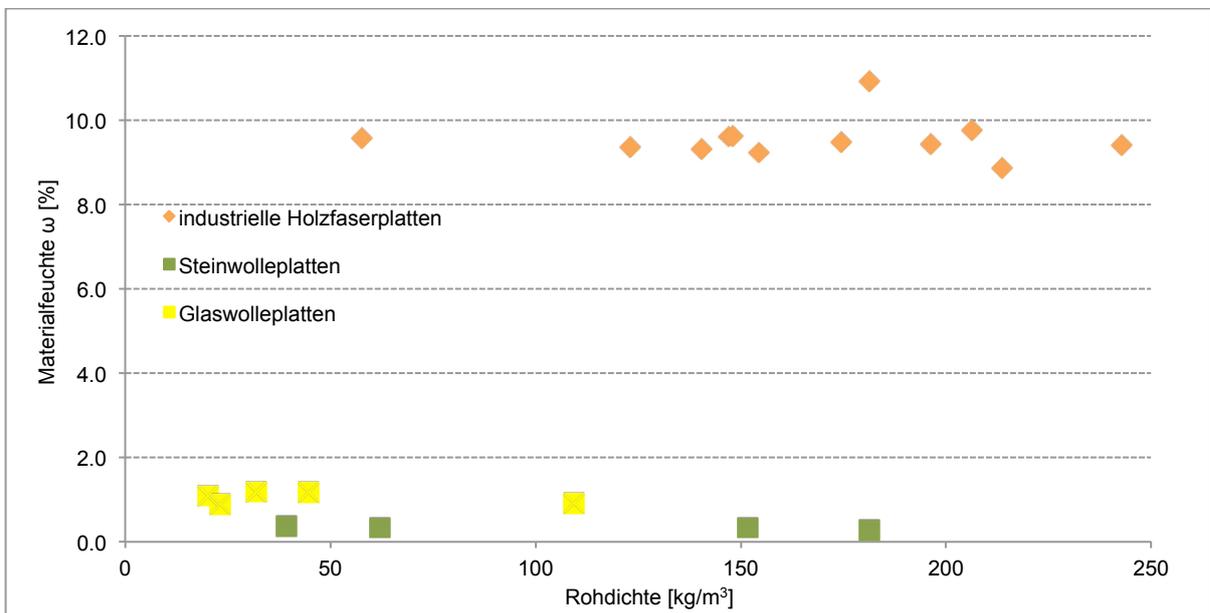


Abbildung 4.5: Feuchtegehalte bei 20° und 65 % rel. Luftfeuchte industrieller Dämmstoffe und Platten im Vergleich.

Dabei zeigte sich wie erwartet, dass Mineralfaserplatten geringere Materialfeuchten aufweisen als Holzfaserprodukte. Produkte aus Steinwolle zeigten dabei die geringsten Messwerte mit einem Minimum von 0.274 %, insgesamt lagen die Materialfeuchten nicht über 2 % und damit auf gleichem Niveau wie Dämmstoffe aus Kunststoffen. So ermittelte beispielsweise

Lakatos für Polystyrolplatten vergleichbar niedrige Werte von maximal 1,09 % (Lakatos und Kalmar 2013). Die Materialfeuchte der untersuchten Holzfaserplatten blieb jeweils über 9 %. Die Werte aller gemessenen Holzfaserproben variierten auf allen Klimastufen nur geringfügig (Standardabweichung 0.38, Variationskoeffizient 0.04), die Einzelwerte und die Mittelwerte aller Plattentypen sind in Abbildung 4.6 dargestellt.

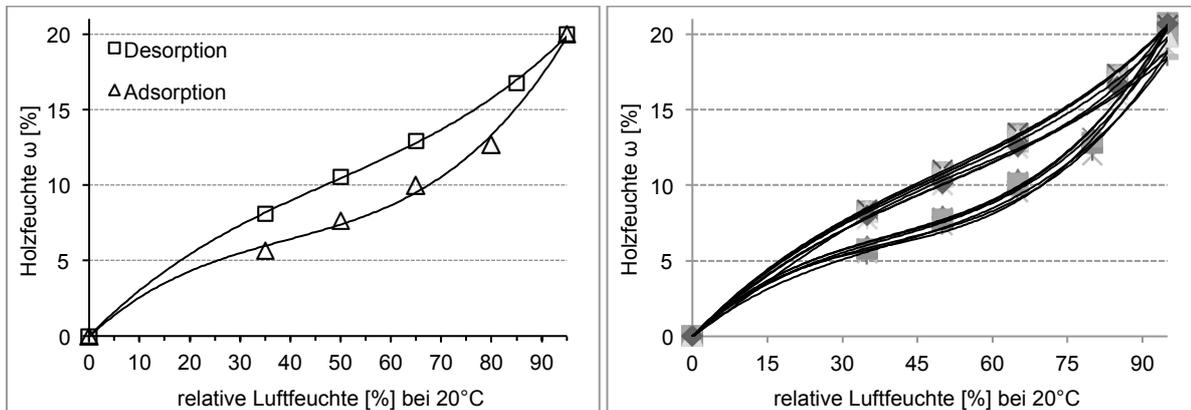


Abbildung 4.6: Sorptionsisotherme von Holzfaserdämmplatten. Mittelwerte aller Plattentypen (links) Werte einzeln (rechts).

Die Sorption in Abhängigkeit der relativen Luftfeuchte wies auch bei Holzfaserplatten den für Holz typisch s-förmigen Verlauf auf. Es zeigten sich ebenfalls unterschiedliche Werte für Adsorption und Desorption. Holzfaserplatten hatten jeweils höhere Werte für Desorption als für Adsorption. Der Unterschied lag dabei bei bis zu 3 % und damit leicht höher als bei Massivholz mit ca. 1-2 % (Niemz 1993).

Der Vergleich der Ergebnisse für Mineralfasern und Holzfasern zeigt, dass die Sorption zum größten Teil durch die Fasern selbst bestimmt wird und nicht durch die Faserzwischenräume innerhalb des Faserverbundes. Die maximale Materialfeuchte bei 95 % rel. Luftfeuchte lag für Holzfaserdämmstoffe bei 20 %. Unter Zugrundelegung des Bindungsartenmodells von Niemz (Niemz 1993) lässt sich ableiten, dass die Wassereinlagerung bei Holzfaserdämmplatten auf den gleichen Bindungsarten wie für Holz beruht, nämlich innerhalb dieses Feuchtebereich auf Chemisorption, Adsorption und Kapillarkondensation. Die freie Einlagerung von Wasser in den Zwischenräumen kann somit nicht stattfinden. Die Ursache für die erhöhten Hysteresewerte der Holzfaserplatten im Vergleich zu Vollholz ist vermutlich dadurch begründet, dass in den stärker aufgeschlossenen Fasern des Faserstoffs mehr kleine Oberflächen für Kapillarkondensation vorliegen als bei Vollholz. Die Kapillarkondensation bei Feuchteaufnahme benötigt nach Popper (Popper, Niemz et al. 2003) weniger Energie als das Leeren der Kapillaren, was dazu führt, dass der Unterschied der Ad- bzw. Desorption zunimmt. Zwischen den Herstellverfahren bestehen geringe Unterschiede. Die Materialfeuchtwerte der Produkte aus dem Nassverfahren liegen für Adsorption und Desorption innerhalb des gesamten untersuchten Rohdichtebereichs nur leicht höher als für Produkte aus dem Trocken-

verfahren. Mit zunehmender Luftfeuchte steigt dieser auf einen maximalen Unterschied von 2,12 % zwischen einer Trockenverfahrensprobe und einer Nassverfahrensprobe. Im Mittel weichen die Ergebnisse um 1.1 % bei der Adsorption bzw. 1.27 % bei der Desorption ab (vergl. Abbildung 4.7).

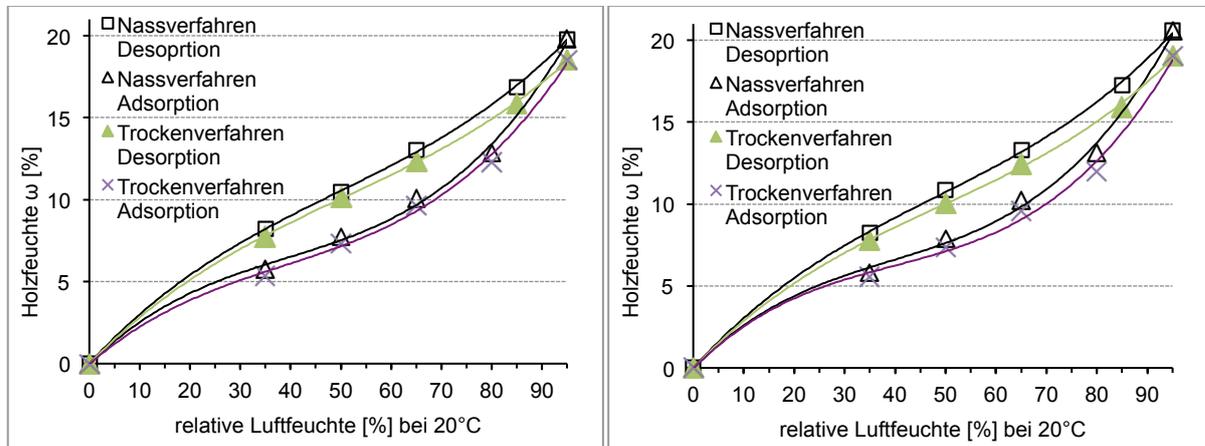


Abbildung 4.7: Sorptionsisotherme von Holzfaserdämmplatten für den oberen Dichtebereich 190 – 204 kg/m<sup>3</sup> (links) und unteren Dichtebereich 105 – 140 kg/m<sup>3</sup> (rechts).

Der Grund für die Abweichungen ist wahrscheinlich auf die Verwendung unterschiedlicher Bindemittel und unterschiedlicher Bindemittelanteile je nach Herstellverfahren zurückzuführen. Für Holzwerkstoffe ist der Einfluss von Bindemitteln auf das Sorptionsverhalten bekannt (Dunky und Niemz 2002). Mit Bindemittelanteilen von im Mittel bis zu 5 Masseprozent verfügen Holzfaserdämmplatten über deutlich geringere Mengen an Bindemittel. Da die Zusammenhänge aber nur von der Art des Bindemittels abhängen, sind sie auch auf Holzfaserverprodukte übertragbar. Bei den Produkten aus dem Trockenverfahren kam jeweils PMDI als Bindemittel zum Einsatz, das nach Niemz (Dunky und Niemz 2002) durch sein besonders gutes Benetzungsverhalten grosse Teile der Faseroberfläche bedecken und somit das Sorptionsverhalten der Holzfasern stärker beeinflussen kann als andere Bindemittel. Bei den Prüfkörpern aus dem Nassverfahren waren keine oder andere Bindemittel verwendet worden. Die verwendeten Bindemittel wurden in emulgierter Form in die wässrige Phase der Stoff suspension zugegeben, was dazu führte, dass die Wirksubstanzen später eher tropfenförmig oder als Klebstoffpartikel an der Faseroberfläche anhafteten und damit die Holzfaseroberfläche weniger bedeckten.

### **Sorptionsgeschwindigkeit**

An sieben Holzfaserproben (vergl. Tabelle 3.2) wurde die Sorptionsgeschwindigkeit ermittelt. Zwei Proben waren aus dem Trockenverfahren (Proben 12 und 17) mit 119 kg/m<sup>3</sup> bzw. 219 kg/m<sup>3</sup>. Drei Proben entstammten dem Nassverfahren (Proben 4, 6 und 22) mit 150 kg/m<sup>3</sup>, 216 kg/m<sup>3</sup> und 289 kg/m<sup>3</sup> und zwei Proben mit 52 kg/m<sup>3</sup> und 55 kg/m<sup>3</sup> waren im Dämmplat-

tenverfahren hergestellt worden (Proben 1 und 23). Abbildung 4.8 zeigt die Feuchtaufnahme bzw. Abgabe in Abhängigkeit der Zeit für die ausgewählten Proben.

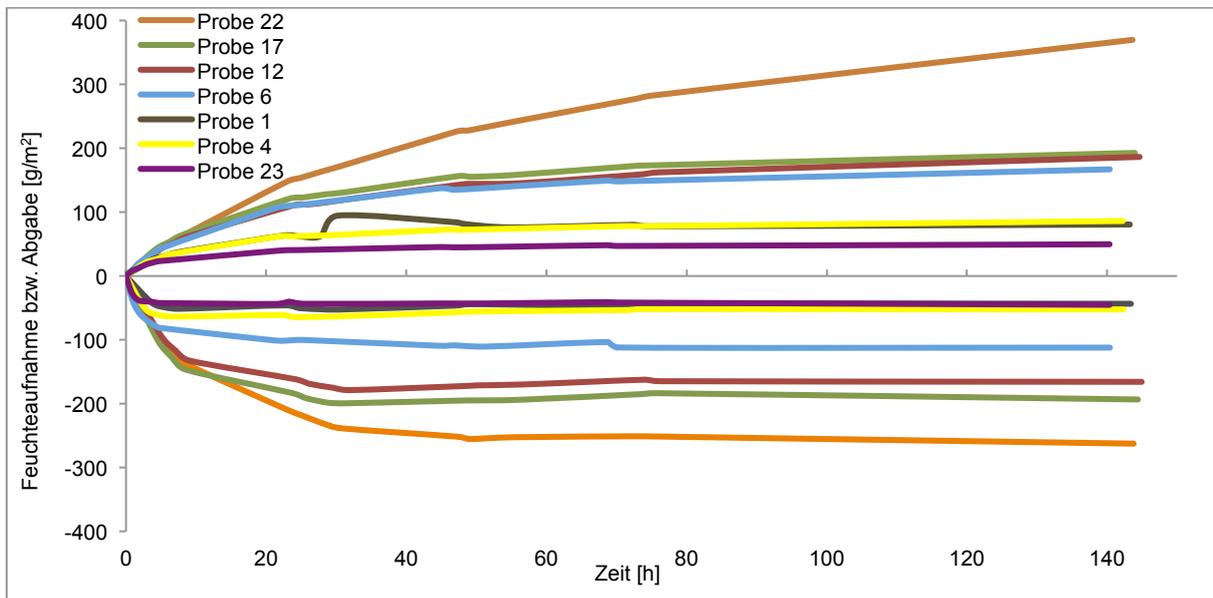


Abbildung 4.8: Sorptionsgeschwindigkeit von Holzfaserdämmplatten und -stoffen

Eine Abhängigkeit der Rohdichte zeigte sich anhand der Ergebnisse nur zum Teil. Während die Proben mit der geringsten Rohdichte (Proben 1 und 23; Holzfaserdämmstoffe) am schnellsten in den konstanten Verlauf der Feuchtaufnahme gelangten, besaß auch die Probe aus dem Nassverfahren mit der geringsten Dichte (Probe 4) eine hohe Geschwindigkeit. Die Probe aus dem Trockenverfahren mit der geringsten Dichte (Probe 12) hatte jedoch nur eine geringfügig höhere Sorptionsgeschwindigkeit als die Probe mit höherer Dichte (Probe 17). Die Probe mit der höchsten Dichte (Probe 22) wies auch die geringste Sorptionsgeschwindigkeit auf. In der folgenden Tabelle sind die Ergebnisse im Einzelnen dargestellt. Zusätzlich ist die dichteberichtigte Sorptionsgeschwindigkeit angegeben. Ein Vergleich der Ergebnisse mit früheren Untersuchungen an Vollhölzern (Zwicker 2008) zeigt, dass die Werte für Holzfaserdämmstoffe insgesamt geringer ausfallen. Für Fichtenholz waren  $A_W$ -Werte zwischen 2.8 und 2.93 ( $\text{kg}_{\text{Wasser}}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{1/2}) \cdot 10^{-4}$ ) und für Buchenholz  $A_W$ -Werte zwischen 4.37 und 5.25 ( $\text{kg}_{\text{Wasser}}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{1/2}) \cdot 10^{-4}$ ) ermittelt worden.

Tabelle 4.1: Rohdichte ( $\rho$ ), Wasseraufnahmekoeffizient (Wasserdampf) ( $A_w$ ) und dichtebereinigte Sorptionsgeschwindigkeit (Wasserdampf) ( $a_w$ ) beim Dry- und Wet-Cup-Versuch ausgewählter Holzfaserverproben

Probe		Dry-Cup			Wet-Cup		
Nr.	Verfahren	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$A_w$ [kg/(m <sup>2</sup> ·s <sup>1/2</sup> )]	$a_w$ [kg/(m <sup>2</sup> ·s <sup>1/2</sup> ) m <sup>3</sup> /kg Holz]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$A_w$ [kg/(m <sup>2</sup> ·s <sup>1/2</sup> ) ]	$a_w$ [kg/(m <sup>2</sup> ·s <sup>1/2</sup> ) m <sup>3</sup> /kg Holz]
12	Trockenverfahren	119	1.053	8.832	120	1.730	14.448
17	Trockenverfahren	219	1.453	6.633	215	1.874	8.730
4	Nassverfahren	150	0.635	4.239	149	0.934	6.263
6	Nassverfahren	216	0.582	2.701	216	2.989	13.855
22	Nassverfahren	289	0.276	0.957	288	5.674	19.708
1	Dämmstoffverfahren	50	0.278	5.512	49	0.626	12.750
23	Dämmstoffverfahren	55	0.060	1.076	49	0.455	9.294

Die Ergebnisse sind nicht zu vergleichen mit Untersuchungen der Flüssigwasseraufnahme wie beispielsweise von Sonderegger (Sonderegger 2011) an verschiedenen Holzfaserdämmplatten aus dem Nass- und Trockenverfahren. Es zeigte sich deutlich, dass Holzfaserdämmplatten eine höhere Aufnahme von Wasserdampf besaßen als Flüssigwasseraufnahme. Auch zeigt sich im Gegensatz zu den Ergebnissen der Wasserdampfaufnahme von Sonderegger die Auswirkung der Zusatzstoffe.

### **Quell-Schwindverhalten**

Ebenfalls an zwei Holzfaserdämmplatten aus dem Trockenverfahren und insgesamt fünf Proben aus dem Nassverfahren wurde das Quell-Schwindverhalten (Längenänderung und Dickenquellung) bei Klimawechsel ermittelt. Das Quell- und Schwindmass wurde für den Bereich der Adsorption (35/95 %) und der Desorption (95/35 %) gemessen. Da die Prüfkörper nach der Desorptionsmessung darrgetrocknet wurden, wurde auch das Schwindmass von 35 auf 0 % rel.LF angegeben. Abbildung 4.9 zeigt das maximale Quell- bzw. Schwindmass des Klimabereiches 0/95 (% rel. Luftfeuchte) in der Plattenebene (Prüfkörperlänge), jeweils in der Produktionsrichtung (längs) und rechtwinklig zur Produktionsrichtung (quer) sowie senkrecht zur Plattenebene (Prüfkörperdicke).

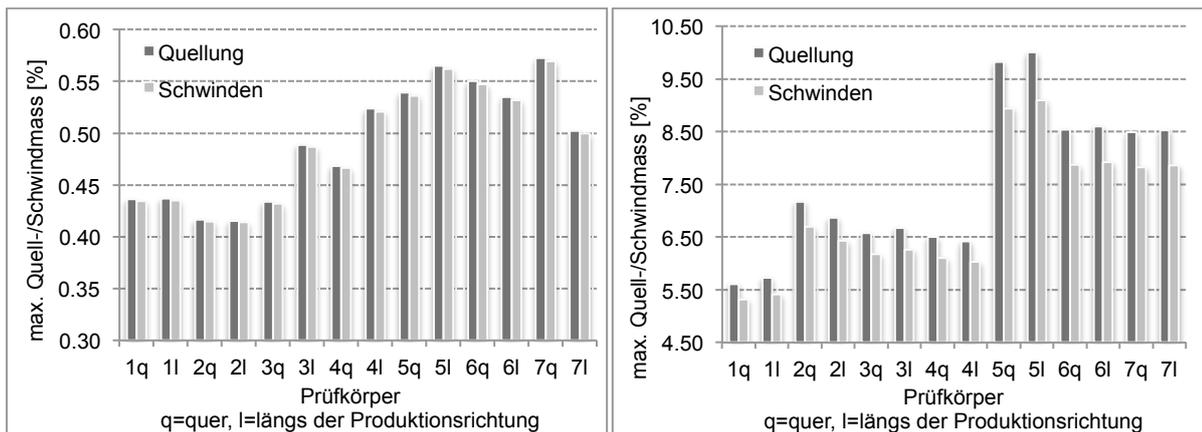


Abbildung 4.9: Maximales Quellmass und Schwindmass in Plattenebene (Prüfkörperlänge; links) und senkrecht zur Plattenebene (Prüfkörperdicke; rechts)

Die Prüfkörper aus dem Trockenverfahren (Proben 1 und 2) zeigten jeweils keinen Unterschied bei der Längenquellung bzw. der -schwindung zwischen längs oder quer zur Produktionsrichtung auf. Die Prüfkörper des Nassverfahrens (Proben 3 bis 7) hatten hingegen jeweils deutliche Unterschiede in Abhängigkeit von der Produktionsrichtung. Für die Proben drei bis fünf (gleicher Hersteller) lagen die Werte in Produktionsrichtung zwischen 0,02 % und 0,06 % höher als quer zur Produktionsrichtung. Für die Proben sechs und sieben lagen die Unterschiede genau entgegengesetzt mit 0,02 % bis 0,07 %. Die Ursache für diese Umkehrung konnte nicht ermittelt werden, möglich wäre eine ungenaue Angabe der Probenahme, die teilweise durch die Hersteller selbst vorgenommen wurde. Der Unterschied des Quell-Schwindverhaltens liegt vermutlich in der weniger gerichteten Faserorientierung beim Trockenverfahren im Gegensatz zur mehrheitlich ausgerichteten Faserorientierung des Nassverfahrens und durch die geringere mechanische Verdichtung der Fasern im Trockenverfahren. Durch das Transportieren der Fasern in der Stoffsusension vor der Siebpartie können sich einerseits bestimmte Faseranteile durch Aufschwimmen quer zur Produktionsrichtung orientieren, andererseits erfolgt an den Rollenpressen eine starke Verdichtung bzw. Stauchung des Faserverbundes, was ebenfalls zu einer teilweisen Orientierung der Fasern führen kann und damit zu höheren Werten in Querrichtung führt. Im Vergleich mit dem Quellmass europäischer Nadelhölzer in Höhe von 0.4 % waren die Ergebnisse ähnlich bzw. teilweise höher, was wiederum auf die deutlich vergrößerte Faser Oberfläche und die damit einhergehende Erhöhung der Sorption zurückzuführen ist. Die Ergebnisse der maximalen Dickenquellung zeigten, dass die Produktionsrichtung bei beiden Herstelltechnologien keinen Einfluss hat. Die Werte der Dickenquellung/Schwindung lagen erwartungsgemäss deutlich höher als diejenigen der Längenquellung und wiesen Werte zwischen 5,3 % und 10 % auf. Zudem lagen deutliche Unterschiede zwischen der Quellung und dem Schwinden vor. Die Werte der Quellung lagen für alle Proben zwischen 0,3 % und 0,91 % höher als für das Schwinden und bestätigten damit das für Holzwerkstoffe übliche Verhalten der teilweise irre-

versiblen Dickenquellung (Spring-back-Effekt) wie beispielsweise in Niemz (Niemz 1993) beschrieben. Sonderegger (Sonderegger und Niemz 2006) hatte anhand Messungen der differentiellen Quellung an Holzwerkstoffen (MDF) ebenfalls aufgezeigt, dass bei Holzwerkstoffen die Dickenquellung teilweise irreversibel ist. Abbildung 4.10 zeigt die maximalen Quellmasse für die Längen- und Dickenquellung in Abhängigkeit der Rohdichte.

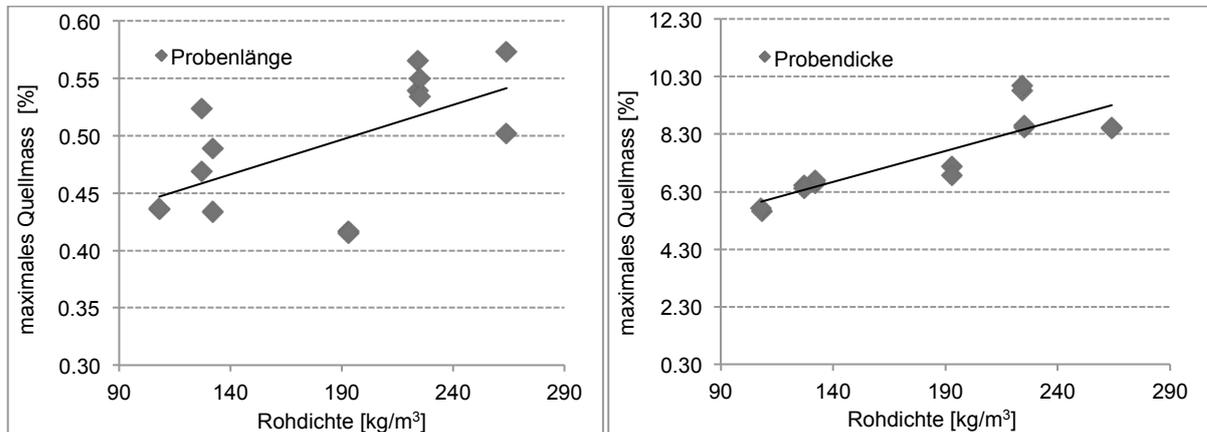


Abbildung 4.10: Maximales Quellmass für Probenlänge (links) und Probendicke (rechts) in Abhängigkeit der Rohdichte

Lediglich für die Dickenquellung lässt sich ein gesicherter Zusammenhang der Quellung mit der Rohdichte feststellen ( $R^2 = 0.73742$ ). Mit zunehmender Rohdichte stieg das maximale Quellmass an.

Bei der differentiellen Quellung in Prozent pro Änderung der relativen Luftfeuchte in Prozent zeigten sich Ergebnisse für die Längenquellung von 0,012 %/% bis 0,033 %/%. Der geringste Wert wurde für eine Dämmplatte aus dem Nassverfahren mit einer Rohdichte von 132 kg/m<sup>3</sup> ermittelt, während der grösste Wert ebenfalls bei einer Probe aus dem Nassverfahren mit einer Rohdichte von 225 kg/m<sup>3</sup> lag. Die Quellung in Probenbreite lag zwischen 0,61 %/% einer Probe aus dem Nassverfahren mit 132 kg/m<sup>3</sup> und 0,98 %/% einer Probe aus dem Trockenverfahren mit 108 kg/m<sup>3</sup>. Am höchsten lagen die Werte für die Dickenquellung mit Werten zwischen 0,38 %/% einer Probe aus dem Trockenverfahren mit 108 kg/m<sup>3</sup> und 1,42 %/% einer Probe aus dem Nassverfahren mit 264 kg/m<sup>3</sup>. Die Ergebnisse lassen keine Schlüsse auf einen Zusammenhang des Herstellverfahrens und der differentiellen Quellung zu. Abbildung 4.11 zeigt die differentielle Quellung in Plattenebene (Länge) und senkrecht zur Plattenebene (Dicke) in Abhängigkeit der Rohdichte.

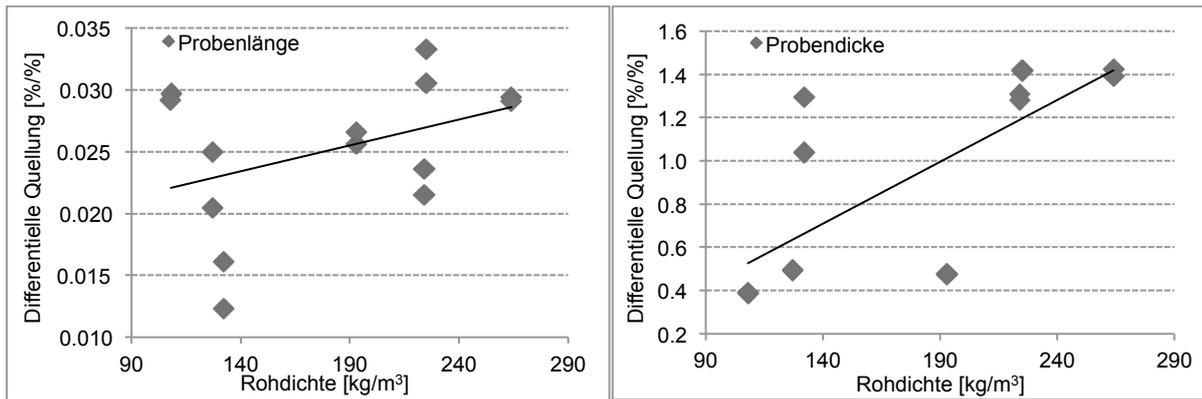


Abbildung 4.11: Differenzielle Quellung (%/% für Probenlänge (links) und Probendicke (rechts) in Abhängigkeit der Rohdichte

Die Ergebnisse der differentiellen Quellung liegen im Vergleich mit Holzwerkstoffen auf einem ähnlichen Niveau wie beispielsweise MDF Platten (Sonderegger und Niemz 2006). Hinsichtlich der deutlich geringeren Rohdichte war erwartet worden, dass die Werte in Abhängigkeit der Rohdichte geringer liegen. Andererseits wiesen die untersuchten Holzfaserverproben höhere Materialfeuchten auf als diejenigen von Holzwerkstoffen, was folglich zu höheren Werten der Quellung führte. Zudem kann auch die Menge an Bindemittel und Hydrophobierungsmittel die Werte beeinflussen, die bei herkömmlichen Holzwerkstoffen üblicherweise höher liegen.

#### 4.1.3 Feuchtetransport

Die Feuchtetransporteigenschaft der industriellen Dämmstoffe wurde anhand einer Dampf-Diffusionsmessung bestimmt. Die Dampfdiffusionsmessung ist für die bestimmungsgemäße Anwendung der Materialien wichtig und stellt eine Standard-Kenngröße für alle Dämmstoffe dar. Wenn Dämmstoffe auf der Aussenseite von Bauteilen angewendet werden, sind niedrige Werte des Dampfdiffusionswiderstandes vorteilhaft, damit in der Dämmschicht keine Feuchteanreicherung entsteht. Die Messungen erfolgten an zwei Holzfaserverplatten aus dem Trockenverfahren und sechs aus dem Nassverfahren. Zusätzlich erfolgten Messungen an Holzfaserver- und Hanffaserverdämmstoffen. Die Rohdichte der geprüften Proben lag im Bereich von  $49 \text{ kg/m}^3$  (Dämmstoff aus Hanf und Dämmstoff aus Holzfaserver) bis  $288.8 \text{ kg/m}^3$  (Dämmplatte; Nassverfahren) und deckte damit den gesamten Rohdichtebereich der Probensammlung ab. Abbildung 4.12 zeigt die Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl in Abhängigkeit der Rohdichte.

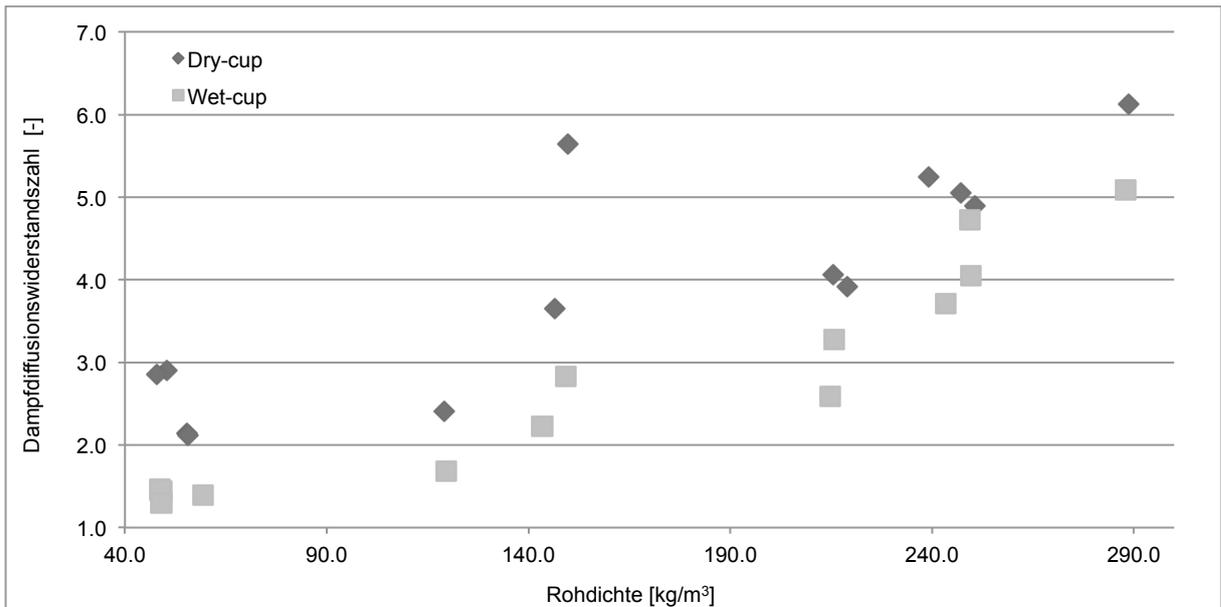


Abbildung 4.12: Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl in Abhängigkeit der Rohdichte

Mit zunehmender Rohdichte der Materialien nahm auch der Diffusionswiderstand zu. Die Bestimmtheitsmasse lagen mit 73% für den Dry-cup Versuch bzw. 88 % für den Wet-cup Versuch hoch, und es kann angenommen werden, dass eine gesicherte Abhängigkeit der Bezugsgrößen vorhanden ist. Der Unterschied zwischen den Dry-cup Ergebnissen und den Wet-cup Ergebnissen lag im Mittel bei  $\mu$  1.2. Den geringsten Unterschied wies eine Dämmplatte aus dem Trockenverfahren mit  $247 \text{ kg/m}^3$  und einer Differenz von  $\mu$  0.3 auf. Der grösste Unterschied mit einer Differenz von  $\mu$  2.8 lag ebenfalls bei einer Dämmplatte aus dem Trockenverfahren mit  $149 \text{ kg/m}^3$  vor. Den geringsten Wert mit  $\mu$  1.3 hatte ein Dämmstoff aus Holzfaser und Hanf mit einer Rohdichte von  $55 \text{ kg/m}^3$ . Den höchsten Wert mit  $\mu$  6.1 hatte eine Dämmplatte aus dem Nassverfahren mit  $288 \text{ kg/m}^3$ . Abbildung 4.13 zeigt die Dampfdiffusionswiderstandszahlen in Abhängigkeit der Rohdichte für beide Herstellverfahren.

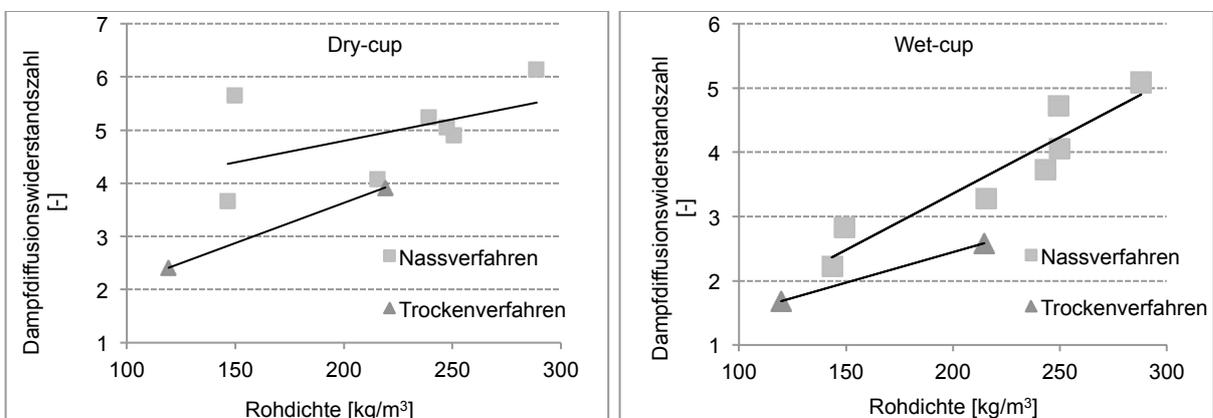


Abbildung 4.13: Dampfdiffusionswiderstandszahl in Abhängigkeit der Rohdichte für Dämmplatten im Nass- und Trockenverfahren für Dry-cup Ergebnisse (links) und Wet-cup Ergebnisse (rechts).

Die Proben aus dem Trockenverfahren wiesen niedrigere Werte auf als die Proben des Nassverfahrens. Die Ursache dafür liegt in der unterschiedlichen Behandlung der Fasern innerhalb des Produktionsprozesses. Der höhere Anteil an mechanisch verhakten Fasern innerhalb der Matrix beim Nassverfahren anstelle von an den Kreuzungspunkten verklebten Fasern im Trockenverfahren kann nach dem multifick'schen Transportmodell (Frandsen et al.) dazu führen, dass im Nassverfahren der Feuchttransportweg durch die Zellwände bzw. -bestandteile anteilig höher liegt als im Trockenverfahren. Zudem ist verfahrensbedingt der Anteil an Fremdstoffen, die sich reduzierend auf die Diffusion auswirken können, innerhalb des Faserverbundes beim Nassverfahren grösser, da das Prozesswasser im Kreislauf verwendet wird und Verunreinigungen (Holzbestandteile, Chemikalien) besitzt. Anhand einer Dämmplatte aus dem Nassverfahren wurde der Einfluss der Dicke untersucht. Bei gleichem Rohdichtebereich ( $239\text{-}251\text{ kg/m}^3$ ) wurden jeweils Proben mit 20 mm, 40 mm und 60 mm Dicke gemessen. Sowohl im Dry-cup Versuch ( $\mu$ -Werte: 5.2; 4.9, 5.1), als auch im Wet-cup Versuch ( $\mu$ -Werte: 3.7, 4.1, 4.7) lagen keine wesentlichen Unterschiede vor. Die leichte Zunahme bei letzteren resultiert aus der Schichtung der Einzellamellen für grössere Plattendicken im Nassverfahren und den zusätzlichen Luftschichten dazwischen, die einen erhöhten Diffusionswiderstand durch die zunehmende Anzahl an Diffusionsübergängen zwischen den Einzelplatten bewirken. Zusätzlich wurde an einem Holzfaserdämmstoff mit  $55\text{ kg/m}^3$  die Auswirkung der Diffusionsrichtung untersucht. Dieser Probentyp war ausgewählt worden, weil grosse Unterschiede in der Probenoberfläche vorhanden waren. Durch die pneumatische Vlieslegung in der Herstellung verfügte eine Plattenseite über deutlich mehr Feinfaseranteile (vergl. Anhang 7.2). Eine Richtungsabhängigkeit der Dampfdiffusionswerte bestand an den Proben nicht. Die Ergebnisse waren für beide Diffusionsrichtungen sowohl im Dry-cup Versuch als auch im Wet-cup Versuch entweder gleich (Dry-cup:  $\mu$ -Wert 2.9) oder nur gering abweichend (Wet-cup:  $\mu$ -Wert 1.4 und 1.5).

Für die Diffusionsmessungen an den Materialkombinationen zeigt Tabelle 3.2 die Ergebnisse der geprüften Kombinationen in den Dry- und Wet-Cup-Versuchen. Bei den Kombinationen 1 bis 3 wurde ein Hochleistungsdämmstoff als Mittellage eingesetzt, in allen anderen Kombinationen kamen Holzfaserdämmplatten bzw. Dämmstoffe aus Holzfasern oder Hanffasern zum Einsatz. Die Kombinationen 1 bis 3 wiesen die niedrigsten Dicken unter 85 mm auf. Die grösste Schichtdicke hatte Kombination 4 mit 156.6 mm. Der Rohdichtebereich aller Kombinationen lag zwischen  $108\text{ kg/m}^3$  (4, Dry-Cup) und  $284\text{ kg/m}^3$  (3, Wet-Cup). Die Kombination 7 war zudem die einzige mit einer um 25 mm dickeren Mittelschicht als die Aussenschichten. Die Mittelschichten aller Kombinationen ausser bei Probe 1 wiesen eine tiefere Rohdichte als die Aussenschichten auf. Die grösste Dichtedifferenz zwischen Mittel- und Aussenschicht besaßen die Kombinationen 8 und 9 mit ca.  $200$  und  $230\text{ kg/m}^3$ .

Tabelle 4.2: Dicke und Rohdichte der einzelnen Schichten

Dry-Cup-Versuch					Wet-Cup-Versuch											
Schichtdicke [mm]					Rohdichte [kg/m <sup>3</sup> ]				Schichtdicke [mm]				Rohdichte [kg/m <sup>3</sup> ]			
Nr.	1	2	3	Total	1	2	3	Total	1	2	3	Total	1	2	3	Total
1	40.0	4.6	39.8	84.3	146	167	148	148	40.1	4.2	39.5	83.8	148	171	148	149
2	35.2	4.2	35.2	74.5	215	160	216	213	35.3	4.2	35.2	74.8	218	164	216	215
3	35.2	4.3	35.3	74.8	288	157	290	282	35.2	4.4	35.0	74.6	291	154	293	284
4	60.0	36.3	60.3	156.6	125	50	125	108	60.0	36.3	60.3	156.0	126	53	126	110
5	39.8	36.2	39.9	115.9	145	49	145	115	40.1	37.0	39.9	117.0	145	53	146	116
6	39.8	32.9	40.2	112.8	146	49	146	118	40.2	32.2	40.1	112.5	145	51	146	118
7	35.0	60.0	35.0	130.1	213	126	215	173	35.2	60.0	35.1	130.2	216	126	215	174
8	35.3	32.9	35.2	103.5	248	51	249	187	35.3	33.7	35.4	104.4	249	50	248	186
9	35.4	36.2	35.2	106.9	286	53	290	209	35.1	35.9	35.2	106.2	290	56	265	206
10	35.2	39.9	35.2	110.3	250	147	251	213	35.6	39.7	35.6	110.8	249	147	250	214

Tabelle 4.3 zeigt Angaben über die Materialfeuchte sowie den Feuchtegradient und Konzentrationsdifferenz der Dry- und Wet-Cup-Versuche der Materialkombinationen.

Tabelle 4.3: Feuchtebezogene Angaben der Dry- und Wet-Cup-Versuche der Materialkombination

Dry-Cup-Versuch					Wet-Cup-Versuch											
Feuchte [%]					FG [%/m]	$\Delta C$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Feuchte [%]					FG [%/m]	$\Delta C$ [kg/m <sup>3</sup> ]			
Nr.	Feuchte Mittel vor der Messung 20°C/65%r.LF			Feuchte Mittel nach der Messung	$\Delta$ Feuchteabnahme	Feuchtegradient	Konzentrationsdifferenz	Feuchte Mittel vor der Messung 20°C/65%r.LF			Feuchte Mittel nach der Messung	$\Delta$ Feuchtezunahme	Feuchtegradient	Konzentrationsdifferenz		
	1	2	3					1	2	3						
1	10.0	9.5	1.2	6.6	7.6	-2.4	-56.2	-6.38	10.4	11.6	2.7	18.2	14.1	3.8	90.0	10.19
2	10.0	9.5	0.8	6.7	7.8	-2.2	-61.2	-8.81	10.3	11.5	1.9	16.6	13.4	3.1	83.1	12.09
3	9.5	8.6	1.0	5.8	7.0	-2.5	-66.9	-12.88	9.5	10.6	1.9	17.5	13.6	4.1	110.9	21.47
4	10.1	9.5	6.5	6.6	7.9	-2.2	-27.8	-4.26	10.0	9.5	11.6	16.7	13.5	3.5	45.1	7.03
5	10.4	9.7	6.5	6.4	7.9	-2.5	-43.9	-5.30	10.4	11.5	11.9	18.7	14.6	4.2	72.0	8.86
6	10.5	9.6	7.7	6.3	7.9	-2.6	-46.2	-5.56	10.6	11.4	15.1	18.4	14.9	4.4	77.4	9.31
7	10.4	9.9	8.3	6.2	8.1	-2.3	-34.4	-7.03	10.4	11.1	12.3	17.2	13.5	3.1	47.8	9.81
8	10.5	9.4	7.5	6.1	7.8	-2.7	-53.0	-9.26	10.5	11.3	14.8	17.8	14.6	4.1	78.0	13.68
9	9.6	8.6	6.3	5.6	7.0	-2.6	-48.8	-9.97	9.8	10.6	11.4	17.6	13.9	4.1	77.2	15.36
10	10.5	9.8	8.4	6.3	8.2	-2.3	-43.8	-9.32	10.3	11.0	13.1	17.9	13.9	3.6	65.7	14.09

Die Ausgleichsfeuchte beim Normalklima vor der Messung befand sich bei allen Prüfkörpern im Bereich von ca. 9.5 % bis 10.5 %. Die Spannweite von 1 % war bei den Kombinationen deutlich kleiner als bei den Einzelmessungen, bei denen sie bei 3 % lag. Zwischen den Dry- und Wet-Cup-Versuchen lag der maximale Unterschied des Feuchtegehaltes vor der Messung innerhalb einer Kombination bei Probe 1 mit 0.4 %.

Bei den Dry-Cup-Versuchen nahm der Feuchtegehalt in Diffusionsrichtung deutlich ab, während der Feuchtegehalt der Schichten in Diffusionsrichtung bei den Wet-Cup-Versuchen anstieg. Der Unterschied der  $\Delta$ -Feuchteabnahme lag bei den Dry-Cup-Versuchen im Bereich von -2.2 % bis -2.7 %. Bei den Wet-Cup-Versuchen lag die  $\Delta$ -Feuchtezunahme wie bei den Einzelmessungen im Bereich von +3.1 % bis +4.4 %. Bei den Prüfkörpern 1 bis 3 zeigte sich, dass bei gleicher Mittelschicht der Feuchtegradient und die Konzentrationsdifferenz mit steigender Rohdichte zunehmen. Bei den Kombinationen 4 bis 10 war eine Zunahme des Feuchtegradienten nicht ersichtlich. Erkennbar war, dass nicht die Rohdichte der Mittelschicht, sondern diejenige der Aussenschichten die Messergebnisse bestimmte. Bei Prüfkörper Nr. 9 lagen der Feuchtegradient und die Konzentrationsdifferenz am höchsten. Die grossen Dichtedifferenzen zwischen Aussen- und Mittelschicht bei den Proben Nr. 8 und 9, sowie die hohe Rohdichte der Mittelschicht bei den Proben Nr. 7 und 10 liessen einen Vergleich der Ergebnisse nicht zu. Tabelle 4.4 zeigt die Messergebnisse der Dry- und Wet-cup Versuche.

Tabelle 4.4: Messergebnisse der Dry- und Wet-Cup-Versuche bei Materialkombinationen

Nr.	$\frac{g}{[kg/m^2 \cdot s]} \cdot 10^{-4}$	$\mu$ [-]	$s$ [-]	$v$ [-]	$s_d$ [m]	$s_d$ gerechnet [m]	Diff [%]
<b>Dry-cup</b>							
1	2.07	3.3	0.08	2.6	0.276	0.348	20.68
2	2.14	3.6	0.16	4.4	0.265	0.332	20.16
3	1.21	6.4	0.14	2.2	0.480	0.488	1.71
4	1.77	2.1	0.05	2.2	0.326	0.437	25.41
5	1.93	2.6	0.04	1.7	0.296	0.370	20.07
6	1.94	2.6	0.06	2.3	0.293	0.392	25.27
7	1.57	2.8	0.02	0.7	0.366	0.421	13.11
8	1.35	4.2	0.16	3.9	0.430	0.442	2.78
9	1.14	4.8	0.36	7.5	0.514	0.511	-0.64
10	1.18	4.5	0.13	3.0	0.492	0.578	14.87
<b>Wet-cup</b>							
1	1.63	2.1	0.05	2.5	0.177	0.210	15.88
2	1.67	2.4	0.05	2.2	0.179	0.214	16.35
3	0.86	4.7	0.24	5.1	0.354	0.392	9.77
4	1.20	1.6	0.04	2.7	0.279	0.292	4.53
5	1.46	1.7	0.02	1.3	0.199	0.226	12.05
6	1.50	1.7	0.00	0.2	0.194	0.228	15.01
7	1.07	2.2	0.01	0.3	0.282	0.283	0.51
8	0.97	3.0	0.08	2.7	0.310	0.335	7.49
9	0.79	3.6	0.15	4.1	0.385	0.408	5.68
10	0.85	4.1	0.06	1.5	0.454	0.449	-1.01

Die Wasserdampf-Diffusionsstromdichte  $g$  nahm bei allen Kombinationen mit Ausnahme von Prüfkörper 10 mit steigender mittlerer Rohdichte ab. Die Ergebnisse der Wasserdampf-Diffusionswiderstandszahl  $\mu$  zeigten den starken Einfluss der Rohdichte auf den Feuchtedurchgang. So nahm  $\mu$  mit steigender Rohdichte bei allen Kombinationen deutlich zu. Prüfkörper 4 wies bei den Dry- und Wet-Cup-Ergebnissen mit  $\mu$  2.1 bzw.  $\mu$  1.6 den kleinsten Messwert auf und war somit die dampfdurchlässigste Kombination, bei der eine im Nassverfahren hergestellte Platte mit einer im Trockenverfahren hergestellten kombiniert wurde. Dass bei dieser Kombination trotz hoher Diffusionsoffenheit eine hohe wasserdampfdiffusionsäquivalente Luftschichtdicke von 0.326 m bzw. 0.279 m vorhanden war kann mit der hohen Probendicke von ca. 156 mm begründet werden. Die Messergebnisse wurden mit den theoretisch ermittelten Werten aus den Messungen der Einzelmaterialien verglichen. Die Werte der wasserdampfdiffusionsäquivalenten Luftschichtdicke wurden dabei aus den Einzelwerten addiert. Bei der Mehrheit der Prüfkörper zeigten sich starke Abweichungen, im Maximum von bis zu 25 % bezogen auf den theoretischen Wert der wasserdampfdiffusionsäquivalenten Luftschichtdicke. Abbildung 4.14 zeigt den Vergleich der simulierten (gerechneten) Ergebnisse mit den gemessenen Ergebnissen. Im Dry-cup Versuch lagen nur für die Proben 3 und 9 die theoretischen und experimentellen Werte gleich, im Wet-cup Versuch die Proben 7 und 10. Alle anderen Proben hatten jeweils höhere theoretische Werte.

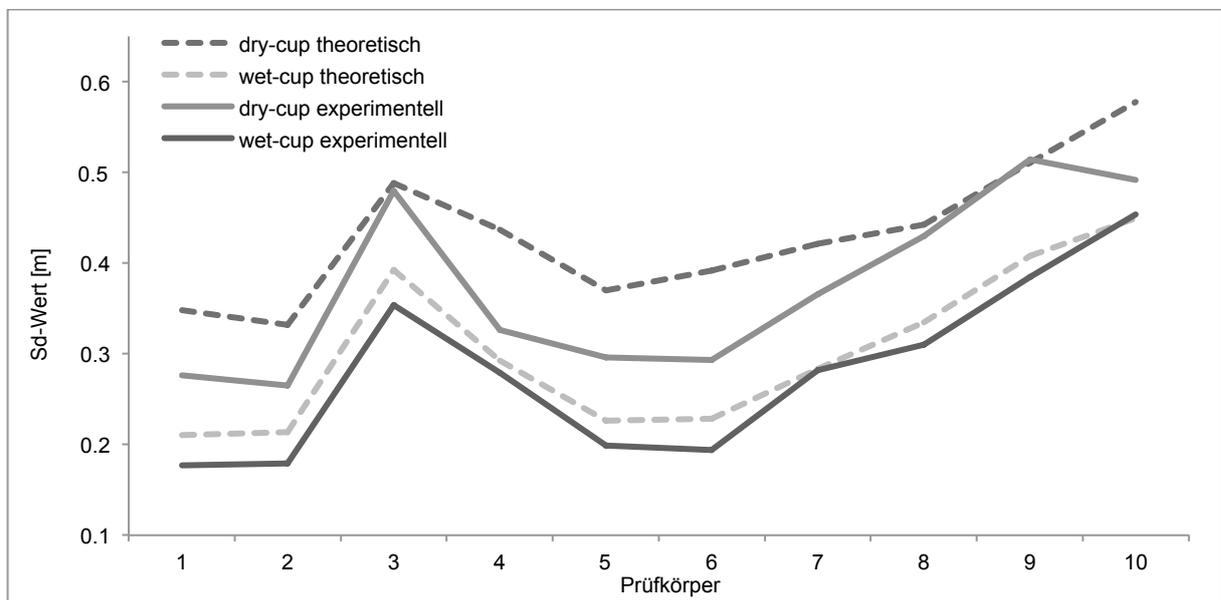


Abbildung 4.14: Vergleich der berechneten und gemessenen  $S_D$ -Werte der Prüfkörper

Abbildung 4.15 zeigt die Wasserdampf-Diffusionswiderstandszahl  $\mu$  in Abhängigkeit der Rohdichte. Für beide Messungen zeigte sich die Abhängigkeit deutlich (Bestimmtheitsmass von 86.1 % bei Dry-Cup und 77.7 % bei Wet-Cup) und weicht von den Ergebnissen der Einzelmaterialien nicht ab.

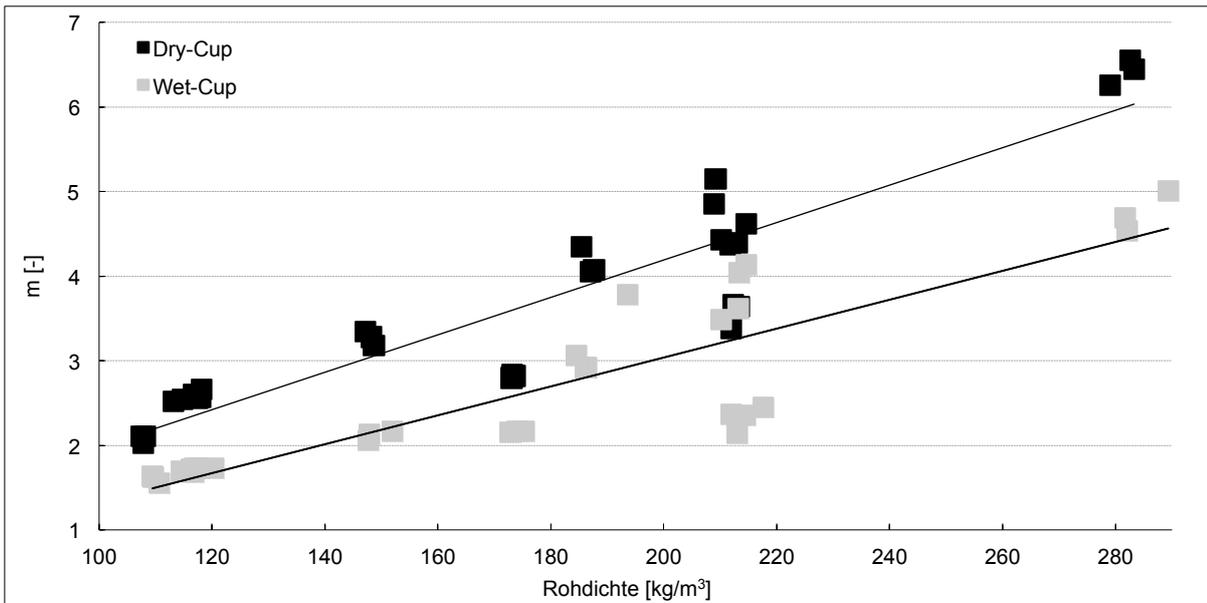


Abbildung 4.15: Wasserdampf-Diffusionswiderstandszahl in Abhängigkeit der Rohdichte bei Materialkombinationen

#### 4.1.4 Wärmeleitfähigkeit

Die Wärmeleitfähigkeit wurde an insgesamt 33 verschiedenen Proben industrieller Herkunft ermittelt. Neben Produkten von Holzfaserherstellern wurden zusätzlich Produkte aus Mineralfasern (Steinwolle und Glaswolle) geprüft. Der Dichtebereich reichte von  $43 \text{ kg/m}^3$  (Steinwollendämmstoff) bis zu  $289 \text{ kg/m}^3$  (Holzfaserdämmplatte). Abbildung 4.16 zeigt die Wärmeleitfähigkeit in Anhängigkeit der Rohdichte, jeweils als Mittelwerte von drei Einzelmessungen.

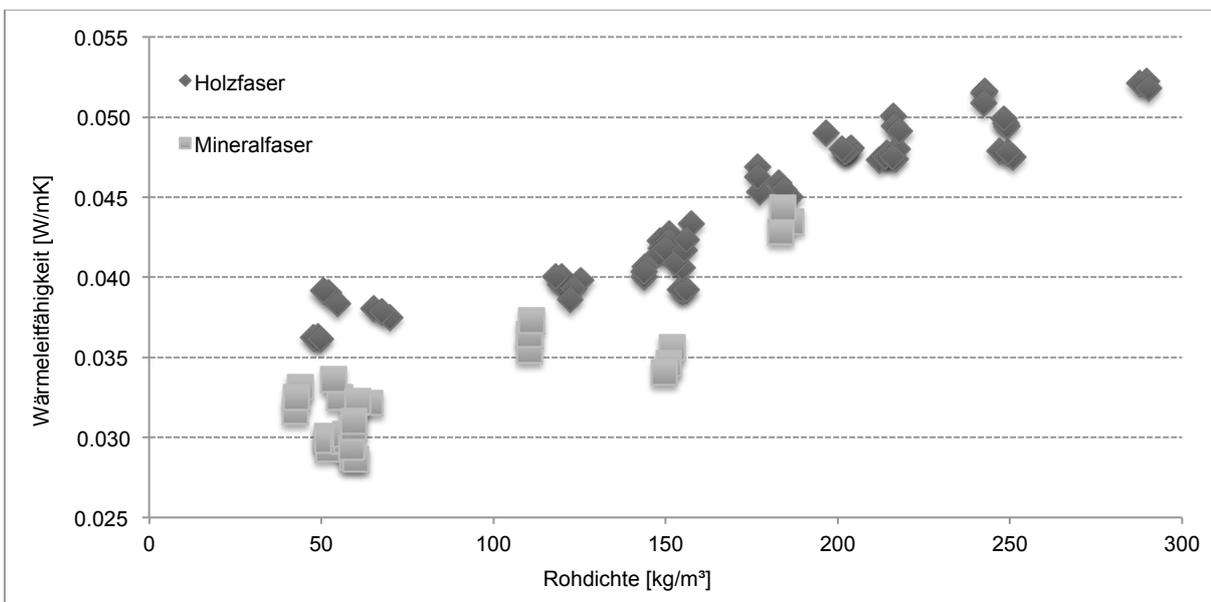


Abbildung 4.16: Wärmeleitfähigkeit industrieller Dämmstoffe in Abhängigkeit der Rohdichte. Angaben als Mittelwerte dreier Einzelmessungen.

Für beide Materialgruppen liess sich die Wärmeleitfähigkeit gut als Funktion der Rohdichte beschreiben. Die Bestimmtheitsmasse lagen mit 87 % für Holzfaserprodukte und 77 % für Mineralfaserprodukte hoch. Mit zunehmender Rohdichte stieg die Wärmeleitfähigkeit. Direkt ersichtlich wird, dass Mineralfaserprodukte im gleichen Rohdichtebereich niedrigere Werte als Holzfaserprodukte aufweisen. Während Mineralfaserprodukte über Werte von minimal 29 mW/(mK) bei einer Rohdichte von 58,6 kg/m<sup>3</sup> verfügten, lagen die minimalen Werte für Holzfaserprodukte mit einer Rohdichte von 48 kg/m<sup>3</sup> bei 36 mW/(mK). Auch im höheren Rohdichtebereich (110-180 kg/m<sup>3</sup>) lagen die Ergebnisse drei bis zehn Milliwatt niedriger als bei Holzfaserprodukten. Die Abbildungen 4.17 und 4.18 zeigen die Wärmeleitfähigkeit aller Proben detaillierter für die beiden Rohdichtebereiche 100-300 kg/m<sup>3</sup> bzw. 30-70 kg/m<sup>3</sup>.

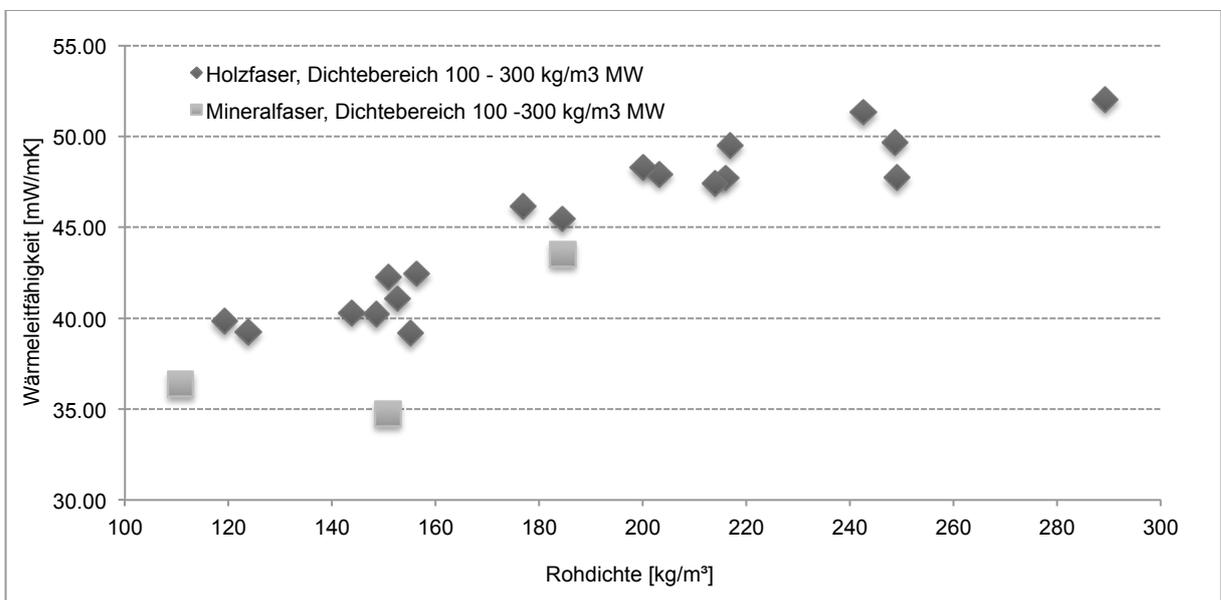


Abbildung 4.17: Wärmeleitfähigkeit industrieller Dämmstoffe in Abhängigkeit der Rohdichte für den Dichtebereich 100-300 kg/m<sup>3</sup>.

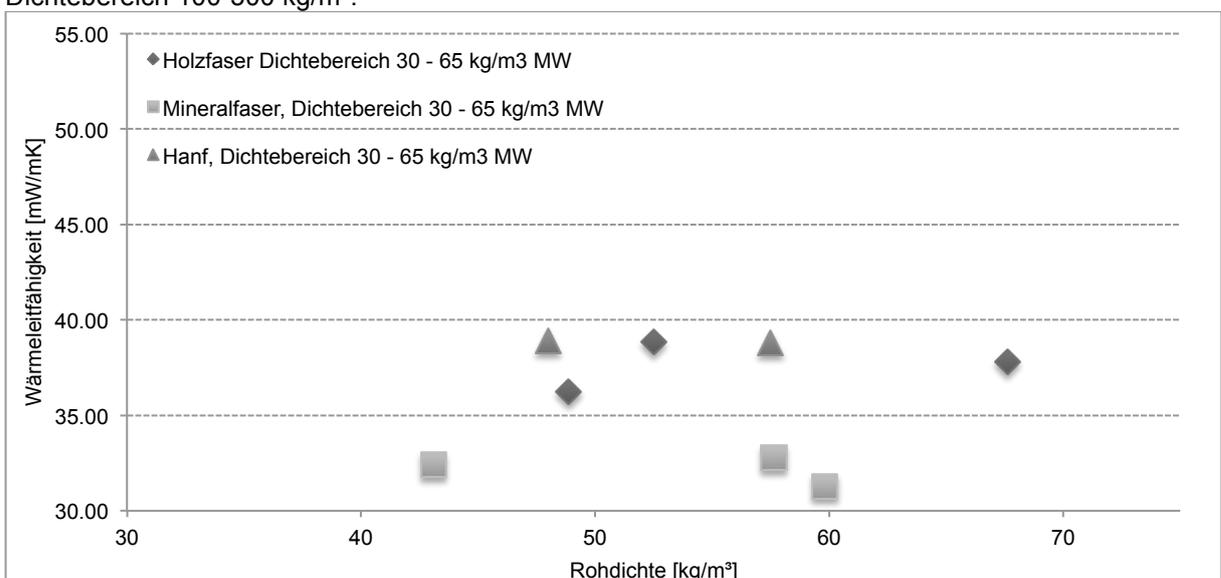


Abbildung 4.18: Wärmeleitfähigkeit industrieller Dämmstoffe in Abhängigkeit der Rohdichte für den Dichtebereich 30-65 kg/m<sup>3</sup>.

Im oberen Rohdichtebereich ( $100\text{-}300\text{ kg/m}^3$ ) korrelierten die Werte der Wärmeleitfähigkeit von Holzfasern gut mit der Rohdichte. Im unteren Rohdichtebereich ( $30\text{-}70\text{ kg/m}^3$ ) bestand für die Holzfaserproben keine Abhängigkeit.

Die unterschiedlichen Messergebnisse für Mineralfaserplatten und Holzfaserplatten müssen im Kontext der Rohdichtebereiche betrachtet werden. Im oberen Rohdichtebereich ist die Abhängigkeit stark an die Materialdichte gebunden und die geringeren Werte der Wärmeleitfähigkeit der Mineralfaserplatten bei gleicher Dichte resultieren mehrheitlich aus der geringeren Materialfeuchte. Wasser besitzt bei  $20^\circ\text{C}$  eine Wärmeleitfähigkeit von  $0.6\text{ W/mK}$  (Kuchling 2004) und trägt damit sehr stark zur Wärmeübertragung bei. Im unteren Dichtebereich lässt der grössere Unterschied der Ergebnisse vermuten, dass zusätzlich weitere Faktoren wie etwa die Fasermorphologie einen Einfluss haben. So hatte Zeitler für Mineralfaserdämmstoffe aufgezeigt, dass in diesem Rohdichtebereich die Wärmeübertragung durch Strahlung einen grösseren Einfluss hat (Zeitler 2000); diese wird durch Fasergrösse und Form beeinflusst.

Zusätzlich wurde an zwei Plattentypen aus Holzfasern die Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit von der Probendicke ermittelt. An einem Typ mit  $216\text{ kg/m}^3$  wurden Proben in zwei unterschiedlichen Dicken gemessen und an einem weiteren Typ mit  $245\text{ kg/m}^3$  wurde an drei unterschiedlichen Dicken die Wärmeleitfähigkeit gemessen.

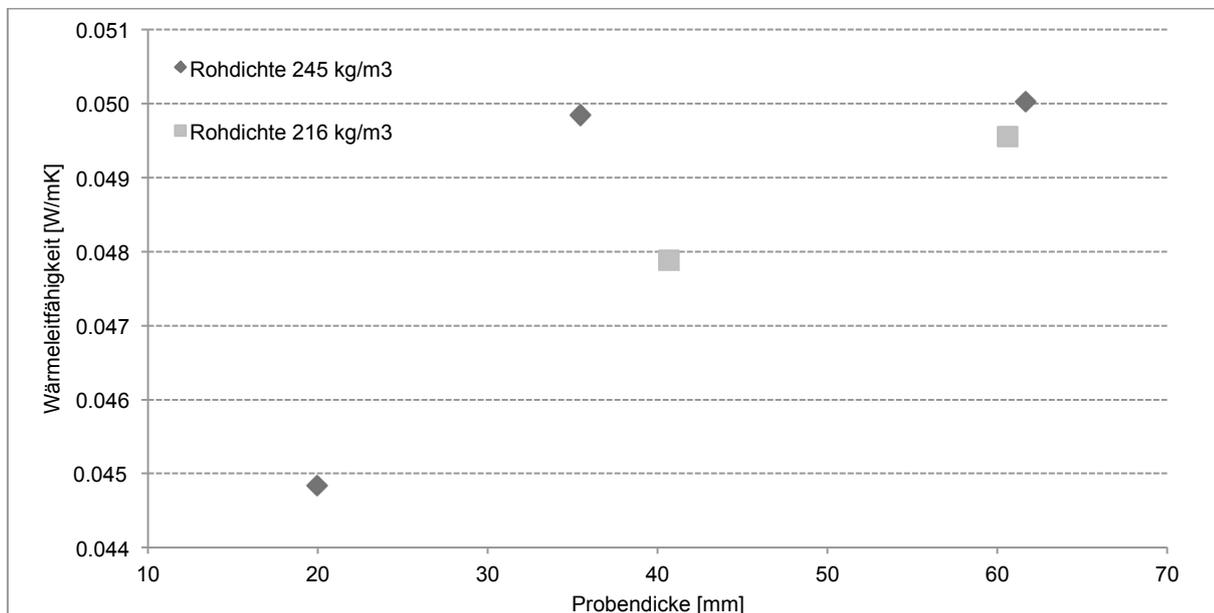


Abbildung 4.19: Wärmeleitfähigkeit zweier Plattentypen in Abhängigkeit der Probendicke.

Die Ergebnisse in Abbildung 4.19 zeigen, dass bei der Probe mit  $216\text{ kg/m}^3$  mit zunehmender Probendicke die Wärmeleitfähigkeit steigt. Für die Probe mit  $245\text{ kg/m}^3$  lag keine deutliche Zunahme vor. Zeitler (Zeitler 2000) hatte an Mineralfaserdämmstoffen ebenfalls eine Zunahme der Wärmeleitfähigkeit mit zunehmender Dicke ermittelt und diesen Effekt darauf

zurückgeführt, dass mit zunehmender Dicke verfahrensbedingte Randzonenverdichtungen die Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit von der Probendicke bewirken können. Die Probe mit  $245 \text{ kg/m}^3$  ohne diesen Effekt bestand aus miteinander verklebten Einzellamellen (Nassverfahren) und es muss deshalb vermutet werden, dass diese Randzoneneffekte dadurch verringert werden. Die verwendeten Einzellamellen aus dem Nassverfahren hatten ein asymmetrisches Rohdichteprofil und der Effekt der unterschiedlichen Porositäten verstärkt sich mit der Zunahme der Schichten. Auch bei Span- und MDF-Platten wirkt sich die Dicke auf das Rohdichteprofile aus (Deppe und Ernst 1996).

Weiter wurde auch die Abhängigkeit der Ergebnisse von der Temperatur (Probenmitteltemperatur) gemessen. Abbildung 4.20 zeigt die Ergebnisse am Beispiel eines Probenkörpers aus Holzfaserdämmplatten. Wie auch in früheren Arbeiten, beispielsweise von Zeitler für Mineralfaserplatten (Zeitler 2000) oder Sonderegger für Holzwerkstoffe (Sonderegger und Niemz 2009), aufgezeigt, wiesen die Holzfaserproben bereits im unteren Temperaturbereich (bis  $30 \text{ °C}$  Probenmitteltemperatur) eine starke Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit von der Temperatur auf.

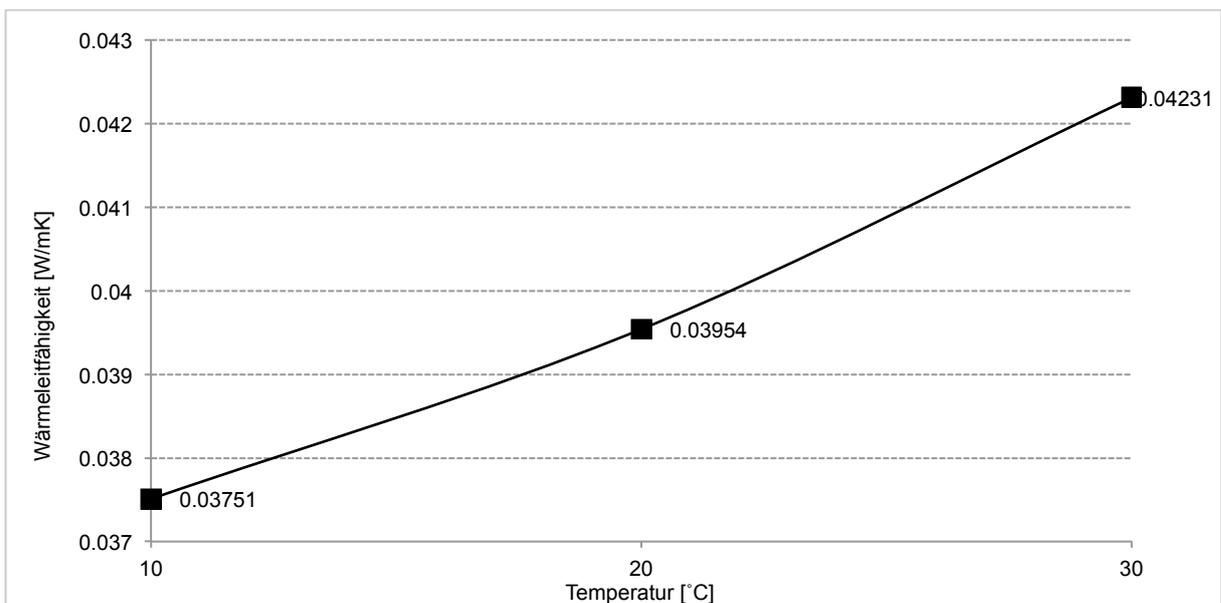


Abbildung 4.20: Wärmeleitfähigkeit einer Holzfaserprobe als Funktion der Temperatur

Zusätzlich erfolgte auch die Untersuchung der Wärmeleitfähigkeit an Materialkombinationen. In Tabelle 4.5 sind die Messergebnisse der Wärmeleitfähigkeit für Einzelmaterialien und Materialkombinationen gegenübergestellt. Dabei wurden die Einzelergebnisse der Wärmedurchlasswiderstände addiert und mit der gemessenen Wärmeleitfähigkeit bei  $20 \text{ °C}$  Probenmitteltemperatur ( $\lambda_{20}$  Messwert) der Materialkombinationen verglichen.

Tabelle 4.5: Wärmeleitfähigkeit der Materialverbunde, n=1 Prüfkörper je Variante

Einzelwerte Plattentypen					Messwerte Kombinationen					
Nr	Rohdichte $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Dicke d [mm]	Lambda $\lambda_{20}$ [W/mK]	R <sub>20</sub> [m <sup>2</sup> K/m]		Rohdichte $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Dicke d [mm]	Lambda $\lambda_{20}$ [W/mK]	R <sub>20</sub> [m <sup>2</sup> K/m]	Diff. [%]
1	212	35.1	0.0473	0.74	2.09	206	79.1	0.0398	1.99	4.78
	151	8.9	0.0145	0.61						
	213.9	35.2	0.0475	0.74						
2	290	35.5	0.0522	0.68	1.97	274	80.0	0.0405	1.98	-0.50
	151	8.9	0.0145	0.61						
	288	35.6	0.0521	0.68						
3	149	39.4	0.0423	0.93	2.49	149	87.7	0.0361	2.43	2.40
	151	8.9	0.0145	0.61						
	148	39.6	0.0415	0.95						
4	149	39.4	0.0423	0.93	2.73	118	112.9	0.0406	2.78	-1.83
	51	33.7	0.0393	0.86						
	149	39.2	0.0418	0.94						
5	120	60.2	0.0395	1.52	4	102	159.6	0.0396	4.03	-0.75
	48	38.4	0.0392	0.98						
	120	60.2	0.0400	1.50						
6	149	39.4	0.0423	0.93	2.88	118	113.4	0.0398	2.84	1.39
	50	38.5	0.0385	1.00						
	148	39.6	0.0415	0.95						
7	212	35.1	0.0473	0.74	2.44	170	130.2	0.0458	2.84	-16.39
	118	60.2	0.0400	1.50						
	216	35.1	0.0475	0.74						
8	249	35.6	0.0494	0.72	2.41	214	109.7	0.0472	2.33	3.32
	149	39.4	0.0406	0.97						
	249	35.4	0.0494	0.72						
9	249	35.6	0.0494	0.72	2.3	184	103.5	0.0464	2.23	3.04
	51	33.7	0.0393	0.86						
	249	35.4	0.0494	0.72						
10	290	35.5	0.0522	0.68	2.32	205	109.8	0.0484	2.27	2.16
	46	37.5	0.0388	0.96						
	290	35.3	0.0518	0.68						

Bei den Kombinationen 1-3 wurde als Mittellage Probe 14 verwendet. Innerhalb dieser drei Kombinationen hatte die Kombination 3 mit einer mittleren Rohdichte von 149 [kg/m<sup>3</sup>] den geringsten  $\lambda_{20}$ -Wert von 0.0361 W/(mK) und Probe 2 mit 274 kg/m<sup>3</sup> den grössten  $\lambda_{20}$ -Wert mit 0.0405 W/(mK). Die Verwendung des Hochleistungsdämmstoffes (Probe 14) führte zu einer deutlichen Reduzierung der Wärmeleitzahl der Materialkombination. Bei den Materialkombinationen 4 bis 10 zeigte sich, dass der Einfluss der Rohdichte der äusseren Lagen gegenüber der Rohdichte der mittleren Lage dominiert. So hatte die Kombination 5 (102 kg/m<sup>3</sup>) den geringsten  $\lambda_{20}$ -Wert (0.0396 W/mK), aber auch die geringste Dichte der Decklagen (120 kg/m<sup>3</sup>). Die Kombination 10 hatte den höchsten  $\lambda_{20}$ -Wert mit 0.0484 W/(mK) mit der zweithöchsten mittleren Rohdichte der Aussenschichten (Rohdichte ca. 290 kg/m<sup>3</sup>). Abbildung 4.21 zeigt den Vergleich der simulierten (gerechneten) Ergebnisse mit den gemessenen Ergebnissen, die mit Ausnahme von Probe 1 und 7 gut übereinstimmen. Die Abweichungen für die Probe 7 resultieren jedoch nicht aus systematischen Gründen, sondern beruhen auf Messtoleranzen.

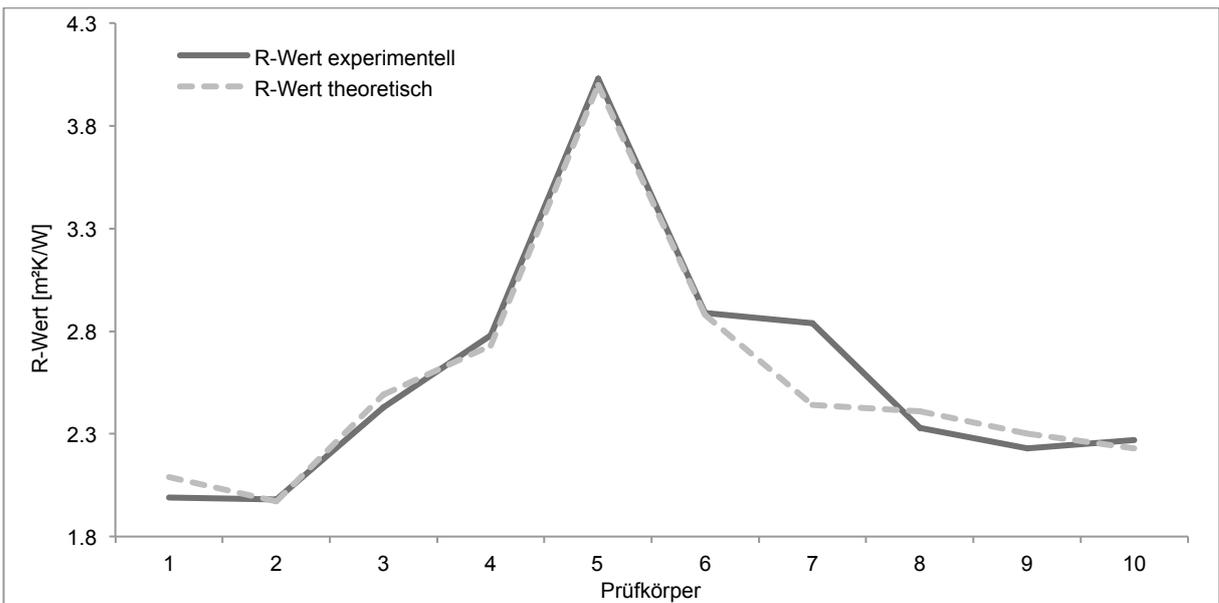


Abbildung 4.21: Vergleich der berechneten und gemessenen  $R_{20}$ -Werte der Prüfkörper

In Abbildung 4.22 sind die Wärmeleitfähigkeit in Abhängigkeit der Rohdichte für die Kombinationen 4 bis 10 und die Kombinationen 1 bis 3 dargestellt.

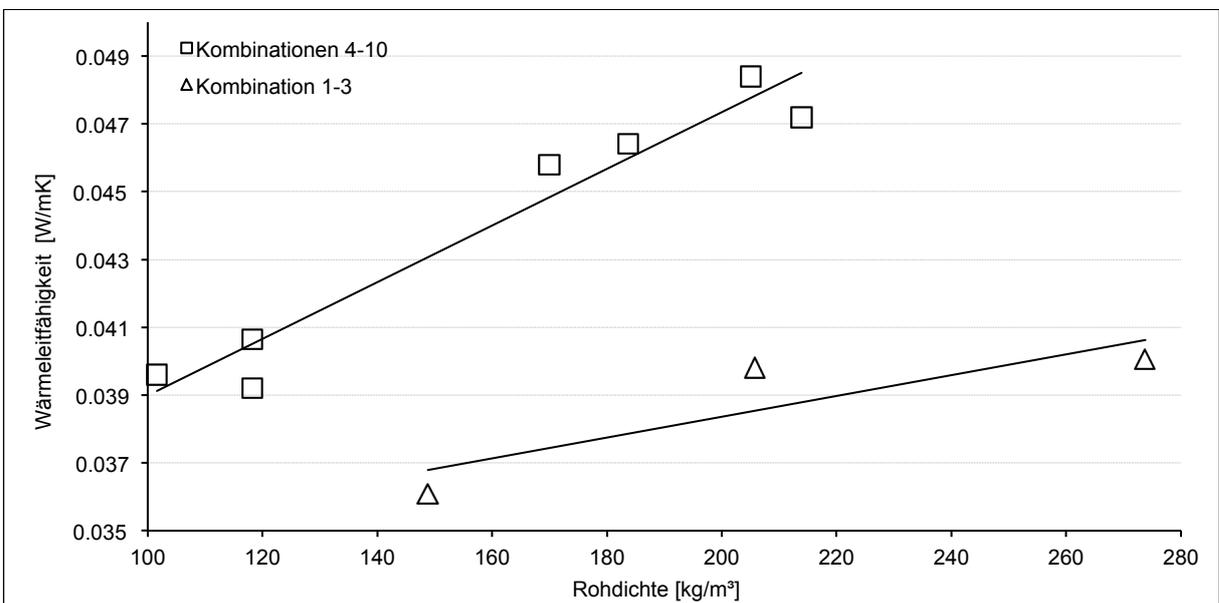


Abbildung 4.22: Wärmeleitfähigkeit in Abhängigkeit der Rohdichte bei Materialkombinationen (□-Symbole: ohne Vliesmatte in Mitte;  $\Delta$ -Symbole: mit Vliesmatte in Mitte)

Die Materialkombinationen zeigten damit vergleichbare Zusammenhänge der Wärmeleitfähigkeit und der Rohdichte wie die Einzelmaterialien. Der Vergleich der gemessenen Ergebnisse und der rechnerisch ermittelten Ergebnisse zeigte Abweichungen von 0.5 – 16 %. Die sehr hohen Werte für Probe 7 sind allerdings als Ausreisser zu betrachten. Ohne dieses Ergebnis liegen die Resultate zwischen 0.5 – 4.8 % und damit im tolerablen Bereich.

## 4.2 Holzfaserstoffe

### 4.2.1 Schüttdichte

#### *Holzfaserstoffe aus industrieller Produktion*

Abbildung 4.23 zeigt die ermittelten Schüttdichten der industriellen Holzfaserstoffe. Insgesamt wurden vier industrielle Holzfaserstoffe aus drei verschiedenen Holzarten untersucht. Neben der Holzart Buche und Kiefer eines Herstellers waren von zwei weiteren Herstellern Fichtenfaserstoffe gewählt worden (Proben Fichte P und Fichte G).

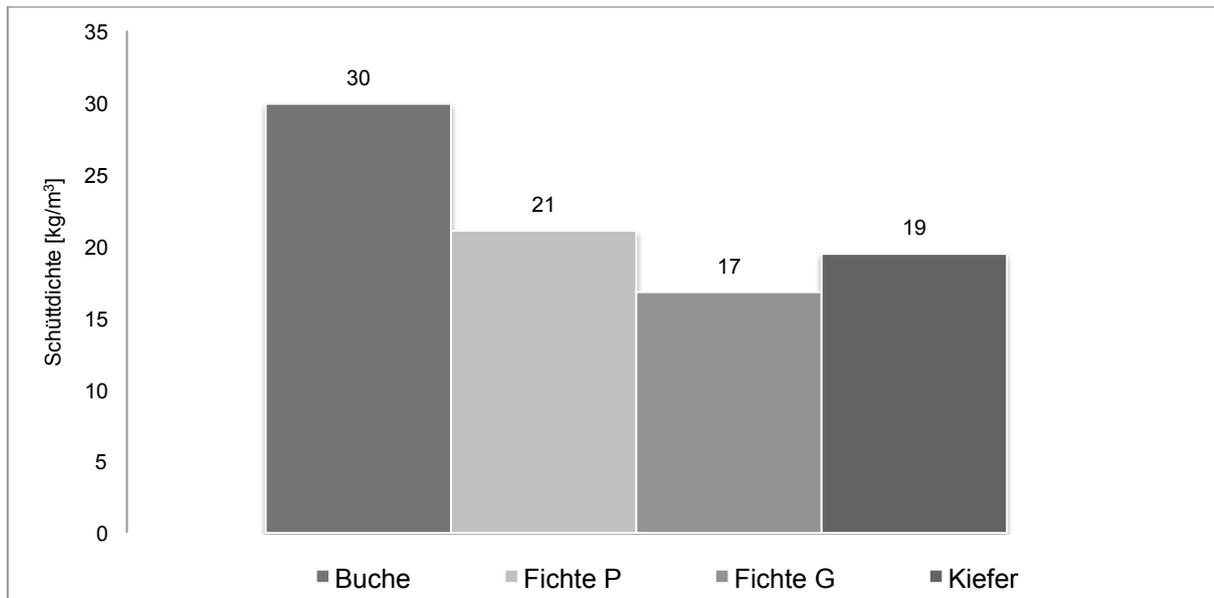


Abbildung 4.23: Schüttdichten der industriellen Holzfaserstoffe

Herstellerbedingt waren der Buchenfaserstoff und der Kiefernfasstoff mit den gleichen Produktionsparametern produziert worden. Die Fichtenfaserstoffe (Fichte P, Fichte G) wurden mit unterschiedlichen Zerkleinerungsparametern hergestellt. Für die Faserstoffe Buche, Kiefer und Fichte G zeigte sich ein Zusammenhang mit der Ausgangsrohichte der Holzarten. (Fichte G: Dichte ca.  $470 \text{ kg/m}^3$ , Kiefer: Dichte ca.  $510 \text{ kg/m}^3$  und Buche: Dichte ca.  $720 \text{ kg/m}^3$ ). Für die Probe Fichte P zeigte sich ein gegensätzliches Ergebnis, da dort der Zerkleinerungsdruck mit 4 bar um die Hälfte geringer war als bei der Probe Fichte G, die Schüttdichte jedoch höher lag. Fichte G wies mit  $17 \text{ kg/m}^3$  Schüttdichte den geringsten Wert auf, während der Buchenfaserstoff mit  $30 \text{ kg/m}^3$  den höchsten Wert hatte. In Abhängigkeit der Aufschlussbedingungen können die Ergebnisse als industriell üblich bezeichnet werden. Andere Arbeiten, z.B. von Krug (Krug 2010) bestätigen die Ergebnisse insbesondere für den Fichtenfaserstoff. Für den Kiefernfasstoff hat beispielsweise Hering (Hering 2007) jedoch weit höhere Werte ermittelt ( $29 \text{ kg/m}^3$ ), allerdings erfolgte die Messung dort mit einer anderen Versuchsanordnung. Die Ergebnisse zeigen nur für Buchen und Kiefernfasstoff aus industrieller Produktion die Abhängigkeit der Schüttdichte vom Zerkleinerungsdruck. Bei Fichte

G war der Druck mit 8 bar doppelt so hoch wie bei Fichte P und es war ein höherer Wert der Schüttdichte erwartet worden.

### **Labortechnisch hergestellte Faserstoffe**

Die Schüttdichte der im Technikum hergestellten Faserstoffe lag zwischen  $18 \text{ kg/m}^3$  und  $33 \text{ kg/m}^3$  und es zeigte sich der erwartete Zusammenhang deutlich: Mit zunehmendem Zerfaserungsdruck während der Herstellung stieg die Schüttdichte der Faserstoffe an. Abbildung 4.24 zeigt die Schüttdichten von Faserstoffen mit vier unterschiedlichen Zerfaserungsdrücken bei der Herstellung.

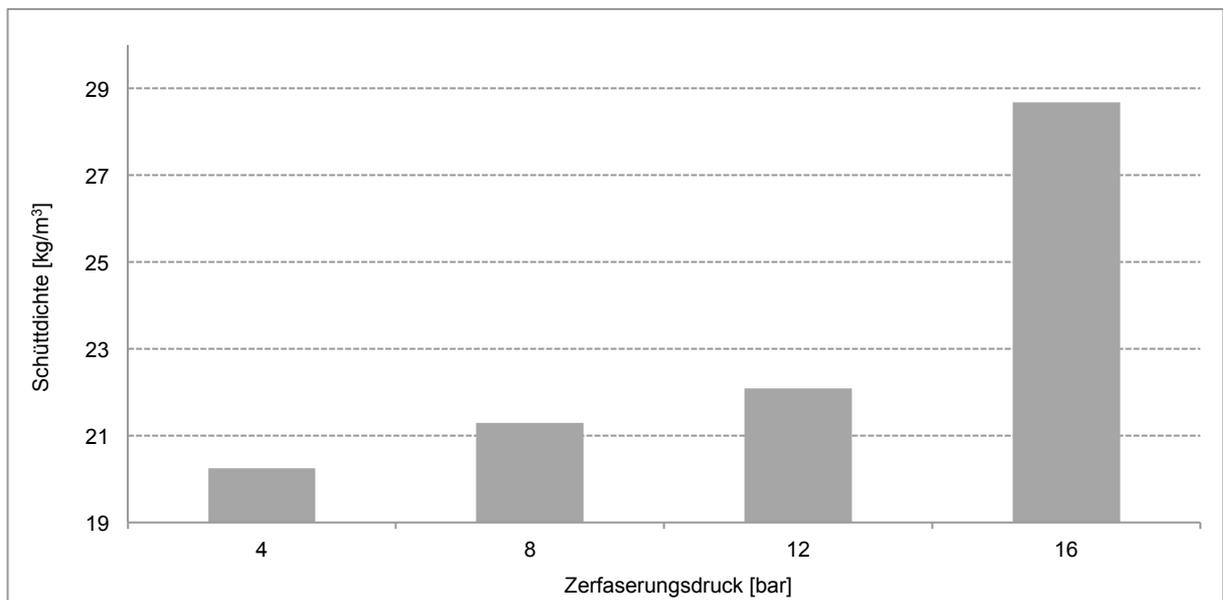


Abbildung 4.24: Schüttdichten labortechnisch hergestellter Holzfasernstoffe in Abhängigkeit des Zerfaserungsdrucks

Die Ergebnisse zeigen, dass im Druckbereich bis 12 bar die Zerfaserungsbedingungen im Kocher einen Einfluss auf die Schüttdichte der Holzfasernstoffe hatten. Bei 16 bar war der Einfluss sehr deutlich. Während mit einer Erhöhung des Drucks von 4 auf 12 bar die Rohdichte um  $2 \text{ kg/m}^3$  von 20 auf  $22 \text{ kg/m}^3$  zunahm, stieg bei der weiteren Erhöhung des Drucks um 4 bar auf 16 bar die Schüttdichte um über  $6 \text{ kg/m}^3$  auf über  $28 \text{ kg/m}^3$ . Diese Ergebnisse bestätigen zum Teil frühere Arbeiten. So hatte beispielsweise Krug (Krug 2010) in Anhängigkeit von den Aufschlussbedingungen für 12 bar vergleichbare Schüttdichten ermittelt. Für höhere Drücke (16 bar) hatten sich jedoch deutlich höhere Werte mit  $51,7 \text{ kg/m}^3$  ergeben. Im Zusammenhang mit den gewählten Zerfaserungsdrücken bzw. den daraus resultierenden Temperaturen war ein Unterschied zwischen 4 bar und den höheren Druckstufen erwartet worden, da bei 4 bar (entspricht einer Temperatur im Kocher von ca.  $143^\circ \text{C}$ ) vermutlich die Glasübergangstemperatur des Lignins noch nicht erreicht ist (Goring 1963) und deshalb die Zerfaserung in der Mittellamelle und teilweise den Zellwandschichten erfolgt. Es zeigte sich

bei den Ergebnissen jedoch keine Auswirkung. Die Bedeutung der Glasübergangstemperatur und damit das Erweichen des Lignins für den Zerfaserungsprozess ist hinlänglich bekannt. Allerdings gibt es unterschiedliche Angaben zum Temperaturniveau. So hatte zum Beispiel Irvine einen grösseren Temperaturbereich angegeben (100 – 140° C) (Irvine 1985). Zudem verändert sich die Reaktion des Lignin in Abhängigkeit vom Feuchtegehalt. Während der Zerfaserung herrschen durch den Dampfeintrag hohe Materialfeuchten, was z.B. von Salmen (Salmen 1984) untersucht worden war und dort einen gleitenden Übergang im Bereich von 20 – 140° C angegeben hatte, was die vorliegenden Ergebnisse erklären kann. Zwischen 12 bar (ca. 187° C) und 16 bar (ca. 201° C) stieg die Schüttdichte deutlich an, was vermutlich darauf zurückzuführen ist, dass die Desintegration des Faserverbundes hauptsächlich in der Mittellamelle erfolgt und infolge dessen mehr separierte Fasern als Faserbündel und Bruchstücke vorliegen, die sich dann im Faserverbund kompakter anordnen und somit zu höheren Schüttdichten führen können. Hinsichtlich der Übertragbarkeit der Ergebnisse auf die industrielle Produktion von Holzfaserstoff ist anzumerken, dass einerseits Zerfaserungsbedingungen mit mehr als 12 bar Druck aktuell nicht üblich sind. Andererseits werden niedrige Druckverhältnisse aus energetischen Gründen nicht angestrebt, da dann der Verbrauch an elektrischer Energie im Vergleich zu thermischer Energie zu stark ansteigt. Somit liegen die vorteilhaften Ergebnisse bezüglich der Schüttrohdichten im industriellen Kontext bereits jetzt im optimalen Bereich zwischen 6 und 10 bar. Abbildung 4.25 zeigt die Schüttdichten der labortechnischen Holzfaserstoffe in Abhängigkeit der Verweilzeiten (Dämpfzeit).

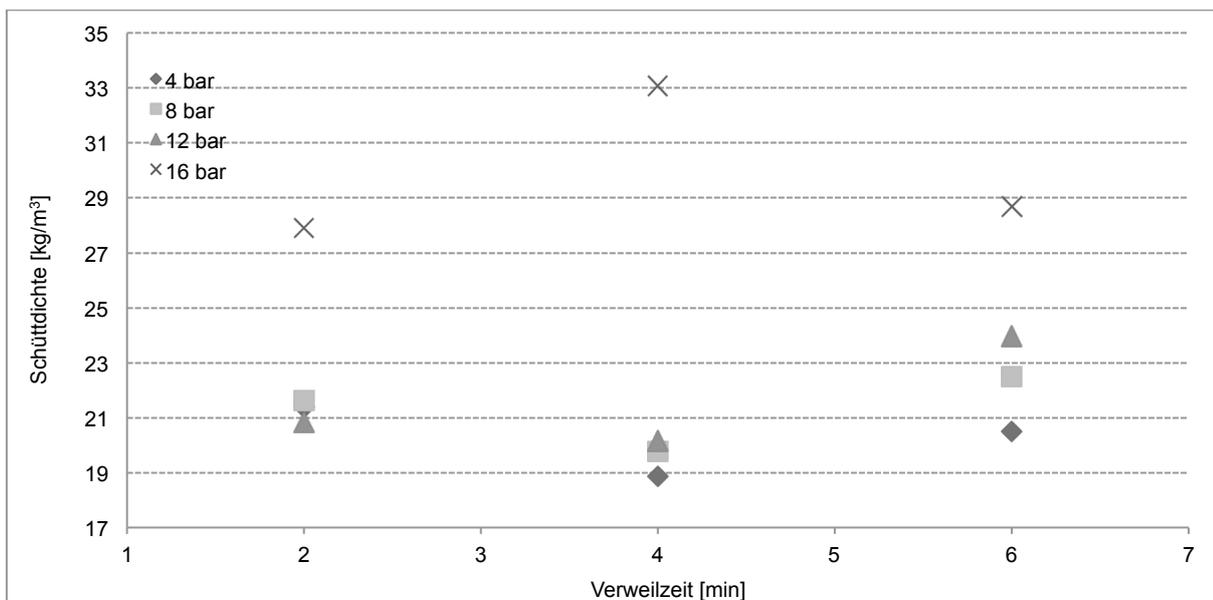


Abbildung 4.25: Schüttdichten labortechnisch hergestellter Holzfaserstoffe in Abhängigkeit der Verweilzeit (Dämpfzeit)

Ausgehend von industriell üblichen Verweilzeiten von circa vier Minuten wurde dieses Merkmal im Experiment mit 2, 4 und 6 Minuten variiert. Wieder zeigte sich hier ein Unterschied der Druckstufen. Während die Ergebnisse bis 12 bar vergleichbare Ergebnisse aufzeigten (geringste Werte bei 4 bar) lagen die Ergebnisse für 16 bar entgegengesetzt (höchster Wert bei 4 bar). Basierend auf den Ergebnissen von Krug (Krug 2010) war erwartet worden, dass die Schüttdichte bei Zerfaserung unter konstantem Druck mit zunehmender Dauer im Kocher steigt. Dort war aufgezeigt worden, dass mit einer Verdoppelung der Dauer von 4 Minuten auf 8 Minuten die Schüttdichten zwischen 23 - 74 % anstiegen. Diese Ergebnisse konnten anhand der eigenen Ergebnisse nicht bestätigt werden. Aufgrund der Wahl geringerer Verweilzeiten ist die Vergleichbarkeit der Ergebnisse jedoch nicht vollständig gegeben.

An den thermisch behandelten Proben zeigte sich, dass mit steigender Behandlungsdauer bei konstanter Temperatur (185 °C) die Schüttdichte sinkt. Mit zunehmender Behandlungstemperatur bei gleicher Behandlungsdauer ergab sich keine signifikante Schüttdichtenänderung (vergl. Abbildung 4.26)

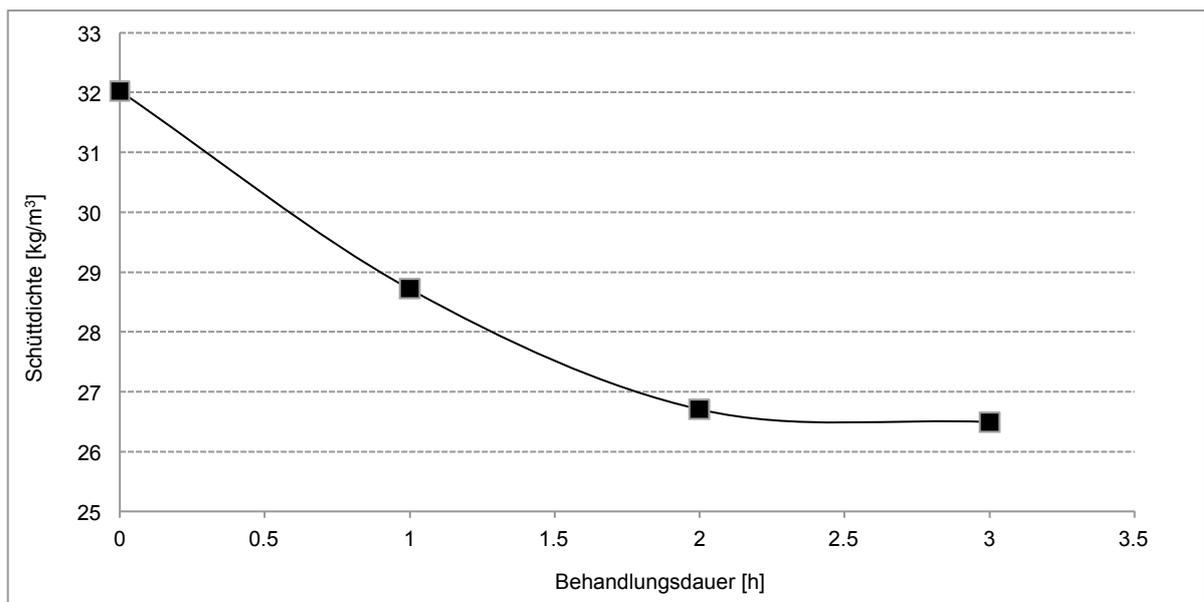


Abbildung 4.26: Schüttdichte thermisch behandelter, labortechnisch hergestellter Holzfasernstoffe in Abhängigkeit der Behandlungsdauer

Der Masseverlust mit zunehmender Behandlungsdauer bei konstanter Temperatur wurde in ähnlichem Umfang auch in Hering (Hering 2007) beschrieben und resultiert aus dem Abbau vor allem der Hemicellulosen ab einer Temperatur von über 140 °C. Es erhöht sich der relative Anteil an Lignin, während der Anteil an Cellulose in etwa gleich bleibt. Hervorzuheben ist dabei, dass die Ergebnisse der Schüttdichten in Abhängigkeit vom Zerfaserungsdruck zwar den gegensätzlichen Zusammenhang aufzeigten, jedoch die Verweildauer des Ausgangsmaterials im Vorwärmer ebenfalls eine thermische Behandlung darstellt. Die gewählten Verweilzeiten liegen im aktuell industriell üblichen Rahmen zwar nur im Bereich von Minuten, deren

Variation kann jedoch zur Erreichung einer gewünschten Fasereigenschaft (z. B. Schüttdichte) verwendet werden.

#### 4.2.2 Porosimetrie

Die Charakterisierung der industriellen Faserstoffe (Buche, Fichte P und Kiefer) mittels Quecksilber-Druck-Porosimetrie ergab Unterschiede bei der Porengrößenverteilung und dem Porenvolumen in Abhängigkeit der Holzart. Während sich die Porengrößenverteilung für die Holzarten Kiefer und Buche ähnlich darstellte, wies der Fichtenfaserstoff mehr kleinere Porenvolumen auf (vergl. Abbildung 4.27). Die Ursache für die ähnlichen Ergebnisse für Buchen- und Kieferfaserstoff liegt in den gleichen Zerfaserungsbedingungen beim Hersteller.

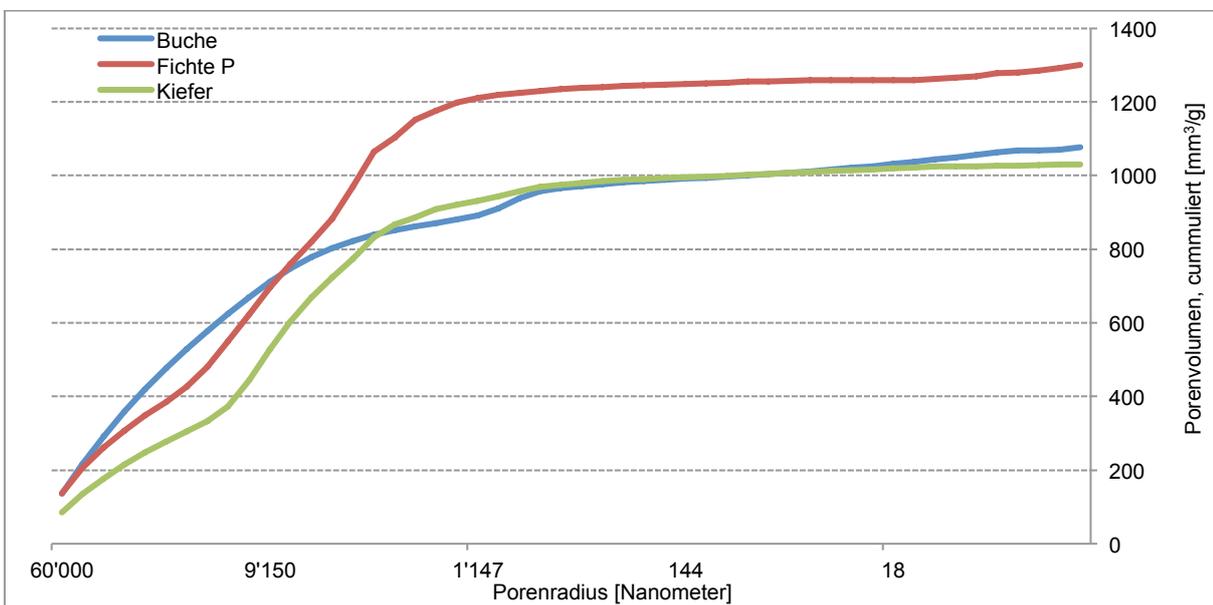


Abbildung 4.27: Porengrößenverteilung für drei der industriellen Faserstoffe (Buche, Fichte P, Kiefer)

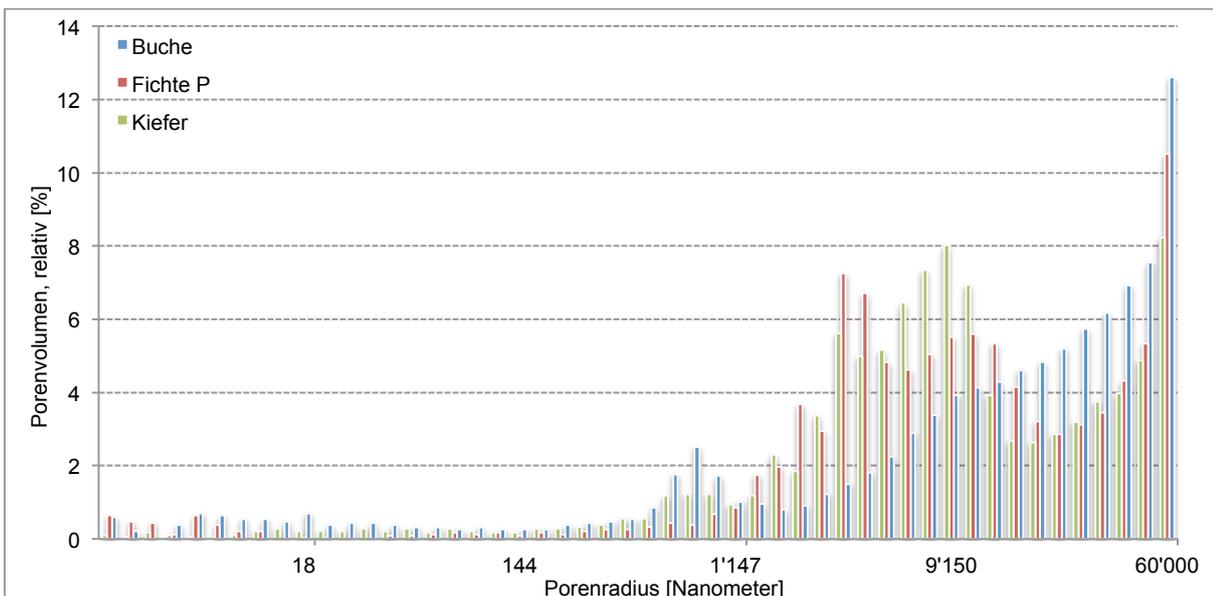


Abbildung 4.28: Relatives Porenvolumen für drei industrielle Faserstoffe

Beim relativen Porenvolumen zeigten sich jedoch Unterschiede zwischen Buchenfaserstoff und den beiden Faserstoffen aus Nadelhölzern (vergl. Abbildung 4.28)

Tabelle 4.6: Zusammenfassung der Ergebnisse für drei Faserstoffe

		<b>Buche</b>	<b>Fichte</b>	<b>Kiefer</b>
Total kumuliertes Porenvolumen	[mm <sup>3</sup> /g]	1078	1300	1031
Total spezifische Oberfläche	[m <sup>2</sup> /g]	24.9	25.4	7.3
Durchschnittlicher Porenradius	[Nanometer]	53453	50840	52686
Gesamtporosität	[%]	64	70	62
Normal-Rohdichte	[g/cm <sup>3</sup> ]	0.594	0.538	0.604
Reindichte	[g/cm <sup>3</sup> ]	1.65	1.80	1.60

Die Ergebnisse in Tabelle 4.6 bestätigen frühere Arbeiten von Plötze und Niemz (Plötze und Niemz 2011) an Laub- und Nadelhölzern nur zum Teil. Die Gesamtporosität des Buchenfaserstoffs lag deutlich über den dort angegebenen Werten für Buche (46,93 %), während die Ergebnisse der Fichte und Kieferfaserstoffe für die beiden Holzarten gut übereinstimmten. Die Werte der Normal-Rohdichte und der Reindichte lagen für alle drei Holzfasernstoffe höher als in der Literatur angegeben. Auch das kumulierte Porenvolumen lag für Buche und Kiefer zwischen 400 und 500 mm<sup>3</sup>/g höher als für die gemessenen Rohhölzer. Die Ergebnisse für Fichtenfaserstoff lagen jedoch 470 mm<sup>3</sup>/g niedriger als in der Literatur angegeben. Somit sind die Ergebnisse nicht eindeutig anhand der Literaturangaben einzuordnen. Die Ergebnisse zeigten insgesamt eine Egalisierung der holzartenspezifischen Werte. Das zeigte sich vor allem an der Normal-Rohdichte, die für alle drei untersuchten Faserstoffe sehr ähnlich war, während die Ausgangsrohdsichten der Holzarten (Fichte P, Buche und Kiefer) jedoch deutliche Unterschiede aufwiesen. Offenbar kommt es während der Zerkleinerung und der thermisch-mechanischen Behandlung der Fasern dazu, dass holzartenspezifische Merkmale in den Hintergrund treten. Mit Ausnahme der spezifischen Oberfläche, die für Kieferfaserstoff deutlich tiefer lag als für Buchen- und Fichtenfaserstoff, zeigten die Ergebnisse der Porosimetrie keine wesentlichen Unterschiede zwischen den untersuchten Holzarten.

### 4.2.3 Morphologie

#### ***Lichtmikroskopische Bilder***

Bildaufnahmen mit jeweils gleicher Belichtung der industriellen Faserstoffe finden sich in der nachfolgenden Abbildung 4.29. Dabei zeigte sich ein farblicher Unterschied zwischen den Buchen- und Kiefernfasernstoffen und dem Fichtenfaserstoff (Fichte P), der eine weisslich-graue Farbe im Gegensatz zur braunen bis rötlichen Farbe der zuvor genannten hatte. Der geringe Unterschied zwischen dem Buchen- und Kiefernfasernstoff war aufgrund der stark unterschiedlichen Ausgangsmaterialien ein unerwartetes Ergebnis. Für den Buchenfaserstoff waren deutlich kleinere Fasern erwartet worden, da die Faserlängen kürzer als diejenigen

von Kiefernholz sind. Durch die Herstellung bei gleichen Zerfaserungsbedingungen erfolgte demnach eine starke Homogenisierung der holzartenspezifischen Merkmale.

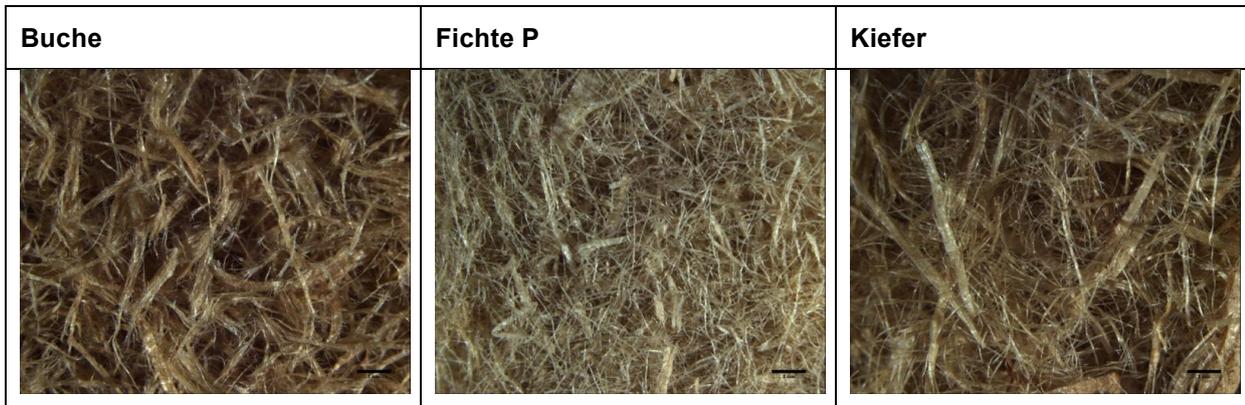
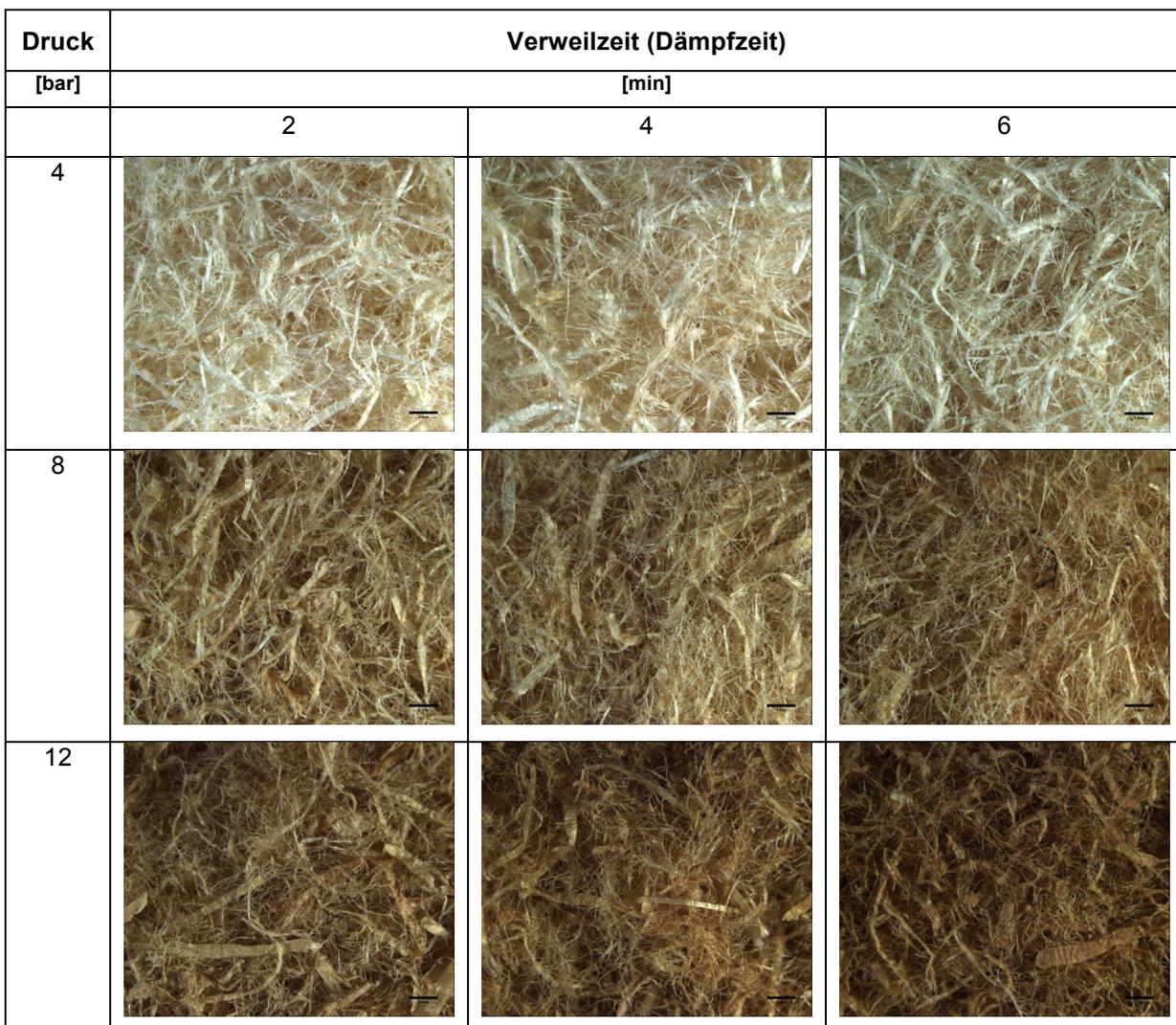


Abbildung 4.29: Bildaufnahmen industrieller Holzfaserstoffe (Massstabangabe jeweils im Bild rechts unten. Länge = 1mm)

Bildaufnahmen labortechnisch hergestellter Faserstoffe in Abhängigkeit des Zerfaserungsdrucks und der Dämpfzeit sind in Abbildung 4.30 dargestellt.



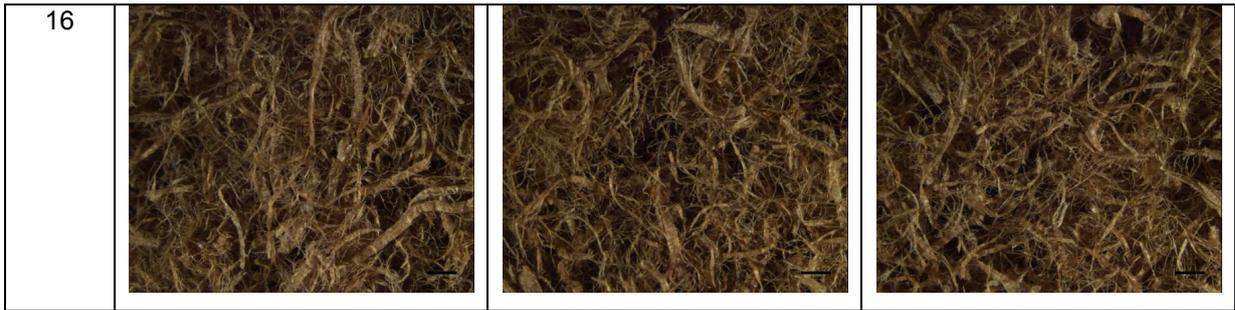


Abbildung 4.30: Lichtmikroskopische Aufnahmen von labortechnisch hergestellten Faserstoffen unterschiedlicher Zerfaserungsdrücke und Verweilzeiten (Massstabangabe jeweils im Bild rechts unten: Länge = 1mm).

Während sich in Abhängigkeit der Verweilzeit die Faserstofffarbe kaum veränderte, war in Abhängigkeit des Zerfaserungsdrucks eine Veränderung deutlich erkennbar. Beginnend von hellgelb-weißem Faserstoff bei 4 bar Druck veränderte sich die Farbe kontinuierlich zu dunkelbraun bei 16 bar Druck, was sich auf das temperaturbedingte Lösen der Hemicellulosen und den relativen Anstieg des Ligningehaltes zurückführen lässt.

**Rasterelektronenmikroskopische Bilder**

Rasterelektronische Aufnahmen wurden an Buchen-, Kiefern- und Fichtenfaserstoff industrieller Herstellung sowie an Mineralfaserstoffen angefertigt. Die nachfolgende Abbildung 4.31 zeigt die Aufnahmen mit unterschiedlicher Vergrößerung.

Faserstoff	Vergrößerung (100x)	Vergrößerung (300x)	Vergrößerung (600x)
Buche			
Fichte P			

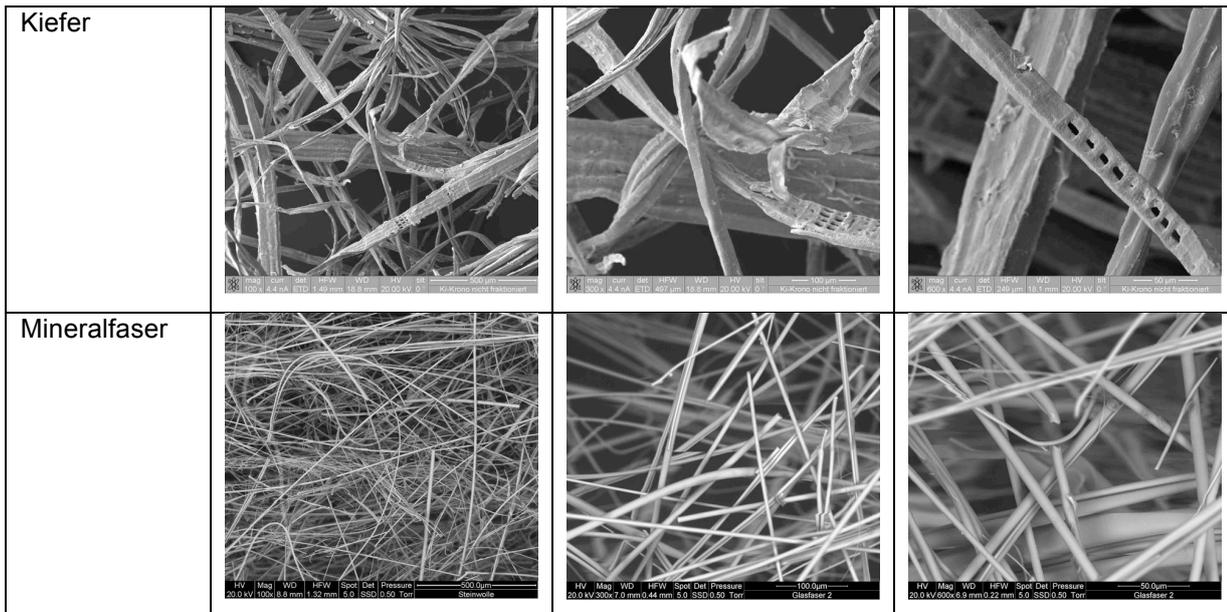


Abbildung 4.31: Rasterelektronische Aufnahmen unterschiedlicher Faserstoffe in 100-, 300- und 600-facher Vergrößerung

Die Aufnahmen stellen lediglich eine zufällige Auswahl der Faserstoffe dar, weshalb eine allgemeingültige Aussage nicht möglich ist. Dennoch zeigten sie Unterschiede zwischen den Holzfasern und den Mineralfasern. Während die Holzfasern klar erkennbar in Faserbündel und Bruchstücke separiert vorlagen, sind Mineralfasern homogener ausgeprägt und deutlicher als Fasern erkenntlich. Die Faserdicken der Mineralfasern variieren zudem weniger als die Holzfaserdicken. Die Anzahl der Kontaktstellen ist daher bei Glasfasern geringer als bei Holzfasern, was sich auf die Wärmeleitung auswirken dürfte. Bei näherer Betrachtung der jeweiligen Herstelltechnologien wird deutlich, dass im thermo-mechanischen Herstellverfahren für Holzfasern der Holzverbund in Abhängigkeit der Zerkleinerungsparameter zerstört wird. Bei der Herstellung der Mineralfasern erfolgt die Formgebung der Fasern durch Auslassen einer Schmelze und anschließend deren Verwirbelung, was zu deutlich homogeneren, zylinderförmigen Fasern führt. Zusätzlich erfolgten rasterelektronische Aufnahmen an labortechnisch hergestellten Holfaserstoffen. Abbildung 4.32 zeigt diese in Abhängigkeit des Zerkleinerungsdrucks in drei unterschiedlichen Vergrößerungsstufen.

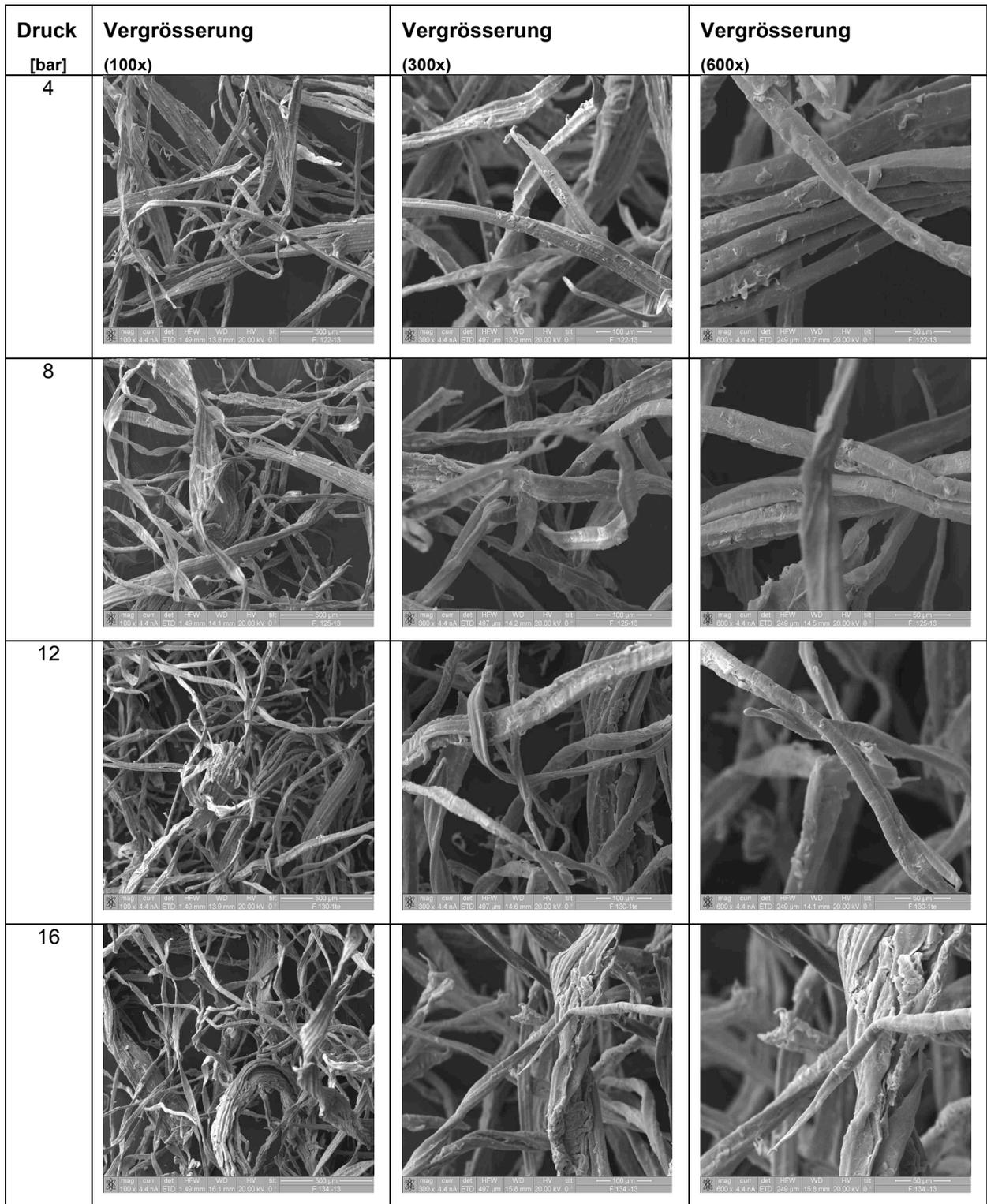


Abbildung 4.32: Rasterelektronische Aufnahmen labortechnisch hergestellter Faserstoffe in 100-, 300- und 600-facher Vergrößerung in Abhängigkeit des Zerfaserungsdrucks

An den rasterelektronischen Aufnahmen waren keine Unterschiede in Abhängigkeit des Zerfaserungsdrucks zu erkennen.

## Partikelanalyse

Die Faserstoffcharakterisierung mittels optischer Partikelanalyse zeigte eine deutliche Differenzierung der Faserlänge und Faserbreite zwischen den drei untersuchten industriellen Faserstoffen aus Fichten- (Fichte P), Buchen- und Kiefernholz. (vergl. Abbildung 4.33)

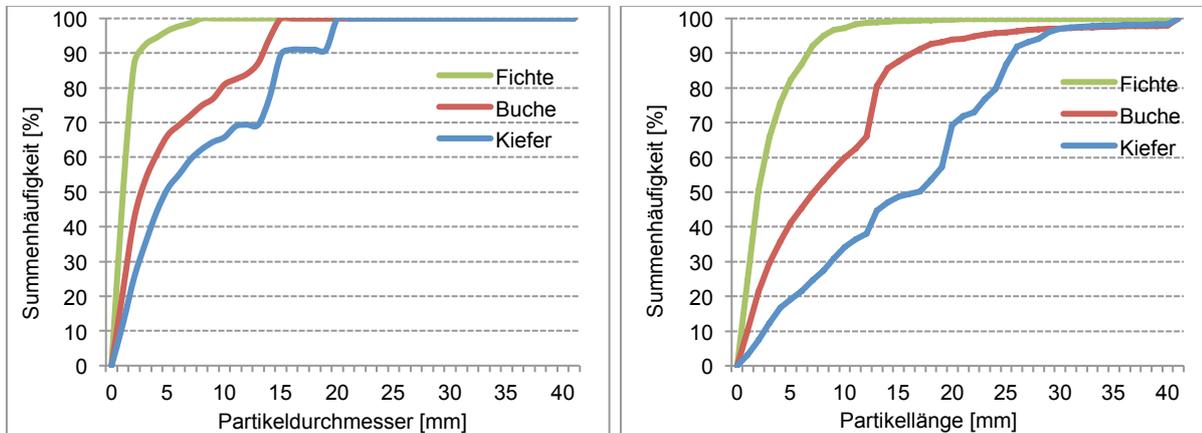


Abbildung 4.33: Summenhäufigkeit des Partikeldurchmessers (links) und der Partikellänge (rechts) von industriellen Holzfasern

Sowohl beim Faserdurchmesser als auch bei der Faserlänge wiesen die Kiefernfasern die höchsten Werte auf. Unter Berücksichtigung der für Buchen- und Kiefernfasern gleichen Zerkleinerungsbedingungen (Kochzeit, Druck) sind die Unterschiede bei Faserlänge und Faserdurchmesser hervorzuheben, da sie die holzanatomische Ausgangssituation der Holzarten widerspiegeln. Buchenholz mit allgemein geringeren Zelldimensionen liefert auch geringere Partikelgrößen als Kiefernholz. Die Ergebnisse zeigen darüber hinaus auch, dass die Laubholzgefäße der Buche durch den Aufschlussprozess stark zerkleinert werden, da sich deren übliche Dimensionen, z.B. die durchschnittliche Länge von 300 – 700mm nach Fengel (Fengel und Wegener 2003), nicht in den Ergebnissen zeigen. Durch die unterschiedlichen Zerkleinerungsbedingungen für die Herstellung der Fichtenfasern sind die Ergebnisse nur bedingt vergleichbar. Im Vergleich zu früheren Arbeiten von Krug (Krug 2010) lässt sich an den Ergebnissen ein Zusammenhang mit den Zerkleinerungsbedingungen nicht ableiten. Im Gegensatz zu den Ergebnissen von Krug wiesen die Fichtenfasern die kleinsten und kürzesten Werte auf, sie waren jedoch mit geringerer Kochzeit und geringerem Zerkleinerungsdruck hergestellt worden. Im Vergleich mit Literaturangaben zur Faserlänge und Breite (Lampert 1967) stimmten die Angaben zum Teil überein. Für Fichtenfasern lagen die Ergebnisse nahe an den Angaben von Lampert, der 1,1 – 6 mm Faserlänge bzw. 0,021 – 0,04 mm Faserbreite angibt, während die Werte für Kiefer (Lampert: 1,8 – 4,5 mm Faserlänge bzw. 0,014 – 0,046 mm Faserbreite) und Buche (Lampert: 0,6 – 1,3 mm Faserlänge bzw. 0,016 – 0,022 mm Faserbreite) stark abwichen. Hierbei ist allerdings zu beachten, dass es sich um Angaben über tatsächliche Fasern und nicht um Faserstoffe handelt. Darüber hinaus zeigten die Ergebnis-

se auch die unterschiedlichen Zerfaserungstiefen. Der Fichtenfaserstoff (Fichte P) bestand aus mehr tatsächlich separierten Fasern oder Faserbruchstücken im Gegensatz zum Buchen- und Kiefernfasernstoff.

Abbildung 4.34 zeigt zusätzlich den auf das Gesamtvolumen bezogenen Volumenanteil der Partikel bei 10, 50 und 90 %. Zudem wurde das Breiten/Längenverhältnis der unterschiedlichen Faserstoffe anhand der Ergebnisse der Partikelanalyse ermittelt und mit den ebenfalls charakterisierten Mineralfasern verglichen (vergl. Abbildung 4.34).

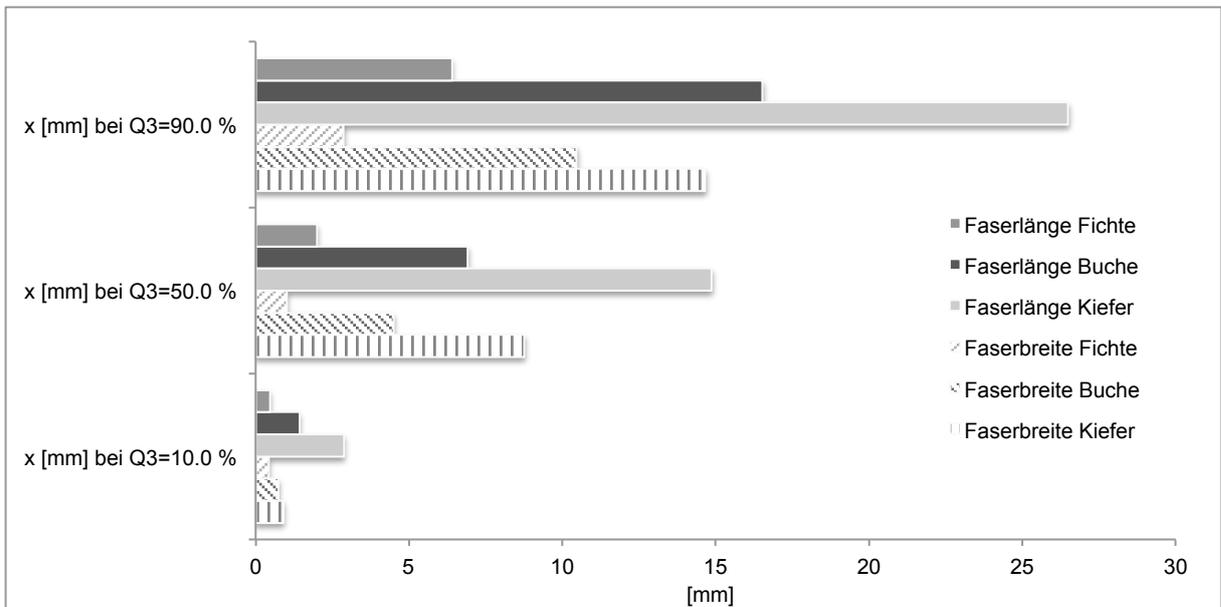


Abbildung 4.34: Auf das Gesamtvolumen bezogene Volumenanteile der Partikel in Prozent für Holzfasernstoffe

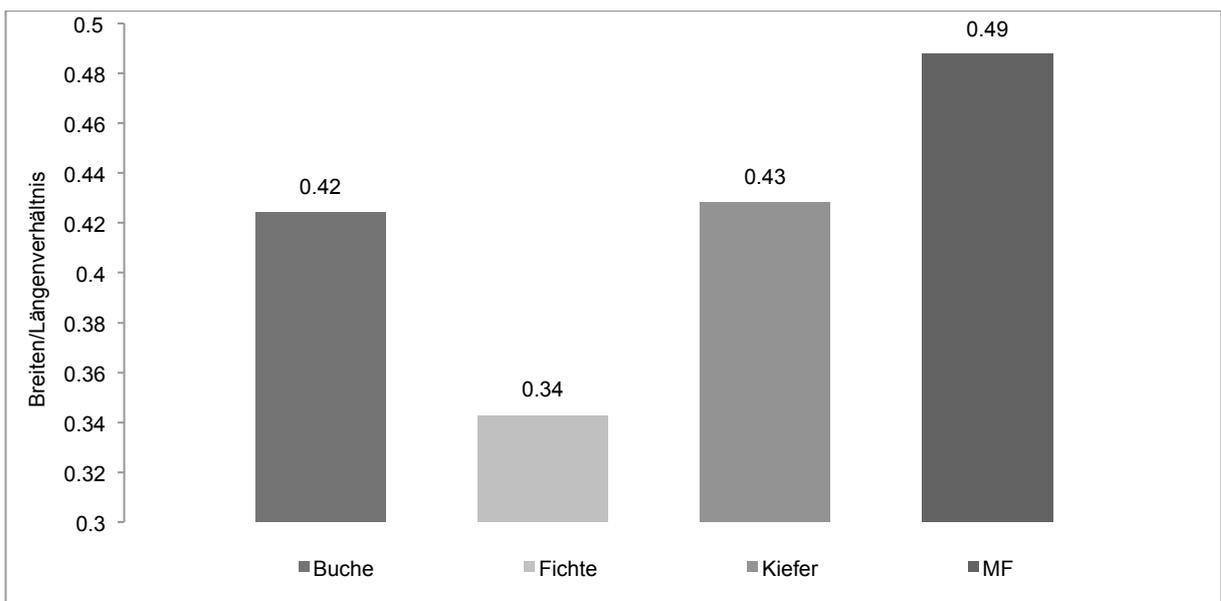


Abbildung 4.35: Breiten/Längenverhältnis industrieller Holzfasernstoffe im Vergleich mit Mineralfasern (MF)

Auffallend sind die unterschiedlichen Breiten/Längenverhältnisse unter den Holzfaserproben. Während Buchen- und Kiefernfasern ähnliche Werte aufwiesen, hatte der Fichtenfaserstoff den geringsten Wert und verfügte damit über den höchsten Schlankheitsgrad. Dieses Ergebnis wird durch Angaben in Lampert für Fichtenfasern bestätigt (Lampert 1967). Im deutlichen Unterschied dazu besaßen die Mineralfasern den geringsten Schlankheitsgrad bzw. das grösste Breiten/Längenverhältnis. Diese Ergebnisse lassen sich auf den wesentlichen Unterschied im Herstellverfahren für Holzfaserstoffe und Mineralfasern zurückführen. Im Gegensatz zum mechanisch geprägten und auf die Desintegration der Faserstruktur ausgerichteten Verfahrens für Holzfaserstoffe, erfolgt die Herstellung von Mineralfasern durch mechanisches oder pneumatisches Schleudern einer Schmelze. Die Schmelze wird dabei durch Düsen in den Schleuderprozess ausgelassen, was zur Ausprägung einer zylindrischen Form der Fasern mit einem Durchmesser führt, der deutlich geringer variiert als derjenige des Holzfaserstoffs. Zusätzlich erfolgte auch eine vergleichende Fasercharakterisierung mit einem Schwingsieb. Abbildung 4.36 zeigt am Beispiel der Fichtenfasern die Summenhäufigkeit der Faserlänge nach optischer und mechanischer Charakterisierung (Schwingsieb). Die Ergebnisse der mechanischen Siebung ergaben für kürzere Faserlängen grössere Häufigkeiten als die optische Messung. Unter der Annahme, dass bei der mechanischen Siebung einzelne Faserbündel und Faseragglomerationen trotz eingesetzter Siebhilfen zur Unterbewertung des Feinanteils führt, waren für die mechanische Siebung genau entgegengesetzte Ergebnisse erwartet worden.

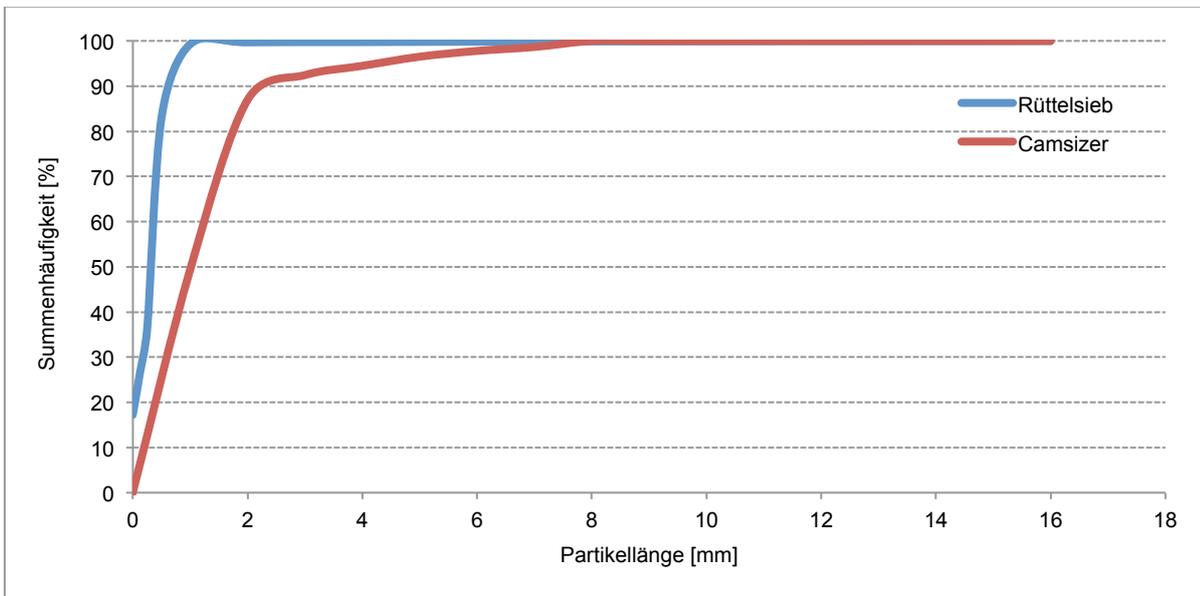


Abbildung 4.36: Summenhäufigkeit der Partikellänge nach optischer und mechanischer Charakterisierung (Schwingsieb) am Beispiel von industriellen Fichtenfasern

Auch bei den labortechnisch hergestellten Holzfaserstoffen zeigte die optische Partikelanalyse eine Differenzierung der Faserlänge und –breite. Abbildung 4.37 zeigt die Summenhäufigkeiten für Faserstoffe in Abhängigkeit des Zerfaserungsdrucks.

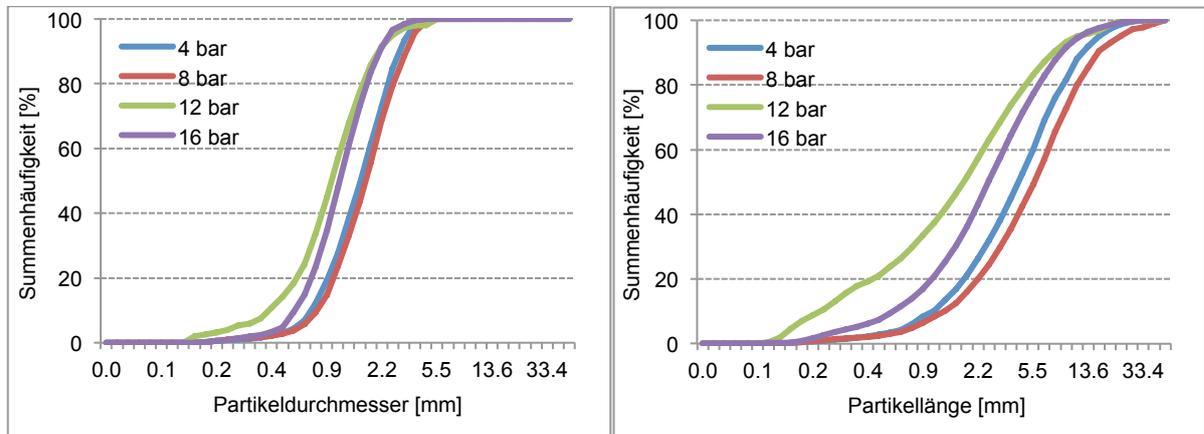


Abbildung 4.37: Summenhäufigkeiten der Partikelbreite (links) und Partikellänge (rechts) von experimentellen Faserstoffen in Abhängigkeit des Zerfaserungsdrucks am Beispiel einer Verweilzeit von vier Minuten

Die Ergebnisse am Beispiel einer Verweilzeit (Dämpfzeit) von vier Minuten zeigen eine Abnahme der Breite, vor allem jedoch der Länge von 4 bar zu 12 bar Zerfaserungsdruck. Entgegen den Erwartungen und früheren Ergebnissen (Krug 2010) lagen die Minimalwerte nicht beim maximalen Druck (16bar), sondern zwischen den Werten für 8 und 12 bar. Eine Erklärung könnte darin liegen, dass die Faserstoffe bei 16 bar aus anlagentechnischen Gründen nicht in der gleichen Versuchsreihe wie die vorherigen hergestellt worden waren und deshalb nicht identische Bedingungen vorlagen. Mit zunehmendem Zerfaserungsdruck stieg, wie schon zuvor bei den Ergebnissen der Schüttdichte aufgezeigt, die Behandlungstemperatur der Hackschnitzel von ca. 140 °C (4 bar) auf über 200 °C (16 bar) was dazu führte, dass die Zerfaserung mehrheitlich in der Mittellamelle erfolgte und mehrheitlich weniger beschädigte Fasern anstelle von Faserbündeln und Bruchstücken entstanden (Schneider 1999).

Die Auswirkung der Verweilzeit (Dämpfzeit) an den gewählten Varianten von 2, 4 und 6 Minuten zeigt Abbildung 4.38 am Beispiel mit 8 bar Aufschlussdruck.

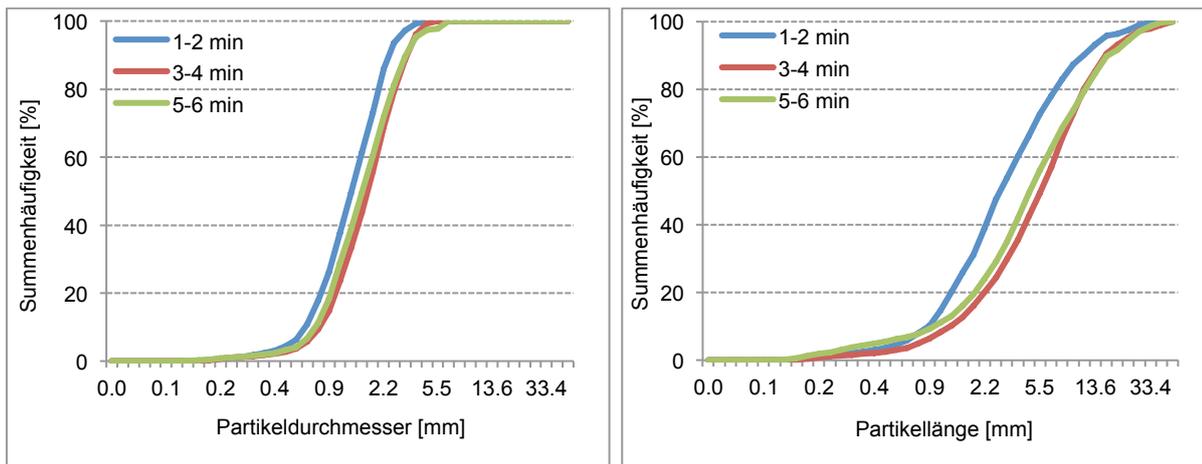


Abbildung 4.38: Summenhäufigkeiten der Faserbreite (links) und Faserlänge (rechts) von experimentellen Faserstoffen in Abhängigkeit der Verweildauer (Dämpfzeit) bei 8 bar Aufschlussdruck.

Es zeigte sich, dass bei der sehr kurzen und industriell unüblichen Verweilzeit von 2 Minuten die geringsten Faserbreiten bzw. Längen entstehen. Bei 4 und 6 Minuten Verweilzeit bestand hingegen kein wesentlicher Unterschied in den Ergebnissen.

#### 4.2.4 Chemische Analyse

An zwei Proben der labortechnisch hergestellten Faserstoffe wurde auch eine chemische Analyse durchgeführt. In Tabelle 4.7 sind die Analyseergebnisse aufgeführt.

Tabelle 4.7: Analyseergebnisse

Probe	Aufschlussdruck [bar]	Behandlung	Lignin	Zellulose	Holocellulose	NaOH 1%	Sol. Etan/Tol	Gesamtgehalt Extraktstoffe [% atro Holz]
			[% atro Holz]					
F-122	4	ohne	26.7	50.6	65.0	15.6	2.1	5.4
F-122	4	1h bei 185°C	27.7	51.2	66.7	16.4	2.0	5.4
F-122	4	2h bei 185°C	28.1	49.7	67.0	16.4	1.8	5.5
F-122	4	3h bei 185°C	27.3	48.5	67.0	15.7	1.9	5.3
F-125	8	ohne	28.1	50.9	67.8	16.9	2.8	8.3
F-125	8	3h bei 160°C	28.9	50.7	66.8	18.1	2.3	8.0
F-125	8	3h bei 175°C	29.9	51.3	65.2	17.0	2.0	8.1
F-125	8	3h bei 185°C	29.8	50.7	67.2	15.6	2.1	7.3

Die Ergebnisse zeigten bis auf den Gehalt an Extraktstoffen keine Unterschiede bei den Analysewerten in Abhängigkeit des Zerfaserungsdrucks und der thermischen Behandlungen. Die Ligningehalte blieben im Vergleich zu Literaturangaben für Fichtenholz (Fengel und Wegener 2003) konstant, während die Zellulosegehalte um ca. 10 Prozentpunkte anstiegen. Der Gehalt an Holocellulose nahm hingegen um ca. 15 Prozentpunkte ab, was auf den Abbau der Hemizellulose zurückzuführen ist. Die Extraktstoffgehalte weichen voneinander in Abhängigkeit von den Zerfaserungsstufen von 4 bzw. 8 bar und damit den unterschiedlichen Temperaturen im Kocher ab. Bei einem Druck von 8 bar liegt der Gehalt an Extraktstoffen um 5 Prozentpunkte höher. Da es sich um Ergebnisse der Heisswasserextraktion handelt, müssten diese Ergebnisse hinterfragt werden, da zu erwarten gewesen wäre, dass die Ex-

traktstoffanteile mit der höheren Zerfaserungstemperatur abnehmen, da die wasserlöslichen Bestandteile (Kohlenhydrate, Proteine und anorganische Salze) bei der Zerfaserung in höherem Masse entfernt werden. Im Allgemeinen bestätigen die Werte jedoch frühere Untersuchungen. So hatte z.B. Schneider (Schneider 1999) umfangreiche Untersuchungen an Inhaltsstoffen unterschiedlich hergestellter Faserstoffe angestellt und vergleichbare Ergebnisse erzielt. Hervorzuheben ist allerdings, dass die Analysewerte insgesamt gering untereinander abweichen und die Zerfaserungsbedingungen und die thermischen Behandlung nicht zu erkennbaren Unterschieden führten. Vielmehr kommt es durch die Zerfaserung und der damit einhergehenden thermischen, hygri-schen und mechanischen Behandlung zu einer Vereinheitlichung der holzartenspezifischen Unterschiede.

#### 4.2.5 Feuchteaufnahme

##### **Holz-faserstoffe aus industrieller Produktion**

An Buchen-, Fichten- und Kiefern-faserstoff wurden die Sorptionsisothermen ermittelt. In Abhängigkeit der unterschiedlichen Holzarten ergaben sich keine wesentlichen Unterschiede der Feuchteaufnahme (Adsorption) bzw. der Feuchteabgabe (Desorption). Deshalb werden in der folgenden Abbildung 4.39 die Ergebnisse für Fichtenfaserstoff (Fichte P) beispielhaft gezeigt:

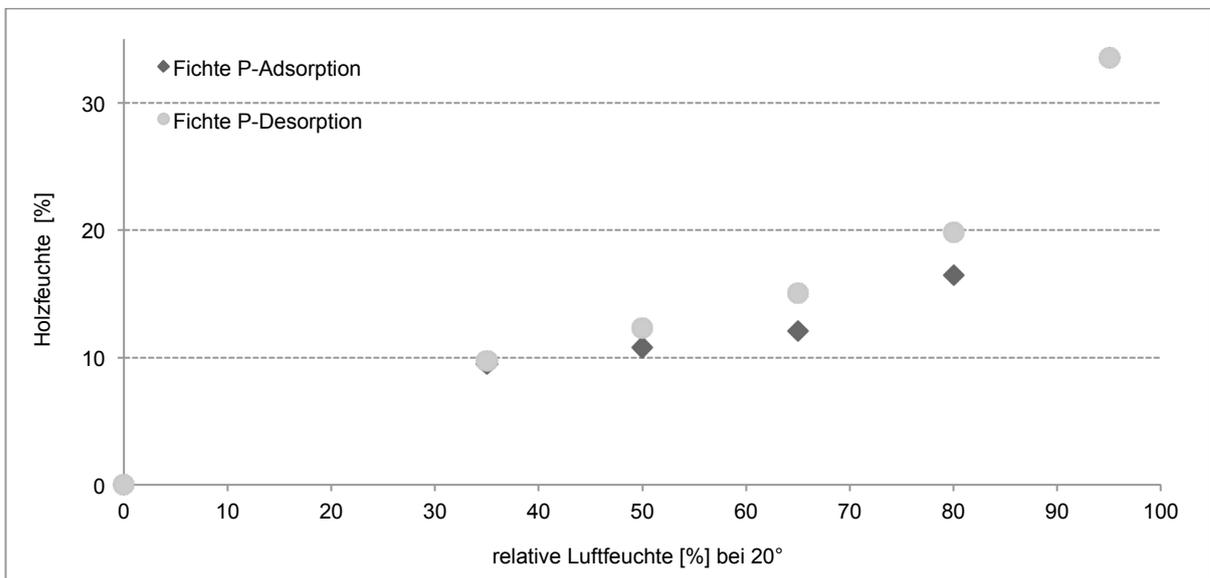


Abbildung 4.39: Sorptionsisotherme (Adsorption und Desorption) für Faserstoffe aus Fichtenholz

Lediglich im hohem Feuchtebereich (95 % rel. Luftfeuchte) lagen die Werte weiter auseinander. Buchenfaserstoff wies mit 19 % Holzfeuchte eine unerwartet geringe Feuchtesättigung auf, während die Werte für Kiefer mit 29,3 % Holzfeuchte und die Werte für Fichte mit 33,5 % Holzfeuchte zwar leicht abwichen, aber dennoch im üblichen Bereich lagen. Kirmeier ermittelte in einer vergleichenden Untersuchung an Sägespänen und Holzfasern ähnliche Sorpti-

onswerte für Holzfasern (Kirmeier, Troger et al. 2001). Im Vergleich mit den Materialfeuchten der industriellen Dämmstoffe lagen die Werte des Faserstoffs leicht höher. Dies insbesondere im Bereich höherer Luftfeuchte (95 % rel. Luftfeuchte), was auf das Fehlen von Materialzusätzen wie Bindemittel oder Hydrophobierungsmittel zurückzuführen ist. Bindemittel oder Zusätze sind selbst nicht oder weniger hygroskopisch als Holzfasern und reduzieren dadurch die darrgewichtsbezogene Materialfeuchte.

### Labortechnisch hergestellte Faserstoffe

Bei der Feuchteaufnahme bzw. Feuchteabgabe der labortechnisch hergestellten Faserstoffe zeigte sich der Einfluss des Zerfaserungsdrucks. Mit zunehmendem Druck nahmen die Werte der Materialfeuchte bei allen gemessenen Feuchtigkeitsstufen ab. Für die unterschiedlichen Verweilzeiten (Dämpfzeiten) zeigten sich keine Abhängigkeiten. Abbildung 4.40 zeigt die Ergebnisse der Sorptionsmessungen bei Feuchten von 35 %rel. Luftfeuchte bis 95 % rel. Luftfeuchte.

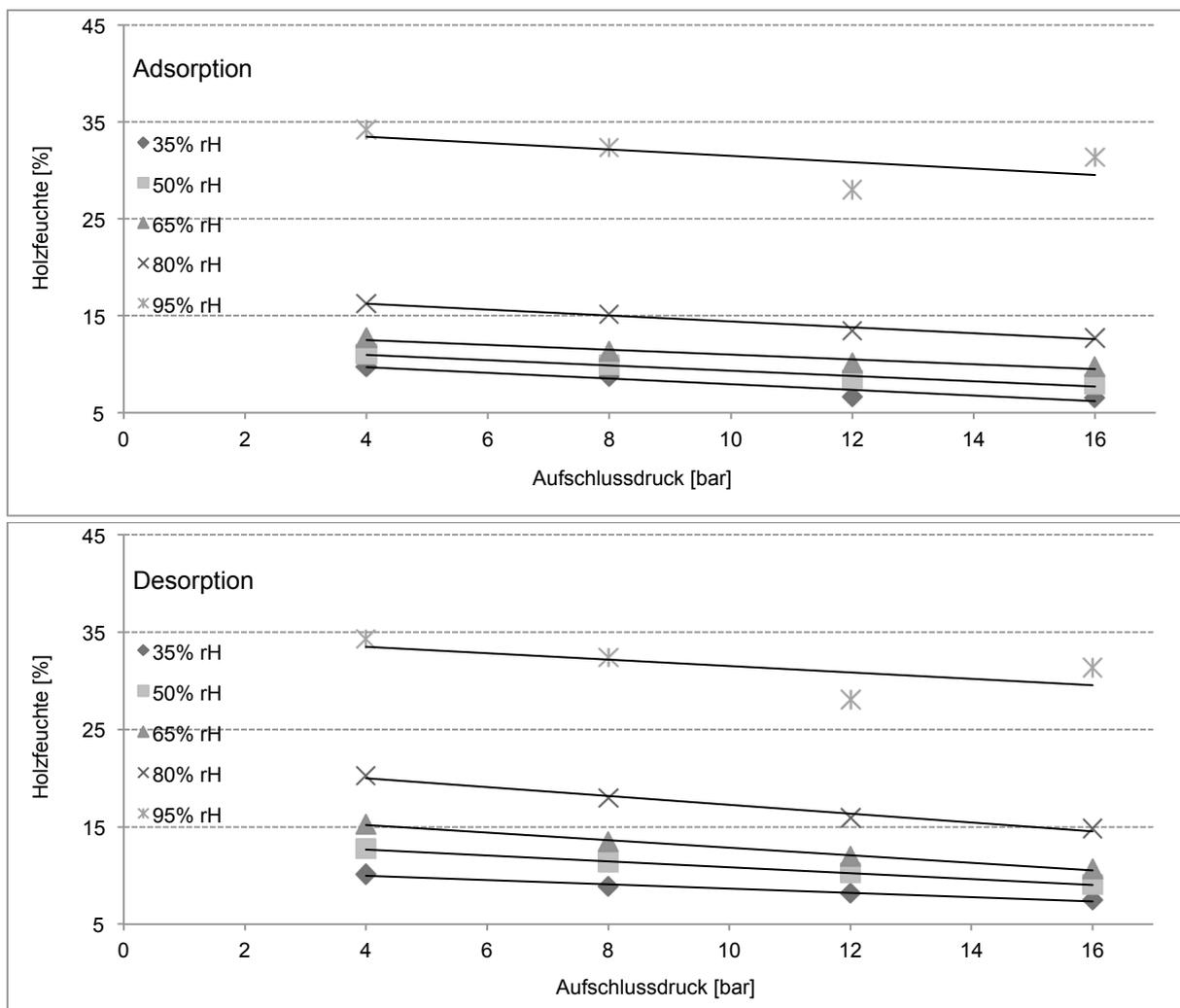
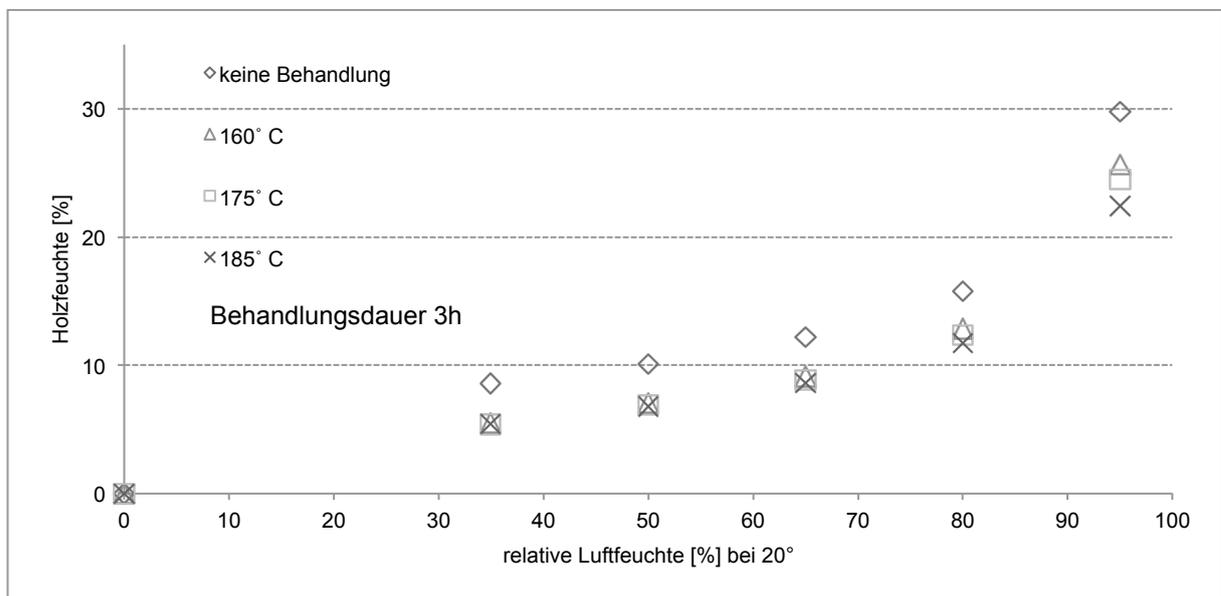


Abbildung 4.40: Adsorptionswerte (oben) und Desorptionwerte (unten) von labortechnisch hergestellten Faserstoffen bei unterschiedlichen Feuchtestufen (20 °C).

Die Materialfeuchten nahmen bei einer Druckerhöhung von 1 bar um 0,24-0,3 % ab und lagen damit zum Beispiel bei 20 °C / 65 % rel. Luftfeuchte zwischen 12,7 % bei 4 bar Aufschlussdruck und 9,8 % bei 16 bar Aufschlussdruck. Das liegt darin begründet, dass mit der Erhöhung des Drucks und der damit einhergehenden Temperaturerhöhung ein zunehmender Abbau der Hemizellulosen und eine Zunahme des Gehaltes an Extraktstoffen erfolgt, was zu einer hydrophoberen Ausprägung der Faserstoffe führt. Krug hatte dies anhand von Untersuchungen zum Einfluss der Zerfaserungsbedingungen auf die Eigenschaften von mitteldichten Faserplatten bereits aufzeigen können (Krug 2010). Die aufgezeigte Abhängigkeit des Feuchtegehaltes vom Zerfaserungsdruck hat für die Wärmeleitfähigkeit der Holzfasersproben grosse Bedeutung, da mit zunehmendem Feuchtegehalt die Wärmeleitfähigkeit ansteigt und somit eine Erhöhung des Zerfaserungsdrucks als indirekte Methode zur Reduktion der Wärmeleitfähigkeit in Aussicht gestellt werden kann. Wie erwartet zeigte sich auch an diesen Faserstoffproben der Effekt der Hysterese. So lagen die Materialfeuchten bei 20 °C / 65 % rel. Luftfeuchte für die Adsorption zwischen 2-3 % niedriger als für die Desorption. Die Feuchteaufnahme der Proben, die zusätzlich thermisch behandelt wurden, war für alle Stufen der relativen Luftfeuchtigkeit geringer. Die Ergebnisse in Abhängigkeit der Behandlungsdauer und der Behandlungstemperatur sind in der nachfolgenden Abbildung 4.41 dargestellt.



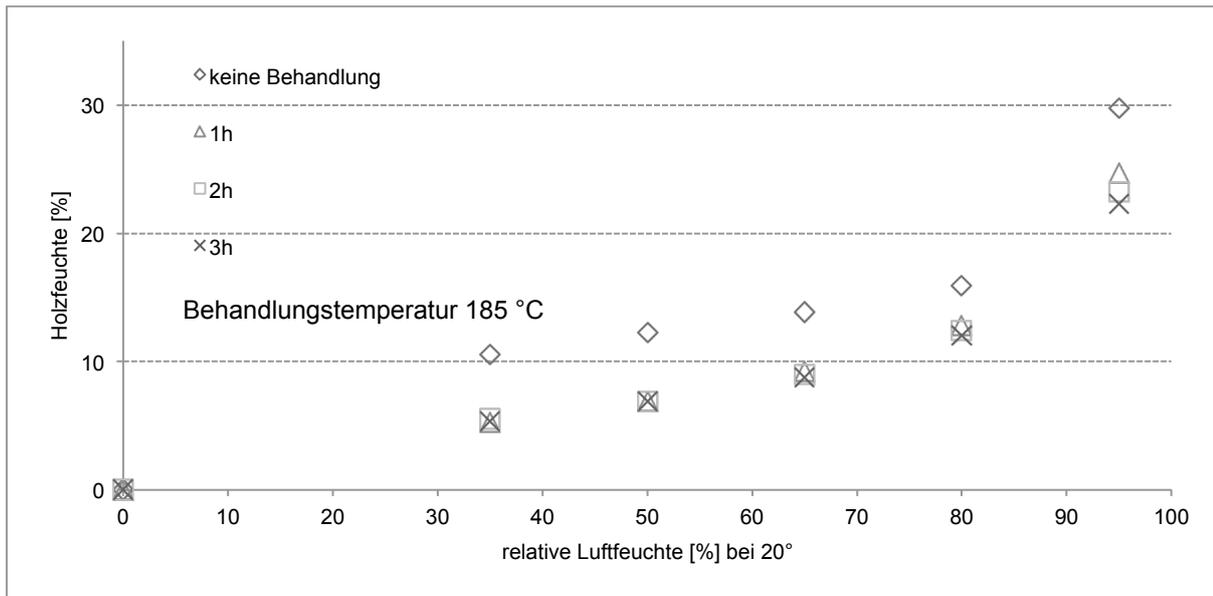


Abbildung 4.41: Holzfeuchte (Adsorption) thermisch behandelter Holzfaserstoffe in Abhängigkeit der Temperatur (vorherige Seite) und in Abhängigkeit der Behandlungsdauer (oben)

Nach der Probenbehandlung mit zunehmender Temperatur (160°, 175° und 185° C) lagen die Werte der Holzfeuchte mit durchschnittlich 3 % deutlich unter der Materialfeuchte der unbehandelten Proben. Auch bei der Behandlung bei 185° C mit unterschiedlicher Dauer (1h, 2h und 3h) lagen die Materialfeuchten tiefer als bei den unbehandelten Proben. Eine deutliche Differenzierung nach Behandlungsdauer oder Behandlungstemperatur lässt sich anhand der Ergebnisse jedoch nicht ableiten. Die Unterschiede in der Materialfeuchte gegenüber den unbehandelten Proben zeigten sich sowohl bereits nach einer Behandlungsdauer von 1h als auch bei der niedrigsten Behandlungstemperatur. Die höchste Behandlungstemperatur führte zur geringsten Materialfeuchte. In Abhängigkeit von der Behandlungsdauer bei gleicher Temperatur (185 °C) lagen die Unterschiede bei bis zu 4 % und lagen damit im gleichen Bereich wie die Ergebnisse in Abhängigkeit der Behandlungstemperatur.

#### 4.2.6 Wärmeleitfähigkeit

##### **Holzfaserstoffe aus industrieller Produktion**

Die Wärmeleitfähigkeit wurde bei unterschiedlichen Rohdichten an den Holzfaserstoffen gemessen. Sie lag zwischen 50 kg/m<sup>3</sup> und 107 kg/m<sup>3</sup>. Abbildung 4.42 zeigt die Wärmeleitfähigkeiten der industriellen Faserstoffe in Abhängigkeit der Rohdichte.

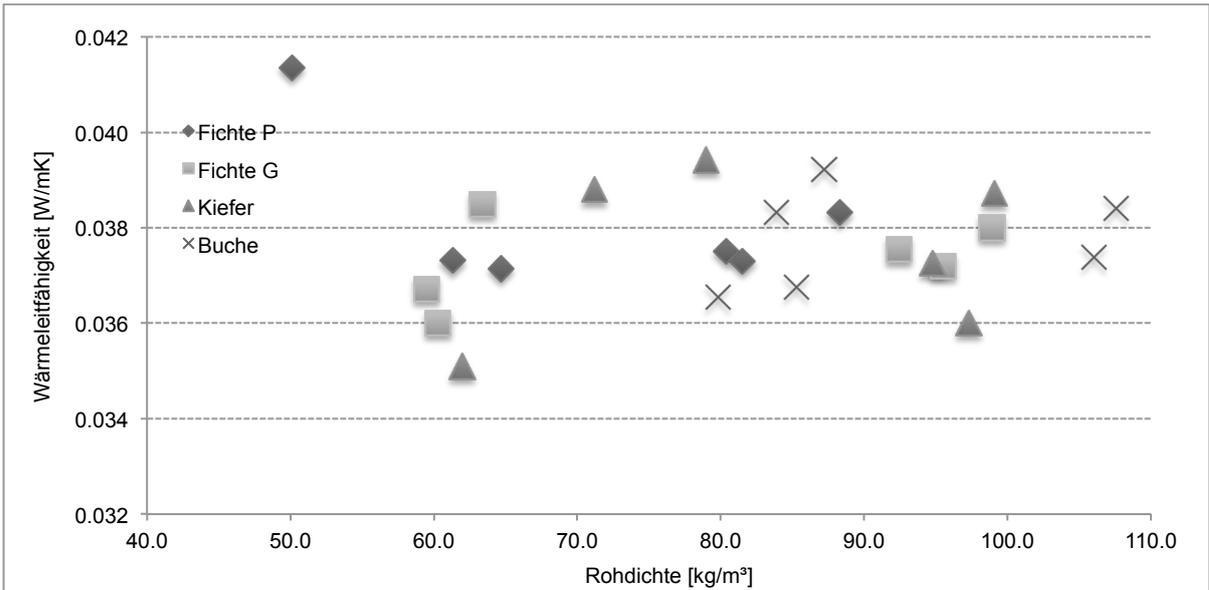


Abbildung 4.42: Wärmeleitfähigkeit industrieller Holzfaserstoffe in Abhängigkeit der Rohdichte

Eine direkte Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit von der Rohdichte zeigte sich in diesem Rohdichtebereich nicht. Zudem waren auch keine Unterschiede in Abhängigkeit von der Holzart erkennbar. Zusätzlich wurden die Faserstoffe in zwei Teile fraktioniert. An der Grobfraktion (> 4mm) bzw. Feinfraktion (< 0.5mm) wurde ebenfalls die Wärmeleitfähigkeit gemessen (vergl. Abbildung 4.43). Auch anhand dieses Vergleichs war keinen Zusammenhang mit der Rohdichte erkennbar. Wie zuvor bereits für industrielle Holzfaserdämmstoffe ermittelt, zeigte sich im Rohdichtebereich von 40-100 kg/m<sup>3</sup>, dass die Fasergröße nur sehr geringen Einfluss auf die Wärmeleitfähigkeit besitzt.

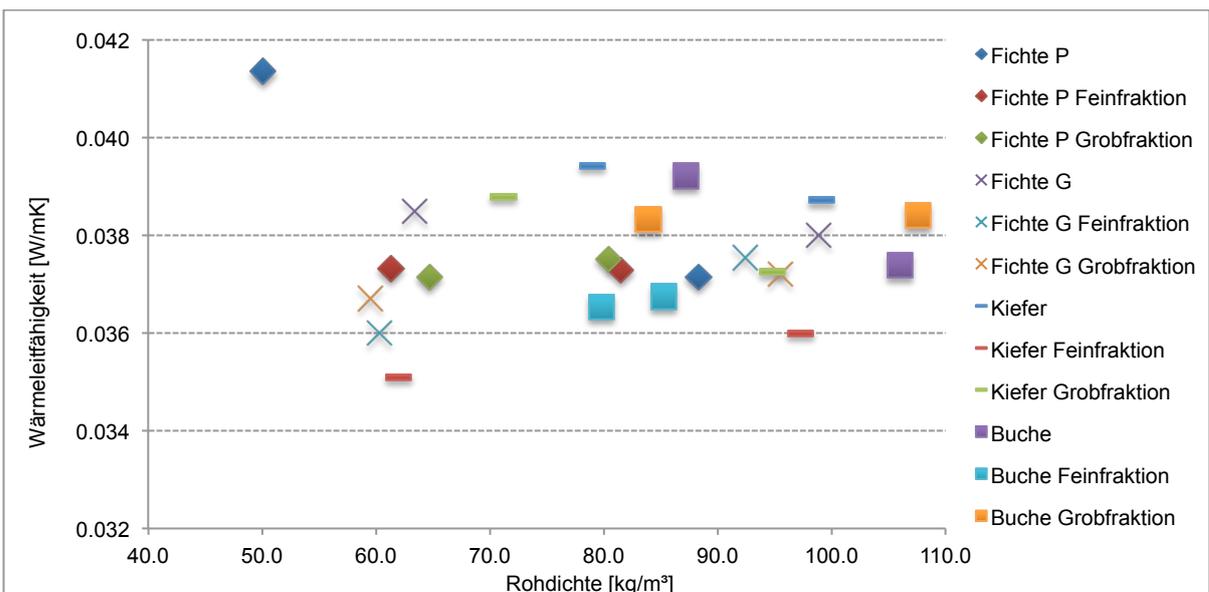


Abbildung 4.43: Wärmeleitfähigkeit fraktionierter industrieller Holzfaserstoffe in Abhängigkeit der Rohdichte

Der Grund für die hier fehlende Abhängigkeit zwischen Wärmeleitfähigkeit und Rohdichte liegt vermutlich darin, dass in diesem Rohdichtebereich die Wärmeübertragung durch Leitung in einem Ausmass durch eine andere Übertragungsart überlagert wird, welches die Fasermorphologie in den Hintergrund treten lässt. Die Fasergrösse hat demnach dann eine massgebliche Auswirkung, wenn die Packungsdichte des Faserverbundes, also die Schüttdichte, ein bestimmtes Mindestmass erreicht und die Anzahl der Berührungspunkte und die Fasermorphologie die Wärmeleitung am stärksten beeinflussen. Ist die Packungsdichte geringer, wirkt sich der Luftanteil und der Anteil der Strahlung an der Wärmeübertragung stärker aus, so dass die Fasergeometrie an Bedeutung verliert. Zeitler hatte den gleichen Zusammenhang bereits für Mineralfasern aufgezeigt (Zeitler 2000).

Abbildung 4.44 zeigt die Wärmeleitfähigkeiten der Prüfkörper, die im Nass- und Trockenverfahren aus den Faserstoffen hergestellt worden waren. Die Herstellung nach den beiden Verfahren war erfolgt, um den industriellen Prozess nachzuvollziehen und die Ergebnisse vergleichen zu können.

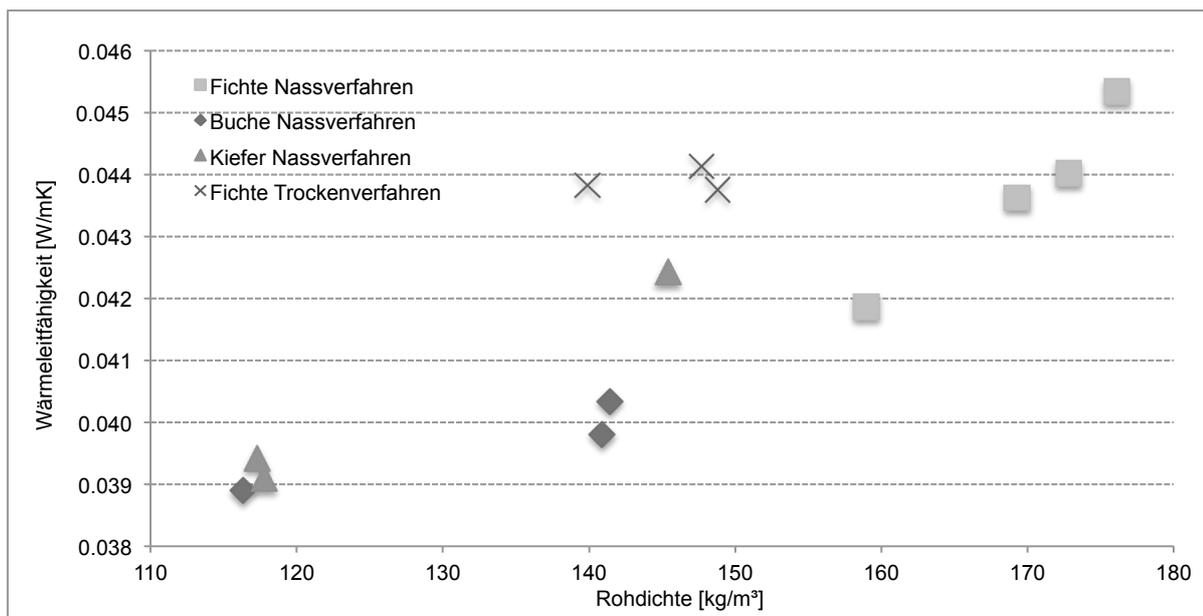


Abbildung 3.44: Wärmeleitfähigkeit von Prüfkörpern nach dem Nassverfahren und Trockenverfahren hergestellt in Abhängigkeit der Rohdichte.

Für die Prüfkörper nach dem Nassverfahren konnte eine Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit von der Rohdichte festgestellt werden (z.B.  $R^2 = 0.89114$  für Fichtenfaserstoff). Für die Prüfkörper nach dem Trockenverfahren war aufgrund des geringen Probenumfangs keine Aussage möglich. Die Werte der Wärmeleitfähigkeit lagen im Vergleich mit den Prüfkörpern aus dem Nassverfahren zwischen 1 und 4 Milliwatt höher. Das darf hinsichtlich der geringeren Fasergrösse des Faserstoffs für die Prüfkörper aus dem Trockenverfahren als erstaunlich bezeichnet werden. Es war erwartet worden, dass die Ergebnisse geringer liegen. Eine Erklärung könnte im Bindemittelanteil liegen. Die Prüfkörper aus dem Trockenverfahren hat-

ten einen Bindemittelanteil von 4 %, bezogen auf die Trockenmasse, als Bindemittel war pMDI mit einer Dichte von ca.  $1000 \text{ kg/m}^3$  verwendet worden, was die Wärmeleitfähigkeit erhöht haben könnte. Eine weitere Erklärung liegt darin, dass die Faserorientierung bei der labortechnischen Herstellung durch das manuelle Einbringen der beleimten Fasern in die Aushärtungseinheit senkrecht zur Plattenebene erfolgte und dadurch ein erhöhter Anteil an Leitung längs zur Faser vorlag, was zur Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit führte. Dieser Zusammenhang wurde für die beiden Herstellverfahren bereits von Lampert (Lampert 1967) aufgezeigt und wurde anhand der vorliegenden Ergebnisse bestätigt.

### **Labortechnisch hergestellte Faserstoffe**

Aus den labortechnisch hergestellten Holzfasern waren mit dem selbst entwickelten Verfahren Prüfkörper hergestellt und deren Wärmeleitfähigkeit ermittelt worden. Die nachfolgende Abbildung zeigt die Wärmeleitfähigkeit der Prüfkörper in Abhängigkeit von der Schüttdichte des Ausgangsmaterials (vergl. Abbildung 4.45). Die Ergebnisse zeigen zwar eine Zunahme der Wärmeleitfähigkeit mit steigender Schüttdichte der Ausgangsmaterialien, die Ergebnisse müssen aber hinsichtlich der Probenkörperherstellung interpretiert werden, da das lose Material selbst nicht geprüft werden konnte. Insofern liegen hier überlagerte Merkmale vor und anhand der Ergebnisse in Abbildung 4.45 kann kein direkter Zusammenhang zwischen der Wärmeleitfähigkeit und der Schüttdichte des Fasermaterials abgeleitet werden.

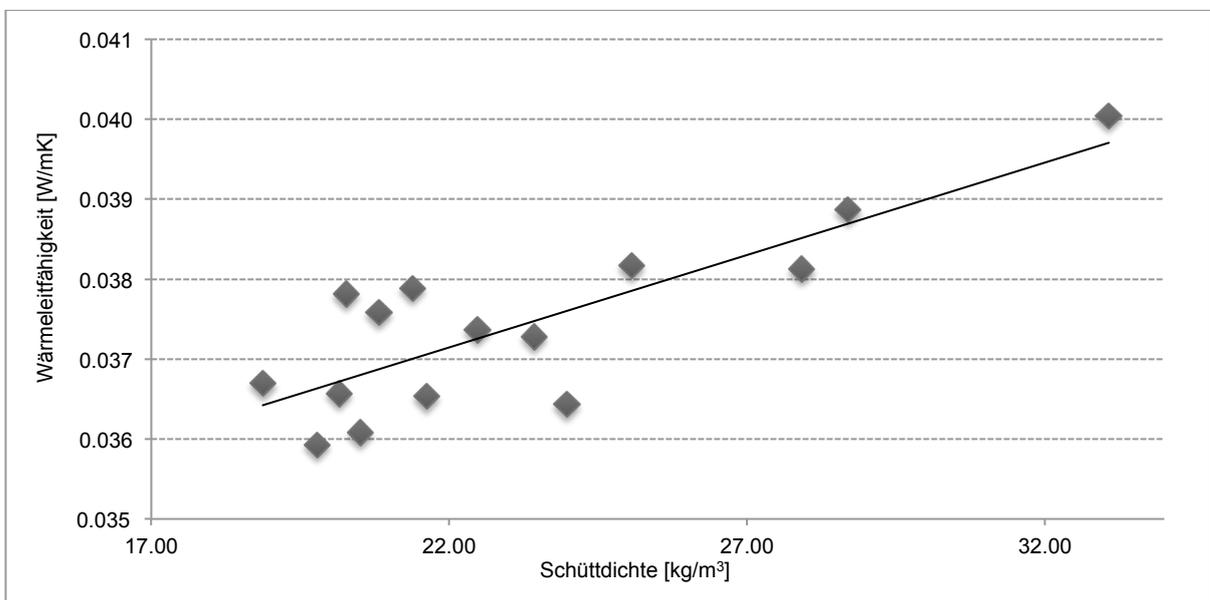


Abbildung 4.45: Wärmeleitfähigkeit von Prüfkörpern aus experimentellen Faserstoffen in Abhängigkeit der Schüttdichte

Um die Ergebnisse besser interpretieren zu können, war bei der Prüfkörperherstellung darauf geachtet worden, die Prüfkörperdichte der Proben in einem möglichst engen Bereich zu halten. Die Messungen erfolgten, wie alle Messungen der Wärmeleitfähigkeit, bei gleichem

Klima und vorheriger Klimatisierung der Prüfkörper bis zur Massekonstanz um den Einfluss der Materialfeuchte zu eliminieren. Eine direkte Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit vom Zerfaserungsdruck zeigte sich anhand der Messungen jedoch nicht eindeutig. Vielmehr zeigen die Ergebnisse, dass das Merkmal der Schüttdichte des Ausgangsmaterials durch die Prüfkörperrohddichte überlagert wird. Abbildung 4.46 zeigt die Wärmeleitfähigkeit der Probekörper aus experimentellen Faserstoffen in Abhängigkeit des Zerfaserungsdrucks und lässt lediglich für die Druckstufe 16 bar erkennen, dass die Wärmeleitfähigkeit leicht erhöht liegt.

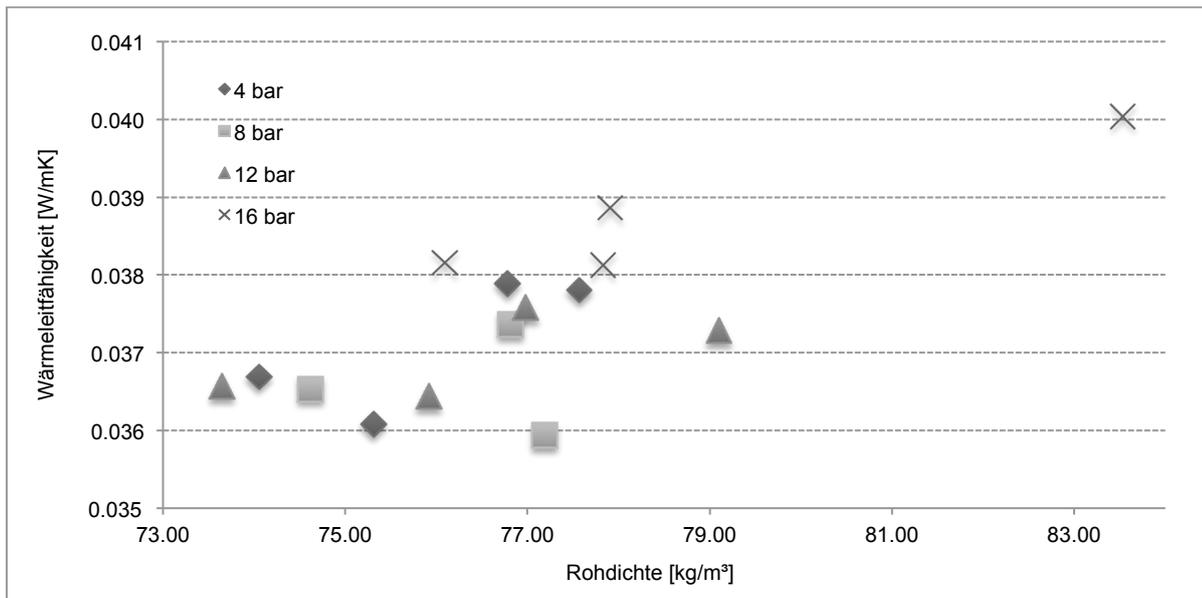


Abbildung 4.46: Wärmeleitfähigkeit von Prüfkörpern aus experimentellen Faserstoffen nach unterschiedlichen Zerfaserungsdruckstufen

Für die Druckbereiche 4, 8 und 12 bar waren keine allgemeingültigen Angaben möglich. Der Rohdichtebereich der Proben lag in einem engen Bereich ( $74\text{-}84\text{ kg/m}^3$ ). Um die Rohdichteschwankung der Materialproben bei der Wärmeleitfähigkeitsmessung zu eliminieren, wurden die Messergebnisse linear auf  $80\text{ kg/m}^3$  normiert. Abbildung 4.47 zeigt die Ergebnisse in Abhängigkeit der Druckstufen für drei unterschiedliche Verweilzeiten.

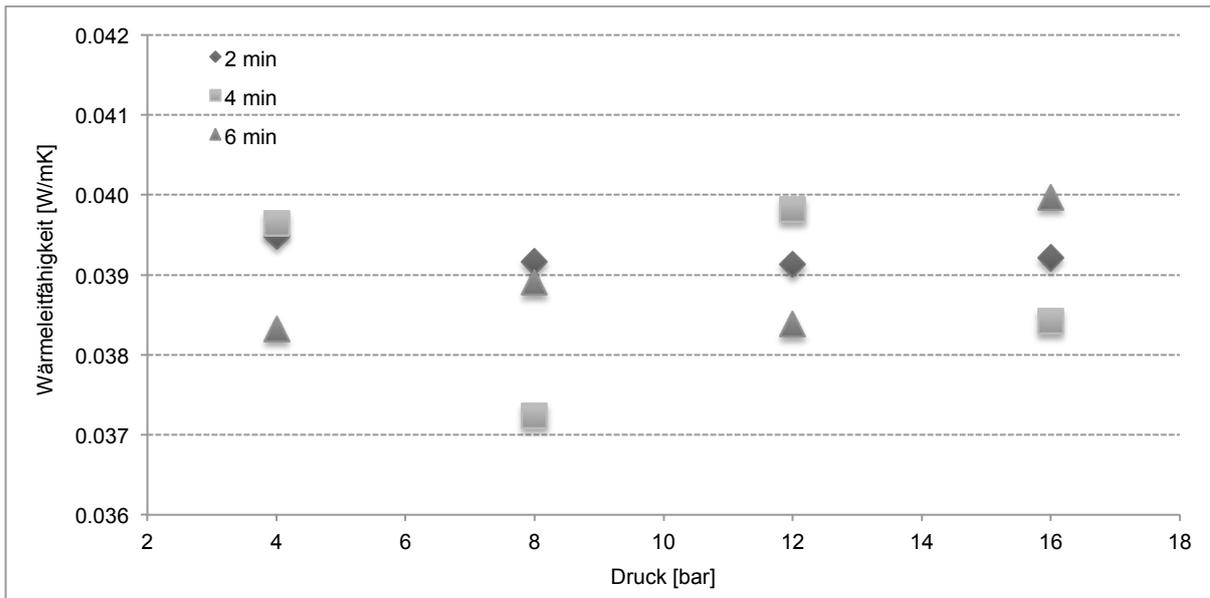


Abbildung 4.47: Wärmeleitfähigkeit von Probekörpern aus experimentellen Faserstoffen normiert auf  $80 \text{ kg/m}^3$  in Abhängigkeit des Zerfaserungsdrucks nach unterschiedlichen Verweilzeiten.

Weder für die Verweilzeiten noch für die unterschiedlichen Druckstufen liessen sich klare Abhängigkeiten aufzeigen. Mit zunehmendem Zerfaserungsdruck hatten die Proben weder eine gesicherte Zunahme noch eine Abnahme der Wärmeleitfähigkeitswerte.

Aufgrund der Ergebnisse der Sorptionsmessungen war erwartet worden, dass die Wärmeleitfähigkeit mit zunehmendem Zerfaserungsdruck abnimmt, da auch die Sorption mit zunehmendem Druck abgenommen hatte, was die Messungen der Wärmeleitfähigkeit nicht bestätigen. Anhand der Partikelanalyse hatte sich ergeben, dass bei der Druckstufe 8 bar die Partikel kleinster Grösse vorlagen. Die Wärmeleitfähigkeit lag in Abhängigkeit vom Zerfaserungsdruck ebenfalls bei diesem Druck am niedrigsten. Aufgrund der geringen Abweichung und der Problematik der Prüfkörperherstellung für die Ermittlung der Wärmeleitfähigkeit ist es anhand der Ergebnisse jedoch nicht möglich, eine allgemeingültige Interpretation abzuleiten. Unter Einbezug der vorliegenden Ergebnisse wäre es folglich einerseits anzustreben, Faserstoffe mit möglichst hohem Druck zu zerfasern, um eine möglichst starke Reduktion der Materialfeuchte zu erzielen. Andererseits sollte der Druck aber nicht zu hoch sein, um die dadurch entstehende Erhöhung der Schüttdichte einzugrenzen. Somit liegen für die Wärmeleitfähigkeit entgegengesetzte Abhängigkeiten mit der Schüttdichte und dem Feuchtegehalt vor. Setzt man nun diese beiden Funktionen als annähernd linear voraus, dann läge der Schnittpunkt  $P(x/y)$  der linearen Funktionen (4.1)

$$f(x) = 0.6489x + 16.625 \quad (4.1)$$

für die Schüttdichte in  $\text{kg/m}^3$  in Abhängigkeit des Zerfaserungsdrucks  $x$  in bar und der linearen Funktion (4.2)

$$f(y) = -0.2497y + 13.501 \quad (4.2)$$

für die Holzfeuchte in % in Abhängigkeit des Zerrfaserungsdrucks  $y$  in bar bei  $P(3.474/14.37)$  und der Zerrfaserungsdruck bei  $x = 14,37$  bar. Somit könnte für die gegenläufigen Funktionen der Schüttdichte und der Feuchteaufnahme in Abhängigkeit vom Zerrfaserungsdruck ein Optimum bei 14 bar lokalisiert werden (Geradenschnittpunkt). Dazu ist jedoch anzumerken, dass derart hohe Zerrfaserungsdrücke aktuell nur auf Laboranlagen möglich sind. Im industriellen Bereich liegen die Maximaldrücke bei 10-12 bar und es wäre folglich anzustreben, den Zerrfaserungsdruck maximal zu halten.

Die Wärmeleitfähigkeiten der zusätzlich thermisch behandelten Proben waren jeweils geringer als die Werte der nicht behandelten Proben.

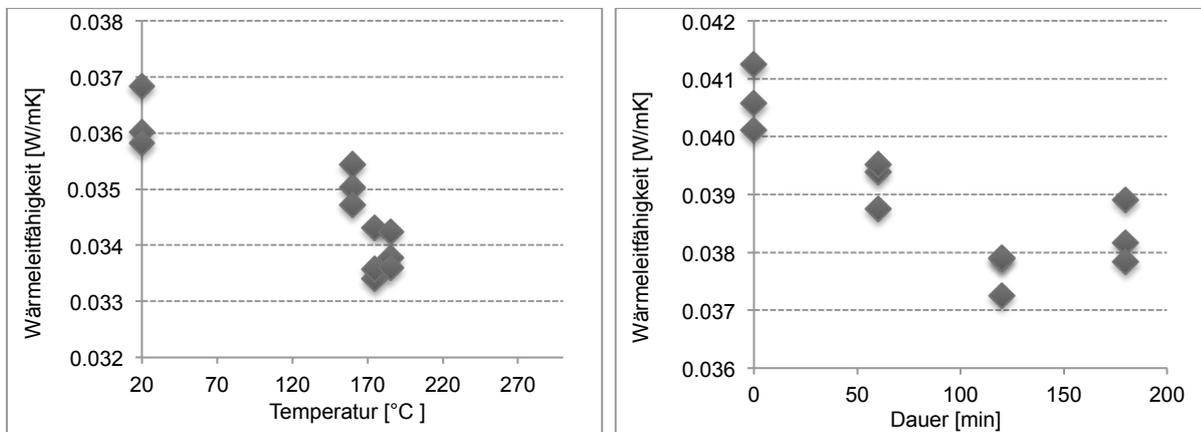


Abbildung 4.48: Wärmeleitfähigkeiten von Probekörpern aus thermisch behandelten Holzfaserstoffen in Abhängigkeit der Temperatur (links) und in Abhängigkeit der Behandlungsdauer (rechts).

Die Ergebnisse in Abbildung 4.48 zeigen eine Abnahme der Wärmeleitfähigkeit von Probekörpern aus thermisch behandeltem Faserstoff sowohl für die Behandlung mit variabler Temperatur als auch variabler Dauer. Die Ergebnisse zeigen die direkte Auswirkung der reduzierten Materialfeuchte infolge der zusätzlichen thermischen Behandlung. Die Werte der Wärmeleitfähigkeit waren bei gleicher Dauer und zunehmender Temperatur zwischen 1.17 und 2.47 mW/(mK) geringer. Bei zunehmender Behandlungsdauer lagen die Werte zwischen 1.43 und 2.98 mW/(mK) und damit unter denen der unbehandelten Proben und für beide Behandlungsvarianten im ähnlichen Bereich.

### 4.3 Modellierung der Wärmeleitfähigkeit

Für die Modellierung der Wärmeleitfähigkeit wurden die Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen an den Faserstoffen in das gewählte Modell übertragen. Verwendet wurden die Werte der industriellen Faserstoffe (Buche, Fichte P und Kiefer) und der labortechnisch hergestellten Faserstoffe (F122, F125, F130, F134). Für die Rohdichte wurden jeweils die Ergebnisse der Porosimetrie verwendet. Die Fasergrößen und deren Verteilung entstammten den morphologischen Untersuchungen mittels digitaler Bildverarbeitung (Camsizer). Die Probendicken wurden aus der Dickenbestimmung der Wärmeleitfähigkeitsmessung übernommen. Tabelle 4.8 zeigt die verwendeten Werte.

Tabelle 4.8: Verwendete Werte der Faserstoffe zur Modellierung

<b>Probe</b>	<b>Rohdichte [kg/m<sup>3</sup>]</b>	<b>Wärmeleitfähigkeit [W/mK]</b>	<b>Probendicke [mm]</b>	<b>Faserdurchmesser [mm]</b>
Buche	593	0.16	34.7	4.49
Fichte P	538	0.11	56.5	1.02
Kiefer	604	0.13	38.3	3.57
F122	538	0.11	70.2	1.59
F125	538	0.11	69.1	1.72
F130	538	0.11	75.7	0.99
F134	538	0.11	57.0	1.13

Für den Wert der Emissivität der Holzfasern wurde zunächst für alle Proben 0.5 gewählt. Die Wärmeübertragungsvorgänge durch den Luftanteil, den Faseranteil und den Strahlungsanteil wurden separat in Abhängigkeit der Probendichte modelliert und anschliessend summiert. Abbildung 4.49 zeigt den Übertragungsvorgang durch den Luftanteil mit einer angenommenen Wärmeleitfähigkeit von  $\lambda = 0.026 \text{ W/mK}$  in Abhängigkeit der Probenrohddichte. Für die Varianten Fichte P sowie die labortechnischen Faserstoffe (F122-F134) war die gleiche Rohdichte angenommen worden, deshalb variieren diese Kurven nicht und in der Abbildung erfolgte nur die Darstellung der Probe Fichte P.

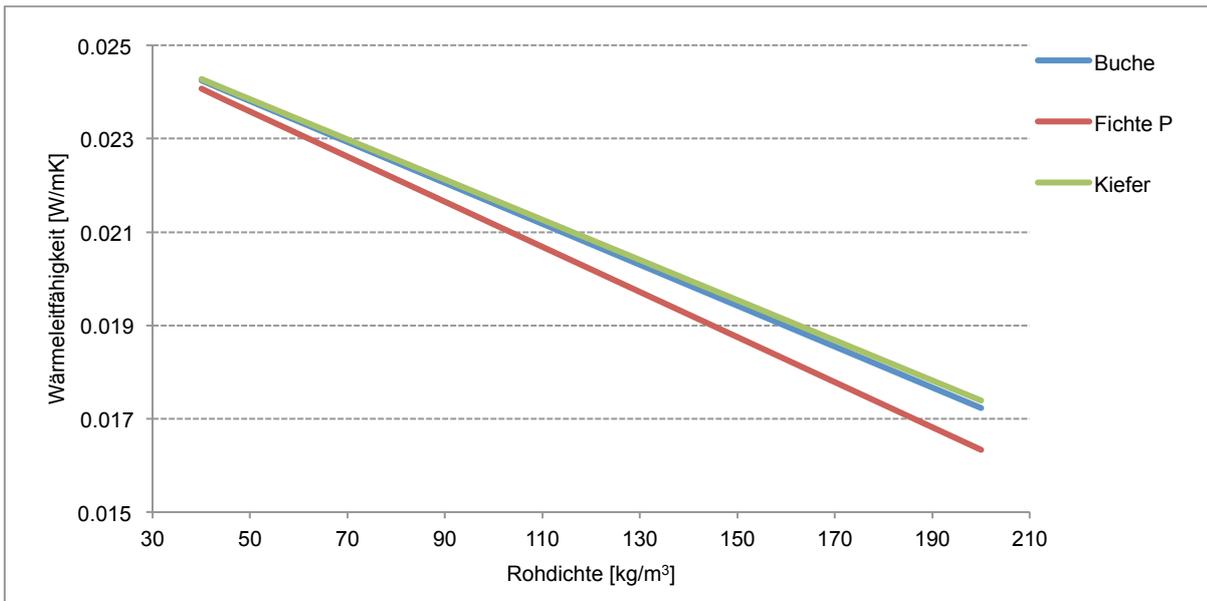


Abbildung 4.49: Modellierte Wärmeleitfähigkeit des Luftanteils innerhalb der Probe in Abhängigkeit der Rohdichte

Es zeigte sich der starke Einfluss des Luftanteils. Mit zunehmender Probenrohddichte stieg der Anteil an Holzfasern und der Luftanteil sank. Damit sank auch der Anteil der Luft an der Wärmeübertragung. Der Unterschied in der Faserreindichte stieg mit zunehmender Rohddichte, war jedoch insgesamt betrachtet mit einem maximalen Unterschied von 1 Milliwatt bei Dichte  $200 \text{ kg/m}^3$  nur gering. Das erklärt, weshalb Faserstoffe mit Fasern sehr hoher Reindichte (z.B. Mineralfasern) sehr niedrige Wärmeleitfähigkeiten aufweisen können.

Die Modellierung des Faseranteils an der Gesamtwärmeübertragung in Abhängigkeit der Probenrohddichte ist in Abbildung 4.50 dargestellt.

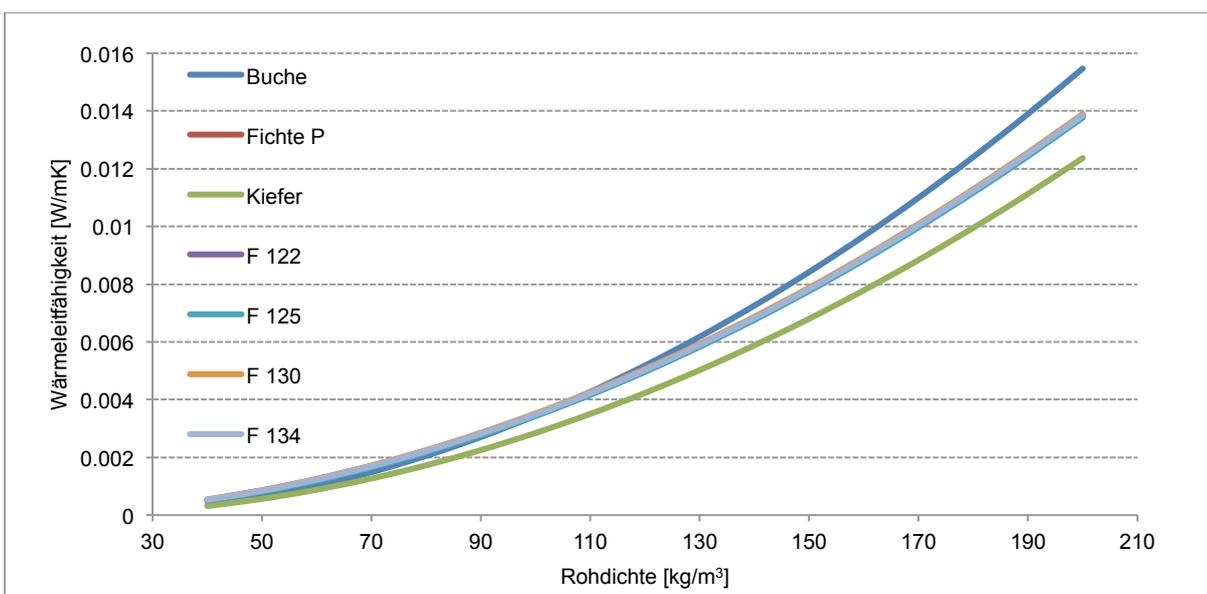


Abbildung 4.50: Modellierte Wärmeleitfähigkeit des Faseranteils innerhalb der Probe in Abhängigkeit der Rohdichte

Die Kurven waren durch den im Modell zugrunde gelegten Zusammenhang aus Faserreindichte und Faserdicke sowie der Faserwärmeleitfähigkeit bestimmt (Formeln 3.19 und 3.20). Die Auswirkung der Wärmeleitfähigkeit der Faser zeigte sich am Ergebnis der Proben Buche und Kiefer, mit jeweils ähnlichen Reindichten und Faserdicken. Die Kieferprobe wies geringere Werte auf, mit steigender Dichte nahm der Unterschied auf bis zu 3 mW/mK bei einer Dichte von 200 kg/m<sup>3</sup> zu. Die Auswirkung der Faserdicke zeigte sich durch den Vergleich zwischen den Werten für F 134 und Kiefer. Zwar hatte die Probe Kiefer eine höhere Wärmeleitfähigkeit, jedoch auch deutlich höhere Faserdicken, was zu weniger Kreuzungspunkten und Linienkontakten und damit zu geringerer Wärmeübertragung führte (vergl. Abbildung 3.19). Einen Beleg für diesen Zusammenhang liefern die morphologischen Untersuchungen, anhand derer Mineralfasern das höchste Breiten/Längen Verhältnis aufwiesen, was im Faserverbund zu weniger Kreuzungspunkten, und damit bei gleicher Dichte zu geringeren Werten der Wärmeleitfähigkeit führen kann. Die Faserreindichte würde isoliert betrachtet dazu führen, dass mit steigender Dichte die Wärmeleitfähigkeit sinkt. Mit steigender Dichte eines Materials steigt jedoch jeweils auch die Wärmeleitfähigkeit, was im Modell berücksichtigt und damit korrigiert wurde. Deutlich wird das ebenfalls anhand von Mineralfasern, die trotz sehr hoher Faserreindichte (> 1500 kg/m<sup>3</sup>) und sehr hoher Wärmeleitfähigkeit der Einzelfaser (> 1.8 W/mK) im Faserverbund zu Dämmstoffen mit niedrigen Werten der Wärmeleitfähigkeit verarbeitet werden können.

Die Modellierung des Strahlungsanteils an der Wärmeübertragung in Abhängigkeit der Probedichte ist in Abbildung 4.51 dargestellt:

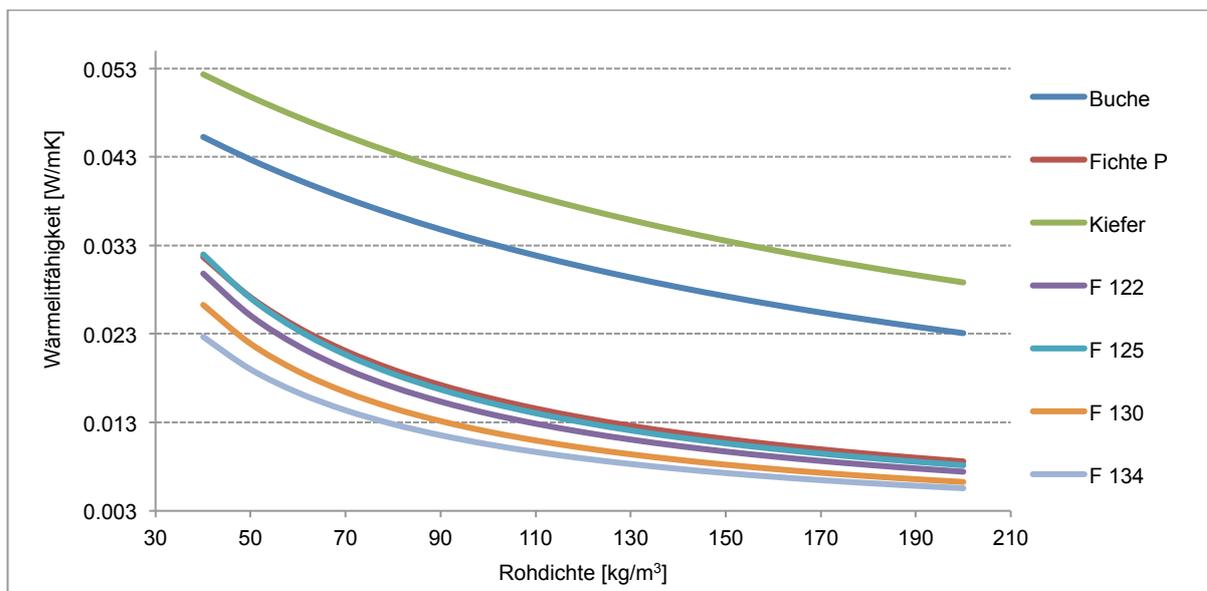


Abbildung 4.51: Modellierte Wärmeleitfähigkeit des Strahlungsanteils innerhalb der Probe in Abhängigkeit der Rohdichte

Es zeigte sich bei konstanten Werten der Emissivität, der Temperatur und der Temperaturdifferenz ebenfalls der Einfluss der Probenrohichte. Mit zunehmender Dichte sank die Wärmeleitfähigkeit des Strahlungsanteils, da der Strahlungsdurchgang dadurch verringert wird. Die Auswirkung der Faserreindichte wurde an den unterschiedlichen Ergebnissen der Buchen- und Kieferproben deutlich. Die Kieferprobe verfügte absolut betrachtet über die höchsten Werte der Wärmeleitfähigkeit. Zwischen den Proben Fichte P und Buche bzw. Kiefer bestand zudem ein Unterschied der Grösse und der Streuung der Partikeldicke. Abbildung 4.52 veranschaulicht die Streuung der Partikeldicken der Proben Buche, Fichte P und Kiefer und es lässt sich aufzeigen, dass die Fichtenfasern eine geringere Häufigkeitsverteilung aufweisen, als die Proben aus Buchen- bzw. Kiefernfasern. Das zeigt auf, dass im Modell nicht nur die Partikeldicke, sondern auch die Streuung der Partikeldicken eine Auswirkung auf die Wärmeleitfähigkeit besitzt. Bei geringerer Streuung der Partikeldicken ist die Wärmeleitfähigkeit ebenfalls geringer.

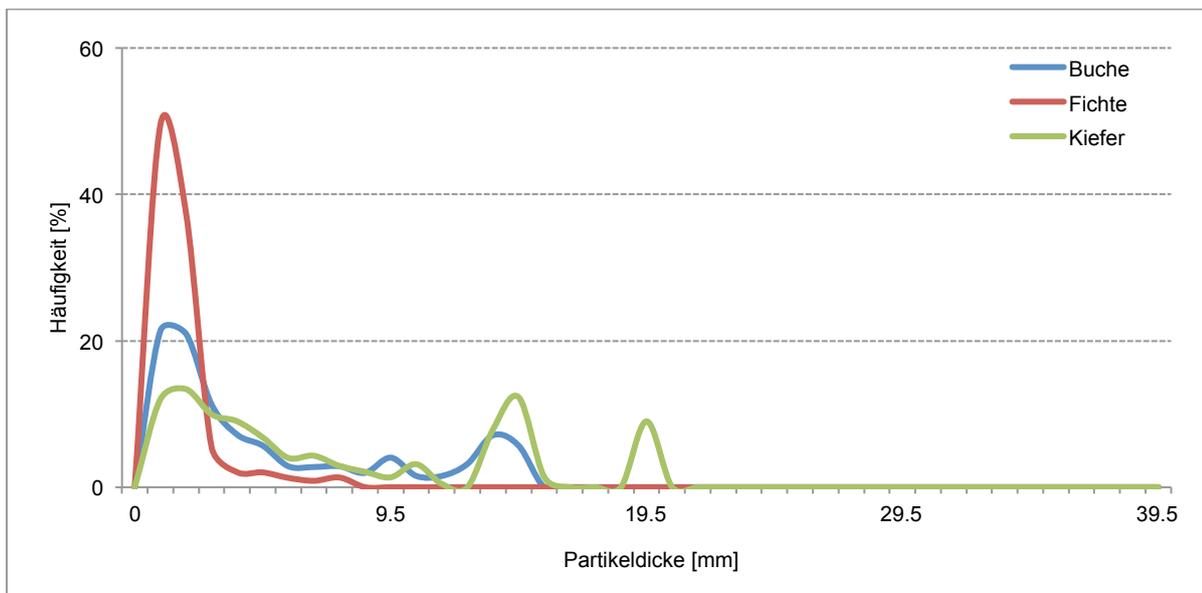


Abbildung 4.52: Häufigkeitsverteilung der Partikeldicke für industrielle Faserstoffe aus Buche, Fichte und Kiefernholz

Nach Gleichung 3.21 nimmt mit zunehmender Partikeldicke und zunehmender Dickenstreuung die Wärmeübertragung zu, was an den Kurven für Buche und Kiefer deutlich wird. Für niedrige Wärmeübertragung durch Strahlung wäre somit anzustreben, Fasern mit geringer Streuung zu verwenden. Dies wird ebenfalls durch die morphologischen Untersuchungen an den Holz- und Mineralfasern bestätigt. Mineralfasern wiesen deutlich homogenere Fasern auf als Holzfasern, die nach der Zerkleinerung in stark variierender Form von Faserbündeln, Faserbruchstücken und Fasern vorlagen.

Die modellierte Summe der Wärmeübertragung aus den Anteilen Luft, Faser und Strahlung für die Proben zeigt Abbildung 4.53. Zusätzlich sind Vergleichswerte aus Messungen an den

Proben F 122-F 134 und den Buchen-, Fichten- und Kiefernfasern angegeben (MW 122-134 und MW Bu-Fi-Ki).

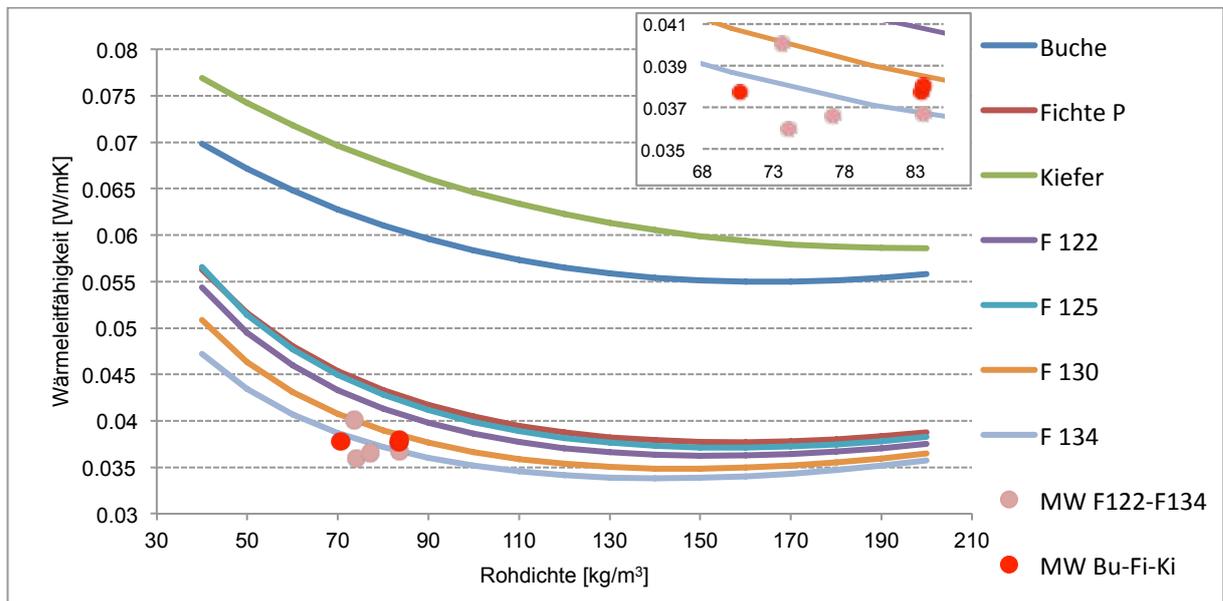


Abbildung 4.53: Wärmeübertragung modelliert aus den Anteilen Luft, Fasern und Strahlung für labor-technisch hergestellten und industriellen Faserstoff sowie Messwerte (MW) der Wärmeübertragung, die zur Verdeutlichung vergrößert dargestellt sind (in der Abbildung rechts oben).

Während für die labortechnisch hergestellten Faserstoffe (F 122-F 134) eine gute Übereinstimmung der Modellierung mit den gemessenen Ergebnissen vorlag, waren die theoretischen Werte für Buchen- und Kiefernfasern deutlich zu hoch. Die Ergebnisse für industrielle Fichtenfasern (Fichte P) lagen hingegen im nahen Bereich der gemessenen Werte. Die Validierung des Modells war von Manohar (Manohar und Kochhar 2012) ursprünglich anhand von Kokosnuss- und Zuckerrohrfasern mit einer sehr geringen Faserverteilung (80 % der Fasern lagen im Bereich von maximal 0.36 mm) und maximalen Faserdicken von 0.52 mm erfolgt. Das legt nahe, dass die Modellierung mit zunehmender Partikeldicke an Genauigkeit verliert. In der nachfolgenden Tabelle 4.9 sind die Prozentanteile der einzelnen Übertragungsarten an der Gesamtwärmeübertragung am Beispiel Fichtenfaserstoff (Probe F 122) für fünf Rohdichten aufgeführt.

Tabelle 4.9: Anteile der Übertragungsarten an der Gesamtwärmeleitfähigkeit in Prozent

Übertragungsart	Dichte [kg/m³]				
	40	80	120	160	200
Luft [%]	44	54	54	50	43
Leitung [%]	1	5	13	24	37
Strahlung [%]	55	41	32	25	20
Gesamtwärmeleitfähigkeit [W/mK]	0.054	0.041	0.037	0.036	0.038

Es wird dabei deutlich, dass die Übertragung durch den Luftanteil mit Werten zwischen 43 % und 54 % einen grossen Einfluss hatte, zudem blieb der Wert über den gesamten Rohdichtebereich auf diesem Niveau konstant. Der Anteil der Wärmeleitung durch die Faser am Gesamtwärmedurchgang stieg hingegen von einem sehr niedrigen Anteil von nur 1 % bis zu 37 % kontinuierlich an. Dadurch lässt sich erklären, warum aus vergleichsweise schweren Mineralfasern ein Fasergefüge mit niedriger Gesamtwärmeleitfähigkeit entsteht. Der Strahlungsanteil lag mit 55 % bei der geringsten Dichte sehr hoch und nahm kontinuierlich bis auf einen Anteil von 20 % ab. Andere Untersuchungen kommen diesbezüglich auf abweichende Ergebnisse. So untersuchte beispielsweise Kaemmerlen (Kaemmerlen, Asllanaj et al. 2010) für Holzfaserdämmplatten mit einer Rohdichte von  $170 \text{ kg/m}^3$  den Einfluss der Wärmestrahlung mit dem Ergebnis, dass dieser vernachlässigbar klein ist. Die Auswirkung der Emissivität war im Modell sehr stark. Abbildung 4.54 zeigt am Beispiel der Probe Fichte 122 für drei Rohdichtebereiche (40, 80 und  $160 \text{ kg/m}^3$ ) die Wärmeleitfähigkeit in Abhängigkeit der Emissivität. Mit zunehmender Rohdichte des Probekörpers nahm der Einfluss der Emissivität ab. Zur Verifizierung dieser starken Abhängigkeit wurde zusätzlich experimentell ein Probekörper mit sehr geringem Wert der Emissivität hergestellt und die Wärmeleitfähigkeit gemessen. Das erfolgte mittels einer Holzfaserprobe, in die eine stark reflektierende Schicht (Aluminiumfolie) hinzugefügt wurde. Die Reflexionsschicht war in der Probenmitte über die ganze Probenfläche eingebaut worden und die Messergebnisse lieferten eine gute Übereinstimmung mit der Modellierung bei Annahme einer Emissivität von 0.1. Zudem bestätigten sie Untersuchungen von Joscak an Holzwerkstoffen (Joscak 2013), die eine Reduktion der Wärmeleitfähigkeit mittels einer Reflexionsschicht um bis zu 58 % aufzeigten.

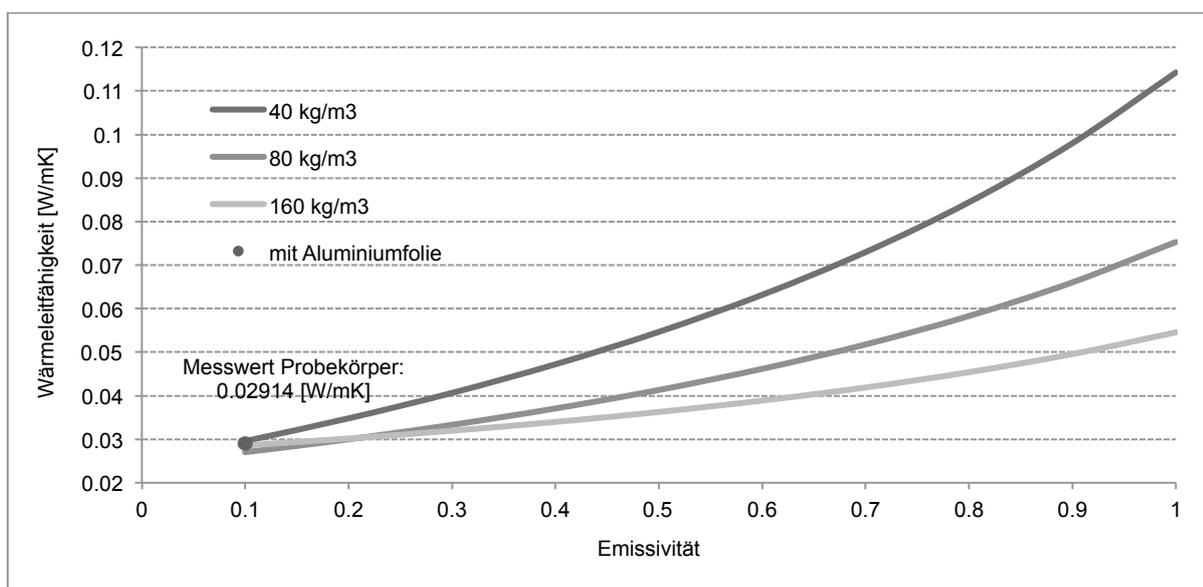


Abbildung 4.54: Wärmeleitfähigkeit in Abhängigkeit der Emissivität am Beispiel von Fichtenfaserstoff (Probe F122) für drei Rohdichtebereiche und der Messwert einer Vergleichsmessung

Zusätzlich waren auch Probekörper mit reflektierenden Partikeln auf Graphitbasis hergestellt worden (vergl. Tabelle 2.4). Damit sollte ermittelt werden, ob durch den Einsatz von stark absorbierenden Materialien die Wärmeleitfähigkeit gesenkt werden kann. Neben herkömmlichem Graphit (Probekörper Fichte P/S1) wurde auch ein spezielles Produkt mit optimierter Absorption eingesetzt (Probekörper Fichte P/S2). Abbildung 4.55 zeigt die Wärmeleitfähigkeit der Probekörper in Abhängigkeit der Rohdichte.

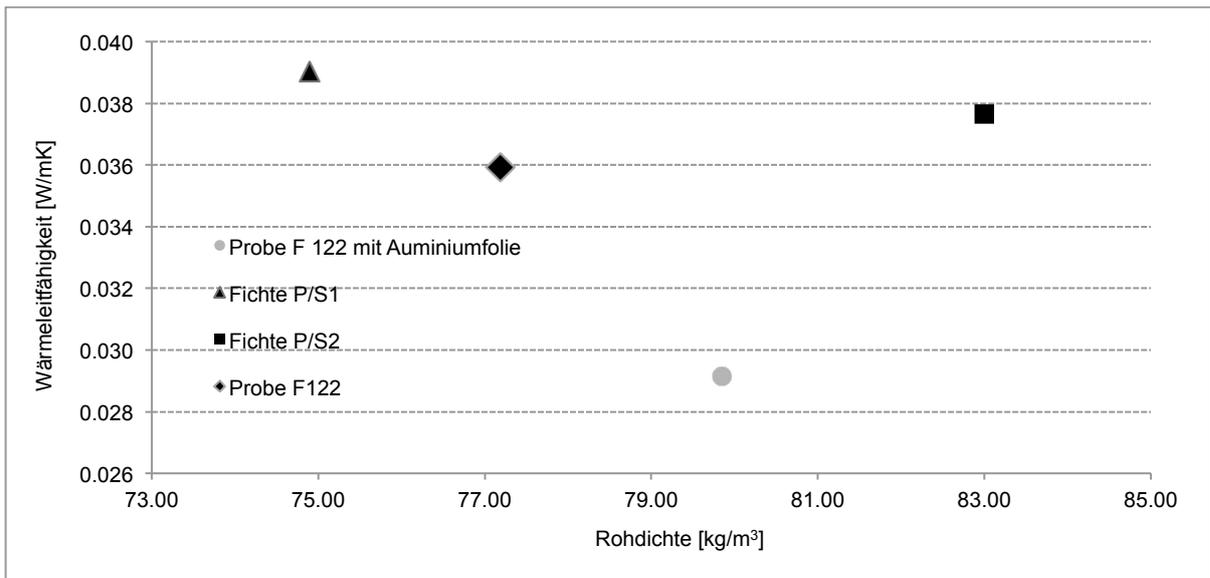


Abbildung 4.55: Wärmeleitfähigkeit in Abhängigkeit der Rohdichte am Beispiel von Fichtenfaserstoff, Prüfkörpern mit Graphitpartikeln und einem Prüfkörper mit Aluminiumfolie in der Mitte.

Die Zugabe der Graphitpartikel brachte keine Verbesserung der Werte. Die Messwerte lagen sogar höher als die einer Vergleichsprobe ohne Graphitpartikel. In diesem orientierenden Versuch lag die Dosiermenge der Graphitpartikel jedoch sehr hoch und es muss angenommen werden, dass das Material die entgegengesetzte Wirkung erzielte und durch die zusätzlichen Partikel mehr Kontaktpunkte innerhalb der Fasermatrix bewirkte und dadurch die Werte der Wärmeleitfähigkeit erhöhte.

## 5 Synthese

### 5.1 Abschliessende Diskussion und Zusammenfassung

Die Materialcharakterisierungen hinsichtlich der Einflussfaktoren Rohstoff, Herstellverfahren und Aufschlussbedingungen zeigten nur zum Teil eindeutige Abhängigkeiten auf. Die Simulation der Wärmeleitfähigkeit lag nur bei den labortechnisch hergestellten Faserstoffen in Übereinstimmung mit den Messergebnissen. Im Folgenden werden die Ergebnisse abschliessend beurteilt und zusammengefasst.

Der **Rohstoff** bzw. die holzartenspezifischen Unterschiede des Ausgangsmaterials wurden durch die Zerfaserung grösstenteils egalisiert, wie die Ergebnisse der Porosimetrie und der chemischen Analyse zeigten. Die Analysen ergaben, dass es durch die Zerfaserung und die damit einhergehende thermische, hygri-sche und mechanische Behandlung zu einer Vereinheitlichung der holzartenspezifischen Unterschiede kommt. Für die Faserstoffherstellung bedeutet das folglich, dass es möglich ist, holzartenspezifische Merkmale zu reduzieren und bisher weniger übliche Holzarten für einen teilweisen oder vollständigen Ersatz der bisher üblichen Materialien einzusetzen. Dabei ist allerdings beim Einsatz von Laubhölzern die im Vergleich zu Nadelhölzern geringere Ausbeute an verwendbarem Fasermaterial zu beachten. Die Materialfeuchte der Holz-faserproben variierte bei allen Pro-bentypen ebenfalls wenig. Die Sorptionsisothermen für Feuchteaufnahme und Feuchteabgabe wiesen für die Holz-faserstoffe aus Fichten-, Buchen- und Kiefernholz einen ähnlichen Verlauf wie bei Vollholz auf, d.h. mit Unterschieden zwischen Ad- und Desorption von maximal 3 % war der Hystereseeffekt deutlich erkennbar. Damit sind die untersuchten Holz-faserprodukte in ihren hygroskopischen Eigenschaften mit denen von Vollholz vergleichbar, die Gleichgewichtsfeuchte (bei 20 °C und 65 % rel. Luftfeuchte) lag mit durchschnittlich 9-11 % allerdings leicht niedriger als diejenige von Fichte mit 12 %. Einerseits erfolgt durch die Temperaturbehandlung während der Zerfaserung ein Abbau von Holzbestandteilen wie beispielsweise Hemizellulosen, die die Materialfeuchte stark beeinflussen. Andererseits führt die starke Desintegration des Holzverbundes bei der Zerfaserung zu einem erhöhten Anteil an kleinen Oberflächen. In Folge dessen kommt es zu einer Verschiebung der einzelnen Feuchteaufnahmevorgänge hin zu vermehrter Wasseraufnahme durch Kapillarkondensation im Gegensatz zur Adsorption durch Poren geringerer Grösse und damit zu grösseren Unterschieden zwischen Adsorption und Desorption. Wesentliche Unterschiede zwischen den Holz-faserprodukten und den Mineralfaserprodukten lagen vor. Die Feuchte von Mineralfaserprodukten lag mit Werten von maximal 2 % sehr deutlich unterhalb der von Holz-faserprodukten und erklärt damit zum Teil die geringeren Werte der Wärmeleitfähigkeit. Es wäre also auch für Holz-faserprodukte anzustreben, die Materialfeuchte weiter zu reduzieren, um damit die Wärmeleitfähigkeit senken zu können. Die Wärmeleitfähigkeiten der industriellen Holz-faserstoffe wiesen bei gleicher Rohdichte kei-

ne Unterschiede in Abhängigkeit der Holzart auf und lagen im gleichen Bereich wie industriell hergestellte Produkte. Im Dichtebereich von  $50 \text{ kg/m}^3$  bis  $107 \text{ kg/m}^3$  zeigte sich keine Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit von der Rohdichte. Die zusätzlich in zwei Teile fraktionierten Holzfasern zeigten in diesem Rohdichtebereich zudem keine Unterschiede in Abhängigkeit von der Fasergrösse.

Das **Herstellverfahren** zeigte eine klare Differenzierung hinsichtlich des Rohdichteniveaus der Fertigprodukte. Durch die starke Abhängigkeit der Materialeigenschaften von der Rohdichte, insbesondere im Rohdichtebereich ab  $100 \text{ kg/m}^3$ , zeigten sich infolge dessen auch Auswirkungen beim Feuchtetransport und der Wärmeleitfähigkeit. Der Feuchtetransport (Diffusion) war beim Trockenverfahren zwar leicht verbessert (geringerer Wert des Dampfdiffusionswiderstandes), das Niveau liegt jedoch insgesamt sehr niedrig, weshalb diesem Unterschied geringe Bedeutung beizumessen ist. Die Rohdichten der untersuchten Holzfaserdämmplatten aus dem Nassverfahren wiesen bei vergleichbaren Produkttypen höhere Werte auf als die Proben aus dem Trockenverfahren. Durch den Zusammenhang zwischen der Rohdichte und der Wärmeleitfähigkeit ergeben sich dadurch klare Vorteile für das Trockenverfahren bei der Reduktion der Wärmeleitfähigkeit, da gleiche Produkttypen (z.B. eine Unterdachplatte) mit geringerer Rohdichte und damit geringerer Wärmeleitfähigkeit hergestellt werden können. Der Grund dafür liegt im Verfahren selbst, bei dem die getrockneten Fasern zunächst pneumatisch zu einer Matte geformt und anschliessend ohne grössere Pressdrücke zur Platte geformt werden. Zudem erfolgt der Einsatz eines Bindemittels mit sehr gutem Benetzungsverhalten (PMDI), was zu einer hohen Effizienz des Bindemittels bzw. höheren Festigkeiten führt. Im Gegensatz dazu erfolgt im Nassverfahren während der Mattenformung gleichzeitig die Entwässerung mit hohen Pressdrücken und einer starken Verdichtung der Fasermatrix, was zwangsläufig zu einer erhöhten Rohdichte der Platte führt. Flexible Holzfaserdämmstoffe aus Holzfasern hatten zwar leicht höhere Rohdichten als Vergleichsproben aus Steinwolle oder Glaswolle, in Abhängigkeit des Anteils an Bindefasern wären jedoch auch gleiche Rohdichten wie diejenigen von Mineralfaserdämmstoffen möglich. Auch das Quell-Schwindverhalten der untersuchten Holzfaserproben war für die Quellung in Plattenrichtung je nach Herstellverfahren unterschiedlich ausgeprägt. Proben aus dem Nassverfahren zeigten in Produktionsrichtung um bis zu 10 % höhere Quellmasse als quer zur Produktionsrichtung. Proben aus dem Trockenverfahren wiesen keine Unterschiede in Abhängigkeit von der Produktionsrichtung auf. Bei beiden Verfahren war die Dickenquellung deutlich höher als die Längenquellung und stieg mit zunehmender Rohdichte an. Die Quellung war teilweise irreversibel und lag um bis zu 0.91 % höher als das Schwinden. Damit gilt für die untersuchten Holzfaserdämmplatten im untersuchten Rohdichtebereich der gleiche Zusammenhang wie für andere Holzwerkstoffe wie beispielsweise Spanplatten. Die starke Abhän-

gigkeit der Quellung in Plattenebene vom Herstellverfahren im Gegensatz zur nicht erkennbaren Abhängigkeit bei der Dickenquellung muss dabei auf die weniger gerichtete Faserorientierung beim Trockenverfahren im Gegensatz zur mehrheitlich ausgerichteten Faserorientierung des Nassverfahrens zurückgeführt werden. Die Wärmeleitfähigkeit von Holzfaserdämmstoffen bzw. -platten hing stark von der Rohdichte ab und Vergleichsmessungen zeigten auf, dass die gleichen Gesetzmässigkeiten wie bei herkömmlichen Dämmstoffen vorlagen, nämlich dass mit zunehmender Dicke und Temperatur die Wärmeleitfähigkeit anstieg. Bei gleichen Rohdichten lagen die Wärmeleitfähigkeiten bei den Mineralfaserplatten jedoch niedriger. Im Rohdichtebereich von 30-65 kg/m<sup>3</sup> um 19 % und im Rohdichtebereich 100-300 kg/m<sup>3</sup> bis zu 21 %. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Mineralfasern eine deutliche, zylindrische Form mit wenig Bruchstücken im Vergleich zu Holzfasern aufweisen. Dadurch reduziert sich die Anzahl der Kontaktpunkte innerhalb des Fasergefüges und damit der Anteil der Wärmeleitung an der Gesamtwärmeübertragung. Zudem lagen die Mineralfasern mit grösseren Durchmessern vor, was bei gleicher Rohdichte zusätzlich zu weniger Kontaktpunkten führt. Letztlich besitzen Mineralfaserprodukte aufgrund ihrer fehlenden hygroskopischen Eigenschaften auch geringere Materialfeuchten, was ebenfalls zu einer Reduktion der Wärmeübertragung führt. Die Werte der Materialkombinationen für die Wärmeleitfähigkeit bzw. des Wärmedurchlasswiderstands stimmten im Vergleich mit den theoretischen und experimentell ermittelten Ergebnissen gut überein. Mit steigender Rohdichte stieg die Wärmeleitfähigkeit an. Dabei zeigte sich ein grösserer Einfluss der Randlagen gegenüber den mittleren Lagen.

Die **Aufschlussbedingungen** führten ebenfalls zu einer deutlichen Differenzierung der Materialeigenschaften. Bei gleichen Zerfaserungsbedingungen zeigten sich die holzartenspezifischen Massen des Rohstoffs auch bei den Faserstoffen. Das zeigte sich an der Schüttdichte der industriellen Holzfasernstoffe von minimal 17 kg/m<sup>3</sup> (Fichte) bis zu maximal 30 kg/m<sup>3</sup> (Buche), die bei gleichen Bedingungen hergestellt worden waren. Der unterschiedliche Zerfaserungsdruck der Proben aus Fichtenholz von 4 bar (Fichte P) und 8 bar (Fichte G) wirkte sich entgegen den Erwartungen nicht auf die Schüttdichte aus, was jedoch auch darauf zurückzuführen ist, dass die Herstellung auf unterschiedlichen Anlagen erfolgt war und das Ausgangsmaterial möglicherweise stark unterschiedlich vorlag. Die Schüttdichte des experimentell im Labor hergestellten Faserstoffs stieg erwartungsgemäss mit zunehmendem Zerfaserungsdruck an, was auf die zunehmende Desintegration des Faserverbundes während der Zerfaserung zurückzuführen ist. Die gewählten Verweilzeiten von zwei bis sechs Minuten hatten hingegen keine Auswirkung auf die Schüttdichte. Vermutlich waren die Zeiten insgesamt von zu geringer Dauer um eine erkennbare Veränderung zu ergeben. Die thermische Behandlung führte wiederum zur Abnahme der Schüttdichte und ist dadurch begründet, dass

mit zunehmender Dauer der thermischen Behandlung von Holzfasern zunehmend Holzbestandteile abgebaut werden. Die lichtmikroskopischen Aufnahmen von industriellen Faserstoffen zeigten in Abhängigkeit von den Zerfaserungsbedingungen nur geringe Unterschiede zwischen Buchen- und Kiefernfaserstoff. Die Fichtenfaserstoffe unterschieden sich hingegen deutlich und waren von geringerer Partikelgrösse und gelblich-weisser Farbe im Gegensatz zu den bräunlichen Buchen- und Kiefernfaserstoffen. Der geringe Unterschied zwischen der Partikelgrösse der Buchen- und Kiefernfaserstoffe war ein unerwartetes Ergebnis. Für den Buchenfaserstoff waren deutlich kleinere Fasern erwartet worden, da die Faserlängen kürzer als diejenigen von Kiefernholz sind. Durch die Herstellung bei gleichen Zerfaserungsbedingungen erfolgte jedoch eine starke Homogenisierung der holzartenspezifischen Merkmale. Anhand der rasterelektronischen Bilder war sehr deutlich erkennbar, dass Holzfaserstoffe aus weniger homogenen Fasern bestanden als die untersuchten Mineralfasern, die sehr einheitlich geformt vorlagen. Bei näherer Betrachtung der jeweiligen Herstelltechnologien wird deutlich, dass im thermo-mechanischen Herstellverfahren für Holzfaserstoff der Holzverbund in Abhängigkeit von den Zerfaserungsparametern aufgehoben wird. Bei der Herstellung der Mineralfasern erfolgt die Formgebung der Fasern durch Auslassen und anschliessender Verwirbelung einer Schmelze, was zu deutlich homogeneren, zylinderförmigen Fasern führt. Die Partikelanalyse bestätigte diese Ergebnisse, zudem zeigte sie Unterschiede in der Faserbreite und Faserlänge für die drei Holzarten. Das Längen/Breitenverhältnis variierte und lag im Vergleich mit Mineralfasern für alle drei Holzarten tiefer, was ebenfalls belegt, dass Mineralfasern eine zylindrische Form mit grösserem Durchmesser aufweisen. Morphologisch zeigte sich für die labortechnisch hergestellten Faserstoffe eine Veränderung der Farbe mit zunehmendem Druck von hellgelb nach dunkelbraun. Zudem sank mit zunehmendem Zerfaserungsdruck die Partikelgrösse. Ein sehr wichtiges Ergebnis stellt die Abnahme des Feuchtegehaltes mit zunehmendem Zerfaserungsdruck dar. Mit zunehmendem Druck nahmen die Materialfeuchten beispielsweise bei 20 °C / 65 % rel. Luftfeuchte von 12 % (4 bar) auf 9.8 % (16 bar) ab, was bei gleichbleibender Rohdichte und Partikelgeometrie zur Reduktion der Wärmeleitfähigkeit führt. Durch die Hysterese lagen die Adsorptionswerte zwischen 2 und 3 % niedriger als bei der Desorption. Allerdings liegt auf Basis der Ergebnisse bei der Schüttdichte in Abhängigkeit von den Zerfaserungsbedingungen ein gegensätzlicher Trend vor. Dort war die Dichte mit zunehmendem Druck angestiegen. Die Verweilzeit im Kocher hatte hingegen keinen Einfluss auf die Farbe und die Partikelgeometrie. Bei labortechnisch hergestellten Holzfasern lagen die Messwerte der Wärmeleitfähigkeit folglich nur mittelbar in Abhängigkeit von den Zerfaserungsbedingungen vor. Da bei steigendem Zerfaserungsdruck die Schüttdichte zunahm, die Materialfeuchte aber abnahm, lagen somit entgegengesetzt wirkende Einflussfaktoren auf die Wärmeleitfähigkeit vor. Der theoretisch maximale Zerfaserungsdruck für die untersuchten Faserstoffe lag bei 14 bar. Dieser Wert ist allerdings indust-

riell nur sehr aufwändig umsetzbar. Durch die zusätzliche thermische Nachbehandlung senkte sich der Wert der Wärmeleitfähigkeit durch die geringere Materialfeuchte infolge des Abbaus der Hemizellulose weiter ab. Als wesentlich erwies sich dort die Dauer der Behandlung im Gegensatz zur Behandlungstemperatur.

Die **Simulation** der Wärmeleitfähigkeit mittels der experimentell ermittelten Parameter führte für Fichtenfaserstoff und den labortechnisch hergestellten Faserstoffen zu einer guten Übereinstimmung mit den Messergebnissen. Für Buchen- und Kieferfaserstoff lag keine Übereinstimmung vor, was auf die deutlich grösseren Faserdicken der Kiefer- und Buchenfaserstoffe zurückzuführen ist. Das Modell war anhand von Fasern mit geringerer Dicken validiert worden und wird mit zunehmenden Faserdicken ungenau. Dennoch kann das für Zuckerrohrfasern und Kokosnusssfasern entwickelte Modell für Modellierungen bzw. Voraussagen mit Holzfaserstoffen verwendet werden, wenn zuvor Einschränkungen bei der Rohdichte und der Fasergrösse gemacht werden. Für Rohdichten bis  $150 \text{ kg/m}^3$  und Faserdicken bis 2mm stimmen die modellierten Werte mit real gemessenen Werten überein, das zeigte ein Vergleich mit handelsüblichen Produkten. Oberhalb dieser Dichte liegen die Werte zu niedrig, was zusätzlich an einer Überbewertung des Luftanteils liegen kann. Bei Fasergrössen über 2mm liegen die Werte des Modells zu hoch, wie die Ergebnisse für Buchen- und Kiefernfasern zeigten. Für Fichtenfasern zeigte das Modell auf, dass die Anteile an der Gesamtwärmeübertragung für Luft, Leitung und Strahlung in Abhängigkeit der Probedichte variieren. Es zeigt sich dabei der starke Anteil des Luftanteils innerhalb der Fasermatrix. Der Anteil der Luft an der Gesamtwärmeübertragung lag zwischen 43 und 54 % und blieb in etwa konstant, während die Anteile der Leitung und der Strahlung mit zunehmender Dichte zunahm bzw. abnahmen. Die Wärmeübertragung durch Leitung war abhängig von der Faserdicke, der Wärmeleitfähigkeit der Einzelfaser und der Rohdichte der Einzelfaser und variierte von nur 1 % bei einer Dichte von  $40 \text{ kg/m}^3$  bis zu 37 % bei einer Dichte von  $200 \text{ kg/m}^3$ . Die Strahlung war bei gleichbleibender Probenmitteltemperatur abhängig von der Faseremissivität, der Faserreindichte und der Dickenverteilung der Fasern und nahm von 55 % bei  $40 \text{ kg/m}^3$  bis zu 20 % bei  $200 \text{ kg/m}^3$  ab.

Zusammenfassend können nun die im Kapitel 1.1 aufgestellten Arbeitshypothesen anhand der gewonnenen Ergebnisse wie folgt beurteilt werden:

- Durch die Rohstoffauswahl bzw. die Holzartenwahl kann die Fasermorphologie beeinflusst und damit verbesserte Eigenschaften von Holzfaserdämmstoffen erzielt werden

Die Rohstoff- bzw. Holzartenwahl führte nicht zu einer holzartspezifischen Verbesserung der Platteneigenschaften. In Abhängigkeit von der gewählten Holzart zeigten sich keine wesentlichen Unterschiede in der Fasermorphologie und der Feuchteaufnahme. Im Umkehrschluss lässt sich jedoch anhand der Ergebnisse aufzeigen, dass sich die bisherige Rohstoffauswahl, die sich mehrheitlich auf Nadelhölzer (Fichte, Kiefer) beschränkte, auf Laubhölzer (Buche) ausweiten lässt, da dadurch gemäss der in dieser Arbeit gewonnenen Erkenntnisse keine negativen Auswirkungen auf die Platteneigenschaften entstehen. Bezüglich der Faserausbeute müsste allerdings beachtet werden, dass diese bei Laubhölzern durch die vorhandenen Gefässe deutlich geringer ausfallen würde.

- Die Herstellverfahren unterscheiden sich wesentlich und beeinflussen einzelne oder mehrere Eigenschaften von Holzfaserdämmstoffen und können damit für Optimierungen gezielt verwendet werden

Die untersuchten Proben unterschieden sich bezüglich der wesentlichen Eigenschaft der Rohdichte deutlich. Die Proben aus dem Trockenverfahren wiesen geringere Rohdichten innerhalb der gleichen Anwendungskategorie auf. Das bedeutet, dass Produkte für den gleichen Anwendungsbereich mit weniger Materialeinsatz als im Nassverfahren hergestellt werden können. Durch den reduzierten Materialeinsatz kann folglich im Rohdichtebereich bis minimal ca.  $100 \text{ kg/m}^3$  die Wärmeleitfähigkeit reduziert werden, womit sich das Trockenverfahren diesbezüglich klar vorteilhafter darstellt. Unterhalb dieser Grenze überlagern der Wärmetransportvorgang durch Strahlung und der Luftanteil die Rohdichte. Die hygrischen Eigenschaften unterscheiden sich in Abhängigkeit von den Herstellverfahren nur gering. Einzig die Diffusion liegt bei Produkten aus dem Trockenverfahren leicht unter den Ergebnissen für Produkte aus dem Nassverfahren. Die Werte sind jedoch insgesamt für beide Verfahren auf einem für Dämmstoffe sehr niedrigen Niveau und damit bauphysikalisch sehr vorteilhaft.

- Durch die gezielte Auswahl von Parametern der Aufschlussbedingungen für Holzfaserstoffe können die Eigenschaften von Holzfaserdämmplatten optimiert werden

Mit der Variation der Zerfaserungsparameter konnten die Eigenschaften zum Teil optimiert werden. Hinsichtlich der Materialfeuchte zeigte sich, dass mit zunehmendem Zerfaserungsdruck die Materialfeuchte der Faserstoffe sank. Noch deutlicher zeigte sich dies an den Proben, die zusätzlich thermisch behandelt wurden, da dort in Abhängigkeit von der Dauer des Aufschlusses die Materialfeuchte reduziert werden konnte. Folglich lässt sich die Wärmeleitfähigkeit durch eine Erhöhung des Zerfaserungsdrucks reduzieren, da damit die Materialfeuchte der Fasern sinkt. Andererseits zeigte sich, dass mit zunehmendem Zerfaserungs-

druck die Schüttdichte der Faserstoffe steigt, was zur Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit führen kann. Die gewählte Verweilzeit von 2, 4 und 6 Minuten und die Variation des Mahlspalts von 0,15 – 0,30 mm brachten keine Veränderungen, vermutlich weil die Variation zu gering gewählt worden war.

## 5.2 Handlungsoptionen und Ausblick

Anhand der Untersuchungsergebnisse lassen sich folgende Handlungsoptionen für die Optimierung der Herstellung von Holzfasern für Holzfaserdämmplatten und Dämmstoffe ableiten:

- Zerfaserung des Ausgangsmaterials zu homogenen Fasern, d.h. möglichst gleichförmige Partikel und geringer Anteil an Faserbruchstücken
- Der Zerfaserungsdruck sollte im industriellen Rahmen möglichst hoch sein, um die Feuchteaufnahme der Fasern und damit die Materialfeuchte des Holzfaserdämmstoffs zu reduzieren.
- Bei Bindemittleinsatz sollte der Zerfaserungsdruck möglichst hoch sein, um Faserstoff mit einem geringeren Anteil an Faserbruchstücken zu erhalten.
- Das Breiten/Längen Verhältnis der Partikel sollte im Bereich grösser als 0.4 liegen.
- Die Streuung der Faserbreite sollte klein sein.

Des Weiteren bestehen Möglichkeiten der Optimierung in folgenden Bereichen:

- Reduktion der Faseremissivität durch Behandlung der Fasern oder Beimischung von Partikeln mit niedriger Emissivität
- Integration von reflektierenden Schichten
- Thermische Nachbehandlung der Fasern, um die Materialfeuchte zu reduzieren
- Teilweiser oder vollständiger Ersatz der Porenluft durch Gase mit reduzierter Wärmeleitfähigkeit, z. B. durch Einsatz von Mikrosphären
- Beimischung von Partikeln mit sehr niedriger Wärmeleitfähigkeit (z.B. Mikrosphären) in das Fasergefüge, um die Wärmeübertragung durch den Luftanteil zu reduzieren.
- Plattenkombinationen mit anderen Materialien, z.B. Sandwichaufbauten mit Mittellage aus nanoporösem Material

Im Rahmen weiterer Forschungstätigkeiten wäre es sinnvoll, den Zerfaserungsprozess und seine Auswirkungen auf die Fasergeometrie noch näher zu untersuchen. So wäre beispielsweise die Zerfaserung von Hölzern mit sehr geringem Ligninanteil interessant, um zu untersuchen, ob deren Zerfaserung mehrheitlich zu homogeneren Fasern führt. Zudem wäre es

sinnvoll, die Auswirkung von längeren Verweilzeiten im Kocher und die Auswirkungen des Mahlpalts zu untersuchen. Schliesslich könnte die Fasermorphologie durch bildgebende Verfahren vertieft untersucht werden.

## 6 Verzeichnisse

### 6.1 Literatur

Autorenkollektiv (1988): *Lexikon der Holztechnik*. Leipzig, VEB Fachbuchverlag.

Bergmann, B. (2003): *Entwicklung einer druckfesten Holzfaserplatte zur Anwendung unter Gussasphalt*. Berner Fachhochschule, Architektur, Holz und Bau; Diplomarbeit

Brunauer, S., et al. (1938): "Adsorption of gases in multimolecular layers." *Journal of the American Chemical Society* 60: 309-319.

Deppe, H.-J. and Ernst, K. (1996): *MDF - Mitteldichte Faserplatten*. Leinfelden-Echterdingen, DRW-Verlag.

DIN-4108-10 (2008). *Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden - Teil 10: Anwendungsbezogene Anforderungen an Wärmedämmstoffe - Werkmässig hergestellte Wärmedämmstoffe*.

DIN-52182 (1976). *Prüfung von Holz; Bestimmung der Rohdichte*.

DIN-52183 (1993). *Prüfung von Holz, Bestimmung des Feuchtegehaltes*.

DIN-52184 (1979). *Prüfung von Holz; Bestimmung der Quellung und Schwindung*.

DIN-EN-312 (2010). *Spanplatten - Anforderungen*.

DIN-EN-316 (2009). *Holzfaserplatten - Definition, Klassifizierung und Kurzzeichen*.

DIN-EN-622-4 (2010). *Faserplatten - Anforderungen an poröse Faserplatten*.

DIN-EN-13171 (2012). *Wärmedämmstoffe für Gebäude - Werkmässig hergestellte Produkte aus Holzfasern (WF) - Spezifikation; Deutsche Fassung*

DIN-EN-13183-1 (2002). *Feuchtegehalt eines Stückes Schnittholz - Teil 1: Bestimmung durch Darrverfahren; Deutsche Fassung*.

DIN-EN-ISO-12572 (2001). *Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Baustoffen und Bauprodukten - Bestimmung der Wasserdampfdurchlässigkeit, Deutsche Fassung*

DIN-EN-ISO-15148 (2002). *Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Baustoffen und Bauprodukten - Bestimmung des Wasseraufnahmekoeffizienten bei teilweisem Eintauchen; Deutsche Fassung*.

Du, N., et al. (2009): "Optimal porosity distribution of fibrous insulation." *International Journal of Heat and Mass Transfer* 52 4350 - 4357.

Dunky, M. and Niemz, P. (2002): *Holzwerkstoffe und Leime: Technologie und Einflussfaktoren*. Berlin Heidelberg, Springer-Verlag.

Elsner, N., et al. (1993): *Grundlagen der technischen Thermodynamik , Band 2: Wärmeübertragung*. Berlin, Akademie Verlag GmbH.

EN-318 (2002). *Bestimmung von Massänderungen in Verbindung mit Änderungen der relativen Luftfeuchte; Deutsche Fassung*.

- EN-1602 (2013). *Wärmedämmstoffe für das Bauwesen - Bestimmung der Rohdichte; Deutsche Fassung.*
- Euring, M. (2008): *Einsatz von Mediatoren bei der enzymatischen Aktivierung der fasereigenen Bindekräfte zur Herstellung von enzymgebundenen, bindemittelfreien Holzwerkstoffen.* Georg August Universität; Dissertation
- Fengel, D. and Wegener, G. (2003): *Wood.* Remagen, Kessel Verlag.
- Förster, F. (2007): *Holzfaserdämmstoffe.* Wuppertal, Verband Holzfasern Dämmstoffe e.V.
- Frandsen, H., et al. (2007): "A revised multi-Fickian moisture transport model to describe non-Fickian effects in wood." *Holzforschung.*
- Freudenberg, C. (2002): *Systematische Untersuchungen zur konstruktiven Gestaltung innovativer Dämmstoffstrukturen.* Technische Universität Dresden; Dissertation
- Friedrich, M. and Wirries, B. (2015). "Wärmeleitfähigkeit verschiedener Dämmstoffe." from <http://www.dieeinsparinfos.de/modernisierungsratgeber/daemmung/infos-zur-waermedaemmung/daemmung-physikalische-grundlagen/>.
- Gebhardt, G. (2012): *Holzfaserdämmplatten als aussteifende Beplankung von Holztafeln.* Karlsruher Institut für Technologie (KIT); Dissertation
- Goring, D. A. I. (1963): "Thermal softening of lignin, hemicellulose and cellulose." *Pulp and Paper in Canada* 64(12): T517-T527.
- Haas, G. v. (1998): *Untersuchungen zur Heisspressung von Holzwerkstoffmatten unter besonderer Berücksichtigung des Verdichtungsverhaltens, der Permeabilität, der Temperaturleitfähigkeit und der Sorptionsgeschwindigkeit.* Universität Hamburg; Dissertation
- Hailwood, A. J. and Horrobin, S. (1946): "Adsorption of water by polymers: analysis in terms of a simple model." *Transactions of the Faraday Society* 42B: 84-93.
- Hering, B. (2007): *Bauphysikalische Eigenschaften von unbehandelten und thermisch modifizierten Holzfasern, -spänen und -wolle aus unterschiedlichen Holzarten und ihre Eignung als Rohstoff für Wärmedämmstoffe.* Technische Universität Kaiserslautern; Dissertation
- Hering, S. (2011): *Charakterisierung und Modellierung der Materialeigenschaften von Rotbuchenholz zur Simulation von Holzverklebungen.* ETH Zürich; Dissertation
- Hohmann, R., et al. (2004): *Bauphysikalische Formeln und Tabellen.* München, Werner-Verlag.
- Hunt, J. F., et al. (2008): "Theoretical thermal conductivity equation for uniform density wood cells." *Wood Fiber Science* 40 (2): 167 - 180.
- IHD-FHIS-281 *Ermittlung der Schüttdichte.*
- Irvine, G. M. (1985): "THE SIGNIFICANCE OF THE GLASS-TRANSITION OF LIGNIN IN THERMOMECHANICAL PULPING." *Wood Science and Technology* 19(2): 139-149.
- ISO-8302 (1991). *Wärmeschutz; Bestimmung des stationären Wärmedurchlasswiderstandes und verwandter Eigenschaften; Verfahren mit dem Plattengerät.*

ISO-13322-2 (2006): "*Partikelgrößenanalyse - Bildanalyseverfahren - Teil 2: Dynamische Bildanalyseverfahren.*"

Joscak, M. (2013): *Experimentelle und rechnerische Charakterisierung des Wärme- und Feuchtetransportes in Holzbauteilen mit variablem Aufbau.* ETH Zürich; Dissertation

Kaemmerlen, A., et al. (2010): "*Transient modeling of combined conduction and radiation in wood fibre insulation and comparison with experimental data.*" International Journal of Thermal Sciences 49(11): 2169-2176.

Kemmler, A., et al. (2013): "*Analyse des schweizerischen Energieverbrauchs 2000 - 2013 nach Verwendungszwecken.*" Studie: Bundesamt für Energie BFE.

Kirmeier, R., et al. (2001): "*Sorption isotherms from untreated wood-based insulation materials.*" Holz Als Roh-Und Werkstoff 59(1-2): 47-48.

Koglin, B. (1967): *Der Wärmetransport in Schaumstoffen.* TU Berlin; Dissertation

Kollmann, F. (1955): *Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe; Band 2.* Berlin u.a., Springer Verlag.

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

Kuchling, H. (2004): *Taschenbuch der Physik.* München, Fachbuchverlag Leipzig.

Lakatos, A. and Kalmar, F. (2013): "*Analysis of water sorption and thermal conductivity of expanded polystyrene insulation materials.*" Building Services Engineering Research & Technology 34(4): 407-416.

Lambda-Messtechnik (2006): *Aufbau und Funktion des Einplatten-Wärmeleitfähigkeitsmessgerätes  $\lambda$ -Meter EP 500.* Dresden, Lambda – Meßtechnik GmbH.

Lampert, H. (1967): *Faserplatten : Rohstoffe, Herstellungsverfahren, Eigenschaften.* Leipzig : Fachbuchverlag.

Lempfer, K. and Berns, J. (2013): *Technologie Handbuch A 0867 210013 Pavatex Dämmstoffplatte.* Krefeld, Siempelkamp GmbH & Co KG.

Lüttge, U., et al. (1994): *Botanik.* Weinheim u.a., VCH.

Lutz, P., et al. (2002): *Lehrbuch der Bauphysik.* Stuttgart u.a., B.G. Teubner.

Manohar, K. and Kochhar, G. S. (2012): "*Heat transfer in opaque fibers* " Journal of Heat Transfer Vol. 134.

Niemz, P. (1993): *Physik des Holzes und der Holzwerkstoffe.* Leinfelden-Echterdingen : DRW.

Niemz, P. (2003). *Holz und Holztechnologie, Skript zur Vorlesung Holztechnologie 2.* E. Zürich. Zürich.

Paulitsch, M. (1989): *Moderne Holzwerkstoffe.* Berlin, Springer Verlag.

Pavatex (2012). *Wesentliche Merkmale Nass- und Trockenverfahren.* Fribourg, Pavatex SA.

- Pavatex (2014). Die Vorteile der Pavatex Holzfaserdämmung. Fribourg, Pavatex SA.
- Plagge, R., et al. (2005): "Automatische Messung des Wasseraufnahmekoeffizienten und des kapillaren Wassergehaltes von porösen Baustoffen." *Bauphysik* 27(Heft 6): 315-323.
- Plötze, M. and Niemz, P. (2011): "Porosity and pore size distribution of different wood types as determined by mercury intrusion porosimetry." *European Journal of Wood and Wood Products* 69: 649 - 657.
- Poniatowski, S., et al. (1959): *Holzfaserplatten im Bauwesen*. Leipzig, Fachbucherlag.
- Popper, R., et al. (2003): *Festigkeits- und Feuchteverformungsänderungen von Holzwerkstoffen entlang der Sorptionsisotherme*. Zürich : Professur Holzwissenschaften, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich.
- Retsch (2014): *Partikelanalysator - Produktinformationsbroschüre*. Haan, Retsch Technology GmbH.
- Rose, D. A. (1965): "Water movement in unsaturated porous materials." *Rilem Bulletin* No. 29: 119 - 123.
- Salmen, L. (1984): "VISCOELASTIC PROPERTIES OF INSITU LIGNIN UNDER WATER-SATURATED CONDITIONS." *Journal of Materials Science* 19(9): 3090-3096.
- Schaffner, H. J. (1948): *Isolier-Baustoffe und Wärmeschutz*. Basel, Verlag für Wissenschaft, Technik und Industrie.
- Scheidung, W. (1998): *Entwicklung, Herstellung und Untersuchung wesentlicher Eigenschaften wasserglasgebundener Holzfaserdämmplatten aus Fichtenholz*. TU-Dresden; Dissertation
- Scheidung, W. (2014): "Thermokammer des IHD - Information und Dienstleistungsangebot." IHD Dresden gGmbH.
- Schmid, J. A. (2010): *Experimentelle und theoretische Untersuchungen zur Ermittlung des Einflusses von Klebfugen auf den Diffusionswiderstand von Holzverklebungen*. Berner Fachhochschule; Architektur; Holz und Bau; Bachelor Thesis
- Schneider, T. (1999): *Untersuchungen über den Einfluss von Aufschlussbedingungen des Holzes und der Faserstofftrocknung auf die Eigenschaften von mitteldichten Faserplatten (MDF)* Universität Göttingen; Dissertation
- Siau, J. F. (1984): *Transport proces in wood*. Berlin, Springer Verlag.
- Sonderegger, W. (2011): *Experimental and theoretical investigations on the heat and water transport in wood and wood-based materials*. ETH.
- Sonderegger, W. and Niemz, P. (2006): "Untersuchungen zur Quellung und Wärmedehnung von Faser-, Span- und Sperrholzplatten." *European Journal of Wood and Wood Products* 64(1): 11-20.
- Sonderegger, W. and Niemz, P. (2009): "Thermal conductivity and water vapour transmission properties of wood-based materials." *European Journal of Wood and Wood Products* 67(3): 313-321.

Sonderegger, W. and Niemz, P. (2012): "Thermal and moisture flux in soft fibreboards." European Journal of Wood and Wood Products 70: 25-35.

Sprengard, C., et al. (2013): *Technologien und Techniken zur Verbesserung der Energieeffizienz von Gebäuden durch Wärmedämmstoffe - Metastudie Wärmedämmstoffe - Produkte - Anwendungen - Innovationen*. Gräfeling, FIW München.

Suchsland, O. and Xu, D. P. (1992): "Determination of swelling stresses in wood-based materials." Forest Products Journal 42(5): 25-27.

TAPPI-T-204-cm-97 (1997). *Solvent extractives of wood and pulp*.

TAPPI-T-212-om-02 (2002). *One percent sodium hydroxide solubility of wood and pulp*.

TAPPI-T-222-om-02 (2002). *Acid-insoluble lignin in wood and pulp*

TAPPI-T-264-cm-07 (2007). *Preparation of wood for chemical analysis, Test Method*.

Vanek, M. and Teischinger, A. (1989): "Diffusionskoeffizienten und Diffusionswiderstandszahlen von verschiedenen Holzarten." Holzforschung und Holzverwertung 41(1): 3-6.

VHD (2013). VHD Medieninformation 11/2013. Wuppertal, Verband Holzfaser-Dämmstoffe e.V.

Vogel, B. (2014): "Wärmedämmung und Gebäudetechnik: Wie viel und in welchem Fall." Fachbeitrag Bundesamt für Energie BFE.

Wesche, K. (1996): *Baustoffe*. Wiebaden u.a., Bauverlag GmbH.

Zeitler, G. M. (2000): *Allgemein gültiges Modell zur Berechnung der Wärmeleitfähigkeit poröser Stoffe und Stoffschichten*. Universität GHS Essen; Dissertation

Zollinger, R. M. (1954): *Die Holzfaserdämmplatte*. Stuttgart, Konradin-Verlag

Zollinger, R. M. (1955): *Holzfaserplatten handhaben und verarbeiten*. Stuttgart, Konradin-Verlag.

Zwicker, P. (2008): *Untersuchungen zum Diffusionsverhalten von Holz und Holzwerkstoffen*. ETH Zürich; Bachelor Thesis

## 6.2 Tabellen

Tabelle 2.1: Einteilung Faserplatten nach Rohdichten .....	8
Tabelle 2.2: Emissionsgrad verschiedener Oberflächen .....	24
Tabelle 2.3: Typische Werte der spezifischen Wärmekapazität .....	29
Tabelle 2.4: Wärmespeicherzahl unterschiedlicher Materialien.....	30
Tabelle 2.5: Maximale und differentielle Quellmasse verschiedener Holzarten .....	35
Tabelle 2.6: Klassifizierung des Saugverhaltens von Baustoffen .....	38

Tabelle 2.7: Wasseraufnahmekoeffizienten ausgewählter Baustoffe teilweise .....	38
Tabelle 3.1: Übersicht zur Materialauswahl und den experimentellen Untersuchungen .....	39
Tabelle 3.2: Übersicht der verwendeten, industriell gefertigten Dämmstoffe .....	41
Tabelle 3.3: Übersicht der verwendeten Holzfaserstoffe und deren Herstellbedingungen .....	43
Tabelle 3.4: Übersicht Holzfaserstoffe mit Farbpigmenten .....	43
Tabelle 3.5: Übersicht der Versuchsvarianten bei der experimentellen Faserstoffherstellung .....	45
Tabelle 3.6: Übersicht der Prüfkörper aus Holzfaserstoffen .....	47
Tabelle 4.1: Rohdichte, Wasseraufnahmekoeffizient und dichtebereinigte Sorptionsgeschwindigkeit beim Dry- und Wet-Cup-Versuch ausgewählter Holzfaserproben .....	77
Tabelle 4.2: Dicke und Rohdichte der einzelnen Schichten .....	83
Tabelle 4.3: Feuchtebezogene Angaben der Dry- und Wet-Cup-Versuche der Materialkombination .....	83
Tabelle 4.4: Messergebnisse der Dry- und Wet-Cup-Versuche bei Materialkombinationen ..	84
Tabelle 4.5: Wärmeleitfähigkeit der Materialverbunde, n=1 Prüfkörper je Variante .....	90
Tabelle 4.6: Zusammenfassung der Ergebnisse für drei Faserstoffe .....	97
Tabelle 4.7: Analyseergebnisse .....	106
Tabelle 4.8: Verwendete Werte der Faserstoffe zur Modellierung .....	117
Tabelle 4.9: Anteile der Übertragungsarten an der Gesamtwärmeleitfähigkeit in Prozent ...	121

### 6.3 Abbildungen

Abbildung 2.1: Dichte, Grösse und Zellbestandteile ausgewählter Holzarten .....	4
Abbildung 2.2: Zellwandmodell .....	5
Abbildung 2.3: Defibrator nach Lampert .....	6
Abbildung 2.4: Verschiedene Zerfaserungsaggregate .....	6
Abbildung 2.5: Masonite Verfahren .....	7
Abbildung 2.6: Übersicht Holzfaserdämmplattenherstellung .....	9
Abbildung 2.7: Langsiebmaschine .....	10
Abbildung 2.8: Holzfaserdämmstoffherstellung im Nassverfahren .....	11
Abbildung 2.9: Pneumatische Vliesbildung .....	12

Abbildung 2.10: Mechanische Vliesbildung .....	12
Abbildung 2.11: Holzfaserdämmstoffherstellung auf speziellen Trockenfaseranlagen. ....	13
Abbildung 2.12: Übersicht der Einsatzgebiete verschiedener Bindemittel für Holzwerkstoffe	15
Abbildung 2.13: typische Anwendungsgebiete von Holzfaserdämmplatten .....	17
Abbildung 2.14: Mindestanforderungen für Holzfaserplatten nach DIN 4108-10 .....	18
Abbildung 2.15: Wärmeleitfähigkeit $\lambda$ in Abhängigkeit der Rohdichte für ausgewählte Baustoffe.....	20
Abbildung 2.16: Abhängigkeit der Porenluft-Wärmeleitfähigkeit von Porendurchmesser und Temperatur bei mineralischen Dämmstoffen .....	20
Abbildung 2.17: Wärmeleitfähigkeit einer Holzfaserplatte ( $130 \text{ kg/m}^3$ ) in Abhängigkeit von der Feuchte .....	21
Abbildung 2.18: Wärmeleitfähigkeit von Faser- und Holzwolleplatten senkrecht zur Plattenebene im Vergleich zu Vollholz und Holzwolle-Leichtbauplatten.....	22
Abbildung 2.19: Spektrale spezifische Ausstrahlung der Strahlung des schwarzen Strahlers nach dem Planck'schen Gesetz.....	23
Abbildung 2.20: Reduktion der Wärmeleitfähigkeit durch Strahlungs-Trübungsmittel am Beispiel EPS .....	25
Abbildung 2.21: Übersicht der Wärmeleitfähigkeit von Dämmstoffe.....	27
Abbildung 1.22: Wärmeleitfähigkeit in Abhängigkeit der Dichte .....	28
Abbildung 2.23: Bindungsarten von Wasser im Holz.....	31
Abbildung 2.24: Schematische Darstellung der fortschreitenden Wassereinlagerung nach Rose.....	33
Abbildung 2.25: Hygroskopisches Gleichgewicht von Sitka-Fichte .....	33
Abbildung 2.26: Richtungen des Quellen und Schwindens bei Holz .....	34
Abbildung 2.27: Multi-Fick'sches Feuchtetransportmodel .....	37
Abbildung 3.1: Prüfkörper Materialkombinationen mit Holzfaserdämmstoff (links) und Hochleistungsdämmstoff (rechts) als Mittellage .....	42
Abbildung 3.2: Laborrefineranlage IHD.....	44
Abbildung 3.3: Thermokammer mit Beschickungsmaterial.....	46
Abbildung 3.4: Prozessverlauf anhand eines Beispiels des Messprotokolls .....	46

Abbildung 2.5: Entwässerungskasten für Stoffsuspension (links), Laborpresse (rechts) im Technikum Pavatex S.A. ....	47
Abbildung 3.6: Faserstoffbeleimung im Trommelmischer (links); Formkasten für Plattendurchströmung (rechts) am IHD .....	48
Abbildung 3.7: Einrichtung zur Prüfkörperherstellung ohne Bindemittel (links); Faserstoffkuchen vor der Verdichtung (rechts) .....	48
Abbildung 3.8: Einrichtung zur Plattenformung ohne Bindemittel (links); Faserstoff mit Druckstempel und halb geöffneten Formkasten (rechts) .....	49
Abbildung 3.9: Prüfkörper nach der Herstellung (links); Prüfkörper im Wärmeleitfähigkeitsmessgerät eingebaut (rechts).....	49
Abbildung 3.10: Schwingsieb mit Schüttkasten und Messzylinder für die Schüttdichtemessung .....	50
Abbildung 3.11: Labor-Rohdichteprofilmessegerät Grecon DAX 5000 .....	51
Abbildung 3.12: Optisches Partikelanalysesystem .....	53
Abbildung 3.13: Massenbestimmung des Prüfkörpers .....	55
Abbildung 3.14: Prüfkörper zur Ermittlung des Quell- Schwindverhaltens .....	57
Abbildung 3.15: Messstellen am Prüfkörper .....	57
Abbildung 3.16: Prüfaufbau Dry-Cup Wet-Cup .....	59
Abbildung 3.17: Regressionsgerade der Masse und Zeit der einzelnen m10-Werte .....	60
Abbildung 3.18: effektive Messfläche des Prüfgerätes.....	63
Abbildung 3.19: Temperaturfeld in der Probe bei der mittleren Temperatur (15 °C) der λ10-Messung .....	63
Abbildung 3.20: Vereinfachte Darstellung der Modellierung des Faseranteils .....	65
Abbildung 3.21: Vereinfachte Darstellung der Wärmeübertragung durch Strahlung.....	67
Abbildung 4.1: Rohdichtebereiche der Materialproben industrieller Dämmstoffe.....	68
Abbildung 4.2: Rohdichteprofil eines Steinwolledämmstoffs, 61 kg/m <sup>3</sup> , eines Glaswollendämmstoffs, 26 kg/m <sup>3</sup> und eines Holzfaserdämmstoffs, 59 kg/m <sup>3</sup> .....	70
Abbildung 4.3: Rohdichteprofil einer Holzfaserdämmplatte Nassverfahren, 243 kg/m <sup>3</sup> , einer Holzfaserdämmplatte Trockenverfahren Hersteller I, 213 kg/m <sup>3</sup> und einer Holzfaserdämmplatte Trockenverfahren Hersteller II, 190 kg/m <sup>3</sup> .....	71

Abbildung 4.4: Feuchtegehalte von Holzfaserplatten unterschiedlicher Rohdichte bei 20 °C und 65 % rel. Luftfeuchte, Adsorption und Desorption .....	73
Abbildung 4.5: Feuchtegehalte bei 20° und 65 % rel. Luftfeuchte industrieller Dämmstoffe und Platten im Vergleich.....	73
Abbildung 4.6: Sorptionsisotherme von Holzfaserdämmplatten. Mittelwerte aller Plattentypen (links) Werte einzeln (rechts).....	74
Abbildung 4.7: Sorptionsisotherme von Holzfaserdämmplatten für den oberen Dichtebereich 190 – 204 kg/m <sup>3</sup> (links) und unteren Dichtebereich 105 – 140 kg/m <sup>3</sup> (rechts).....	75
Abbildung 4.8: Sorptionsgeschwindigkeit von Holzfaserdämmplatten und -stoffen .....	76
Abbildung 4.9: Maximales Quellmass und Schwindmass in Plattenebene (Prüfkörperlänge; links) und senkrecht zur Plattenebene (Prüfkörperdicke; rechts) .....	78
Abbildung 4.10: Maximales Quellmass für Probenlänge (links) und Probendicke (rechts) in Abhängigkeit der Rohdichte.....	79
Abbildung 4.11: Differenzielle Quellung (%/% für Probenlänge (links) und Probendicke (rechts) in Abhängigkeit der Rohdichte.....	80
Abbildung 4.12: Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl in Abhängigkeit der Rohdichte.....	81
Abbildung 4.13: Dampfdiffusionswiderstandszahl in Abhängigkeit der Rohdichte für Dämmplatten im Nass- und Trockenverfahren .....	81
Abbildung 4.14: Vergleich der berechneten und gemessenen S <sub>D</sub> -Werte der Prüfkörper .....	85
Abbildung 4.15: Wasserdampf-Diffusionswiderstandszahl in Abhängigkeit der Rohdichte bei Materialkombinationen.....	86
Abbildung 4.16: Wärmeleitfähigkeit industrieller Dämmstoffe in Abhängigkeit der Rohdichte. Angaben als Mittelwerte dreier Einzelmessungen.....	86
Abbildung 4.17: Wärmeleitfähigkeit industrieller Dämmstoffe in Abhängigkeit der Rohdichte für den Dichtebereich 100-300 kg/m <sup>3</sup> . .....	87
Abbildung 4.18: Wärmeleitfähigkeit industrieller Dämmstoffe in Abhängigkeit der Rohdichte für den Dichtebereich 30-65 kg/m <sup>3</sup> . .....	87
Abbildung 4.19: Wärmeleitfähigkeit zweier Plattentypen in Abhängigkeit der Probendicke. .	88
Abbildung 4.20: Wärmeleitfähigkeit einer Holzfaserprobe als Funktion der Temperatur.....	89
Abbildung 4.21: Vergleich der berechneten und gemessenen R <sub>20</sub> -Werte der Prüfkörper .....	91
Abbildung 4.22: Wärmeleitfähigkeit in Abhängigkeit der Rohdichte bei Materialkombinationen .....	91

Abbildung 4.23: Schüttdichten der industriellen Holzfasernstoffe .....	92
Abbildung 4.24: Schüttdichten labortechnisch hergestellter Holzfasernstoffe in Abhängigkeit des Zerfasernsdrucks .....	93
Abbildung 4.25: Schüttdichten labortechnisch hergestellter Holzfasernstoffe in Abhängigkeit der Verweilzeit (Dämpfzeit) .....	94
Abbildung 4.26: Schüttdichte thermisch behandelter, labortechnisch hergestellter Holzfasernstoffe in Abhängigkeit der Behandlungsdauer.....	95
Abbildung 4.27: Porengrößenverteilung für drei industrielle Fasernstoffe .....	96
Abbildung 4.28: Relatives Porenvolumen für drei industrielle Fasernstoffe .....	96
Abbildung 4.29: Bildaufnahmen industrieller Holzfasernstoffe .....	98
Abbildung 4.30: Lichtmikroskopische Aufnahmen von labortechnisch hergestellten Fasernstoffen unterschiedlicher Zerfasernsdrücke und Verweilzeiten .....	99
Abbildung 4.31: Rasterelektronische Aufnahmen unterschiedlicher Fasernstoffe in 100-, 300- und 600-facher Vergrößerung .....	100
Abbildung 4.32: Rasterelektronische Aufnahmen labortechnisch hergestellter Fasernstoffe in 100-, 300- und 600-facher Vergrößerung in Abhängigkeit des Zerfasernsdrucks .....	101
Abbildung 4.33: Summenhäufigkeit des Fasernsurchmessers (links) und der Fasernlänge (rechts) von industriellen Holzfasernstoffen .....	102
Abbildung 4.34:.... Auf das Gesamtvolumen bezogene Volumenanteile der Partikel in Prozent für Holzfasernstoffe .....	103
Abbildung 4.35: Breiten/Längenverhältnis industrieller Holzfasernstoffe im Vergleich mit Mineralfasern (MF) .....	103
Abbildung 4.36: Summenhäufigkeit der Fasernlänge nach optischer und mechanischer Charakterisierung (Schwingsieb) am Beispiel von industriellen Fichtenfasern .....	104
Abbildung 4.37: Summenhäufigkeiten der Fasernbreite (links) und Fasernlänge (rechts) von experimentellen Fasernstoffen in Abhängigkeit des Zerfasernsdrucks am Beispiel einer Verweilzeit von 4 Minuten.....	105
Abbildung 4.38: Summenhäufigkeiten der Fasernbreite (links) und Fasernlänge (rechts) von experimentellen Fasernstoffen in Abhängigkeit der Verweildauer (Dämpfzeit) bei 8 bar Aufschlussdruck. ....	106
Abbildung 4.39: Sorptionsisotherme (Adsorption und Desorption) für Fasernstoffe aus Fichtenholz .....	107

Abbildung 4.40: Adsorptionswerte (oben) und Desorptionwerte (unten) von labortechnisch hergestellten Faserstoffen bei unterschiedlichen Feuchttestufen (20 °C). .....	108
Abbildung 4.41: Holzfeuchte (Adsorption) thermisch behandelter Holzfasernstoffe in Abhängigkeit der Temperatur (oben) und in Abhängigkeit der Behandlungsdauer (unten) .....	110
Abbildung 4.42: Wärmeleitfähigkeit industrieller Holzfasernstoffe in Abhängigkeit der Rohdichte .....	111
Abbildung 4.43: Wärmeleitfähigkeit fraktionierter industrieller Holzfasernstoffe in Abhängigkeit der Rohdichte .....	111
Abbildung 3.44: Wärmeleitfähigkeit von Prüfkörpern nach dem Nassverfahren und Trockenverfahren hergestellt in Abhängigkeit der Rohdichte. ....	112
Abbildung 4.45: Wärmeleitfähigkeit von Prüfkörpern aus experimentellen Faserstoffen in Abhängigkeit der Schüttrohdichte .....	113
Abbildung 4.46: Wärmeleitfähigkeit von Prüfkörpern aus experimentellen Faserstoffen nach unterschiedlichen Zerfaserungsdruckstufen .....	114
Abbildung 4.47: Wärmeleitfähigkeit von Probekörpern aus experimentellen Faserstoffen normiert auf 80 kg/m <sup>3</sup> in Abhängigkeit des Zerfaserungsdrucks nach unterschiedlichen Verweilzeiten .....	115
Abbildung 4.48: Wärmeleitfähigkeiten von Probekörpern aus thermisch behandelten Holzfasernstoffen in Abhängigkeit der Temperatur (links) und in Abhängigkeit der Behandlungsdauer (rechts) .....	116
Abbildung 4.49: Modellierte Wärmeleitfähigkeit des Luftanteils innerhalb der Probe in Abhängigkeit der Rohdichte .....	118
Abbildung 4.50: Modellierte Wärmeleitfähigkeit des Faseranteils innerhalb der Probe in Abhängigkeit der Rohdichte .....	118
Abbildung 4.51: Modellierte Wärmeleitfähigkeit des Strahlungsanteils innerhalb der Probe in Abhängigkeit der Rohdichte .....	119
Abbildung 4.52: Häufigkeitsverteilung der Faserdicke für industrielle Faserstoffe aus Buche, Fichte und Kiefernholz .....	120
Abbildung 4.53: Wärmeübertragung modelliert aus den Anteilen Luft, Fasern und Strahlung für labortechnisch hergestellten und industriellen Faserstoff sowie Messwerte (MW) der Wärmeübertragung .....	121

Abbildung 4.54: Wärmeleitfähigkeit in Abhängigkeit der Emissivität am Beispiel von Fichtenfaserstoff (Probe F122) für drei Rohdichtebereiche und der Messwert einer Vergleichsmessung .....	122
Abbildung 4.55: Wärmeleitfähigkeit in Abhängigkeit der Rohdichte am Beispiel von Fichtenfaserstoff, Prüfkörpern mit Graphitpartikeln und einem Prüfkörper mit Aluminiumfolie in der Mitte.....	123

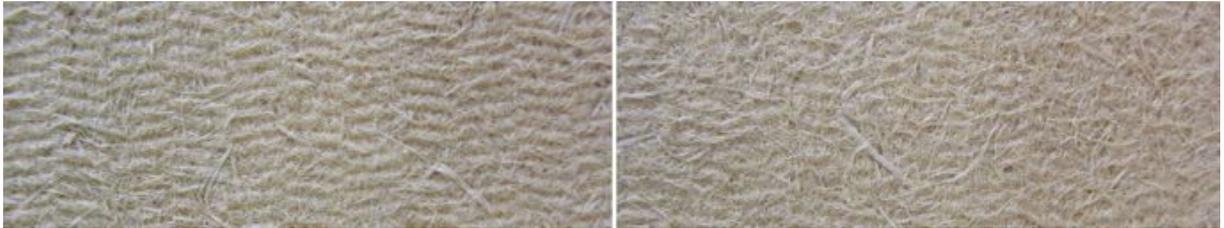
## 7 Anhang

### 7.1 Verwendete Messgeräte

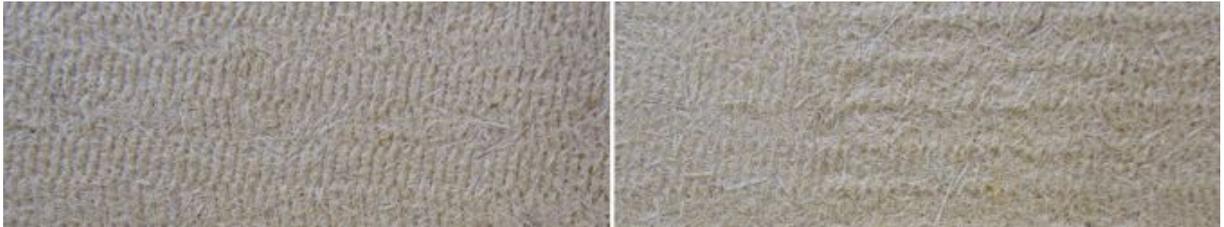


## 7.2 Aufnahmen industrieller Holzfaserdämmstoffe – Ober- und Unterseite

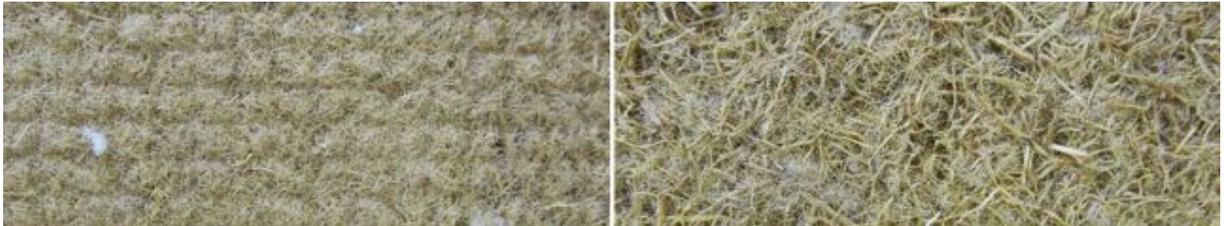
Trockenfaserplatte [110 kg/m<sup>3</sup>]



Trockenfaserplatte [200 kg/m<sup>3</sup>]



Holzfaserdämmplatte [55 kg/m<sup>3</sup>]



Nassfaserplatte [130 kg/m<sup>3</sup>]



Nassfaserplatte [140 kg/m<sup>3</sup>]



Nassfaserplatte [210 kg/m<sup>3</sup>]



Nassfaserplatte [240 kg/m<sup>3</sup>]



Holzfaser-Hanf-Dämmplatte [50 kg/m<sup>3</sup>]



Nassfaserplatte [260 kg/m<sup>3</sup>]



## 7.3 Publikationsliste

### 7.3.1 Publikationen

#### **Begutachtet**

Gariglio F.; Ghazi Wakili K.; Schnider T.; Brombacher V.; Niemz P. (2015): *Experimentelle und numerische Untersuchungen des hygrothermischen Verhaltens von Flachdachelementen mit Hohlkastensystem*. Bauphysik 37 (Heft 1): 17-30

Brombacher V., et. al. (2012): *Untersuchungen zu Wärmeleitfähigkeit und Feuchteverhalten von Holzfaserrplatten und Materialkombinationen*. Bauphysik 34 (Heft 4): 157-169

#### **Nicht begutachtet**

Richter C., Sterzik G., Brombacher V., Sterzik S. (2001): *Alternative Verfahren zur Dämmplattenproduktion*. Holz-Zentralblatt Nr. 20, Leinfelden-Echterdingen

Brombacher V., Sterzik G., Richter C. (2000): *Umweltgerechte Bau- und Dämmstoffe*. GWT der TU Dresden, Eigenverlag: 1-14

Richter C., Sterzik G., Brombacher V. (1999): *Wärmedämmstoffe und Verpackungskörper aus nachwachsenden Rohstoffen*. GWT der TU Dresden, Eigenverlag

### 7.3.2 Konferenzpublikationen

Brombacher V. (2014): *Industrielle Herstellung von Holzfaserdämmstoffen im Trockenverfahren*. 16. Holztechnologisches Kolloquium (HTK). 03. – 04. April 2014. Schriftenreihe Holz- und Papiertechnik, Band 12. TU-Dresden, Eigenverlag. S.46-55

Michel F.; Niemz P.; Brombacher V. (2013): *Untersuchungen zur Optimierung der Eigenschaften von Faserdämmplatten*. 10. Holzwerkstoffkolloquium. 12.-13. Dezember 2013. IHD-Dresden, Tagungsband. S.118-129

Brombacher V., et. al. (2013): *Investigation of thermal conductivity and moisture behaviour of fibreboard and material combinations*. International panel products symposium (IPPS). 09. – 10- Oktober 2013, Llandudno, Wales, UK.

Brombacher V. (2011): *Weichfaserplatten, ihre Dämmwirkung und Anwendungsmöglichkeiten*. Fachtagung Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe (VFhhF). 05.-06.Mai 2011. Verein zur Förderung holzbiologischer & holztechnischer Forschung. Universität Göttingen