



Eidgenössische Technische Hochschule
Institut für Baustoffe
Holzphysik
ETH Hönggerberg
CH-8093 Zürich

Schlussbericht März 2012

Bestimmung bauphysikalischer relevanter Eigenschaften in
Materialkombinationen aus porösen Holzfaserplatten und
anderen Materialien

Projekt Nummer: 2010.10

Prof. Dr. P. Niemz

F. Michel

Projektleiter

Bearbeiter

Betreuung: V. Brombacher, Pavatex SA

Zürich, 11.3.12

Auftraggeber: Bundesamt für Umwelt BAFU
Fond zur Förderung der Wald- und Holzforschung
Abteilung Wald



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Bearbeitungszeit: 14.03.2011 – 30.11.2011



Abstract

Der Einsatz natürlicher Dämmstoffe gewinnt im Bauwesen zunehmend an Bedeutung. Schlagwörter wie Nachhaltigkeit und Ökologie sind in aller Munde und werden zur Anpreisung verschiedenster Produkte und Bereiche verwendet und medial eingesetzt. Besonders für die Anwendung natürlicher Dämmstoffe fehlen befriedigende Informationen, Dokumentationen und Erfahrungen, was zur Folge hat, dass Bauplaner und Architekten vielerorts auf deren Einsatz verzichten.

Dennoch verbucht die Produktion von Dämmstoffen auf Holzbasis derzeit einen Aufwärtstrend. So errichtete Kronospan[®] in Heiligengrabe und Homatherm[®] in Berga eine neue Anlage, zugleich kaufte Homatherm[®] die Firma Isoroy[®] und Gutex[®] baute ein neues Werk in Waldshut. Auch Pavatex[®] erweiterte seine Produktion von Dämmplatten in den letzten Jahren deutlich und baut zurzeit ein neues Werk (Trockenverfahren) in Frankreich.

Die Industrie steht jedoch vor der Frage, inwieweit die derzeitige Rohstoffversorgung durch Nadelhölzer, deren zukünftige Sicherung in Frage gestellt werden muss, substituiert werden kann. Die Verwendung von Laubholzfasern und anderen Naturfasern ist alternativ denkbar und gewinnt daher zunehmend an Bedeutung.

Eine Möglichkeit der Optimierung des Materialeinsatzes, aber auch der Verbesserung bauphysikalisch relevanter Materialeigenschaften, bietet die Kombination verschiedener Dämmmaterialien zu einem mehrschichtigen Endprodukt. Dabei spielt neben den Eigenschaften der einzelnen Lagen auch deren Verbindung eine wichtige Rolle. Gewisse Erfahrungen zu Materialkombinationen mit schichtweisem Aufbau bestehen bereits aus der Prüfung des Diffusionsverhaltens und der Wärmeleitung von verklebtem Holz, wobei u.a. Jahrringlage und Schichtdicke wichtige Einflussgrößen sind. Zudem werden zunehmend verschiedene Rohstoffe im Fasergemisch kombiniert (z.B. Hanf- und Holzfasern), um Synergieeffekte zu erzielen.

Im Bauwesen erfolgen heute die meisten Betrachtungen der Feuchtetransportvorgänge ungeachtet der Übergänge an den Grenzflächen zwischen Schicht und Schichtverbindung. Zwar werden für unterschiedliche Materialien verschiedene Kennwerte herangezogen, die Übergänge und allfällige Randerscheinungen werden jedoch wenig oder gar nicht betrachtet. In dieser Arbeit wurden an Einzelmaterialien und bei Materialkombination unterschiedlicher poröser Weichfaserplatten neben der Wärmeleitfähigkeit auch die Aufnahme und Leitung von Wasserdampf mittels genormter Materialeigenschaftsprüfungen untersucht und betrachtet.

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass die Wärmeleitfähigkeit, die Sorption und Diffusion sowie das Quellen und Schwinden bei porösen Holzfaserplatten sehr stark von der Rohdichte, aber auch vom Feuchtegehalt abhängt. Des Weiteren hat sich ein Einfluss des verwendeten Herstellverfahrens und der damit verbundenen Faserorientierung in der Dämmplatte gezeigt. Beim Trockenverfahren kann aufgrund der neueren Technologie eine diffusere Faserorientierung, bei einem homogenen Plattenquerschnitt bis zu 20 cm Dicke erzeugt werden. Im Nassverfahren ergibt sich eine stärker gerichtete Orientierung der Fasern, i.d.R. bei einem maximalen Produktionsquerschnitt von 20 mm Dicke. Höhere Querschnitte werden im Nassverfahren durch Schichten und Verkleben einzelner Lagen erzielt. Aus den Untersuchungen geht hervor, dass diese Schichtung einen Einfluss auf die Materialeigenschaften hat, welcher mit Erhöhung der linienförmig verklebten Schichten verstärkt nachgewiesen werden konnte.



Abstract

In the building industry the use of natural insulants is increasingly gaining in importance. Buzzwords such as sustainability and ecology are on everyone's lips and used in order to advertise various products and fields as well as for medial purposes. Especially the implementation of natural insulants lacks satisfactory information, documentation and experience, which results in the fact that construction planners and architects in many places refrain from their use.

Despite this fact, the production of insulants is experiencing an upward trend. Kronospan[®], for example, built a new site in Heiligengrabe and Homatherm[®] built a new one in Berga. At the same time, Homatherm[®] bought the Isoroy[®] company and Gutex[®] built a new plant in Waldshut. Also Pavatex[®] considerably expanded its production of insulation boards in the last years and is currently building a new plant (dry process) in France.

However, the industry is facing the question of to what extent the current raw material supply can be substituted by conifers whose future safeguard has to be questioned. Alternatively, the use of hardwood fibres and other natural fibres is imaginable and therefore increasingly gaining in importance.

The combination of various insulating materials into a multilayered end product offers a possibility to optimise the material usage as well as to improve material properties that are relevant from a construction physics point of view. Thereby, apart from the properties of the individual layers, their combination also plays an important part. Certain knowledge regarding material combinations with a layered fitting already exists from the analysis of the diffusion behaviour and the thermal conduction of glued wood. Thereby, the position of annual rings and the layer thickness are, among others, important influencing variables. Additionally, various raw materials are increasingly combined to a fibre blend (e.g. hemp and wood fibres) in order to achieve synergy effects.

Today, most of the considerations concerning moisture transport processes are made without regard to the transitions at the interfaces between layer and layer combination. Although various characteristic values are raised for different materials, transitions and peripheral matters are not or hardly considered. In this thesis, apart from the thermal conductivity also the absorption and conduction of water vapour of individual materials and material combinations of different porous soft boards were analysed and observed with the aid of standardised material property examinations.

The research has shown that thermal conductivity, sorption and diffusion as well as swelling and evaporation of wood fibre boards depend strongly on the bulk density but also on the moisture content. Additionally, an influence by the used production method and the therewith associated fibre orientation was shown. Thanks to modern technology, a more diffuse fibre orientation can be achieved in the dry process, in the case of a homogeneous board cross-section up to a thickness of 20 cm. In the wet process, a more directed fibre orientation results, generally in the case of a maximal production cross-section of a thickness of 22 mm. In the wet process, higher cross-sections are achieved by layering and laminating the individual layers. The research shows that this layering has an influence on the material properties which was additionally proven by increasing the linear glued layers.



Inhaltsverzeichnis

Abstract.....	i
Inhaltsverzeichnis	iii
Vorwort.....	v

1 Einleitung

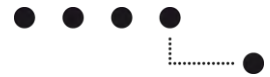
1.1 Ausgangslage	1
1.2 Zielsetzung.....	3
1.3 Rahmenbedingungen.....	4
1.3.1 Vorbetrachtungen	4
1.3.2 Abgrenzungen und Bemerkungen	5

2 Stand des Wissens

2.1 Forstwirtschaftliche Lagebeurteilung	6
2.2 Aufbau des Holzes	7
2.3 Feuchtetechnisches Verhalten von Holz.....	9
2.3.1 Feuchtebewegungen durch Diffusion	12
2.3.2 Quell- und Schwindverhalten	15
2.4 Werkstoffe aus Holz.....	19
2.5 Einteilung der Dämmstoffe.....	20
2.6 Herstellverfahren der Faserplatten	23
2.6.1 Zerfaserung	24
2.6.2 Nassverfahren	27
2.6.3 Trockenverfahren.....	29
2.6.4 Inhaltsstoffe, Zusatzstoffe	31

3 Physikalische Grundlagen zu Wärmedämmstoffen im Bauwesen

3.1 Wärmedämmung und Wärmespeicherung	32
3.2 Wärmetechnische Kennzahlen	40
3.3 Feuchte und Diffusion	49



4 Material

4.1	Thermodynamische Kenngrößen bei Einzelmaterialien	52
4.2	Thermodynamische Kenngrößen bei Materialkombination	53

5 Methoden

5.1	Wärmeleitfähigkeit	54
5.2	Wasserdampf-Diffusion.....	56
5.3	Berechnung der Sorptionsgeschwindigkeit.....	61
5.4	Quellen und Schwinden	63

6 Ergebnisse und Diskussion

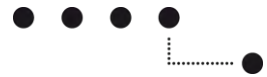
6.1	Wärmeleitfähigkeit	67
6.2	Wärmeleitfähigkeit bei Materialkombination	71
6.3	Wasserdampf-Diffusion.....	74
6.4	Wasserdampf-Diffusion bei Materialkombination.....	79
6.4.1	Relative Luftfeuchte in den Prüfgefäßen der Wasserdampf-Diffusion	83
6.5	Berechnung der Sorptionsgeschwindigkeit.....	86
6.6	Quellen und Schwinden	89
6.6.1	Feuchteauf- und abgabe bei Klimawechsel.....	89
6.6.2	Quell- und Schwindverhalten bei Klimawechsel	93

7 Zusammenfassung und Ausblick.....97

Verzeichnisse

Abbildungsverzeichnis	100
Tabellenverzeichnis	102
Normenverzeichnis	104
Literaturverzeichnis.....	106

Anhang.....114



Vorwort

Beim Studienlehrgang zum Bachelor of Science in Holztechnik an der Berner Fachhochschule für Architektur, Holz und Bau in Biel besteht die Möglichkeit nach dem fünften Semester ein neun monatiges Praktikum zu besuchen. Ich habe diese Chance genutzt und durfte das Praktikum am Institut für Baustoffe der Eidgenössischen Technischen Hochschule absolvieren. Während dieser Zeit habe ich auch den vorliegenden Schlussbericht verfasst.

Holz als natürlich gewachsener Werkstoff fasziniert mich durch seine vielseitigen Eigenschaften, Verarbeitungen und Verwendungen, seit je her. Mit der Wahl der Thematik hatte ich Gelegenheit mein Wissen über Holz und Holzwerkstoffe weiter zu vertiefen. Die Arbeit in der Holzphysikgruppe eröffnete mir einen Einblick in die spannende Welt der Forschung, dabei hatte ich die Gelegenheit das umfassende Gebiet der Holzphysik aus neuen Blickwinkeln zu betrachten und den Reiz nach der Suche neuer Erkenntnisse zu spüren.

An dieser Stelle möchte ich mich beim Bundesamt für Umwelt BAFU und dem Fond zur Förderung der Wald- und Holzforschung für die Finanzierung dieses Projektes bedanken.

Ein weiterer Dank richtet sich an Herrn Prof. Dr. Peter Niemz und die Arbeitsgruppe Holzphysik des Instituts für Baustoffe der ETH Zürich für die gute Zusammenarbeit und die Unterstützung während des Praktikums.

Weiter möchte ich mich bei meinen betreuenden Dozenten Herrn Prof. Dr. Thomas Volkmer und Herrn Prof. Dr. Andreas Hurst bedanken. Sie haben sich stets Zeit genommen und mich mit ihren Fachkenntnissen und Erfahrungen richtungsweisend unterstützt.

Ferner bedanke ich mich bei Herrn Dipl.-Forstwirt Volker Brombacher (Pavatex SA[®]), welcher mir als Betreuer zur Seite stand und wesentlich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen hat.

Ein Dank geht ebenfalls an die Firmen Pavatex SA[®], Gutex[®], Steico[®] und Val Naturel[®], welche mir die verschiedenen Dämmfaserplatten kostenlos zur Verfügung gestellt haben.

Zum Schluss möchte ich mich ganz herzlich bei Melanie Wetzig für die Korrektur dieses Schlussberichtes bedanken.



1 Einleitung

1.1 Ausgangslage

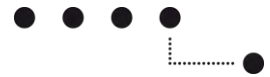
Die Erarbeitung dieser Arbeit erfolgt im Rahmen eines Forschungsprojektes des Fonds zur Förderung der Wald- und Holzforschung des Bundesamtes für Umwelt BAFU. Realisiert wird das Projekt in der Arbeitsgruppe Holzphysik am Institut für Baustoffe der ETH Zürich. Die Arbeitsgruppe führt Forschungsarbeiten auf dem Gebiet der physikalischen und mechanischen Eigenschaften von Holz und Holzwerkstoffen durch.

Ein bauphysikalisches Hauptanliegen ist der thermische Komfort für den Menschen im Sommer wie im Winter, wobei die Dämmung der Gebäudehülle einen wesentlichen Einfluss auf das menschliche Wohlbefinden hat und den Gesamtenergiebedarf massgeblich beeinflusst.

Vor dem Hintergrund einer nachhaltigen Gesellschaft gewinnt der Einsatz natürlicher Dämmstoffe immer mehr an Bedeutung. Die Vorteile dieser Dämmstoffe definieren sich, im Vergleich zu Schaumstoffen und Mineralwolle, durch die Möglichkeit der zerstörungsfreien Feuchtigkeitsaufnahme und- abgabe sowie der sehr guten spezifischen Wärmekapazität und der höheren Dichte. Speziell bei Holzfaserdämmplatten ist bedingt durch diese Eigenschaften vor allem der sommerliche Wärmeschutz, der sich in den Kenngrössen der Phasenverschiebung und der Amplitudendämpfung zeigt, hervorzuheben. Die Produktion von Dämmstoffen auf Holzfaserbasis befindet sich im Wachstum. Namhafte Hersteller wie Kronoply[®], Homatherm[®], Gutex[®] und Pavatex[®] erweitern ihre Produktion laufend und prüfen auch Expansionen an weiteren Standorten.

Zur Herstellung von Holzfaserplatten wird hauptsächlich Nadelholz eingesetzt. Durch die waldbauliche Umstrukturierung der Schweizer Wälder vom reinen Nadelwald zum Mischwald wird der Laubholzanteil deutlich steigen. Es stellt sich nun die Frage, inwieweit die Rohstoffversorgung durch Nadelhölzer zukünftig gewährleistet werden kann. Mit der Möglichkeit der Verwendung von Laubholzfasern und anderen natürlichen Fasern könnten Engpässe in der Rohstoffzulieferung überbrückt und langfristig gelöst werden. Gemäss der Firma Pavatex SA[®] bereitete die Zugabe von Laubholzfasern zur Abdeckung des Rohstoffbedarfs Probleme und erbrachte nicht den gewünschten Erfolg. Durch einen geschichteten Materialverbund könnten Laubhölzer jedoch in Faserdämmplatten integriert werden, um Eigenschaften zu optimieren und Synergieeffekte zu erzielen. Die höhere Dichte von Laubholz gegenüber Nadelhölzern würde sich auf bestimmte Anwendungsbereiche, wie z.B. Schalldämmung und Wärmespeichervermögen positiv auswirken. Auch der Einsatz pflanzlicher Fasern, wie zum Beispiel Hanffasern, welche sich durch ihre hervorragenden hygrothermischen Eigenschaften auszeichnen und zudem sehr resistent gegenüber biologischem Abbau sind, ist alternativ denkbar und könnte genutzt werden.

Feuchtigkeitsbewegungen sind für bauphysikalische Betrachtungen sehr bedeutend. So kann es bei ungünstigen Bedingungen zur Durchfeuchtung von Dämmmaterialien und ganzen Bauteilen führen, was das Dämmvermögen wesentlich herabsetzt und im Extremfall zu Pilzbefall als Folge einer Kondenswasserbildung führen kann. Im Bauwesen erfolgen heute die meisten Betrachtungen der Feuchtetransportvorgänge ungeachtet der Schichtübergänge von Grenzflächen. Zwar werden für unterschiedliche Materialien verschiedene Kennwerte herangezogen, die Übergänge und allfällige Randerscheinungen werden jedoch wenig oder gar nicht betrachtet. Kenntnisse über die Einflüsse der Grenzflächen bei Materialkombination auf bauphysikalische Parameter (z.B. Wärmeübergang, Feuchtedurchgang) sind bislang nur wenig bekannt (Sonderegger 2011), was weitere Untersuchungen notwendig macht.



Seit den 1990er Jahren werden im Auftrag des Bundesamtes für Energie BFE periodisch Analysen über die Veränderung des Energieverbrauches durchgeführt. Die Analyse des schweizerischen Energieverbrauches zwischen 2000 und 2009 nach Verwendungszwecken aus dem Jahr 2010 zeigt, dass der Haushaltssektor mit 28.7% nach dem Verkehr den zweit grössten Anteil des Gesamtenergieverbrauches der Schweiz einnimmt (Abbildung 1.1).

Energieverbrauch 2009 nach Verbrauchssektoren

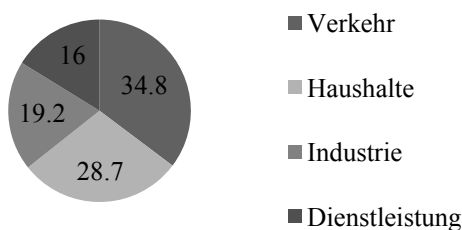


Abbildung 1.1: Energieverbrauch 2009 nach Verbrauchssektoren (Analyse des schweizerischen Energieverbrauchs 2000- 2009 nach Verwendungszwecken)

Nutzenergieverteilung von Haushalten

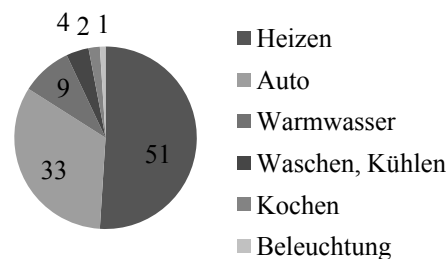


Abbildung 1.2: Nutzenergieverteilung von Haushalten (Mötzl 2000)

Bei der Betrachtung der Nutzenergieverteilung beim Haushaltssektor (Abbildung 1.2) fällt auf, dass über die Hälfte der Nutzenergie (51%) für das Heizen aufgebracht wird. Das zeigt, dass durch einen gezielten Einsatz hochwertiger Dämmstoffe ein enormes Sparpotential für die Reduzierung der Nutzenergie in Haushaltssektor vorhanden ist.

Die Frage warum über die Hälfte der Nutzenergie für das Heizen aufgewendet wird, beantwortet die genaue Betrachtung des Wärmeverlustes bei Gebäuden (Abbildung 1.3). Diese Grafik macht deutlich, dass 50% der Wärmeverluste auf die Gebäudehülle zurückzuführen sind. So kann eine zeitgemässe und fachlich korrekte Wärmedämmung einen erheblichen Beitrag zur Reduzierung des Energieverbrauches beitragen.

Wärmeverlust bei Gebäuden

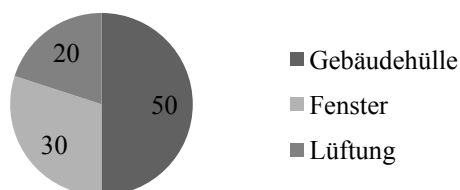


Abbildung 1.3: Wärmeverlust bei Gebäuden (www.energie.ch)



1.2 Zielsetzung

In dieser Arbeit sind als bauphysikalisch relevante Materialeigenschaften die Wärmeleitfähigkeit, die Sorption und die Diffusion sowie die Quellung und Schwindung als Schwerpunkt ausgewählt worden. Mit den entsprechenden Werkstoffprüfungen werden diese Eigenschaften bei Einzelmaterialien und bei Materialkombinationen aus verschiedenen Faserplatten untersucht. Unter Betrachtung der Ergebnisse werden Randerscheinungen an Schichtübergängen analysiert und quantifiziert. Zudem stellt sich die Frage, ob durch Einsatz von Materialkombinationen aus verschiedenen Dämmfaserplatten eine Optimierung der bauphysikalisch relevanten Materialeigenschaften erreicht werden kann.

Des Weiteren soll geklärt werden, inwiefern Herstellverfahren und Schichtverklebung im Nassverfahren hergestellter Faserplatten, unter Berücksichtigung der Anzahl an Schichten und Fugen, die thermische Leitfähigkeit und die Wasserdampf-Diffusion beeinflussen.

Diese Arbeit soll der Erweiterung des aktuellen Kenntnisstandes über naturfaserbasierte Dämmstoffe dienen, eine Optimierung des Materialeinsatzes unterstützen und sich mit der Frage der zukünftigen Rohstoffversorgung beschäftigen.

Es werden verschiedene Messungen an Einzelmaterialien und deren Kombination durchgeführt um die erforderlichen Daten zur Wärmeleitfähigkeit und Wasserdampf-Diffusion zu generieren.

Zu Beginn sind folgende Meilensteine mit Absprache des Industriepartners, der Firma Pavatex SA[®], definiert worden.

1. Aktueller Kenntnisstand zur Wärmeleitfähigkeit und zum Diffusionsverhalten von Holzfaserplatten
2. Erstellung des Prüfplans
3. Definition sinnvoller Materialkombination hinsichtlich des Erkenntnisgewinnes
4. Untersuchungen zur Sorptionsgeschwindigkeit an Einzelmaterialien und Diffusionsversuche an Einzelmaterialien und an Materialkombinationen
5. Ermittlung der Wärmeleitfähigkeit mit dem Wärmeleitfähigkeitsmessgerät λ - Meter EP 500 der Lambda- Messtechnik GmbH Dresden an Einzelmaterialien und Materialkombinationen
6. Gegenüberstellung der Ergebnisse aus den Untersuchungen an Einzelmaterialien und an Materialkombinationen (Vergleich rechnerische/ messtechnische Ermittlung Materialparameter)
7. Auswertung, Interpretation und Bewertung der Ergebnisse
8. Erstellung einer Bachelor-Thesis und eines Zwischen- und Schlussberichtes



1.3 Rahmenbedingungen

1.3.1 Vorbetrachtungen

Vor Beginn den in dieser Arbeit veröffentlichten Untersuchungen ist eine ausführliche Analyse der am Markt vorhandenen Weichfaserprodukte durchgeführt worden (detailliert im CD-Anhang).

Dabei sind Produkte folgender Hersteller poröser Weichfaserplatten betrachtet worden:

- GUTEX
- STEICO
- HOMATHERM
- PAVATEX
- VALNATUREL (Hanffaserplatte)

Weiter wurde der Hochleistungsdämmstoff „Aerogel“ der Firma SPACELOFT (Aspen, Colorado, USA) zum Vergleich herangezogen, welcher im weiteren Verlauf auch die verschiedenen Werkstoffeigenschaftsprüfungen durchlaufen wird.

Die Analyse ist nach folgenden Angaben, Eigenschaften und Kennwerten durchgeführt worden:

- Verwendungszweck
- Herstellverfahren (Nass- oder Trockenverfahren)
- Inhaltsstoffe, Zusatzstoffe
- Wärmeleitfähigkeit λ [$\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$]
- Wärmedurchgangswiderstand **R-Wert** [$(\text{m}^2\cdot\text{K})/\text{W}$]
- Wärmedurchgangskoeffizient **U-Wert** [$\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$]
- Spezifische Wärmekapazität **C-Wert** [$\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$]
- Rohdichte ρ [kg/m^3]
- Wärmespeicherzahl **S** [$\text{kJ}/(\text{m}^3\cdot\text{K})$]
- Temperaturleitfähigkeit α [m^2/s]
- Wasserdampf-Diffusionswiderstandszahl μ [-]
- Äquivalente Luftschichtdicke **s_d-Wert** [m]

Diese Analyse hat ergeben, dass eine Unterscheidung der Produkte meist über den Verwendungszweck gemacht wird. Erst bei genauerer Betrachtung und der Auflistung aller Herstellerangaben aus den Produktdatenblättern war es möglich Abhängigkeiten und Tendenzen der Angaben zu verstehen. Die angegebenen Werte sind rechnerisch nachverfolgt, und falls fehlend, ergänzt worden.

Aufgrund dieser Analyse sind für einen ersten Überblick an 24 Dämmstoffkombinationen, ausgehend von einem dreischichtigen Plattenaufbau, U-Wert Berechnungen durchgeführt worden. Die Ergebnisse wurden nach dessen Wert sortiert. Aus dieser Übersicht sind dann zehn sinnvolle Kombinationen ausgewählt worden (detailliert im CD-Anhang).

Unter sinnvoll werden folgende Punkte verstanden:

- Symmetrischer Plattenaufbau
- Kombination von Isonat chanvre (85% Hanf) mit Weichfaserplatten aller Hersteller
- Kombination vom Hochleistungsdämmstoff mit Weichfaserplatten aller Hersteller (nur als Mittellage)



Zusammenfassend sind folgende Lösungsschritte in Absprache des Industriepartners definiert worden:

- Literaturrecherche
- Analyse der Produktportfolios verschiedener Hersteller
- Festlegen sinnvoller Materialkombinationen
- Festlegen der bauphysikalisch relevanten Materialeigenschaften
- Festlegen der verschiedenen Prüfungen zu den Werkstoffeigenschaften
- Vorgehensweise der Materialeigenschaftsprüfungen
- Herstellung und Vorbereitung der verschiedenen Prüfkörper
- Vorversuche an Einzelmaterialien durchführen
- Versuche an Materialkombinationen durchführen
- Ermittlung der Daten, Gegenüberstellung, Analyse und Interpretation
- Dokumentation

1.3.2 Abgrenzungen und Bemerkungen

Die Firma Pavatex SA legt Wert auf die Versuchsdurchführung nach DIN EN ISO 12572 Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Baustoffen und Bauprodukten; Bestimmung der Wasserdampfdurchlässigkeit [11]. Abweichungen zur Norm werden immer mit Absprache der Firma Pavatex vereinbart.

Die zu prüfenden porösen Weichfaserplatten haben gemäss Produktdatenblatte eine Rohdichte im Bereich von 35 bis 270 kg/m³ mit einer Wärmeleitfähigkeit λ_D von 0.038 bis 0.048 W/(m·K).



2 Stand des Wissens

2.1 Forstwirtschaftliche Lagebeurteilung

Die eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft erfasst seit den 1980er Jahren den Zustand und die Veränderung des Schweizer Waldes in Form der Landesforstinventare (LFI). Bis anhin sind drei LFI aufgenommen und ausgewertet worden. LFI 1 von 1983-85, LFI 2 von 1993-95 und das LFI 3 von 2004-06 seit 2009 läuft eine kontinuierliche Erhebung zum LFI 4 bis 2017. Seit einigen Jahrzehnten ist der Schweizer Wald grösseren Belastungen ausgesetzt, insbesondere wegen der Zunahme von klimatischen und biogenen Störungen (Usbeck et al. 2010). Entsprechend war der Anteil der Zwangsnutzung sehr gross. Die mittlere Zwangsnutzungsmenge stieg von jährlich 2.2 Mio. m³ zwischen LFI 1 und LFI2 auf 2.9 Mio. m³ zwischen LFI 2 und LFI 3 (Schwyzer et al. 2010). Wegen vorübergehend höherer Holzpreise war auch die reguläre Holznutzung zwischen dem LFI 2 und dem LFI 3 relativ gross. Deshalb war die Menge des genutzten und des abgestorbenen Holzes während dieses Zeitraumes fast gleich gross wie der Holzzuwachs (Duc et al.). Unter Holzvorrat werden lebende und Zuwachs liefernde Bäume gezählt. Dieser besteht in der Schweiz aus ca. 69% Nadelholz und ca. 31% Laubholz und stieg zwischen LFI 2 und LFI 3 um 2.4 % auf 405 Mio. m³. Der Nadelholzvorrat sank während dieser Zeit um insgesamt um 2.44 Mio. m³, wobei die Fichte eine besonders hohe Abnahme von 7.55 Mio. m³ erlitt. Laubholz verzeichnete dagegen einen Zuwachs von 11.96 Mio. m³, wobei die Buche mit 4.28 Mio. m³ am deutlichsten zunahm (Krackler et al. 2011).

Das Ziel bei der Verarbeitung von sägefrischem Holz im Sägewerk ist eine möglichst hohe Ausbeute des Schnittholzes aus dem Stammholzanteil, dabei sind Laubhölzer auf Grund der meist krummeren Stammform schwieriger zu bearbeiten und gelten als unrentabler als Nadelholz. Abbildung 2.1 zeigt die prozentualen Anteile an Stammholz und anfallenden Resten bei Nadel- und Laubbäumen. Es fällt auf, dass der Stammholzanteil bei Laubbäumen mit 55% deutlich kleiner ist als der bei Nadelbäumen mit 80%.

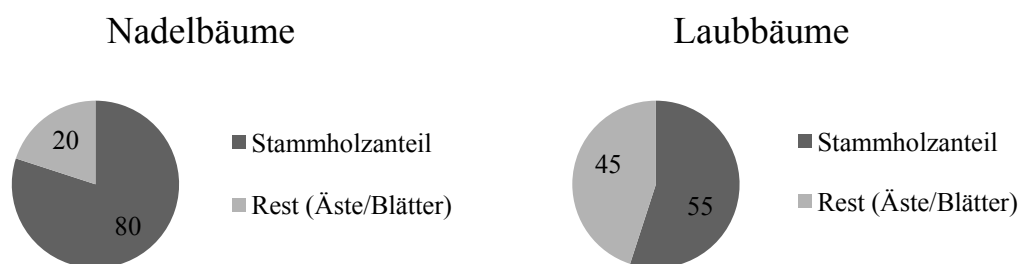


Abbildung 2.1: Nutzbarer Stammholzanteil von Nadel- und Laubholz (Thees 2009)

Auch bei der Schnittholzausbeute des Stammholzes zeigen sich deutliche Unterschiede. Dem maximalen Restholzanteil von 85% bei Laubholz steht ein maximaler Anteil von 50% bei Nadelholz gegenüber (Krackler et al. 2010). Zusammenfassend könnte die Entwicklung des Holzvorrates, aber auch die Problematik beim Ein- und Zuschnitt von Laubholz entgegen der vorherrschenden Meinungen als Chance für die Faserstoffindustrie begriffen werden. Der grosse Restholzanteil könnte vermehrt der Faserstoffherstellung zugeführt werden, wenn die Technologie der Herstellung von Dämmfaserplatten so angepasst werden könnte, dass die gewünschten Eigenschaften beibehalten werden.

2.2 Aufbau des Holzes

Holz kann als hierarchisches Material angesehen werden, aufgebaut aus unterschiedlichen Strukturen über mehrere Ebenen. Die Abbildung 2.2 visualisiert eindrucksvoll die verschiedenen Ebenen, beginnend beim Stamm folgen das Kern- und Splintholz der Jahrring, die einzelnen Tracheiden sowie die Zellwandschichten, welche schlussendlich aus den aus Zelluloseketten gebildeten Mikrofibrillen aufgebaut sind. Die wichtigsten chemischen Komponenten des Holzes sind Zellulose, Hemizellulosen und Lignin.

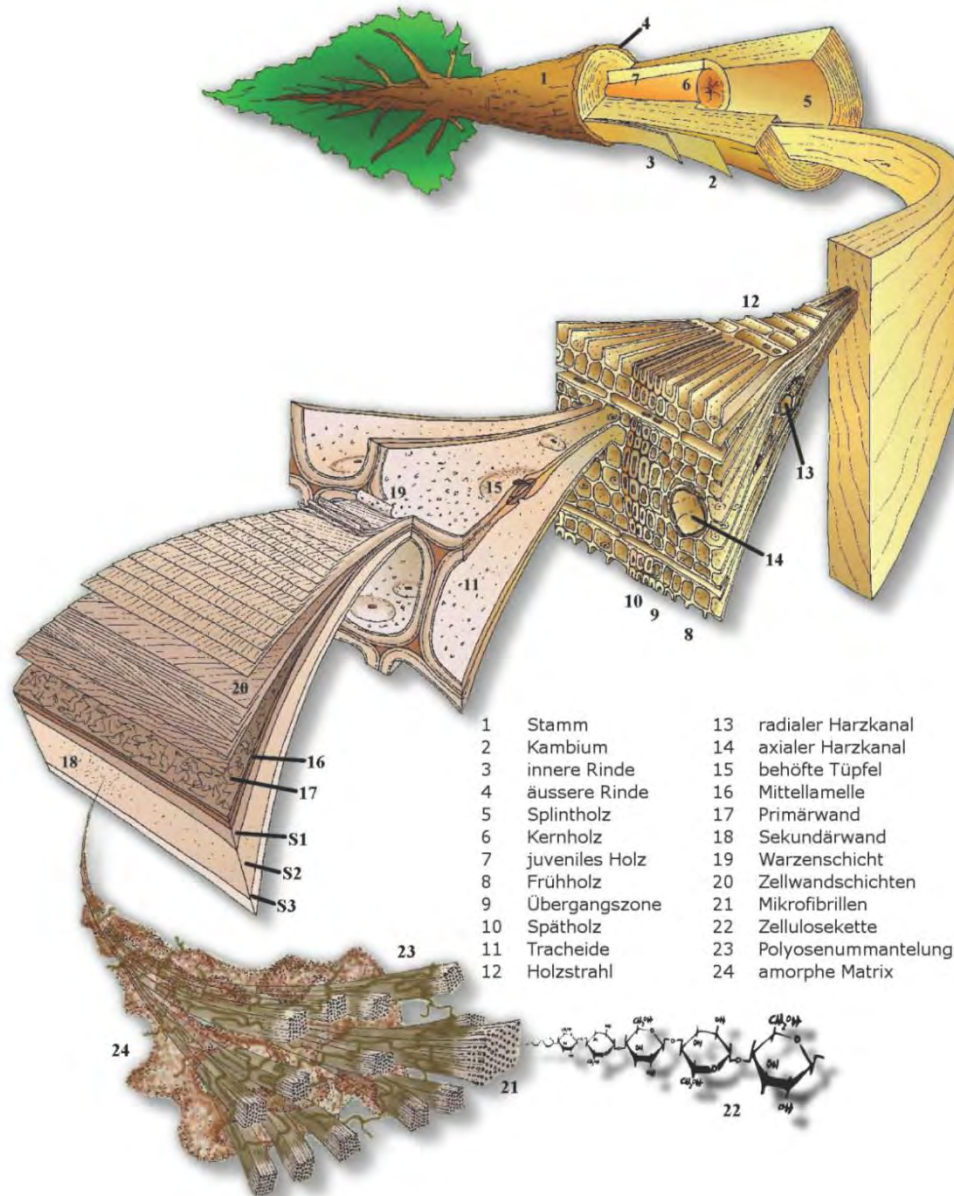


Abbildung 2.2: Hierarchische Struktur von Nadelholz (Forschungszentrum für Holztechnologie der Universität von Canterbury (Christchurch, Neuseeland))

Radial wird der Stamm in äussere und innere Rinde (Phloem), das Kambium sowie im Inneren des Stammes (Xylem) in Splint- und Kernholz unterteilt. Das Dickenwachstum geht von der Kambialschicht aus (sekundäres Dickenwachstum), welche nach aussen Rinde und nach innen Splintholz erzeugt. Der Wassertransport aus dem Boden bis zur Krone erfolgt vorwiegend über die äusseren Bereiche des Splintholzes. Ein Jahrring kann in Früh- und Spätholz unterteilt werden.

Diese unterscheiden sich, resultierend aus den jahreszeitlichen Wachstumsbedingungen, je nach Porigkeit (ring-, halbring- oder zerstreutporig) in den Zellgrößen und Wanddicken. Bei zerstreutporigem Laubholz wie der Buche, sind die kleinen Gefässe (Tracheen) gleichmässig über den Jahrring verteilt und in einer grossen Anzahl feiner Faserzellen den Librifasern eingebunden. Die Tracheen sind mit kleinen Öffnungen, den sogenannten Hoftüpfeln versehen, die für den Wassertransport quer zur Faser verantwortlich sind (Abbildung 2.3). Der Hauptteil des Wassertransportes findet allerdings nicht quer sondern längs der Tracheen statt. Bei Nadelhölzern dagegen, die keine Tracheen besitzen, findet der Wassertransport ausschliesslich über die Tracheiden statt, die ebenfalls über Hoftüpfel miteinander verbunden sind.

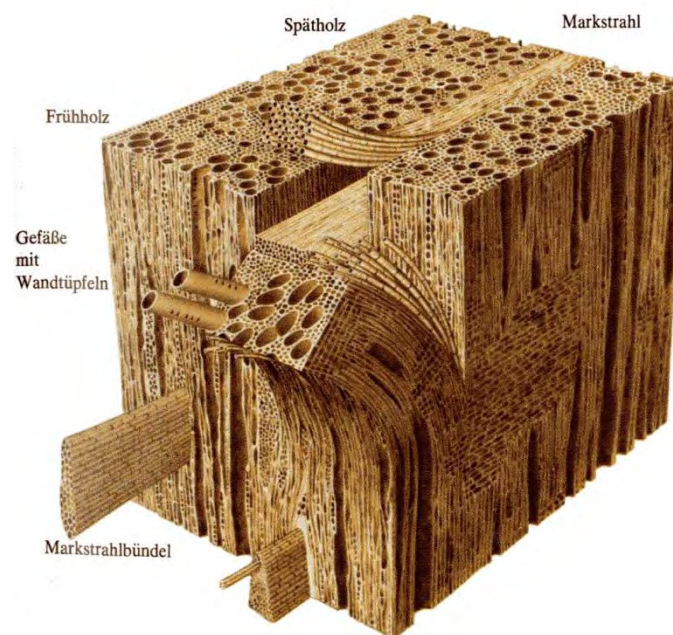


Abbildung 2.3: Mikrostruktur von Buchenholz (*Fagus sylvatica* L.); links) Tangential-, rechts)-, Radial- und oben) Querschnitt (Schwab 1977)

So unterschiedlich die Funktion, die Form und das Aussehen der Holzzellen bei Laub- und Nadelholz sind, der Aufbau der verholzten Zellwand folgt in beiden Fällen einem sehr ähnlichem Grundmuster. Über die Mittellamelle sind die Zellwände, bestehend aus Primär-, Sekundär- und Tertiärwand, miteinander verbunden. Die Speicherung von Nähr- und Inhaltstoffen erfolgt in den Parenchymzellen, welche bei Nadelhölzern kastenförmig und bei Laubhölzern vorwiegend axial vereinzelt sowie radial in Form von Holzstrahlen auftreten.

Weitere deutliche Unterschiede zwischen Nadel- und Laubholz zeigen sich in den verschiedenen Faserlängen. So hat die Rotbuche (*Fagus sylvatica* L.) eine Faserlänge von 600-1300 µm und die Fichte (*Picea abies* Karst.) eine Faserlänge von 1300-4800 µm (Wagenführ 2010).

2.3 Feuchtetechnisches Verhalten von Holz

Wie alle hygroskopischen Stoffe besitzt auch Holz die Fähigkeit Feuchtigkeit aus der Umgebung in Form von Wasserdampf aus der Luft aufzunehmen, zu speichern und wieder abzugeben.

Die Feuchtaufnahme bei Holz erfolgt wie in Abbildung 2.4 in vier Phasen, von denen die ersten drei infolge Sorption und die Letzte durch Kapillarkräfte erfolgt.

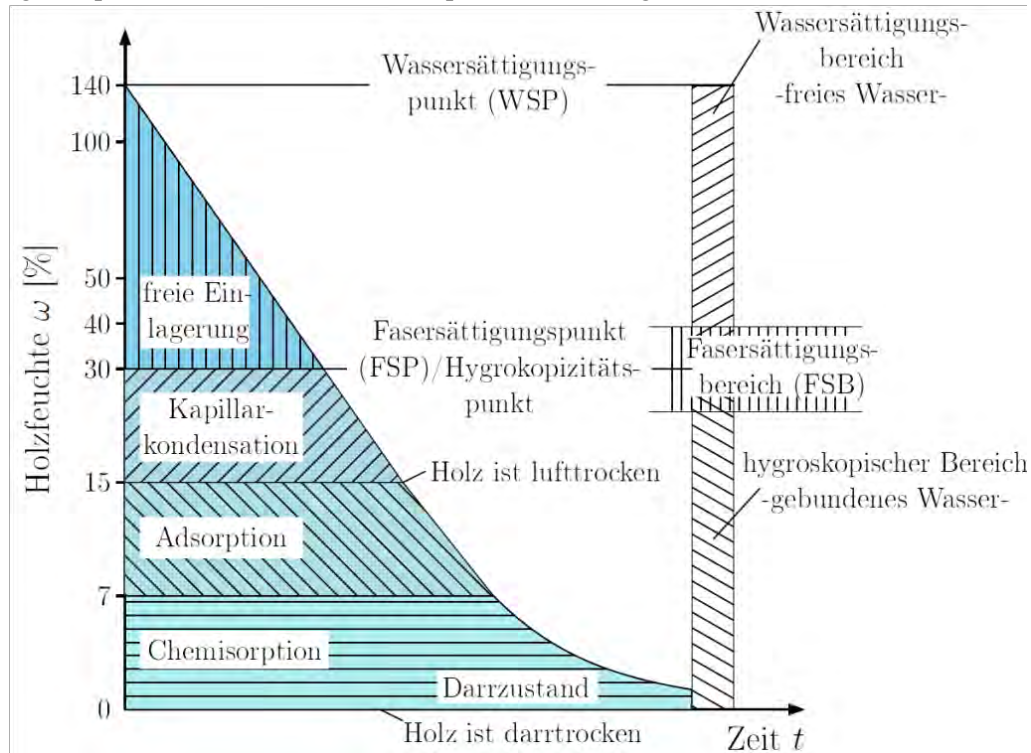


Abbildung 2.4: Bindungsarten von Wasser im Holz (nach Niemz 1993)

Holz mit einer Holzfeuchte von annähernd 0% gilt als darrtrocken. In der ersten Phase der Feuchtaufnahme, der Chemiesorption, im Holzfeuchtebereich von 0 bis ca. 7%, werden die Wasserstoffmoleküle durch Wasserstoffbrücken an die freien Nebenvalenzen der Hydroxylgruppen in den amorphen Bereichen des Zellulosegerüsts des Holzes gebunden.

In der zweiten, der Adsorptionsphase, im Holzfeuchtebereich von 7 bis ca. 15%, entstehen durch van der Waals-Kräfte nicht-kovalente Bindungen zwischen den Wasserstoffmolekülen und Feuchtigkeit reichert sich in den Poren der Zellwände an, das Holz beginnt zu quellen.

In der dritten und letzten Sorptionsphase, der Kapillarkondensation (zwischen 15 bis ca. 30% Holzfeuchte), kondensiert der Wasserdampf aus den Kapillaren und lagert sich bis zum Fasersättigungspunkt auf der Oberfläche der Zellwände an. Oberhalb des Fasersättigungsbereiches treten keine weiteren Quell- und Schwinderscheinungen auf. Der Fasersättigungsbereich bezeichnet den höchstmöglichen Gehalt an gebundenem Wasser, und wird erreicht wenn sich Holz in wassergesättigter Luft befindet (Niemz 1993).

In der vierten Phase, der freien Einlagerung, ab ca. 30% bis zum Wassersättigungspunkt wird Wasser in den Zellhohlräumen eingelagert. Da der exakte Fasersättigungspunkt einer Holzart nur schwer zu bestimmen ist, wird dieser meist nach dem Hailwood-Horobin-Modell berechnet (Popper et al. 2001). Holzfeuchten über dem Fasersättigungsbereich können durch Wasserlagerung erreicht werden.



Holz kann, wie bereits erwähnt, aufgrund seines hygroskopischen Verhaltens Feuchtigkeit aus der Umgebungsluft aufnehmen. Bei gleich bleibenden Bedingungen stellt sich ein Gleichgewichtsfeuchtegehalt, bzw. ein Sorptionsgleichgewicht ein, welches von folgenden Faktoren abhängig ist:

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

Den Zusammenhang zwischen relativer Luftfeuchte und Temperatur auf den Feuchtegehalt des Holzes zeigt Abbildung 2.5 in Form der Sorptionsisothermen von Sitka-Fichte (*Picea sitchensis*) (Niemz 1993).

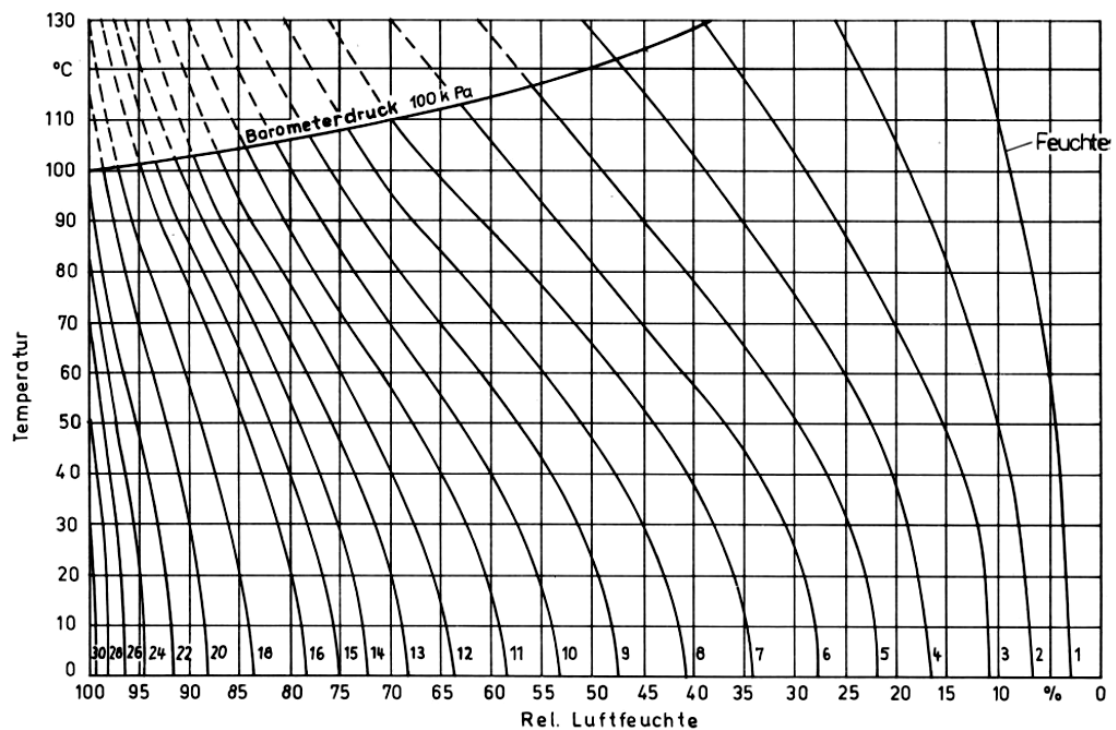


Abbildung 2.5: Hygroskopisches Gleichgewicht von Sitka-Fichte

Der Holzfeuchtegehalt dient als Kenngrösse zur Beurteilung des Wassergehaltes, welcher nach DIN 52183 „Prüfung von Holz; Bestimmung des Feuchtegehaltes“ wie folgt berechnet wird (Gleichung 2.1).

$$\omega = \frac{m_{\omega} - m_{dtr}}{m_{dtr}} \cdot 100 \quad (2.1)$$

Dabei ist.

- ω der Feuchtegehalt [%]
- m_{ω} die Masse der feuchten Probe [kg]
- m_{dtr} die Masse der darrtrockenen Probe [kg]

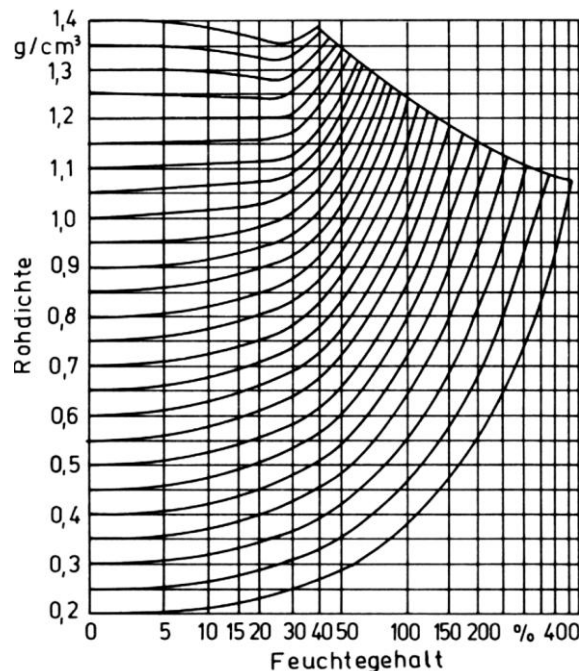


Abbildung 2.6: Einfluss des Feuchtegehaltes auf die Rohdichte (Niemz 1993)

Die Rohdichte ist eine der wichtigsten Eigenschaften von Holz und Holzwerkstoffen aber auch von Wärmedämmstoffen. Sie beeinflusst nahezu alle Eigenschaften wie Wärmeleitfähigkeit, Quell- und Schwindverhalten und auch die Festigkeit, welche mit steigender Rohdichte zunehmen (Niemz 1993). Die Rohdichte ρ definiert sich als Quotient aus der Masse über dem Raumvolumen eines Stoffes. Wird Holz dem Normalklima von 20°C und 65% rel. Luftfeuchte ausgesetzt und sich das Sorptionsgleichgewicht eingestellt hat (bei Fichte ca. 12%) wird das als Normal-Rohdichte bezeichnet. Die feuchteabhängige Dichte wird nach Gleichung 2.2 berechnet.

$$q_\omega = \frac{m_\omega}{V_\omega} \quad (2.2)$$

Dabei ist:

ϱ_ω die Rohdichte bei Holzfeuchte ω [kg/m³]

$m_{(\omega)}$ die Masse bei Holzfeuchte ω [kg]

V_ω das Volumen bei Holzfeuchte ω [m³]

Weil die Dichte feuchteabhängig ist wird sie differenziert betrachtet und ist wie in Tabelle 2.1 unterteilt.

Tabelle 2.1: Feuchtabhängige Dichten bei Holz und Holzwerkstoffen (nach Niemz 1993)

Bezeichnung	Zustand
Darrdichte ρ_{dtr}	Masse darrtrocken/ Volumen darrtrocken
Normal-Rohdichte ρ_{ω}	Dichte im Normalklima bei 20°C/ 65% rel. Luftfeuchte
Raumdichtezahl R	Masse darrtrocken/ Volumen bei maximal gequollenen Zustand
Reindichte ρ_{r}	Masse darrtrocken/ Volumen der reinen Zellwand ohne Hohlräume: für alle Holzarten einheitlich ca. 1500 kg/m ³ (Niemz 1993)

2.3.1 Feuchtebewegungen durch Diffusion

Die Diffusion ist ein Prozess, bei dem Stoffe durch Molekülbewegungen infolge eines Teildruck- bzw. Konzentrationsunterschiedes von einem Teil des Systems zu einem anderen transportiert werden (Crank 1975). Holz besitzt im hygroskopischen Bereich drei unterschiedliche Arten der Diffusion, die Oberflächen-, Wasserdampf- und Lösungsdiffusion, welche in Abbildung 2.7 illustriert sind.

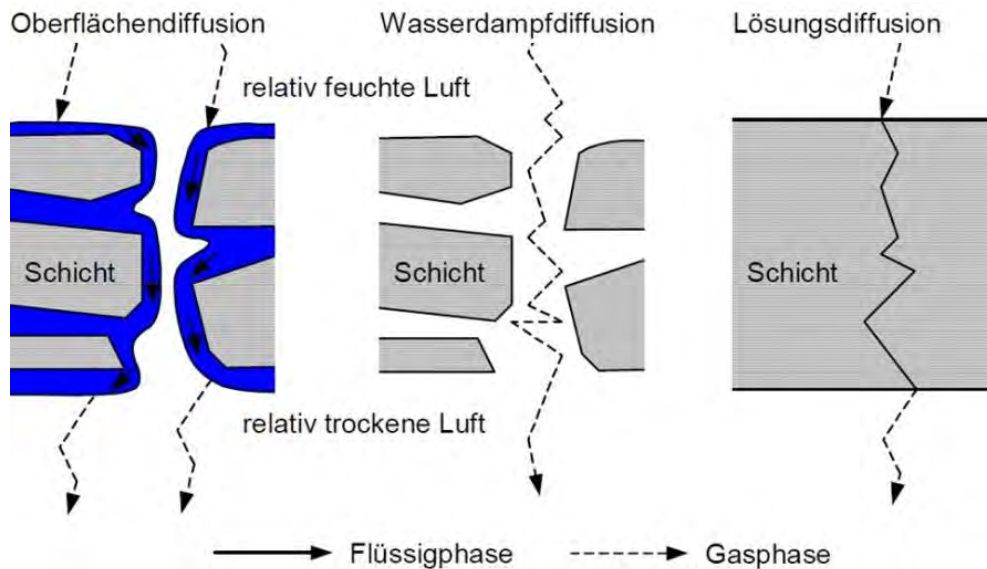


Abbildung 2.7: Gas- und Flüssigkeitsphasenzustände bei Diffusionsvorgängen in Holz (Schmidt 2011)

Der Transport von Feuchtigkeit aufgrund einer Konzentrationsdifferenz einer diffundierenden Flüssigkeit wird als Ficksche Diffusion bezeichnet (Fick 1855). Die mathematische Beschreibung erfolgt im dreidimensionalen Fall unter stationären Bedingungen nach dem ersten Fickschen Gesetz (Gleichung 2.3).

$$J = -D \nabla C \quad (2.3)$$

Dabei ist:

unter der stationären Bedingung, dass $\left(\frac{\partial c}{\partial t} = 0\right)$

J die Diffusionsstromdichte [$\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$]

D der Diffusionskoeffizient [$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$]

∇ Nabla-Operator [-]

C die Konzentration des gelösten Stoffes [mol/l]

wobei:

$$D = \begin{bmatrix} d_x & 0 & 0 \\ 0 & d_y & 0 \\ 0 & 0 & d_z \end{bmatrix}, \text{ und } \nabla C = \begin{bmatrix} \frac{\partial c}{\partial x} \\ \frac{\partial c}{\partial y} \\ \frac{\partial c}{\partial z} \end{bmatrix} \nabla C = \begin{bmatrix} c, x \\ c, y \\ c, z \end{bmatrix}$$



Unter Anlehnung an das erste Ficksche Gesetz gibt es weitere Konzentrationsdifferenzen. Neben der Konzentration und dem Feuchtegehalt können Gradienten auf Potentialen wie dem Wasserdampfpartialdruck basieren, was Siau (Siau 1995) näher beschreibt. Für zeitlich veränderliche Prozesse kann unter Einführung der Kontinuitätsgleichung (Gleichung 2.4), das erste Ficksche Gesetz in das zweite Ficksche Gesetz (Gleichung 2.5) überführt werden.

$$\frac{\partial c}{\partial t} = -\nabla \cdot J \quad (2.4)$$

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \nabla \cdot (D \nabla C) \quad (2.5)$$

Reduziert man das zweite Ficksche Gesetz (Gleichung 2.5) auf den eindimensionalen Fall mit konstanten Diffusionskoeffizienten folgt die Gleichung 2.6.

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \cdot \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \quad (2.6)$$

Dabei ist:

x die Koordinate

Solche Diffusionsprozesse finden bei Holz hauptsächlich unterhalb des Fasersättigungsbereiches statt. Man unterscheidet dabei zwischen Diffusion von gebundenem Wasser durch die Zellwände und dem Transport von Wasserdampf in den Zelllumen (Siau 1995).

Obwohl nach Siau (Siau 1995) der Diffusionskoeffizient nicht konstant, sondern stark von der Holzfeuchtigkeit und der Temperatur abhängig ist, kann nach Vanek und Teischinger (1989) bei isothermen Bedingungen mit dem Fickschen Gesetz eine hinreichend genaue Näherungen des Diffusionsstromes berechnet werden.

Zur Bestimmung der Diffusionskoeffizienten führte Wadsö (Wadsö 1993a, b) Sorptionsmessungen an Fichtenproben in zwei unterschiedlichen Feuchteintervallen durch. Dabei stellte er fest, dass bei höherem Feuchteniveau der Diffusionskoeffizient geringer ist als bei niedriger Feuchte. Ebenso wiesen geringere Dicken einen niedrigeren Diffusionskoeffizienten auf. Dies konnte auch nicht bedingt durch die hohen umgebenen Luftgeschwindigkeiten mit dem Oberflächenadsorptionskoeffizienten begründet werden. Deshalb folgerte er daraus ein „nicht-Ficksches“ Feuchteaufnahmeverhalten und schlägt eine Kombination der zwei Fickschen Gesetze wie folgt vor (Gleichung 2.7).

$$J = -D_c(c, p) \cdot \frac{\partial c}{\partial x} - D_p(p, c) \cdot \frac{\partial p}{\partial x} \quad (2.7)$$

Diese entsprechen der Konzentration (c) und dem Wasserdampfpartialdruck (p) als treibendes Potential.

Dieser Ansatz wird von Frandsen (Frandsen et al. 2007) zu einem „multi-Fickschen“ Feuchtaufnahmeverhalten erweitert (s. Abbildung 2.8) und nach Gleichung 2.8 und Gleichung 2.9 berechnet.

$$\frac{\partial c_b}{\partial t} = \nabla \cdot (D_b \nabla C_b) + \dot{c} \quad (2.8)$$

$$\frac{\partial c_v}{\partial t} = \nabla \cdot (D_v \nabla C_v) + \dot{c} \quad (2.9)$$

Dieser Ansatz beinhaltet eine Sorptionsrate \dot{c} , welche dem Wasser einen theoretischen Übergang zwischen der Dampfphase (v) und der Phase mit gebundenem Wasser (b) ermöglicht.

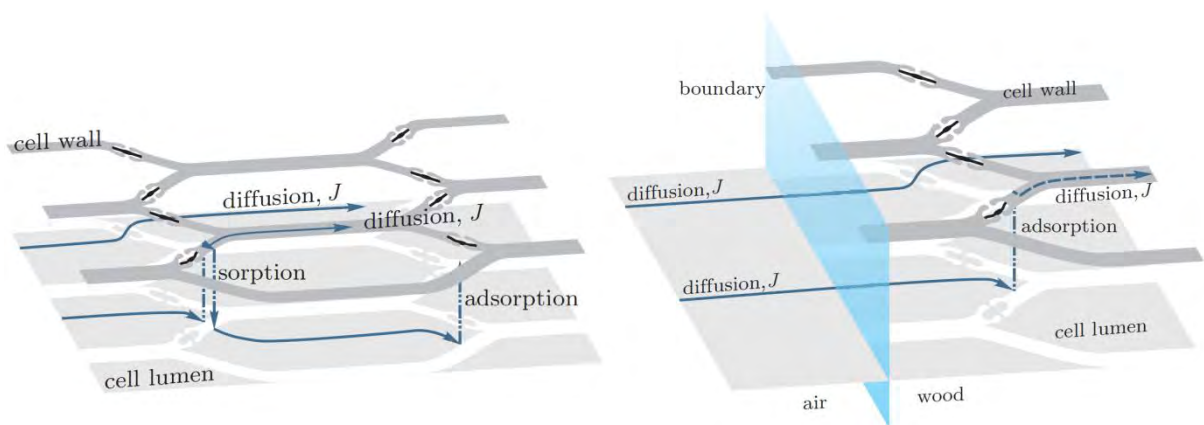
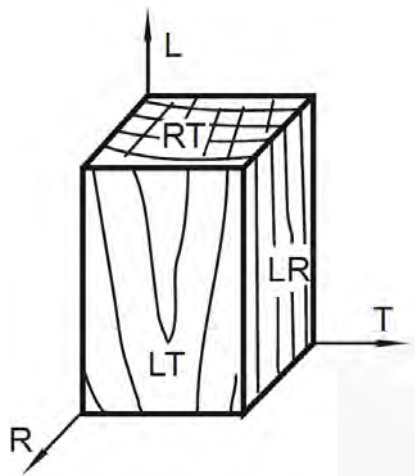


Abbildung 2.8: Multi-Ficksches Feuchtetransportmodell (nach Frandsen et al. 2007)
 links: zeitabhängige Prozesse beim Feuchtetransport durch Zellwände
 rechts: Bewegung von Wasserdampf an der Grenze von Luft zu Holz mit resultierender Sorption und Diffusion von gebundenem Wasser

2.3.2 Quell- und Schwindverhalten

Das Quell- und Schwindverhalten unterscheidet sich, wie nahezu alle Holzeigenschaften, in den drei anatomischen Grundrichtungen des Holzes (Abbildung 2.9).



Grundrichtungen:

L Longitudinal

R Radial

T Tangential

Schnittebenen:

LT Tangentialfläche, Fladerschnitt

RT Querschnitt, Stirn- oder Hirnfläche

RL Radialfläche; Riftschnitt

Abbildung 2.9: Anatomische Grundrichtungen von Holz (Niemz 2003)

Bei der Aufnahme von Feuchtigkeit bis zum Erreichen des Fasersättigungspunktes (FSP) kommt es dabei zu einem Ausdehnen der Zellwand, wodurch ein Quellen stattfindet. Die durch Feuchteabnahme bedingte Volumenkontraktion wird als Schwinden bezeichnet (Niemz 1993). Die Auswirkung dieser richtungsabhängigen Materialeigenschaft ist in Abbildung 2.10 illustriert.

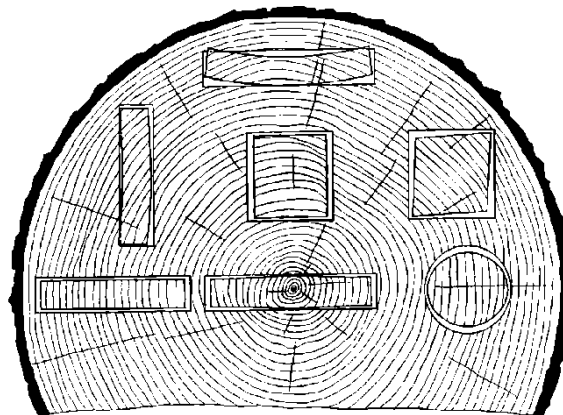


Abbildung 2.10: Charakteristische Schwindung verschiedener Querschnitte in Abhängigkeit von der Querschnittlage (Forest Product Laboratory, Madison, 1999)

Bei den mitteleuropäischen Holzarten beträgt das maximale Schwindmass im Mittel longitudinal 0.3%, radial 5% und tangential 10% (ca. 1:10:20). Holz schwindet beim Trocknen also tangential (parallel zu den Jahresringen) doppelt so stark wie radial (parallel zu den Holzstrahlen).

Zur Beurteilung des Quell- und Schwindverhaltens von Holz werden das Quell- und Schwindmass hinzugezogen. 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).



Maximales Quellmass α_{max}

Die maximale Quellung in einer bestimmten holzanatomischen Richtung bei der maximalen Probenabmessung bezieht sich auf die minimale Masse beim darrtrockenen Zustand und berechnet sich nach Gleichung 2.10.

$$\alpha_{max} = \frac{l_{max} - l_{min}}{l_{min}} \cdot 100 \quad (2.10)$$

Dabei ist:

α_{max} das maximale Quellmass (bei l, r, oder t) [%]

l_{max} die maximale Probenabmessung im nassen Zustand über dem FSP (bei l, r, oder t) [mm]

l_{min} die minimale Probenabmessung im darrtrockenen Zustand (bei l, r, oder t) [mm]

Lineares Quellmass α

Die Massänderung in einer bestimmten holzanatomischen Richtung bei Zunahmen der Holzfeuchte u_1 auf u_2 bezogen auf den darrtrockenen Zustand $u_0 = 0\%$ wird nach Gleichung 2.11 berechnet.

$$\alpha = \frac{l_{\omega 2} - l_{\omega 1}}{l_{min}} \cdot 100 \quad (2.11)$$

Dabei ist:

α das Quellmass (bei l, r, oder t) [%]

$l_{\omega 1}$ die Probenabmessung beim Feuchtegehalt ω_1 (bei l, r, oder t) [mm]

$l_{\omega 2}$ die Probenabmessung beim Feuchtegehalt ω_2 (bei l, r, oder t), wobei $u_2 > u_1$ [mm]

l_{min} die Probenabmessung im darrtrockenen Zustand (bei l, r, oder t) [mm]

Maximales Schwindmass β_{max}

Das maximale Schwindmass in einer bestimmten holzanatomischen Richtung bei der minimalen Probenabmessung bezieht sich auf die maximale Masse beim nassen Zustand und berechnet sich nach Gleichung 2.12.

$$\beta_{max} = \frac{l_{max} - l_{min}}{l_{max}} \cdot 100 \quad (2.12)$$

Dabei ist:

β_{max} das maximale Schwindmass (bei l, r, oder t) [%]

l_{max} die maximale Probenabmessung im nassen Zustand über dem FSP (bei l, r, oder t) [mm]

l_{min} die minimale Probenabmessung im darrtrockenen Zustand (bei l, r, oder t) [mm]

Lineares Schwindmass β

Die Massänderung in einer bestimmten holzanatomischen Richtung bei Abnahme der Holzfeuchte u_1 auf u_2 bezogen auf den nassen Zustand u (über dem Fasersättigungspunkt) wird nach Gleichung 2.13 berechnet.

$$\beta = \frac{l_{\omega 2} - l_{\omega 1}}{l_{max}} \cdot 100 \quad (2.13)$$

Dabei ist:

β das Quellmass (bei l, r, oder t) [%]

$l_{\omega 1}$ die Probenabmessung mit Feuchtegehalt ω_1 (bei l, r, oder t) [mm]

$l_{\omega 2}$ die Probenabmessung mit Feuchtegehalt ω_2 (bei l, r, oder t), wobei $\omega_2 > \omega_1$ [mm]

l_{max} die maximale Probenabmessung im nassen Zustand über dem FSP (bei l, r, oder t) [mm]



Volumenquellmass α_v

Das Volumenquellmass ergibt sich aus den linearen Quellmassen der drei Hauptrichtungen des Holzes und berechnet sich nach Gleichung 2.14.

$$\alpha_v = \frac{(100+\alpha_l) \cdot (100+\alpha_r) \cdot (100+\alpha_t)}{10^4} - 100 \quad (2.14)$$

Dabei ist:

α_v das Volumenquellmass [%]

$\alpha_{l,r,t}$ die linearen Quellmasse in longitudinaler, radialer und tangentialer Richtung [%]

Volumenschwindmass β_v

Das Volumenschwindmass ergibt sich analog zum Volumenquellmass aus den linearen Schwindmassen der drei Hauptrichtungen des Holzes und wird nach Gleichung 2.15 berechnet.

$$\beta_v = \frac{(100+\beta_l) \cdot (100+\beta_r) \cdot (100+\beta_t)}{10^4} - 100 \quad (2.15)$$

Dabei ist:

β_v das Volumenschwindmass [%]

$\beta_{l,r,t}$ die linearen Schwindmasse in l, r, t [%]

Näherungsweise können die Volumenquell- und Schwindmasse auch nach Gleichung 2.16 bzw. 2.17 berechnet werden.

$$\alpha_v \approx \alpha_l + \alpha_r + \alpha_t \quad (2.16)$$

$$\beta_v \approx \beta_l + \beta_r + \beta_t \quad (2.17)$$

Diese Bestimmungen der Quellung und Schwindung werden in DIN 52184 Prüfung von Holz; Bestimmung der Quellung und Schwindung [8] geregelt. Besonders wichtig für die praktische Verwendung sind:

- Das prozentuale Quellmass bezogen auf die Änderung des Feuchtegehaltes des Holzes (differentielle Quellung) und das prozentuale Quellmass bezogen auf die Änderung der relativen Luftfeuchtigkeit (Quellungskoeffizient) und
- die Schwindung des Holzes beim Trocknen von sägefrischem Holz in einer bestimmten holzanatomischen Richtung auf den normalklimatisierten Zustand (Trocknungs-Schwindmass).



Differentielle Quellung q

Die differentielle Quellung ist das prozentuale Quellmass des Holzes je 1% Holzfeuchtigkeitsänderung in dem für die praktische Holzverwendung wichtigen Feuchtklima bei 20°C und $\varphi_F \approx 85\%$ bzw. dem Trockenklima bei 20°C und $\varphi_T \approx 35\%$ und wird nach Gleichung 2.18 berechnet.

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

Dabei ist:

- q die differentielle Quellung [%/%]
- l_F die Probenabmessung bei Ausgleichsfeuchte im Feuchtklima (bei l, r, oder t) [mm]
- l_T die Probenabmessung bei Ausgleichsfeuchte im Trockenklima (bei l, r, oder t) [mm]
- $\omega_F - \omega_T$ die Holzfeuchtedifferenz zwischen Feucht- und Trockenklima [%]
- l_0 die Probenabmessung im darrtrockenen Zustand [mm]

Quellungskoeffizient h

Unter dem Quellungskoeffizienten versteht man das prozentuale Quellmass des Holzes je 1% relativer Luftfeuchtigkeitsveränderung in dem für die praktische Holzverwendung wichtigen Feuchtklima bei 20°C und $\varphi_F \approx 85\%$ bzw. dem Trockenklima bei 20°C und $\varphi_T \approx 35\%$, berechnet sich nach Gleichung 2.19.

$$h = \frac{l_F - l_T}{l_0 \cdot (\varphi_F - \varphi_T)} \cdot 100 \quad (2.19)$$

Dabei ist:

- h der Quellungskoeffizient [%/%]
- l_F die Probenabmessung bei Ausgleichsfeuchte im Feuchtklima (bei l, r, oder t) [mm]
- l_T die Probenabmessung bei Ausgleichsfeuchte im Trockenklima (bei l, r, oder t) [mm]
- $\varphi_F - \varphi_T$ die Differenz zwischen Feucht- und Trockenklima [%]
- l_0 die Probenabmessung im darrtrockenen Zustand [mm]

Trocknung-Schwindmass β_N

Die Trocknungs-Schwindmasse gelten als Sonderfall der linearen Schwindmasse, weil sie sich bei der Trocknung vom nassen Zustand des Holzes auf den normalklimatisierten Zustand bei 20°C und $\varphi 65\%$ ergeben. Berechnet werden sie nach Gleichung 2.20.

$$\beta_N = \frac{l_W - l_N}{l_N} \cdot 100 \quad (2.20)$$

Dabei ist:

- β_N das Trocknungs-Schwindmass (bei l, r, oder t) [%]
- l_W die Probenabmessung des nassen Holzes über der Fasersättigung (bei l, r, oder t) [mm]
- l_N die Probenabmessung im Normalklima (bei l, r, oder t) [mm]

Tabelle 2.2 zeigt die maximalen- und differentiellen Quellmasse verschiedener Holzarten. Longitudinal wird das differentielle Quellmass in der Praxis vernachlässigt.

Tabelle 2.2: Maximales- und differentielles Quellmass verschiedener Holzarten (nach DIN 52184 [8])

Holzart	maximales Quellmass α_{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

2.4 Werkstoffe aus Holz

Das Ziel bei der Herstellung von Werkstoffen ist den Werkstoff Holz zu homogenisieren, und die Anisotropie, also die richtungsabhängigen Eigenschaften wie z.B. das Quellen und Schwinden, zu reduzieren. Werkstoffe aus Holz werden im Allgemeinen über die Art und Weise des Holzaufschlusses definiert und benannt (Abbildung 2.11).

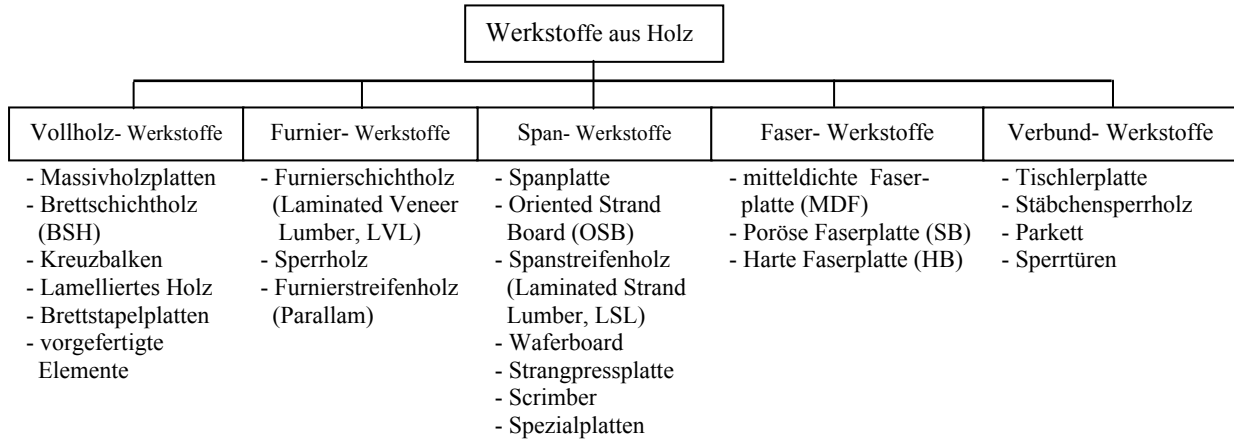


Abbildung 2.11: Einteilung der Holzwerkstoffe (Niemz 2010)

Vollholz-Werkstoffe bestehen aus zusammengefügteten Massivholzteilen in Form von Leisten, Brettern oder Balken. Furnier- Werkstoffe sind aus verleimten Furnierwaren, welche geschnitten oder materialsparend geschält oder gemessert werden können, hergestellt. Bei Span- und Faserwerkstoffen ist die eigentliche Struktur des Holzes kaum mehr erkennbar. Für Holzwerkstoffe auf Spanbasis wird Holz mittels Hackern und Zerspanern zu Spänen verkleinert. Anschliessend werden die Späne beleimt, maschinell geschichtet, gepresst, besäumt und zuletzt geschliffen. Faserplatten sind aus Holzfasern oder anderen ligno- zellulosehaltigen Fasern hergestellte Platten, deren Bindung in erster Linie auf Verfilzung der Fasern und der eigenen Bindungskräfte beruht (Lampert 1966). Der Faseraufschluss erfolgt mittels Refinern. Als Rohstoff werden meist Hackschnitzel aus grösstenteils Nadel- aber auch vermehrt Laubholz hergestellt und im Nass- oder Trockenverfahren aufbereitet (s. Kap. 2.6).

Die Anforderung an die Holzqualität ist bei den verschiedenen Holzwerkstoffen sehr differenziert. Allgemein nimmt die Anforderung mit steigendem Aufschlussgrad ab. Span- und Faser-Werkstoffe können aus Resten der Holzbe- und verarbeitung aber auch aus Altholz hergestellt werden. Abbildung 2.12 macht den Einfluss der Strukturauflösung vom Schnittholz bis zur Faserplatte auf die Eigenschaften von Holz-Werkstoffen deutlich.

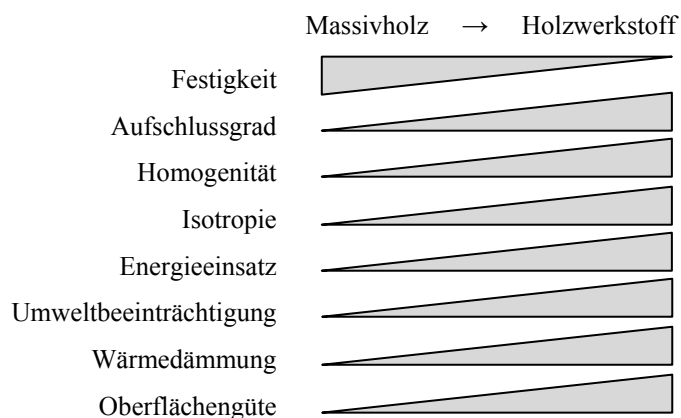


Abbildung 2.12: Einfluss der Strukturauflösung bei Holz-Werkstoffen (Niemz 2010)

2.5 Einteilung der Dämmstoffe

Dämmstoffe aus Holz zählen zu den Faser-Werkstoffen und werden allgemein als poröse Weichfaserplatten bezeichnet. Nach SIA 279 [15] können Dämmmaterialien lose oder in Form von Filzen, Matten oder Platten und mit verschiedenen Oberflächenbehandlungen hergestellt werden. Abbildung 2.13 zeigt eine Gliederung nach organischen und anorganischen Rohstoffen, welche natürlich vorkommen oder synthetisch hergestellt werden. Nach DIN 4108-4 Wärmeschutz und Energieeinsparung in Gebäuden [1] dürfen Baustoffe mit einer Wärmeleitfähigkeit von kleiner gleich $0.1 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ als Wärmedämmstoff bezeichnet werden.

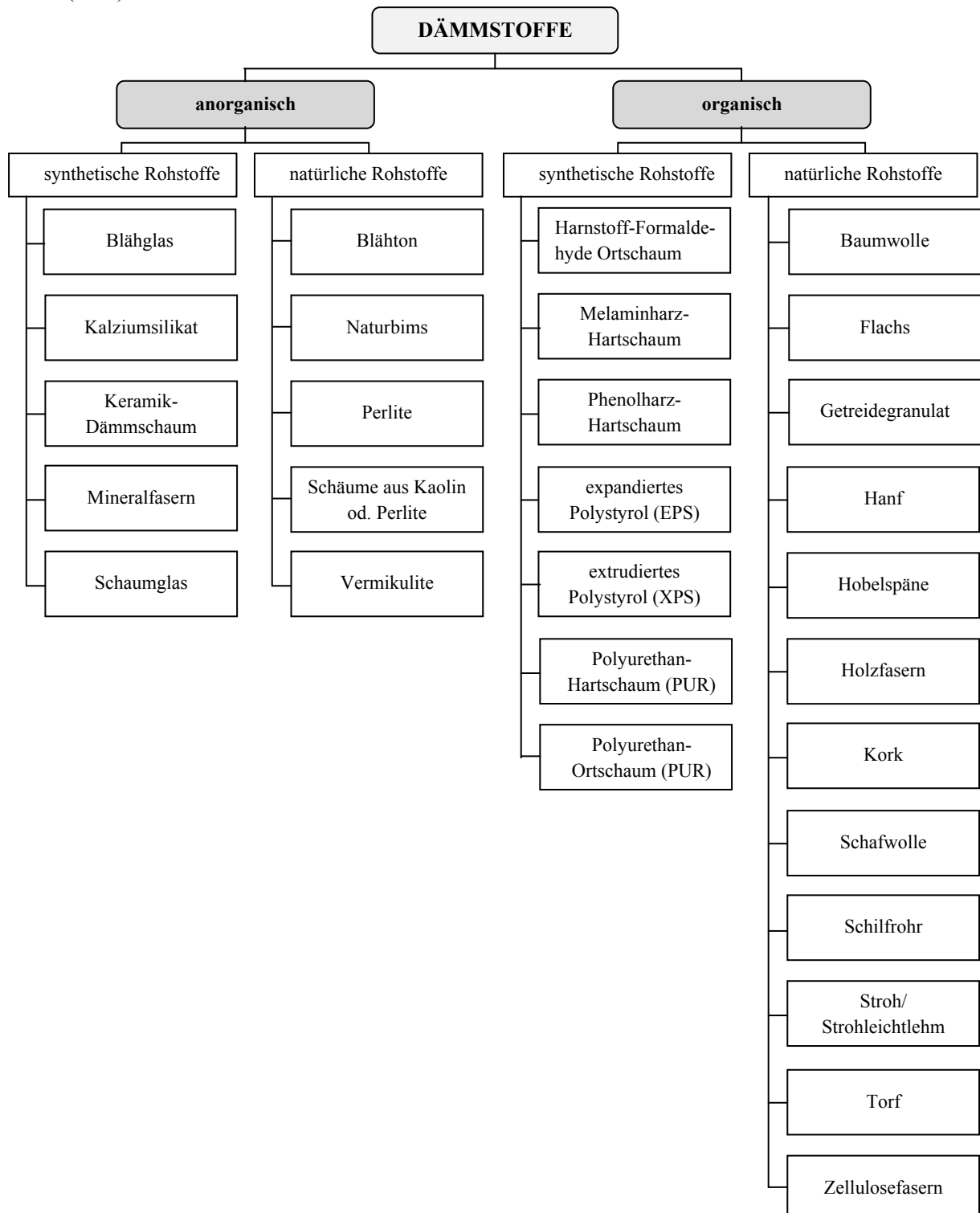


Abbildung 2.13: Dämmstoffarten nach Rohstoffen unterteilt (nach Reyer 2002)

Neben der Einteilung nach Rohstoffen können Dämmmaterialien auch in porige Dämmstoffe und Faserdämmstoffe unterteilt werden. Die gängigen porigen Dämmstoffe sind z.B. Bläherlit, Blähton, Schaumglas, Keramikglas und die verschiedenen aufgeschäumten Materialien, aber auch Kork als natürlicher, poriger Dämmstoff. Bei Faserdämmstoffen wird, wie Abbildung 2.14 zeigt, anhand der Herkunft der verwendeten Fasern unterteilt.

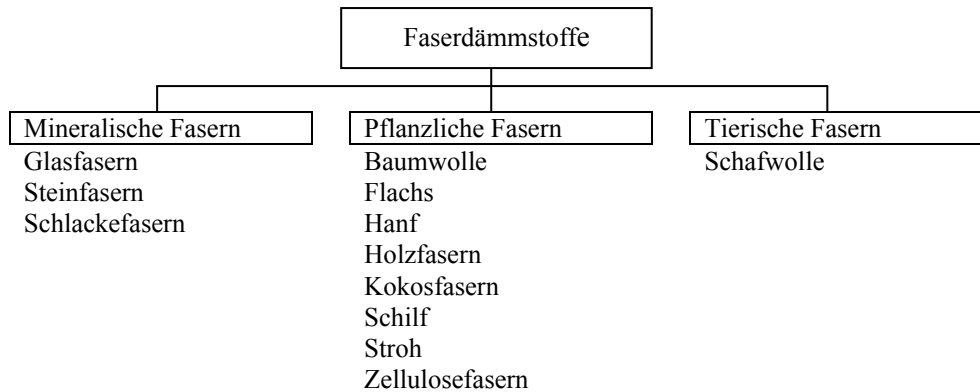


Abbildung 2.14: Einteilung der Faserdämmstoffe (nach Sörensen 2000)

Im Hintergrund steigender Energiekosten und steigender Klimaschutzverpflichtung ist in den letzten Jahren die Nachfrage nach ökologischen, nachwachsenden Rohstoffen im Bauwesen deutlich gestiegen. Der Einsatz von nachwachsenden Rohstoffen unterstützt nicht nur den Wunsch ressourcenschonend zu bauen, sondern eröffnet weitere Vorteile gegenüber den herkömmlichen Materialien. Den Vorteilen, besonders bei Dämmstoffen auf Holzfaserbasis, wie eine sehr gute CO₂-Bilanz, VOC freies Raumklima, sowie das einfache Recycling, stehen ein in der Regel der etwas höhere Preis, aber auch häufig ungenügende Informationen und Erfahrungen gegenüber.

Um aus pflanzlichen Fasern Faserdämmstoffe herzustellen sind an den Faserstoff qualitativ bestimmte Forderungen zu stellen, welche hauptsächlich von folgenden Faktoren abhängen:

- dem technisch brauchbaren Faseranteil der Gesamtmasse als Festigkeitsbildner
- der geometrischen Struktur der Zellelemente und der Fasern
- der nach der Zerfaserung erreichten Oberfläche der Fasern nach Grösse und Beschaffenheit
- dem chemischen Aufbau der Zellelemente und der Fasern

Der Anteil der technisch nutzbaren Fasern ist bei verschiedenen Pflanzengattungen sehr unterschiedlich. Der Faseranteil bei Nadelholz liegt mit 90-95% sehr hoch, bei Laubholz ist der Faseranteil mit durchschnittlich 66% bereits viel geringer. Bei anderen ligno-zellulosehaltigen Rohstoffen, wie bei Einjahrespflanzen liegt der Faseranteil bei deutlich tieferen 25%. Die Geometrische Struktur der Faser, die Beschaffenheit nach der Zerfaserung und der chemische Aufbau haben einen entscheidenden Einfluss auf die Herstellung und können je nach Herstellverfahren unterschiedliche Anforderungen der Faserdämmstoffe stellen (Lampert 1966).



Dämmstoffe, ob organisch, anorganisch, synthetisch hergestellt oder natürlich vorhanden, porig oder aus Fasern, haben mehr oder weniger immer dieselbe Funktion.

Sie werden als Wärmeschutz eingesetzt, um die thermische Behaglichkeit für den Menschen im Sommer und im Winter zu gewährleisten. Dies betrifft vor allem die Gebäudehülle wie das Dach, die Aussenwände und die Bodenplatte, aber auch Decken, Böden und Innenwände gegen unbeheizte Räume. Bei der Dämmung zwischen beheizten Geschossen oder Räumen übernimmt die Dämmschicht aber auch eine Tritt- und Schallschutzfunktion.

Je nach Konstruktion kann sich die Dämmschicht ausserhalb, dazwischen oder innerhalb der tragenden Konstruktion befinden. Ausserhalb in Form einer Fassaden- oder Aufsparrendämmung, dazwischen als Kern- oder Zwischensparrendämmung und innerhalb als vollflächige Innen- oder Untersparrendämmung. Tabelle 2.3 zeigt eine Übersicht von geeigneten Dämmmaterialien je nach Einsatzort.

Tabelle 2.3: Anwendungsbereich für Dämmstoffe (nach Scheiding 1998)

Einsatzort	Aufgabe	Geeignete Dämmstoffe
Dach	Zwischensparrendämmung Aufsparrendämmung	Platten aus Faserdämmstoffen (inklusive Holzfaserdämmstoffe) Schüttungen, Platten aus Mineralwolle, EPS ¹ , PUR ³
Aussenwand	Wärmedämmung Schalldämmung	Schaum- oder Faserdämmplatten (inklusive Holzfaserdämmstoffe) Holzwollleichtplatten Schüttungen, Platten aus KMF ² , EPS ¹ , oder XPS ⁴
Innenwand	Wärmedämmung gegen unbeheizte Räume (z.B. Treppenhaus) Schalldämmung	Platten aus Faserdämmstoffen (inklusive Holzfaserdämmstoffe) Zelluloseschüttungen (eingeblassen)
Geschossdecke	Wärmedämmung Schall- und Trittschalldämmung	Platten aus Faser- und Schaumdämmstoffen (inklusive Holzfaserdämmstoffe) Schüttungen
Kellerwand (aussen)	Drainage, Wärmedämmung gegen Erdreich	EPS ¹ - Granulatplatten, XPS ⁴ , Schaumglas
Abkürzungen		
¹ EPS	Expandiertes Polystyrol	
² KMF	Künstliche Mineralfasern	
³ PUR	Polyurethan-Hartschaum	
⁴ XPS	Extrudiertes Polystyrol	



2.6 Herstellverfahren der Faserplatten

Die technische Entwicklung der Faserplattenherstellung lässt sich auf die Herstellung von Papier zurückzuführen, welche in Japan bereits seit dem sechsten Jahrhundert v. Chr. datiert ist. Damals sind die dickeren Papiersorten bereits als Wandverkleidung eingesetzt worden.

Die eigentliche Faserplattenindustrie entstand im 20. Jahrhundert. 1926 gründet W.H. Mason in den USA die Masonite Corporation, die einen massgeblichen Teil der industriellen Entwicklung zur Holzfaserplattenherstellung beigetragen hat (Kollmann 1955). Die Entwicklung der Mason-Kanone ermöglichte die Aufbereitung von Hackschnitzeln zu Fasern, Faserbündeln und Faserbruchstücken. Durch anschliessendes Heisspressen ohne Bindemittelzusätze sind so die ersten hochwertigen Faserplatten produziert worden. 1931 wurde die kontinuierliche Zerkleinerung oder Defibrung von Hackschnitzeln unter Dampf und Druck bei 170 bis 175°C vom Schweden Arne Apslund entwickelt und in einem industriellen Prozess verwirklicht (Paulitsch 1989).

Das Zerkleinern von Holz oder anderen ligno-zellulosehaltigen Rohstoffen ist bis heute das eigentliche Kernstück der Faserplattentechnologie.

Bei der Herstellung wird hauptsächlich zwischen Nass- und Trockenverfahren unterschieden. Seltener findet auch das Halbtrockenverfahren Anwendung.

Mit diesen Verfahren können durch Pressen Faserplatten mit verschiedenen Rohdichten hergestellt werden, welche nach DIN 52350 [9] wie folgt einzuteilen sind (Tabelle 2.4):

Tabelle 2.4: Einteilung Faserplatten nach Rohdichten	
Bezeichnung	Rohdichte [kg/m ³]
hochporöse Faserplatten	bis 180
poröse Faserplatten	180-400
halbharte Faserplatten	400-850
harte Faserplatten	über 850

Der Prozess der Zerkleinerung erfolgt bei allen Herstellverfahren nach den gleichen Grundprinzipien. Der kennzeichnende Unterschied ist der Feuchtigkeitsgehalt der Fasern vor und nach der Vliesbildung. Die Faserfeuchtigkeit der einzelnen Herstellverfahren wird wie folgt angegeben werden:

- Nassverfahren 100% und mehr
- Trockenverfahren 5 bis 10%
- (Halbtrockenverfahren) 12 bis 45%

Des Weiteren unterscheiden sich diese Verfahren durch das Transportmedium mit dem die Fasern während der Vliesbildung befördert werden sowie in der Beigabe von Zusatzstoffen und Bindemitteln in Art und Menge (Lampert 1966).

Im folgenden Kapitel wird hauptsächlich die Herstellung von porösen und hochporösen Faserplatten mit einer Rohdichte bis 400 kg/m³ betrachtet.

2.6.1 Zerkleinerung

Der technisch brauchbare Faseranteil definiert sich über den Anteil an Festigkeitsgewebe, welches bei Nadelholz in Form von Spätholztracheiden und bei Laubholz aus Libriformfasern besteht. Die übrigen Zellelemente, wie Parenchymzellen und Gefäße dienen der Herstellung als Füllstoffe. Diese Zellelemente sind bei jedem ligno-zellulosehaltigen Rohstoff vorhanden und können sich bei einem zu hohen Anteil ungünstig auf die Eigenschaften des Endproduktes auswirken (Lampert 1966).

Zur industriellen Aufbereitung des Faserrohstoffes mit einem einwandfreien Faseraufschluss ist eine Zerkleinerung in Hackschnitzel erforderlich. Den Hackschnitzeln werden Fremdpartikel mittels Rüttelsieben und Magneten entzogen. Danach erfolgt eine hydrothermische Vorbehandlung, welche das Lignin erweicht und den mechanischen Aufschluss des Holzgefüges erleichtert. Das Lignin hält als Kittsubstanz den Zellverbund zusammen und ist als verhärtetes Polymer für die Druckfestigkeit des Holzes verantwortlich.

Die Defibrierung in Fasern und Faserbündel erfolgt in Zerkleinerungsaggregaten, den sogenannten Refinern (vergl. Abbildung 2.17). Diese Mühlen verarbeiten die Hackschnitzel zu einem gleichmässigen Faserbrei. Dabei ist darauf zu achten, dass der Faseraufschluss möglichst schonend erfolgt und keine wesentlichen Faserverkürzungen mit sich zieht. Für einen optimalen Aufschluss der Fasern, sind für Laub- und Nadelholz spezielle Mahlscheiben entwickelt worden (Abbildung 2.18). Die Streudichte der Fasern beträgt je nach Aufschlussgrad 15-30 kg/m³ (Dunky, Niemz 2002).

In der Praxis wird für die thermo-mechanische Zerkleinerung meist das Defibratorverfahren eingesetzt (Abbildung 2.15).

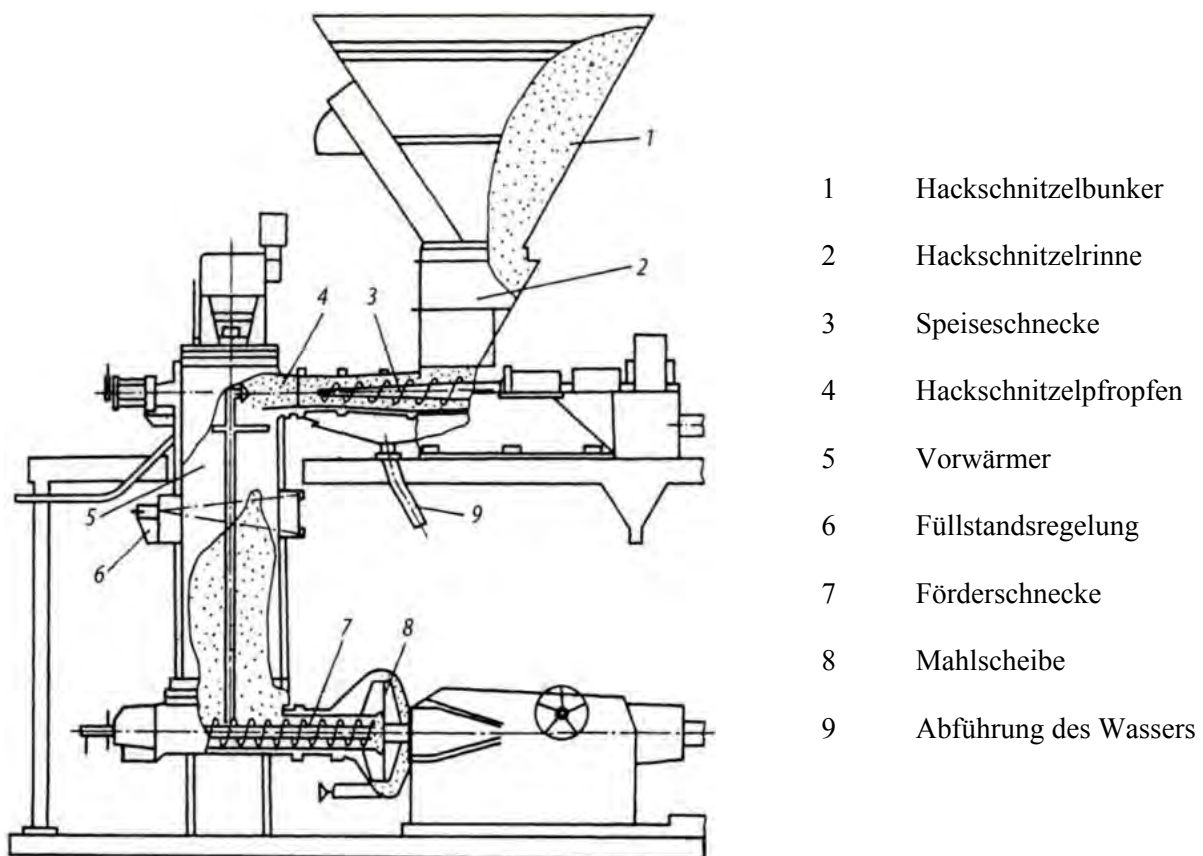


Abbildung 2.15: Defibrator (Dunky, Niemz 2002)

Beim Defibratorverfahren unterscheidet man folgende Bauarten von Refinern:

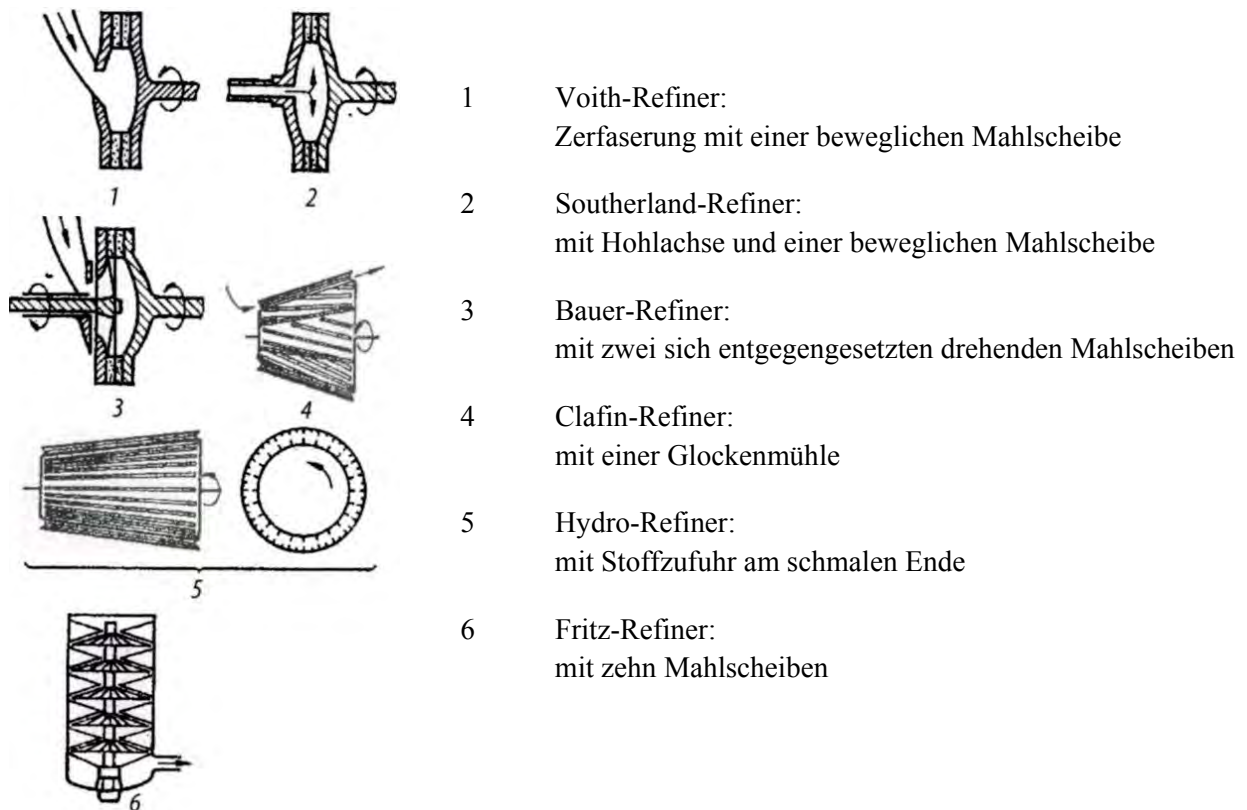


Abbildung 2.16: Verschiedene Zerkleinerungsaggregate (Lexikon der Holztechnik 1990)

Als Weiterentwicklung der Refiner mit einer beweglichen Mahlscheibe gilt, der meist verwendete, Bauer-Refiner mit zwei sich entgegengesetzt drehenden Mahlscheiben, welcher in Abbildung 2.17 detailliert dargestellt ist.

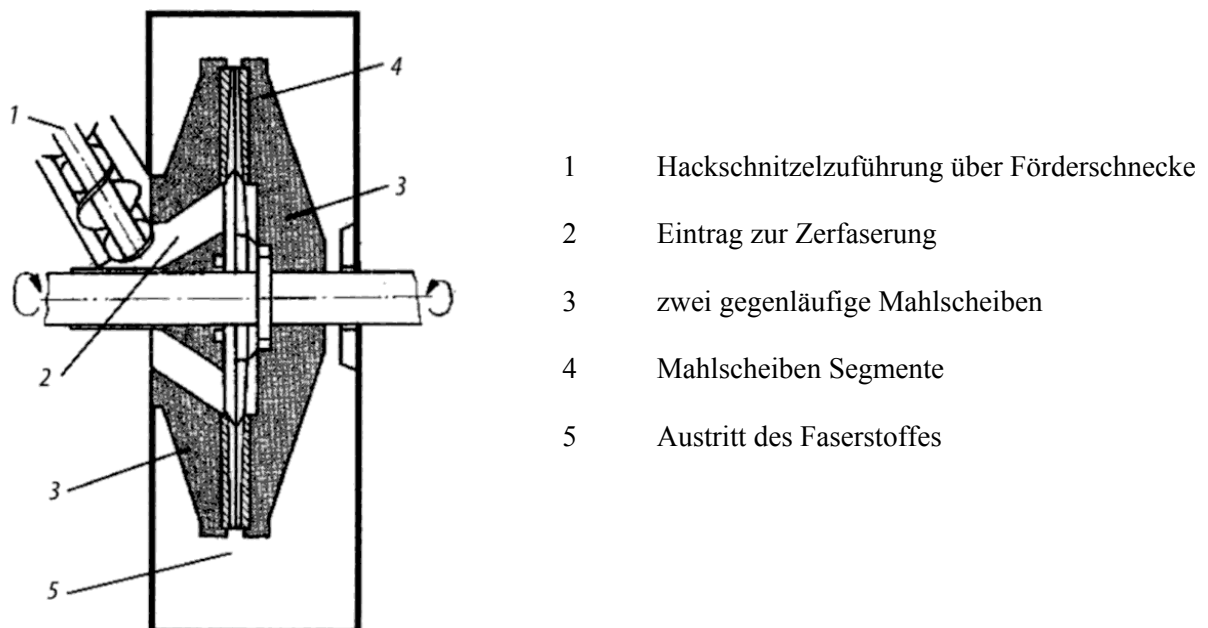
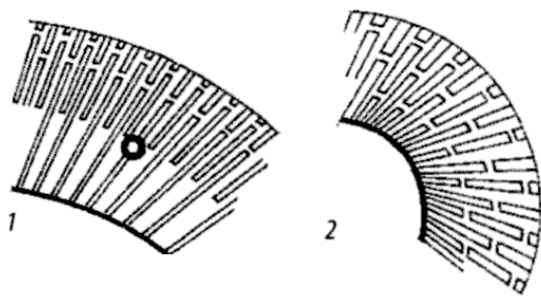


Abbildung 2.17: Bauer- Refiner (Lexikon der Holztechnik 1990)

Unterschiedlich segmentierte Mahlscheiben für Nadel- und Laubholz:



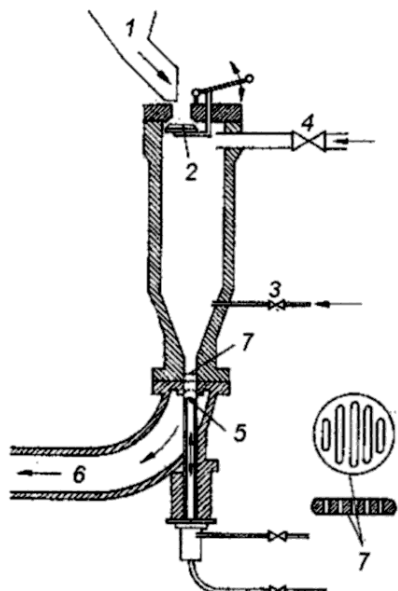
- 1 Mahlscheibe für Nadelholz
- 2 Mahlscheibe für Laubholz

Abbildung 2.18: Verschiedene Mahlscheiben (Lexikon der Holztechnik 1990)

Beim Defibratorverfahren hängt die Faserstoffqualität wesentlich von den folgenden Einflussgrößen ab (Dunky, Niemz 2002):

- Zeit und Dampfdruck im Vorwärmer
- Zerfaserungsdruck
- Abstand der Mahlscheiben
- Drehzahl und Zustand der Mahlscheiben
- Rohstoffart und Rohstofffeuchte

Das Masonite- oder Dampfexplosionsverfahren (Abbildung 2.19) erreicht den Faseraufschluss nicht durch mechanische Einwirkung, sondern über eine spontane Druckentlastung. Durch plötzliches Öffnen des Schnellschlussventils entspannt sich der aufgebaute Überdruck explosionsartig und zerreißt die zugeführten Hackspäne in eine moosartige Masse aus langen Faserbündeln und Fasern. Dabei hat die Randreibung der geschlitzten Ventilplatte einen wesentlichen Einfluss auf die Zerfaserung (Kollman 1955). Durch die Entwicklung der hydro-mechanischen Verfahren hat dieses Verfahren jedoch an Bedeutung verloren.



- 1 Hackschnitzelzuführung
- 2 Einlassventil
- 3 Dampfventil
- 4 Hochdruckdampfventil
- 5 hydraulisch gesteuertes Schnellschlussventil
- 6 Faserstofftransportleitung
- 7 geschlitzte Ventilplatte

Abbildung 2.19: Masonite- Verfahren (Lexikon der Holztechnik 1990)

Neben den genannten Verfahren gibt es noch Verfahren des chemischen Holzaufschlusses, wie z.B. das Biffar-Verfahren oder das Sulfit-verfahren, auf die wegen ihrer geringen Bedeutung aber nicht weiter eingegangen wird.

2.6.2 Nassverfahren

Beim Nassverfahren werden die Fasern nach der Zerkleinerung in dem Transportmedium Wasser bei 30-60°C zu einem Faserbrei auf eine Stoffkonzentration von 0.8...-1.5-...2.5% aufgeschwemmt. Die Faservliesbildung erfolgt durch eine kontinuierliche Sedimentation der Fasern aus der Suspension auf ein umlaufendes Siebband. Bei diesem Vorgang wird der Faserbrei durch freies Abfließen des Wassers und oder Abpressen mit Walzen entwässert. Dabei wird der Feuchtegehalt von 100% und mehr auf 35-50% gesenkt und die Rohdichte bestimmt. Die Geschwindigkeit der Entwässerung wird entscheidend vom Mahlgrad der Fasern beeinflusst.

Bei der Vliesbildung im Nassverfahren strebt man eine starke Fibrillierung und damit eine Verfilzung der Fasern an. Fasern aus Nadelholz weisen einen deutlich höheren Schlankeitsgrad (Verhältnis von Länge : Dicke) auf als Fasern Laubholz, sie sind deutlich länger und somit besser geeignet für das Nassverfahren als Laubholzfaser. Der entwässerte Faserkuchen wird nach der Vliesbildung in Mehretagen- oder Einbahntrocknern bei 150-170°C (max. 250°C) auf 1-4% Feuchtegehalt getrocknet. Dabei werden die holzeigenen Bindungskräfte aktiviert und die evtl. beigemischten Klebstoffe ausgehärtet (Dunky, Niemz 2002).

Abbildung 2.20 zeigt den industriellen Fertigungsablauf von Faserdämmplatten im Nassverfahren.

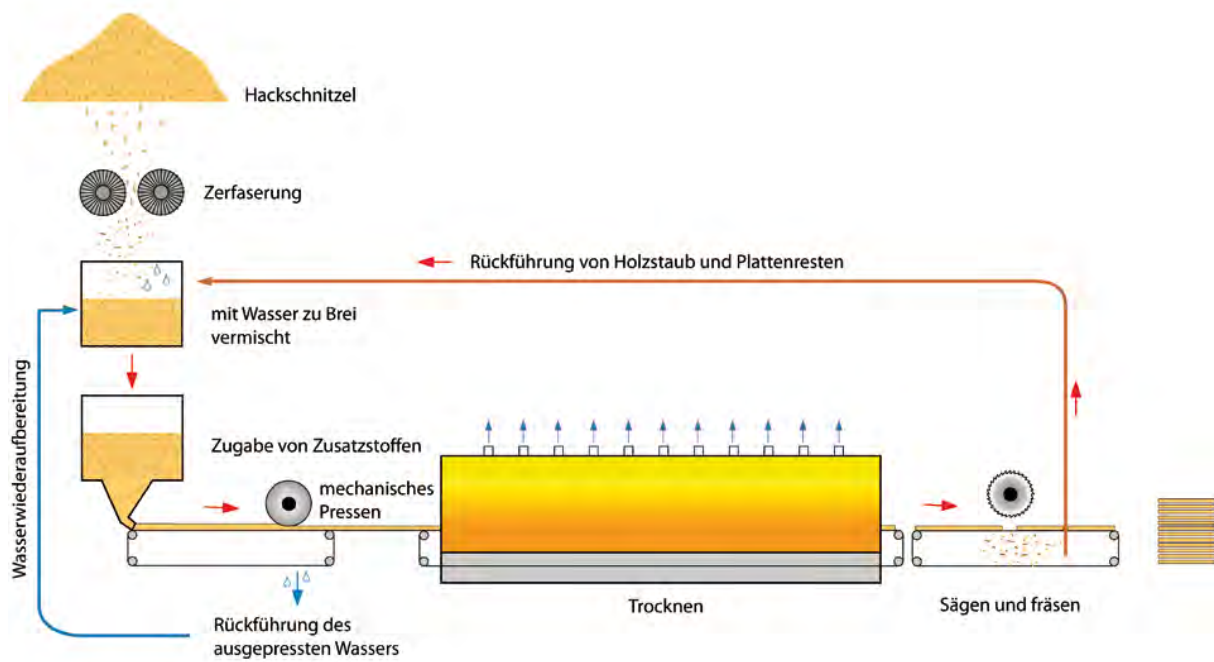


Abbildung 2.20: Nassverfahren (Gutex Planungs-CD)

Die Produktion harter Faserplatten die im Nassverfahren produziert werden ist stark rückläufig. Heute werden im Nassverfahren zunehmend Spezialprodukte, die diffusionsoffen, oder diffusionsdicht und meist mehrlagig verklebt sind, hergestellt. Dabei gewinnen Faserplatten niedriger Dichte im Rahmen der Verwendung ökologischer Baustoffe zunehmend an Bedeutung.

Abbildung 2.21 zeigt, dass sich der Fertigungsablauf von Hart- und Dämmfaserplatten bis zur Vliesbildung nicht wesentlich unterscheidet. Die Hartfaserplatten werden im Gegensatz zu den Faserdämmplatten nach dem Entwässern mittels Heisspressen noch weiter verdichtet und gepresst.

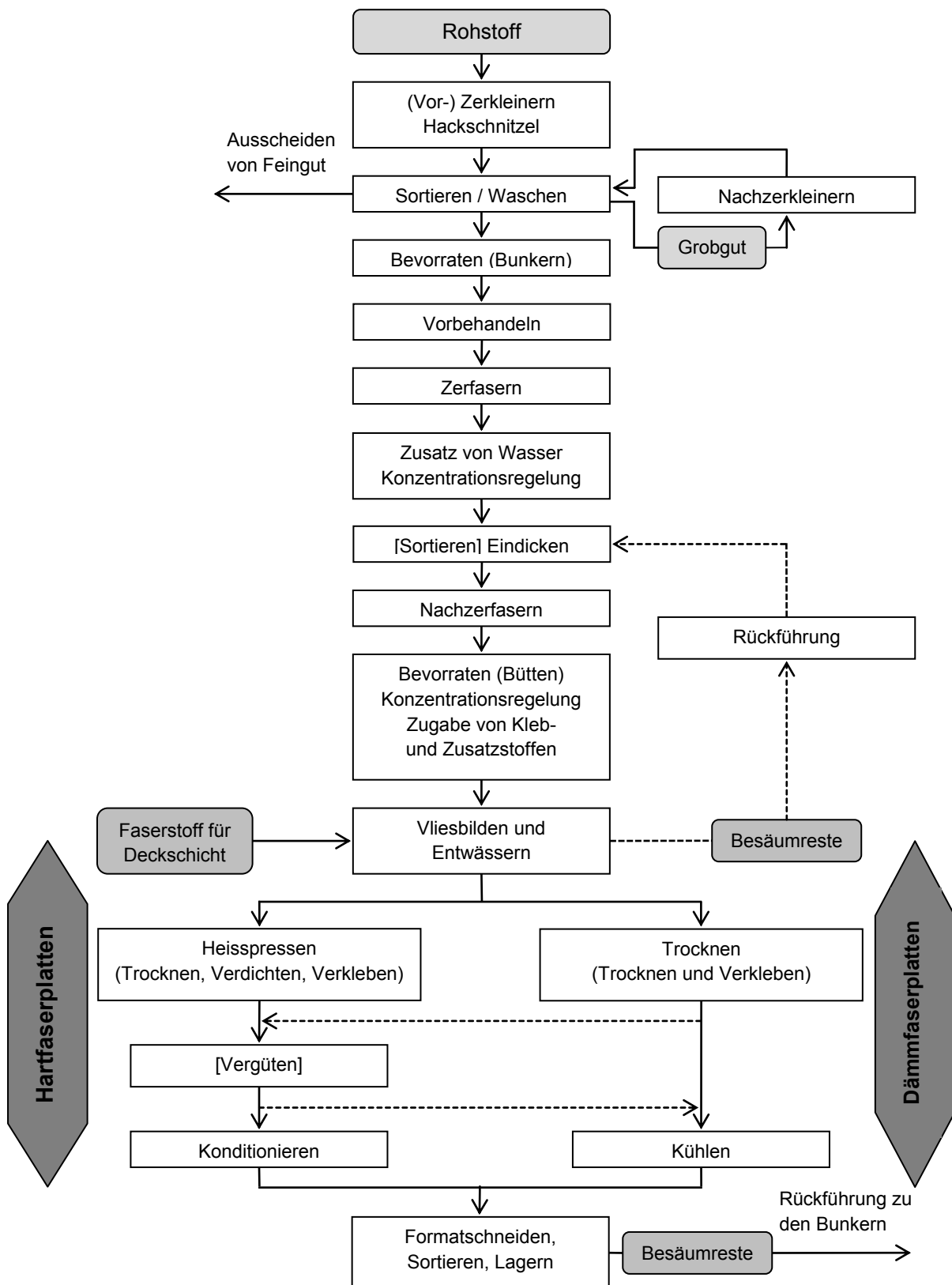


Abbildung 2.21: Herstellung von Faserplatten im Nassverfahren (nach Dunky, Niemz 2002)

2.6.3 Trockenverfahren

Das Trockenverfahren erfolgt nach der Zerfaserung in einem gasförmigen Transportmedium bei einem deutlich tieferen Feuchtegehalt (5-10%) der Fasern als beim Nassverfahren. Das Prinzip des Verfahrens besteht darin, dass nach der Zerfaserung Klebstoff dem sich mit einer Geschwindigkeit von 150-500 m/s bewegenden Faserstrom, zugeführt wird. Diese Beleimung erfolgt meist im Blowline-System (Blasleitungs-Beleimung). Der Faserstoff wird nach der Zerfaserung in die Blasleitung eingebracht und dann mit Leim besprüht, der sich aufgrund der hohen Turbulenzen gleichmässig auf die 100-110°C heissen Fasern verteilt. Anschliessend werden die Fasern und Faserbündel mit Ein- oder meist Zweistufentrocknern auf einen Feuchtegehalt von 5-10% getrocknet (Dunky, Niemz 2002). Abbildung 2.22 zeigt verschiedene Bauformen der Leimflottenzufuhr von Blasleitungen. Durch Verringerung des Rohrquerschnittes an der Eindüesestelle kann die Geschwindigkeit des Faserstoffes weiter erhöht werden.

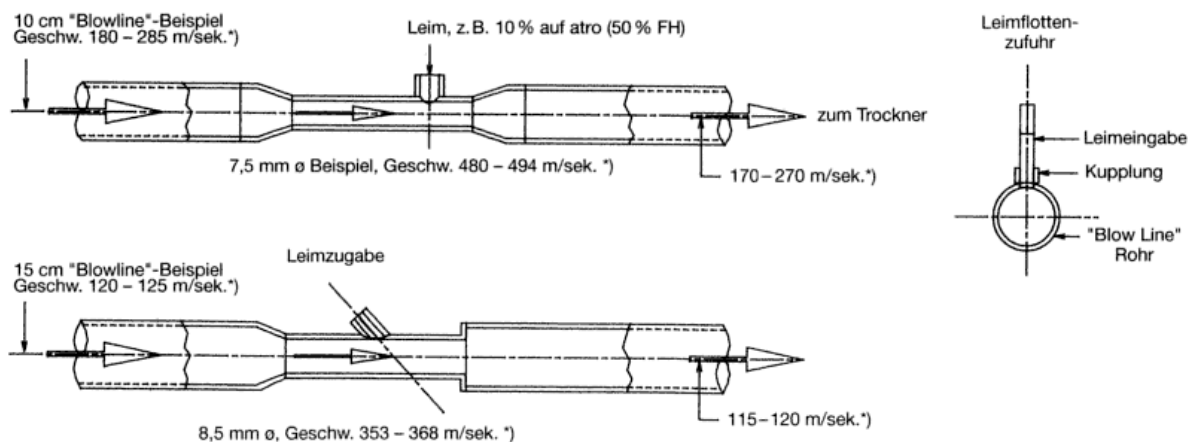
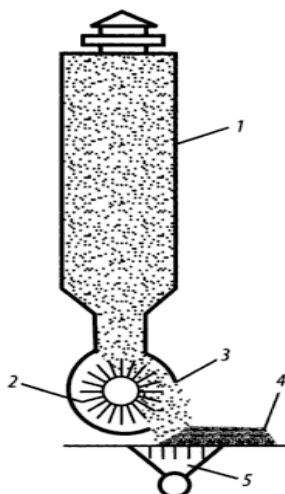


Abbildung 2.22: Blowline- Systeme (Dunky, Niemz 2002)

Für die Beleimung während der pneumatischen Förderung, sind die kurzen und schwereren Laubholzfasern für das Trockenverfahren besser geeignet als die längeren Nadelholzfasern. Die Vliesbildung erfolgt heute durch mechanische Streuung der beleimten Fasern. Ein bekanntes und viel verwendetes Verfahren ist das Felter-System (s. Abbildung 2.23).



- 1 Felterschacht zum Verteilen des Faserstoffes
- 2 Bürstenwalze
- 3 Metallsieb
- 4 Faservlies
- 5 Absaugung

Abbildung 2.23: Felter-System (Dunky, Niemz 2002)

Abbildung 2.24 zeigt den Fertigungsablauf von Dämmfaserplatten im Trockenverfahren. Hier werden die Fasern nach der Zerkleinerung direkt in einen Stromtrockner geblasen und in einem warmen Luftstrom pneumatisch transportiert und getrocknet. Im Zyklon werden die Fasern vom Luftgemisch getrennt, bevorratet und anschliessend auf ein Transportband gestreut. Die Beleimung erfolgt in einem Beleimungsturm. Ähnlich wie beim Felter-System, verteilt eine Streumaschine die Fasern auf ein umlaufendes Siebband. Dort wird das Faservlies mit einer Aushärteeinheit ein Dampf-/Luftgemisch durch das Faservlies gesaugt (z.B. System ContTherm der Firma Siempelkamp), damit das PUR-Harz reagieren und aushärten kann.

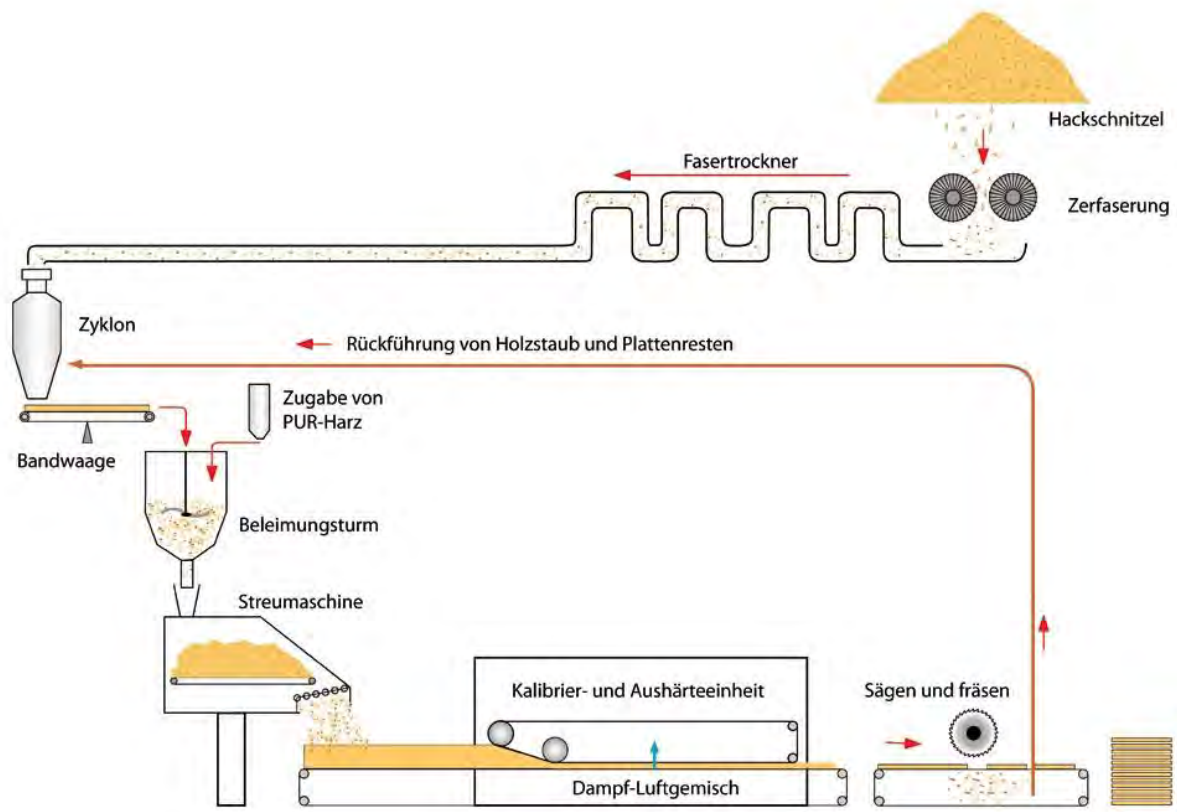


Abbildung 2.24: Trockenverfahren (Gutex Planungs-CD)

In diesem Verfahren können homogene Dämmplatten bis zu einer Dicke von 200 mm hergestellt werden. Der anfallende Fräs- und Sägestaub kann, ähnlich dem Nassverfahren, wieder in den Produktionsablauf eingebracht werden.



2.6.4 Inhaltsstoffe, Zusatzstoffe

Folgende Stoffe werden bei der Faserplattenherstellung zugesetzt:

- Klebstoffe
- Hydrophobierungsmittel sowie wahlweise
- Holzschutzmittel (Fungizide, Insektizide)
- feuerhemmende Zusatzstoffe

Klebstoffe setzen sich allgemein zusammen aus:

- Flüchtigen Stoffen (Lösungsmittel, Dispersionsmittel, Verdünnungsmittel)
- Nichtflüchtigen Bestandteilen (Bindemittel, Pigmente, Füllstoffe, Streckmittel, Hilfsstoffe wie Härter, Beschleuniger, Verzögerer)

Klebstoffe werden im Nass- und Trockenverfahren eingesetzt. Beim Nassverfahren kann infolge der Aktivierung holzeigener Bindungskräfte auf Klebstoffe verzichtet, oder mit nur sehr geringem Zusatz von meist Phenolharz (Anteil von ca. 1-3%) gearbeitet werden. Beim Trockenverfahren wird in der Regel Harnstoffharz als Klebstoff eingesetzt. Teilweise kommen auch Melamin- oder Phenolharze und Isocyanate zum Einsatz. Als Härter dient meist Ammoniumsulfat (Dunky, Niemz 2002).

Im Nassverfahren hergestellte Platten werden wegen ihrer begrenzten Dicke zu mehrlagigen Dämmfaserplatten mit geschäumten oder nicht geschäumten Weissleim (PVAc ca. 2%) verklebt.

Als Hydrophobierungsmittel wird bei beiden Verfahren i.d.R. Paraffin eingesetzt. Beim Trockenverfahren wird das Flüssigparaffin (Anteil 0.3-2%) bei der Zerkleinerung als Dispersion der Leimflotte zugegeben. Gegebenenfalls wird auch Bitumen, Kolophonium oder Latex bei Unterdachplatten eingesetzt. Bei flexiblen Faserplatten niedriger Dichte werden Polyolefin-Fasern beigemischt.

Als Holzschutzmittel werden verschiedene Präparate mit fungizider und insektizider Wirkung eingesetzt. Der erforderliche Anteil an Feuerschutzmittel bei feuerhemmenden Faserdämmstoffen beträgt 12-20% (Dunky Niemz 2002).

Mit der Zugabe von Inhalts- und Zusatzstoffen können die Eigenschaften und das Verhalten gegen externe Einflüsse gezielt modifiziert und angepasst werden. Um auf Löse- und Bindemittel verzichten zu können, werden auch alternative Stoffe wie z.B. Maisstärke oder Tannine als Bindemittel eingesetzt.



3 Physikalische Grundlagen zu Wärmedämmstoffen im Bauwesen

Es gibt keinen Baustoff der alles kann. Die Suche nach dem optimalen Baustoff ist immer eine Entscheidung für einen optimalen Kompromiss. Die meisten Werkstoffeigenschaften überlagern und beeinflussen sich gegenseitig, so ist es kaum möglich einen Baustoff zu finden der alle bauphysikalischen, ökologischen und ästhetischen Kriterien erfüllt. Als grundsätzliche Entscheidungshilfe dienen die physikalischen Eigenschaften von Baustoffen, welche über ihren Einsatz entscheiden. Hervorzuheben ist hierbei, dass immer die Funktion des Wärmedämmstoffes klar sein sollte. So muss zwischen Wärmedämmung und Wärmespeicherung unterschieden werden, meist tritt eine Kombination von verschiedenen Baustoffen auf, welche zum einen eine wärmeabschirmende und zum anderen eine wärmespeichernde Eigenschaft haben.

3.1 Wärmedämmung und Wärmespeicherung

Die thermische Energie oder Wärmeenergie ist die Energie, die in der untergeordneten Bewegung der Atome gespeichert ist. Ein Molekül wird durch Wärmezufuhr zum Schwingen angeregt. Je nach Art des Stoffes reagiert das benachbarte Molekül in kürzerer oder längerer Zeit ebenfalls mit Schwingungen. Diese Weitergabe von Schwingungen ist ein Transport von Wärmeenergie.

Wärmeenergie aufzunehmen, zu speichern und wieder abzugeben ist eine spezifische Werkstoffeigenschaft (Holzmann 2009).

Wärmetransport

Bei Temperaturunterschieden innerhalb eines Baustoffes oder einer Bauteilschicht bzw. zwischen verschiedenen Bauteilschichten tritt immer das Bestreben zu einem Temperatúrausgleich auf. Die Wärmeenergie bewegt sich dabei immer vom wärmeren zum kälteren Ort.

In fast allen Baustoffen wird Wärme durch alle der drei möglichen Mechanismen übertragen; durch:

- Leitung; innerhalb von festen Teilen, Fasern, Schaumhäuten aber auch im Gas dazwischen,
- Strahlung; zwischen Fasern, zwischen Wänden von Poren, aber auch innerhalb fester, aber strahlungsdurchlässiger Bestandteile (z.B. Polystyrol ist infrarotdurchlässig)
- Konvektion; zwischen Fasern und innerhalb der Poren von Schäumen und anderen porigen Materialien

In der Bauphysik werden diese komplexen Wärmetransportmechanismen innerhalb eines Baustoffes mit einer „fiktiven“ Wärmeleitfähigkeit dargestellt. Das heisst, dass alle drei auftretenden Transportmechanismen einzig als Wärmeleitfähigkeit zusammengefasst werden (Mötzl 2000).



Wärmeleitfähigkeit

Die Wärmeleitung auch Wärmediffusion genannt, ist eine wichtige physikalische Eigenschaft von Bau- und vor allem Wärmedämmstoffen.

Die Fähigkeit Wärme zu leiten hängt sehr stark von der Struktur des Stoffes ab. Metalle besitzen ein sehr dichtes Gefüge und leiten Wärme sehr gut. Poröse Stoffe leiten Wärme aufgrund ihrer Struktur und geringen Dichte nur gering weiter. Deshalb werden bei Dämmstoffen möglichst poröse Stoffe eingesetzt, welche die Wärme weniger gut leiten und diese im Winter nicht nach draussen bzw. im Sommer nicht ins Gebäude rein lassen (Holzmann 2009).

Definition Wärmeleitfähigkeit

Das Mass für die Wärmeleitung eines Stoffes ist die Wärmeleitfähigkeit definiert in der Wärmeleitzahl λ (Lambda). Die Wärmeleitfähigkeit ist die Wärmemenge, die durch einen Würfel mit 1m Kantenlänge bei einem Temperaturunterschied von 1 K in einer Stunde hindurch fließt (Niemz 1993).

Kennzahl	Bezeichnung	Einheit
Wärmeleitfähigkeit	λ (Lambda)	[W/(m·K)]

Die Wärmeleitfähigkeit von Baustoffen wird von folgenden Faktoren beeinflusst:

- Verwendete Feststoffe
- Gefügebau der Feststoffe
- Art und Aufbau der Gaseinschlüsse
- Winddichtigkeit des Gefüges
- Feuchtigkeit und Temperatur des Baustoffes

Typische Werte für die Wärmeleitfähigkeit sind:

- Vakuum	0	[W/(m·K)]
- Mineralwolle	0.035-0.045	[W/(m·K)]
- Weichfaserplatten	0.038-0.09	[W/(m·K)]
- Wasser	0.556	[W/(m·K)]
- Holz	0.13	[W/(m·K)]
- Beton	2.1	[W/(m·K)]
- Stahl	50	[W/(m·K)]
- Aluminium	160	[W/(m·K)]

Bei faserigen Baustoffen ist die Wärmeleitfähigkeit zudem sehr stark abhängig von der Faserstruktur und deren Orientierung. Die Leitfähigkeit bei homogenen Baustoffen ist dagegen stärker abhängig von der Porigkeit des Baustoffes. Feuchtigkeit steigert im Allgemeinen die Wärmeleitfähigkeit. Das gilt besonders für Wärmedämmstoffe, deren wärmedämmende Eigenschaft durch einen hohen Feuchtegehalt deutlich reduziert werden kann (Holzmann 2009).



Spezifische Wärmekapazität

Bei der Wärmespeicherung ist im Gegensatz zur Wärmedämmung eine gute Wärmeleitung erwünscht, da die Wärmeenergie nicht „abgeschirmt“ sondern aufgenommen werden soll.

Die spezifische Wärmekapazität wird meist zum Vergleich verschiedener Baustoffe herangezogen. Diese massenbezogene Kennzahl ist allerdings zur Beurteilung der effektiven Wärmespeicherung nur bedingt aussagekräftig, da das dazugehörige Volumen nicht mit einbezogen wird. Die spezifische Wärmekapazität wird allerdings benötigt um Wärmespeicherzahl zu berechnen, welche das Volumen mit einbezieht.

Definition spezifische Wärmekapazität

Das stoffbedingte 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 Gleichung 3.1 (Holzmann 2009).

Kennzahl	Bezeichnung	Einheit
Spezifische Wärmekapazität	C-Wert	[kJ/(kg·K)]

$$C = \frac{Q}{m \cdot \Delta T} \quad (3.1)$$

Dabei ist:

C	die spezifische Wärmekapazität [kJ/(kg·K)]
Q	die benötigte Wärmemenge [kJ]
m	die Masse [kg]
ΔT	die Temperaturdifferenz [K]

Die Eigenschaft eines Stoffes Wärme zu speichern ist sehr stark abhängig von der Rohdichte und dessen Struktur. Für die Berechnung der spezifischen Wärmekapazität nach Gleichung 3.1 wird die benötigte Wärmemenge Q mit einem speziellen Messverfahren, der Kalorimetrie, ermittelt.

Typische Werte für die spezifische Wärmekapazität sind:

- Stahl	0.45	[kJ/(kg·K)]
- Aluminium	0.9	[kJ/(kg·K)]
- Luft	1	[kJ/(kg·K)]
- Beton	0.88	[kJ/(kg·K)]
- Holz (darrtrocken)	1.3	[kJ/(kg·K)]
- Weichfaserplatten	2.1	[kJ/(kg·K)]
- Holz (u = 100%)	2.8	[kJ/(kg·K)]
- Wasser	4.2	[kJ/(kg·K)]

Die bei Weichfaserplatten niedrige Wärmeleitfähigkeit in Kombination mit den vergleichsweise hohen Werten der spezifischen Wärmekapazität ergeben deutliche Vorteile im Vergleich zu mineralischen Dämmstoffen. Die effektiven Temperaturschwankungen sind bei Weichfaserplatten geringer und zudem tritt eine Phasenverschiebung der Temperaturmaxima auf (s. Phasenverschiebung und Temperatur-Amplitudendämpfung).



Wärmespeicherzahl

Jedes Material besitzt die Fähigkeit Wärme aufzunehmen und zu speichern. Ein weiterer wichtiger Parameter zur Beschreibung dieses Phänomens stellt die Wärmespeicherzahl dar.

Für die Beurteilung des Wärmespeichervermögens ist die Wärmespeicherzahl besser geeignet als die zuvor erläuterte spezifische Wärmekapazität, da diese das Speichervolumen mit einbezieht.

Definition Wärmespeicherzahl

Die volumenbezogene Wärmespeicherzahl beschreibt wie viel Wärmeenergie benötigt wird um 1m³ eines Stoffes um 1 K zu erhöhen. Die Wärmespeicherzahl bildet sich aus dem Produkt aus Materialrohddichte und der spezifischen Wärmekapazität und berechnet sich nach Gleichung 3.2 (Keller 2007).

Kennzahl	Bezeichnung	Einheit
Wärmespeicherzahl	S	[kJ/(m ³ ·K)]

$$S = \rho \cdot C \quad (3.2)$$

Dabei ist:

- S die Wärmespeicherzahl [kJ/(m³·K)]
 ρ die Rohddichte [kg/m³]
 C die spezifische Wärmekapazität [kJ/(kg·K)]

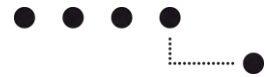
Entscheidend für eine Beurteilung der qualitativen Wärmespeicherung eines Baustoffes ist das sogenannte wirksame Speichervermögen. Ein hohes wirksames Speichervermögen haben daher Bauteilschichten welche:

- eine möglichst hohe spezifische Wärmekapazität,
- eine möglichst hohe Materialrohddichte und
- eine möglichst hohe Wärmeleitfähigkeit besitzen und
- die möglichst nahe an der Oberfläche angeordnet und nicht durch wärmedämmende Schichten von der Raumluft getrennt sind.

Typische Werte für die spezifische Wärmekapazität und die Wärmespeicherzahl sind in Tabelle 3.1 angegeben:

Tabelle 3.1: Wärmespeicherzahl unterschiedlicher Materialien

Material	Rohddichte [kg/m ³]	C [kJ/(kg·K)]	S [kJ/(m ³ ·K)]
Wasser	1000	4.2	4200
Stahl	7800	0.45	3510
Beton	2400	0.88	2112
Holz (Fichte)	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



Temperaturleitfähigkeit

Die Temperaturleitfähigkeit ist die Materialeigenschaft eines Stoffes, die zur Beschreibung der zeitlichen Veränderung und der räumlichen Verteilung der Temperatur durch Wärmeleitung als Folge eines Temperaturgefälles dient.

Definition Temperaturleitfähigkeit

Die Temperaturleitfähigkeit oder auch Temperaturleitzahl genannt gibt die Reichweite einer an der Oberfläche erfolgten Temperaturänderung in die Tiefe des Materials an und dient der Beschreibung des Energietransportes. Die Temperaturleitzahl definiert sich aus dem Verhältnis des Wärmedämmvermögens und dem Wärmespeichungsvermögen. Je geringer die Temperaturleitzahl ist, desto besser sind der sommerliche Hitze- und der winterliche Kälteschutz. Die Berechnung erfolgt nach Gleichung (3.3).

Kennzahl	Bezeichnung	Einheit
Temperaturleitfähigkeit	α	$[\text{m}^2/\text{s}]$

$$\alpha = \frac{\lambda}{c \cdot \rho} \quad (3.3)$$

bzw.

$$\alpha = \frac{\lambda}{s} \quad (3.4)$$

Dabei ist:

- α die Temperaturleitfähigkeit $[\text{m}^2/\text{s}]$
- λ die Wärmeleitfähigkeit $[\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})]$
- C die spezifische Wärmekapazität $[\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})]$
- ρ die Rohdichte $[\text{kg}/\text{m}^3]$

Heute berechnet man technisch relevante Wärmeleitaufgaben mit Hilfe von Finite-Elemente-Programmen. Als Resultat erhält man die zeitliche wie räumliche Temperaturverteilung, womit man auf das räumliche Ausdehnungsverhalten der Bauteile schließen kann, das seinerseits wieder den örtlichen Spannungszustand mitbestimmt. So wird die Temperaturfeldrechnung zu einer wichtigen Grundlage für alle technischen Auslegungsaufgaben, bei denen die thermische Bauteilbelastung nicht vernachlässigt werden kann (Holzmann 2009).

Phasenverschiebung und Temperatur-Amplitudendämpfung

Die Phasenverschiebung und die Temperatur-Amplitudendämpfung werden benötigt um den sommerlichen Wärmeschutz zu beschreiben. Der sommerliche Wärmeschutz setzt sich aus verschiedenen Komponenten zusammen:

- bauliche Massnahmen
- technische Anlagen
- wirksame Speichermasse der Gebäudehülle

Zu den baulichen Massnahmen zählen verschiedene Beschattungssysteme aber auch das Reduzieren von Fensterflächen und anderen transparenten Bauteilflächen. Als technische Anlagen werden Klimaanlage oder mechanische Lüfter eingesetzt. Die wirksame Speichermasse ist neben der Innen- und Aussenverkleidung und der Konstruktion auch über den eingesetzten Dämmstoff gegeben.

In den wärmeren Jahreszeiten können an besonnten Bauteilaussenflächen sehr hohe Temperaturspitzen auftreten, welche die ganze Gebäudehülle aufwärmen. Dämmstoffe mit einer hohen wirksamen Speichermasse besitzen die Eigenschaft viel Wärme lange Zeit zu speichern und geben die Wärmeenergie nur in geringen Mengen an den Innenraum weiter.

Definition Phasenverschiebung

Die Phasenverschiebung entspricht der Zeitspanne in Stunden zwischen Auftreten der höchsten Aussentemperatur und der höchsten Innentemperatur während eines Tages.

Kennzahl	Bezeichnung	Einheit
Phasenverschiebung	h	[h]

Eine Phasenverschiebung von 10-12 Stunden ist ideal. In diesem Fall wird die Mittagshitze, die zwischen 13 und 15 Uhr einwirkt, erst mit einer zeitlichen Verzögerung zwischen 23 und 3 Uhr an die Innenräume abgegeben (Abbildung 3.1).

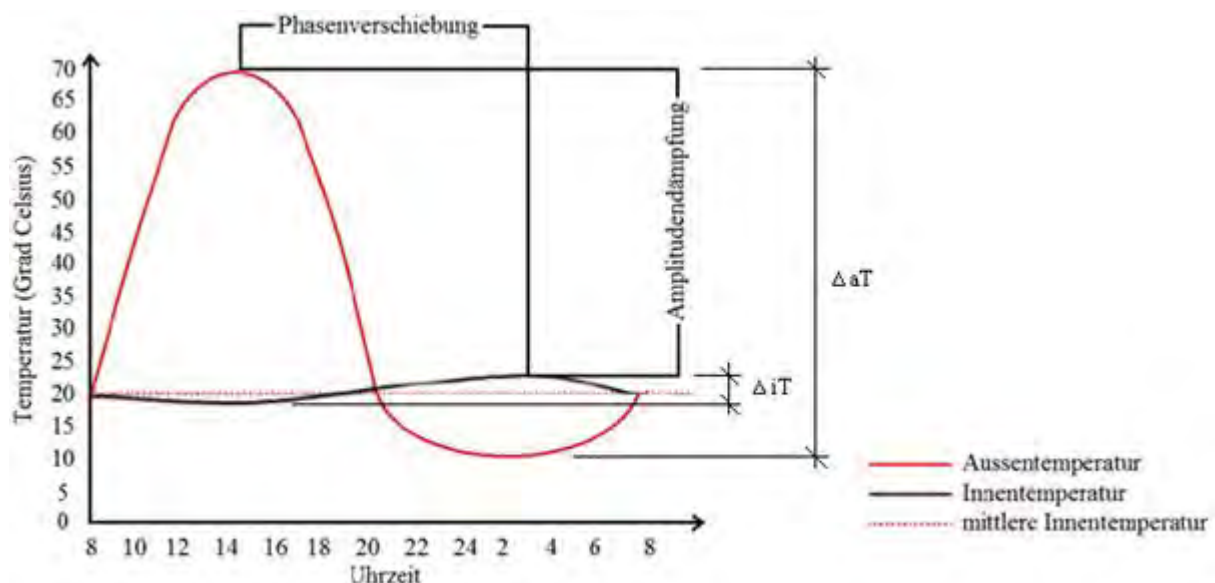


Abbildung 3.1: Phasenverschiebung und Amplitudendämpfung



Die äusseren Temperaturschwankungen werden mehr oder weniger durch die Aussenwand gedämpft, d.h., dass sich die Temperaturschwankung auf der inneren Wandoberfläche in reduzierter Grösse zeigt. Das Verhältnis zwischen der höchsten Aussentemperatur und der höchsten Innentemperatur wird als Temperaturamplitudenverhältnis (TAV) bezeichnet.

Definition Temperaturamplitudenverhältnis

Das Temperaturamplitudenverhältnis ist das Verhältnis der Temperaturschwankung aussen und der Temperaturschwankung im Innenraum. Dieses Verhältnis ist dimensionslos und wird als TAV angegeben. Das TAV berechnet sich nach Gleichung 3.5.

Kennzahl	Bezeichnung	Einheit
Temperaturamplitudenverhältnis	TAV	[-]

$$TAV = \frac{aT_{max} - aT_{min}}{iT_{max} - iT_{min}} \quad (3.5)$$

resp.

$$TAV = \frac{\Delta aT}{\Delta iT} \quad (3.6)$$

Dabei ist:

TAV das Temperaturamplitudenverhältnis [-]

aT_{max} die maximale Aussentemperatur der Bauteilaussenfläche [°C]

aT_{min} die minimale Aussentemperatur der Bauteilaussenfläche [°C]

iT_{max} die maximale Innentemperatur [°C]

iT_{min} die minimale Innentemperatur [°C]

Die Speicherfähigkeit eines Baustoffes ist für die Stabilität des Raumklimas verantwortlich. Je grösser diese Fähigkeit ist, desto höher ist die Temperaturamplitudendämpfung (TAD). Welche sich aus dem Kehrwert des TAV bildet und nicht grösser als 15% sein sollte (Gleichung 3.7).

Kennzahl	Bezeichnung	Einheit
Temperaturamplitudendämpfung	TAD	[%]

$$TAD = \frac{1}{TAV} \quad (3.7)$$

resp.

$$TAD = \frac{1}{\frac{\Delta aT}{\Delta iT}} \quad (3.8)$$

Dabei ist:

TAD die Temperaturamplitudendämpfung [%]

TAV das Temperaturamplitudenverhältnis [-]

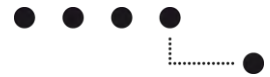


Tabelle 3.2 zeigt die Temperaturamplitudendämpfung und die Phasenverschiebung verschiedener Dämmstoffe bei gleicher Dämmstoffdicke. Dabei fällt auf, dass eine Holzfaser-Dämmplatte die Kriterien für den sommerlichen Wärmeschutz deutlich besser erfüllt als ihre Substitute.

Tabelle 3.2: Temperaturamplitudendämpfung und Phasenverschiebung verschiedener Dämmstoffe (Pavatex 2001)

Dämmstoff	TAD [%]	Rohdichte [kg/ m ³]	spezifische Wärmekapazität [kJ/(kg·K)]	Phasenverschiebung [h]
Holzfaser-Dämmplatte	4	160	2.70	15.1
Zellulose	16	45	1.94	8.7
Flachs	20	30	1.55	7.4
Baumwolle	21	20	1.90	7.1
Steinwolle	21	40	1.00	6.7
Schafwolle	22	25	1.30	7.0
Polystyrol	22	20	1.50	6.3
Mineralwolle	23	20	1.00	5.9

Neben der Wahl des Dämmstoffes beeinflusst auch die Dämmschichtdicke das Amplitudenverhältnis und die Phasenverschiebung. Tabelle 3.3 zeigt diesen Einfluss am Beispiel einer Holzfaserplatte der Firma Gutex.

Tabelle 3.3: Einfluss der Dämmstoffdicke auf das TAV und die Phasenverschiebung (Gutex Planungs-CD)

Produkt: Gutex Thermosafe-homogen (Rohdichte 110 kg/m ³)		
Dämmstoffdicke [mm]	TAV [-]	Phasenverschiebung [h]
20	2.2	2.6
60	2.3	5.8
100	4.6	8.3
140	8.9	10.8
180	17.1	13.3
220	33.0	15.8
260	63.7	18.3
300	122.6	20.8



3.2 Wärmetechnische Kennzahlen

Als wärmetechnische Kennzahlen definieren sich Wärmedurchlasswiderstand, Wärmeübergangswiderstand, und Wärmedurchgangswiderstand. Diese Widerstände sind nicht materialspezifisch, sondern Grössen die zur Ermittlung eines statischen Wärmedurchgangskoeffizienten, besser bekannt unter dem U-Wert, herangezogen werden.

Das folgende Kapitel soll einen Überblick über die Zusammenhänge und den Aufbau der Berechnung des statischen U-Wertes bei homogenen und inhomogenen Bauteilen im Hochbau liefern.

Die internationale Norm DIN EN ISO 6946 [12] legt das Verfahren zur Berechnung des Wärmedurchlasswiderstandes und des Wärmedurchgangskoeffizienten von Bauteilkomponenten und Bauteilen fest. Davon ausgenommen sind Türen, Fenster und andere verglaste Einheiten, Vorhangfassaden, an das Erdreich grenzende Bauteilkomponenten und Lüftungselemente. Geregelt ist das wärmetechnische Verhalten verglaster Bauelemente u.a. in den Normen DIN 52619-3 [10] und DIN EN ISO 10077-1 [3] und -2 [4].

Wärmedurchlasswiderstand

Das Wärmedämmvermögen eines Baustoffes hängt sehr stark von dessen Schichtdicke ab. Je dicker die Schicht und je geringer deren Wärmeleitfähigkeit sind, desto grösser ist der Widerstand, der dem Wärmefluss entgegengesetzt wird (Mötzel 2000).

Definition Wärmedurchlasswiderstand

Der Wärmedurchlasswiderstand entspricht der Wärmeleitfähigkeit eines Baustoffes in Relation zu den eingesetzten Schichtdicken. Der Wärmedurchlasswiderstand gibt den Widerstand eines Bauteils an, der dem stationären Durchgang der Wärmemenge von 1 Ws (1 Joule) entgegengesetzt wird. Besteht ein Bauteil aus mehreren unterschiedlichen Schichten, können die einzelnen errechneten Wärmedurchlasswiderstände addiert werden. Die Berechnung des Wärmedurchlasswiderstandes erfolgt nach Gleichung 3.9.

Kennzahl	Bezeichnung	Einheit
Wärmedurchlasswiderstand	R-Wert	$[(m^2 \cdot K)/W]$

$$R = \frac{d}{\lambda} \quad (3.9)$$

bzw.

$$R = \sum \frac{d}{\lambda}$$

Dabei ist:

- R der Wärmedurchlasswiderstand $[(m^2 \cdot K)/W]$
- d die Dicke des jeweiligen Baumaterials $[m]$
- λ die Wärmeleitfähigkeit des jeweiligen Bauteils $[W/(m \cdot K)]$

Soll ein bestimmter Wärmedurchlasswiderstand erreicht werden, sind je nach Material unterschiedliche Schichtdicken notwendig. Mit der Erhöhung der Schichtdicke können bei Dämmmaterialien relativ schnell hohe Widerstände erreicht werden. Je grösser der Wärmedurchlasswiderstand ist, desto besser ist das Wärmedämmvermögen eines Dämmstoffes bzw. eines Bauteils (Mötzel 2000).



Bemessungswerte für den Wärmedurchlasswiderstand von Luftschichten

Luftschichten werden bei der Berechnung des U-Wertes berücksichtigt. Die Bemessungswerte gelten für Luftschichten die in Wärmestromrichtung einer Dicke von weniger als dem 0.1 fachen der Länge bzw. der Breite der Luftschicht entsprechen und 0.3m nicht überschreiten. Der Wärmedurchlasswiderstand der Luftschicht hängt von dessen Dicke und Richtung ab. Spezifische Werte für den Wärmedurchlasswiderstand von Luftschichten können Tabelle 3.4 entnommen werden. Davon abweichende Luftschichten werden nach DIN EN ISO 6946 [12] Anhang B berechnet.

Tabelle 3.4: Wärmedurchlasswiderstand in Abhängigkeit der Richtung des Wärmestromes (DIN EN ISO 6946 [12])

Dicke der Luftschicht [mm]	Wärmedurchlasswiderstand [(m ² ·K)/W]		
	Richtung des Wärmestromes		
	Aufwärts	Horizontal	Abwärts
0	0.00	0.00	0.00
5	0.11	0.11	0.11
7	0.13	0.13	0.13
10	0.15	0.15	0.15
15	0.16	0.17	0.17
25	0.16	0.18	0.19
50	0.16	0.18	0.21
100	0.16	0.18	0.22
300	0.16	0.18	0.23

ANMERKUNG¹ Zwischenwerte können mittels linearer Interpolation ermittelt werden.

ANMERKUNG² Die Werte unter „horizontal“ gelten für Richtungen des Wärmestromes von ± 30° zur horizontalen Ebene.



Wärmeübergangskoeffizienten

Die Wärmeübertragung von der Innenluft auf die innere Bauteiloberfläche wird mit dem Wärmeübergangskoeffizienten h_i (früher α_i) angegeben und die der äusseren Bauteiloberfläche an die Aussenluft mit dem Wärmeübergangskoeffizienten h_e (früher α_a). Diese Übergangskoeffizienten werden benötigt um den Widerstand des Wärmeübergangs für innen und aussen zu berechnen.

Definition Wärmeübergangskoeffizienten

Die Wärmeübergangskoeffizienten geben an, welcher Wärmestrom in Watt von 1 m² Bauteiloberfläche durch Wärmeleitung und Konvektion an die Luft abgegeben und durch Wärmestrahlung an Bauteile übertragen werden, wenn der Temperaturunterschied zur angrenzenden Luftschicht 1 Kelvin beträgt.

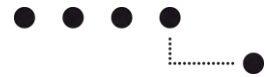
Kennzahl	Bezeichnung	Einheit
Wärmeübergangskoeffizient	h_i (für innen)	[W/(m ² ·K)]
	h_e (für aussen)	[W/(m ² ·K)]

Die in der Praxis anzusetzenden Werte sind in der SIA Norm 180 „Wärme und Feuchteschutz im Hochbau“ definiert. Der Wert für den äusseren Wärmeübergangskoeffizienten h_e wurde in der aktuellen Ausgabe der SIA Norm 180 [14] von 1999 um 5 W/(m²·K) angehoben, was zu einer eigentlichen Verschärfung der Norm und der Erhöhung des äusseren Wärmeübergangswiderstandes und demzufolge auch zur Erhöhung des zu berechnenden U-Wertes geführt hat (s. Tabelle 3.5).

Tabelle 3.5: Werte für die Wärmeübergangskoeffizienten von 1988 und 1999

SIA 180 Ausgabe 1988 (früher)	SIA 180 Ausgabe 1999 (aktuell)
Innen für alle Oberflächen	
$\alpha_i = 8 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$	$h_i = 8 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$
Aussen für alle Oberflächen	
$\alpha_a = 20 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$	$h_e = 25 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$
Für Bauteile im Erdreich	
$\alpha_a = 0 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$	$h_e = 0 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$

Die SIA Norm 180 [14] liefert im Gegensatz zur DIN EN ISO 6946 [12] auch Werte für den Wärmeübergangskoeffizienten für Bauteile im Erdreich. Da bei Bauteilkomponenten welche an Erdreich angrenzenden weder Strahlung noch Konvektion auftritt, wird in diesem Fall auf den Wärmeübergangskoeffizient h_e verzichtet bzw. ein Wert von 0 W/m²K eingesetzt.



Wärmeübergangswiderstand

Die konventionell zu verwendenden Werte der Wärmeübergangswiderstände werden ähnlich den Wärmedurchlasswiderständen entsprechend der Richtung des Wärmestroms berücksichtigt und sind ebenfalls in der Norm DIN EN ISO 6946 [12] wie in Tabelle 3.6 definiert.

Tabelle 3.6: Wärmeübergangswiderstand in Abhängigkeit der Richtung des Wärmestroms

Wärmeübergangswiderstand [(m ² ·K)/W]	Richtung des Wärmestroms		
	Aufwärts	Horizontal	Abwärts
R _{si} für innen	0.010	0.13	0.17
R _{se} für aussen	0.04	0.04	0.04

Die in Tabelle 3.6 angegebenen Werte sind Bemessungswerte. Für die Angabe des Wärmedurchgangskoeffizienten von Bauteilkomponenten, in denen von der Richtung des Wärmestromes unabhängige Werte gefordert werden oder die Richtung des Wärmestromes variieren kann, wird empfohlen die Werte für den horizontalen Wärmestrom zu verwenden.

Die Wärmeübergangswiderstände beziehen sich ausschliesslich auf Oberflächen, die mit der Luft in Berührung sind. Sie sind nicht anwendbar, wenn die Oberfläche ein anderes Material berührt (DIN EN ISO 6946).

Definition Wärmeübergangswiderstand

Die Wärmeübergangswiderstände R_{si} und R_{se} werden aus den Kehrwerten der Wärmeübergangskoeffizienten h_i und h_e nach Gleichung 3.10 berechnet. Diese beiden Übergangswiderstände berücksichtigen die Wärmeübertragungseffekte der Konvektion und der Strahlung.

Kennzahl	Bezeichnung	Einheit
Wärmeübergangswiderstand	R _{si} (für innen)	[(m ² ·K)/W]
	R _{se} (für aussen)	[(m ² ·K)/W]

$$R_{si} = \frac{1}{h_i} \quad (3.10)$$

bzw.

$$R_{se} = \frac{1}{h_e}$$

Dabei ist:

- R_{si} der innere Wärmeübergangskoeffizient [(m²·K)/W]
- R_{se} der äussere Wärmeübergangskoeffizient [(m²·K)/W]
- h_i der innere Wärmedurchgangskoeffizient [W/(m²·K)]
- h_e der äussere Wärmedurchgangskoeffizient [W/(m²·K)]



Wärmedurchgangswiderstand bei homogenem und inhomogenem Aufbau eines Bauteils

Als homogene Bauteile bezeichnet man Konstruktionen, die aus mehreren durchgehenden, hintereinanderliegenden Schichten von Baumaterialien bestehen. Die Berechnung des Wärmeübergangswiderstandes erfolgt in diesem Fall nach Gleichung 3.11.

Definition Wärmedurchgangswiderstand

Der Wärmedurchgangswiderstand beschreibt die Dämmwirkung eines Bauteils, die aus der Summe der Wärmedurchlasswiderstände einzelner Bauteilschichten und den beiden Wärmeübergangswiderständen zwischen der Luft und den Bauteiloberflächen für innen und aussen definiert wird.

Kennzahl	Bezeichnung	Einheit
Wärmedurchgangswiderstand	R_T	$[(m^2 \cdot K)/W]$

Berechnung homogen

$$R_T = R_{si} + R + R_{se} \quad (3.11)$$

bzw.

$$R_T = \frac{1}{h_i} + \sum \frac{d}{\lambda} + \frac{1}{h_e}$$

Dabei ist:

R_T der Wärmedurchgangswiderstand $[(m^2 \cdot K)/W]$

R_{si} der Wärmeübergangskoeffizient für innen $[(m^2 \cdot K)/W]$

R der Wärmedurchlasswiderstand $[(m^2 \cdot K)/W]$

R_{se} der Wärmeübergangskoeffizient für aussen $[(m^2 \cdot K)/W]$



Bei inhomogenen Bauteilen laufen die verschiedenen Baumaterialschichten nicht über die gesamte Fläche durch, sondern werden regelmässig durch andere Schichten unterbrochen wie z.B. durch Stahlstützen, Betonpfeiler, Ständer oder Sparren. Diese Unterbrechungen verschlechtern den U-Wert und müssen deshalb berücksichtigt werden.

Für die Berechnung wird das Bauteil dafür senkrecht zur Oberfläche in Abschnitte und parallel in Schichten zerlegt, so dass diese jeweils als thermisch homogenen betrachtet werden können (s. Abbildung 3.2).

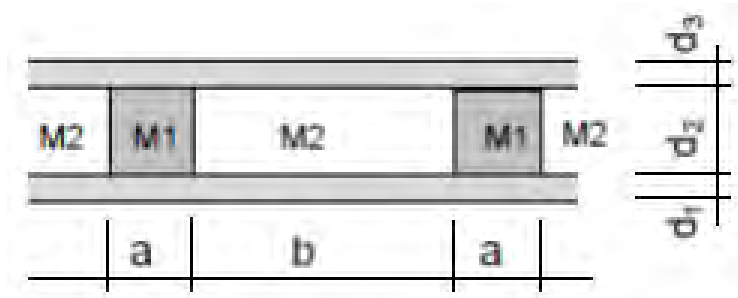


Abbildung 3.2: Zerlegung eines inhomogenen Bauteils

Diese Betrachtung liefert einen oberen Grenzwert des Wärmedurchgangs bei den Abschnitten (Gleichung 3.13) und einen unteren Grenzwert des Wärmedurchgangs bei den Schichten (Gleichung 3.14). Der Wärmedurchgangswiderstand wird anschliessend durch den Mittelwert des oberen und unteren Grenzwertes nach Gleichung 3.15 berechnet.

Berechnung inhomogen

$$R'_T = \frac{a+b}{\frac{a}{R_{si} + \sum \frac{d}{\lambda} + R_{se}} + \frac{b}{R_{si} + \sum \frac{d}{\lambda} + R_{se}}} \quad (3.13)$$

$$R''_T = R_{si} + \frac{d_1}{\lambda_1} + \frac{d_2}{\frac{a \times \lambda_{M1} + b \times \lambda_{M2}}{a+b}} + \frac{d_3}{\lambda_3} + R_{se} \quad (3.14)$$

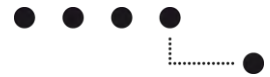
$$R_T = \frac{R'_T + R''_T}{2} \quad (3.15)$$

Dabei ist:

- R_T der Wärmedurchgangswiderstand $[(m^2 \cdot K)/W]$
- R'_T der obere Wärmedurchgangswiderstand $[(m^2 \cdot K)/W]$
- R''_T der untere Wärmedurchgangswiderstand $[(m^2 \cdot K)/W]$

- a Breite der Bauteilkomponente M1 [m]
- b Breite der Bauteilkomponente M2 [m]

- R_{si} der Wärmeübergangskoeffizient für innen $[(m^2 \cdot K)/W]$
- $\sum \frac{d}{\lambda}$ Summe der Wärmedurchlasswiderstände der Bauteilkomponenten $[(m^2 \cdot K)/W]$
- R_{se} der Wärmeübergangskoeffizient für aussen $[(m^2 \cdot K)/W]$



Wärmedurchgangskoeffizient

Der Wärmedurchgangskoeffizient U-Wert (früher k-Wert) beschreibt den Wärmeverlust über ein Bauteil. Je kleiner der U-Wert ist, desto besser ist die Wärmedämmung. Deshalb wird versucht mittels Auswahl geeigneter Baustoffe den Wärmedurchgangskoeffizienten möglichst niedrig zu halten. Der Aufwand zur weiteren Reduzierung des Wärmedurchgangskoeffizienten steigt mit dessen Abnahme. Der U-Wert wird zur Definition des Mindestwärmeschutzes herangezogen, welcher in der Schweiz in den kantonalen Bauordnungen für wärmedämmende Bauteile der Gebäudehülle (Wände, Decken, Dächer, Böden, sowie Fenster und Türen) beschrieben ist. Für energiesparende Bauweisen ist der Wärmedurchgangskoeffizient zwar eine wichtige Orientierung, jedoch werden diese Bauweisen über den Heizwärmebedarf definiert.

Definition Wärmedurchgangskoeffizient

Definiert wird der Wärmedurchgangskoeffizient über den Wärmestrom in Watt, der unter stationären, d.h. bei zeitlich unveränderten Randbedingungen während einer Sekunde zwischen einer 1m^2 grossen Bauteiloberfläche und der angrenzenden Luft bei einem Temperaturunterschied von 1 K ausgetauscht wird. Bei der Berechnung des Wärmedurchgangskoeffizienten nach Gleichung 3.16 (Holzmann 2000).

Kennzahl	Bezeichnung	Einheit
Wärmedurchgangskoeffizient	U-Wert (früher k-Wert)	$[\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})]$

$$U - \text{Wert} = \frac{1}{R_T} \quad (3.16)$$

Dabei ist:

$U - \text{Wert}$ der Wärmedurchgangskoeffizient $[\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})]$

R_T der Wärmedurchgangswiderstand $[(\text{m}^2 \cdot \text{K})/\text{W}]$

In der SIA Norm 180 [14] sind die maximalen zulässigen U-Werte für verschiedene Bauteile unter Berücksichtigung der Anforderungen für Behaglichkeit und Oberflächenkondensationsfreiheit je nach Art und Lage des Bauteils wie in Tabelle 3.7 definiert.

Tabelle 3.7: Maximal zulässige U-Werte bei verschiedenen Bauteilen

Bauteil	Bauteil gegen Aussenklima oder im Erdreich bis 2m	unbeheizte Räume	mehr als 2m im Erdreich ¹⁾
Steil- oder Flachdach	0.4	0.5	0.6
vertikale Wand	0.4	0.6	0.6
Fenster, Fenstertüren, Türen	2.4	2.4	-
Boden	0.4	0.6	0.6

¹⁾ Höhere Werte sind zulässig, wenn mittels Berechnung der Wärmeströme und der Oberflächentemperaturen nach Norm EN ISO 10211-1 belegt wird, dass die Behaglichkeit gesichert ist und keine Gefahr von Oberflächenkondensation und Schimmelbildung besteht (SIA 180 [14]).



Wärmebrücken

Wärmebrücken sind thermische Schwachstellen in der Gebäudehülle, durch die örtlich mehr thermische Energie oder Wärme abfließt als durch benachbarte Bauteile.

Durchdringungen und Bauteilübergänge gelten oft als Wärmebrücken und führen zu:

- erhöhtem Wärmeverlust und
- bauphysikalischen und hygienischen Risiken (z.B. Bildung von Oberflächenkondensat und Pilzbefall) sowie
- thermisch unbehaglichem Klima

Wärmebrücken sollten durch konstruktive Massnahmen möglichst vermieden werden. Die Berücksichtigung von Wärmebrücken wird für einen Wärmedämmnachweis in den Normen [1] und [2] verbindlich verlangt (Wärmebrückenkatalog). Deshalb hat das Bundesamt für Energie BFE einen Wärmebrückenkatalog erstellen lassen, indem zudem zwischen punktuellen und linearen Wärmebrücken wie folgt unterschieden wird.

Punktuelle Wärmebrücken

Punktuelle Wärmebrücken sind Störungen in der Gebäudehülle wie z.B. Fassadenanker, Säulen, Schrauben usw., welche auf einen Punkt bezogen werden können. Dabei entspricht der punktbezogene Wärmedurchgangskoeffizient einer Verlustleistung in Watt bei einer Temperaturdifferenz vom Innenraum zur Aussenluft von einem Kelvin.

Kennzahl	Bezeichnung	Einheit
Punktbezogener Wärmedurchgangskoeffizient	X-Wert	[W/K]

Je kleiner der punktbezogene Wärmedurchgangskoeffizient ist, umso kleiner ist der zusätzliche durch die Wärmebrücke verursachte Energieverlust.

Im Wärmebrückenkatalog werden punktbezogene Zuschläge auf zwei verschiedene Arten betrachtet:

- bei in grossen Abständen auftretenden Wärmebrücken (z.B. Säulen) wird der **X-Wert** ausgewiesen.
- bei in regelmässigen kleinen Abständen auftretenden Wärmebrücken (z.B. Fassadenanker) wird der **X-Wert** in einen für die Benutzung bequemerer U-Wert-Zuschlag umgerechnet (Wärmebrückenkatalog).



Lineare Wärmebrücken

Lineare Wärmebrücken sind Störungen in der Gebäudehülle wie z.B. Balkonanschlüsse, Ständer, Sparren bei Zwischensparrendämmung usw., welche auf eine Länge bezogen werden können.

Der längenbezogene Wärmedurchgangskoeffizient entspricht dabei einer Verlustleistung in Watt, verursacht durch eine Störung von einem Meter Länge, bei einer Temperaturdifferenz vom Innenraum zur Aussenluft von einem Kelvin.

Kennzahl	Bezeichnung	Einheit
Längenbezogener Wärmedurchgangskoeffizient	Ψ-Wert	[W/(m·K)]

Je kleiner der längenbezogene Wärmedurchgangskoeffizient ist, umso kleiner ist der durch die Wärmebrücke pro Laufmeter verursachte Energieverlust.

Folgende Eigenschaften beeinflussen den längenbezogenen Wärmedurchgangskoeffizienten:

- U-Werte der angrenzenden Bauteile
- Qualität der Anschlusskonstruktion
- Bezugspunkt, für welchen der Bezugspunkt bestimmt wird (Wärmebrückenkatalog)



3.3 Feuchte und Diffusion

Wasser kann in einem Haus an verschiedenen Orten und in verschiedenen Aggregatzuständen (fest, flüssig und gasförmig) auftreten als:

- als Dampf in der Raumluft
- als Dampf im Inneren der Konstruktion
- als Kondensat im Inneren der Konstruktion
- als Kondensat an der inneren und äusseren Oberfläche
- als Wasser im Baugrund
- als Frost im äusseren Bauteilbereich

Im Zusammenhang mit Dämmstoffen sind vor allem Dampf und Kondensat im Inneren der Konstruktion relevant.

Die tatsächlich vorhandene Menge an Wasserdampf je m^3 Luft wird als absolute Luftfeuchtigkeit bezeichnet. Die relative Luftfeuchtigkeit gibt an, wie viel Prozent Wasserdampf die Luft bezogen auf die maximal mögliche Aufnahmemenge (Sättigungsdampfmenge) enthält. Wie viel Wasserdampf die Luft aufnehmen kann, hängt von deren Temperatur und dem Luftdruck ab. Warme Luft kann mehr absolute Feuchtigkeit aufnehmen als kalte Luft. Wird warme Luft abgekühlt, so steigt die relative Luftfeuchtigkeit bis eine Sättigung (100% rel. LF) erreicht ist und überschüssiger Wasserdampf kondensiert und als Wasser abgegeben wird. Die Temperatur, ab der Wasserdampf zu kondensieren beginnt wird als Taupunkt bezeichnet.

In kalter Winterluft ist deutlich weniger Wasserdampf enthalten als in einem beheizten Wohnraum. Die üblichen Werte der relativen Luftfeuchtigkeit in Wohn- und Arbeitsräumen liegen zwischen 40 und 60% und kann im Winter bis unter 30% sinken (Mötzl 2000).

Die warme feuchtere Luft der Innenräume bewegt sich im Winter durch den gesamten Wandaufbau nach aussen. Dafür verantwortlich sind verschiedene Feuchtetransportmechanismen, welche im Folgenden beschrieben werden.

Bei der Dampfdiffusion durch die Gebäudehülle streben die unterschiedlichen Wasserdampfpartialdrücke nach dem Ausgleich des Druckunterschiedes dabei bewegen sich die Wasserdampfmoleküle immer in Richtung des geringeren Dampfdruckes, welcher im Winter aussen und im Sommer tagsüber innen ist. Das beschriebene Gesetz des Gasausgleiches bildet den Antrieb für die Trocknung feuchter Bauteile, auch wenn keine Luftströmung vorliegt. Gleichzeitig ist dieses Gesetz auch Ursache dafür, dass sich hygroskopische Stoffe wie Holz und Holzwerkstoffe an die Raumluftfeuchte angleichen (Mötzl 2000).



Wasserdampf-Diffusionswiderstand

Der Feuchtetransport durch Diffusion ist stoffspezifisch und wird über die Wasserdampfdurchlässigkeit und den Wasserdampf-Diffusionswiderstand beschrieben. Dieser ist stark abhängig von der Dicke und Struktur des Baustoffes. Dabei setzen verschiedene Baustoffe den Wasserdampfmolekülen einen unterschiedlichen Widerstand entgegen.

Definition Wasserdampf-Diffusionswiderstandszahl

Die Wasserdampf-Diffusionswiderstandszahl definiert sich als Quotient aus dem Wasserdampf-Diffusionskoeffizienten der Luft δ_a und dem des betreffenden Baustoffes und berechnet sich nach Gleichung 3.19. Er gibt an, wievielfach grösser der Diffusionsdurchlasswiderstand des Baustoffes ist als der einer gleich dicken Luftschicht (Wagenführ 2008).

Kennzahl	Bezeichnung	Einheit
Wasserdampf-Diffusionswiderstandszahl	μ	[-]

$$\mu = \frac{\delta_a}{\delta_{BS}} \quad (3.19)$$

Dabei ist:

- μ die Wasserdampf-Diffusionswiderstandszahl [-]
- δ_a der Wasserdampf-Diffusionskoeffizient der Luft [Kg/(m·h·Pa)]
- δ_{BS} der Wasserdampf-Diffusionskoeffizient des Baustoffes [Kg/(m·h·Pa)]

Grundsätzlich ist bei der Planung der Gebäudehülle und des Wandaufbaus darauf zu achten, dass der Diffusionswiderstand der einzelnen Materialien von innen nach aussen abnimmt. So kann erreicht werden, dass aussen mehr Dampf abgeführt wird, als von Innenraum zuströmt. Die Folge ist, dass der Dampfdruck innerhalb des Bauteils stark gesenkt wird, und somit kein Kondensat entsteht. Idealerweise werden die äusseren Schichten möglichst diffusionsoffen ausgeführt, da derartige Konstruktionen ein sehr hohes Austrocknungspotential besitzen und damit als bauphysikalisch sehr sicher sind (Mötzl 2000).

Gängige Werte der Wasserdampf-Diffusionswiderstandszahl μ verschiedener Baustoffe sind:

- Luft 1 μ
- Holzfaserplatten 5-10 μ (DIN 12086)
- Gipskartonplatten 8 μ (DIN V 4108-4)
- Holz 40 μ (DIN V 4108-4)
- Beton 70-150 μ (DIN V 4108-4)



Äquivalente Luftschichtdicke

Die Wasserdampfdurchlässigkeit beschreibt den Diffusionswiderstand einer Bauteilschicht in Form einer diffusionsäquivalenten Luftschichtdicke in Meter. Das heisst, dass der Diffusionswiderstand einer Bauteilschicht als Dicke einer ruhenden Luftschicht, welche denselben Widerstand hat wie die Bauteilschicht, betrachtet wird. Die äquivalente Luftschichtdicke bildet sich aus dem Produkt des Wasserdampf-Diffusionswiderstandes und der Schichtdicke der betrachteten Bauteilschicht und berechnet sich nach Gleichung 3.20 (Popper et al.).

Kennzahl	Bezeichnung	Einheit
Äquivalente Luftschichtdicke	s_d-Wert	[m]

$$s_d = \mu \cdot d \quad (3.20)$$

Dabei ist

- s_d die äquivalente Luftschichtdicke [m]
- μ die Wasserdampf-Diffusionswiderstandszahl [-]
- d die Dicke der Bauteilschicht [m]

Nach DIN 4108 Teil 3 wird eine Schicht als diffusionsoffen bezeichnet, wenn der s-Wert maximal 0,5 m beträgt. Der Begriff diffusionsoffen besagt, dass eine solche Bauschicht die Abtrocknung der darunter liegenden Bauteile nicht nennenswert behindert.

Als diffusionsdicht gelten hingegen Schichten mit einem s_d-Wert ab 1500 m. Diese Werte erreichen Metallfolien ab einer Dicke von 50 µm. Dampfdichte Schichten werden bei besonderen klimatischen Bedingungen wie bei Schwimmbädern oder Kühlräumen benötigt.



4 Material

4.1 Thermodynamische Kenngrößen bei Einzelmaterialien

Für die verschiedenen Materialeigenschaftsprüfungen sind an zehn industriell gefertigten Weichfaserplatten unterschiedlicher Dicke und Dichte Messungen durchgeführt worden. Von den zehn Weichfaserplatten werden zwei Produkte im Nassverfahren und acht im Trockenverfahren hergestellt. Bei einer Platte wurden an drei unterschiedlichen Dicken die Wärmeleitfähigkeit, Sorption und Diffusion untersucht. Bei einer weiteren Platte ist die Wärmeleitfähigkeit an zwei unterschiedlichen Dicken untersucht. Tabelle 4.1 zeigt eine Übersicht der verschiedenen Produkte mit den durchgeführten Materialeigenschaftsprüfungen und der Anzahl Prüfkörper.

Tabelle 4.1: Materialeigenschaftsprüfungen der Einzelmaterialien

					Materialeigenschaftsprüfungen		
Einzelmaterialien		Rohdichte	Dicke	Wärme- leitfähigkeit	Sorption/ Diffusion	Quellen und Schwinden	
Nr.	Produktnamen	ρ [kg/m ³]	d [mm]	Anzahl Prüfkörper	Anzahl Prüfkörper	Anzahl Prüfkörper	
1	Gutex	Thermosafe-homogen ¹	110	60	3	6	20
2		Multiplex-top ¹	200	35	3	6	20
3	Pavatex	Pavaflex	55	35	3	12 (beidseitig)	
4		Pavapor	135	15	3	6	20
5		Pavatherm	140	40	3	6	20
7				20			20
8		Pavaboard	210	40	3	6	
9				60	3		
10				20	3	6	
11		Isoroof-natur-KN	240	35	3	6	20
12				60	3	6	
13	Valnaturel	Isonat chanvre	35	35	3	6	
14		Isonat plus	55	35	3	6	
15	Steico	Steico universal	270	35	3	6	20
16	Spaceloft	Aerogel Vliesmatte		5		6	
17			150	10	3		
¹ im Trockenverfahren hergestellt		Anzahl gesamt		42	78	140	



4.2 Thermodynamische Kenngrößen bei Materialkombination

Tabelle 4.2 zeigt die zehn verschiedenen Materialkombinationen an welchen Wärmeleitfähigkeits- und die Diffusionsmessungen durchgeführt worden sind. Für die Messung der Wärmeleitfähigkeit wurden die Kombinationen aus denselben Platten geschichtet, welche bereits bei den Einzelmessungen verwendet worden sind, somit konnte den einzelnen Schichten der dazugehörige Einzelmesswert zugeordnet werden.

Tabelle 4.2: Materialeigenschaftsprüfungen der Materialkombinationen

			Materialeigenschaftsprüfungen	
Materialkombinationen		Rohdichte	Dicke	
Nr.	Plattenaufbau	ρ [kg/m ³]	d [mm]	
1	Multiplex-top	200	35	1
	Aerogel Vliesmatte	150	10	
	Multiplex-top	200	35	
2	Steico universal	270	35	1
	Aerogel Vliesmatte	150	10	
	Steico universal	270	35	
3	Pavatherm	140	40	1
	Aerogel Vliesmatte	150	10	
	Pavatherm	140	40	
4	Pavatherm	140	40	1
	Pavaflex	55	35	
	Pavatherm	140	40	
5	Thermosafe homogen	110	60	1
	Isonat chanvre	35	40	
	Thermosafe homogen	110	60	
6	Pavatherm	140	40	1
	Isonat chanvre	35	35	
	Pavatherm	140	40	
7	Multiplex-top	200	35	1
	Thermosafe homogen	110	60	
	Multiplex-top	200	35	
8	Isoroof-natur-KN	240	35	1
	Pavatherm	140	40	
	Isoroof-natur-KN	240	35	
9	Isoroof-natur-KN	240	35	1
	Pavaflex	55	35	
	Isoroof-natur-KN	240	35	
10	Steico universal	270	35	1
	Isonat chanvre	35	35	
	Steico universal	270	35	
Anzahl gesamt				60

5 Methoden

5.1 Wärmeleitfähigkeit

Die Prüfkörper für die Wärmeleitfähigkeitsmessung wurden mit einer Formatkreissäge auf die Masse von $500 \times 500 \text{ mm}^2$ zugeschnitten. Vor der Prüfung sind die Platten stehend und luftumspült im Normalklima von 20°C und 65% relativer Luftfeuchte bis zur Massenkonstanz konditioniert worden (Abbildung 5.1). Die Norm DIN EN ISO 15148 [5] gibt an, dass der Ausgleichszustand als erreicht gilt, wenn sich die Masse innerhalb von 24 Stunden um weniger als 0.1% verändert hat.



Abbildung 5.1: Lagerung im Klimaraum

Die Messung der Wärmeleitfähigkeit wurde mit dem Einplatten-Wärmeleitfähigkeitsmessgerät „Lambda-Meter EP 500“ der Lambda-Messtechnik GmbH, Dresden durchgeführt (Abbildung 5.2). Die Versuchsdurchführung erfolgte nach ISO 8302 [16] Wärmeschutz; Bestimmung des stationären Wärmedurchlasswiderstandes und verwandter Eigenschaften.

Eine Messung beinhaltet drei Einzelmessungen bei 10, 20 und 30°C bei einer Temperaturdifferenz von 10°C . Aus diesen drei Messwerten wird mit einer linearen Regression über die Temperatur die Wärmeleitfähigkeit bei 10°C ($\lambda_{10.\text{reg}(T)}$) und die Veränderung der thermischen Leitfähigkeit mit steigender Temperatur pro Kelvin ($\Delta\lambda_{(T)/K}$) bestimmt. Was einen absoluten λ_{10} -Wert als Resultat ergibt, welcher nach Gleichung 5.1 berechnet wird.

$$\lambda_{(T)} = \lambda_{10.\text{reg}(T)} + \Delta\lambda_{(T)/K} \cdot (T - 10) \quad (5.1)$$

Dabei ist:

T	die Temperatur [$^\circ\text{C}$]
$\lambda_{(T)}$	die Wärmeleitfähigkeit bei der Temperatur T [$\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$]
$\lambda_{10.\text{reg}(T)}$	die Wärmeleitfähigkeit der linearen Regression (10, 20, 30°C) bei 10°C [$\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$]
$\Delta\lambda_{(T)/^\circ\text{C}}$	die Veränderung der Wärmeleitfähigkeit pro Kelvin [$\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$]

Je geringer die Dicke und die Wärmekapazität des Materials sind, desto schneller kann sich ein sogenanntes eindimensionales stationäres Temperaturfeld ausbilden und desto kürzer sind die Messzeiten. Bei den vorliegenden Ergebnissen wurde die Messung beendet, wenn sich der λ_{10} -Wert innerhalb einer Stunde um weniger als um 1% verändert hat. Die Messzeit der geprüften Faserplatten lag zwischen 12 und 24 Stunden.

Bei den Faserplatten mit einer Materialrohichte unter 60 kg/m^3 war der Standard Prüfdruck von 2.5 kN/m^2 deutlich zu hoch. Unter diesem Druck haben sich diese Platten bis auf $2/3$ der Materialdicke verdichtet. Deshalb wurde dieser deutlich reduziert und auf 0.25 kN/m^2 eingestellt. Die effektive Messzone des Prüfgerätes ist eine Kreisfläche von 200 mm Durchmesser in der Mitte der Probe (Abbildung 5.3).

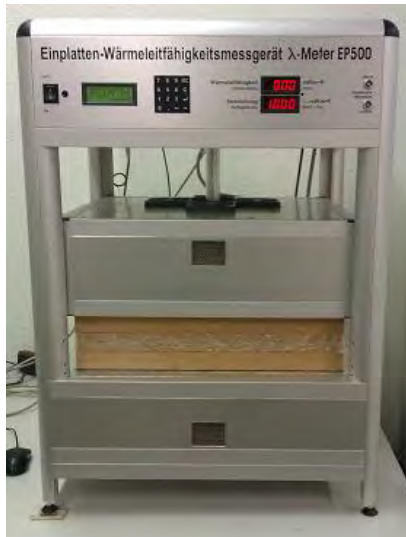


Abbildung 5.2: Lambda-Meter EP500

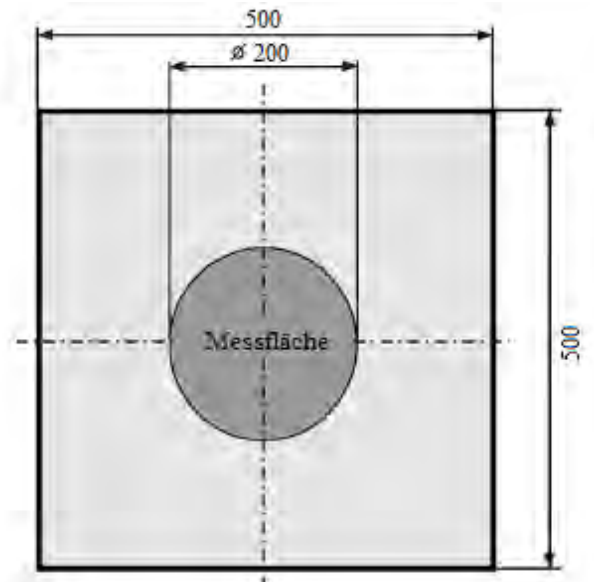


Abbildung 5.3: Effektive Messfläche des Prüfgerätes

Das äussere Material geht nicht ins Messergebnis ein. Es ist jedoch erforderlich, damit die thermischen Bedingungen geschaffen werden können, die innerhalb der Messzone das erforderliche eindimensionale stationäre Temperaturfeld sichern. Abbildung 5.4 zeigt ein solches Temperaturfeld in einer Probe während einer Messung. Mit den aussen liegenden Kühlringen kann die Schmalfläche so abgekühlt werden, dass sich die durch die Raumtemperatur bedingte erhöhte Randstirnflächentemperatur nicht ins Innere des Prüfkörpers ausbreiten kann.

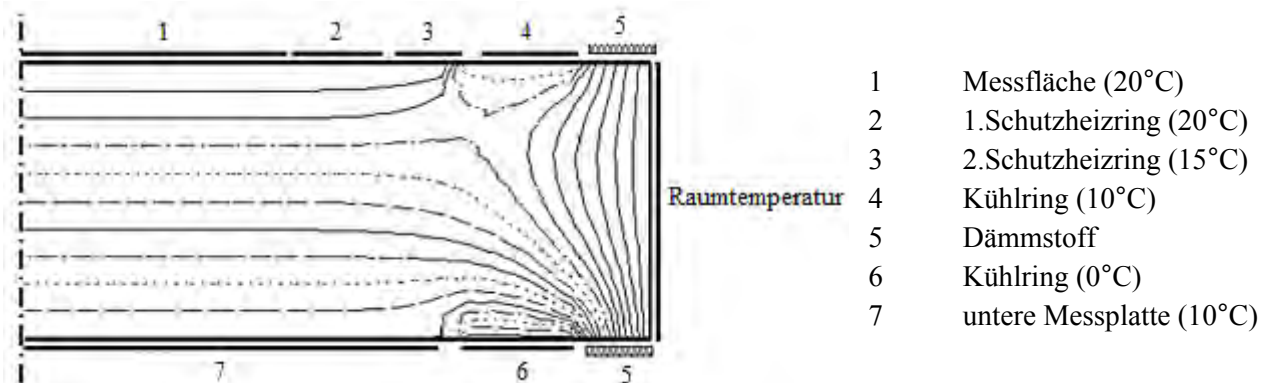


Abbildung 5.4: Temperaturfeld in der Probe bei der mittleren Temperatur (20°C) der λ_{10} -Messung

Die Querwärmeströme zwischen Messfläche und den Schutzheizringen werden mit Thermoelementen detektiert und mit den Schutzheizringen ausgeregelt.

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 Detektierung und Ausregelung der Querwärme nicht erreicht werden, was zwangsläufig zum Messabbruch führte. Die Schichtung der Materialkombinationen erfolgte ohne Klebstoff.

5.2 Wasserdampf-Diffusion

Die Messung der Wasserdampf-Diffusion wurde in Anlehnung an die Norm DIN EN ISO 12572 [11] Bestimmung der Wasserdampfdurchlässigkeit durchgeführt.

Das Messprinzip besteht darin, dass die Prüfkörper bei gleichbleibender Temperatur einer Wasserdampf-Partialdruckdifferenz ausgesetzt werden und über die Massenänderung pro Zeiteinheit die Wasserdampf-Diffusion quantifiziert werden kann. Dafür sind jeweils sechs kreisförmige Prüfkörper mit 140 mm Durchmesser in Materialdicke hergestellt worden. Für die Messung wurden diese dampfdicht auf ein Glasgefäß mit 140 mm Durchmesser und einer Höhe von 100 mm aufgesetzt und in einem auf 20°C und 65% rel. Luftfeuchte klimatisierten Raum gelagert. Die Abdichtung der Glasgefäße erfolgte mit Gummimanschetten mit einem Innendurchmesser von 139 mm und einer Höhe von 55 mm mit 1 mm Dicke. Durch den Wasserdampf-Partialdruckunterschied zwischen dem Glasgefäß und dem Prüfraum entsteht ein Dampfdiffusionsstrom durch die dampfdurchlässigen Prüfkörper. Bei der durchgeführten Diffusionsmessung sind jeweils drei Prüfkörper mit einem trockenen Prüfgefäß (Dry-Cup) und drei mit einem nassen Prüfgefäß (Wet-Cup) geprüft worden. Je nach benötigtem Wasserdampf-Partialdruckunterschied von 65 zu 0% und 65 zu 100% rel. Luftfeuchte wurden die Gläser mit Silikagel (Trocknungsmittel) für 0% rel. Luftfeuchte, respektive mit vollentsalztem Wasser für 100% rel. Luftfeuchte bis 15 mm±5 mm unterhalb des Glasrandes aufgefüllt. Was einer Abweichung der Prüfbedingungen der Norm entspricht, die den klimatisierten Raum mit 23°C±0.5 und 50% rel. Luftfeuchte angibt und im Satz A für die Dry-Cup-Versuche ein Wasserdampf-Partialdruckunterschied von 50% (50/0%) und im Satz C für die Wet-Cup-Versuche einen von 43% (50/93%) vorsieht.

Abbildung 5.5 zeigt das Prinzip der Dry- und Wet-Cup-Versuche mit den gegenläufigen Diffusionsrichtungen und den Prüfaufbau der Versuche im Klimaraum.

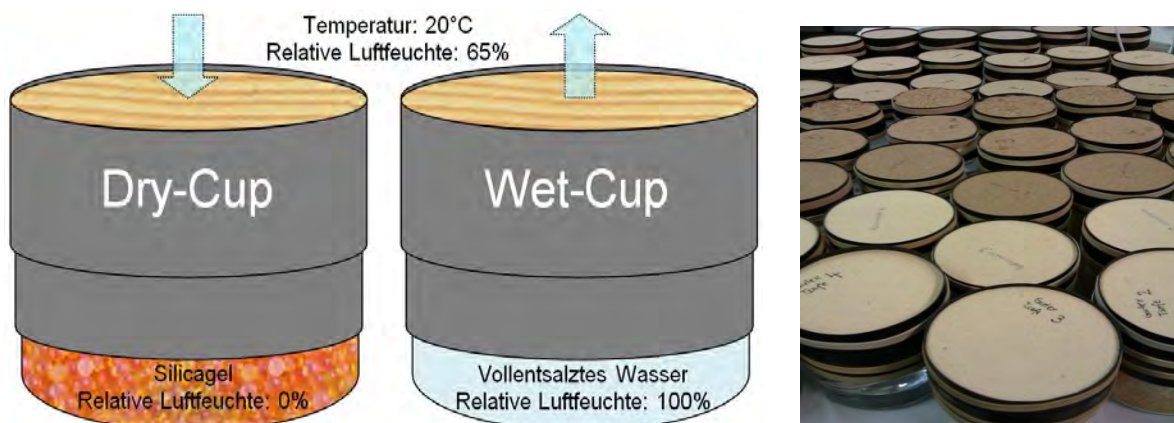
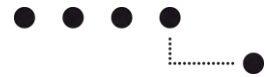


Abbildung 5.5: Prüfaufbau Dry-Cup Wet-Cup (Abbildung links von Schmidt 2010)

Durch periodisches Wägen des Prüfaufbaues kann die Wasserdampf-Diffusionsstromdichte bei einem stationären Zustand bestimmt werden. Die Norm [11] gibt vor, dass die Wägung solange vorzunehmen ist, bis sich die Massenänderung je Zeiteinheit an fünf aufeinander folgenden Messungen innerhalb von ± 10% der Masse des Prüfkörpers befindet.

Die Wägungen erfolgten während sieben Tagen und wurden am ersten Tag zwei Mal und ab dem zweiten Tag drei Mal durchgeführt. Vor Beginn und nach Abschluss der Messung wurde der Prüfkörper separat gewogen, um über die Darrmasse die Materialrohddichte vor, und den Feuchtegehalt vor und nach der Messung zu bestimmen. Die Bestimmung der Darrmasse und die Berechnung der Materialrohddichte erfolgte nach DIN 52182 [6] Prüfung von Holz; Bestimmung der Rohddichte und die des Feuchtegehaltes nach DIN 52183 [7] Prüfung von Holz; Bestimmung des Feuchtegehaltes.



Für jede Prüfanordnung ist die Massenänderung je Zeiteinheit \dot{m}_{10} zwischen den einzelnen aufeinander folgenden Wägungen nach Gleichung 5.2 berechnet worden.

$$\dot{m}_{10} = \frac{m_2 - m_1}{t_2 - t_1} \quad (5.2)$$

Dabei ist:

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

Abbildung 5.6 zeigt die resultierende Regressionsgerade zwischen Masse und Zeit der einzelnen \dot{m}_{10} -Werte am Beispiel eines Prüfkörpers beim Dry-Cup-Versuch. Die Steigung der Geraden durch die \dot{m}_{10} -Werte im linearen Bereich bezeichnet man als G und wird benötigt um die Wasserdampf-Diffusionsstromdichte zu berechnen.

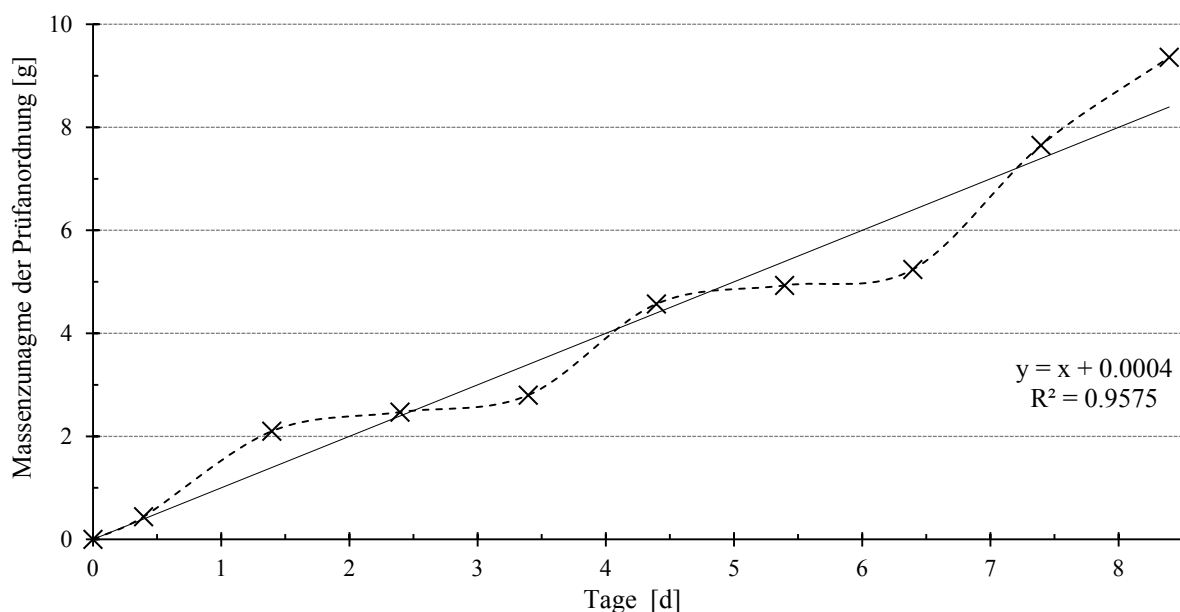


Abbildung 5.6: Verlauf der Massenänderung je Zeiteinheit

Die Wasserdampf-Diffusionsstromdichte g gibt die Wasserdampfmenge an, welche unter der Wirkung des Dampfdruckgefälles pro Zeit in Diffusionsrichtung durch die Prüffläche diffundiert und berechnet sich nach Gleichung 5.3.

$$g = \frac{G}{A} \quad (5.3)$$

Dabei ist:

- g die Wasserdampf-Diffusionsstromdichte [kg/(m² · s)]
- G entspricht \dot{m}_{10} [kg/s]
- A der arithmetische Mittelwert der freien oberen und unteren Prüffläche [m²]



Neben der Diffusionsstromdichte wird folgend der Wasserdampfdiffusions-Durchlasskoeffizient, welcher 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 Gleichung 5.4 berechnet.

$$W = \frac{G}{A \cdot \Delta p_v} \quad (5.4)$$

mit Δp_v aus Gleichung 5.5

$$\Delta p_v = p_{sat1} - p_{sat2} \quad (5.5)$$

wobei bei Temperaturen über 0°C $p_{sat1/2}$ nach Gleichung 5.6 berechnet wird.

$$p_{sat1/2} = \varphi \cdot 610.5 \cdot e^{\frac{17.269 \cdot \theta}{237.3 + \theta}} \quad (5.6)$$

Dabei ist:

W	der Wasserdampfdiffusions-Durchlasskoeffizient [$\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$]
Δp_v	die Dampfdruckdifferenz über dem Prüfkörper (Dry-Cup 1519.02, Wet-Cup 817.93) [Pa]
p_{sat1}	der Dampfdruck im Prüfgefäß [Pa]
p_{sat2}	der Dampfdruck im Klimaraum [Pa]
φ	die relative Luftfeuchte der Prüfgefäße (0, 100) resp. des Klimaraums (65) [%]
θ	die Temperatur im Klimaraum (20) [$^\circ\text{C}$]

Die Norm [11] gibt an, dass bei hochdurchlässigen Stoffen mit einem s_d -Wert ≤ 0.2 m, wie bei den geprüften porösen Holzfaserplatten, der Widerstand der Luftschicht zwischen der Unterseite des Prüfkörpers und dem Trocknungsmittel resp. der gesättigten Lösung bei der Berechnung des Wasserdampfdiffusions-Durchlasskoeffizienten W zu berücksichtigen ist (Anhang G). Der korrigierte Durchlasskoeffizient W_c berechnet sich nach Gleichung 5.7.

$$W_c = \frac{1}{\frac{A \cdot \Delta p_v}{G} \cdot \frac{d_a}{\delta_a}} \quad (5.7)$$

Dabei ist:

W_c	der korrigierte Wasserdampfdiffusions-Durchlasskoeffizient [$\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$]
d_a	die Dicke der Luftschicht [m]
δ_a	der Wasserdampfdiffusions-Leitkoeffizient der Luft nach Gleichung 5.8 [$\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$]

$$\delta_a = \frac{0.083 \cdot p_0}{R_v \cdot T \cdot p} \cdot \left(\frac{T}{273} \right)^{1.81} \quad (5.8)$$

Dabei ist:

δ_a	der Wasserdampfdiffusions-Leitkoeffizient der Luft, $2.076 \cdot 10^{-10}$ [$\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$]
p_0	der Atmosphärendruck, 1013.25 [hPa]
R_v	die spezifische Gaskonstante für Wasserdampf, 461.5 [$\text{Nm}/(\text{kg} \cdot \text{K})$]
T	die Temperatur von im Klimaraum [K]
p	der mittlere Luftdruck im Klimaraum [Pa]



Die Wasserdampf-Diffusionswiderstandszahl μ ist der bekannte dimensionslose stoffspezifische Kennwert der Diffusionsmessung, welche nach Gleichung 5.9 berechnet wird.

$$\mu = \frac{\delta_a}{\delta_{Bs}} \quad (5.9)$$

mit δ_{Bs} aus Gleichung 5.10

$$\delta_{Bs} = W_c \cdot d \quad (5.10)$$

Dabei ist:

μ	die Wasserdampf-Diffusionswiderstandszahl [-]
δ_{Bs}	der Wasserdampfdiffusions-Leitkoeffizient des Baustoff [kg/(m·s·Pa)]
d	die mittlere Dicke des Prüfkörpers [m]

Mit der Wasserdampf-Diffusionswiderstandszahl μ eines Stoffes lässt sich wasserdampfdiffusionsäquivalente Luftschichtdicke nach Gleichung 5.11 oder nach Gleichung 5.12 berechnen.

$$s_d = \mu \cdot d \quad (5.11)$$

Dabei ist:

s_d	die wasserdampfdiffusionsäquivalente Luftschichtdicke [m]
-------	---

$$s_d = \delta_a \cdot Z_c \quad (5.12)$$

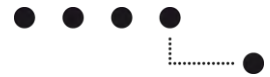
mit Z_c aus Gleichung 5.13

$$Z_c = \frac{1}{W_c} \quad (5.13)$$

Dabei ist:

Z_c	der korrigierte Wasserdampfdiffusions-Durchlasswiderstand [(m ² ·s·Pa)/kg]
-------	---

Die Diffusionsmessung bei Materialkombination wurde nach dem gleichen Versuchsprinzip durchgeführt und die Kennzahlen nach demselben Verfahren berechnet (detailliert im CD-Anhang). Da die Messung im linearen Bereich durchgeführt werden müssen, wurden die Dry- und Wet-Cup Prüfanordnungen 14 Tage lang im Klimaraum gelagert. Bei den Einzelmessungen belief sich diese Lagerung bis zum Erreichen eines linearen Feuchtedurchgangs auf sieben Tage. Da das Silikagel nach 14 Tagen sehr viel Wasser aufgenommen hatte wurde es zwei Tage vor Messbeginn ersetzt. Ebenso wurde das vollentsalzte Wasser ersetzt, da sich die Luftschicht infolge des Feuchtetransports aus dem Glas um mehr als 5 mm verändert hat und nicht mehr im geforderten Bereich von 15 mm±5 mm war. Die Schichtung erfolgte wie bei der Wärmeleitfähigkeitsmessung ohne Klebstoff.



Die Probenausmessung für die Dry- und Wet-Cup-Versuche wurde mit folgenden Geräten durchgeführt:

- Eine elektronische Messwaage: „Mettler-Toledo PM4000“, mit einer Messgenauigkeit von einem hundertstel Gramm, mit elektronischer Datenübertragung an den Computer.
- Eine Schiebelehre der Firma Mitutoyo mit einer Messgenauigkeit von einem hundertstel Millimeter
- Ein Trockenschrank der Firma Kendro Laboratory Products GmbH des Typs „Heraeus Function Line“ bei einer Temperatur von 103° Celsius.
- Ein Vakuum-Exsikkator

Weitere Materialien, welche zur Versuchsdurchführung benötigt wurden, sind:

- 60 Bechergläser
- 120 Gummimanschetten und 260 Gummiringe
- Getrocknetes Silikagel
- Vollentsalztes Wasser



Abbildung 5.7: Verwendete Geräte zur Versuchsdurchführung

5.3 Berechnung der Sorptionsgeschwindigkeit

Die Sorptionsgeschwindigkeit wurde anlehnend an die Norm DIN EN ISO 15148 [5] Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Baustoffen und Bauprodukten; „Bestimmung des Wasseraufnahmekoeffizienten bei teilweisem Eintauchen“ berechnet (detailliert im CD-Anhang). Der Versuchsaufbau zur Berechnung der Sorptionsgeschwindigkeit entspricht dem Aufbau der Diffusionsmessung. Der kennzeichnende Unterschied ist, dass im Gegensatz zur Diffusionsmessung nur der Prüfkörper und nicht der Prüfkörper zusammen mit dem gefüllten Becherglas gewogen wird (Abbildung 5.8). Diese Messung wurde vor der Diffusionsmessung mit den gleichen Prüfkörpern durchgeführt.



Abbildung 5.8: Massenbestimmung der Prüfscheibe

Um die Sorptionsgeschwindigkeit einer Probe zu bestimmen, muss die Masse des Prüfkörpers zu verschiedenen Zeitpunkten bis zum Erreichen einer linearen Feuchteauf- bzw. Abnahme gewogen werden. Ist der lineare Bereich erreicht und die Gewichtsveränderung innerhalb 24 Stunden nicht grösser als 0.1% kann diese Messung beendet, und mit der Diffusionsmessung begonnen werden. Die Messung der Feuchteauf- und abnahme zur Bestimmung der Sorptionsgeschwindigkeit kann vor der Diffusionsmessung erfolgen. Die Diffusionsmessung selbst bedingt keine vorgängige Bestimmung der Sorptionsgeschwindigkeit. Da die geprüften Dämmstoffe sehr diffusionsoffen sind und die Feuchteauf- und abnahme am Anfang der Messung sehr schnell erfolgt, wurde die Massenänderung der Prüfkörper am ersten und zweiten Tag vier Mal aufgenommen, am dritten Tag drei Mal, am vierten Tag zwei Mal und ein Mal am letzten Tag. Die Messung dauerte sieben Tage. Die Prüfkörper die den Gleichgewichtszustand vorzeitig erreicht hatten, wurden nicht ausgesondert, aber bis zum Schluss mit gemessen.

Die Differenz Δm_t zwischen der Masse bei jeder Wägung und der Ausgangsmasse bezogen auf die wasseraufnehmende Fläche, berechnet sich nach der Gleichung 5.14 und ist über der Wurzel der Wägezeit \sqrt{t} , abzutragen.

$$\Delta m_t = \frac{m_t - m_i}{A} \quad (5.14)$$

Dabei ist:

- 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 [m²]

Abbildung 5.9 zeigt links die Feuchteauf- und -abnahme über der Zeit in Stunden und rechts die Feuchteauf- und -abnahme über der Wurzel der Zeit am Beispiel eines Prüfkörpers bei den Dry- und Wet-Cup-Versuchen.

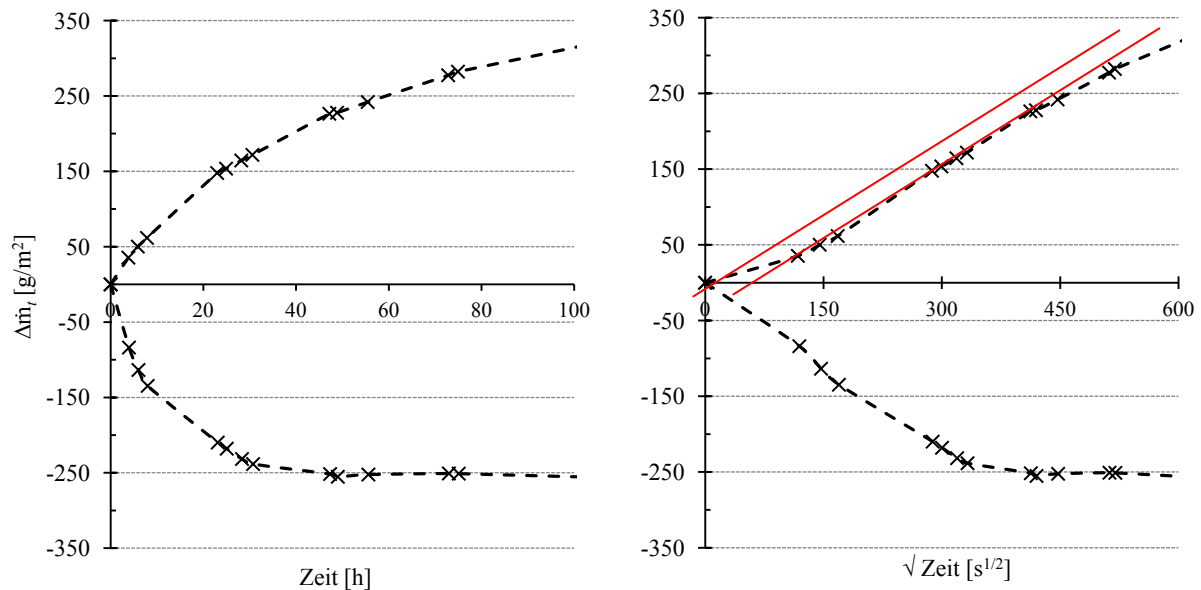


Abbildung 5.9: Feuchteauf- und -abnahme über der Zeit und über der Wurzel der Zeit

Nach einer kurzen, anfänglichen Stabilisierungsphase darf eine gerade Linie durch die Werte von Δm_t über \sqrt{t} gezeichnet werden. Diese Linie, auf den Zeitpunkt Null extrapoliert, schneidet die vertikale Achse bei Δm_0 .

Die Steigung der linearen Trendlinie entspricht dem Wasseraufnahmekoeffizienten A_w , welcher nach Gleichung 5.15 berechnet wird.

$$A_w = \frac{\Delta m_{tf} - \Delta m_{ti}}{\sqrt{t_f} - \sqrt{t_i}} \quad (5.15)$$

Dabei ist:

- A_w der Wasseraufnahmekoeffizienten [$\text{kg}_{\text{Wasser}}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{1/2})$]
- Δm_{tf} der Wert von Δm auf der Geraden zur Zeit t_f [kg/m^2]
- Δm_{ti} der Wert von Δm auf der Geraden zur Zeit t_i [kg/m^2]
- t_f die Prüfdauer [s]
- t_i die Referenzzeit [s]

Aus dem Quotienten des Wasseraufnahmekoeffizienten A_w und der Rohdichte ρ kann die dichtebereinigte Sorptionsgeschwindigkeit a_w nach Gleichung 5.16 berechnet werden.

$$a_w = \frac{A_w}{\rho} \quad (5.16)$$

Dabei ist:

- a_w die dichtebereinigte Sorptionsgeschwindigkeit [$\text{kg}_{\text{Wasser}}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{1/2}) \cdot \text{m}^3/\text{kg}_{\text{Holz}}$]
- A_w der Wasseraufnahmekoeffizient [$\text{kg}_{\text{Wasser}}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{1/2})$]
- ρ die Rohdichte des Prüfkörpers im Normalklima vor der Messung (20°C/65% r. LF) [kg/m^3]

5.4 Quellen und Schwinden

Das Quell- und Schwindverhalten wurde in Anlehnung an die Normen DIN 52184 [8] Prüfung von Holz; Bestimmung der Quellung und Schwindung und DIN EN 318 [17] Holzwerkstoffe; Bestimmung von Massänderung in Verbindung mit Änderung der relativen Luftfeuchte durchgeführt.

Die Prüfkörper der sieben ausgewählten Faserplatten wurden mit einer Formatkreissäge auf die Masse von $400 \times 20 \text{ mm}^2 \times \text{Plattendicke}$ zugeschnitten und anschliessend bis zur Massenkonstanz im Normalklima bei 20°C und 65% relativer Luftfeuchte gelagert (Abbildung 5.10). Von diesen Produkten wurden zwei im Nass- und fünf im Trockenverfahren hergestellt.



Abbildung 5.10: Quellen und Schwinden Lagerung im Klimaraum

Pro Dämmstoff wurden 20 Prüfkörper hergestellt, von denen die Hälfte in Richtung des Produktionsverlaufes (längs) und die andere Hälfte quer zum Produktionsverlauf (quer) aus der einer Platte herausgeschnitten worden sind (s. Abbildung 5.11).

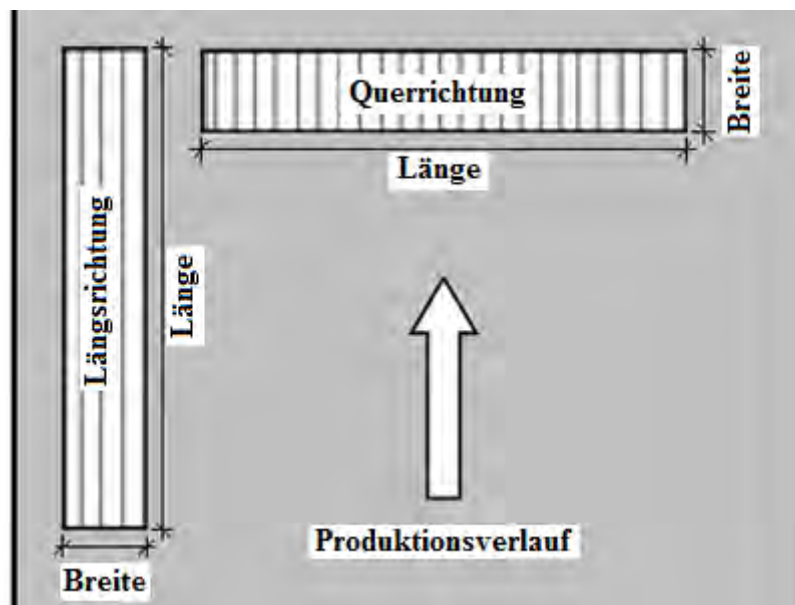


Abbildung 5.11: Definition Längs- und Querrichtung

Insgesamt wurden 10 Messungen in verschiedenen Klimastufen durchgeführt. Für die einzelne Messung wurden die Prüfkörper bis zu Massenkonstanz (Massenänderung $<0.1\%$ innerhalb 24 Stunden) in einem Klimaschrank bei 20°Celsius gelagert. In der ersten Messung wurden die

Prüfkörper von der Ausgleichsfeuchte im Normalklima auf die bei 35% rel. LF getrocknet. Ab dann wurden die Prüfkörper mit Erhöhung der relativen Luftfeuchte bis 95% befeuchtet (Adsorption) und anschliessend durch Reduzierung der relativen Luftfeuchte bis 35% wieder entfeuchtet (Desorption). Die Adsorptionsmessungen (Feuchtaufnahme) erfolgten bei 35, 50, 65, 80 und 95% rel. LF. Anschliessend wurde die Desorption (Feuchteabnahme), analog dazu, bei 95, 85, 65, 50 und 35% relativer Luftfeuchtigkeit aufgenommen. Nach Abschluss der Ad- und Desorptionsmessung wurden die Prüfkörper in einem Trockenschrank bis zur Darmasse getrocknet.

Eine Einzelmessung beinhaltet die Bestimmung der Masse um die Ausgleichsfeuchte der Klimastufe zu bestimmen sowie eine Längenmessung (l) an einem Messpunkt und eine Dickenmessung (d) und Breitenmessung (b) an drei Messpunkten. Abbildung 5.12 zeigt die definierten Messpunkte am Prüfkörper.

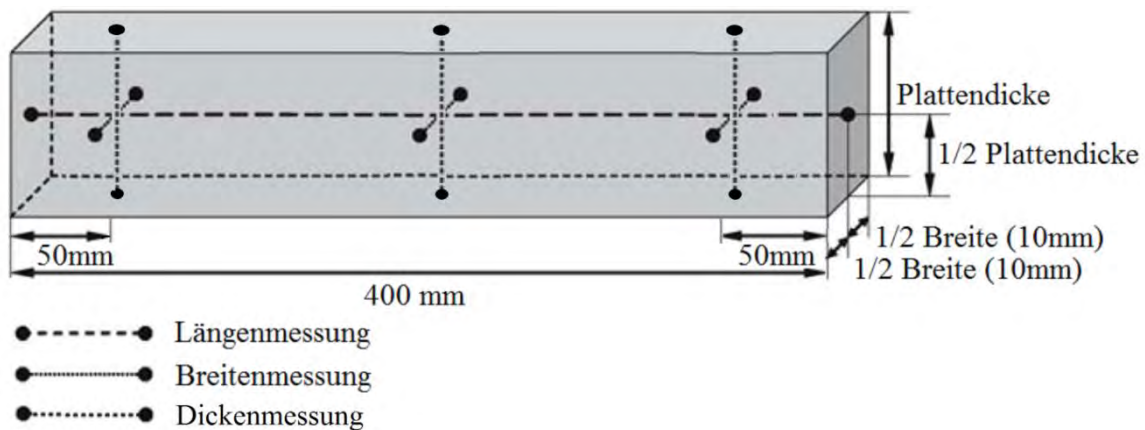


Abbildung 5.12: Messpunkte am Prüfkörper

Die Einzelmessungen wurden in fünf verschiedenen Klimaräumen mit den entsprechenden Klimastufen durchgeführt um, während des etwa 5 Stunden dauernden Messdurchganges, ein konstantes Klima beizubehalten. Dafür mussten die Prüfkörper zeitweilig aus dem Klimaschrank genommen und in den Klimaraum transportiert werden.

Über die resultierende Ausgleichsmasse wurden der Feuchtegehalt und die Rohdichte in den einzelnen Klimastufen bestimmt. Damit konnten auch die Sorptionsisothermen aller geprüften Produkte im Bereich von 0 bis 95% rel. LF bestimmt werden.

Die Messung der Länge, der Dicke und der Breite wurde mit einer Längenmesslehre und einem Dickenmessgerät (Messgenauigkeit 0.001mm) durchgeführt. Da die porösen Faserplatten über eine unebene und raue Oberfläche verfügen, wurde ein runder Messaufnehmer mit 20mm Durchmesser verwendet, womit sehr genaue Messergebnisse erzielt werden konnten (Abbildung 5.13).

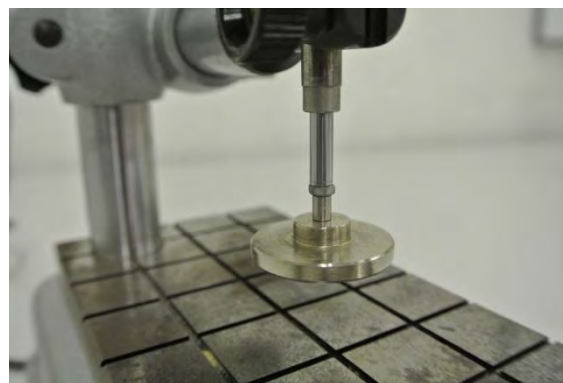


Abbildung 5.13: Messaufnehmer bei Dickenmessung



Mit den Massen der Länge, der Dicke und der Breite sind folgenden Kennzahlen berechnet worden (detailliert im CD-Anhang):

- Lineare Quell- und Schwindmasse ($\alpha_{l,d,b}$, $\beta_{l,d,b}$)
- Maximales Quell- und Schwindmass ($\alpha_{l,d,b \max}$, $\beta_{l,d,b \max}$)
- Differentielles Quellmass ($q_{l,d,b}$)
- Quellungskoeffizienten (l , d , b)

Die Berechnung der Quell- und Schwindmasse erfolgte analog zur Bestimmung der Quell- und Schwindmasse bei Vollholz nach DIN 52184 [8], welche im Kapitel 2.3.2 Quell- und Schwindverhalten detailliert beschrieben sind.

Einzig bei der differentiellen Quellung (Gleichung 2.10) wurde für l_0 nicht die Probenabmessung im darrtrocknen Zustand genommen, sondern nach Gleichung 5.17 berechnet

$$q = \frac{l_F - l_T}{l_0 \cdot (\omega_F - \omega_T)} \cdot 100 \quad (2.10)$$

Dabei ist:

- q die differentielle Quellung [%/%]
 l_F die Probenabmessung bei Ausgleichsfeuchte im Feuchtklima (bei l, d, oder b) [mm]
 l_T die Probenabmessung bei Ausgleichsfeuchte im Trockenklima (bei l, d, oder b) [mm]
 $\omega_F - \omega_T$ die Holzfeuchtedifferenz zwischen Feucht- und Trockenklima [%]
 l_0 die Probenabmessung im darrtrockenen Zustand [mm]

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 wie folgt berechnet.

$$l_0 = l_{65} - \frac{\omega_{65}}{\omega_{95} - \omega_{65}} \cdot (l_{95} - l_{65}) \quad (5.17)$$

Dabei ist:

- l_{65} die Dicke der Probe bei Ausgleichsfeuchte in 65% rel. Luftfeuchte [mm]
 l_{95} die Dicke der Probe bei Ausgleichsfeuchte in 95% rel. Luftfeuchte [mm]
 ω_{65} die Holzfeuchte bei 65% rel. Luftfeuchte [%]
 ω_{95} die Holzfeuchte bei 95% rel. Luftfeuchte [%]

Die Bestimmung der Darmasse und die Berechnung der Materialrohddichte erfolgte nach DIN 52182 [6] Prüfung von Holz; Bestimmung der Rohddichte und die des Feuchtegehaltes nach DIN 52183 [7] Prüfung von Holz; Bestimmung des Feuchtegehaltes.

Bei der Angabe der Rohddichte und des Feuchtegehalts vor der Messung sowie der Quell- und Schwindmasse der Dicke, wurde für alle 20 Prüfkörper (Längs- und Querrichtung) zusammengefasst und nicht differenziert betrachtet. Genauso wurde der Feuchtegehalt in den verschiedenen Klimastufen über alle 20 Prüfkörper zusammengefasst, da der Bezug auf den Produktionsverlauf keinen Einfluss auf die Ergebnisse hat.

Die Probenausmessung für die Berechnung der Quell- und Schwindmasse wurde mit folgenden Geräten durchgeführt:

- Eine elektronische Messwaage: „Mettler-Toledo AE200“, mit einer Messgenauigkeit von einem Milligramm, mit elektronischer Datenübertragung an den Computer.
- Eine Schiebelehre der Firma Mitutoyo mit einer Messgenauigkeit von einem hundertstel Millimeter, mit elektronischer Datenübertragung an den Computer.
- Zwei Dickenmessgeräte: Mitutoyo „Digimatic Indikator“ mit einer Messgenauigkeit von einem hundertstel Millimeter und elektronischer Datenübertragung an den Computer (Mitutoyo IT-014UT).
- Eine Längenmesslehre
- Ein Klimaschrank: Feutron KPK 200



Abbildung 5.14: Verwendete Geräte zur Versuchsdurchführung

6 Ergebnisse und Diskussion

6.1 Wärmeleitfähigkeit

Tabelle 6.1 zeigt eine Gegenüberstellung von Nenn- und Messwerten als Ergebnisübersicht der geprüften Dämmmaterialien. Der Vergleich der Messresultate (λ_{10}) mit den Nennwerten (λ_d) aus den Produktdatenblättern zeigt, dass die angegebenen λ_d -Werte im selben Bereich liegen wie die gemessenen λ_{10} -Werte und sich nicht wesentlich unterscheiden. Die λ_{10} -Messwerte reichen von 0.0132 W/(m·K) bei Aerogel bis 0.048 W/(m·K) bei Steico universal. Die maximalen Abweichungen, zwischen Nenn- und Messwert, weisen bei Isoroof 60 mm +7.7% und bei Isonat chanvre -11.4% auf.

Tabelle 6.1: Ergebnisse der Wärmeleitfähigkeitsmessung der Einzelmaterialien

Einzelmaterialien			Nennwerte ²			Ergebnisse der Einzelmessungen				
			Rohdichte ρ [kg/m ³]	Dicke d [mm]	Lambda λ_d [W/mK]	Rohdichte ρ [kg/m ³]	Dicke d [mm]	Lambda λ_{10} [W/mK]	s [W/mK]	Var [%]
Nr.	Firma									
1	Gutex	Thermosafe-homogen ¹	110	60	0.037	119	60.2	0.0376	0.230	0.61
2		Multiplex-top ¹	200	35	0.044	214	35.1	0.0469	0.385	0.82
3	Pavatex	Pavaflex	55	35	0.038	53	32.0	0.0372	0.364	0.97
4		Pavapor	135	15	0.038	155	17.2	0.0379	0.127	0.33
5		Pavatherm	140	40	0.038	149	39.4	0.0402	0.370	0.91
6		Pavaboard	210	40	0.046	216	40.6	0.0465	0.300	0.64
7			60	217		60.6	0.0468	0.260	0.56	
8		Isoroof-natur-KN	20	0.047	249	19.9	0.0463	0.210	0.45	
9			35		249	35.4	0.0476	0.115	0.24	
10			60		244	61.6	0.0505	0.165	0.32	
11	Valnaturel	Isonat chanvre	35	35	0.042	48	38.1	0.0372	0.351	0.94
12		Isonat plus	55	35	0.038	58	36.0	0.0372	0.225	0.60
13	Steico	Steico universal	270	35	0.048	289	35.4	0.0510	0.221	0.43
14	Spaceloft	Aerogel Vliesmatte	150	10	0.0132	151	8.9	0.0142	0.128	0.90

¹ im Trockenverfahren hergestellt

² gemäss Herstellerangaben

Abbildung 6.1 zeigt die Wärmeleitfähigkeit in Abhängigkeit der Rohdichte. Dabei zeigt sich, dass die Wärmeleitfähigkeit mit steigender Rohdichte zunimmt und sich die bekannte Korrelation zwischen Wärmeleitfähigkeit und Rohdichte mit einem Bestimmtheitsmass von 87,2% ergibt.

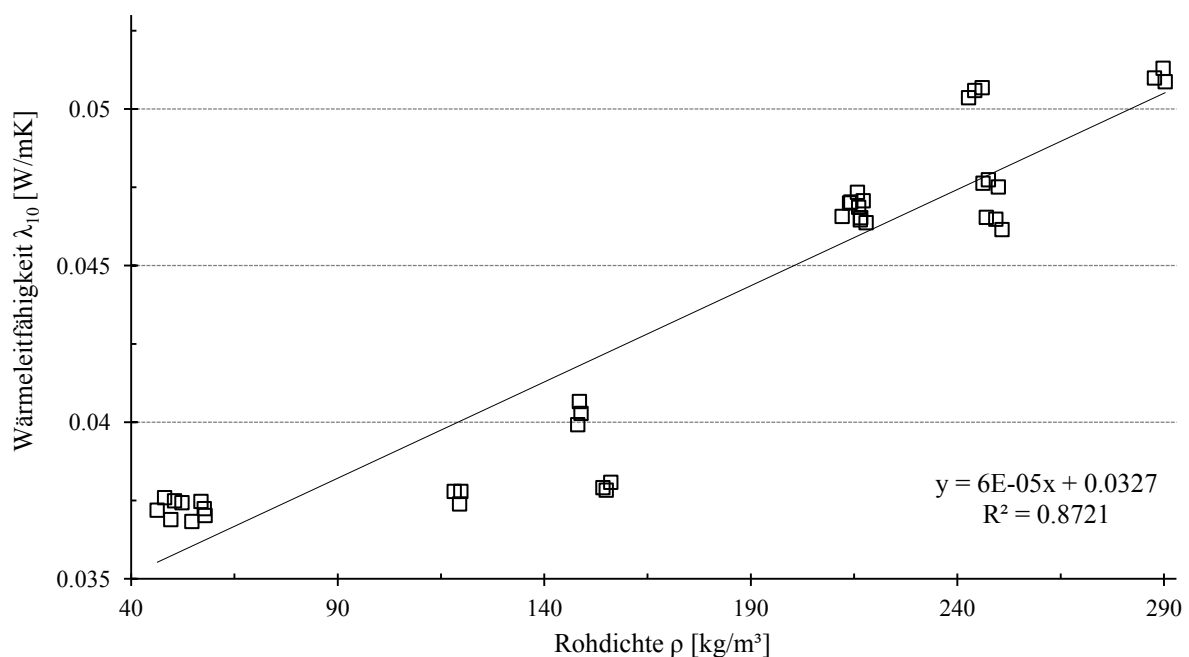


Abbildung 6.2 zeigt die Wärmeleitfähigkeit in Abhängigkeit der Rohdichte unterteilt nach Produkten. Dabei stehen die ausgefüllten Symbole für im Trockenverfahren, und die nicht ausgefüllten für im Nassverfahren, hergestellten Platten. Die drei leichtesten Platten 3, 11 und 12 (ca. 50 kg/m³) weisen mit einheitlich 0.037 W/(m·K) die tiefsten λ_{10} -Werte auf. Ebenso weist Steico universal (14) als schwerstes Produkt (ca. 290 kg/m³) den höchsten λ_{10} -Wert mit 0.051 W/(m·K) auf.

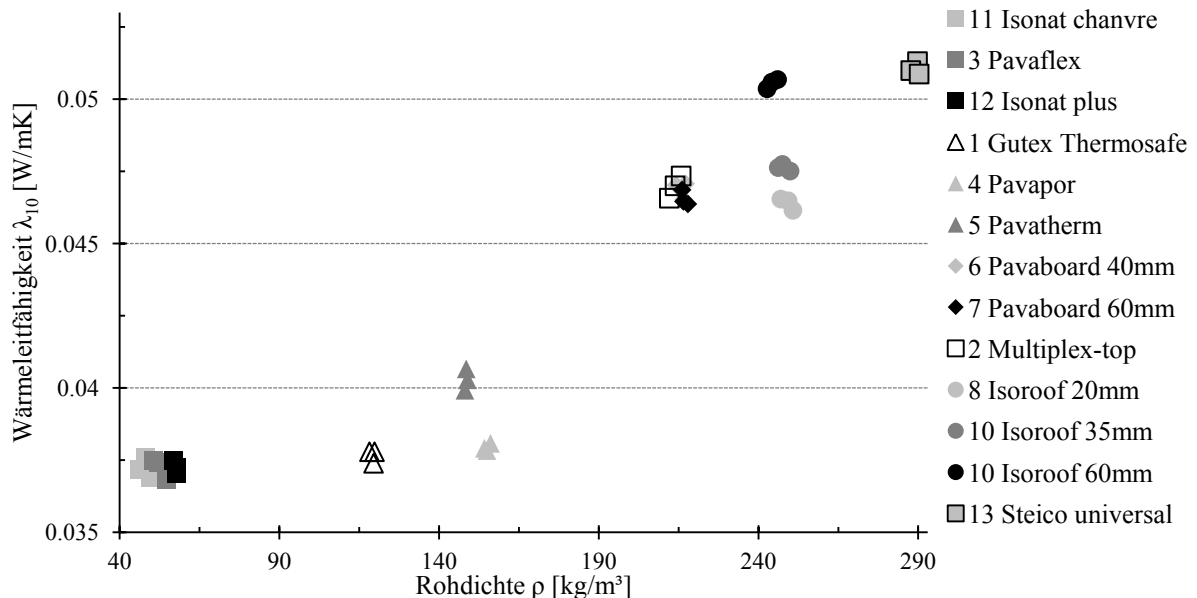


Abbildung 6.2: Wärmeleitfähigkeit in Abhängigkeit der Rohdichte nach Einzelmaterialeien

Interessant ist, dass das Produkt 1 (Trockenverfahren) obwohl es eine rund doppelt so hohe Rohdichte hat wie die Produkte 3, 11 und 12 einen λ_{10} -Wert im selben Bereich aufweist, was in erster Linie auf die Orientierung der Fasern zurückzuführen ist. Die Wärmeleitfähigkeit in Faserrichtung ist bei Massivholz etwa 2.25 bis 2.75-mal höher als senkrecht zur Faser (Kollmann und Côté 1968).

Bei den im Trockenverfahren hergestellten porösen Faserplatten, ist bedingt durch eine diffusere Faserorientierung, der Anteil an Fasern und Faserbündeln die parallel zur Plattenoberfläche ausgerichtet sind grösser als bei solchen, welche im Nassverfahren hergestellt werden. Beim Trockenverfahren wird aufgrund der Wurfstreuung nach der Blowline-Beleimung eine weniger gerichtete Faserorientierung erreicht.

Beim Nassverfahren findet im unteren Dichtebereich ein freies Abfließen des Wassers statt, was eine gerichtete Faserorientierung in Abflussrichtung, also senkrecht zur Plattenoberfläche zur Folge hat.

So ergibt sich trotz viel höherer Dichte ein verhältnismässig kleiner λ_{10} -Wert beim Produkt 2. Die Produkte 2, (Trockenverfahren) 7 und 8 (beide Nassverfahren) weisen somit ähnliche Messwerte im selben Dichtebereich auf. Höhere Dichten werden im Nassverfahren durch Abpressen des Wassers erreicht. Durch das zusätzliche Verdichten des Faserstoffes kann eine Änderung der Orientierung der Fasern vermutet werden. So müsste der Anteil der Fasern die senkrecht zur Plattenoberfläche angeordnet sind durch das Pressen abnehmen, was erklären könnte, dass die λ_{10} -Wert im gleichen Bereich sind.

Die Betrachtung der Produkte 8, 9 und 10 (alle drei Isoroof) zeigt, dass die λ_{10} -Werte mit Zunahme der Plattendicke ebenfalls zunehmen und sich von 0.0463 bis 0.0505 (W/(m·K)) verteilen. Was bei einem spezifischen Materialkennwert nicht sein dürfte. Die Produkte 9 und 10 weisen eine bzw. zwei Klebfugen auf. Somit kann ein Einfluss der Verklebung und der Anzahl Klebefugen vermutet werden. Die Verklebung dieser Platten ab Werk erfolgt mit einem geschäumten PVAc- Klebstoff linienförmig in einem Abstand von ca. 10 cm und einer Amplitude von etwa 3 cm.

Um weiter auf diese Thematik einzugehen wurde aus dem Wärmedurchlasswiderstand ($\text{m}^2 \cdot \text{K} / \text{W}$) der spezifische Wärmewiderstand ($\text{m} \cdot \text{K} / \text{W}$) auf 1m Schichtdicke berechnet und in Abhängigkeit der Rohdichte dargestellt. (Anhang 1.1). Der spezifische Wärmewiderstand verhält sich umgekehrt proportional zur Wärmeleitfähigkeit und weist eine ähnliche Korrelation zwischen spezifischem Wärmewiderstand und Rohdichte mit einem Bestimmtheitsmass von 86.8% auf.

Abbildung 6.3 zeigt den spezifischen Wärmewiderstand in Abhängigkeit zur Rohdichte nach Einzelmaterialien.

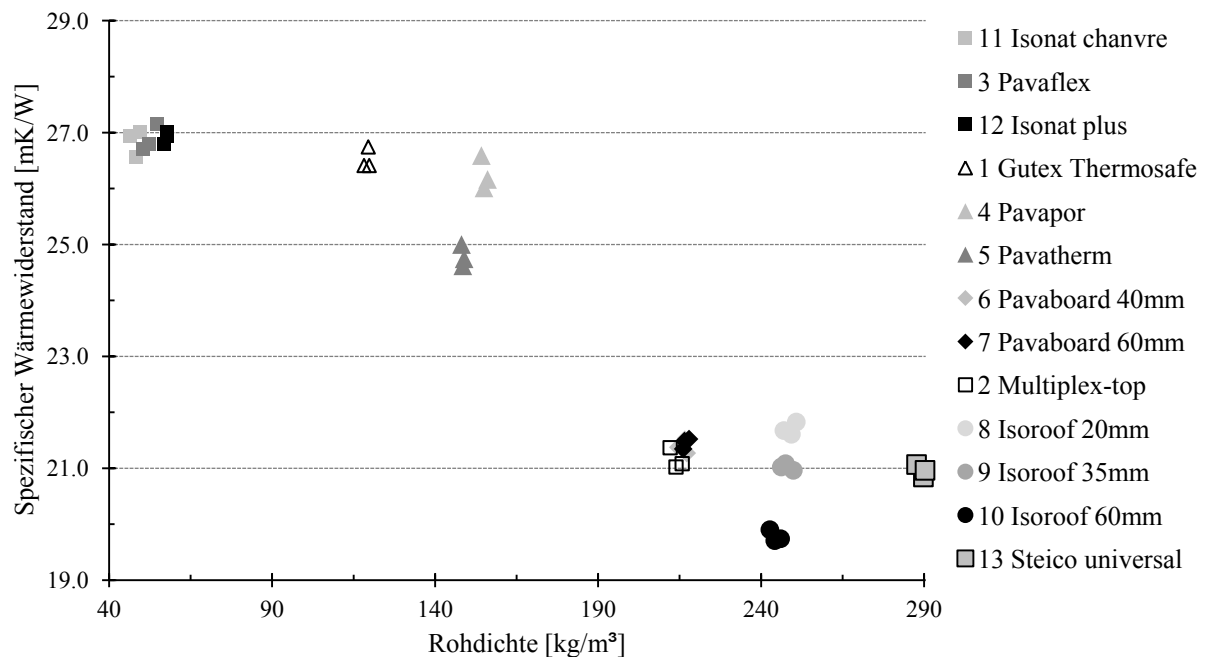


Abbildung 6.3: Spezifischer Wärmewiderstand in Abhängigkeit der Rohdichte nach Einzelmaterialien

Die Produkte 3, 11 und 12 weisen als leichteste Produkte die höchsten Werte für den spezifischen Wärmewiderstand auf. Steico universal (13) als schwerstes Produkt weist nicht wie erwartet den tiefsten spezifischen Wärmewiderstand auf. Der tiefste Wert ist bei Isoroof 60mm mit zwei Klebfugen zu finden. Wie bei der Wärmeleitfähigkeit verteilen sich die Werte bei Isoroof (8, 9, 10) in einem relativ grossen Bereich. Somit kann ein Einfluss der Verklebung und der Anzahl Klebfugen bestätigt werden. Die Verklebung dieser Platten ab Werk erfolgt mit einem geschäumten PVAc- Klebstoff linienförmig in einem Abstand von ca. 10 cm und einer Amplitude von etwa 3 cm.

Abbildung 6.4 zeigt die Wärmeleitfähigkeit in Abhängigkeit der Temperatur am Beispiel eines Prüfkörpers von Thermosafe-homogen. Dabei zeigt sich, dass die Wärmeleitfähigkeit mit steigender Temperatur zunimmt. Mit einem Bestimmtheitsmass von 99.21% offenbart sich eine sehr deutliche Korrelation zwischen Wärmeleitfähigkeit und Temperatur.

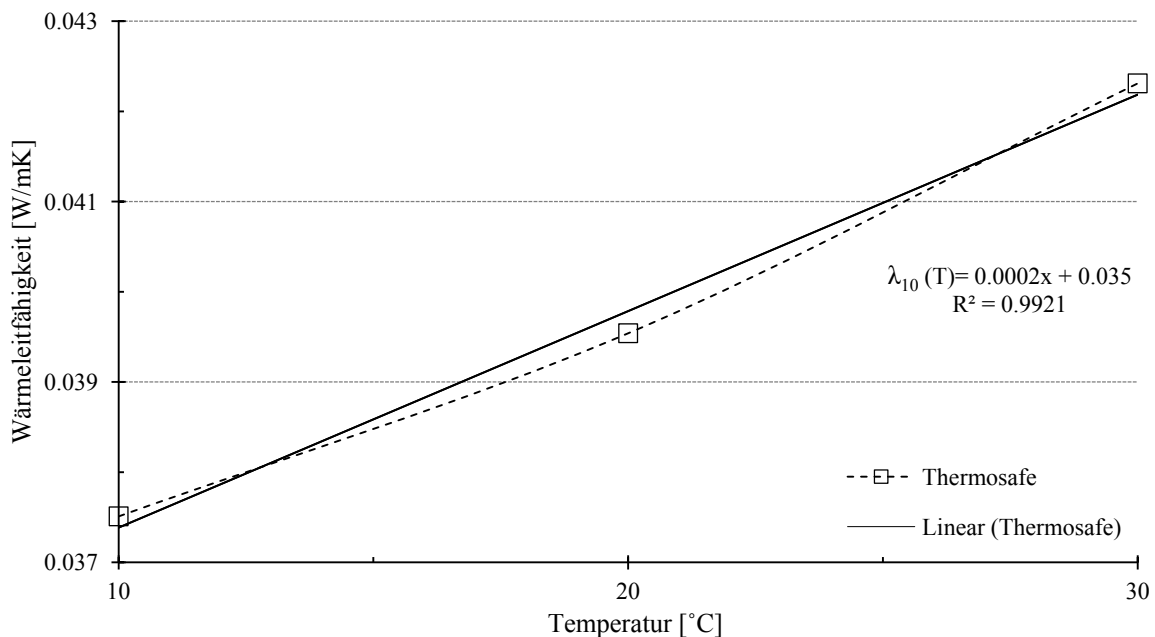


Abbildung 6.4: Wärmeleitfähigkeit in Abhängigkeit der Temperatur

Die Funktion einer Geraden ist in expliziter Form der Geradengleichung in Gleichung 6.1 dargestellt.

$$y = m \cdot x + q \quad (6.1)$$

Dabei ist:

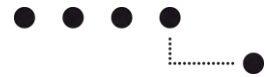
- y der Funktionswert
- m die Steigung der Geraden und $m = \tan \alpha$ (α : Steigungswinkel)
- x Wert der x-Achse
- q Schnittpunkt der y-Achse

Die Funktion der Trendlinie der Wärmeleitfähigkeit in Abhängigkeit der Temperatur ($\lambda_{10}(T)$) aller geprüften Platten wurde für die Darstellung im Anhang 1.3 wie in Gleichung 6.2 definiert.

$$\lambda_{10}(T) = A \cdot T + B \quad (6.2)$$

Dabei ist:

- $\lambda_{10}(T)$ die Trendlinie
- A die Steigung der Trendlinie
- T Wert der x-Achse [°C]
- B der y-Achsenabschnitt bei 0°C



6.2 Wärmeleitfähigkeit bei Materialkombination

Tabelle 6.2 zeigt eine Gegenüberstellung der Messergebnisse der Einzelmaterialien und der der Materialkombinationen als Übersicht. Bei den Kombinationen 1, 2 und 3 wurde als Mittellage der Hochleistungsdämmstoff Aerogel verwendet. Diese drei Kombinationen werden im weiteren Verlauf getrennt betrachtet, da diese Kombinationen nicht aus reinen Holzfaserprodukten bestehen. Innerhalb dieser drei Kombinationen hat die leichteste Kombination (3) mit einer mittleren Rohdichte von 148.8 kg/m^3 den kleinsten λ_{20} -Wert von $0.0361 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ und die Schwerste (2) mit 273.8 kg/m^3 den grössten λ_{20} -Wert mit $0.0405 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$.

Tabelle 6.2: Ergebnisse der Wärmeleitfähigkeitsmessungen der Materialkombinationen

Materialkombinationen		Ergebnisse der Einzelmessungen				Ergebnisse der Kombination			
		Rohdichte	Dicke	Lambda	R ₂₀ -Wert	Rohdichte	Dicke	Lambda	R ₂₀ -Wert
Nr.	Plattenaufbau	$\rho \text{ [kg/m}^3\text{]}$	d [mm]	$\lambda_{20} \text{ [W/mK]}$	$\text{[m}^2\text{K/m]}$	$\rho \text{ [kg/m}^3\text{]}$	d [mm]	$\lambda_{20} \text{ [W/mK]}$	$\text{[m}^2\text{K/m]}$
1	Multiplex-top	1	212	35.1	0.0473	206	79.1	0.0398	1.99
	Aerogel Vliesmatte	1	151	8.9	0.0145				
	Multiplex-top	2	213.9	35.2	0.0475				
2	Steico universal	1	290	35.5	0.0522	274	80.0	0.0405	1.98
	Aerogel Vliesmatte	1	151	8.9	0.0145				
	Steico universal	2	288	35.6	0.0521				
3	Pavatherm	1	149	39.4	0.0423	149	87.7	0.0361	2.43
	Aerogel Vliesmatte	1	151	8.9	0.0145				
	Pavatherm	3	148	39.6	0.0415				
4	Pavatherm	1	149	39.4	0.0423	118	112.9	0.0406	2.78
	Pavaflex	2	51	33.7	0.0393				
	Pavatherm	2	149	39.2	0.0418				
5	Thermosafe homogen	1	120	60.2	0.0395	102	159.6	0.0396	4.03
	Isonat chanvre	2	48	38.4	0.0392				
	Thermosafe homogen	2	120	60.2	0.0400				
6	Pavatherm	1	149	39.4	0.0423	118	113.4	0.0398	2.84
	Isonat chanvre	1	50	38.5	0.0385				
	Pavatherm	3	148	39.6	0.0415				
7	Multiplex-top	1	212	35.1	0.0473	170	130.2	0.0458	2.84
	Thermosafe homogen	3	118	60.2	0.0400				
	Multiplex-top	3	216	35.1	0.0475				
8	Isorooft-natur-KN	1	249	35.6	0.0494	214	109.7	0.0472	2.33
	Pavatherm	1	149	39.4	0.0406				
	Isorooft-natur-KN	2	249	35.4	0.0494				
9	Isorooft-natur-KN	1	249	35.6	0.0494	184	103.5	0.0464	2.23
	Pavaflex	2	51	33.7	0.0393				
	Isorooft-natur-KN	2	249	35.4	0.0494				
10	Steico universal	1	290	35.5	0.0522	205	109.8	0.0484	2.27
	Isonat chanvre	3	46	37.5	0.0388				
	Steico universal	3	290	35.3	0.0518				

Bei den Kombinationen 4 bis 10 zeigt sich, dass diese Abhängigkeit nicht zwingend von der mittleren Rohdichte, sondern vielmehr von der Rohdichte der aussen liegenden Schichten beeinflusst wird. So hat die leichteste Kombination 5 mit 101.6 kg/m^3 den kleinsten λ_{20} -Wert $0.0396 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$, aber auch die leichteste Aussenschicht. Die Kombination 10 mit der zweithöchsten mittleren Rohdichte hat mit den schwersten Aussenschichten von ca. 290 kg/m^3 den grössten λ_{20} -Wert mit $0.0484 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$.

Abbildung 6.5 zeigt die Wärmeleitfähigkeit in Abhängigkeit der Rohdichte der Kombinationen. Bei den Kombinationen 4 bis 10 (□-Symbole) im oberen Bereich ergibt sich eine deutliche Korrelation zwischen Wärmeleitfähigkeit und Rohdichte mit einem Bestimmtheitsmass von 92.5%. Die Kombinationen 1 bis 3 (Δ-Symbole) befinden sich in einem tieferen Bereich der λ_{20} -Werte und weisen ebenfalls diese Korrelation mit einem Bestimmtheitsmass von 83.5% auf.

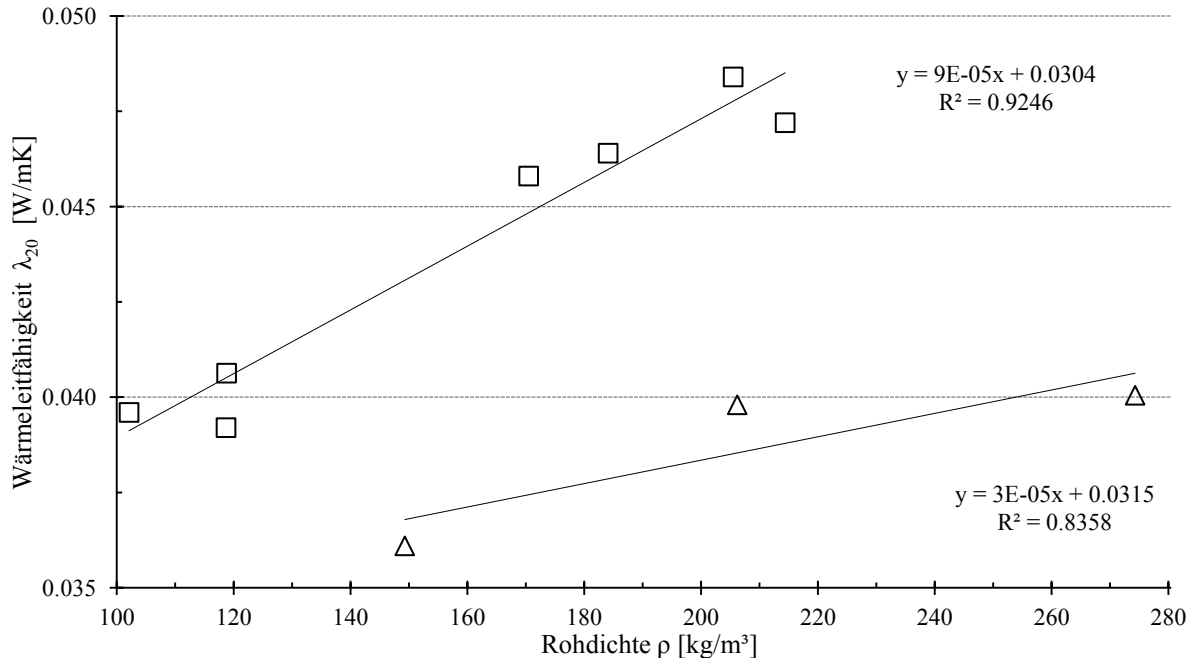


Abbildung 6.5: Wärmeleitfähigkeit in Abhängigkeit der Rohdichte bei Materialkombination

Abbildung 6.6 zeigt die gleiche Abhängigkeit mit Nummerierung der Kombinationen. Die Kombinationen 4, 5 und 6 mit den niedrigsten mittleren Rohdichten in der Gruppe von 4 bis 10 weisen die tiefsten λ_{20} -Werte im Bereich von ca. 0.040 W/(m·K) auf. Die Kombinationen 7 bis 10 im Rohdichtebereich von ca. 170 bis 220 kg/m³ haben eine Wärmeleitfähigkeit zwischen ca. 0.045 bis 0.050 W/(m·K). Die Kombination 10 mit den schwersten Aussen- und der leichtesten Innenschicht hat den grössten gemessenen λ_{20} -Wert mit 0.0484 W/(m·K). Kombination 3 mit ca. 150 kg/m³ hat mit 0.0361 W/(m·K) den kleinsten gemessenen λ_{20} -Wert.

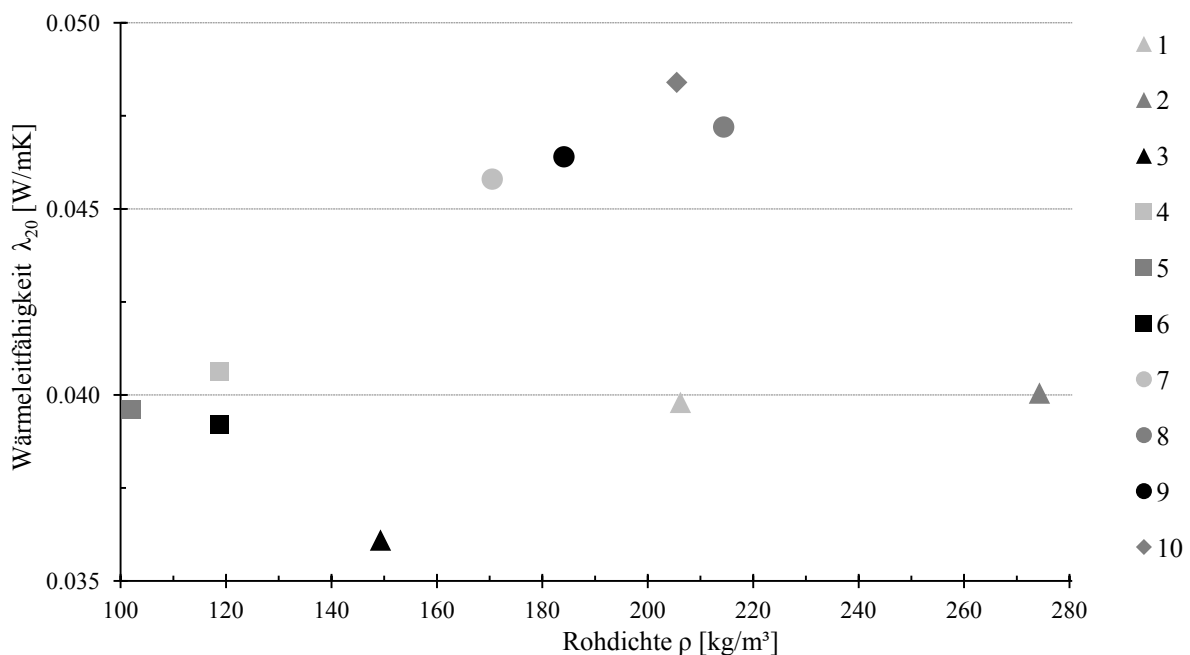


Abbildung 6.6: Wärmeleitfähigkeit in Abhängigkeit zur Rohdichte bei Materialkombination nach Kombinationen

Auch bei den Kombinationen ergibt sich die deutliche Korrelation zwischen spezifischem Wärmewiderstand und Rohdichte mit einem Bestimmtheitsmass von 81.2 bei den Kombinationen mit dem Hochleistungsdämmstoff (1-3) und bei den reinen Faserstoffkombinationen (4-10) eine von 93.8% (Anhang 1.2). Abbildung 1.4 zeigt den spezifischen Wärmewiderstand in Abhängigkeit zur Rohdichte mit Nummerierung der Kombinationen.

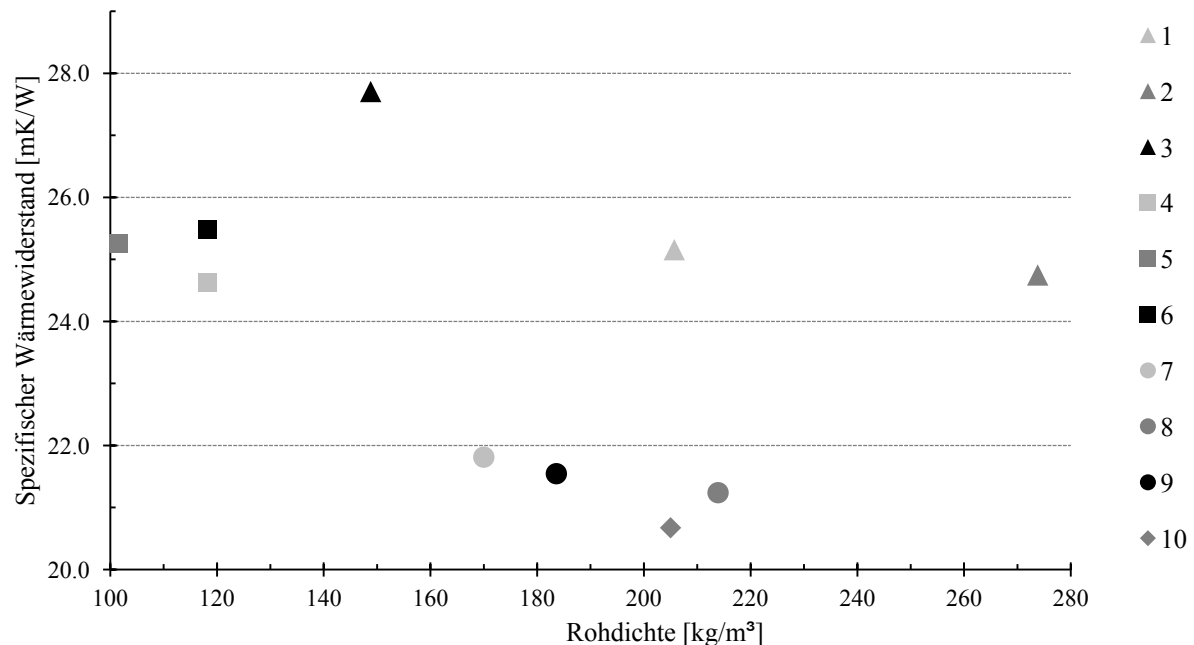


Abbildung 6.7: Spezifischer Wärmewiderstand in Abhängigkeit zur Rohdichte bei Materialkombination nach Kombinationen

Die leichteste Kombinationen (3) mit Hochleistungsdämmstoff verfügt analog zur Wärmeleitfähigkeit über den höchsten spezifischen Wärmewiderstand von 27.7 (m·K/W).

Dabei weisen die Kombinationen 1 und 2 mit einer rund doppelt so hohen Rohdichte einen spezifischen Wärmewiderstand im selben Bereich auf wie die leichtesten Kombinationen 4, 5 und 6. Die Kombination 10 weist im mittleren Bereich der Rohdichte der geprüften Kombinationen den kleinsten gemessenen spezifischen Wärmewiderstand aller Kombinationen auf.

Durch Kombination verschiedener Faserplatten konnte die geringe Wärmeleitfähigkeit der leichten Platten mit der hohen wirksamen Speichermasse der schweren Platten zusammengebracht werden, was bei Materialkombination zur Reduktion des höheren λ -Werts der schwereren Aussenschichten geführt hat. Mit dem Hochleistungsdämmstoff als Mittellage wurde die Wärmeleitfähigkeit bei einer Kombination, um 5 mW/(m K) verringert und mit einer hohen wirksamen Speichermasse ein verhältnismässig kleiner λ -Wert erzielt.

6.3 Wasserdampf-Diffusion

Tabelle 6.3 zeigt die geprüften Dämmmaterialien mit Herstellerangaben über Inhaltsstoffe und Zusätze sowie die Nennwerte der Rohdichte und der Dicke und der Wasserdampf-Diffusionswiderstandszahl. Dabei fällt auf, dass die Firma Pavatex für die Produkte 3 bis 10 für die materialspezifische Kennzahl μ unabhängig der Rohdichte einheitlich den Wert 5 angibt.

Tabelle 6.3: Herstellerangaben der geprüften Materialien

Einzelmaterialien			Nennwerte ²			
			Rohdichte	Dicke	Wasserdampf- diffusions- widerstandszahl	
						ρ [kg/m ³]
Nr.	Firma	Produktnamen	Inhaltstoffe und Zusätze			
1	Gutex	Thermosafe-homogen ¹	NH, 4% PUR Harz, 0.5% Paraffin	110	60	5
2		Multiplex-top ¹	NH, 4% PUR Harz, 1.5% Paraffin	200	35	3
3	Pavatex	Pavaflex	NH, 8% Polyolefinfasern,	55	35	5
4		Pavaflex gedreht	10% Amoniumpolyphosphat			
5		Pavapor	NH, 1% Paraffin	135	15	5
6		Pavatherm	NH, 1% Paraffin, 1.5% PVAc-Kleber	140	40	5
7		Pavaboard	NH, 5% Stärke, 0.5% Paraffin	210	40	5
8			NH, 5% Latex, 0.7% Paraffin		20	
9			Isoroof-natur-KN	0.5 PVAc-Kleber (zur Lagen- Verklebung bei 35 und 60mm)	240	35
10					60	
11	Valnaturel	Isonat chanvre	85% Hanf, 15% rezikl. Binder	35	35	2
12		Isonat plus	60% NH, 30% Hanf, 10% rezikl. Binder	55	35	2
13	Steico	Steico universal	NH, Paraffin, Aluminiumsulphat	270	35	5
14	Spaceloft	Aerogel Vliesmatte	CF, amorphe Silica, Mag.-Hydroxid	150	5	11

¹ im Trockenverfahren hergestellt
² gemäss Herstellerangaben

Beim Produkt Pavaflex, welches ein sichtbar asymmetrisches Dichteprofil aufweist, sind deutliche Unterschiede zwischen Plattenober- und unterseite zu sehen, die produktionsbedingt sind. Sie ergeben sich durch das freie Abfließen des Wassers und das schnellere Absinken der feinen Partikel zur Produktionsunterseite (bei niedriger Dichte) beim Nassverfahren. Abbildung 6.8 zeigt links die Plattenoberseite (Produktionsunterseite) mit einer sehr feinen Struktur, an welcher sich die Kontur des Siebbandes deutlich abzeichnet und rechts die Plattenunterseite (Produktionsoberseite) mit deutlich grösseren Faserstücken.

Um zu prüfen, ob die Diffusionsrichtung bei diesem Produkt einen Einfluss auf die Dampfdiffusion hat, wurden bei Pavaflex sechs zusätzliche Prüfkörper gedreht auf das Becherglas aufgebracht und gemessen.



Abbildung 6.8: Plattenoberflächen bei Pavaflex (links Oberseite, rechts Unterseite)



Tabelle 6.4 zeigt verschiedene Angaben über die Feuchteverhältnisse, sowie Feuchtegradient und Konzentrationsdifferenz aus den Messergebnissen Dry- und Wet-Cup-Versuche. Der ausgeglichene Feuchtegehalt beim Normalklima vor der Messung befand sich bei allen Produkten ausser beim Hochleistungsdämmstoff (unter 3%) in einem Bereich von ca. 8 bis 11%. Die Hanffaserprodukte 11 und 12 weisen die niedrigsten Ausgleichsfeuchten mit unter 9% auf, was auf die hydrophobe Eigenschaft des Rohstoffes Hanf zurückzuführen ist und sich positiv auf die Wasserdampf-Diffusionswiderstandszahl auswirkt, welche mit steigendem Feuchtegehalt zunimmt (Niemz, Sonderegger 2009).

Tabelle 6.4: Feuchtebezogene Angaben der Dry- und Wet-Cup-Versuche

	Dry-Cup-Versuch						Wet-Cup-Versuch					
	Feuchte ω [%]				FG [%/m]	ΔC [kg/m ³]	Feuchte ω [%]				FG [%/m]	ΔC [kg/m ³]
Nr.	vor der Messung 20°C/65%φ	nach der Messung	Δ-Feuchteabnahmen	Innenfeuchte	Feuchtegradient	Konzentrationsdifferenz	vor der Messung 20°C/65%φ	nach der Messung	Δ-Feuchtezunahme	Innenfeuchte	Feuchtegradient	Konzentrationsdifferenz
1	10.5	8.6	-1.9	6.6	-64.2	-4.2	10.5	13.1	2.6	15.6	85.5	5.6
2	10.5	8.4	-2.1	6.3	-118.7	-8.3	10.5	13.1	2.5	15.6	144.4	9.9
3	10.9	8.8	-2.1	6.7	-122.0	-1.9	11.0	15.0	4.0	19.0	231.8	3.5
4	10.6	8.4	-2.2	6.1	-125.8	-1.9	11.2	16.2	4.9	21.1	273.4	4.3
5	10.2	8.6	-1.5	7.1	-173.1	-4.2	10.1	13.1	3.0	16.1	334.0	8.0
6	10.5	8.6	-1.9	6.6	-97.4	-5.1	10.5	14.0	3.5	17.5	176.3	9.2
7	10.3	7.8	-2.5	5.3	-120.5	-9.8	10.2	14.0	3.8	17.8	184.9	15.0
8	10.6	8.5	-2.1	6.5	-203.3	-8.9	10.6	14.0	3.4	17.4	333.5	14.9
9	10.6	8.0	-2.5	5.5	-145.5	-11.5	10.5	14.2	3.7	17.9	210.3	16.7
10	10.5	7.9	-2.6	5.4	-85.2	-11.6	10.5	14.3	3.8	18.1	124.7	17.1
11	8.7	6.7	-2.0	4.7	-109.8	-2.1	8.8	11.4	2.6	14.0	139.8	2.3
12	8.1	6.2	-1.9	4.3	-105.8	-2.0	8.2	11.1	2.9	14.0	165.9	3.2
13	9.7	7.4	-2.3	5.2	-128.4	-11.9	9.8	13.8	4.0	17.8	228.4	21.2
14	2.7	2.6	-0.2	1.1	-209.7	-1.4	1.6	1.6	0.0	3.4	292.9	2.0

Der Hochleistungsdämmstoff weist den mit Abstand tiefsten Feuchtegehalt vor der Messung mit 2.7 bzw. 1.6% auf. Der Hochleistungsdämmstoff wird vom Hersteller als nanoporöse Silica-Aerogel Vliesmatte mit hydrophoben Eigenschaften deklariert, welche einen Feuchtedurchgang ohne Feuchteaufnahme ermöglicht.

Zwischen Dry- und Wet-Cup-Versuchen ist der maximale Unterschied des Feuchtegehaltes vor der Messung innerhalb eines Produktes bei 4 mit 0.6% bzw. bei 14 mit 0.9% zu finden. Bei den übrigen Produkten ist der Feuchtegehalt vor der Messung bei Dry- und Wet-Cup in einem Bereich von $\pm 0.1\%$. Bei den Dry-Cup-Versuchen 1 bis 13 befindet sich der Feuchtegehaltsunterschied Δ-Feuchteabnahme im Bereich von -1.9 bis -2.5%. Bei den Wet-Cup-Versuchen ist dieser Unterschied Δ-Feuchtezunahme höher und in einem Bereich von +2.5 bis +4.9%.

Die Innenfeuchte gibt, bei Annahme eines linearen Feuchteverlaufes durch den Prüfkörper, den Feuchtegehalt in der Plattenmitte an, welcher bei 5 am höchsten und bei 13 am tiefsten ist.



Tabelle 6.5 stellt die Ergebnisse der Dry- und Wet-Cup-Versuche dar. Der Vergleich der gemessenen Wasserdampf-Diffusionswiderstandszahlen mit dem von den Herstellern angegebenen Nennwerte zeigt, dass die Angaben zum Teil deutlich über den Messwerten liegen und als zu Allgemein bezeichnet werden dürfen. Einzig die Hanffaser-Produkte 11 und 12 sind bei Dry-Cup mit 2 sehr genau deklariert und bei Wet-Cup sogar noch tiefer als angegeben. Diese Produkte weisen zugleich die niedrigsten Messwerte für μ auf und sind somit sehr diffusionsoffen, was sich auch bei Betrachtung der s_d -Werte zeigt.

Tabelle 6.5.: Messergebnisse der Dry- und Wet-Cup-Versuche

Dry-Cup-Versuch												
Nr.	d	ρ	g	W_c	δ_{Bs}	μ	s	Var	Z	s_d	D	Km
1	60.4	119	3.72	8.62	5.21	2.4	0.01	0.6	1.16	0.146	28.34	3.05
2	35.2	219	3.94	5.30	1.86	3.9	0.02	0.4	1.89	0.138	8.79	1.74
3	34.6	50	5.23	7.16	2.47	2.9	0.09	3.3	1.40	0.100	49.68	2.26
4	35.1	48	5.22	7.27	2.55	2.9	0.05	1.7	1.38	0.100	50.59	2.18
5	17.8	150	5.18	3.68	0.65	5.6	0.16	2.9	2.72	0.101	11.63	1.58
6	39.9	147	3.72	5.68	2.26	3.7	0.05	1.3	1.76	0.146	15.12	2.01
7	41.5	216	3.26	5.12	2.12	4.1	0.19	4.7	1.95	0.169	7.29	1.42
8	20.2	239	4.94	3.96	0.79	5.2	0.05	0.9	2.53	0.106	5.89	1.27
9	34.9	251	3.22	4.25	1.48	4.9	0.09	1.9	2.36	0.171	5.12	1.16
10	60.8	247	1.86	4.12	2.5	5.1	0.26	5.1	2.43	0.307	20.33	1.14
11	36.8	55	6.35	9.73	3.57	2.1	0.09	4.1	1.03	0.079	38.30	3.03
12	36.1	56	6.34	9.83	3.54	2.1	0.06	2.8	1.02	0.076	62.07	3.18
13	35.2	289	2.60	3.39	1.19	6.1	0.16	2.6	2.95	0.216	4.04	1.06
14	4.8	151	7.84	1.31	0.062	16.0	1.75	10.9	7.65	0.056	6.65	1.01
Wet-Cup-Versuch												
Nr.	d	ρ	g	W_c	δ_{Bs}	μ	s	Var	Z	s_d	D	Km
1	60.4	120	-2.67	12.35	7.45	1.7	0.02	1.2	0.81	0.102	15.17	1.64
2	35.2	215	-2.93	8.04	2.82	2.6	0.05	2.0	1.22	0.091	5.49	1.06
3	34.6	49	-4.38	14.44	4.98	1.4	0.09	6.6	0.69	0.050	22.78	1.01
4	36.1	49	-4.30	14.25	5.15	1.5	0.06	4.0	0.71	0.053	19.21	0.83
5	17.7	149	-4.53	7.35	1.30	2.8	0.05	1.9	1.36	0.050	5.26	0.71
6	40.1	143	-2.88	9.34	3.74	2.2	0.03	1.4	1.07	0.089	6.66	0.86
7	41.4	216	-2.04	6.33	2.62	3.3	0.08	2.5	1.57	0.136	2.97	0.58
8	20.3	244	-3.34	5.58	1.13	3.7	0.08	2.3	1.79	0.076	2.39	0.52
9	35.2	250	-1.97	5.13	1.80	4.1	0.09	2.3	1.95	0.143	2.19	0.49
10	60.9	250	-1.04	4.39	2.67	4.7	0.04	0.8	2.27	0.243	1.94	0.43
11	36.9	49	-4.62	15.59	5.89	1.3	0.03	2.2	0.62	0.048	38.86	1.7
12	35.5	59	-4.51	14.97	5.31	1.4	0.03	2.2	0.66	0.049	26.32	1.43
13	35.4	288	-1.60	4.08	1.44	5.1	0.05	0.9	2.42	0.180	1.41	0.36
14	4.2	153	-6.83	1.85	0.078	11.2	0.4	4.6	5.39	0.032	24.58	3.66
Abkürzungen	Bezeichnung										Einheit	
d	Dicke										$[m] \cdot 10^{-3}$	
ρ	Rohdichte										$[kg/m^3]$	
g	Wasserdampf-Diffusionsstromdichte										$[kg/(m^2 \cdot s)] \cdot 10^{-4}$	
W_c	korrigierter Wasserdampfdiffusions-Durchlasskoeffizient										$[kg/(m^2 \cdot s \cdot Pa)] \cdot 10^{-11}$	
δ_{Bs}	Wasserdampfdiffusions-Leitkoeffizient des Baustoffes										$[kg/(m \cdot s \cdot Pa)] \cdot 10^{-12}$	
μ	Wasserdampf-Diffusionswiderstandszahl										[-]	
s	Standardabweichung										[-]	
Var	Variationskoeffizient										[-]	
Z	Wasserdampfdiffusions-Durchlasswiderstand										$[(m^2 \cdot s \cdot Pa)/kg] \cdot 10^{10}$	
s_d	wasserdampfdiffusionsäquivalente Luftschichtdicke										[m]	
D	Diffusionskoeffizient										$[m^2/s] \cdot 10^{-9}$	
Km	Diffusionszahl										$[kg/(m \cdot s)] \cdot 10^{-6}$	

Bei 3 und 4 (Pavaflex und Pavaflex gedreht) belegen die Messergebnisse, dass die Diffusionsrichtung trotz des ausgeprägten asymmetrischen Rohdichteprofiles bei diesem Produkt keinen Einfluss auf die

Wasserdampf-Diffusionswiderstandszahl hat. So ergibt sich ein μ für beide Richtungen von einheitlich 2.9 bei Dry-Cup und die Werte 1.4 und 1.5 bei Wet-Cup.

Die Rohdichte der geprüften Faserplatten befindet sich im Bereich von 49 kg/m^3 (11 Wet-Cup) bis 288.8 kg/m^3 (13 Dry-Cup). Die Wasserdampf-Diffusionsstromdichte g ist bei den diffusionsoffenen Hanffaserplatten 11 und 12 am grössten und bei 13 dem diffusionsdichtesten Produkt am kleinsten.

Bei den Produkten 8, 9 und 10 (alle drei Isorooft) zeigt sich, dass mit steigender Schichtdicke die Stromdichte abnimmt und wie bei der Messung der Wärmeleitfähigkeit ein Einfluss der Verklebung und der Anzahl der Schichten gegeben ist. Im Gegensatz dazu nimmt mit steigender Schichtdicke der Wasserdampfdiffusions-Leitkoeffizient des Dämmstoffes δ_{Bs} zu. Ebenso nimmt bei den Wet-Cup-Versuchen das μ mit steigender Schichtdicke zu. Was bei den Dry-Cup-Versuchen nicht der Fall ist und die Werte in einem relativ kleinen Bereich von 4.9 bis 5.2 liegen.

Des Weiteren wurde der Diffusionskoeffizient D und die Diffusionszahl K_m unter Annahme einer linearen Feuchteverteilung über den Probenquerschnitt berechnet und angegeben.

Abbildung 6.9 zeigt die Wasserdampf-Diffusionswiderstandszahl μ in Abhängigkeit der Rohdichte aller geprüften Dämmstoffe.

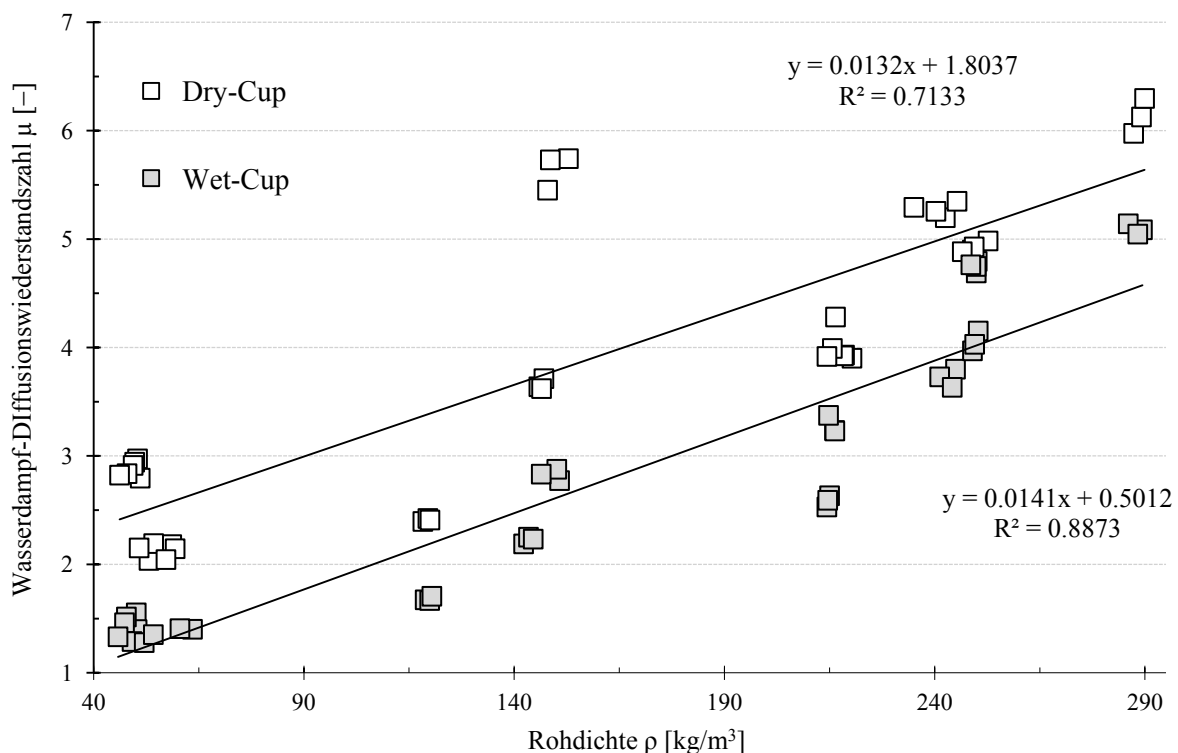


Abbildung 6.9: Wasserdampf-Diffusionswiderstandszahl in Abhängigkeit der Rohdichte

Dabei zeigt sich die bekannte Korrelation zwischen μ und der Rohdichte mit einem Bestimmtheitsmass von 71.3% bei Dry-Cup und 89% bei Wet-Cup. Die Faserplatten im Rohdichtebereich von ca. 40 bis 50 kg/m^3 wiesen bei den Dry- und Wet-Cup-Versuchen die tiefsten μ -Werte zwischen ca. 2 und 3 auf. Während bei den Wet-Cup-Versuchen Messwerte fast einheitlich bei ca. 1.5 liegen. Des Weiteren zeigt sich, dass auch beim Feuchtedurchgang ein Einfluss des Produktionsverfahrens gegeben ist. Bei im Trockenverfahren hergestellten Faserplatten (1 und 2) ergibt sich bei gleicher Rohdichte ein verhältnismässig kleinerer μ -Wert als bei den im Nassverfahren hergestellten Platten, was wiederum auf die diffusere Faserorientierung des Trockenverfahrens abgeleitet werden kann, welche den Feuchtedurchgang durch den homogenen Aufbau erleichtert.

Abbildung 6.10 zeigt die Wasserdampf-Diffusionswiderstandszahl μ in Abhängig der mittleren Rohdichte mit Bezeichnung der einzelnen Produkte. Dabei stehen die umrandeten Symbole für Wet-Cup und die nicht umrandeten für Dry-Cup-Versuche.

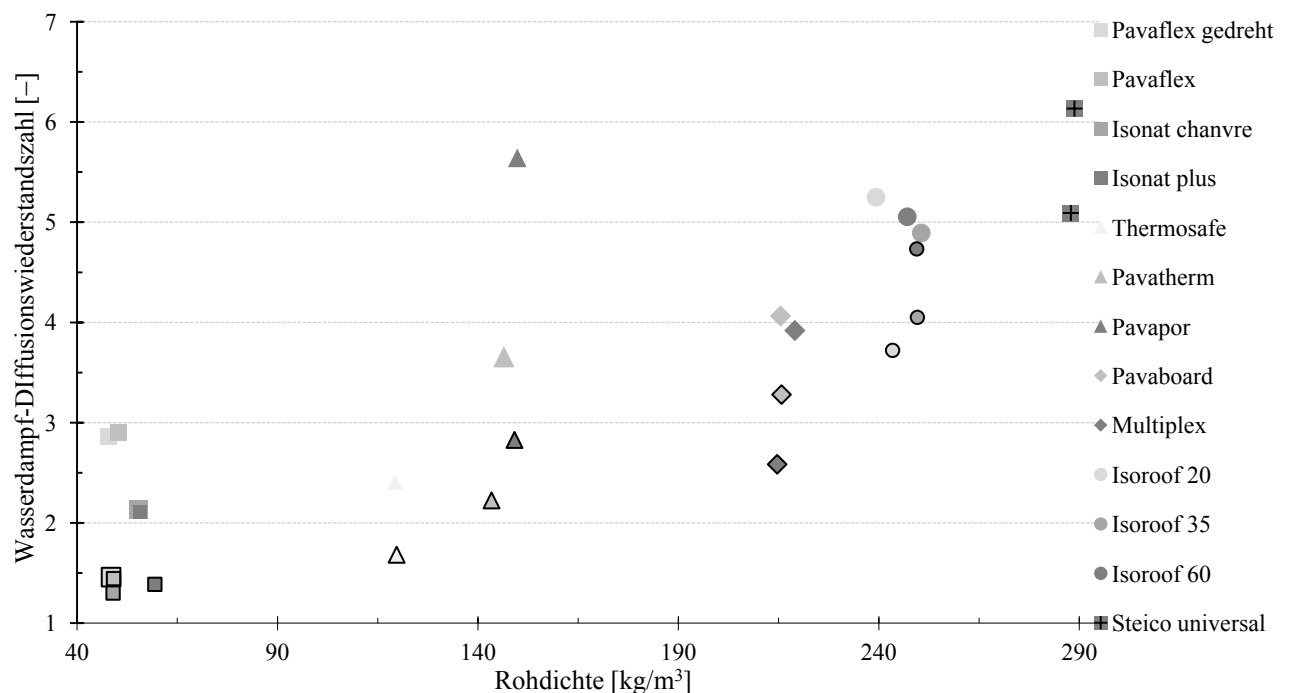


Abbildung 6.10: Wasserdampf-Diffusionswiderstandszahl in Abhängigkeit der Rohdichte nach Einzelmaterialien

Bei Betrachtung der Dry-Cup-Ergebnisse fällt auf, dass Pavapor (5) mit einer mittleren Rohdichte von 149.8 kg/m^3 und einem μ von 5.6 einen ähnlich hohen Wert wie das schwerste Produkt Steico universal (13) aufweist und fast doppelt so hoch ist, wie die Werte der anderen Platten im selben Rohdichtebereich. Bei diesem Produkt ist zudem der Unterschied zwischen Dry- und Wet-Cup mit 2.8 am grössten. Am kleinsten ist dieser Unterschied bei Isoroof 60 mit 0.4, wobei der Wert der Dry-Cup-Messung durch Schichtung des Plattenaufbaues erhöht wurde. Ebenfalls zeigen sich die verhältnismässig kleineren Werte der im Trockenverfahren hergestellten Produkte Thermosafe-homogen und vor allem Multiplex-top.

6.4 Wasserdampf-Diffusion bei Materialkombination

Tabelle 6.6 zeigt den Aufbau der geprüften Kombinationen der Dry- und Wet-Cup-Versuche mit Diffusionsrichtung durch die Probe, wobei Schicht 1 die dem Klimaraum zugewandte Lage ist. Bei den Kombinationen 1 bis 3 ist der Hochleistungsdämmstoff Aerogel als Mittellage eingesetzt worden. Die Kombinationen 1 bis 3 und 4 bis 10 wurden zudem Aufsteigend der Rohdichte sortiert.

Tabelle 6.6: Aufbau der Materialkombination

Nr.	Diffusionsrichtung		
	Dry-Cup →		Wet-Cup ←
	1	2	3
1	Pavatherm	Aerogel	Pavatherm
2	Multiplex-top ¹	Aerogel	Multiplex-top ¹
3	Steico universal.	Aerogel	Steico universal.
4	Thermosafe-homogen ¹	Pavatherm	Thermosafe-homogen ¹
5	Pavatherm	Isonat chanvre	Pavatherm
6	Pavatherm	Pavaflex	Pavatherm
7	Multiplex-top ¹	Thermosafe-homogen ¹	Multiplex-top ¹
8	Isoroof-natur-KN	Pavaflex	Isoroof-natur-KN
9	Steico universal.	Isonat chanvre	Steico universal.
10	Steico universal.	Pavatherm	Steico universal.

¹ im Trockenverfahren hergestellt

Tabelle 6.7 zeigt Schichtdicke und Rohdichte der einzelnen Lagen, die gesamte Schichtdicke sowie die mittlere Rohdichte. Die Kombinationen 1 bis 3 weisen dabei die niedrigsten Querschnitte unter 85 mm auf. Der grösste Querschnitt hat Kombination 4 mit über 156 mm. Der Rohdichtebereich aller Kombinationen befindet sich zwischen 107.8 kg/m³ (4 Dry-Cup) und 284.4 kg/m³ (3 Wet-Cup).

Tabelle 6.7: Dicke und Rohdichte der einzelnen Schichten

Dry-Cup-Versuch									Wet-Cup-Versuch							
Schichtdicke [mm]					Rohdichte [kg/m ³]				Schichtdicke [mm]				Rohdichte [kg/m ³]			
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

Die Kombination 7 ist zudem die einzige bei der die Mittelschicht 25mm dicker ist als die Aussenschichten. Die Mittelschichten aller Kombinationen ausser bei 1 haben eine tiefere Rohdichte als die Aussenschichten. Die grösste Dichtedifferenz zwischen Mittel- und Aussenschicht weisen die Kombinationen 8 und 9 mit ca. 200 und 230 kg/m³ auf.



Tabelle 6.8 zeigt verschiedene Angaben über die Feuchteverhältnisse, sowie Feuchtegradient und Konzentrationsdifferenz der Dry- und Wet-Cup-Versuche der Materialkombination. Die Ausgleichsfeuchte beim Normalklima vor der Messung befand sich bei allen Prüfkörpern im Bereich von ca. 9.5 bis 10.5%. Die Spannweite von einem Prozent ist bei den Kombinationen deutlich kleiner als bei den Einzelmessungen bei denen sich diese bei drei Prozent befand. Zwischen den Dry- und Wet-Cup-Versuchen ist der maximale Unterschied des Feuchtegehaltes vor der Messung innerhalb einer Kombination bei 1 mit 0.4% zu finden.

Tabelle 6.8: Feuchtebezogene Angaben der Dry- und Wet-Cup-Versuche der Materialkombination

Dry-Cup-Versuch									Wet-Cup-Versuch							
Feuchte ω [%]							FG [%/m]	ΔC [kg/m ³]	Feuchte ω [%]					FG [%/m]	ΔC [kg/m ³]	
Nr.	Feuchte Mittel vor der Messung 20°C/65%r. LF				Feuchte Mittel nach der Messung	Δ -Feuchteabnahme	Feuchtegradient	Konzentrationsdifferenz	Feuchte Mittel vor der Messung 20°C/65%r. LF				Feuchte Mittel nach der Messung	Δ -Feuchtezunahme	Feuchtegradient	Konzentrationsdifferenz
	Diffusion → 1 2 3								Diffusion ← 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

Bei Betrachtung der Feuchte der einzelnen Schichten nach der Messung zeigt, dass der Feuchtegehalt in Diffusionsrichtung bei den Dry-Cup-Versuchen deutlich abnimmt. Genauso deutlich nimmt der Feuchtegehalt der Schichten in Diffusionsrichtung bei den Wet-Cup-Versuchen zu.

Bei den Dry-Cup-Versuchen befindet sich der Feuchtegehaltsunterschied der mittleren Feuchte Δ-Feuchteabnahme im Bereich von -2.2 und -2.7%. Bei den Wet-Cup-Versuchen ist dieser Unterschied Δ-Feuchtezunahme wie bei den Einzelmessungen höher und im Bereich von +3.1 und +4.4.

Bei den Produkten 1 bis 3 zeigt sich, dass bei gleicher Mittelschicht. Feuchtegradient und Konzentrationsdifferenz mit steigender Rohdichte zunehmen. Bei den Kombinationen 4 bis 10 ist dieser Trend beim Feuchtegradienten nicht eindeutig zu erkennen. Ähnlich wie bei den Kombinationen der Wärmeleitfähigkeit ist nicht die mittlere Rohdichte ausschlaggebend, sondern vielmehr die der Aussenschichten, welche bei 9 mit Steico universal am schwersten ist. Auch die hohen Dichtedifferenzen zwischen Aussen- und Mittelschicht bei 8 und 9, sowie die hohe Rohdichte der Mittelschicht bei 7 und 10, erschweren einen Vergleich. Bei der Konzentrationsdifferenz trifft dieser Trend ausser bei 9 wieder zu.

Tabelle 6.9 stellt die Ergebnisse der Diffusions-Versuche der Kombination dar. Die Wasserdampf-Diffusionsstromdichte g nimmt bei allen Kombinationen mit steigender mittlerer Rohdichte ausser bei 10 ab. Der korrigierte Wasserdampf-Diffusions-Durchlasskoeffizient W_c nimmt genauso mit steigender Rohdichte ab.

Tabelle 6.9: Messergebnisse der Dry- und Wet-Cup-Versuche bei Materialkombinationen

Dry-Cup-Versuch										
Nr.	g	W_c	δ_{Bs}	μ	s	Var	Z	s_d	D	Km
1	2.07	6.35	5.36	3.3	0.08	2.6	1.57	0.276	14.44	1.94
2	2.14	5.84	4.35	3.6	0.16	4.4	1.71	0.265	9.53	1.84
3	1.21	3.24	2.42	6.4	0.14	2.2	3.09	0.480	3.70	0.95
4	1.77	9.99	0.15	2.1	0.05	2.2	1.00	0.326	34.24	3.35
5	1.93	8.14	9.44	2.6	0.04	1.7	1.23	0.296	22.32	2.32
6	1.94	8.01	9.04	2.6	0.06	2.3	1.25	0.293	20.86	2.22
7	1.57	7.38	9.60	2.8	0.02	0.7	1.36	0.366	15.38	2.41
8	1.35	5.00	5.17	4.2	0.16	3.9	2.00	0.430	7.92	1.34
9	1.14	4.33	4.63	4.8	0.36	7.5	2.31	0.514	6.40	1.22
10	1.18	4.66	5.14	4.5	0.13	3.0	2.15	0.492	7.39	1.42
Wet-Cup-Versuch										
Nr.	g	W_c	δ_{Bs}	μ	s	Var	Z	s_d	D	Km
1	1.63	9.83	8.23	2.1	0.05	2.5	1.02	0.177	7.09	0.96
2	1.67	8.68	6.50	2.4	0.05	2.2	1.15	0.179	5.32	1.04
3	0.86	4.39	3.27	4.7	0.24	5.1	2.28	0.354	1.58	0.41
4	1.20	1.30	2.03	1.6	0.04	2.7	0.77	0.279	13.98	1.40
5	1.46	1.22	1.43	1.7	0.02	1.3	0.82	0.199	10.16	1.07
6	1.50	1.21	1.36	1.7	0.00	0.2	0.83	0.194	9.56	1.02
7	1.07	9.60	1.25	2.2	0.01	0.3	1.04	0.282	7.49	1.18
8	0.97	6.99	7.29	3.0	0.08	2.7	1.43	0.310	3.90	0.66
9	0.79	5.73	6.09	3.6	0.15	4.1	1.74	0.385	2.91	0.54
10	0.85	5.08	5.63	4.1	0.06	1.5	1.97	0.454	2.78	0.54
Abkürzungen	Bezeichnung							Einheit		
d	Dicke							$[m] \cdot 10^{-3}$		
ρ	Rohdichte							$[kg/m^3]$		
g	die Wasserdampf-Diffusionsstromdichte							$[kg/m^2 \cdot s] \cdot 10^{-4}$		
W_c	der korrigierte Wasserdampfdiffusions-Durchlasskoeffizient							$[kg/(m^2 \cdot s \cdot Pa)] \cdot 10^{-11}$		
δ_{Bs}	Wasserdampfdiffusions-Leitkoeffizient des Baustoffes							$[kg/(m \cdot s \cdot Pa)] \cdot 10^{-12}$		
μ	Wasserdampf-Diffusionswiderstandszahl							[-]		
s	Standardabweichung							[-]		
Var	Variationskoeffizient							[-]		
Z	der Wasserdampfdiffusions-Durchlasswiderstand							$[(m^2 \cdot s \cdot Pa)/kg] \cdot 10^{10}$		
s_d	die wasserdampfdiffusionsäquivalente Luftschichtdicke							$[m]$		
D	Diffusionskoeffizient							$[m^2/s] \cdot 10^{-9}$		
Km	Diffusionszahl							$[kg/(m \cdot s)] \cdot 10^{-6}$		

Die Betrachtung der Wasserdampf-Diffusionswiderstandszahl μ zeigt den starken Einfluss der Rohdichte auf den Feuchtedurchgang, so nimmt das μ mit steigender Rohdichte bei allen Kombinationen deutlich zu. Die Kombination 4 ist bei den Dry- und Wet-Cup-Ergebnissen weisst mit 2.1 bzw. 1.6 den kleinsten Messwert auf und ist somit die dampfdurchlässigste Kombination bei welcher eine im Nassverfahren hergestellte Platte (Pavatherm) mit einer im Trockenverfahren (Thermosave-homogen) hergestellten kombiniert wird. Des Weiteren fällt auf, dass bei dieser Kombination trotz hoher Diffusionsoffenheit eine hohe Wasserdampfdiffusions-äquivalente Luftschichtdicke von 0.326 bzw. 0.279 m vorhanden ist, welche mit dem grössten gemessenen Querschnitt von ca. 156 mm begründet werden kann.

Abbildung 6.11 zeigt die Wasserdampf-Diffusionswiderstandszahl μ in Abhängigkeit der Rohdichte. Dabei zeigt sich die angesprochene Korrelation zwischen μ und der Rohdichte mit einem Bestimmtheitsmass von 86.1% bei Dry-Cup und 77.7% bei Wet-Cup.

Der Vergleich mit der Abbildung 6.9: Wasserdampf-Diffusionswiderstandszahl in Abhängigkeit der Rohdichte bei den Einzelmaterialelementen zeigt, dass sich die Ergebnisse der Kombinationen, im Rohdichtebereich von ca. 160 bis 220 kg/m³, z.T. überschneiden und stärker Schwanken als bei den Einzelmessungen. Im unteren Bereich der Rohdichte bis ca. 130 kg/m³ befinden sich die Wet-Cup-Ergebnisse ähnlich gestaffelt wie bei den Einzelmaterialelementen.

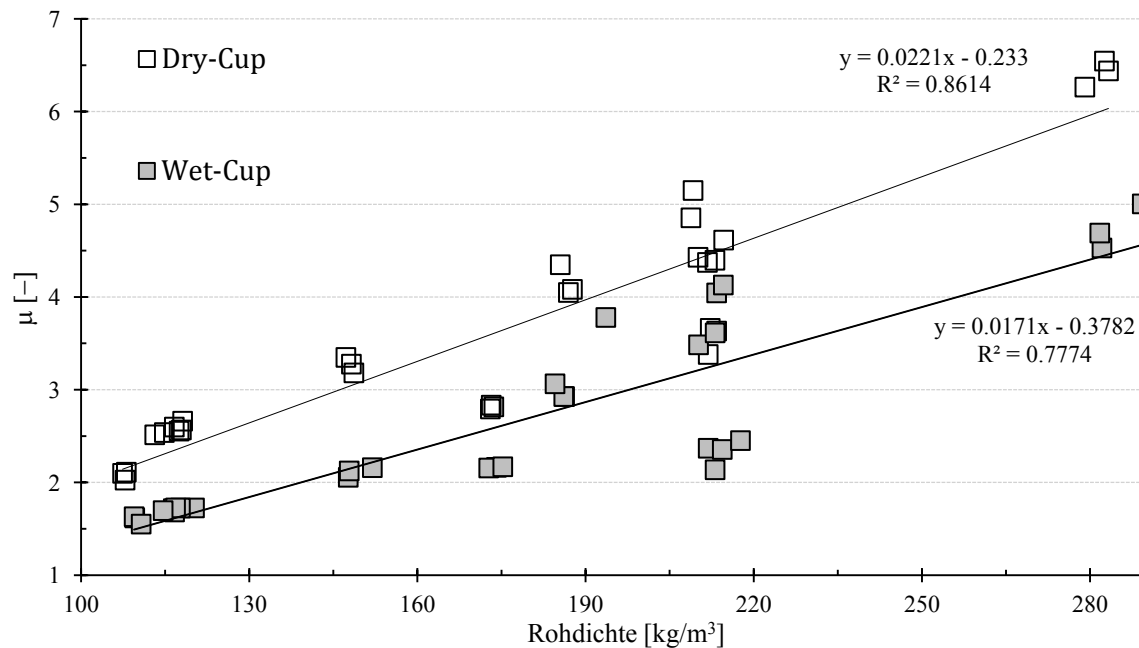


Abbildung 6.11: Wasserdampf-Diffusionswiderstandszahl in Abhängigkeit der Rohdichte bei Materialkombinationen

Abbildung 6.12 zeigt den Mittelwert der Wasserdampf-Diffusionswiderstandszahl μ in Abhängigkeit der Rohdichte mit Bezeichnung der geprüften Kombination.

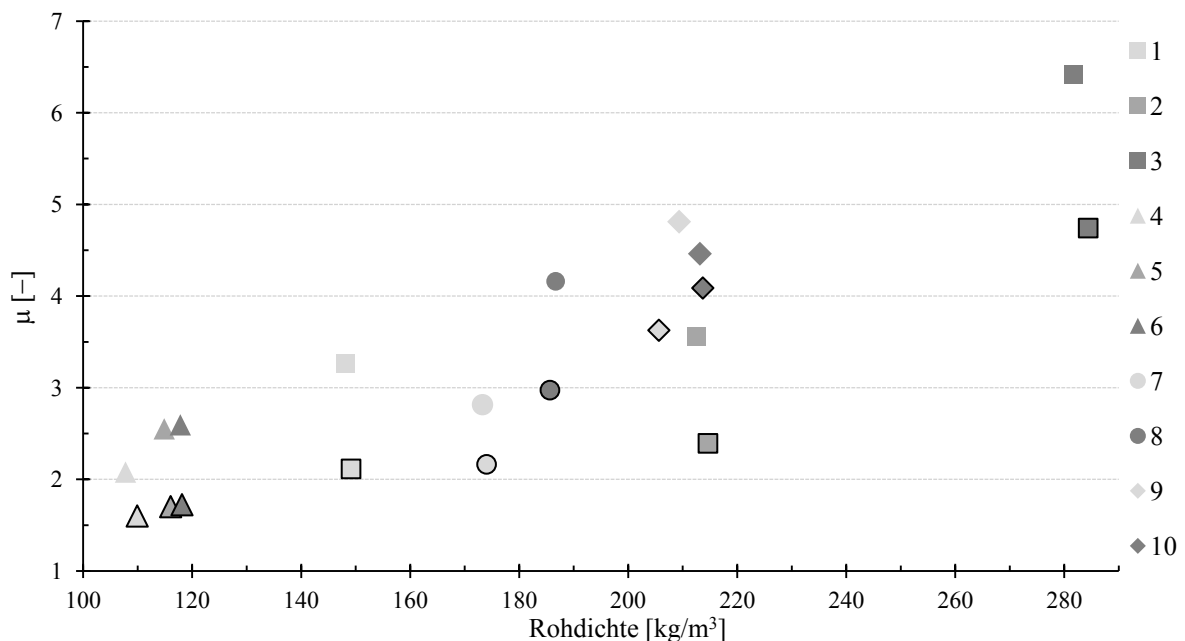


Abbildung 6.12: Wasserdampf-Diffusionswiderstandszahl in Abhängigkeit der Rohdichte bei Materialkombination

Dabei fällt auf, dass die Kombination 2 mit dem Hochleistungsdämmstoff einen verhältnismässig kleinen μ -Wert im Vergleich mit den Kombinationen im selben Rohdichtebereich aufweist.

6.4.1 Relative Luftfeuchte in den Prüfgefäßen der Wasserdampf-Diffusion

Um zu überprüfen, ob in den Prüfgefäßen tatsächlich die angenommenen relativen Luftfeuchtigkeiten von 0% und 100% erreicht werden können, wurde vor dem Zusammenbau ein Stück Fichtenholz in die Glasgefäße der Einzelmessungen gelegt. Dafür sind 48 Holzplättchen mit $20 \times 60 \times 2 \text{ mm}^3$ hergestellt worden. Die Hälfte davon wurde für die Dry-Cup-Versuche 48 Stunden in einem Darrofen auf eine Holzfeuchte von 0% getrocknet. Für die Wet-Cup-Versuche ist die andere Hälfte in einem Klimaschrank 14 Tage lang bei 20°C und 99% relativer Luftfeuchte gelagert worden. Bei den trockenen Gefäßen wurden die Plättchen auf das Silikagel gelegt und bei den nassen Gefäßen mit einem Draht auf ein Stück Polystyrol befestigt (s. Abbildung 6.13).



Abbildung 6.13: Fichtenholzplättchen beim Dry- und Wet-Cup-Versuch

Nach der Messung der Wasserdampf-Diffusion wurde die Masse dieser Holzplättchen aufgenommen und anschliessend wieder in einem Darrofen getrocknet und die Darmasse bestimmt. Mit der Masse nach der Messung und der Darmasse wurde die Holzfeuchte nach DIN 52183 [7] Prüfung von Holz; Bestimmung des Feuchtegehaltes nach Gleichung 2.1 (Kapitel: 2.3 Feuchtetechnisches Verhalten von Holz) berechnet.

$$\omega = \frac{m_{\omega} - m_{dtr}}{m_{dtr}} \cdot 100 \quad (2.1)$$

Dabei ist.

ω der Feuchtegehalt [%]

m_{ω} die Masse der feuchten Probe nach der Messung [g]

m_{dtr} die Masse der darrtrockenen Probe [g]

Über den Feuchtegehalt konnte die relative Luftfeuchte in den Prüfgefäßen näherungsweise über die Sorptionsisothermen von Sitka-Fichte aus Abbildung 2.5 (Kapitel: 2.3 Feuchtetechnisches Verhalten von Holz) herausgelesen werden.

Bei den Dry-Cup-Versuchen dürften die Holzplättchen kaum Feuchtigkeit aufnehmen, falls in der Luftschicht unterhalb der Prüfscheibe tatsächlich ein Feuchteklima von 0% vorherrscht. Die Vermutung liegt nahe, dass dies durch den Feuchteeintrag vom Klimaraum in das Prüfgefäß jedoch kaum ganz zu verhindern ist. Bei den Wet-Cup-Versuchen findet der Feuchtedurchgang aus dem Glass statt, was vermuten lässt, dass die Holzplättchen auch Feuchtigkeit abgeben.

Tabelle 6.10 zeigt die Produkte bei denen ein Holzplättchen in die Prüfgefässe gelegt wurde mit Herstellerangaben und Messwerten der Wasserdampf-Diffusion der Einzelnen Produkte.

Tabelle 6.10: Herstellerangaben und Messwerte der Dry- und Wet-Cup-Versuche

Einzelmaterialien				Nennwerte ²		Messwerte	
				Rohdichte	Dicke	Wasserdampf- diffusions- widerstandszahl	
Nr.	Firma	Produktnamen	Inhaltstoffe und Zusätze	ρ [kg/m ³]	d [mm]	μ_{dry} [-]	μ_{wet} [-]
1	Gutex	Thermosafe-homogen ¹	NH, 4% PUR Harz, 0.5% Paraffin	110	60	2.4	1.7
2		Multiplex-top ¹	NH, 4% PUR Harz, 1.5% Paraffin	200	35	3.9	2.6
3	Pavatex	Pavaflex	NH, 8% Polyolefinfasern,	55	35	2.9	1.4
4		Pavaflex gedreht	10% Amoniumpolyphosphat			2.9	1.5
5		Pavapor	NH, 1% Paraffin	135	15	5.6	2.8
6		Pavatherm	NH, 1% Paraffin, 1.5% PVAc-Kleber	140	40	3.7	2.2
7		Isoroof-natur-KN	NH, 5% Latex, 0.7% Paraffin 0.5 PVAc-Kleber	240	60	5.1	4.7
8	Steico	Steico universal	NH, Paraffin, Aluminiumsulphat	270	35	6.1	5.1

¹ im Trockenverfahren hergestellt
² gemäss Herstellerangaben

Tabelle 6.11 zeigt den berechneten Feuchtegehalt der Holzplättchen und die ungefähre relative Luftfeuchtigkeit in den Dry- und Wet-Cup-Gläsern bei 20°C.

Tabelle 6.11: Relative Luftfeuchte in den Prüfgefässen bei Dry- und Wet-Cup-Versuchen bei 20°C

		Dry-Cup-Versuche				Wet-Cup-Versuche			
		Masse		Material- feuchte	rel. Luft- feuchte	Masse		Material- feuchte	rel. Luft- feuchte
		nach der Messung	darr			ω	φ		
Nr.	Produktnamen	[g]	[g]	[%]	[%]	[g]	[g]	[%]	[%]
1	Thermosafe-homogen	2.24	2.15	4.10	ca. 17	2.62	2.16	21.33	ca. 92
		2.41	2.32	4.01		2.51	2.07	21.63	
		2.31	2.22	4.06		2.74	2.26	21.22	
2	Multiplex	2.39	2.29	4.27	ca. 17.5	2.61	2.17	20.48	ca. 90
		2.13	2.04	4.16		2.40	1.99	20.59	
		2.28	2.19	4.39		2.49	2.07	20.34	
3	Pavaflex	2.18	2.06	5.67	ca. 25.5	2.76	2.33	18.78	ca. 87
		2.21	2.10	5.39		2.30	1.95	18.02	
		2.19	2.08	5.13		2.45	2.06	18.80	
4	Pavapor	2.40	2.27	5.67	ca. 26	2.55	2.16	18.14	ca. 86.5
		2.24	2.11	5.87		2.37	2.00	18.39	
		2.08	1.96	5.81		2.32	1.96	18.23	
5	Pavatherm	2.47	2.36	4.74	ca. 18	2.58	2.15	20.23	ca. 89
		2.32	2.21	4.85		2.80	2.32	20.71	
		2.13	2.03	4.57		2.77	2.30	20.65	
6	Isoroof 60 mm	2.06	2.01	2.74	ca. 7	2.58	2.06	25.06	ca. 96
		2.17	2.11	2.90		2.62	2.10	24.82	
		2.29	2.23	2.60		2.58	2.07	24.77	
7	Steico-universal	2.17	2.10	3.28	ca. 12	2.84	2.31	22.95	ca. 95
		2.39	2.31	3.16		2.86	2.33	22.73	
		2.23	2.16	3.28		2.76	2.24	23.33	
Mittelwert		2.25	2.15	4.44	18.5	2.58	2.14	20.73	90.4
Standardabweichung		0.11	0.11	1.03	6.8	0.16	0.12	2.23	3.6
Variationskoeffizient		4.96	5.08	23.24	36.9	6.33	5.64	10.77	4.0



Die Holzfeuchte der Holzplättchen in den Dry-Cup-Prüfgefässen befindet sich zwischen 2.6% (6) und 5.9% (4) bei einer relativen Luftfeuchte von ca. 7 bis 26%. Dabei hat Isoroof 60mm (6) den grössten Querschnitt und Pavapor (4) den kleinsten Querschnitt mit ca. 15 mm. Da der Feuchteeintrag durch den Prüfkörper bei Pavapor grösser ist als bei Isoroof 60mm und mehr Feuchtigkeit im Trocknungsmittel eingelagert wird erhöht sich die relative Luftfeuchte in diesem Prüfgefäss mehr als beim diffusionsdichteren Isoroof 60mm.

Die Holzfeuchte der Holzplättchen in den Wet-Cup-Prüfgefässen befindet sich für alle im Fasersättigungsbereich von 18% (3) bis 25% (6) bei einer relativen Luftfeuchte von ca. 86.5 bis 96%. Auch bei den Wet-Cup-Versuchen hat sich im Prüfgefäss von Isoroof 60mm der höchste Wert der relativen Luftfeuchte mit ca. 97% ergeben, welcher dampfgesättigter Luft am nächsten kommt.

Ein ähnlich hoher Wert ist nur noch bei Steico-universal, dem schwersten Produkt, mit ca. 95% rel. LF zu finden.

In den Prüfgefässen der Produkte 3 und 4, den zwei resultieren Werte der relativen Luftfeuchte, welche deutlich höher bzw. tiefer als die angenommen Werte.

Allgemein müssen die Ergebnisse dieser Holzfeuchtemessung und die Bestimmung der relativen Luftfeuchtigkeit mit Vorsicht genossen werden. Zum einen ist die Bestimmung der relativen Luftfeuchte mittels Sorptionsisothermen sehr ungenau und zum anderen gilt die Bestimmung der Holzfeuchte für den Zeitpunkt direkt nach Abschluss der Messung. Die Holzfeuchte während der Messung kann auf diese Weise nicht bestimmt werden.

Trotzdem darf angenommen werden, dass die Luftfeuchten von 0% und 100% zu tief bzw. zu hoch angesetzt sind.

6.5 Berechnung der Sorptionsgeschwindigkeit

Tabelle 6.12 zeigt die geprüften Dämmmaterialien mit Herstellerangaben der Rohdichte und der Dicke sowie die Wasserdampf-Diffusionswiderstandszahl und die äquivalente Luftschichtdicke der Wasserdampf-Diffusionsmessung.

Tabelle 6.12: Herstellerangaben und Messwerte der Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl

Einzelmaterialien			Nennwerte ²		Messwerte			
			Rohdichte	Dicke	Wasserdampf- diffusions- widerstandszahl		Äquivalente Luftschichtdicke	
					μ_{dry} [-]	μ_{wet} [-]	s _d -Dry [m]	s _d -Wet [m]
Nr.	Firma	Produktnamen	ρ [kg/m ³]	d [mm]				
1	Gutex	Thermosafe-homogen ¹	110	60	2.4	1.7	0.146	0.102
2		Multiplex-top ¹	200	35	3.9	2.6	0.138	0.091
3	Pavatex	Pavaflex	55	35	2.9	1.4	0.100	0.050
4		Pavaflex gedreht			2.9	1.5	0.100	0.053
5		Pavapor	135	15	5.6	2.8	0.101	0.050
6		Pavatherm	140	40	3.7	2.2	0.146	0.089
7		Pavaboard	210	40	4.1	3.3	0.169	0.136
8			240	20	5.2	3.7	0.106	0.076
9			Isoroof-natur-KN		35	4.9	4.1	0.171
10				60	5.1	4.7	0.307	0.243
11	Valnaturel	Isonat chanvre	35	35	2.1	1.3	0.079	0.048
12		Isonat plus	55	35	2.1	1.4	0.076	0.049
13	Steico	Steico universal	270	35	6.1	5.1	0.216	0.180

¹ im Trockenverfahren hergestellt

² gemäss Herstellerangaben

Abbildung 6.14 zeigt die Feuchtauf- und abnahme über der Zeit der Einzelmaterialien beim Dry- und Wet-Cup-Versuch.

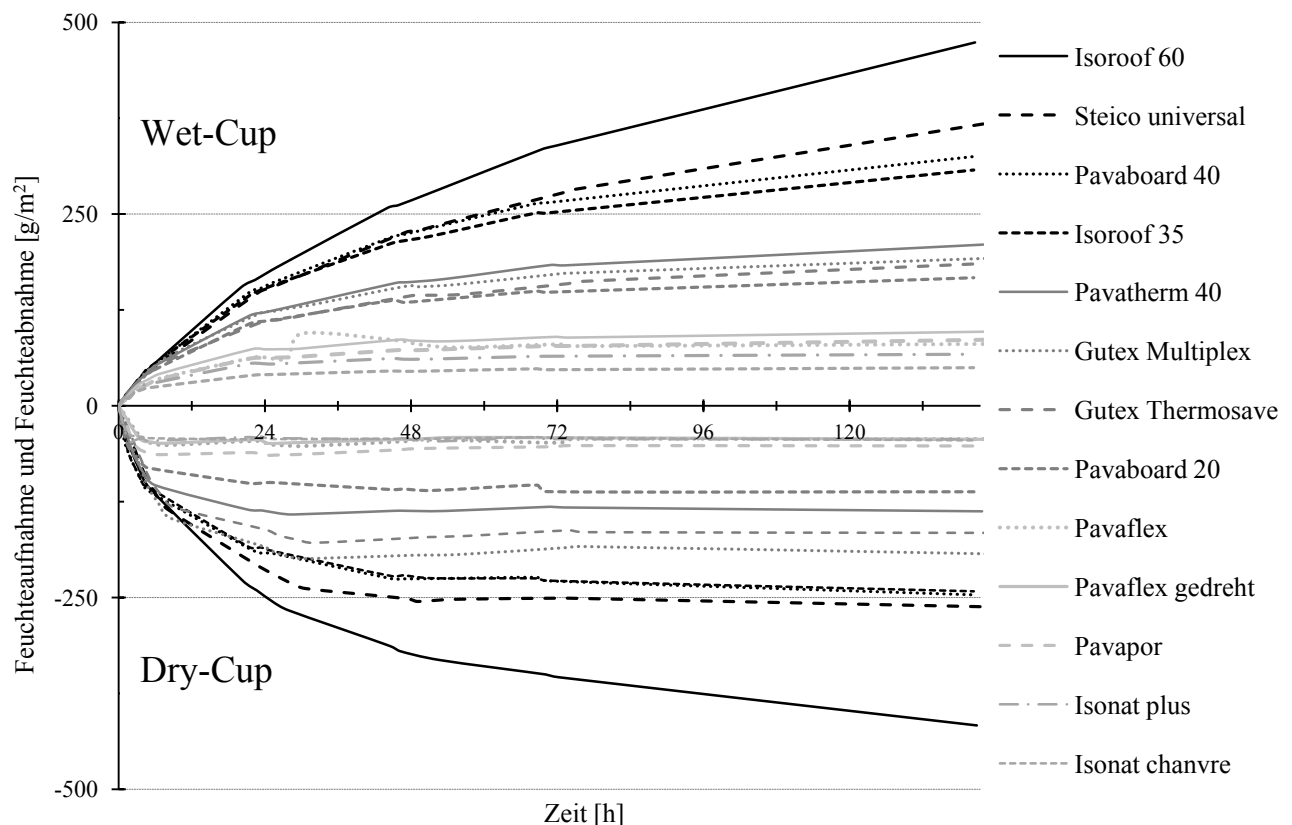


Abbildung 6.14: Feuchtauf- und abnahme bei Dry- und Wet-Cup-Versuchen

Dabei zeigt sich, dass die leichtesten Platten mit einer Rohdichte bis ca. 60kg/m^3 und Pavapor (7) mit einer Dicke von 15mm bereits nach wenigen Stunden einen linearen Feuchtedurchgang aufweisen und keine Massenänderung mehr stattfindet.

Abbildung 6.15 zeigt die Feuchteauf- und -abnahme über der Wurzel der Zeit der Einzelmaterialeien im Dry- und Wet-Cup-Versuch mit der anfänglichen Stabilisierungsphase während den ersten Stunden.

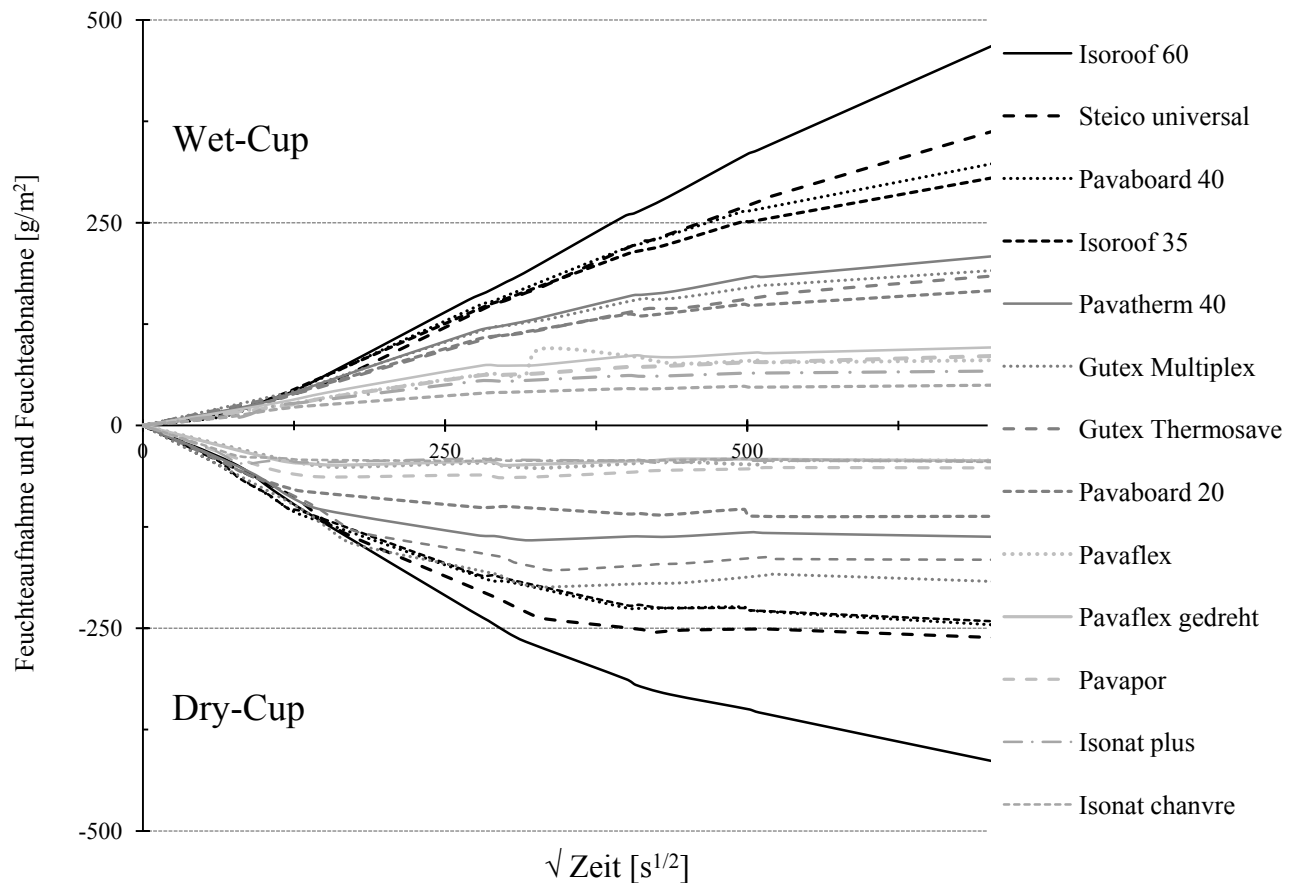


Abbildung 6.15: Feuchteauf- und -abnahme über der Wurzel der Zeit bei Dry- und Wet-Cup-Versuchen

Zwicker hat in Untersuchungen zum Diffusionsverhalten von Holz und Holzwerkstoffen (Zwicker 2008) den Wasseraufnahmekoeffizienten und die Sorptionsgeschwindigkeit bei Fichte und Buche nach dem gleichen Versuchsaufbau durchgeführt und berechnet. Tabelle 6.13 zeigt einen Auszug aus den Messergebnissen bei Fichte und im Dry- und Wet-Cup-Versuch.

Tabelle 6.13: Wasseraufnahmekoeffizient und Sorptionsgeschwindigkeit bei Fichte und Buche (Zwicker 2008)

Holzart	Richtung	Dry-Cup				Wet-Cup			
		d	ρ	A_w	a_w	d	ρ	A_w	a_w
Fichte	tangential	20.03	427	2.93	6.85	20.05	430	6.18	14.36
	radial	19.90	404	2.80	6.93	20.06	412	6.21	15.07
Buche	tangential	20.00	678	4.37	6.45	19.99	681	6.77	9.94
	radial	20.02	652	5.25	8.05	20.00	655	6.55	10.16
Abkürzungen		Bezeichnung				Einheit			
d		Dicke				[mm]			
ρ		Rohdichte				[kg/m³]			
A_w		Wasseraufnahmekoeffizient				[kg Wasser/(m²·s¹/²)] · 10⁻⁴			
a_w		Dichtebereinigte Sorptionsgeschwindigkeit				[(kg Wasser/(m²·s¹/²)) · (m³/kg Holz)] · 10⁻⁷			

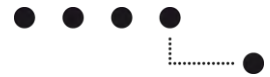


Tabelle 6.14 zeigt den Wasseraufnahmekoeffizienten und die dichtebereinigte Sorptionsgeschwindigkeit der einzelnen Platten im Dry- und Wet-Cup- Versuch. Der Wasseraufnahmekoeffizient befindet sich bei Dry-Cup im Wertebereich von 0.060 bei Isonat chanvre (8) bis 2.862 bei Isoroof 60 (10) und bei Wet-Cup in einem von 0.0455 bis 7.037 ebenfalls bei 8 und 10. Der Vergleich mit den Messergebnissen bei Fichte und Buche zeigt, dass der Wasseraufnahmekoeffizient von porösen Faserplatten deutlich kleiner ist. Einzig Isoroof 60 weist im Wet-Cup-Versuch mit 60mm Dicke einen ähnlichen Wert auf wie Fichte und Buche mit ca. 20mm.

Tabelle 6.14: Wasseraufnahmekoeffizient und Sorptionsgeschwindigkeit beim Dry- und Wet-Cup-Versuch

Einzelmaterialien		Dry-Cup			Wet-Cup		
Nr.	Produktnamen	ρ	A_w	a_w	ρ	A_w	a_w
1	Thermosafe-homogen	119	1.053	8.832	120	1.730	14.448
2	Multiplex	219	1.453	6.633	215	1.874	8.730
3	Pavaflex	50	0.278	5.512	49	0.626	12.750
4	Pavaflex gedreht	48	0.343	7.174	49	0.932	19.217
5	Pavapor	150	0.635	4.239	149	0.934	6.263
6	Pavatherm	147	0.538	3.674	144	2.469	17.219
7	Pavaboard	216	0.582	2.701	216	2.989	13.855
8	Isoroof 20	239	0.156	0.652	244	1.497	6.148
9	Isoroof 35	250	0.633	2.525	250	2.730	10.936
10	Isoroof 60	247	2.862	11.581	250	7.034	28.196
11	Isonat chanvre	55	0.060	1.076	49.0	0.455	9.294
12	Isonat plus	56	0.287	5.139	60	0.681	11.461
13	Steico universal	289	0.276	0.957	288	5.674	19.708
Abkürzungen		Bezeichnung			Einheit		
ρ		Rohdichte			$[\text{kg}/\text{m}^3]$		
A_w		Wasseraufnahmekoeffizient			$[\text{kg}_{\text{Wasser}}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{1/2})] \cdot 10^{-4}$		
a_w		bereinigte Sorptionsgeschwindigkeit			$[(\text{kg}_{\text{Wasser}}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{1/2})) \cdot (\text{m}^3/\text{kg}_{\text{Holz}})] \cdot 10^{-7}$		

Bei Isoroof (8, 9 und 10) nehmen der Wasseraufnahmekoeffizient und die Sorptionsgeschwindigkeit, wie bei der Wärmeleitfähigkeit- und der Wasserdampf-Diffusionsmessung mit steigender Schichtdicke deutlich zu. Was wiederum mit Anzahl der Schichten und Klebfugen begründet werden kann.

Bei dem im Trockenverfahren hergestellten Produkte Multiplex-top (7) zeigt sich, im Vergleich mit Pavaboard (7) im gleichen Dichtebereich, ein verhältnismässig grosser Wasseraufnahmekoeffizient, welcher um fast Faktor drei grösser ist als der von Pavaboard.

Die dichtebereinigte Sorptionsgeschwindigkeit schwankt bei Dry-Cup im relativ grossen Wertebereich von 0.0652 bei Isoroof 20mm (8) bis 11.581 bei Isoroof 60mm (10) und bei Wet-Cup in einem noch grösseren von 6.148 bis 28.196 ebenfalls bei 8 und 10.

Der Vergleich mit den Ergebnissen bei Fichte und Buche zeigt, dass das Mittel der dichtebereinigten Sorptionsgeschwindigkeit bei Faserplatten etwa dem von Fichte und Buche entspricht.



6.6 Quellen und Schwinden

6.6.1 Feuchteauf- und abgabe bei Klimawechsel

Tabelle 6.15 zeigt die für den Quell- und Schwindversuch ausgewählten Faserplatten mit Herstellerangaben über Inhaltstoffe und Zusätze sowie die Nennwerte der Rohdichte und der Dicke.

Tabelle 6.15: Einzelmaterialien der Quell- und Schwindversuche

Einzelmaterialien				Nennwerte ²	
				Rohdichte	Dicke
Nr.	Firma	Produktnamen	Inhaltstoffe und Zusätze	ρ [kg/m ³]	d [mm]
1	Gutex	Thermosafe-homogen ¹	NH, 4% PUR Harz, 0.5% Paraffin	110	60
2		Multiplex-top ¹	NH, 4% PUR Harz, 1.5% Paraffin	200	35
3	Pavatex	Pavapor	NH, 1% Paraffin	135	15
4		Pavatherm	NH, 1% Paraffin, 1.5% PVAc-Kleber	140	40
5		Pavaboard	NH, 5% Stärke, 0.5% Paraffin	210	20
6		Isoroof-natur-KN	NH, 5% Latex, 0.7% Paraffin	240	35
7	Steico	Steico universal	NH, Paraffin, Aluminiumsulphat	270	35

¹ im Trockenverfahren hergestellt

² gemäss Herstellerangaben

Tabelle 6.16 gibt die Ausgleichsfeuchte und die Normalrohddichte der verschiedenen Platten im Normalklima (20°C/ 65% r. LF) an (detailliert im Anhang 3.1). Die Ausgleichsfeuchte reicht von 10% bei Steico-universal (7) bis 11.1% bei Pavapor (3) und Pavatherm (4). Neben Steico-universal, dem schwersten Produkt, weist auch das leichteste Produkt Thermosave-homogen einen ähnlich tiefen Feuchtegehalt auf. Bei Thermosave-homogen das im Trockenverfahren hergestellt, bewirkt die diffusere Faserorientierung und der homogene Plattenaufbau, aber auch die Verwendung des PUR-Harzes einen ähnlich tiefen Feuchtegehalt wie die der rund doppelt so schweren Produkte. Alle anderen Faserplatten haben im Normalklima einen höheren Gehalt, wobei Pavapor und Pavatherm mit Dichten unter 150 kg/m³ den höchsten Feuchtegehalt aufweisen. Es zeigt sich die Tendenz, dass der Feuchtegehalt im Normalklima mit zunehmender Rohdichte abnimmt.

Tabelle 6.16: Ausgleichsfeuchte und Normalrohddichte vor der Messung

Einzelmaterialien		vor der Messung bei 20°C/65% rel. Luftfeuchte		
Nr.		Feuchte	Rohdichte	Abweichung zum Nennwert
		ω [%]	ρ [kg/m ³]	[%]
1 ¹	Thermosafe-homogen ¹	10.4	108	-1.6
2 ¹	Multiplex-top ¹	11.1	193	-3.4
3	Pavapor	11.1	132	-1.9
4	Pavatherm	11	127	-9.3
5	Pavaboard	10.9	224	+6.6
6	Isoroof-natur-KN	10.9	225	-6.25
7	Steico universal	10	264	-2.2

¹ im Trockenverfahren hergestellt

Der Vergleich mit dem Nennwert zeigt, dass die gemessene Rohdichte bei allen Produkten, ausser bei Pavaboard (5), tiefer ist als angegeben. Die Abweichung zum Nennwert der Rohdichte liegt über alle Platten betrachtet zwischen -9.3% bei Pavatherm (4) und +6.6% bei Pavaboard (5).

Tabelle 6.17 zeigt die Ausgleichsfeuchte nach der Konditionierung im Klimaschrank bei 20°C im Adsorptionsbereich von 35 bis 95% und im Desorptionsbereich von 95 bis 35% rel. LF mit Standardabweichung, Variationskoeffizient sowie die gemessenen Minimal- und Maximalwerte über alle 20 Prüfkörper.

Tabelle 6.17: Ausgleichsfeuchte in verschiedenen Klimastufen

Einzelmaterialien			relative Luftfeuchte ϕ [%] bei 20°C									
Nr.	Firma	Produktnamen	Holzfeuchte ω [%]	35	50	65	80	95	85	65	50	35
1	Gutex	Thermosafe-homogen ¹	\bar{x}	5.5	7.3	9.6	12	19.	15.9	12.5	10	7.8
			s	0.10	0.07	0.07	0.09	0.18	0.07	0.06	0.11	0.09
			Var	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.005	0.005	0.01	0.01
			Min	5.36	7.20	9.41	11.79	18.44	15.76	12.32	9.79	7.54
			Max	5.70	7.43	9.67	12.16	19.19	16.06	12.55	10.17	7.89
2		Multiplex-top ¹	\bar{x}	5.4	7.4	9.7	12.3	18.5	15.9	12.3	10.2	7.7
			s	0.05	0.03	0.06	0.07	0.09	0.06	0.03	0.05	0.05
			Var	0.01	0.004	0.01	0.01	0.005	0.004	0.003	0.01	0.01
			Min	5.28	7.31	9.58	12.18	18.29	15.77	12.27	10.04	7.64
			Max	5.43	7.41	9.76	12.41	18.64	15.94	12.39	10.20	7.82
3	Pavatex	Pavapor	\bar{x}	5.9	7.8	10.3	13.1	20.7	17.3	13.4	10.8	8.3
			s	0.18	0.21	0.18	0.16	0.22	0.17	0.16	0.20	0.17
			Var	0.03	0.03	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02
			Min	5.32	7.26	9.73	12.57	20.17	16.77	12.82	10.19	7.72
			Max	6.04	8.08	10.48	13.25	20.95	17.45	13.57	11.07	8.54
4		Pavatherm	\bar{x}	5.8	7.9	10.2	13.2	20.6	17.2	13.3	10.8	8.2
			s	0.05	0.05	0.06	0.06	0.29	0.10	0.08	0.42	0.06
			Var	0.01	0.01	0.01	0.004	0.01	0.01	0.01	0.04	0.01
			Min	5.78	7.75	10.17	13.03	20.16	17.07	13.18	9.44	8.12
			Max	5.91	7.96	10.35	13.27	21.09	17.44	13.43	11.97	8.32
5		Pavaboard	\bar{x}	6	7.9	10.3	13.2	20.6	17.4	13.5	11	8.4
			s	0.05	0.05	0.05	0.05	0.15	0.05	0.04	0.08	0.07
			Var	0.01	0.01	0.01	0.003	0.01	0.003	0.003	0.01	0.01
			Min	5.87	7.85	10.23	13.10	20.28	17.24	13.37	10.81	8.23
			Max	6.03	8.01	10.41	13.27	20.79	17.42	13.52	11.11	8.50
6		Isoroof-natur-KN	\bar{x}	5.7	7.8	10.1	12.8	19.8	16.9	13	10.5	8.2
			s	0.08	0.08	0.09	0.13	0.18	0.12	0.10	0.11	0.10
			Var	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
			Min	5.64	7.63	9.97	12.60	19.46	16.68	12.85	10.32	8.09
			Max	5.94	7.93	10.28	13.09	20.09	17.07	13.19	10.75	8.44
7	Steico	Steico universal	\bar{x}	5.3	7.2	9.5	12.3	20.7	16.5	12.6	10.1	8
			s	0.06	0.31	0.11	0.22	0.83	0.28	0.14	0.12	0.10
			Var	0.01	0.04	0.01	0.02	0.04	0.02	0.01	0.01	0.01
			Min	5.20	6.69	9.26	11.99	19.46	16.09	12.30	9.99	7.84
			Max	5.43	8.21	9.76	12.77	22.97	17.25	12.96	10.42	8.24

¹ im Trockenverfahren hergestellt

Abkürzungen

\bar{x}	Mittelwert
s	Standardabweichung
Var	Variationskoeffizient
Min	Minimalwert
Max	Maximalwert

Da sich die Ausgleichsfeuchte der verschiedenen Klimastufen über alle Produkte in einem ähnlichen Bereich befindet, wurden alle Werte zu einer mittleren Ausgleichsfeuchte zusammengefasst. Die Standardabweichung von 0.38 und der Variationskoeffizient von 0.04 über alle Klimastufen bestätigten, dass der Feuchtgehalt bei gleichem Klima relativ nahe beieinander liegt und sich nicht wesentlich unterscheidet (s. Tabelle 6.18).

Tabelle 6.18 zeigt die mittlere Ausgleichsfeuchte in den verschiedenen Klimastufen mit der resultierenden Holzfeuchteänderung zwischen dem Klimawechsel sowie der Holzfeuchteunterschied (Δ -Holzfeuchte) zwischen Adsorption und Desorption bei gleichem Klima.

Tabelle 6.18: Mittlere Ausgleichsfeuchte der Materialien

Mittelwerte Einzelmaterialien Holzfeuchte ω [%]	relative Luftfeuchte ϕ [%] bei 20°C									
	65	35	50	65	80	95	85	65	50	35
\bar{x}	10.8	5.7	7.6	10	12.7	20	16.7	12.9	10.5	8.1
s	0.38	0.24	0.28	0.34	0.46	0.83	0.59	0.44	0.37	0.24
Var	0.04	0.04	0.04	0.03	0.04	0.04	0.04	0.03	0.03	0.03
Min	10	5.3	7.2	9.5	12	18.5	15.9	12.3	10	7.7
Max	11.	6	7.9	10.4	13.2	20.7	17.4	13.5	11	8.4
Klimawechsel	-	65/35	35/50	50/65	65/80	80/95	95/85	85/65	65/50	50/35
Holzfeuchteänderung		-5.1	+2	+2.3	+2.7	+7.3	-3.3	-3.8	-2.4	-2.4
Δ -Holzfeuchte Adsorption / Desorption		2.4	2.9	3	-	0.00	-	3	2.9	2.4

Abkürzungen	
\bar{x}	Mittelwert
s	Standardabweichung
Var	Variationskoeffizient
Min	Minimalwert
Max	Maximalwert

Abbildung 6.16 zeigt die mittleren Sorptionsisothermen der Adsorption und Desorption, welche den für Holz typischen s-förmigen Verlauf aufweisen. Dabei sind die Isotherme der Adsorption und die der Desorption nicht deckungsgleich. Nach Niemz ist der sich einstellende Feuchtegehalt bei der Desorption von Massivholz, aufgrund des Hystereseeffektes, um 1 bis 2% kleiner als der bei der Adsorption, physikalisch sei dieser Vorgang aber noch nicht eindeutig geklärt (Niemz 1993). Bei den geprüften Faserplatten ist dieser Unterschied (Δ -Holzfeuchte) etwas höher und bei 65% rel. LF mit 3% am grössten.

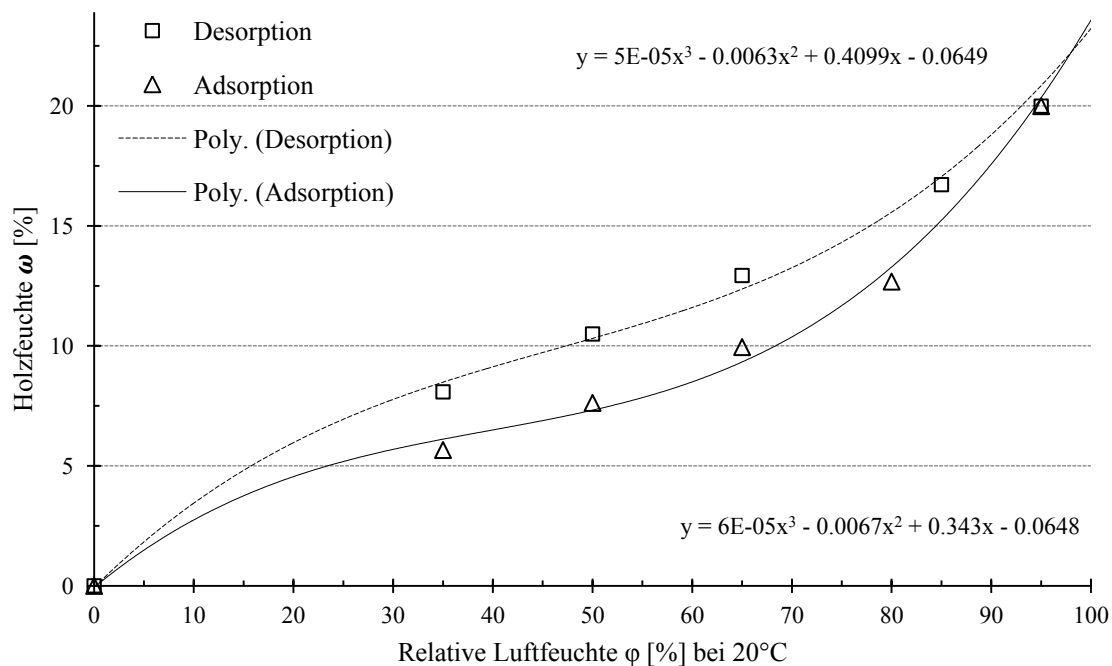


Abbildung 6.16: Mittlere Sorptionsisothermen der Ad- und Desorption

Abbildung 6.17 zeigt die Sorptionsisothermen der Ad- und Desorption mit den wertemässig kleinsten bzw.- grössten Ausgleichsfeuchten aller geprüften Faserplatten. Die Sorptionsisothermen der einzelnen Faserplatten sind im Anhang 3.2 abgelegt.

Die im Trockenverfahren hergestellten Produkte der Firma Gutex Thermosafe-homogen (1) und Multiplex-top (2) weisen, die verhältnismässig kleinsten Ausgleichsfeuchten auf, was mit der Verwendung des Bindemittels PUR Harz begründet werden kann (Schneider 1973 und Schneider, Roffael 1978). Nur Steico universal (7) weist bei der Adsorption bei 35 und 50% rel. LF tiefere Werte auf. Die höchste Ausgleichsfeuchte ergibt sich für alle Messungen bei Pavaboard (5), bei welchem als einziges Produkt das natürliche Bindemittel Stärke zugesetzt wird. Der Einfluss der Zugabe des Hydrophobierungsmittels Paraffin kann aus den Messergebnissen nur vermutet werden, da er, wenn auch zu ungleichen Teilen, bei all den geprüften Faserplatten eingesetzt wurde. Durch die wasserabweisende Wirkung des Paraffins wird die Ausgleichsfeuchte gesenkt.

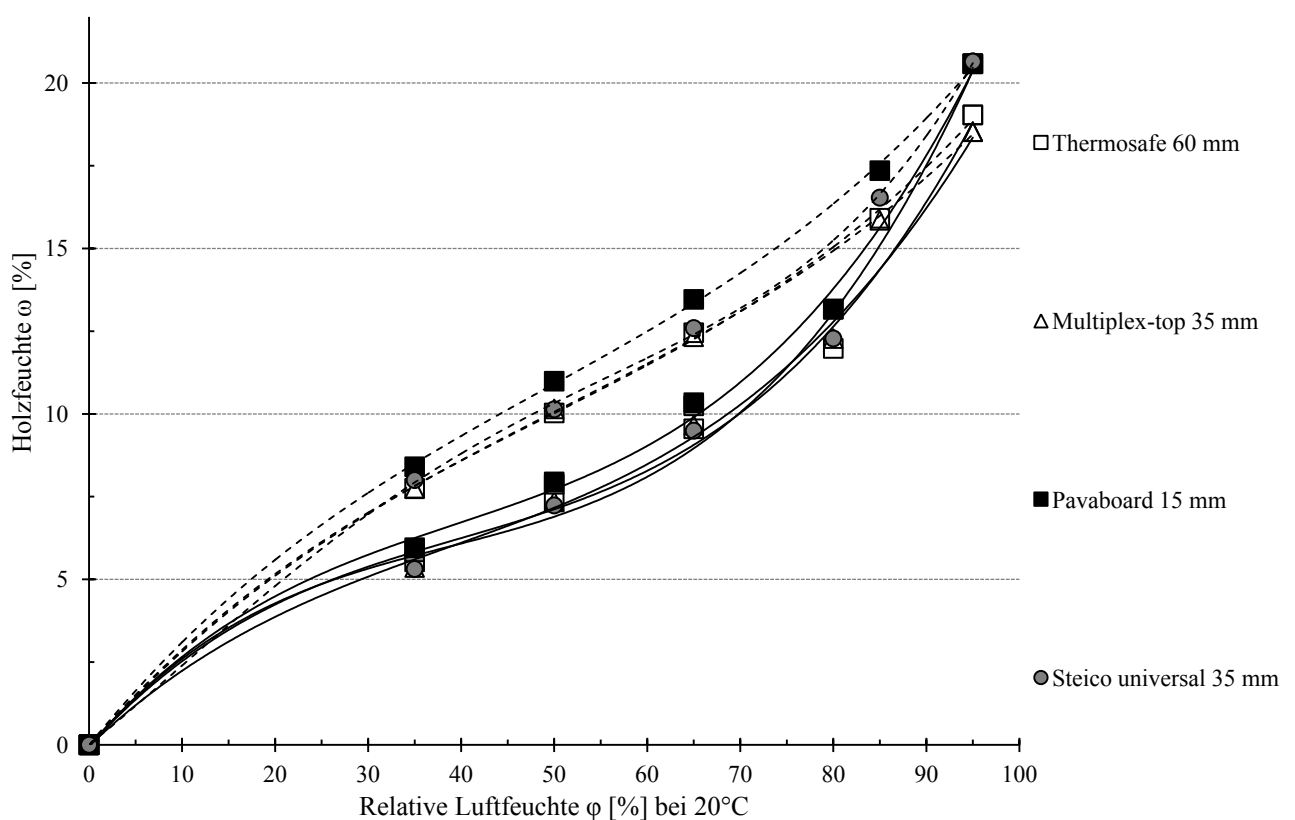


Abbildung 6.17: Sorptionsisothermen der Ad- und Desorption bei 20°C

Holzwerkstoffe werden insbesondere bei Partikelwerkstoffen wie porösen Faserplatten, Spanplatten, MDF und OSB bei der Herstellung einer erhöhten Temperatur bei der Trocknung (bis 400°C bei Spänen und Fasern) ausgesetzt und bei Temperaturen von bis zu 250°C gepresst. Dadurch kommt es zu einer Art Wärmebehandlung. Aus Arbeiten zur Wärmebehandlung ist bekannt, dass die Gleichgewichtsfeuchte von diesen Werkstoffen dadurch bis zu 50% jener der unbehandelten sinkt (Popper et al. 2005, Hoffman et al. 2008 und Junghans et al. 2006).

Die Gleichgewichtsfeuchte dieser Werkstoffe ist im Normalklima daher deutlich niedriger als die von Massivholz. Bei Spanplatten und MDF ergibt sich eine Gleichgewichtsfeuchte im Normalklima von ca. 8%, bei den geprüften Faserplatten ca. 10.8 und bei Massivholz ca. 12%.

6.6.2 Quell- und Schwindverhalten bei Klimawechsel

Tabelle 6.19 stellt das lineare Quell- und Schwindmass der Prüfkörperlängsseite (Länge) in und quer zur Produktionsrichtung dar. Dabei wird der Klimawechsel zwischen den Messungen sowie das Quell- und Schwindmass über den ganzen Bereich der Adsorption (35/95%) und der Desorption (95/35%) angegeben. Weil die Prüfkörper nach der Desorptionsmessung darrgetrocknet worden sind, wurde auch das Schwindmass von 35 auf 0% rel. LF angegeben (detailliert im Anhang 3.3.1).

Tabelle 6.19: Lineare Quell- und Schwindmasse der Länge

		Länge		Quellen				Schwinden					
		α_l	β_l	Klimawechsel der relativen Luftfeuchte ϕ [%] bei 20 °C									
Nr.		[%]	35/50	50/65	65/80	80/95	35/95	95/85	85/65	65/50	50/35	35/0	95/35
1	Thermosave-homogen ¹	quer	0.112	0.040	0.041	0.121	0.314	0.071	0.042	0.059	0.056	0.206	0.228
		längs	0.093	0.052	0.041	0.154	0.340	0.074	0.058	0.046	0.070	0.186	0.249
2	Multiplex-top ¹	quer	0.082	0.065	0.030	0.121	0.298	0.081	0.032	0.053	0.055	0.194	0.221
		längs	0.086	0.074	0.024	0.126	0.310	0.079	0.041	0.040	0.075	0.179	0.235
3	Pavapor	quer	0.033	0.033	0.050	0.066	0.182	0.032	0.071	0.050	0.069	0.210	0.222
		längs	0.013	0.044	0.031	0.114	0.202	0.058	0.066	0.059	0.070	0.233	0.254
4	Pavatherm	quer	0.067	0.067	0.017	0.108	0.259	0.092	0.042	0.049	0.077	0.206	0.260
		längs	0.099	0.053	0.031	0.122	0.304	0.092	0.068	0.056	0.084	0.221	0.300
5	Pavaboard	quer	0.036	0.072	0.050	0.094	0.251	0.083	0.065	0.066	0.083	0.239	0.297
		längs	0.047	0.080	0.043	0.096	0.266	0.094	0.062	0.065	0.100	0.241	0.321
6	Isorooft	quer	0.115	0.083	0.018	0.113	0.330	0.102	0.061	0.073	0.078	0.234	0.314
		längs	0.119	0.068	0.048	0.116	0.351	0.099	0.064	0.071	0.074	0.225	0.307
7	Steico-universal	quer	0.109	0.074	0.020	0.123	0.326	0.102	0.071	0.087	0.073	0.236	0.334
		längs	0.097	0.077	0.032	0.088	0.293	0.088	0.057	0.071	0.070	0.213	0.286
¹ im Trockenverfahren hergestellt													

¹ im Trockenverfahren hergestellt

Beim Quell- und Schwindmass über den gesamten Bereich der Feuchteauf- und abnahme weisen sechs von sieben Faserplatten in Produktionsrichtung (längs) ein grösseres Quell- bzw. Schwindmass auf, als die in Querrichtung (quer), womit auf einen Einfluss der Produktionsrichtung und somit der Faserorientierung auf das Quell- und Schwindverhalten geschlossen werden kann. Die in Produktionsrichtung ausgerichteten Fasern quellen und schwinden in Faserlängsrichtung mehr als quer zum Faserverlauf. Bei Feuchteaufnahme quellen die einzelnen Fasern und strecken sich dabei in der Längsachse.

In den einzelnen Klimastufen ergibt sich in den äusseren Bereichen bei der Adsorption von 35 auf 50% rel. LF und der Desorption von 95 auf 85% rel. LF ein im Vergleich mit den Werten der dazwischen liegenden Klimawechsel ein leicht erhöhtes Quell- und Schwindmass. Die Betrachtung der Feuchteauf- und abnahme in den verschiedenen Bereichen zeigt, dass das Quellmass etwas grösser ist als das Schwindmass. Dies und die erhöhten Werte in den äusseren Bereichen zeigen den Einfluss des Hystereseeffektes, welcher sich mit den Sorptionsisothermen begründet und für das verminderte Schwindmass verantwortlich ist.



Die Quell- und Schwindmasse der Dicke wurden über alle Prüfkörper der einzelnen Faserplatten berechnet und nicht in Abhängigkeit der Produktionsrichtung betrachtet. Das Quell- und Schwindmass der Dicke ist wie erwartet am grössten und um etwa Faktor 20 grösser als das der Länge. Das Quellmass von 35 auf 95% r. LF reicht von 5.9% bis 13.7% und ist beim leichtesten Produkt Thermosave-homogen prozentual am kleinsten und bei Steico-universal dem schwersten Produkt am grössten. So nimmt mit Zunahme der Rohdichte auch die Quellung zu, was sich mit der erhöhten Pressung bei Faserplatten höherer Dichten begründet (Tabelle 6.20 detailliert im Anhang 3.3.2).

Tabelle 6.20: Lineares Quell- und Schwindmass der Dicke

	Dicke	Quellen					Schwinden						
	α_l β_l	Klimawechsel der relativen Luftfeuchte ϕ [%] bei 20 °C											
Nr.	[%]	35/50	50/65	65/80	80/95	35/95	95/85	85/65	65/50	50/35	35/0	95/35	
1 Thermosave ¹	l und q	0.698	0.778	0.936	3.498	5.910	1.145	1.064	0.795	0.618	1.744	3.622	
2 Multiplex-top ¹	l und q	0.767	1.178	1.281	2.971	6.196	0.729	1.336	0.838	1.073	2.585	3.977	
3 Pavapor	l und q	5.792	1.095	1.232	3.682	11.801	0.920	1.401	0.886	0.793	2.218	3.999	
4 Pavatherm	l und q	0.955	1.318	1.241	3.624	7.137	0.843	1.462	0.721	0.877	2.164	3.903	
5 Pavaboard	l und q	5.605	1.204	2.222	4.303	13.334	2.114	1.716	1.103	1.123	2.964	6.055	
6 Isoroof	l und q	7.147	1.552	1.224	3.428	13.351	1.000	1.415	1.653	0.730	3.096	4.798	
7 Steico-universal	l und q	5.448	2.461	1.679	4.075	13.664	1.006	1.675	1.574	0.693	2.894	4.948	

¹ im Trockenverfahren hergestellt

Des Weiteren fällt auf, dass sich bei Thermosafe-homogen (1) und Multiplex-top (2), aber auch bei Pavatherm (4) ein deutlich tieferes Quellmass beim Klimawechsel von 35 auf 50% ergibt. Bei den Platten 1 und 2 ist dies durch die Zugabe des PUR Harzes beim Trockenverfahren begründet. Pavatherm weist eine Klebfuge in Plattenebene auf, welche ein vermindertes Quellen an den Übergangsbereichen bewirkt. Deutlich ausgeprägter als bei den Quell und Schwindmassen der Länge ist auch das verminderte Schwindmass zwischen 35 und 95% r. LF mit einem Verhältnis zwischen Schwind- und Quellmass von 1:1.5 bei Multiplex-top (2) bis 1:2.9 bei Pavapor (3).

Die Betrachtung des Quellmasses der Breite hat im Gegensatz zur der Länge einen weniger eindeutigen Einfluss der Produktionsrichtung ergeben. Die Werte befinden sich in einem ähnlichen Bereich und sind teils in Produktionsrichtung und teils quer dazu grösser. Bei den Prüfkörpern die quer zur Produktionsrichtung, bezogen auf die Länge, zugeschnitten wurden, quillt und schwindet die Breite in Produktionsrichtung und somit in Faserrichtung. Von sieben verschiedenen Faserplatten haben drei in Längsrichtung zur Achse (quer zur Faserausrichtung) und vier in Querrichtung dazu (längs zur Faserausrichtung) ein grösseres Quellmass. Tabelle 6.21 gibt das lineare Quell- und Schwindmass der Breite an (detailliert im Anhang 3.3.3).

Tabelle 6.21: Lineare Quell- und Schwindmass der Breite

	Breite		Quellen				Schwinden						
	α_l	β_l	Klimawechsel der relativen Luftfeuchte ϕ [%] bei 20 °C										
Nr.	[%]		35/50	50/65	65/80	80/95	35/95	95/85	85/65	65/50	50/35	35/0	95/35
1 Thermosave-homogen ¹	quer		1.959	3.507	0.665	0.206	6.337	0.381	0.795	0.239	0.143	0.390	1.557
	längs		2.225	3.092	1.289	0.073	6.679	0.546	0.574	0.293	0.187	0.194	1.599
2 Multiplex-top ¹	quer		1.603	3.754	0.474	0.782	6.613	0.672	0.261	0.256	0.117	0.256	1.305
	längs		1.633	3.711	0.459	0.792	6.595	0.586	0.355	0.217	0.130	0.314	1.288
3 Pavapor	quer		0.612	3.249	0.662	0.384	4.907	0.974	0.319	0.093	0.186	0.080	1.573
	längs		1.491	3.378	0.674	0.404	5.948	0.792	0.355	0.063	0.159	0.128	1.369
4 Pavatherm	quer		1.548	3.347	0.534	0.163	5.592	0.875	0.317	0.068	0.161	0.381	1.421
	längs		1.382	3.464	0.611	0.024	5.482	0.819	0.417	0.102	0.126	0.254	1.464
5 Pavaboard	quer		0.931	3.490	0.771	0.551	5.744	1.010	0.209	0.208	0.137	0.126	1.565
	längs		0.575	3.576	0.703	0.597	5.451	1.043	0.262	0.148	0.161	0.133	1.613
6 Isoroof	quer		1.931	3.291	0.965	0.406	6.592	0.243	0.703	0.137	0.089	0.226	1.171
	längs		2.073	3.154	1.077	0.365	6.669	0.184	0.762	0.179	0.083	0.157	1.209
7 Steico-universal	quer		1.506	3.770	0.411	0.291	5.978	0.271	0.581	0.203	0.089	0.217	1.145
	längs		1.499	3.841	0.389	0.318	6.048	0.150	0.662	0.323	0.067	0.248	1.202

¹ im Trockenverfahren hergestellt



Um einen Überblick der linearen Quell- und Schwindmasse zu erhalten wurde in Tabelle 6.22 das Verhältnis der Länge zur Dicke zur Breite ($l : d : b$) über die gemessenen Bereiche der Adsorption (35%/95% r. LF) und der Desorption (95%/35% r. LF) für beide Richtungen berechnet.

Tabelle 6.22: Verhältnis der linearen Quell- und Schwindmasse

Einzelmaterialien		Verhältnis der linearen Quellmasse von 35 auf 95% rel. LF	Verhältnis der linearen Schwindmasse von 95 auf 35% rel. LF
Nr. Firma	Produktnamen	Länge : Dicke : Breite	Länge : Dicke : Breite
1	Gutex Thermosafe-homogen ¹	1 : 18.1 : 19.9	1 : 15.2 : 27.3
2	Multiplex-top ¹	1 : 20.4 : 21.7	1 : 17.5 : 29.0
3	Pavapor	1 : 61.4 : 28.2	1 : 16.8 : 22.8
4	Pavatherm	1 : 25.4 : 19.7	1 : 13.9 : 19.8
5	Pavaboard	1 : 51.6 : 21.7	1 : 19.6 : 18.1
6	Isoroof-natur-KN	1 : 39.2 : 19.5	1 : 15.5 : 21.4
7	Steico Steico universal	1 : 44.1 : 19.4	1 : 16.0 : 19.4

¹ im Trockenverfahren hergestellt

Dabei zeigt sich im Adsorptionsbereich bei Pavapor (3) die im Verhältnis grösste Dicken- und Breitenquellung mit 1 : 61.4 : 28.2. Bei Thermosafe-homogen (1) hat sich im Gegensatz dazu die im Verhältnis geringste Quellung mit 1 : 18.1 : 19.9 ergeben. Die Betrachtung des Desorptionsbereiches zeigt, dass die Breitenschwindung bei allen geprüften Produkten ausser bei Pavaboard (5) die Dickenquellung überragt. Das bedeutet, dass die Dickenquellung mehr oder weniger irreversibel ist und der Prüfkörper nach der Quellung nicht mehr vollständig in den verdichteten Ursprungszustand schwindet.

Tabelle 6.23 zeigt das maximale Quell- und Schwindmass von 0 auf 95 bzw. von 95 auf 0% rel. LF sowie die differentielle Quellung und den Quellungskoeffizienten beim Klimawechsel von 35 auf 80% rel. LF (detailliert im Anhang 3.4 und 3.5).

Tabelle 6.23: Maximales Quell- und Schwindmass mit differentieller Quellung und Quellungskoeffizient

		Maximales Quellmass [%]			Maximales Schwindmass [%]			Differentielle Quellung [%/ %]			Quellungskoeffizient [%/ %]		
		Klimabereich der relativen Luftfeuchte ϕ [%]											
		0/95			95/0			35/80			35/80		
Nr.	Richtung	α_l^{max}	α_d^{max}	α_b^{max}	β_l^{max}	β_d^{max}	β_b^{max}	q_l	q_d	q_b	l	b	d
1 ¹	quer	0.436	5.614	1.988	0.434	5.315	1.947	0.030	0.384	0.909	0.004	0.056	0.131
	längs	0.437	5.726	1.826	0.435	5.416	1.793	0.029	0.388	0.989	0.004	0.055	0.141
2 ¹	quer	0.417	7.176	1.586	0.415	6.695	1.561	0.026	0.476	0.811	0.004	0.073	0.125
	längs	0.416	6.870	1.629	0.414	6.428	1.603	0.027	0.474	0.804	0.004	0.073	0.124
3	quer	0.434	6.581	1.681	0.432	6.175	1.653	0.016	1.038	0.606	0.003	0.166	0.097
	längs	0.489	6.679	1.521	0.487	6.260	1.498	0.012	1.296	0.749	0.002	0.206	0.119
4	quer	0.469	6.504	1.836	0.466	6.107	1.802	0.020	0.499	0.715	0.003	0.082	0.117
	längs	0.524	6.415	1.748	0.521	6.028	1.718	0.025	0.492	0.727	0.004	0.080	0.118
5	quer	0.539	9.824	1.720	0.536	8.945	1.690	0.022	1.306	0.685	0.003	0.211	0.111
	längs	0.565	10.003	1.778	0.562	9.093	1.747	0.024	1.280	0.651	0.004	0.204	0.104
6	quer	0.550	8.542	1.417	0.547	7.869	1.397	0.031	1.416	0.840	0.005	0.223	0.132
	längs	0.535	8.600	1.385	0.532	7.919	1.366	0.033	1.418	0.858	0.005	0.222	0.135
7	quer	0.573	8.489	1.381	0.569	7.825	1.362	0.029	1.423	0.807	0.004	0.217	0.123
	längs	0.502	8.530	1.472	0.500	7.859	1.450	0.029	1.393	0.793	0.005	0.218	0.124

¹ im Trockenverfahren hergestellt

Beim maximalen Quellmass ist, wie erwartet, die Dickenquellung bei allen Platten am grössten. Mit 5.6% ist das maximale Quellmass der Dicke bei Thermosafe-homogen (1) quer zum Produktionsverlauf am schwächsten und bei Pavaboard (5) längs zum Produktionsverlauf mit 10% am stärksten ausgeprägt. Analog dazu ist das maximale Schwindmass der Dicke bei Thermosafe-homogen quer zum Produktionsverlauf mit 5.3% am kleinsten und bei Pavaboard längs zum Produktionsverlauf

mit 9.1% am grössten. Thermosafe-homogen weist mit der kleinsten Dickenquellung jedoch die grösste Breitenquellung aller Platten mit 2% auf.

Um einen Überblick der maximalen Quell- und Schwindmasse zu erhalten wurde das Verhältnis der Länge zur Dicke zur Breite (l : d : b) in Tabelle 6.24 im Bereich von 0 auf 95% bzw. von 95 auf 0% für beide Richtungen berechnet und angegeben.

Tabelle 6.24: Verhältnis der maximalen Quell- und Schwindmasse

Einzelmaterialien		Verhältnis der maximalen Quellmasse von 0% auf 95% rel. LF	Verhältnis der maximalen Schwindmasse von 95% auf 0% rel. LF
Nr. Firma	Produktnamen	Länge : Dicke : Breite	Länge : Dicke : Breite
1 Gutex	Thermosafe-homogen ¹	1 : 13.0 : 4.4	1 : 12.3 : 4.3
2	Multiplex-top ¹	1 : 16.9 : 3.9	1 : 15.8 : 3.8
3	Pavapor	1 : 14.4 : 3.5	1 : 13.5 : 3.4
4	Pavatherm	1 : 13.0 : 3.6	1 : 12.3 : 3.6
5	Pavaboard	1 : 18.0 : 3.2	1 : 16.4 : 3.1
6	Isoroof-natur-KN	1 : 15.8 : 2.6	1 : 14.6 : 2.6
7 Steico	Steico universal	1 : 15.8 : 2.7	1 : 14.7 : 2.6

¹ im Trockenverfahren hergestellt

Bei der differentiellen Quellung pro 1% Veränderung der relativen Luftfeuchte ist bei den Faserplatten 1, 2 und 4 das differentielle Quellmass der Breite grösser als das der Dicke. Bei den übrigen überragt das differentielle Quellmass der Dicke jenes der Breite. Die differentielle Quellung der Länge reicht von 0.012%/ bei Pavapor (3) in Produktionsrichtung bis 0.033%/ bei Isoroof-natur (6) ebenfalls in Produktionsrichtung. Die Differentielle Quellung der Dicke ist beim leichtesten Produkt Thermosafe-homogen (1) quer zum Produktionsverlauf mit 0.384%/ am kleinsten und beim schwersten Steico universal mit 1.4%/ am grössten und es zeigt sich, dass mit Zunahme der Rohdichte auch die differentielle Quellung zunimmt. Abbildung 6.18

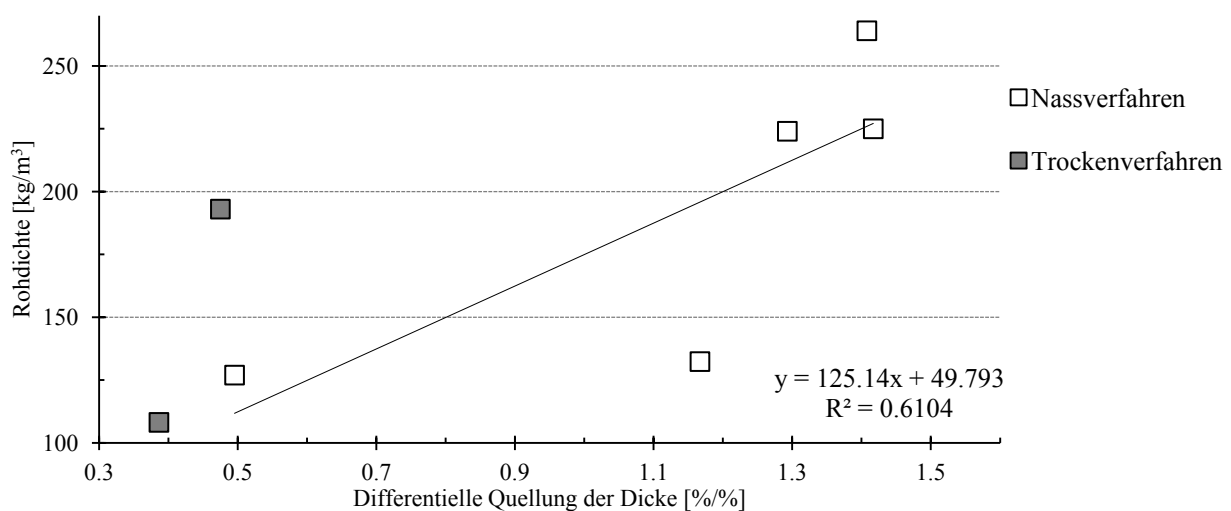


Abbildung 6.18: Differentielle Dickenquellung in Abhängigkeit der Rohdichte

Wie bei der differentiellen Quellung der Dicke verhält, sich auch der Quellungskoeffizient der Dicke, welcher bei Produkten die im Nass- und Trockenverfahren hergestellt werden mit steigender Rohdichte zunimmt, wobei das bei im Trockenverfahren hergestellten Platten deutlicher ausgeprägt ist.



7 Zusammenfassung und Ausblick

Trotz des wachsenden Bewusstseins unserer Gesellschaft für Nachhaltigkeit, verzichten heutzutage Bauplaner und Architekten oftmals auf den Einsatz natürlicher Dämmstoffe. Dies ist insofern nachvollziehbar, da es an befriedigenden Informationen, Dokumentationen und Erfahrungen hinsichtlich einer sicheren Anwendung solcher wieder- und neuentdeckten umweltfreundlichen Materialien fehlt. Um diesen Mangel zu mindern, wurden im Rahmen dieser Arbeit Untersuchungen zur Wärmeleitfähigkeit und zum Feuchteverhalten verschiedener poröser Holzfaserplatten, durchgeführt.

Zudem soll das Potential natürlicher Dämmstoffe weiter ausgereizt werden. Durch eine optimale Kombination von Plattenwerkstoffen aus verschiedenen Naturfasern (Hanf- und Holzfasern) soll auf vorteilhafte Synergieeffekte abgezielt werden. Um die Chancen dieser anwendungsorientierten Material-Optimierung aufzuzeigen, werden verschiedene Dämmstoff-Produkte zu mehrschichtigen Materialkombinationen geschichtet und ebenso auf bauphysikalische Parameter hin untersucht.

Die heutzutage im Bauwesen gängigen Betrachtungen der Feuchtetransportvorgänge lassen den Einfluss an Grenzflächenübergängen unberücksichtigt. Zwar werden für unterschiedliche Materialien die entsprechenden Kennwerte herangezogen, die Übergänge und allfällige Randerscheinungen werden jedoch wenig oder gar nicht betrachtet. Für mehrschichtige Materialkombinationen sind die Kenntnisse über den Grenzflächeneinfluss auf bauphysikalische Parameter (z.B. Wärmeübergang, Feuchtedurchgang) bislang nur begrenzt vorhanden (Sonderegger 2011), was weitere Untersuchungen notwendig macht.

Die Eigenschaftsprüfungen erfolgten an elf industriell gefertigten Dämmfaserplatten, von fünf verschiedenen Herstellern, im Materialrohdbereich von 50 bis 290 kg/m³, von denen zwei Produkte im Trockenverfahren und acht im Nassverfahren hergestellt werden. Weiter wurde der Hochleistungsdämmstoff „Aerogel“ getestet und zum Vergleich herangezogen. Dieser wurde ebenso in die Materialkombinationen eingesetzt, um die Grenzen der Reduzierung bestimmter Kenngrößen auszuloten.

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass Wärmeleitfähigkeit, Sorption und Diffusion sowie Quellen und Schwinden bei porösen Holzfaserplatten sehr stark von der Rohdichte und vom Feuchtegehalt abhängig sind. Zudem beeinflusst das Herstellverfahren und die damit verbundene Faserorientierung in der Platte die Messergebnisse deutlich. Die Materialeigenschaften der mehrschichtigen Produktkombinationen (40 mm und 60 mm) aus, im Nassverfahren hergestellten Faserplatten sind deutlich von der Anzahl der Materialschichten und Verbindungsfugen abhängig.

Die Untersuchungen der Wärmeleitfähigkeit haben gezeigt, dass die thermische Leitfähigkeit mit Erhöhung Rohdichte zunimmt. Bei den geprüften, porösen Dämmfaserplatten ist die Zielgrösse ein möglichst kleiner λ -Wert, welcher sich in einem Bereich von 0.037 W/(m K) bei den leichtesten Platten bis 0.051 W/(m K) bei der schwersten Platten befindet.

Neben der Rohdichte haben auch das Herstellverfahren und die damit verbundene Faserorientierung einen Einfluss auf Wärmeleitfähigkeit eines Dämmstoffes. Im Trockenverfahren wird durch die gleichmässige Beleimung im Blowline-System eine diffusere Faserorientierung und ein homogenerer Plattenaufbau erreicht als im Nassverfahren. Die diffusere Ausrichtung der Fasern ergibt einen kleineren Anteil an Fasern, die senkrecht zur Plattenebene orientiert sind. Da die Wärmeleitfähigkeit in Faserrichtung grösser ist, werden bei diesen Produkten bei gleicher Rohdichte tiefere Messwerte erreicht. Beim Nassverfahren ergibt sich aufgrund des Transportmediums Wasser eine Ausrichtung der Fasern in Fliessrichtung des Wassers, wobei bei den Platten niedriger Rohdichte ein freies Abfließen des Wassers bei der Vliesbildung erfolgt. Der dadurch bedingte, höhere Anteil an Fasern, die senkrecht zur Plattenebene ausgerichtet sind, begünstigt die Wärmeleitung in der Platte.



Des Weiteren ergibt sich, bei höheren Querschnitten (Nassverfahren), durch die Schichtung eine Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit und somit eine Verschlechterung der wärmedämmenden Eigenschaft innerhalb eines Produktes. Da dies bei einem spezifischen Materialkennwert grundsätzlich nicht sein kann, kann die Begründung nur im Einfluss der Anzahl an Schichten und deren Verklebungen liegen.

Neben den genannten Einflüssen wurde auch eine hohe Temperaturabhängigkeit nachgewiesen. Die Wärmeleitfähigkeit nimmt bei Erhöhung der Temperatur pro Kelvin um 0.45 % linear zu.

Durch Kombination verschiedener Faserplatten konnte die geringe Wärmeleitfähigkeit der leichten Platten mit der hohen wirksamen Speichermasse der schweren Platten zusammengebracht werden. Dies führte bei der Materialkombination zu einer Reduktion des höheren λ -Werts der schwereren Aussenschichten. Mit dem Hochleistungsdämmstoff Aerogel als Mittellage wurde die Wärmeleitfähigkeit bei einer Kombination, um 5 mW/(m K) verringert und mit einer hohen wirksamen Speichermasse ein verhältnismässig kleiner λ -Wert erzielt.

Wie bei der Wärmeleitfähigkeit nimmt auch die Wasserdampf-Diffusion in Form der spezifischen Wasserdampf-Diffusionswiderstandszahl μ bei steigender Rohdichte deutlich zu und befindet sich bei den geprüften Produkten in einem Bereich von ca. 2 bis 5. Die Wasserdampf-Diffusionswiderstandszahl gibt an, um welchen Faktor das betreffende Material gegenüber Wasserdampf dichter ist als eine gleich dicke, ruhende Luftschicht. Je grösser der Faktor, desto dampfdichter ist ein Baustoff. Neben der Rohdichte hat auch der Feuchtegehalt einen starken Einfluss auf die Wasserdampfdiffusion, so wird mit Zunahme des Feuchtegehaltes der Feuchtedurchgang erhöht und Wasserdampf-Diffusionswiderstandszahl μ gesenkt. Dies zeigt sich sehr deutlich an den unterschiedlichen Ergebnissen der Dry- und Wet-Cup-Versuche innerhalb eines Produktes.

Die zwei untersuchten Hanffaserprodukte haben aufgrund der hydrophoben Eigenschaften des Rohstoffes und durch die zusätzliche Beigabe von Bindefasern, eine um 2% kleinere Gleichgewichtsfeuchte (8%) bei Normalklima (20°/65% rel. LF) und weisen, mit einem Gewicht von ca. 50 kg/m³, trotz tieferem Feuchtegehalt, den kleinsten gemessenen Faktor im Dry- und Wet-Cup-Versuch auf.

Bei einem Produkt der Firma Pavatex, hergestellt im Nassverfahren, mit niedriger Dichte hat die Untersuchung gezeigt, dass die Diffusionsrichtung durch das asymmetrische Rohdichteprofil keinen Einfluss auf die Wasserdampf-Diffusion hat. Für beide Diffusionsrichtungen haben sich ähnliche Messwerte ergeben.

Faserplatten die im Trockenverfahren hergestellt werden, weisen bei gleicher Dichte eine höhere Diffusionsoffenheit auf, als solche, die im Nassverfahren hergestellt werden.

Der Feuchtedurchgang wird einerseits durch die diffusere Faserorientierung und einem homogenen Aufbau, andererseits durch die Verwendung des PUR-Harzes begünstigt.

Der Einfluss der Schichtverklebung und Erhöhung der Querschnitte zeigt, analog zu den Messungen der Wärmeleitfähigkeit, dass die Wasserdampf-Diffusionszahl mit der Erhöhung der Schichten zunimmt und, dass die Diffusionsoffenheit dadurch innerhalb eines Produktes abnimmt.

Die Herstellung der Faserplatten unter relativ hohen Temperaturen (bis 250°C) führt eine Wärmebehandlung herbei. Dies bestätigen auch die Ergebnisse aus den Messungen der Ausgleichsfeuchte in den Bereichen der Adsorption und Desorption bei den Quell- und Schwindversuchen.

Aus diversen Arbeiten zur Wärmebehandlung ist hinreichend bekannt, dass dadurch die Gleichgewichtsfeuchte bis zu 50% reduziert werden kann. Bei den geprüften Faserplatten hat sich eine mittlere Ausgleichsfeuchte bei Normalklima von 10.8 % ergeben, welche im Vergleich zu unbehandeltem Fichtenholz mit 12% um etwa 1 % kleiner ist. Die geprüften Faserplatten, weisen die für Holz typischen s-förmigen Sorptionsisothermen auf, bei welchen der Hystereseeffekt mit einem Unterschied von 3% zwischen Adsorption und Desorption bei gleichen Klimabedingungen stärker ausgeprägt ist, als bei Fichtenholz. Bei Fichte beträgt dieser Unterschied 1 bis 2%. Die Betrachtung



des, durch Feuchteauf- und abnahme bedingten Quell- und Schwindverhaltens, hat einen klaren Einfluss der Platten-Produktionsrichtung ergeben. Bei den linearen Quell- und Schwindmassen resultierten in Produktionsrichtung ein grösseres Quell- und Schwindmass. Durch das zusätzliche Pressen im Nassverfahren, nimmt bei Platten höherer Rohdichte (über 100 kg/m^3) der Anteil an Fasern, die in Produktionsrichtung ausgerichtet sind, noch weiter zu. Entsprechend der Erwartungen, ist die Dickenquellung der geprüften Platten bei dem Klimawechsel von 35% auf 95% rel. LF bei 20°C am grössten. Sie Befindet sich im Bereich von ca. 6% bis 13% und nimmt mit steigender Rohdichte zu. Der Vergleich zwischen Quell und Schwindmass zeigt, dass es vor allem bei der Dickenquellung zu einer mehr oder wenigen irreversiblen Volumenkontraktion kommt, die nicht mehr in den verdichteten Ursprungszustand schwindet.

Die Anforderungen an Dämmstoffe sind teils sehr gegenläufig, so ist auf der einen Seite sehr leichter Dämmstoff erwünscht der einen tiefen Lambda-Wert hat und zugleich sehr diffusionsoffen ist, auf der andern Seite sollte der Dämmstoff über eine möglichst hohe wirksame Speichermasse verfügen, welche mit Zunahme der Rohdichte einher geht. So stellt sich die Frage der Verwendung eines Dämmstoffes vielmehr nach dessen Zweck, welcher sich in Wärmedämmung und Wärmespeicherung unterscheidet.

Folgende Fragestellungen sind für zukünftige Arbeiten von wissenschaftlichem und technischem Interesse:

- Welchen Einfluss hat die Morphologie der Faser auf den Wärmeübergang zwischen den Partikeln?
- Welchen Einfluss auf die Wärmeleitfähigkeit hat die Fasergeometrie, insbesondere der Schlankheitsgrad auf den Wärmeübergang zwischen den einzelnen Fasern und Partikeln?
- Welche Additive können eingesetzt werden, um die drei wesentlichen Eigenschaften der Wärmeübertragung (Strahlung, Strömung, Leitung) zu optimieren und zugleich den rezyklierbaren Werkstoff beizubehalten?
- Wie kann die Ausrichtung der Fasern bei der Vliesbildung beeinflusst werden um dadurch die Wärmeleitfähigkeit des Werkstoffes zu optimieren?
- Wie kann der Feuchtegehalt der Platte genutzt werden um die Wärmekapazität zu erhöhen?
- Welchen Einfluss auf die Wärmeleitfähigkeit und die Wärmekapazität hat die Zusammensetzung des Fasergemisches insbesondere bzgl. Holzart und Rindenanteil?



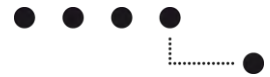
Verzeichnisse

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1: Energieverbrauch 2009 nach Verbrauchssektoren	2
Abbildung 1.2: Nutzenergieverteilung von Haushalten	2
Abbildung 1.3: Wärmeverlust bei Gebäuden.....	2
Abbildung 2.1: Nutzbarer Stammholzanteil von Nadel- und Laubholz	6
Abbildung 2.2: Hierarchische Struktur von Nadelholz	7
Abbildung 2.3: Mikrostruktur von Buchenholz	8
Abbildung 2.4: Bindungsarten von Wasser im Holz	9
Abbildung 2.5: Hygroskopisches Gleichgewicht von Sitka-Fichte	10
Abbildung 2.6: Einfluss des Feuchtegehaltes auf die Rohdichte	11
Abbildung 2.7: Gas- und Flüssigkeitsphasenzustände bei Diffusionsvorgängen in Holz	12
Abbildung 2.8: Multi-Ficksches Feuchtetransportmodell.....	14
Abbildung 2.9: Anatomische Grundrichtungen von Holz	15
Abbildung 2.10: Charakteristische Schwindung verschiedener Querschnitte	15
Abbildung 2.11: Einteilung der Holzwerkstoffe	19
Abbildung 2.12: Einfluss der Strukturauflösung bei Holz-Werkstoffen	19
Abbildung 2.13: Dämmstoffarten nach Rohstoffen unterteilt	20
Abbildung 2.14: Einteilung der Faserdämmstoffe	21
Abbildung 2.15: Defibrator.....	24
Abbildung 2.16: Verschiedene Zerfaserungsaggregate	25
Abbildung 2.17: Bauer- Refiner	25
Abbildung 2.18: Verschiedene Mahlscheiben	26
Abbildung 2.19: Masonite- Verfahren	26
Abbildung 2.20: Nassverfahren	27
Abbildung 2.21: Herstellung von Faserplatten im Nassverfahren	28
Abbildung 2.22: Blowline- Systeme.....	29
Abbildung 2.23: Felter-System	29
Abbildung 2.24: Trockenverfahren	30
Abbildung 3.1: Phasenverschiebung und Amplitudendämpfung	37
Abbildung 3.2: Zerlegung eines inhomogenen Bauteils	45
Abbildung 5.1: Lagerung im Klimaraum	54
Abbildung 5.3: Effektive Messfläche des Prüfgerätes	55
Abbildung 5.4: Temperaturfeld in der Probe bei der mittleren Temperatur (20°C).....	55
Abbildung 5.2: Lambda-Meter EP500	55
Abbildung 5.5: Prüfaufbau Dry-Cup Wet-Cup	56



Abbildung 5.6: Verlauf der Massenänderung je Zeiteinheit.....	57
Abbildung 5.7: Verwendete Geräte zur Versuchsdurchführung	60
Abbildung 5.8: Massenbestimmung der Prüfscheibe	61
Abbildung 5.9: Feuchteauf- und abnahme über der Zeit und über der Wurzel der Zeit	62
Abbildung 5.10: Quellen und Schwinden Lagerung im Klimaraum	63
Abbildung 5.11: Definition Längs- und Querrichtung.....	63
Abbildung 5.12: Messpunkte am Prüfkörper	64
Abbildung 5.13: Messaufnehmer bei Dickenmessung	64
Abbildung 5.14: Verwendete Geräte zur Versuchsdurchführung	66
Abbildung 6.1: Wärmeleitfähigkeit in Abhängigkeit der Rohdichte	67
Abbildung 6.2: Wärmeleitfähigkeit in Abhängigkeit der Rohdichte nach Einzelmaterialien....	68
Abbildung 6.3: Spezifischer Wärmewiderstand in Abhängigkeit der Rohdichte	69
Abbildung 6.4: Wärmeleitfähigkeit in Abhängigkeit der Temperatur	70
Abbildung 6.5: Wärmeleitfähigkeit in Abhängigkeit der Rohdichte bei Materialkombination ..	72
Abbildung 6.6: Wärmeleitfähigkeit in Abhängigkeit der Rohdichte bei Materialkombination ..	72
Abbildung 6.7: Spezifischer Wärmewiderstand in Abhängigkeit der Rohdichte	73
Abbildung 6.8: Plattenoberflächen bei Pavaflex	74
Abbildung 6.9: Wasserdampf-Diffusionswiderstandszahl in Abhängigkeit der Rohdichte	77
Abbildung 6.10: Wasserdampf-Diffusionswiderstandszahl in Abhängigkeit der Rohdichte ...	78
Abbildung 6.11: Wasserdampf-Diffusionswiderstandszahl in Abhängigkeit der Rohdichte ...	82
Abbildung 6.12: Wasserdampf-Diffusionswiderstandszahl in Abhängigkeit der Rohdichte ...	82
Abbildung 6.13: Fichtenholzplättchen beim Dry- und Wet-Cup-Versuch	83
Abbildung 6.14: Feuchteauf- und abnahme bei Dry- und Wet-Cup-Versuchen	86
Abbildung 6.15: Feuchteauf- und abnahme über der Wurzel der Zeit	87
Abbildung 6.16: Mittlere Sorptionsisothermen der Ad- und Desorption	91
Abbildung 6.17: Sorptionsisothermen der Ad- und Desorption bei 20°C	92
Abbildung 6.18: Differentielle Dickenquellung in Abhängigkeit der Rohdichte	96



Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1: Feuchtabhängige Dichten bei Holz und Holzwerkstoffen	11
Tabelle 2.2: Maximales- und differentielles Quellmass verschiedener Holzarten	18
Tabelle 2.3: Anwendungsbereich für Dämmstoffe	22
Tabelle 2.4: Einteilung Faserplatten nach Rohdichten	23
Tabelle 3.1: Wärmespeicherzahl unterschiedlicher Materialien	35
Tabelle 3.2: Temperaturamplitudendämpfung und Phasenverschiebung	39
Tabelle 3.3: Einfluss der Dämmstoffdicke auf das TAV und die Phasenverschiebung	39
Tabelle 3.4: Wärmedurchlasswiderstand in Abhängigkeit der Richtung des Wärmestromes	41
Tabelle 3.5: Werte für die Wärmeübergangskoeffizienten von 1988 und 1999	42
Tabelle 3.6: Wärmeübergangswiderstand in Abhängigkeit der Richtung des Wärmestroms	43
Tabelle 3.7: Maximal zulässige U-Werte bei verschiedenen Bauteilen	46
Tabelle 4.1: Materialeigenschaftsprüfungen der Einzelmaterialien	52
Tabelle 4.2: Materialeigenschaftsprüfungen der Materialkombinationen	53
Tabelle 6.1: Ergebnisse der Wärmeleitfähigkeitsmessung der Einzelmaterialien	67
Tabelle 6.2: Ergebnisse der Wärmeleitfähigkeitsmessungen der Materialkombinationen	71
Tabelle 6.3: Herstellerangaben der geprüften Materialien	74
Tabelle 6.4: Feuchtebezogene Angaben der Dry- und Wet-Cup-Versuche	75
Tabelle 6.5.: Messergebnisse der Dry- und Wet-Cup-Versuche	76
Tabelle 6.6: Aufbau der Materialkombination	79
Tabelle 6.7: Dicke und Rohdichte der einzelnen Schichten	79
Tabelle 6.8: Feuchtebezogene Angaben der Dry- und Wet-Cup-Versuche bei Kombination	80
Tabelle 6.9: Messergebnisse der Dry- und Wet-Cup-Versuche bei Kombinationen	81
Tabelle 6.10: Herstellerangaben und Messwerte der Dry- und Wet-Cup-Versuche	84
Tabelle 6.11: Relative Luftfeuchte in den Prüfgefäßen bei Dry- und Wet-Cup-Versuchen	84
Tabelle 6.12: Herstellerangaben und Messwerte der Wasserdampfdiffusion	86
Tabelle 6.13: Wasseraufnahmekoeffizient und Sorptionsgeschwindigkeit (Zwicker 2008)	87
Tabelle 6.14: Wasseraufnahmekoeffizient und Sorptionsgeschwindigkeit	88
Tabelle 6.15: Einzelmaterialien der Quell- und Schwindversuche	89
Tabelle 6.16: Ausgleichsfeuchte und Normalrohddichte vor der Messung	89
Tabelle 6.17: Ausgleichsfeuchte in verschiedenen Klimastufen	90
Tabelle 6.18: Mittlere Ausgleichsfeuchte der Materialien	91
Tabelle 6.19: Lineare Quell- und Schwindmasse der Länge	93
Tabelle 6.20: Lineares Quell- und Schwindmass der Dicke	94
Tabelle 6.21: Lineare Quell- und Schwindmass der Breite	94



Tabelle 6.22: Verhältnis der maximalen Quell- und Schwindmasse	95
Tabelle 6.23: Maximales Quell- und Schwindmass mit differentieller Quellung	95
Tabelle 6.24: Verhältnis der maximalen Quell- und Schwindmasse	96



Normenverzeichnis

- [1] DIN V 4108-4
Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden - Teil 4: Wärme- und feuchteschutztechnische Bemessungswerte
- [2] DIN 4108
Beiblatt 2, Wärmebrücken — Planungs- und Ausführungsbeispiele
- [3] DIN EN ISO 10077-1
Wärmetechnisches Verhalten von Fenstern, Türen und Abschlüssen - Berechnung des Wärmedurchgangskoeffizienten - Teil 1: Allgemeines (ISO 10077-1:2006 + Cor. 1:2009); Deutsche Fassung EN ISO 10077-1:2006 + AC:2009
- [4] DIN EN ISO 10077-2
Wärmetechnisches Verhalten von Fenstern, Türen und Abschlüssen - Berechnung des Wärmedurchgangskoeffizienten - Teil 2: Numerisches Verfahren für Rahmen (ISO/DIS 10077-2:2009); Deutsche Fassung EN ISO 10077-2:2009
- [5] DIN EN ISO 15148
Wärme und Feuchteteknisches Verhalten von Baustoffen und Bauprodukten; Bestimmung des Wasseraufnahmekoeffizienten bei teilweisem Eintauchen
- [6] DIN 52182 (September 1976)
Prüfung von Holz;. Bestimmung der Rohdichte
- [7] DIN 52183 (1993)
Prüfung von Holz;. Bestimmung des Feuchtegehaltes
- [8] DIN 52184 (März 1994)
Prüfung von Holz;. Bestimmung der Quellung und Schwindung
- [9] DIN 52350 (September 1953)
Prüfung von Holzfaserplatten; Probenahme, Dickenmessung, Bestimmung des Flächengewichtes und der Rohdichte
- [10] DIN 52619-3
Wärmeschutztechnische Prüfungen; Bestimmung des Wärmedurchlasswiderstandes und Wärmedurchgangskoeffizienten von Fenstern; Messung an Rahmen
- [11] DIN EN ISO 12572 (September 2001)
Wärme- und feuchteteknisches Verhalten von Baustoffen und Bauprodukten; Bestimmung der Wasserdampfdurchlässigkeit
- [12] DIN EN ISO 6946 (September 2007)
Bauteile- Wärmedurchlasswiderstand und Wärmedurchgangskoeffizient-Berechnungsverfahren



- [13] DIN EN ISO 15148 (März 2003)
Wärme- und feuchtetechnische Verhalten von Baustoffen und Bauprodukten;
Bestimmung des Wasseraufnahmekoeffizienten bei teilweisem Eintauchen
- [14] SIA 180 (1999)
Wärme- und Feuchteschutz im Hochbau
- [15] SIA 279 (2004)
Bauwesen- Wärmedämmstoffe- Allgemeine Anforderungen Nenn- und
Bemessungswerte des Wärmedurchlasswiderstandes und der Wärmeleitfähigkeit
- [16] ISO 8302 (August 1991)
Wärmeschutz; Bestimmung des stationären Wärmedurchlasswiderstandes und
verwandter Eigenschaften; Verfahren mit dem Plattengerät
- [17] DIN EN 318 Holzwerkstoffe; Bestimmung von Massänderung in Verbindung mit
Änderung der relativen Luftfeuchte



Literaturverzeichnis

- Autorenkollektiv. 1990.** *Lexikon der Holztechnik.* Leipzig : VEB, Fachbuchverlag Leipzig, 1990. 3-343-00611-4.
- BFE, Bundesamt für Energie. 2002.** *U-Wert-Berechnung und Bauteilkatalog Neubauten.* Bern : BBL, Vertrieb Publikationen, 2002.
- BFE, Bundesamt für Energie. 2003.** *Wärmebrückenkatalog.* Bern : BBL, Vertrieb Publikationen, 2003.
- Boisits, R. 1993.** *Dämmstoffe auf den ökologischen Prüfstand.* Wien : IBO-Verlag, 1993. 3-900-40321-X.
- Crank, J. 1975.** *The Mathematics of Diffusion.* New York : Oxford University Press Inc., 1975.
- Duc, P. 2010.** *Entwicklung der Baumarten im Schweizer Wald - methodische Überlegung.* Birmensdorf : Eidgenössischen Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft, 2010.
- Dunky, M., Niemz, P. 2002.** *Holzwerkstoffe und Leime: Technologie und Einflussfaktoren.* Berlin : Springer-Verlag, 2002. 978-3-540-429-980-7.
- Egner, K. 1934.** *Beiträge zur Kenntnis der Feuchtebewegung in Hölzern, vor allem in Fichtenholz, bei der Trocknung unterhalb des Fasersättigungspunktes.* Berlin : VDI-Verlag, 1934.
- Fick, A. 1855.** *Ueber Diffusion, Annalen der Physik und der Chemie.* 1855.
- Frandsen, H., Damkilde, L., Svensson, S. 2007.** *A revised multi-Fickian moisture transport model to describe non-Fickian effects in wood.* Berlin, New-York : Holzforschung, 2007.
- Hoffmann, et al. 2008.** *Investigation of the chemical changes in the structure of wood thermally modified within a nitrogen autoclave.* s.l. : Wood research, 2008. 53.
- Holzmann, G., Wangelin, M. 2009.** *Natürliche und pflanzliche Baustoffe Rohstoff-Bauphysik- Konstruktionen.* Wiesbaden : GWV Fachverlage GmbH, 2009.
- Junghans, et al. 2006.** *Behandlungsintensität bestimmt Thermoholzqualität.* s.l. : Holz-Zentralblatt, 2006. 132.
- Keller, B., Rutz, S. 2007.** *Pinpoint Fakten der Bauphysik zu nachhaltigem Bauen.* Zürich : vdf Hochschulverlag AG der ETH Zürich, 2007. 978-3-7281-3117-1.
- Kisseloff, P. 1969.** *Feuchtigkeitsbewegung und Wärmeleitung in Holz.* s.l. : Holz als Roh- und Werkstoff, 1969.
- Kollman, F. 1955.** *Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe.* Berlin : Springer Verlag, 1955.
- Kollman, F., Côté, W.A. 1968.** *Principles of Wood Science and Technology. Volume1: Solid Wood.* Berlin/Heidelberg/New York : Springer-Verlag, 1968.
- Krackler, et al. 2011.** *Schwierigkeiten und Chancen in der Laubholzverarbeitung.* 2011.
- . 2010.** *Untersuchungen zur Verwertung von bei anfallenden Holzresten,.* s.l. : Kuratorium des Fonds zur Förderung der Wald- und Holzforschung Nr. 2008.10, 2010.
- Lampert, H. 1966.** *Faserplatten Rohstoff, Herstellverfahren, Eigenschaften.* Leipzig : VEB-Fachbuchverlag, 1966.
- Ludwig, K. 1933.** *Beiträge zur Kenntnis der künstlichen Holztrocknung mit besonderer Berücksichtigung des Einflusses der Temperatur.* Berlin : TU-Berlin, 1933.
- Merkel, M., Thomas, K.H. 2007.** *Taschenbuch der Werkstoffe.* München : Hanser-Verlag, 2007. 978-3-446-41194-4.
- Mötzl, H., Zegler, T. 2000.** *Ökologie der Dämmstoffe: Grundlagen der Wärmedämmung Lebenszyklusanalysen von Wärmedämmstoffen optimale Dämmstandards.* Wien : Springer-Verlag, 2000.
- Niemz, P. 1993.** *Physik des Holzes und der Holzwerkstoffe.* Dresden : DRW-Verlag, 1993.



- Niemz, P. 2003.** *Holz und Holztechnologie, Skript zur Vorlesung Holztechnologie 2.* Zürich : s.n., 2003.
- Niemz, P. 2010.** *Holz und Holzwerkstoffe, Skript zur Vorlesung Baustoffe 1.* Zürich : s.n., 2010.
- Niemz, P. 1993.** *Physik des Holzes und der Holzwerkstoffe.* Leinfelden-Echterdingen : DRW-Verlag, 1993. 3-87181-324-9.
- Niemz, P., Soneregger, W. 2009.** *Untersuchungen zu Sorptionsverhalten von Holzwerkstoffen.* Berlin : Verlag für Architektur und technische Wissenschaften, 2009. Bauphysik 31, Heft 4.
- Paulitsch, M. 1989.** *Moderne Holzwerkstoffe.* Berlin : Springer-Verlag, 1989. 3-540-50750-7.
- Popper, R. et al. 2005.** *Untersuchungen zum Sorptions- und Quellverhalten von thermisch behandeltem Holz.* Zürich : Holz als Roh- und Werkstoff, 2005. 63.
- Reyer, E., Schild, K., Völkne, S. 2002.** *Kompendium der Dämmstoffe.* Stuttgart : Fraunhofer IRB-Verlag, 2002. 3-8167-6146-1.
- Schmidt, J. A. 2011.** *Experimentelle und theoretische Untersuchungen zur Ermittlung des Einflusses von Klebfugen auf den Diffusionswiderstand von Holzverklebungen.* Biel : Bachelor-Thesis, 2011.
- Schwab, J. 1977.** *Das grosse Buch vom Holz.* München : Schuler Verlagsgesellschaft, 1977. 103761107080.
- Schwyzer, A. 2010.** *Gesundheit und Vitalität, Ergebnis und des dritten LFI.* Birmensdorf : Eidgenössischen Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft, 2010.
- Siau, J. F. 1984.** *Transport proces in wood.* Berlin, Heidelberg, New York, Tokyo : Springer-Verlag, 1984.
- Siau, J. F. 1995.** *Wood: Influence of moisture on physikal properties.* Virginia Polytechnic Institut and State University : Wood Science an Forrest Products, 1995.
- Sonderegger, W. 2011.** *Experimental and theoretical investigations on the heat and water transport in wood an wood-based materials.* Zürich : s.n., 2011. Diss. ETH No. 19503.
- Sörensen, C. 2000.** *Wärmedämmstoffe im Vergleich.* München : Umweltinstitut München, 2000. 3-930-615-13-4.
- Tuttel, T. 1925.** *A mathematical theory of the drying of wood.* s.l. : Franklin Institut, 1925.
- Usbeck, T. 2010.** *Increasing storm damage to forests in Switzerland from 1858 to 2007.* 2010.
- Vanek, M, Teischinger, A. 1989.** *Diffusionskoeffizienten und Diffusionswiderstandszahlen von verschiedenen Holzarten.* Wien : BOKU-Wien, 1989.
- Wadsö, L. 1994.** *Describing non-Fickian water vapor sorption in wood.* s.l. : Journal of Materilas Science 29, 2367-2372, 1994.
- **1993a.** *Measurements of water vapor sorption in wood Part 1. Instrumentation.* s.l. : Wood Sicence and Technology 27, 369-400, 1993a.
- **1993b.** *Measurements of water vapor sorption in wood Part 2. Results.* s.l. : Wood Science and Technology 28, 59-65, 1993b.
- Wagenfüh, A., Scholz, F. 2008.** *Taschenbuch der Holztechnik.* München : Hanser-Verlag, 2008. 978-3-446-22852-8.
- Wagenführ, R. 2000.** *Holzatlas.* Leibzig : Hanser-Verlag, 2000. 3-446-21390-2.
- Zwicker, P. 2008.** *Untersuchungen zum Diffusionsverhalten von Holz und Holzwerkstoffen.* Zürich : Bachelorarbeit, 2008.



Anhang

Inhaltsverzeichnis

1	Wärmeleitfähigkeit	
1.1	Spezifischer Wärmewiderstand	1
1.2	Spezifischer Wärmewiderstand bei Materialkombination	2
1.3	Temperaturabhängigkeit	3
2	Wasserdampf-Diffusion	11
3	Quellen und Schwinden	
3.1	Ausgleichsfeuchte bei Normalklima	16
3.2	Sorptionsisothermen	17
3.3	Lineare Quell- und Schwindmasse	21
3.3.1	Lineare Quell- und Schwindmasse der Länge	21
3.3.2	Lineare Quell- und Schwindmasse der Dicke	22
3.3.3	Lineare Quell- und Schwindmasse der Breite	23
3.4	Maximale Quell- und Schwindmasse	24
3.5	Differentielle Quellung und Quellungskoeffizient	25
3.6	Volumenquell- und Schwindmass	26
4	Plattenoberflächen	
4.1	Gutex	27
4.2	Pavatex	27
4.3	Valnaturel	28
4.4	Steico	28
4.5	Spaceloft	29
5	Produktdatenblätter	
5.1	Gutex	30
5.2	Pavatex	32
5.3	Valnaturel	37
5.4	Steico	39
5.5	Spaceloft	41

1 Wärmeleitfähigkeit

1.1 Spezifischer Wärmewiderstand

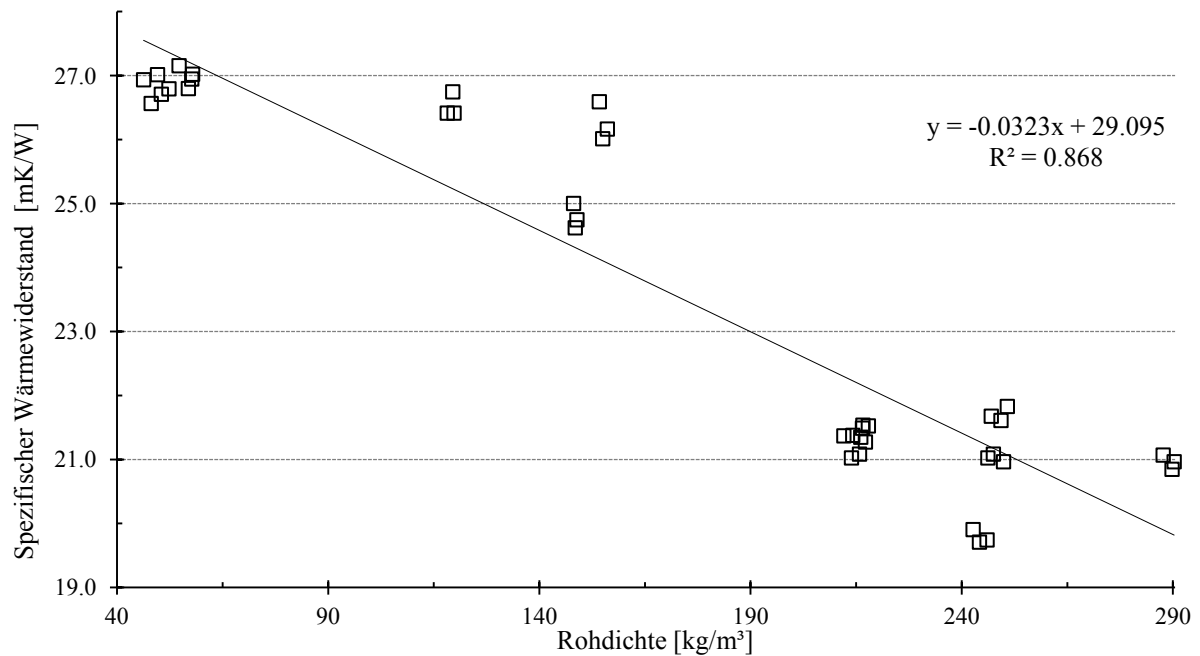


Abbildung 1.1: Spezifischer Wärmewiderstand in Abhängigkeit der Rohdichte

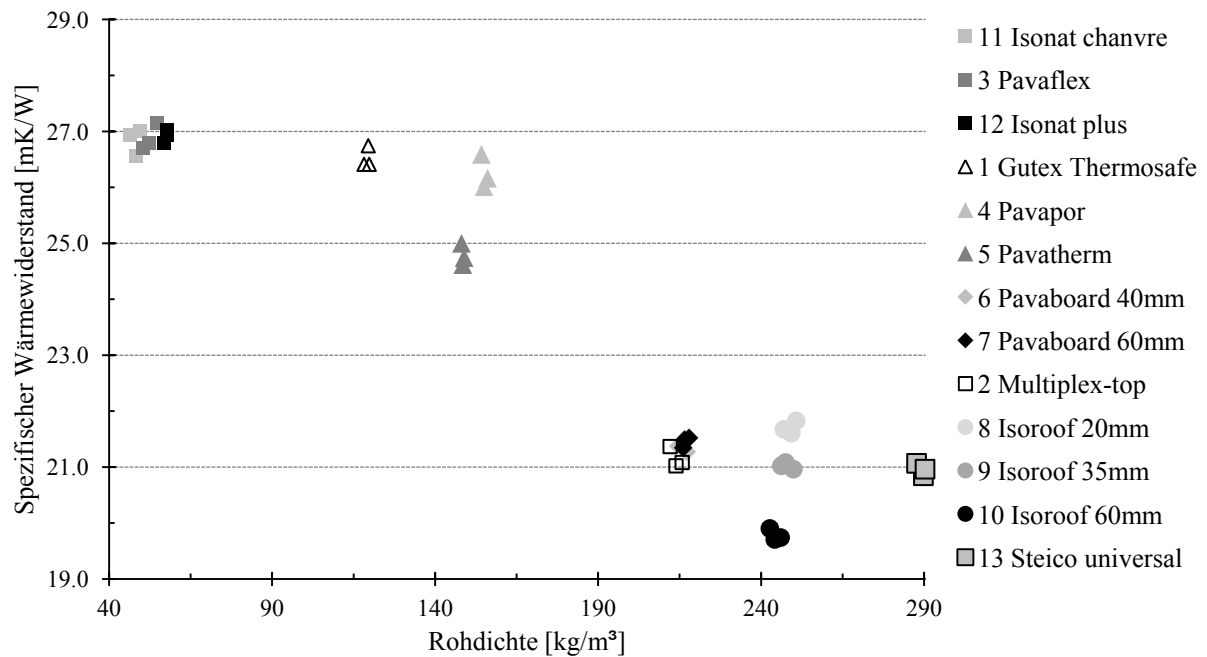


Abbildung 1.2: Spezifischer Wärmewiderstand in Abhängigkeit der Rohdichte nach Einzelmaterialien

1.2 Spezifischer Wärmewiderstand bei Materialkombination

Abbildung 1.3 zeigt den spezifischen Wärmewiderstand in Abhängigkeit zur Rohdichte bei Materialkombination.

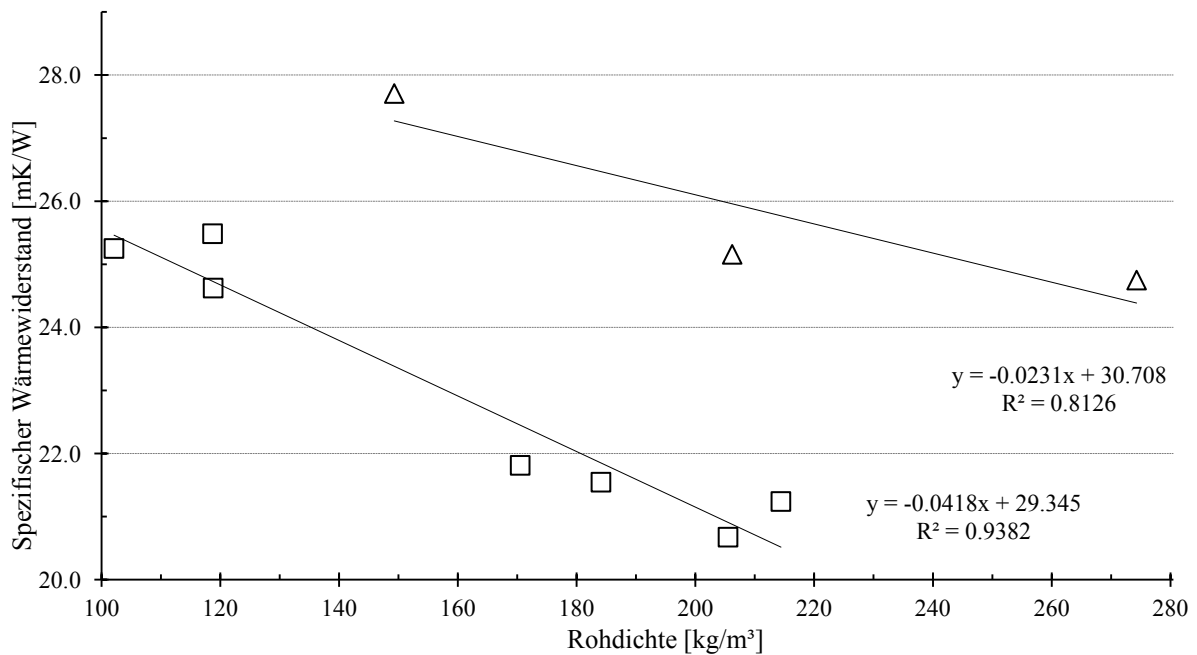


Abbildung 1.3: Spezifischer Wärmewiderstand in Abhängigkeit zur Rohdichte bei Materialkombination

Abbildung 1.4 zeigt den spezifischen Wärmewiderstand in Abhängigkeit zur Rohdichte mit Nummerierung der Kombinationen.

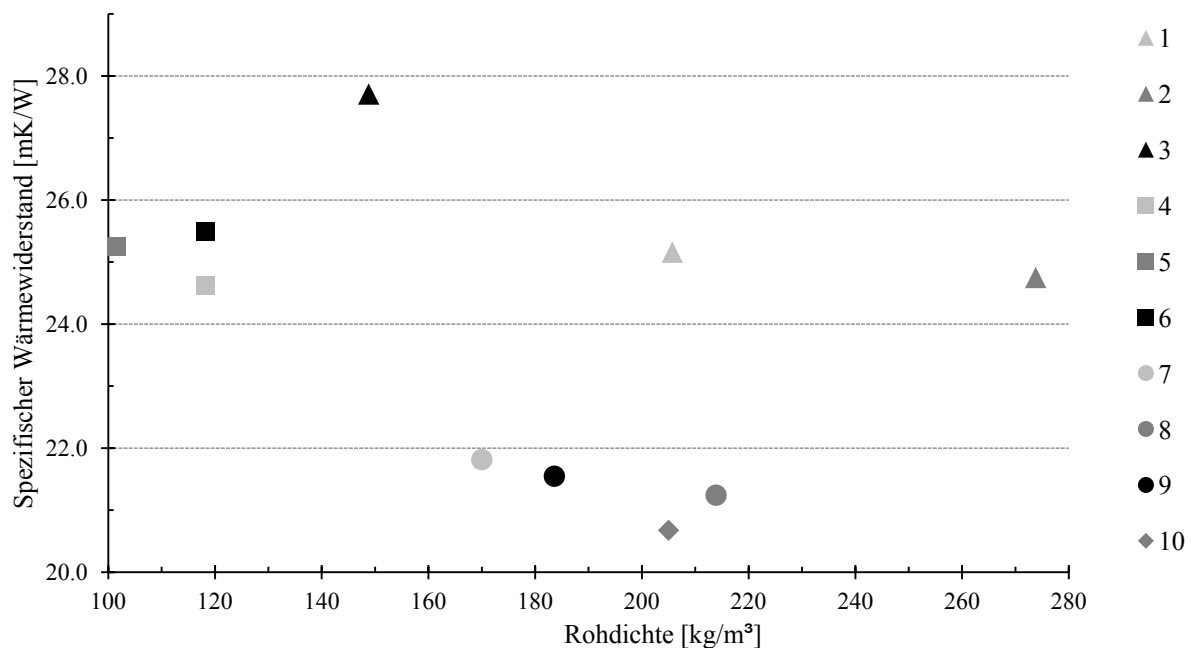


Abbildung 1.4: Spezifischer Wärmewiderstand in Abhängigkeit zur Rohdichte bei Materialkombination nach Kombinationen

1.3 Temperaturabhängigkeit

Tabelle 1.1 zeigt die Funktion und das Bestimmtheitsmass der Trendlinien der gemessenen λ -Werte der einzelnen Prüfkörper bei 10, 20 und 30°C.

Tabelle 1.1: Funktion und Bestimmtheitsmass von $\lambda_{10}(T)$

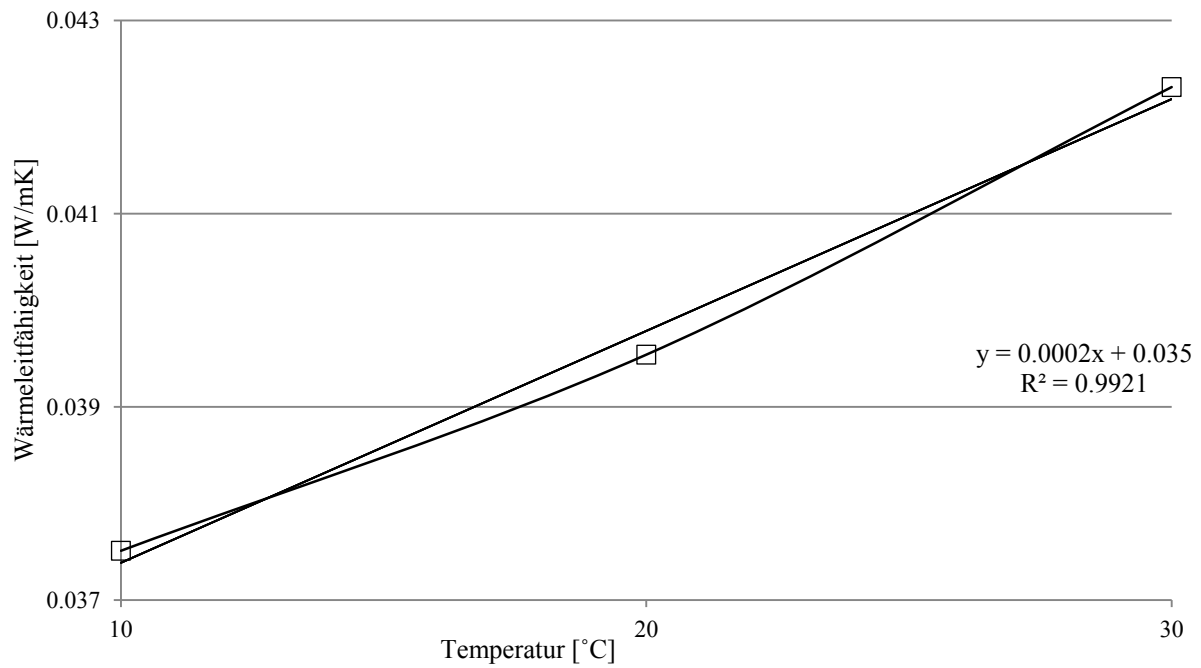
Einzelmaterialien		Messergebnisse			Funktion $\lambda_{10}(T)$		Bestimmtheitsmass
		Rohdichte ρ [kg/m ³]	Dicke d [mm]	Lambda λ_{10} [W/mK]	A	B	
Nr.	Firma	Produktenamen					R ²
1	Gutex	Thermosafe-homogen ¹	1	120	60.2	0.03739	0.9921
			2	120	60.2	0.03779	0.9998
			3	118	60.2	0.03779	0.9997
2		Multiplex-top ¹	1	212	35.1	0.04657	0.9868
			2	214	35.2	0.04700	0.9925
			3	216	35.1	0.04734	0.9433
3	Pavatex	Pavaflex	1	58	36.0	0.03724	0.9989
			2	57	36.2	0.03747	0.9978
			3	58	35.9	0.03702	0.9981
4		Pavapor	1	155	17.3	0.03783	0.9999
			2	154	17.3	0.03791	0.9998
			3	156	17.2	0.03808	0.9965
5		Pavatherm	1	149	39.4	0.04066	0.9673
			2	149	39.2	0.04028	0.9709
			3	148	39.6	0.03992	0.9749
6		40 mm Pavaboard	1	217	40.9	0.04707	0.9781
			2	217	40.4	0.04653	0.9556
			3	214	40.7	0.04703	0.9613
7		60 mm Pavaboard	1	216	60.9	0.04686	0.9877
			2	217	60.5	0.04646	0.9823
			3	218	60.4	0.04637	0.9828
8		20 mm Isoroof	1	247	20.3	0.04654	0.9979
			2	251	19.7	0.04615	0.9947
			3	249	19.9	0.04648	0.9969
9		35 mm Isoroof	1	248	35.1	0.04774	0.9661
			2	246	35.2	0.04763	0.9734
			3	250	35.3	0.04751	0.9625
10		60 mm Isoroof	1	244	61.4	0.05059	0.9996
			2	243	61.8	0.05036	0.9999
			3	246	61.8	0.05068	0.9993
11	Valnaturel	Isonat chanvre	1	50	38.5	0.03689	0.9986
			2	48	38.4	0.03759	0.9988
			3	46	37.5	0.03719	0.9981
12		Isonat plus	1	58	36.0	0.03724	0.9997
			2	57	36.2	0.03747	0.9956
			3	58	35.9	0.03702	0.9972
13	Steico	Steico universal	1	290	35.5	0.05130	0.9871
			2	288	35.6	0.05099	0.9995
			3	290	35.3	0.05087	0.9961
14	Spaceloft	Aerogel Vliesmatte	1	151	8.9	0.01421	0.9959
			2	149	9.0	0.01417	0.9905
			3	152	8.8	0.01441	0.9838

¹ im Trockenverfahren hergestellt

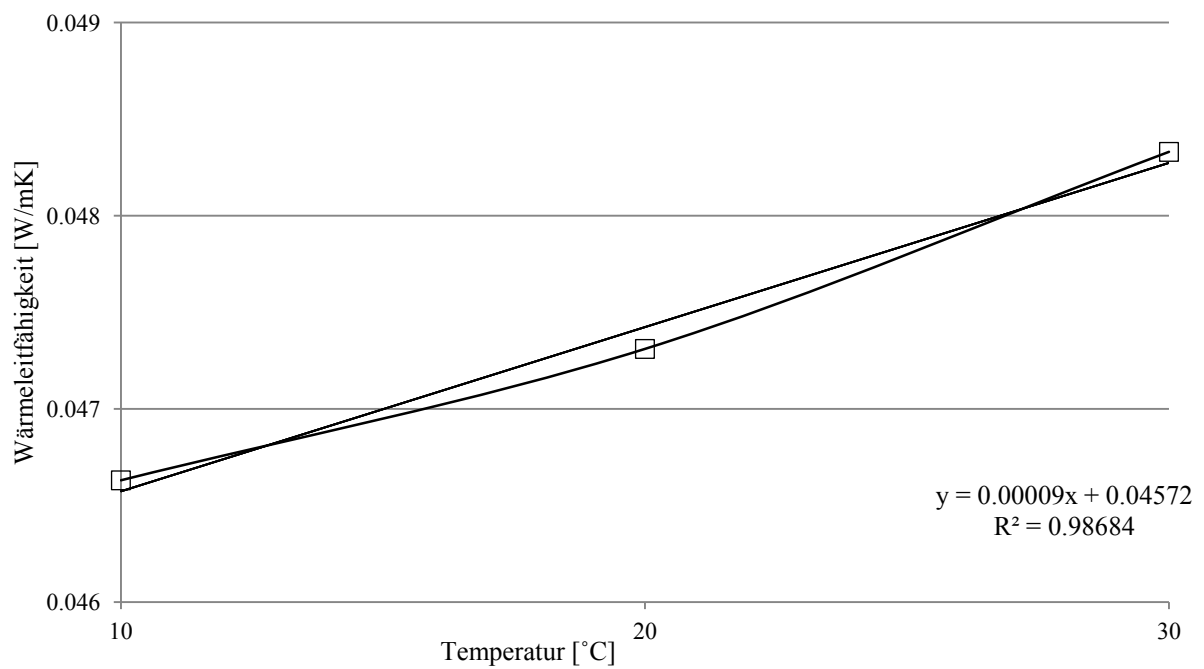
Dabei weisen die geschichtete Produkte 7 und 10, welche über zwei Klebfugen verfügen den grössten Wert A für die Steigung der Trendlinie mit 0.0004 auf. Die Produkte 2 und 14 weisen mit 0.0008 und 0.00003 die kleinsten Werte der Steigung auf.

Bei den Produkten 8 ,9 und 10 alle drei Isoroof zeigt, dass sich die Steigung A bei Verdopplung der Schichtdicke ebenfalls verdoppelt.

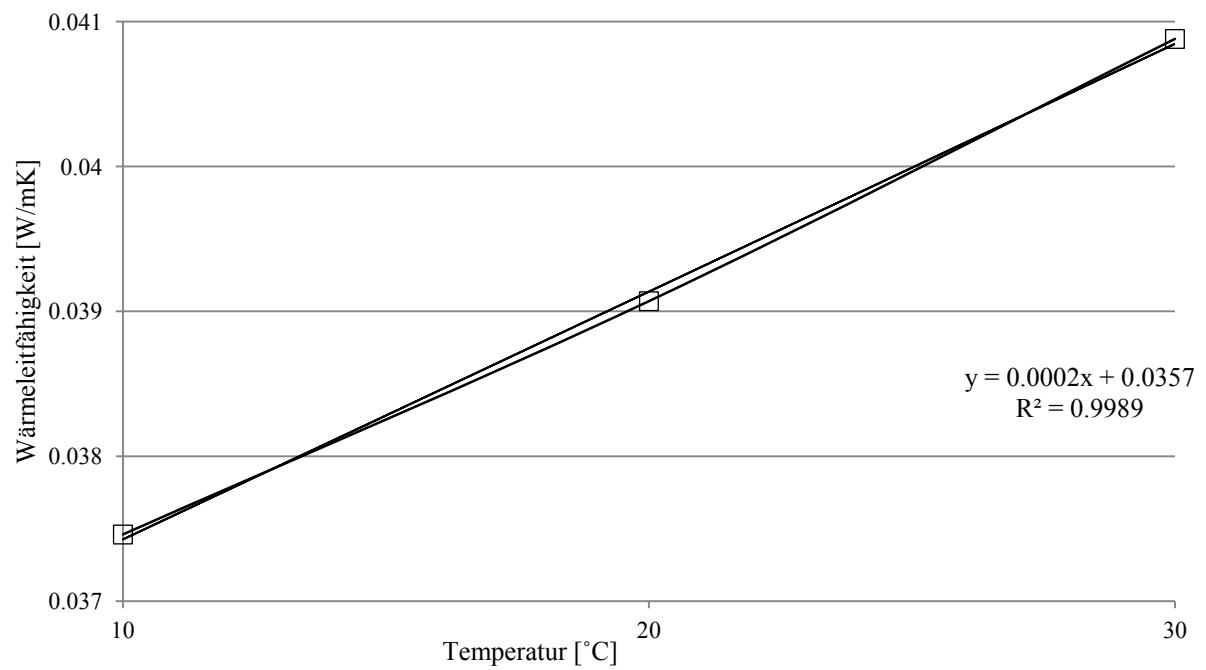
1.1



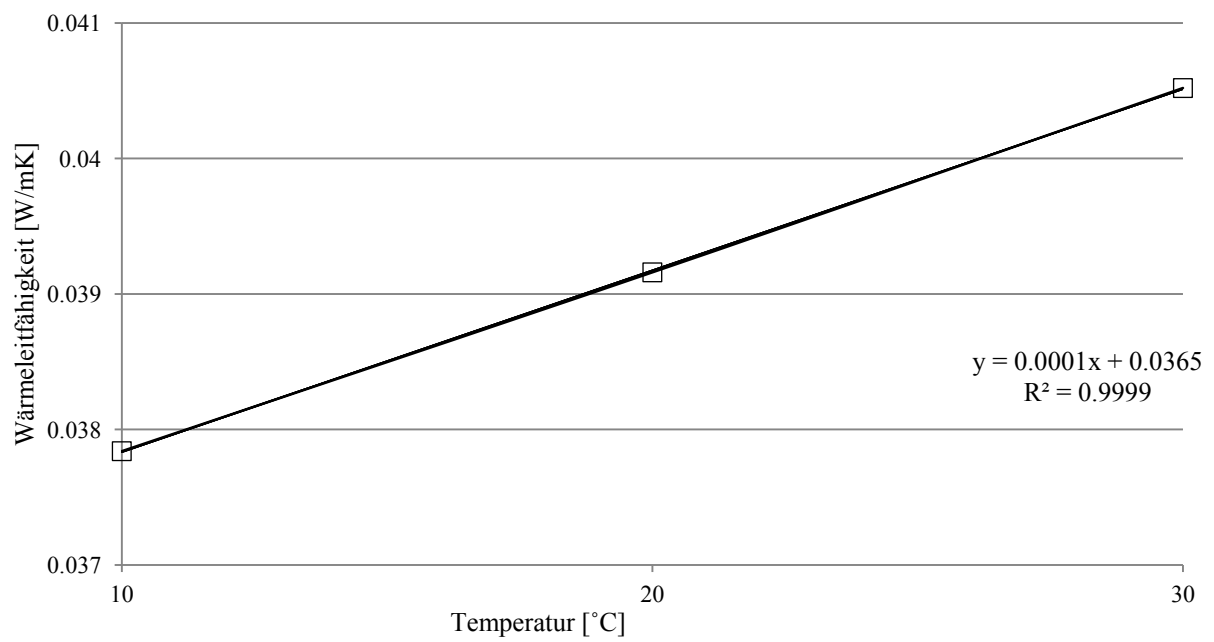
2.1

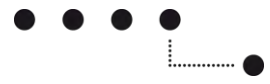


3.1

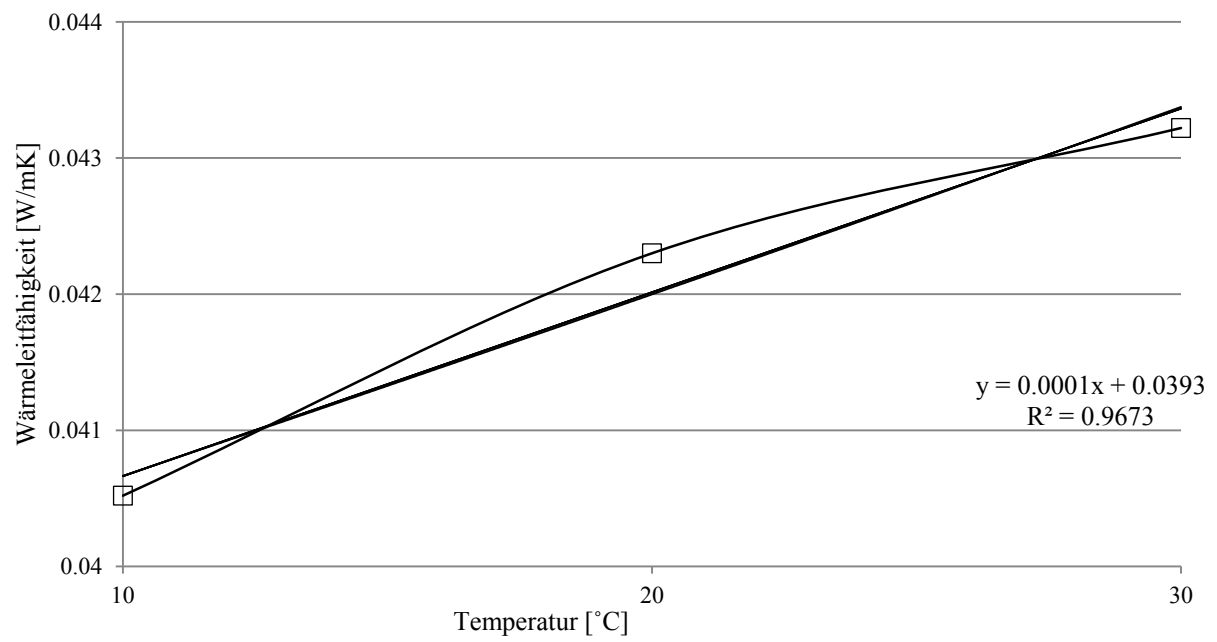


4.1

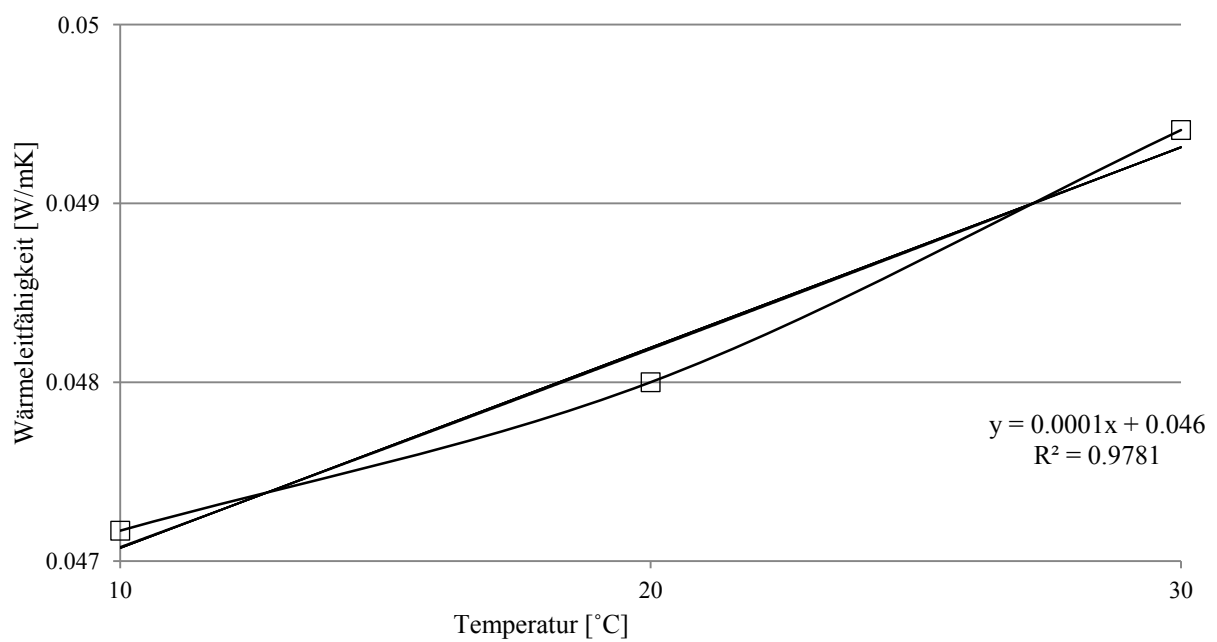




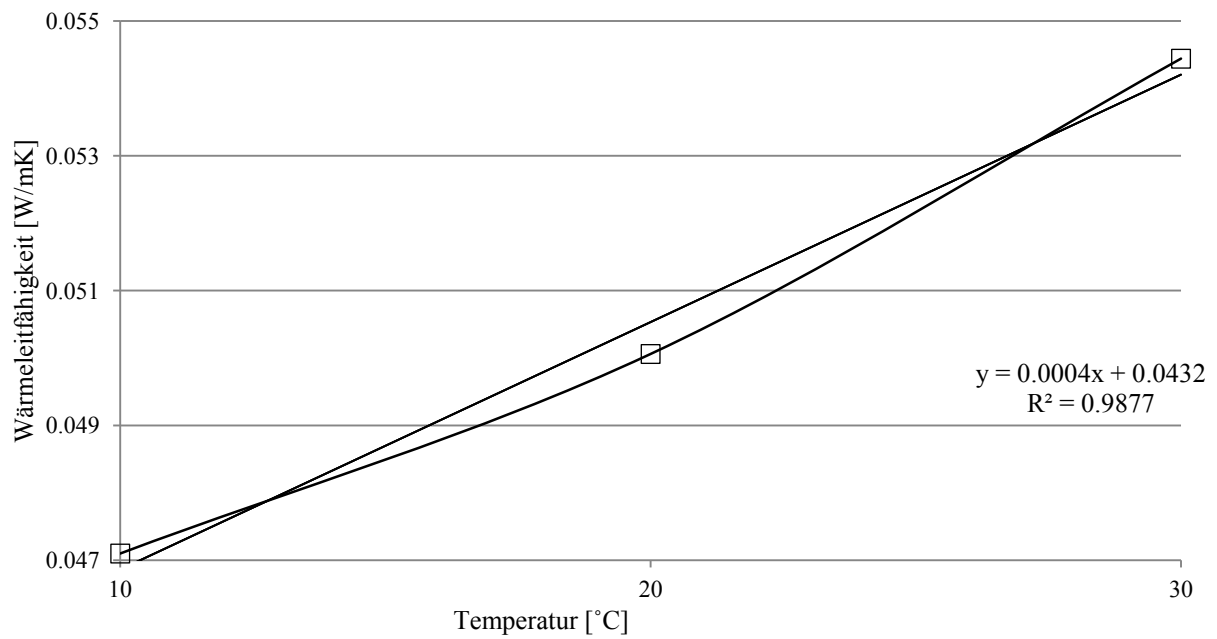
5.1



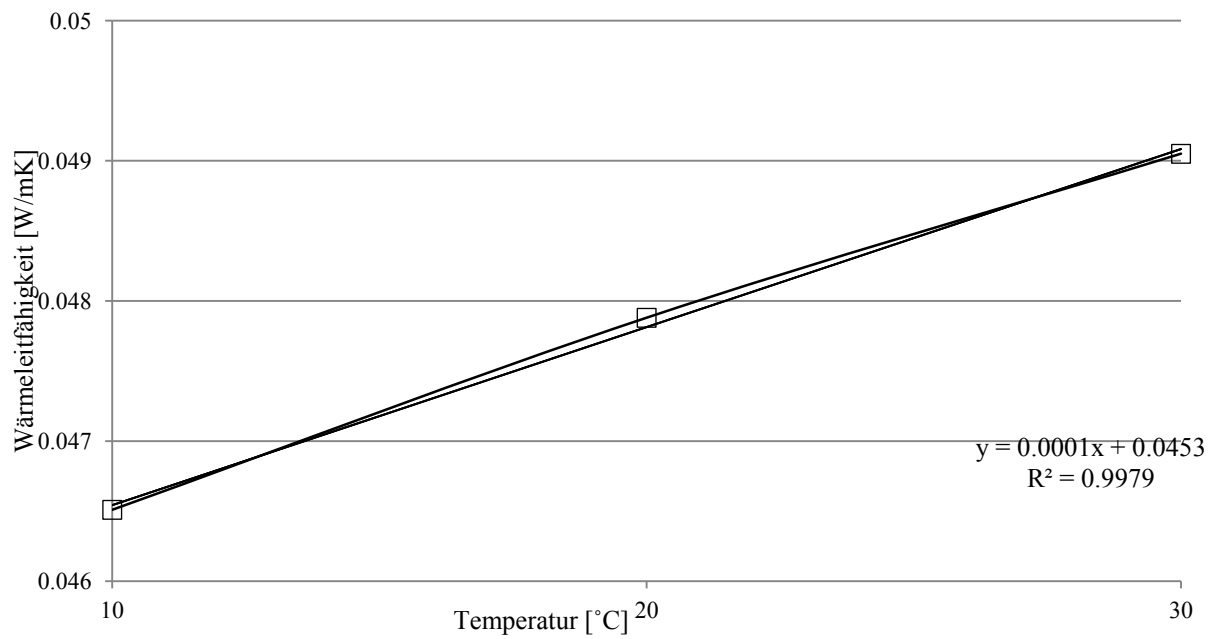
6.1



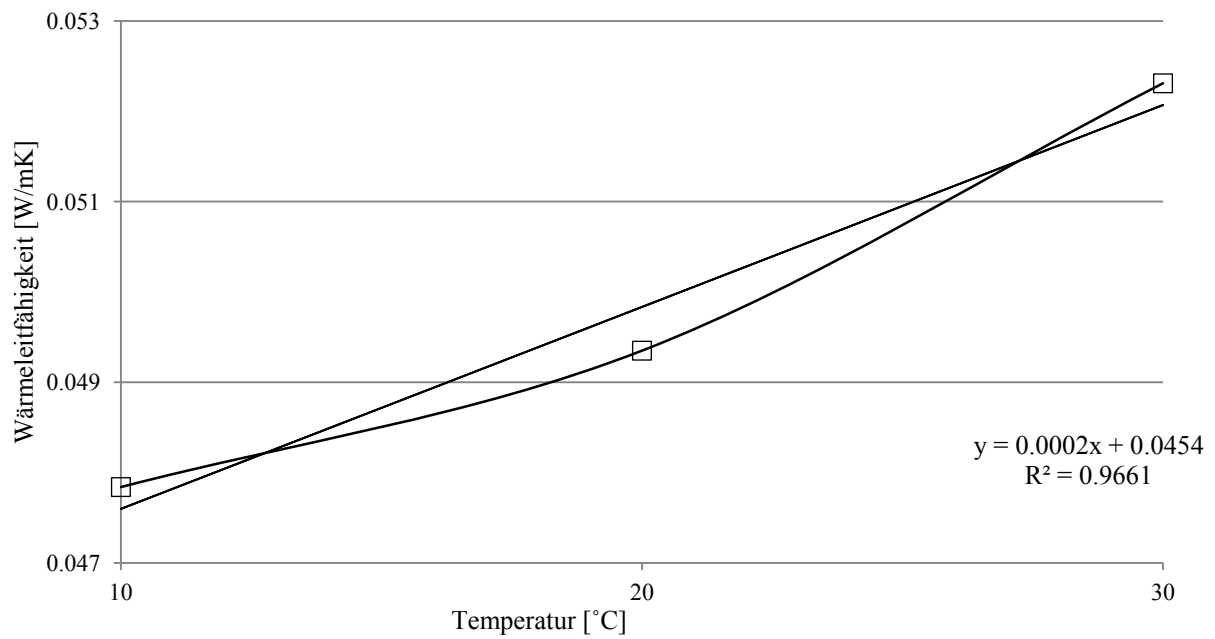
7.1



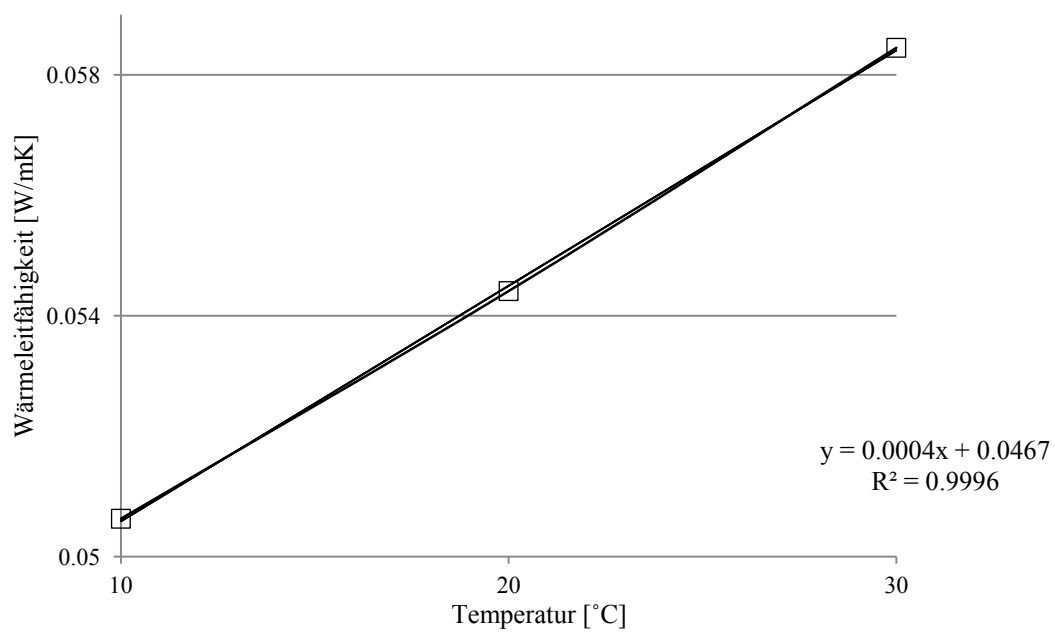
8.1



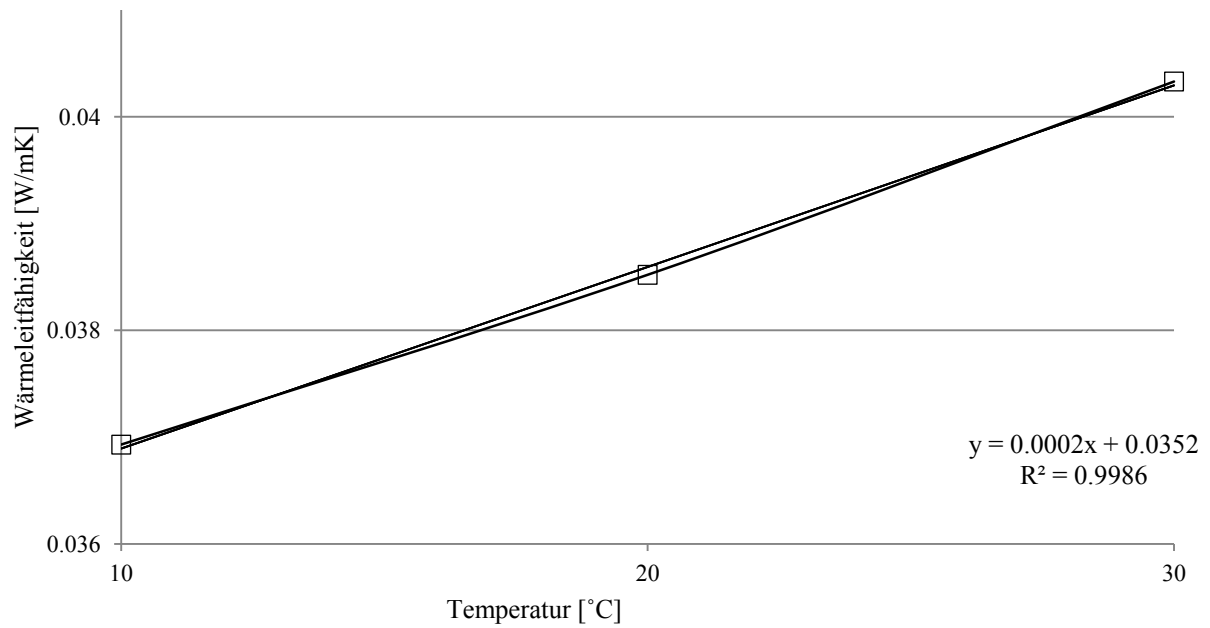
9.1



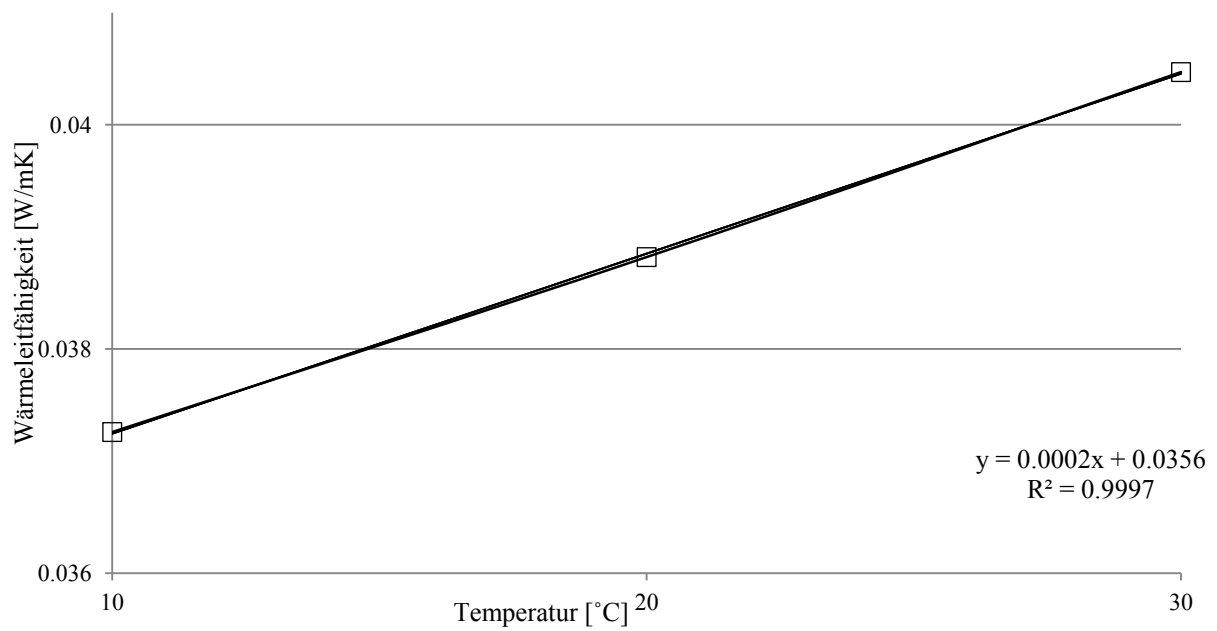
10.1



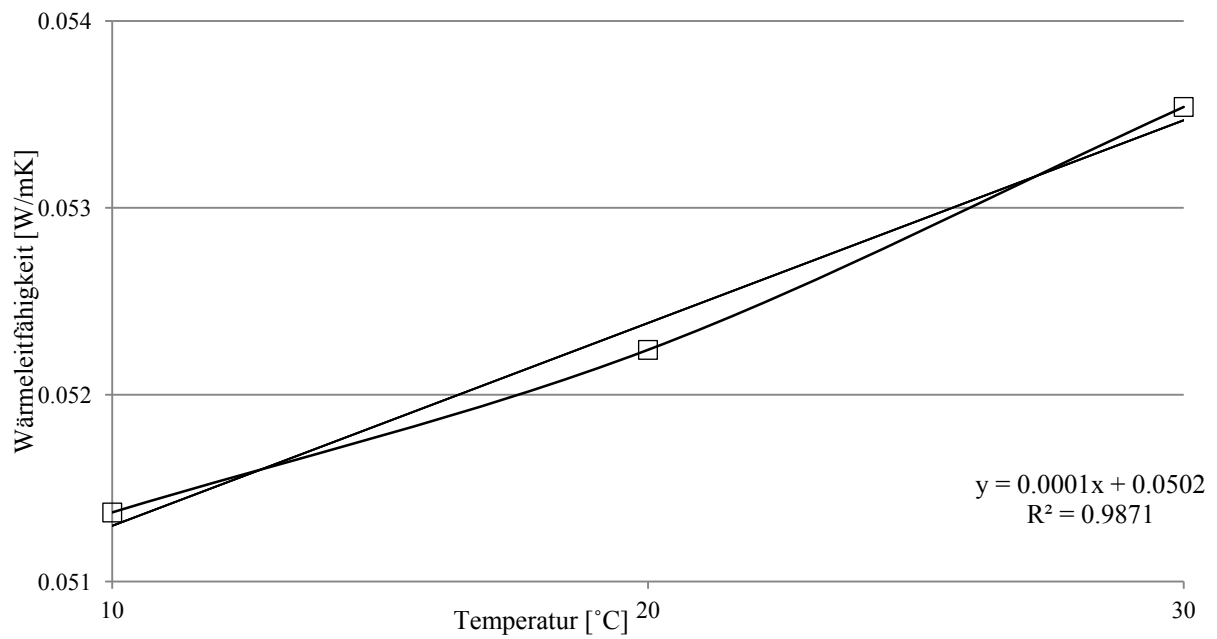
11.1



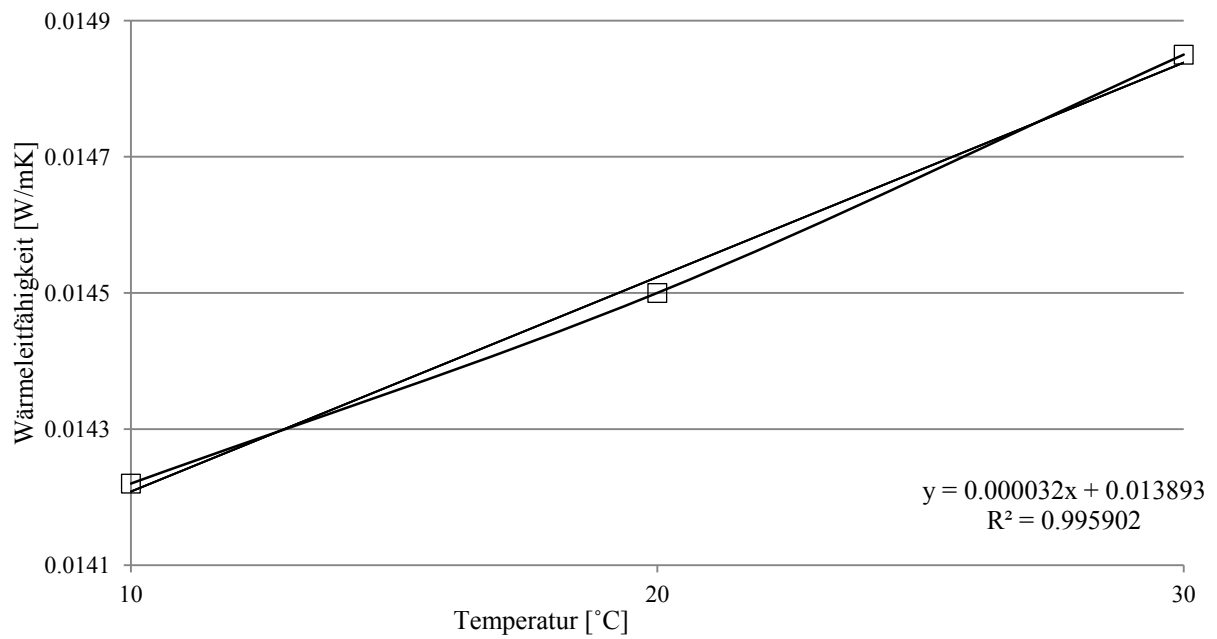
12.1

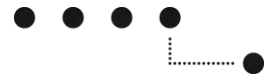


13.1



14.1





2 Wasserdampf-Diffusion

Materialkombinationen

1



2



3



4



5



6



7



8

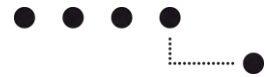


9



10





3 Quellen und Schwinden

3.1 Ausgleichsfeuchte bei Normalklima

Tabelle 3.1: Einzelmaterialien der Quell- und Schwindversuche

Einzelmaterialien				Nennwerte ²	
				Rohdichte	Dicke
Nr.	Firma	Produktenamen	Inhaltstoffe und Zusätze	ρ [kg/m ³]	d [mm]
1	Gutex	Thermosafe-homogen ¹	NH, 4% PUR Harz, 0.5% Paraffin	110	60
2		Multiplex-top ¹	NH, 4% PUR Harz, 1.5% Paraffin	200	35
3	Pavatex	Pavapor	NH, 1% Paraffin	135	15
4		Pavatherm	NH, 1% Paraffin, 1.5% PVAc-Kleber	140	40
5		Pavaboard	NH, 5% Stärke, 0.5% Paraffin	210	20
6		Isoroof-natur-KN	NH, 5% Latex, 0.7% Paraffin	240	35
7	Steico	Steico universal	NH, Paraffin, Aluminiumsulphat	270	35

¹ im Trockenverfahren hergestellt

² gemäss Herstellerangaben

Tabelle 3.2: Ausgleichsfeuchte und Normalrohddichte vor der Messung

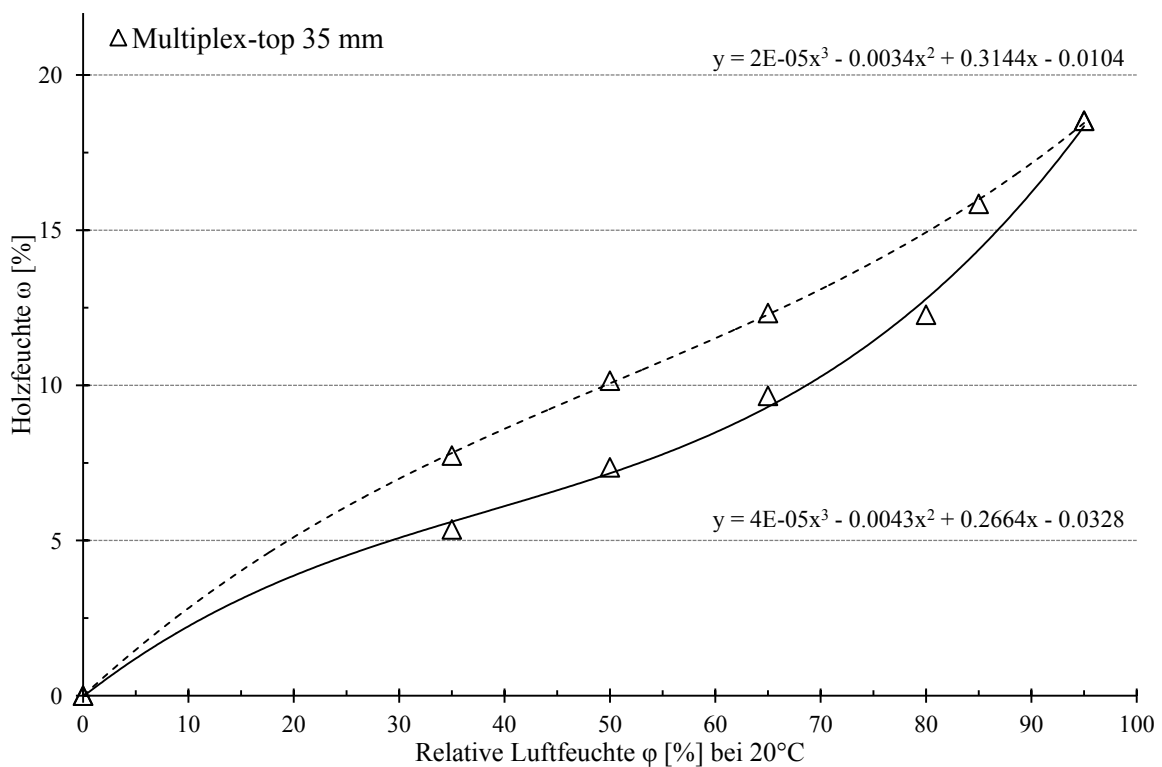
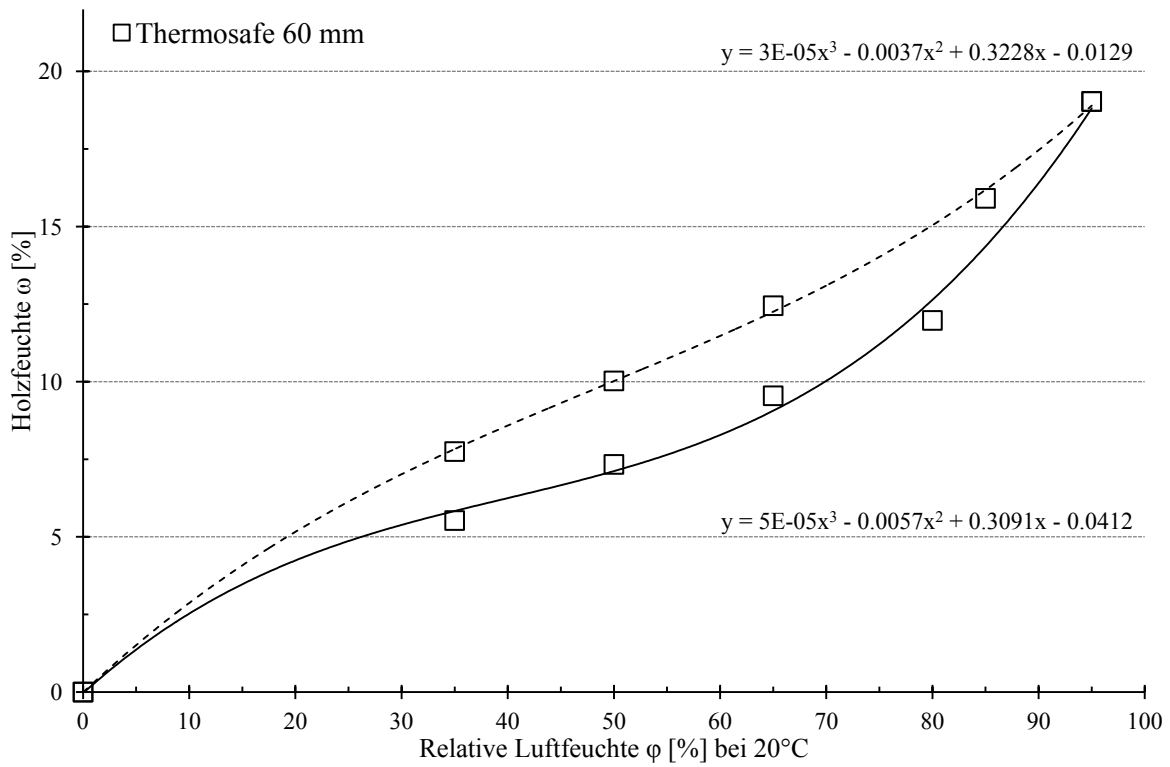
Einzelmaterialien		vor der Messung bei 20°C/65% rel. Luftfeuchte		
Nr.		Feuchte	Rohdichte	Abweichung zum Nennwert [%]
		ω [%]	ρ [kg/m ³]	
1 ¹	\bar{x}	10.4	108	-1.6
	s	0.349	0.985	
	Var	0.034	0.009	
2 ¹	\bar{x}	11.1	193	-3.4
	s	0.047	2.419	
	Var	0.004	0.013	
3	\bar{x}	11.1	132	-1.9
	s	0.168	0.794	
	Var	0.015	0.006	
4	\bar{x}	11	127	-9.3
	s	0.061	0.648	
	Var	0.005	0.005	
5	\bar{x}	10.9	224	+6.6
	s	0.668	0.899	
	Var	0.061	0.004	
6	\bar{x}	10.9	225	-6.25
	s	0.109	0.920	
	Var	0.010	0.004	
7	\bar{x}	10	264	-2.2
	s	0.430	1.933	
	Var	0.043	0.007	

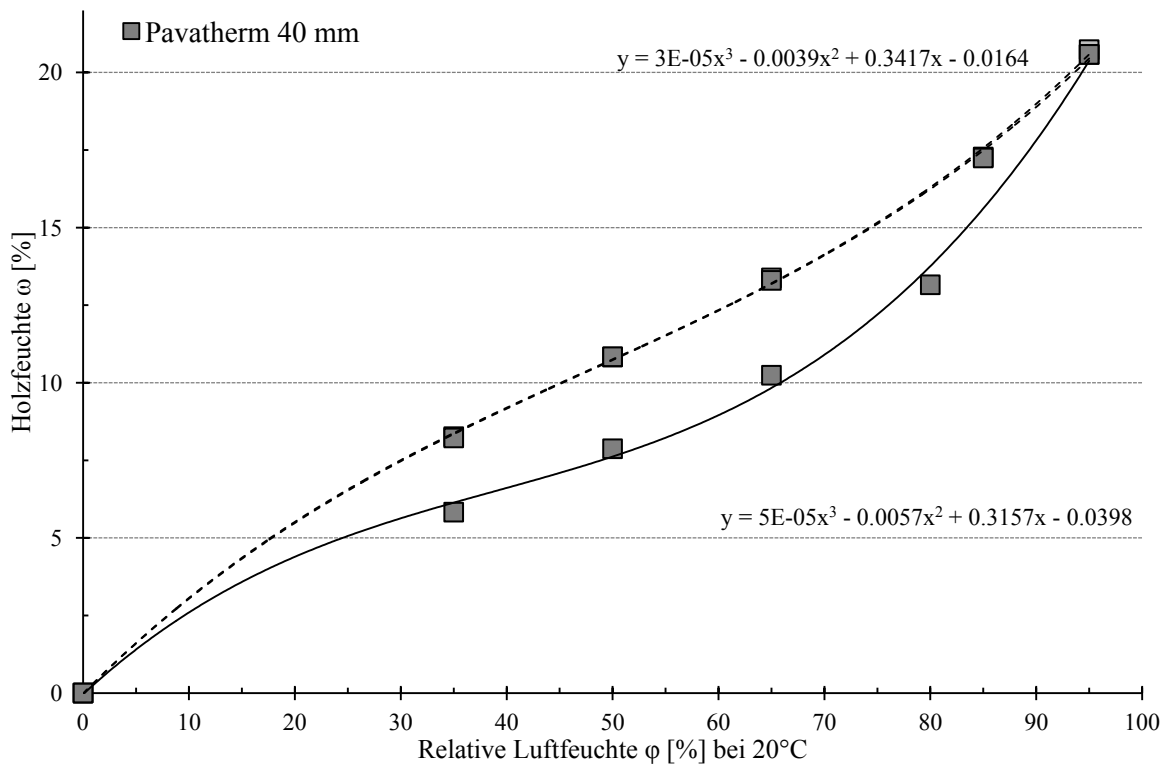
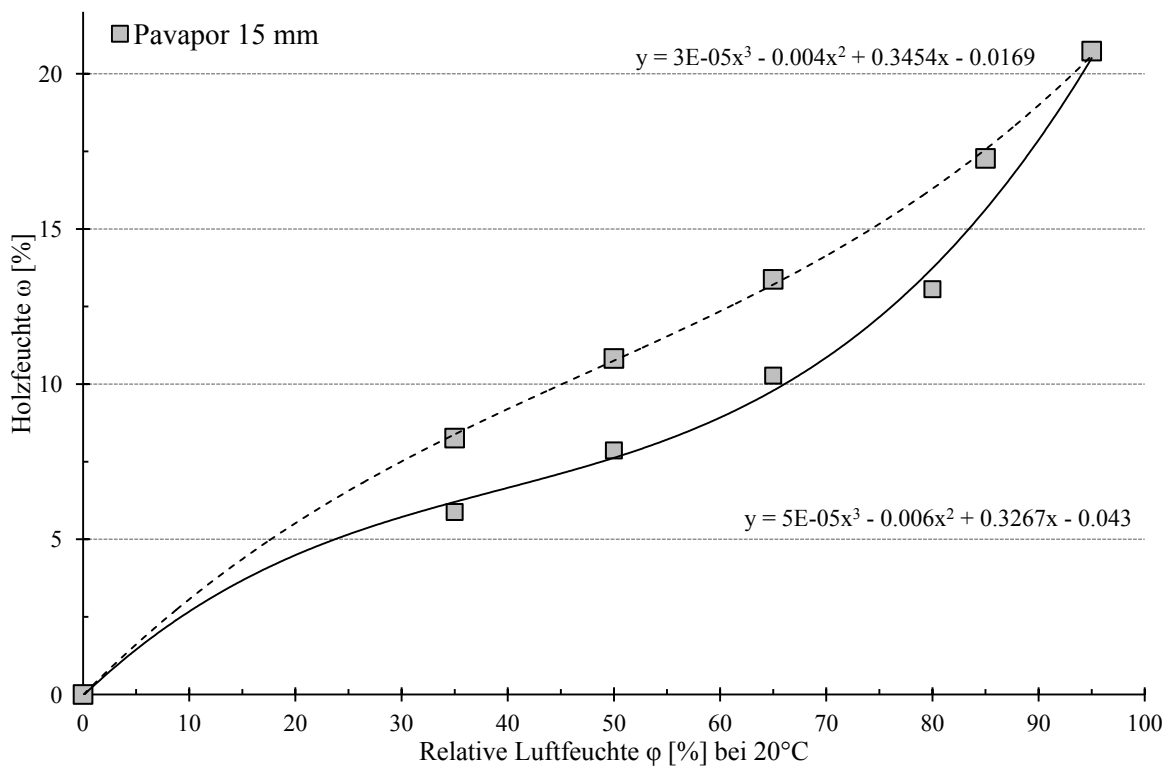
¹ im Trockenverfahren hergestellt

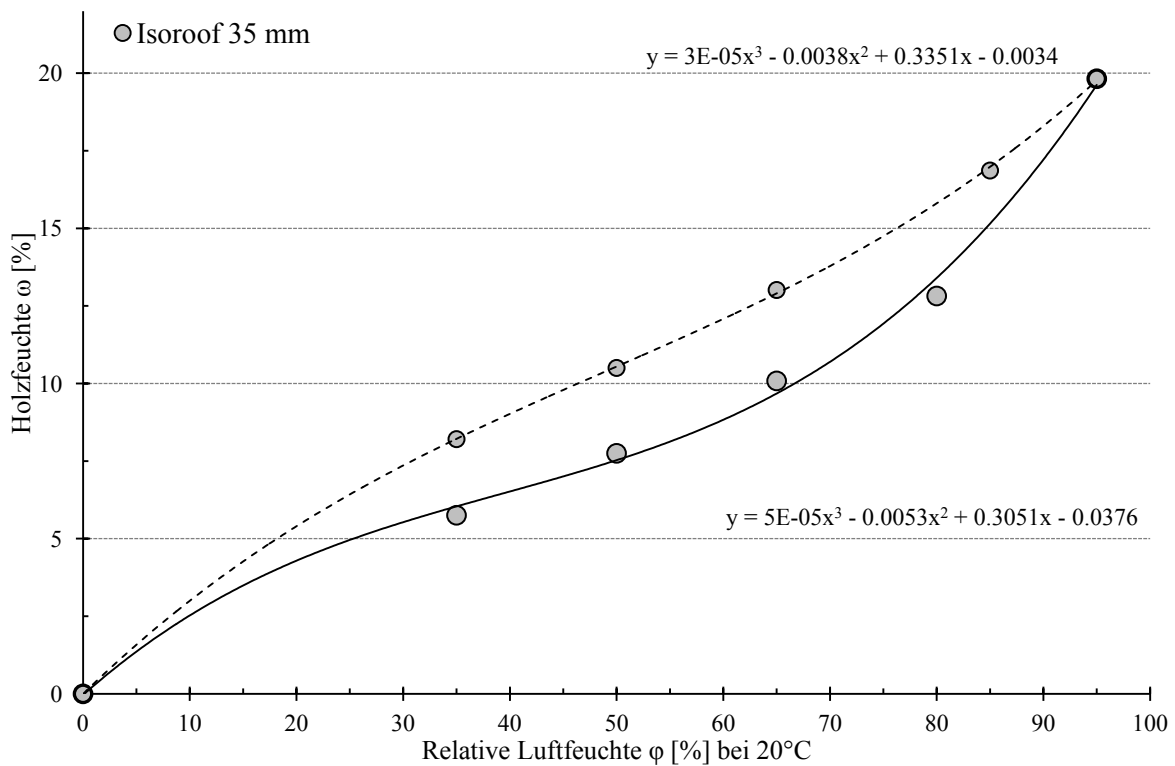
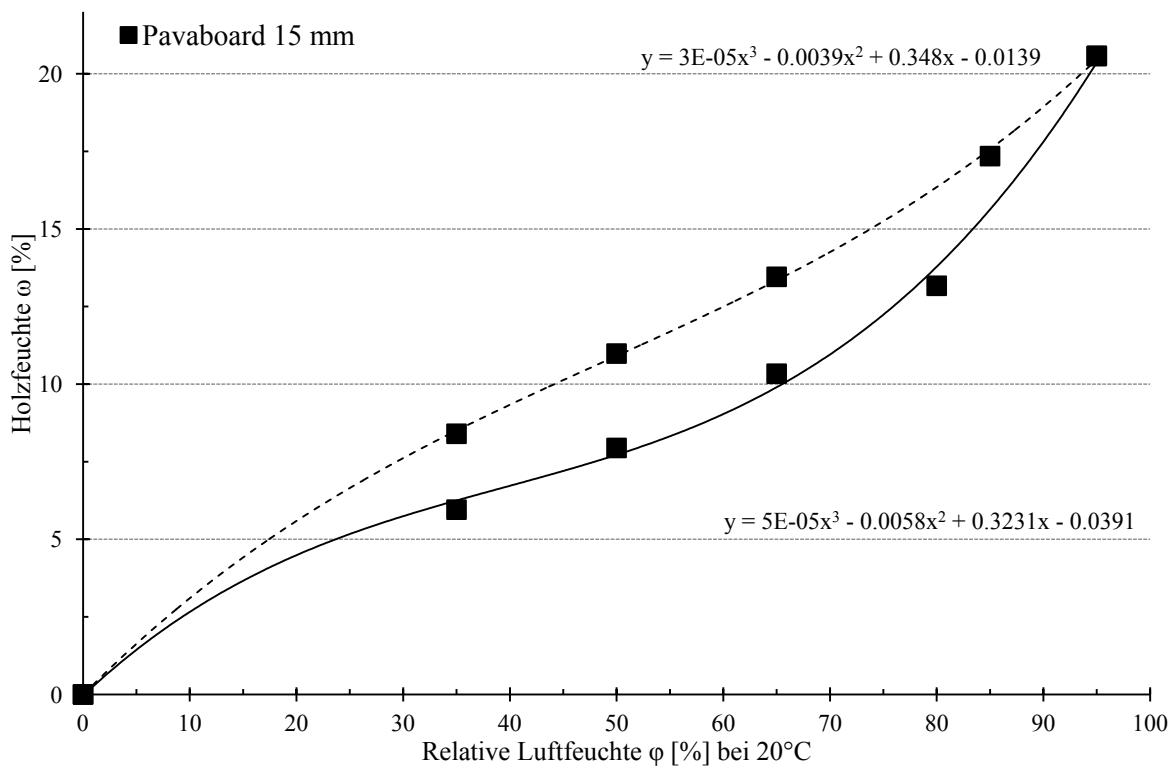
Abkürzungen

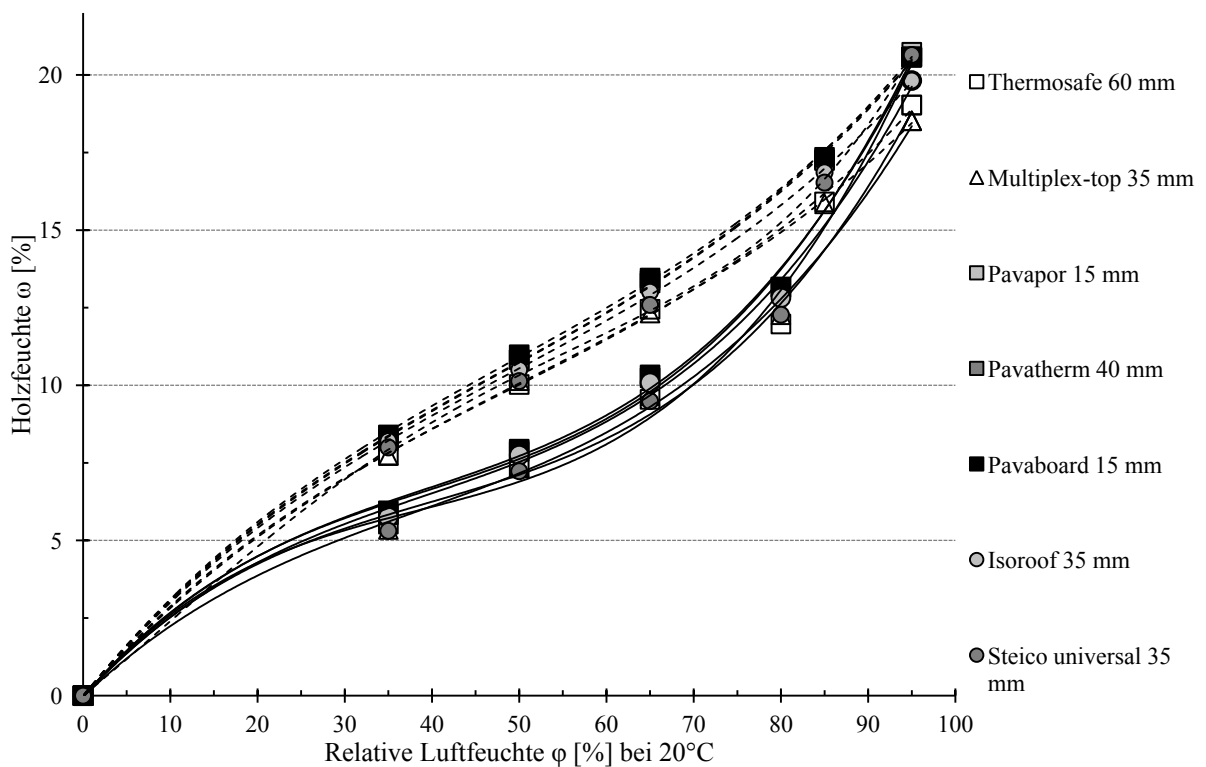
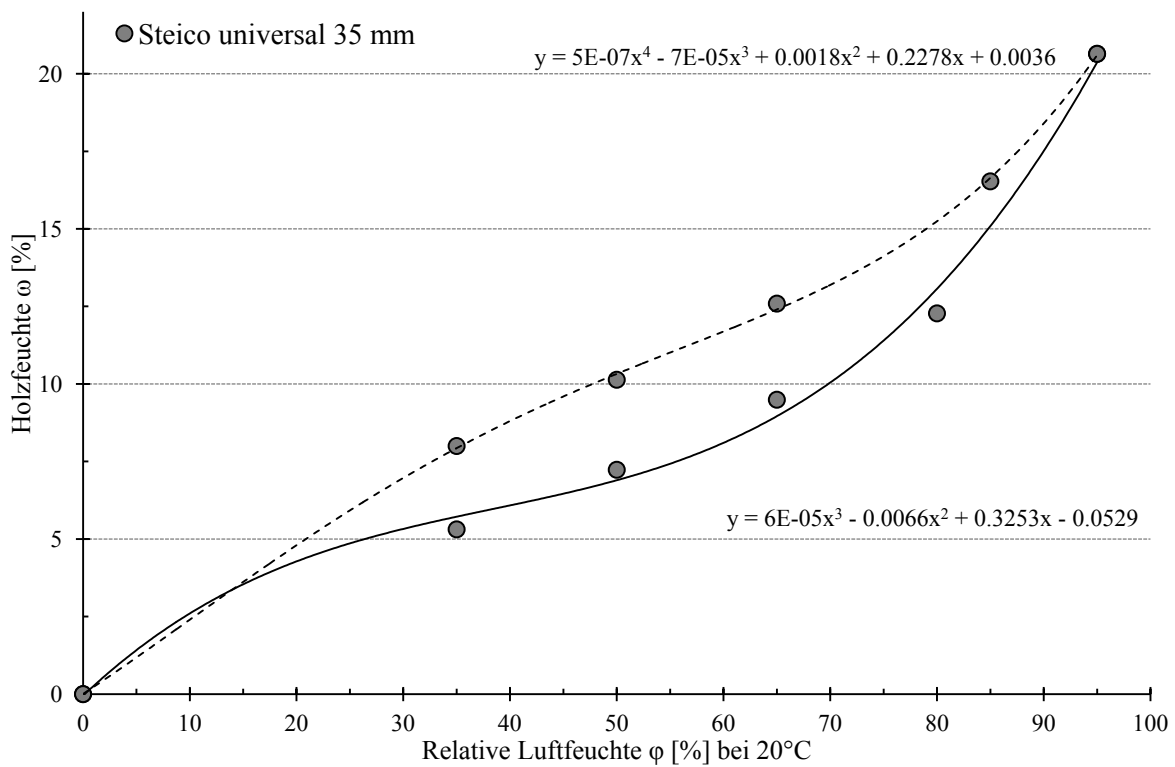
\bar{x}	Mittelwert
s	Standardabweichung
Var	Variationskoeffizient

3.2 Sorptionsisothermen











3.3 Lineare Quell- und Schwindmasse

3.3.1 Lineare Quell- und Schwindmasse der Länge

Tabelle 3.3 stellt das Quell- und Schwindmasse der Länge in und quer zur Produktionsrichtung dar. Dabei werden der Klimawechsel sowie das Quell- und Schwindmass über den Bereich der Adsorption (35%/95% r. LF) und der Desorption (95%/35% r. LF) angegeben.

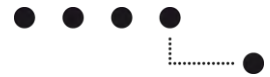
Tabelle 3.3: Lineares Quell- und Schwindmass der Länge

Lineares Quell-und Schwindmass		Länge	Quellen					Schwinden					
		α_l	β_l	Klimawechsel der relativen Luftfeuchte φ [%]									
Nr.	Richtung	[%]	35/50	50/65	65/80	80/95	35/95	95/85	85/65	65/50	50/35	35/0	95/35
1 ¹	quer	\bar{x}	0.112	0.040	0.041	0.121	0.314	0.071	0.042	0.059	0.056	0.206	0.228
		s	0.023	0.029	0.030	0.054	0.042	0.026	0.025	0.017	0.013	0.017	0.049
		Var	0.208	0.709	0.715	0.446	0.134	0.373	0.596	0.295	0.229	0.083	0.213
	längs	\bar{x}	0.093	0.052	0.041	0.154	0.340	0.074	0.058	0.046	0.070	0.186	0.249
		s	0.022	0.026	0.020	0.024	0.029	0.017	0.015	0.011	0.014	0.012	0.024
		Var	0.241	0.490	0.476	0.155	0.086	0.230	0.260	0.241	0.200	0.063	0.097
2 ¹	quer	\bar{x}	0.082	0.065	0.030	0.121	0.298	0.081	0.032	0.053	0.055	0.194	0.221
		s	0.019	0.017	0.017	0.005	0.016	0.010	0.011	0.008	0.016	0.030	0.017
		Var	0.232	0.257	0.557	0.044	0.055	0.126	0.345	0.145	0.290	0.153	0.078
	längs	\bar{x}	0.086	0.074	0.024	0.126	0.310	0.079	0.041	0.040	0.075	0.179	0.235
		s	0.033	0.021	0.024	0.011	0.034	0.021	0.008	0.016	0.017	0.009	0.024
		Var	0.383	0.289	0.996	0.091	0.111	0.263	0.209	0.403	0.223	0.052	0.103
3	quer	\bar{x}	0.033	0.033	0.050	0.066	0.182	0.032	0.071	0.050	0.069	0.210	0.222
		s	0.008	0.011	0.018	0.010	0.012	0.013	0.014	0.007	0.014	0.013	0.012
		Var	0.233	0.325	0.363	0.157	0.063	0.389	0.200	0.146	0.208	0.063	0.052
	längs	\bar{x}	0.013	0.044	0.031	0.114	0.202	0.058	0.066	0.059	0.070	0.233	0.254
		s	0.017	0.009	0.014	0.018	0.024	0.030	0.016	0.009	0.009	0.013	0.032
		Var	1.317	0.206	0.450	0.156	0.120	0.518	0.239	0.148	0.128	0.054	0.128
4	quer	\bar{x}	0.067	0.067	0.017	0.108	0.259	0.092	0.042	0.049	0.077	0.206	0.260
		s	0.019	0.023	0.035	0.025	0.020	0.021	0.015	0.011	0.018	0.021	0.020
		Var	0.292	0.341	2.045	0.228	0.076	0.226	0.349	0.228	0.230	0.101	0.075
	längs	\bar{x}	0.099	0.053	0.031	0.122	0.304	0.092	0.068	0.056	0.084	0.221	0.300
		s	0.037	0.020	0.028	0.042	0.071	0.028	0.025	0.021	0.013	0.011	0.029
		Var	0.374	0.390	0.887	0.349	0.232	0.306	0.369	0.372	0.158	0.051	0.096
5	quer	\bar{x}	0.036	0.072	0.050	0.094	0.251	0.083	0.065	0.066	0.083	0.239	0.297
		s	0.011	0.007	0.016	0.008	0.011	0.010	0.011	0.009	0.005	0.013	0.014
		Var	0.308	0.097	0.329	0.090	0.045	0.125	0.168	0.137	0.063	0.055	0.047
	längs	\bar{x}	0.047	0.080	0.043	0.096	0.266	0.094	0.062	0.065	0.100	0.241	0.321
		s	0.007	0.019	0.017	0.013	0.009	0.025	0.009	0.008	0.012	0.012	0.016
		Var	0.155	0.242	0.397	0.133	0.035	0.269	0.150	0.118	0.116	0.048	0.050
6	quer	\bar{x}	0.115	0.083	0.018	0.113	0.330	0.102	0.061	0.073	0.078	0.234	0.314
		s	0.022	0.029	0.034	0.016	0.022	0.017	0.010	0.012	0.020	0.013	0.020
		Var	0.189	0.350	1.873	0.145	0.068	0.168	0.164	0.169	0.259	0.054	0.062
	längs	\bar{x}	0.119	0.068	0.048	0.116	0.351	0.099	0.064	0.071	0.074	0.225	0.307
		s	0.013	0.010	0.007	0.015	0.016	0.017	0.007	0.008	0.010	0.009	0.019
		Var	0.112	0.140	0.157	0.127	0.047	0.172	0.113	0.107	0.135	0.042	0.062
7	quer	\bar{x}	0.109	0.074	0.020	0.123	0.326	0.102	0.071	0.087	0.073	0.236	0.334
		s	0.027	0.037	0.034	0.015	0.044	0.014	0.009	0.010	0.017	0.017	0.012
		Var	0.248	0.496	1.707	0.120	0.135	0.136	0.129	0.114	0.230	0.070	0.037
	längs	\bar{x}	0.097	0.077	0.032	0.088	0.293	0.088	0.057	0.071	0.070	0.213	0.286
		s	0.018	0.011	0.018	0.014	0.017	0.010	0.004	0.007	0.008	0.005	0.008
		Var	0.185	0.148	0.567	0.162	0.056	0.115	0.077	0.098	0.111	0.025	0.027

¹ im Trockenverfahren hergestellt

Abkürzungen

\bar{x}	Mittelwert
s	Standardabweichung
Var	Variationskoeffizient



3.3.2 Lineare Quell- und Schwindmasse der Dicke

Tabelle 3.4 zeigt die Quell- und Schwindmasse der Dickenmessung über alle 20 Prüfkörper für längs und quer zum Produktionsverlauf.

Tabelle 3.4: Lineares Quell- und Schwindmass der Dicke

Lineares Quell-und Schwindmass		Dicke	Quellen					Schwinden						
		α_d	β_d	Klimawechsel der relativen Luftfeuchte φ [%]										
Nr.	Richtung	[%]		35/50	50/65	65/80	80/95	35/95	95/85	85/65	65/50	50/35	35/0	95/35
1 ¹	längs	\bar{x}		0.698	0.778	0.936	3.498	5.910	1.145	1.064	0.795	0.618	1.744	3.622
	und	s		0.064	0.050	0.075	0.081	0.147	0.069	0.053	0.056	0.057	0.082	0.082
	quer	Var		0.091	0.065	0.080	0.023	0.025	0.060	0.050	0.071	0.093	0.047	0.023
2 ¹	längs	\bar{x}		0.767	1.178	1.281	2.971	6.196	0.729	1.336	0.838	1.073	2.585	3.977
	und	s		0.124	0.065	0.068	0.334	0.350	0.272	0.039	0.049	0.051	0.053	0.275
	quer	Var		0.162	0.055	0.053	0.112	0.057	0.372	0.029	0.058	0.048	0.021	0.069
3	längs	\bar{x}		5.792	1.095	1.232	3.682	11.801	0.920	1.401	0.886	0.793	2.218	3.999
	und	s		1.192	0.213	0.254	0.212	1.175	0.191	0.156	0.124	0.146	0.206	0.206
	quer	Var		0.206	0.195	0.206	0.057	0.100	0.207	0.111	0.140	0.184	0.093	0.052
4	längs	\bar{x}		0.955	1.318	1.241	3.624	7.137	0.843	1.462	0.721	0.877	2.164	3.903
	und	s		0.172	0.144	0.129	0.203	0.199	0.292	0.204	0.126	0.111	0.155	0.174
	quer	Var		0.180	0.109	0.104	0.056	0.028	0.346	0.139	0.175	0.126	0.072	0.045
5	längs	\bar{x}		5.605	1.204	2.222	4.303	13.334	2.114	1.716	1.103	1.123	2.964	6.055
	und	s		0.274	0.085	0.110	0.148	0.227	0.122	0.078	0.068	0.088	0.102	0.150
	quer	Var		0.049	0.071	0.049	0.034	0.017	0.058	0.046	0.062	0.079	0.034	0.025
6	längs	\bar{x}		7.147	1.552	1.224	3.428	13.351	1.000	1.415	1.653	0.730	3.096	4.798
	und	s		0.821	0.776	0.154	0.114	0.133	0.094	0.067	0.089	0.055	0.067	0.101
	quer	Var		0.115	0.500	0.126	0.033	0.010	0.094	0.048	0.054	0.076	0.022	0.021
7	längs	\bar{x}		5.448	2.461	1.679	4.075	13.664	1.006	1.675	1.574	0.693	2.894	4.948
	und	s		0.582	0.580	0.135	0.153	0.186	0.143	0.076	0.079	0.050	0.116	0.130
	quer	Var		0.107	0.236	0.080	0.037	0.014	0.142	0.045	0.050	0.073	0.040	0.026

¹ im Trockenverfahren hergestellt

Abkürzungen

\bar{x}	Mittelwert
s	Standardabweichung
Var	Variationskoeffizient



3.3.3 Lineare Quell- und Schwindmasse der Breite

Tabelle 3.5 gibt das lineare Quell- und Schwindmass der Breite in und quer zur Produktionsrichtung an.

Tabelle 3.5: Lineares Quell- und Schwindmass der Breite

Lineares Quell-und Schwindmass		Breite		Quellen				Schwinden					
		α_b	β_b	Klimawechsel der relativen Luftfeuchte φ [%]									
Nr.	Richtung	[%]	35/50	50/65	65/80	80/95	35/95	95/85	85/65	65/50	50/35	35/0	95/35
1 ¹	quer	\bar{x}	1.959	3.507	0.665	0.206	6.337	0.381	0.795	0.239	0.143	0.390	1.557
		s	0.279	0.117	0.114	0.190	0.245	0.159	0.393	0.182	0.059	0.276	0.280
		Var	0.142	0.033	0.172	0.922	0.039	0.419	0.494	0.761	0.416	0.708	0.180
	längs	\bar{x}	2.225	3.092	1.289	0.073	6.679	0.546	0.574	0.293	0.187	0.194	1.599
		s	0.439	0.480	0.393	0.161	0.305	0.120	0.148	0.102	0.124	0.110	0.185
		Var	0.197	0.155	0.305	2.202	0.046	0.220	0.257	0.349	0.664	0.568	0.116
2 ¹	quer	\bar{x}	1.603	3.754	0.474	0.782	6.613	0.672	0.261	0.256	0.117	0.256	1.305
		s	0.119	0.061	0.093	0.089	0.088	0.119	0.153	0.091	0.089	0.088	0.182
		Var	0.074	0.016	0.196	0.114	0.013	0.177	0.585	0.358	0.763	0.344	0.139
	längs	\bar{x}	1.633	3.711	0.459	0.792	6.595	0.586	0.355	0.217	0.130	0.314	1.288
		s	0.066	0.077	0.120	0.112	0.081	0.123	0.076	0.060	0.068	0.088	0.127
		Var	0.040	0.021	0.262	0.141	0.012	0.210	0.214	0.275	0.519	0.279	0.099
3	quer	\bar{x}	0.612	3.249	0.662	0.384	4.907	0.974	0.319	0.093	0.186	0.080	1.573
		s	0.311	0.376	0.282	0.206	0.566	0.199	0.131	0.148	0.118	0.134	0.204
		Var	0.508	0.116	0.426	0.536	0.115	0.204	0.409	1.587	0.635	1.676	0.130
	längs	\bar{x}	1.491	3.378	0.674	0.404	5.948	0.792	0.355	0.063	0.159	0.128	1.369
		s	0.191	0.106	0.146	0.191	0.202	0.100	0.129	0.075	0.117	0.107	0.149
		Var	0.128	0.031	0.217	0.471	0.034	0.126	0.364	1.177	0.735	0.830	0.109
4	quer	\bar{x}	1.548	3.347	0.534	0.163	5.592	0.875	0.317	0.068	0.161	0.381	1.421
		s	0.273	0.125	0.140	0.093	0.253	0.128	0.148	0.080	0.069	0.127	0.158
		Var	0.176	0.037	0.263	0.570	0.045	0.146	0.467	1.172	0.431	0.332	0.111
	längs	\bar{x}	1.382	3.464	0.611	0.024	5.482	0.819	0.417	0.102	0.126	0.254	1.464
		s	0.364	0.122	0.081	0.104	0.429	0.070	0.098	0.060	0.080	0.053	0.104
		Var	0.263	0.035	0.133	4.319	0.078	0.085	0.234	0.593	0.636	0.209	0.071
5	quer	\bar{x}	0.931	3.490	0.771	0.551	5.744	1.010	0.209	0.208	0.137	0.126	1.565
		s	0.309	0.110	0.230	0.272	0.257	0.201	0.138	0.107	0.044	0.077	0.171
		Var	0.332	0.031	0.298	0.493	0.045	0.199	0.658	0.514	0.317	0.613	0.110
	längs	\bar{x}	0.575	3.576	0.703	0.597	5.451	1.043	0.262	0.148	0.161	0.133	1.613
		s	0.178	0.153	0.143	0.159	0.150	0.136	0.098	0.094	0.067	0.038	0.104
		Var	0.309	0.043	0.204	0.267	0.028	0.130	0.375	0.637	0.419	0.287	0.064
6	quer	\bar{x}	1.931	3.291	0.965	0.406	6.592	0.243	0.703	0.137	0.089	0.226	1.171
		s	0.080	0.097	0.073	0.059	0.097	0.041	0.066	0.058	0.051	0.039	0.043
		Var	0.041	0.029	0.075	0.146	0.015	0.170	0.094	0.422	0.571	0.172	0.037
	längs	\bar{x}	2.073	3.154	1.077	0.365	6.669	0.184	0.762	0.179	0.083	0.157	1.209
		s	0.145	0.166	0.170	0.132	0.139	0.048	0.057	0.064	0.051	0.039	0.101
		Var	0.070	0.053	0.158	0.362	0.021	0.261	0.074	0.356	0.614	0.250	0.083
7	quer	\bar{x}	1.506	3.770	0.411	0.291	5.978	0.271	0.581	0.203	0.089	0.217	1.145
		s	0.088	0.070	0.059	0.142	0.138	0.104	0.103	0.092	0.027	0.065	0.089
		Var	0.058	0.018	0.142	0.490	0.023	0.384	0.177	0.451	0.304	0.301	0.078
	längs	\bar{x}	1.499	3.841	0.389	0.318	6.048	0.150	0.662	0.323	0.067	0.248	1.202
		s	0.128	0.101	0.071	0.087	0.079	0.082	0.088	0.051	0.032	0.088	0.097
		Var	0.086	0.026	0.182	0.274	0.013	0.546	0.133	0.158	0.480	0.355	0.081

¹ im Trockenverfahren hergestellt

Abkürzungen

\bar{x}	Mittelwert
s	Standardabweichung
Var	Variationskoeffizient

3.4 Maximale Quell- und Schwindmasse

zeigt das maximale Quell- und Schwindmass der Länder, der Dicke und der Breite von 0 auf 95 bzw. von 95 auf 0% relativer Luftfeuchte.

Nr. Richtung			Differentielle Quellung			Quellungskoeffizient		
			[%/%]			[%/%]		
			Klimabereich der relativen Luftfeuchte φ [%]					
			0/95			95/0		
			$\alpha_{l\ max}$	$\alpha_{d\ max}$	$\alpha_{b\ max}$	$\beta_{l\ max}$	$\beta_{d\ max}$	$\beta_{b\ max}$
1 ¹	quer	\bar{x}	0.436	5.614	1.988	0.434	5.315	1.947
		s	0.047	0.188	0.538	0.047	0.169	0.513
		Var	0.108	0.034	0.271	0.107	0.032	0.263
	längs	\bar{x}	0.437	5.726	1.826	0.435	5.416	1.793
		s	0.031	0.119	0.253	0.031	0.106	0.244
		Var	0.071	0.021	0.138	0.070	0.020	0.136
2 ¹	quer	\bar{x}	0.417	7.176	1.586	0.415	6.695	1.561
		s	0.025	0.409	0.172	0.025	0.355	0.167
		Var	0.059	0.057	0.109	0.059	0.053	0.107
	längs	\bar{x}	0.416	6.870	1.629	0.414	6.428	1.603
		s	0.024	0.132	0.144	0.024	0.116	0.139
		Var	0.058	0.019	0.089	0.058	0.018	0.087
3	quer	\bar{x}	0.434	6.581	1.681	0.432	6.175	1.653
		s	0.016	0.176	0.200	0.015	0.155	0.193
		Var	0.036	0.027	0.119	0.036	0.025	0.117
	längs	\bar{x}	0.489	6.679	1.521	0.487	6.260	1.498
		s	0.030	0.293	0.137	0.030	0.258	0.133
		Var	0.061	0.044	0.090	0.061	0.041	0.089
4	quer	\bar{x}	0.469	6.504	1.836	0.466	6.107	1.802
		s	0.020	0.243	0.289	0.020	0.214	0.278
		Var	0.043	0.037	0.157	0.043	0.035	0.154
	längs	\bar{x}	0.524	6.415	1.748	0.521	6.028	1.718
		s	0.032	0.346	0.107	0.031	0.307	0.104
		Var	0.061	0.054	0.061	0.060	0.051	0.060
5	quer	\bar{x}	0.539	9.824	1.720	0.536	8.945	1.690
		s	0.011	0.200	0.146	0.011	0.166	0.141
		Var	0.021	0.020	0.085	0.021	0.019	0.084
	längs	\bar{x}	0.565	10.003	1.778	0.562	9.093	1.747
		s	0.008	0.170	0.096	0.008	0.140	0.093
		Var	0.015	0.017	0.054	0.015	0.015	0.053
6	quer	\bar{x}	0.550	8.542	1.417	0.547	7.869	1.397
		s	0.018	0.164	0.063	0.018	0.140	0.062
		Var	0.033	0.019	0.045	0.033	0.018	0.044
	längs	\bar{x}	0.535	8.600	1.385	0.532	7.919	1.366
		s	0.018	0.101	0.104	0.018	0.086	0.102
		Var	0.033	0.012	0.075	0.033	0.011	0.074
7	quer	\bar{x}	0.573	8.489	1.381	0.569	7.825	1.362
		s	0.012	0.087	0.098	0.012	0.074	0.095
		Var	0.021	0.010	0.071	0.021	0.009	0.070
	längs	\bar{x}	0.502	8.530	1.472	0.500	7.859	1.450
		s	0.011	0.211	0.107	0.011	0.179	0.104
		Var	0.022	0.025	0.073	0.022	0.023	0.072

¹ im Trockenverfahren hergestellt

Abkürzungen

\bar{x}	Mittelwert
s	Standardabweichung
Var	Variation



3.5 Differentielle Quellung und Quellungskoeffizient

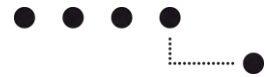
sowie die differentielle Quellung und den Quellungskoeffizienten beim Klimawechsel von 35 auf 80% relativer Luftfeuchte.

Nr. Richtung			Maximales Quellmass			Maximales Schwindmass		
			[%]			[%]		
			Klimabereich der relativen Luftfeuchte φ [%]					
			35/80			35/80		
			q_l	q_d	q_b	l	b	d
1 ¹	quer	\bar{x}	0.030	0.384	0.909	0.004	0.056	0.131
		s	0.006	0.017	0.034	0.001	0.003	0.005
		Var	0.212	0.044	0.038	0.211	0.049	0.040
	längs	\bar{x}	0.029	0.388	0.989	0.004	0.055	0.141
		s	0.003	0.016	0.050	0.000	0.002	0.007
		Var	0.111	0.040	0.050	0.110	0.043	0.051
2 ¹	quer	\bar{x}	0.026	0.476	0.811	0.004	0.073	0.125
		s	0.002	0.020	0.013	0.000	0.003	0.002
		Var	0.092	0.042	0.016	0.093	0.046	0.015
	längs	\bar{x}	0.027	0.474	0.804	0.004	0.073	0.124
		s	0.004	0.013	0.017	0.001	0.002	0.003
		Var	0.159	0.027	0.021	0.157	0.030	0.022
3	quer	\bar{x}	0.016	1.038	0.606	0.003	0.166	0.097
		s	0.002	0.125	0.093	0.000	0.021	0.014
		Var	0.152	0.120	0.153	0.153	0.129	0.146
	längs	\bar{x}	0.012	1.296	0.749	0.002	0.206	0.119
		s	0.003	0.042	0.031	0.000	0.006	0.005
		Var	0.237	0.032	0.042	0.237	0.030	0.041
4	quer	\bar{x}	0.020	0.499	0.715	0.003	0.082	0.117
		s	0.003	0.018	0.022	0.001	0.003	0.004
		Var	0.169	0.037	0.031	0.166	0.038	0.032
	längs	\bar{x}	0.025	0.492	0.727	0.004	0.080	0.118
		s	0.008	0.016	0.055	0.001	0.002	0.009
		Var	0.314	0.032	0.075	0.314	0.030	0.075
5	quer	\bar{x}	0.022	1.306	0.685	0.003	0.211	0.111
		s	0.002	0.020	0.027	0.000	0.004	0.005
		Var	0.070	0.015	0.039	0.068	0.018	0.043
	längs	\bar{x}	0.024	1.280	0.651	0.004	0.204	0.104
		s	0.001	0.033	0.017	0.000	0.005	0.003
		Var	0.047	0.025	0.026	0.046	0.025	0.029
6	quer	\bar{x}	0.031	1.416	0.840	0.005	0.223	0.132
		s	0.003	0.015	0.014	0.001	0.002	0.001
		Var	0.110	0.010	0.016	0.115	0.010	0.008
	längs	\bar{x}	0.033	1.418	0.858	0.005	0.222	0.135
		s	0.002	0.018	0.027	0.000	0.002	0.003
		Var	0.046	0.013	0.031	0.041	0.007	0.022
7	quer	\bar{x}	0.029	1.423	0.807	0.004	0.217	0.123
		s	0.006	0.022	0.011	0.001	0.002	0.002
		Var	0.212	0.016	0.013	0.210	0.011	0.016
	längs	\bar{x}	0.029	1.393	0.793	0.005	0.218	0.124
		s	0.002	0.040	0.021	0.000	0.003	0.001
		Var	0.086	0.029	0.027	0.093	0.016	0.009

¹ im Trockenverfahren hergestellt

Abkürzungen

\bar{x}	Mittelwert
s	Standardabweichung
Var	Variation



3.6 Volumenquell- und Schwindmass

Tabelle 3.6 stellt das Volumenquell- und Schwindmass beim Klimawechsel von 0 auf 95% bzw. von 95 auf 0% relativer Luftfeuchte dar.

Tabelle 3.6: Volumenquell- und Schwindmass

Nr. Richtung			Volumenquell- und Schwindmass [%]		Volumenquell- und Schwindmass (Näherung) [%]	
			α_v	β_v	α_v	β_v
1 ¹	quer	\bar{x}	8.184	7.832	8.038	7.697
		s	0.775	0.730	0.774	0.728
		Var	0.412	0.403	0.412	0.402
	längs	\bar{x}	8.127	7.772	7.989	7.643
		s	0.403	0.382	0.403	0.381
		Var	0.230	0.226	0.230	0.226
2 ¹	quer	\bar{x}	9.330	8.810	9.179	8.670
		s	0.607	0.547	0.606	0.547
		Var	0.225	0.219	0.225	0.219
	längs	\bar{x}	9.062	8.582	8.915	8.445
		s	0.301	0.280	0.301	0.279
		Var	0.166	0.163	0.166	0.163
3	quer	\bar{x}	8.844	8.396	8.697	8.260
		s	0.392	0.364	0.392	0.364
		Var	0.182	0.178	0.182	0.178
	längs	\bar{x}	8.831	8.377	8.689	8.245
		s	0.461	0.421	0.461	0.421
		Var	0.196	0.191	0.196	0.191
4	quer	\bar{x}	8.968	8.523	8.809	8.375
		s	0.553	0.513	0.552	0.512
		Var	0.238	0.233	0.238	0.232
	längs	\bar{x}	8.843	8.411	8.687	8.267
		s	0.486	0.442	0.485	0.442
		Var	0.176	0.172	0.176	0.172
5	quer	\bar{x}	12.315	11.381	12.083	11.172
		s	0.358	0.319	0.358	0.319
		Var	0.127	0.123	0.127	0.123
	längs	\bar{x}	12.591	11.622	12.345	11.401
		s	0.274	0.242	0.274	0.242
		Var	0.086	0.083	0.086	0.083
6	quer	\bar{x}	10.685	9.975	10.509	9.814
		s	0.246	0.219	0.246	0.219
		Var	0.097	0.094	0.097	0.094
	längs	\bar{x}	10.694	9.976	10.521	9.817
		s	0.223	0.205	0.223	0.205
		Var	0.120	0.118	0.120	0.118
7	quer	\bar{x}	10.617	9.916	10.443	9.756
		s	0.198	0.182	0.197	0.182
		Var	0.103	0.101	0.103	0.101
	längs	\bar{x}	10.680	9.970	10.504	9.809
		s	0.330	0.295	0.329	0.294
		Var	0.120	0.117	0.120	0.117

¹ im Trockenverfahren hergestellt

Abkürzungen

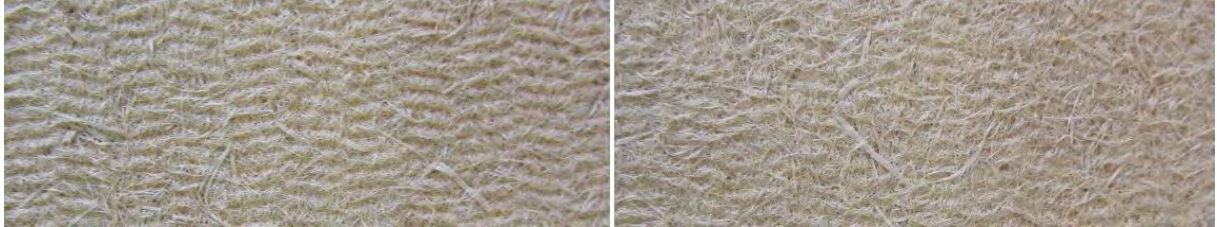
\bar{x}	Mittelwert
s	Standardabweichung
Var	Variation



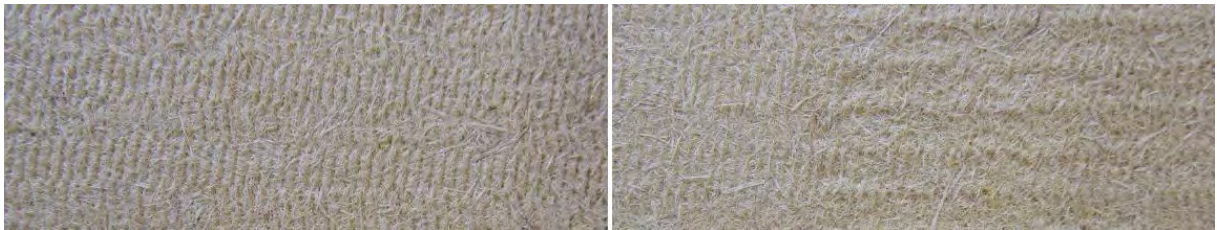
4 Plattenoberflächen

4.1 Gutex

Thermosafe-homogen



Multiplex-top



4.2 Pavatex

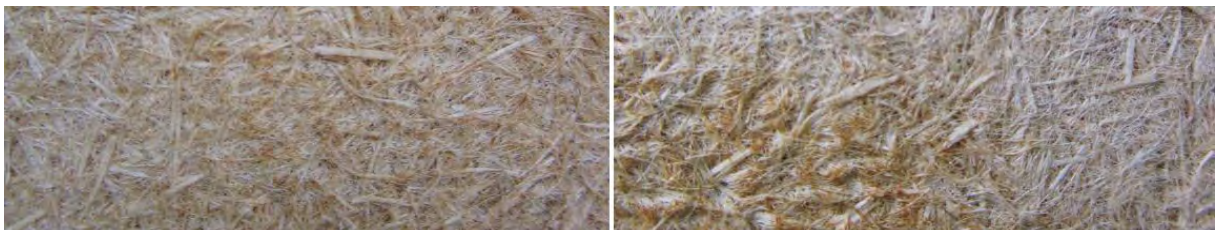
Pavaflex



Pavapor



Pavatherm





Pavaboard



Isoroof-natur-KN



4.3 Valnaturel

Isonat chanvre



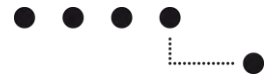
Isonat plus



4.4 Steico

Steico Universal





4.5 Spaceloft

Aerogel-Vliesmatte



5 Produktdatenblätter

5.1 Gutex

13/2011

Technisches Merkblatt: **GUTEX®** Thermosafe-homogen

GUTEX Thermosafe-homogen ist die universelle Dämmplatte mit einschichtigem homogenen Rohdichteprofil und hervorragenden Eigenschaften für sommerlichen Hitze- und winterlichen Kälteschutz.

Foto: GUTEX-Archiv

Technische Daten:

	Thermosafe-homogen	
Kantenabbildung	stumpf	Stufenfalz
Dicke (mm)	40/60/80/100/120	140/160/180/200/220/240
Länge x Breite (mm)	1200 x 625	1200 x 625
Deckmaß Länge x Breite (mm)		1185 x 610 (0,7 l2 m²)
Quadratmeter pro Palette (m²)	0,75	0,75
Gewicht pro Platte (kg)	3,3/4,9/6,6/8,2/9,9	11,55/13,2/14,85/16,5/18,5/19,8
Gewicht pro m² (kg)	4,4/6,6/8,8/11/13,2	15,4/17,6/19,8/22/24,2/26,4
Platten pro Palette (Stk.)	112/70/56/42/36	32/28/24/22/20/18
Quadratmeter pro Palette (m²)	84/52,5/42/31,5/27	24/21/18/16,5/15/13,5
Gewicht pro Palette (kg)	450 ab 60 mm Dicke 390	
Rohdichte (kg/m³)	110	110
Wärmeleitfähigkeit Nennwert λ_p (W/mK)	0,037	0,037
Wärmeleitfähigkeit Bemessungswert $\lambda_{p,w}$ (W/mK)	0,040	0,040
Nennwert Wärmedurchlasswiderstand R_p (m²K/W)	1,08/1,62/2,16/2,70/3,24	3,78/4,32/4,86/5,4/5,95/6,49
Wärmedurchlasswiderstand R (m²K/W)	1,00/1,50/2,00/2,50/3,00	3,50/4,00/4,50/5,00/5,50/6,00
Dampfdiffusion μ	3	3
sd-Wert (m)	0,12/0,18/0,24/0,30/0,36	0,42/0,48/0,54/0,60/0,66/0,72
Druckspannung/Druckfestigkeit (kPa)	50	50
Zugfestigkeit einschichtig Plattenober- und -unterseite (kPa)	10	10
Stoßungswiderstand (kPa s/m²)	100	100
kurzzeitige Wasseraufnahme (kg/m²)	≤ 2,0	≤ 2,0
spezif. Wärmekapazität (J/kgK)	2100	2100
Brandverhalten: Euroklasse nach DIN EN 13501-1	E	E

Anwendungsgebiete:

- Aufdachdämmung auf vollflächigem Untergrund
- Zwischensparrendämmung
- Dämmung unter Mass Estrich
- Dämmung von Holzrahmen- und Holztafelbauweise
- Dämmung oberste Geschossdecke
- Dämmung von Massivholzänden und Mauerwerk (hinterlüftete Fassade)
- leichte Trennwände

Anwendungsgebiete nach DIN 4108/10:

- DAD: Außendämmung von Dach oder Decke, vor Bewitterung geschützt, Dämmung unter Deckungen, dm: mittlere Druckbelastbarkeit
- DZ: Zwischensparrendämmung, zweischaliges Dach, nicht begehbare, aber zugängliche oberste Geschossdecke
- WAB: Außendämmung der Wand hinter Bekleidung, dm: mittlere Druckbelastbarkeit
- WH: Dämmung von Holzrahmen- und Holztafelbauweise
- WTR: Dämmung von Raumtrennwänden

Vorzüge:

- optimale Wärmedämmung
- hervorragende Wärmespeicherkapazität
→ sommerlicher Hitze- und winterlicher Kälteschutz
- hoher Schallschutz
- feuchtigkeitsregulierend
- dampfdiffusionsoffen
- leicht hydrophobiert
- einfach zu verarbeiten
- als Unterbau in Verbindung mit Wärmedämmverbundsystem GUTEX Thermowall-plus einsetzbar. Siehe Broschüre „Die Wärmedämmverbundsysteme“
- nachhaltiger Rohstoff Holz → recyclefähig
- hergestellt in Deutschland (Schwarzwald)
- baubiologisch unbedenklich (natureplus zertifiziert)

Kennzeichnung VPE-BI 13/11-T4-VS 2,0-C310/PN40-103-A-R00
 *Zul. Nr. 2315-1404 **weitere Abmessungen auf Anfrage
 Eintragung Akkreditations AZ-Abbildung Kennnummer nach DIN EN ISO 17020

Inhaltsstoffe:

- unbehandeltes Tannen- und Fichtenholz aus dem Schwarzwald
- Zuschlagstoffe:
 - 4,0 % PUR-Harz
 - 0,5 % Paraffin

Technisches Merkblatt GUTEX® Multiplex-top



Foto: GUTEX/Archiv

GUTEX Multiplex-top ist die regensichere Unterdeckplatte mit einschichtigem homogenem Rohdichteprofil.

Technische Daten:	Multiplex-top
Kantenausbildung	Nut und Feder
Dicke (mm)	18/22/28/35
Länge x Breite (mm)	2 500 x 7 50
Deckmaß, Länge x Breite (mm)	2 476 x 726 (18 mm) 2 480 x 728 (22/28 mm) 2 480 x 722 (35 mm)
Quadratmeter pro Platte (m²)	1,875
Gewicht pro Platte (kg)	6,75/8,25/10,5/13,125
Gewicht pro m² (kg)	3,6/4,4/5,6/7,0
Platten pro Palette (Stk.)	55/45/35/28
Quadratmeter pro Palette (m²)	103,12/84,37/65,63/52,5
Gewicht pro Palette (kg)	530/530/430/400
Rohdichte (kg/m³)	200
Nennwert Wärmeleitfähigkeit λ_e (W/mK)	0,044
Bemessungswert Wärmeleitfähigkeit λ (W/mK)*	0,047
Nennwert Wärmedurchlasswiderstand R_e (m²K/W)	0,41/0,50/0,64/0,80
Wärmedurchlasswiderstand R (m²K/W)	0,38/0,47/0,60/0,74
Dampfdiffusion (μ)	3
s.d.-Wert (m)	0,054/0,066/0,084/0,105
Druckspannungsfestigkeit (kPa)	200
Zugfestigkeit senkrecht zur Plattenoberfläche (kPa)	40
Strömungswiderstand (kPa s/m³)	100
kurzzeitige Wasseraufnahme (kg/m²)	1,0
spezifische Wärmekapazität (J/kgK)	2 100
Brandverhalten: Euroklasse nach DIN EN 13501-1	E



Bezeichnung: Trockenverleimtes WFB-BI 13171-T4-V5 1,0-C5(10Y)100-TR40-MU3-AR 00
Zul.Nr.22.15-1404
Erkennung: Abholbestandszettel A2, Abholbestandsnummer nach ANV03/01/05/170201

Inhaltsstoffe:

- unbehandeltes Tannen- und Fichtenholz aus dem Schwarzwald
- Zuschlagstoffe:
 - 4,0 % PUR-Harz
 - 1,5 % Paraffin

Anwendungsgebiete:

- als regensichere Unterdeckung
- als Abdeckplatte in Verbindung mit GUTEX Thermosafe-homogen für Aufdachdämmung
- bis auf die Dicke von 18 mm sind alle GUTEX Multiplex-top Platten für die direkte Verlegung auf den Sparren geeignet
- GUTEX Multiplex-top 18 mm nur für Anwendung bei Aufdachdämmung
- nach DIN 4108-10: DADs, DEOs, WABds
- UDP-A gemäß ZVDH-Regelwerk
- gemäß Merkblatt der Verbände

Vorzüge:

- zeitsparende und einfache Verlegung durch hohe Maßgenauigkeit
- einschichtiges und homogenes Rohdichteprofil
- winddichtend
- ab 15° Dachneigung regensicher ohne zusätzliche Abdeckung oder Abklebung der Plattenstöße für 22, 28 + 35 mm Plattendicke; ab 20° Dachneigung für 18 mm Plattendicke
- als Behelfsdach 3 Monate bewitterbar
- keine Nageldichtbänder oder Nageldichtungen notwendig
- zusätzliche Wärmedämmung
- Minimierung der Wärmebrücken
- hervorragende Wärmespeicherkapazität
→ hoher sommerlicher Hitzeschutz
- Verbesserung der Schalldämmung
- feuchtigkeitsregulierend
- diffusionsoffen
- Garantiehinterlegung beim Zentralverband des deutschen Dachdeckerhandwerks
- nachhaltiger Rohstoff Holz → recyclefähig
- hergestellt in Deutschland (Schwarzwald)
- baubiologisch unbedenklich (natureplus zertifiziert)

Unser GUTEX Service:

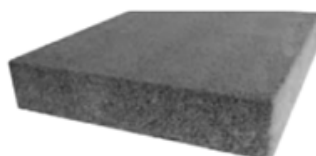
- Bei **technischen Fragen** rufen Sie unsere Info-Line unter **+49-7741/60 99-125** an, schicken Sie uns ein Fax unter **+49-7741/60 99-21** oder senden Sie eine E-Mail an **anwendungstechnik@gutex.de**
- Besuchen Sie auch unsere **kostenlose Schulung** im Hause GUTEX. Termine finden Sie auf unserer Homepage unter „Service“
- Unter **www.gutex.de** finden Sie u.a. Informationen über Bauphysik, Produktanwendungen, Konstruktionsvorschläge mit Berechnungen, sowie Ausschreibungstexte und CAD-Zeichnungen zum Downloaden

5.2 Pavatex

PAVAFLEX

Der flexible Dämmstoff aus Holzfasern für die Gebäudehülle

Produktdatenblatt - CH
PAVAFLEX



Vorteile

- Flexibler Holzfaserdämmstoff für die Dämmung zwischen den Sparren und im Gefach.
- Leichte Verarbeitung, sehr gute Klemmwirkung und hohe Setzungssicherheit.
- Diffusionsoffen und sorptionsfähig für ein angenehmeres Wohnklima.
- Gute Wärmespeicherfähigkeit für einen besseren sommerlichen Hitzeschutz.
- Ideale Ergänzung für das PAVATEX-Dachsanierungssystem mit der Luftdichtbahn LDB 0.02 in Kombination mit ISOLAIR L bzw. PAVATHERM-PLUS[®].
- Verbesserter Beitrag zum Klimaschutz durch hohe Dämmwirkung sowie Kohlenstoff-Bindung in der Masse des Dämmstoffes und somit Entzug des CO₂ aus der Umwelt.
- Bauaufsichtlich zugelassener und güteüberwachter Qualitätsdämmstoff. Recyclingfähig.

Verwendung

PAVAFLEX ist eine flexible Holzfaserdämmplatte mit hervorragenden wärmedämmenden und wärmespeichernden Eigenschaften für eine diffusionsoffene Bauweise sowohl in der Gebäudehülle als auch im Innenausbau. Durch die Diffusionsoffenheit und Feuchtespeicherfähigkeit des Dämmstoffes wird der Feuchtigkeitsgehalt im Raum reguliert. Dies sorgt für ein gesundes und behagliches Raumklima. Der hautfreundliche Dämmstoff lässt sich mit einfachen Schneidwerkzeugen bearbeiten. Dank Flexibilität und dadurch entstehender Klemmwirkung ist PAVAFLEX schnell, leicht und fugenfrei bis zu einer Klemmweite von 900 mm zwischen die Konstruktion einpassbar.

Technische Daten

Eigenschaft	Einheit	Wert
Holzfaserdämmplatte		EN 13171
DIBt-Zulassung		Z-23.15-1417
Wärmeleitfähigkeit λ_p	W/(m K)	0,038
Rohdichte	kg/m ³	55
Spez. Wärmekapazität	J/kgK	2.100
Diffusionswiderstand	μ	5
Brandkennziffer		4.3
Euroklasse EN 13501-1		E

Lieferform

Dicke	Format	Packeinheit
40 mm	135 x 57,5 cm	100 Stk/Pal.
50 mm	135 x 57,5 cm	80 Stk/Pal.
60 mm	135 x 57,5 cm	60 Stk/Pal.
80 mm	135 x 57,5 cm	50 Stk/Pal.
100 mm	135 x 57,5 cm	40 Stk/Pal.
120 mm	135 x 57,5 cm	32 Stk/Pal.
140 mm	135 x 57,5 cm	24 Stk/Pal.
160 mm	135 x 57,5 cm	24 Stk/Pal.
180 mm	135 x 57,5 cm	20 Stk/Pal.
200 mm	135 x 57,5 cm	20 Stk/Pal.
220 mm	135 x 57,5 cm	16 Stk/Pal.
240 mm	135 x 57,5 cm	16 Stk/Pal.

Inhaltsstoffe:		PAVATEX SA
Nadelholz	82 %	Rte de la Pisciculture 37 1701 Fribourg Schweiz
Zusatzstoffe:		
Bindefasern (Polyolefin)	8 %	Telefon +41 (0)26 426 31 11
Brandschutzmittel	10 %	Telefax +41 (0)26 426 32 09 info@pavatex.ch

Ihre Gratis Hotline
für technische Fragen:
0800-Dämmen (0800-32 66 36)

Fax Bestellbüro: 0800 322 422

Produktdatenblatt PAVAFLEX, Stand 07/2011 (08)
Ermüdungsbedingte Änderungen vorbehalten.

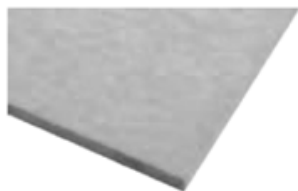
pavatex

Mehr Informationen finden Sie unter: www.pavatex.ch

PAVAPOR

Universelle Trittschalldämmplatte

Produktdatenblatt - CH
PAVAPOR



Vorteile

- Erste genormte Trittschalldämmplatte aus Holzfasern auf dem europ. Markt.
- Vielseitige Dämmplatte mit besonders geringer Zusammendrückbarkeit für alle Anwendungen im Fußbodenbau.
- Hervorragende Schalldämmung in allen Anwendungsbereichen.
- Günstiges Preis-Leistungs-Verhältnis gegenüber Spezialprodukten.
- Problemlose Entsorgung dank Kompostiergutachten.
- Bauökologisch zertifiziert durch natureplus®
- Bauaufsichtlich zugelassener und güteüberwachter Qualitätsdämmstoff.



Verarbeitung

Für PAVAPOR wurden erstmals Holzfasern zu einer genormten Trittschalldämmplatte verarbeitet, wobei auf den Zusatz fremder Bindemittel bewusst verzichtet wurde. Das Ergebnis ist eine Dämmplatte mit außergewöhnlich hoher Belastbarkeit und hervorragender Trittschalldämmung in allen Anwendungsbereichen, d.h. unter hydraulisch gebundenen Estrichen, Trockenestrichen wie z.B. Fermacell-Estrichelementen, Estrichziegeln, Verlegespanplatten sowie Fertigparkett. Die Einsatzgebiete sind Massiv- und Holzbalkendecken aller Art im Neubau und bei der Gebäudesanierung.

Technische Daten

Eigenschaft	Einheit	Wert
Holzfaserdämmplatte		EN 13171 EN 622-4
DIBt-Zulassung		Z-23.15-1429
Wärmeleitfähigkeit Bemessungswert	W/(m K)	0.038
Rohdichte	kg/m³	135
Spez. Wärmekapazität	J/kgK	2.100
Diffusionswiderstand	μ	5
Zusammendrückbarkeit (d_L / d_p)	mm	17 / 16 22 / 21 32 / 30
Brandkennziffer		4.3
Euroklasse EN 13501-1		E
Dyn. Steifigk.	MN/m²	≤ 50 (17 mm Dicke) ≤ 40 (22 mm Dicke) ≤ 30 (32 mm Dicke)

Lieferform

Ausführung	Einheit	Wert
Breite/ Länge	cm	60 x 102
Dicke	mm	17/16 22/21 32/30
Kante	-	stumpf
Lagerung		trocken, plan liegend und geschützt vor Beschädigung

Inhaltsstoffe:

Schweizer Nadelholz
Zusatzstoffe:
max. 0,5% Paraffin

Für PAVAPOR liegt ein Gutachten zur Kompostierbarkeit vor.

PAVATEX SA

Rte de la Pisciculture 37
1701 Fribourg
Schweiz
Telefon +41 (0)26 426 31 11
Telefax +41 (0)26 426 32 09
info@pavatex.ch

Ihre Grathotline

für technische Fragen:

0800-Dämmen (0800-32 66 36)

Fax Bestellbüro: 0800 322 422

Produktionsdatum: PAVAPOR 101, Stand 07/2011 (D)
Bemerkung: Bedingte Änderungen bleiben vorbehalten.

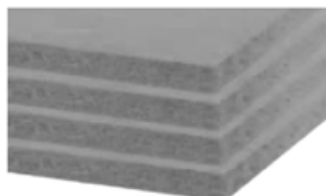
pavatex

Mehr Informationen finden Sie unter: www.pavatex.ch

PAVATHERM

Holzfaserdämmplatte für Dach, Wand und Decke

Produktdatenblatt - CH
PAVATHERM



Vorteile

- Dämmstark gegen Heizenergieverluste und sommerliche Hitze.
- Hervorragende Schalldämmung durch poröse Plattenstruktur.
- Geprüfte Bauteile mit hohen Feuerwiderstandsklassen.
- Diffusionsoffen und sorptionsfähig für angenehmes Wohnklima.
- Bauökologisch zertifiziert durch natureplus®. Problemlose Entsorgung.
- Bauaufsichtlich zugelassener und güteüberwachter Qualitätsdämmstoff.



Verarbeitung

Die PAVATHERM-Holzfaserdämmplatte ist vielseitig einsetzbar in den Bereichen Dach, Wand und Boden. Die hervorragenden wärmedämmenden und wärmespeichernden Eigenschaften, die günstige Diffusionswiderstandszahl von $\mu = 5$, aber auch verarbeitungsrelevante Kriterien wie eine hohe Formbeständigkeit sind die idealen Voraussetzungen für den Einsatz in einer Vielzahl von wärmedämmten Konstruktionen. Ganz gleich ob zwischen oder auf den Dachsparren oder bei Wandkonstruktionen im Holzhäusbau - PAVATHERM-Dämmplatten sind immer die erste Wahl, wenn höchste Ansprüche an die Gebäudehülle gestellt werden.

Technische Daten

Eigenschaft	Einheit	Wert
Holzfaserdämmplatte		EN 13171
DIBt-Zulassung		Z-23.15-1429
Wärmeleitfähigkeit λ_0	W/(m K)	0,038
Rohdichte	kg/m ³	140
Spez. Wärmekapazität	J/kgK	2.100
Diffusionswiderstand	μ	5
Druckspannung bei 10% Stauchung	kPa	20
Baustoffklasse DIN 4102-1		B2
Euroklasse EN 13501-1		E

Lieferform

Ausführung	Einheit	Wert
Breite/ Länge für Dicke 20/ 30/ 40/ 60/ 80/ 90/ 100/ 120mm	cm	60 x 102
für Dicke 40/ 60 mm	cm	120 x 205
für Dicke 80 mm	cm	80 x 205
Dicke	mm	20/30/40/60/80/90/100/120
Kante	-	stumpf

Inhaltsstoffe:

Schweizer Nadelholz
Zusatzstoffe:
max. 0,5% Paraffin
max 2% Weissleim
(PVA zur Schichtenverklebung bei
Dicken \geq 30 mm)

PAVATEX SA

Rte de la Pisciculture 37
1701 Fribourg
Schweiz
Telefon +41 (0)26 426 31 11
Telefax +41 (0)26 426 32 09
info@pavatex.ch

Ihre Gratis Hotline
für technische Fragen:
0800-Dämmen (0800-32 66 36)

Fax Bestellbüro: 0800 322 422

Für PAVATHERM liegt ein Gutachten zur
Kompostierbarkeit vor.

Produkt verändert PAVATHERM, Stand 07/2011 (18)
Ermittlung bedingte Änderungen vorbehalten.

pavatex

Mehr Informationen finden Sie unter: www.pavatex.ch

PAVABOARD

Hoch druckbelastbare Holzfaserdämmplatte für Bodenaufbauten

Produktdatenblatt -CH
PAVABOARD



Vorteile

- Besonders druckfeste und formbeständige Plattenstruktur.
- Spürbare Verbesserung der Wärme- und Schalldämmung.
- Speziell für hohe Belastungen oder große Dämmschichtdicken.
- Anwendung unter Unterlagsböden und schwimmend verlegten Gehbelägen.
- Einfache Verlegung, Zuschnitte mit üblichen Holzbearbeitungsmaschinen.
- Güteüberwachter Qualitätsdämmstoff.



Verarbeitung

PAVABOARD eignet sich hervorragend unter Unterlagsböden aller Art, Trockenestrichelementen und sogar Fertigparkett und Laminat, da hier besonders druckbelastbare Wärmedämmplatten gefordert werden. PAVABOARD weist mit seiner hohen Druckfestigkeit von über 150 N/mm² die besten Voraussetzungen für Anwendungen mit hohen Belastungen bzw. großen Dämmschichtdicken auf. Die Verlegung von PAVABOARD ist einfach und für Zuschnitte können übliche Holzbearbeitungswerkzeuge verwendet werden. Mehrlagige Dämmschichten werden fugenversetzt ausgeführt. Zahlreiche geprüfte Fußbodenaufbauten mit Nutzlastangaben liegen vor.

Technische Daten

Eigenschaft	Einheit	Wert
Holzfaserdämmplatte		EN 13171
DIBt-Zulassung		Z-23.15-1429
Wärmeleitfähigkeit Bemessungswert	W/(m K)	0,046
Rohdichte	kg/m ³	ca. 210
Spez. Wärmekapazität	J/kgK	2.100
Diffusionswiderstand	μ	5
Druckspannung bei 10% Stauchung	kPa	150
Temperaturbeständigkeit Kurzfristig	°C	250
Baustoffklasse DIN 4102-1		B2
Euroklasse EN 13501-1		E

Lieferform

Ausführung	Einheit	Wert
Breite/ Länge	cm	60 x 102
Dicke	mm	20 / 40 / 60
Kante	-	stumpf

Inhaltsstoffe:

Schweizer Nadelholz	94 %
Natürliche Stärke	5 %
Paraffin	1 %

PAVATEX SA

Rte de la Pisciculture 37
1701 Fribourg
Schweiz
Telefon +41 (0)26 426 31 11
Telefax +41 (0)26 426 32 09
info@pavatex.ch

Ihre Grathotline

für technische Fragen:

0800-Dämmen (0800-32 66 36)

Fax Bestellbüro: 0800 322 422

Produktdatenblatt / 001/001/001, Stand 07/2011 (8)
Entwicklung/Bedingte Änderungen vorbehalten.

pavatex

Mehr Informationen finden Sie unter: www.pavatex.ch

ISOROOF-NATUR-KN

Das PAVATEX-Unterdachsystem

Produktdatenblatt - CH
ISOROOF-NATUR-KN



Vorteile

- Drei Monate frei bewitterbar
- Unterdachsystem mit Dämmplatten aus naturbelassenen Holzfasern, vergütet mit kautschukähnlichem Zusatz bei der Herstellung
- Dampfdurchlässig und feuchteausgleichend
- Hervorragender sommerlicher Hitzeschutz durch hohe Wärmespeicherung
- Spürbar verbesserter Schallschutz durch poröse Plattenstruktur und hohes Flächengewicht
- Verringerung der Wärmeverluste durch verbesserte Winddichtigkeit
- Systemgeprüftes Zubehörmaterial zum Abdichten der Fugen, Anschlüsse und Durchdringungen
- Baubiologisch zertifiziert durch natureplus®

Verarbeitung

Das PAVATEX-Unterdach ISOROOF-NATUR-KN bietet verschiedene Ausführungsmöglichkeiten bestimmt durch die jeweiligen Sicherheitsansprüche. Möglich ist zum Beispiel eine Verlegung ohne Fugenabdichtung ebenso wie Ausführungen für erhöhte Beanspruchung gemäss Norm SIA 232. Dies erfordert entweder die Abdeckung der Plattenstösse mit der diffusionsoffenen PAVATEX-Abdeckbahn rot plus oder die Verklebung der Plattenstösse mit ISOROOF-Systemkleber. Bei allen Ausführungen sind die Anschlüsse mit PAVATAPE-Butylkautschukband abzudichten.

Technische Daten

Eigenschaft	Einheit	Wert
Holzfaserdämmplatte		EN 13171 / EN 622-4
DIBt-Zulassung		Z-23.15-1429
Wärmeleitfähigkeit λ_p	W/(m K)	0,047
Rohdichte	kg/m ³	240
Spez. Wärmekapazität	J/kgK	2.100
Diffusionswiderstand	μ	5
Druckspannung bei 10% Stauchung	kPa	200 (22 mm) / 175 (35 - 60 mm)
Brandkennziffer		4.3
Euroklasse EN 13501-1		E

Lieferform

Ausführung	Einheit	Wert
Format (Länge x Breite)	cm	250 x 77
Deckmass (Länge x Breite)	cm	248 x 75
Dicke	mm	18*, 22, 35, 52, 60
Kante 18, 22, 35 mm	-	KN (Keil-Nut)
Kante 52, 60 mm	-	Doppelte Keil-Nut

* Für Bereich Wand

Inhaltssstoffe

Schweizer Nadelholz
Zusatzstoffe:
max. 5% Latex
max. 0,7% Paraffin
max. 0,5% Weissleim (PVAc zur Schichtenverklebung bei 35, 52 und 60 mm).

PAVATEX SA

Rte de la Pisciculture 37
1701 Fribourg
Schweiz
Telefon +41 (0)26 426 31 11
Telefax +41 (0)26 426 32 09
info@pavatex.ch

Ihre Grathotline
für technische Fragen:
0800-Dammen (0800-32 66 36)

Fax Bestellbüro: 0800 322 422

Produktdatenblatt ISOROOF-NATUR-KN, Stand 07/2011 (8)
Einschlagbedingte Änderungen bleiben vorbehalten.

pavatex

Mehr Informationen finden Sie unter: www.pavatex.ch

5.3 Valnaturel



Unsere leistungsstärkste – die reine Hanffaser-Isolation

Isonat chanvre: authentisch, leistungsstark, recycelbar

Von Natur aus haben Hanffasern eine anti-Bakterielle und anti-Fungizide Wirkung. Nagetiere meiden Hanf, da Ihre Zähne von den Fasern Schaden nehmen. Auch Motten oder andere Insekten meiden die Hanffasern da diese darin keine Eier legen können. (Dehydration) Isonat chanvre eignet sich für alle Bereiche der Bausolierung sowohl für den Innen- u. Aussenausbau. Diese Isolation ist ein wahrer Alleskönner bis hin zur perfekten Lärmdämmung.

Technisches Dossier

Name: Isonat chanvre

Beschreibung	Spez.Werte	Einheiten	Toleranz
Material 1: Hanffasern	85%		5%
Material 2: Recycelbarer Binder	15%		5%
Material 3:			
Dichte	35	Kg/m ³	+/- 5Kg/m ³
Lambda	0.042	W/(m.K)	
Akustische Koeffizient Absorbierung	0.95	micron	
Reissfestigkeits - Faktor	280	newton	
Thermische Resistenz (Dicke 45-140mm)	1.05-2,63		
Phasenkoeffizient	10	Stunden	
Standart Länge	120-700	cm	+/-10%
Standart Breite	60	cm	+/-10%
Standart Dicken	45-140	mm	5%
Standart Oberfläche /Platte	0.72	m ²	
Feuerklassifizierung	E		
Feuchtigkeitsaufnahme	0.7	Kg/m ²	



✓ Isonat chanvre: 100% natürlich, schützt die Umwelt und hält ein Leben lang.



VAL NATUREL

Quai de la gare 1, CH - 1907 Saxon
 Tel. +41 27 723 23 28
 Fax. +41 27 723 23 38
 Mail. info@valnaturel.ch
 Web. www.isonat.ch

Illustration: Valnaturel SA - photos: Jacques & Marie



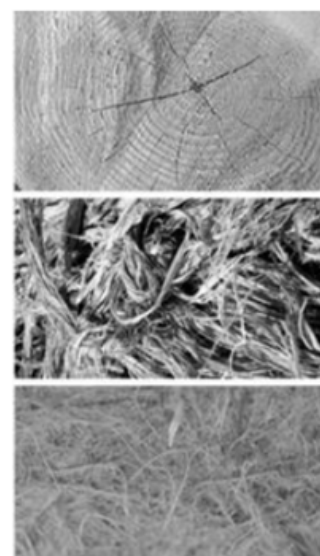
Isonat + schützt die Umwelt und trägt Sorge zur Natur

- ✓ Holz und Hanf zwei natürlich nachwachsende Rohstoffe aus europäischem Anbau.
- ✓ Isonat + hilft aktiv die heimischen Ressourcen zu schützen und senkt den CO2 Ausstoss nachhaltig.
- ✓ Isonat + ist vollständig kompostierbar resp. recycelbar !!
- ✓ Isonat + wird mit sehr wenig Energie hergestellt und transportiert (Oeko-Logistik)
- ✓ Isonat + ruft keine Allergien hervor
- ✓ Isonat + wirkt zuverlässig gegen: Bakterien, Viren, Pilze, Motten und alle Nagetiere
- ✓ Isonat + verleiht Ihrem Zuhause eine einzigartige Atmosphäre
- ✓ Isonat + isoliert nicht nur Wärme und Kälte sondern auch den Schall !

Technisches Dossier

Name: Isonat +

Beschreibung	Spez. Werte	Einheiten	Toleranz
Material 1: Hanffasern	30%		5%
Material 2: Holzfasern	55%		5%
Material 3: Textilfasern & Latex pfl.	15%		5%
Dichte	45-55	Kg/m ³	+/-10%
Lambda	0.0378	W/(m.K)	
Akustische Koeffizient Absorbierung	0.95	micron	
Reissfestigkeits - Faktor	240	newton	
Thermische Resistenz (Dicke 40-200mm)	1.05-5,25		
Phasenkoeffizient	10	Stunden	
Standart Länge	120	cm	+/-10%
Standart Breite	60	cm	+/-10%
Standart Dicken	40-200	mm	5%
Standart Oberfläche /Pannele	0.72	m ²	
Feuerklassifizierung	E		
Feuchtigkeitsaufnahme	0.5	Kg/m ²	



Spezialgrößen können bei besonderen Bedingungen auf Mass hergestellt werden. Fragen Sie uns, wir beraten Sie gerne.



VAL NATUREL

Quai de la gare 1, CH - 1907 Saxon
 Tel. +41 27 723 23 28
 Fax. +41 27 723 23 38
 Mail. info@valnaturel.ch
 Web. www.isonat.ch

Source: Institut für Produktentwicklung und Qualität

5.4 Steico

STEICO *universal*
Unterdeck- und Wandbauplatte

Umweltfreundliche Dämmsysteme
aus natürlicher Holzfaser



EINSATZBEREICHE

Wärmedämmende **Unterdeckplatte**
aus natürlicher Holzfaser.

Wärmedämmende **Wandbauplatte**
aus natürlicher Holzfaser.



- Hohe Druckfestigkeit, im Auflagebereich trittfest
- Exzellente Dämmeigenschaften und hoher sommerlicher Wärmeschutz
- Vermindert konstruktive Wärmebrücken
- Besonders diffusionsoffen, geeignet für hohlraumfrei gedämmte Dächer
- Durch Spezialfalz regensicher für Dachneigungen $\geq 18^\circ$



naturharzgebunden

Dicke [mm]	Format [mm]	Deckmaß [mm]	Gewicht [kg/m³]	Stück/Palette	m²/Palette	Deckfläche/Pal.	Gew./Pal. [kg]
22	2.500 * 600	2.480 * 585	5,88	104	156,0	150,9	ca. 1.020
24	2.500 * 600	2.477 * 577	6,36	98	147,0	140,1	ca. 1.020
35	2.500 * 600	2.477 * 577	9,28	66	99,0	94,3	ca. 1.010
52	2.500 * 600	2.477 * 577	13,78	44	66,0	62,9	ca. 1.000

MATERIAL

Holzfaserdämmplatte produziert nach DIN EN 13171 und DIN EN 13986, mit laufender Güteüberwachung.

Zur Staubbeseitigung gelten die Bestimmungen der BG und der TRGS 553.

ANWENDUNGSGEBIETE

nach DIN 4108-10:2008

Außendämmung von Dach oder Decke, vor Bewitterung geschützt, Dämmung unter Deckungen	DAD - dk, dg, dm, ds
Außendämmung von Dach oder Decke, vor Bewitterung geschützt, Dämmung unter Abdichtungen	DAA - dh, ds
Zwischensparrendämmung, zweischaliges Dach, nicht begehbare, aber zugängliche oberste Geschossdecke	DZ
Innendämmung der Decke (untersseitig) oder des Daches	DI - zk, zg
Innendämmung der Decke oder Bodenplatte (oberseitig) unter Estrich ohne Schallschutzanforderung	DEO - dg, dm, ds
Außendämmung der Wand hinter Bekleidung	WAE - dk, dg, dm, ds
Dämmung v. Holzrahmen- und Holztafelbauweise	WH
Innendämmung der Wand	WI - zk, zg
Dämmung von Raumentrennwänden	WTR

Druckbelastbarkeit: dk=stark, dg=gering, dh=mittlere, ds=hoch, dm=mittel, ds=hoch

TECHNISCHE KENNDATEN STEICO unimicro

Produziert und überwacht gemäß DIN EN 13171 und DIN EN 13986	
Plattenkennzeichnung	WF-EN 13171-T4-DS Q0,-J2-CS(10V)100-TR30-WS1,0-AF100; EN 622-4-SB.H-E1
Kantenausbildung	Spezialprofil Nut und Feder
Brandverhalten nach DIN EN 13501-1	E
Nennwert Wärmeleitfähigkeit λ_0 [W/(m*K)]	0,048
Nennwert Wärmedurchlasswiderstand R_0 [(m²*K)/W]	0,45 (22)/0,50 (24)/0,70 (35)/1,05 (52)
Bemessungswert der Wärmeleitfähigkeit λ [W/(m*K)]	0,050 (gemäß Zulassung Z-23.15-1452)
Rohdichte [kg/m³]	270
Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl μ	5
Sd-Wert [m]	0,11 (22)/0,12 (24)/0,18 (35)/0,26 (52)
Kurzzeitige Wasseraufnahme [kg/m²]	≤ 1,0
Spezif. Wärmekapazität c [J/(kg*K)]	≥ 1.100
Garantierte Druckspannung bei 10 % Stauchung σ_{10} [N/mm²]	0,20
Garantierte Druckfestigkeit [kPa]	200
Zugfestigkeit \perp [kPa]	≥ 30
Längenbezogener Strömungswiderstand [(kPa*s)/m²]	≥ 100
UDP - A	erfüllt Klasse 3 bis 5 gemäß ZVDH Fachregeln so fern DN ≥ 18° und DN ≥ RDN - 8°
Einsatzstoffe - naturharz	Holzfasern, Aluminiumsulfat, Paraffin, Lagerverklebung
Abfallschlüssel (EAK/AVV)	03 01 05 / 17 02 01
Der Nennwert der Wärmeleitfähigkeit λ_0 kann gemäß SIA Normen als Bemessungswert für Nachweise im Hochbau verwendet werden.	
Brandkennziffer	BKZ 4,3

Gedruckt auf 100% recyceltem Papier | Stand 04/2011. Es gilt die aktuelle Auflage. Irrtum vorbehalten.

5.5 Spaceloft

ULTRA DÜNN

SPACELOFT®

FÜR
GEBÄUDE
UND
WOHNHÄUSER

ISOLATION

aspen aerogels

DATENBLATT

Spaceloft® ist eine flexible, nanoporöse Aerogel-Isolationsmatte, die Energieverluste verringert und gleichzeitig den Innenraum in Wohn- und Bürogebäuden nicht beeinträchtigt.

Dank einmaliger Eigenschaften, extrem geringe Wärmeleitfähigkeit, überlegene Flexibilität, Kompressionsfestigkeit, hydrophobe Eigenschaften und einfache Verwendung, ist Spaceloft® für jene wesentlich, die eine Spitzen-Wärmedämmung suchen.

Unter Einsatz patentierter Nanotechnik verbindet die Spaceloft®-Dämmung Silica-Aerogel mit festigenden Fasern für eine branchenführende Wärmedämmungsleistung in einem einfach zu verarbeitenden und umweltsicheren Produkt.

Spaceloft® ist eine bewährte, effiziente Dämmung in Gebäudeaufgaben und bietet den höchsten K-Wert aller Dämmmaterialien für maximale Energieeffizienz in Wänden, Dächern, Boden, Rahmen und Fenstern.



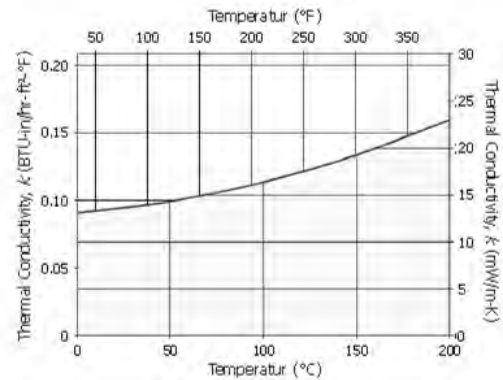
Physikalische Eigenschaften

Dicken*	5 mm, 10 mm
Max. Einsatztemperatur	200°C
Farbe	Weiss
Dichte*	D. 15 g/cc
Hydrophob	ja
Material Form*	1450 mm breit

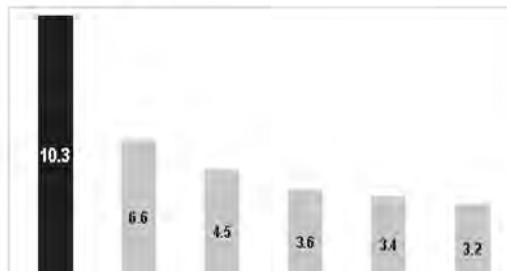
© Aspenwerke

Wärmeleitfähigkeit

ASTM C 177 Ergebnisse



R-Wert je Zoll



ULTRA DÜNN

SPACELOFT®

FÜR
GEBÄUDE
UND
WOHNHÄUSER

ISOLATION

aspen aerogels

DATENBLATT

Vorteile

Überlegene Dämmungsleistung

Bis zu fünf Mal besser thermische performance als Konkurrenzprodukte.

Dicke und Profil verringert

Gleiche Wärmedämmung bei einem Bruchteil der Dicke.

Geringerer Zeit- und Arbeitsaufwand beim Einbau

Einfacher Zuschnitt und Gestaltung komplexer Formen, eng anliegend auch in Räumen mit beschränktem Zugriff.

Robuste physikalische Eigenschaften

Weich und flexible, jedoch mit ausgezeichneter Federung, Spaceloft® erreicht wieder seine Wärmedämmleistung selbst nach einem Kompressionsdruck von bis zu 50 psi.

Einsparungen bei Versand und Lagerung

Verringertes Materialvolumen, hohe Packungsdichte und geringe Verlustraten können die Logistikkosten gegenüber festen, vorgeformten Isolationen um den Faktor 5 oder mehr verringern.

Vereinfachtes Inventar

Im Gegensatz zu festen, vorgeformten Isolationen, wie Rohrmanschetten oder Platten, können dieselben Spaceloft®-Matten fest um jede Form oder Gestalt gelegt werden.

Hydrophob und doch atmungsaktiv

Spaceloft® stoßt Wasser ab, läßt jedoch Dampf hindurch.

Umweltsicher

Auf Müllhalden entsorgbar, ohne Zusätze oder atmungsschädlichen Fasergehalt.

Merkmale

Spaceloft® kann mit herkömmlichem Textil-Schneidwerkzeug, wie Scheren, elektrischen Scheren oder Rasiermessern zugeschnitten werden. Das Material kann staubig sein. Für die Handhabung wird das Tragen von Handschuhen, Sicherheitsbrille und Staubmaske empfohlen. Vergleich Sie das MSDS für die vollständige Gesundheits- und Sicherheitsinfo.

Andere verfügbare Materialien

Aspen Aerogels® produziert verschiedene Serien flexibler Aerogel-Matten für Wärmedämmung, Energieabsorption und Brandschutz. Wenden Sie sich für weitere Infos zu diesen Produkten bitte an Aspen Aerogels®.

Aerogel Vliesmatte von Agitec (Spaceloft)



TECHNISCHE WERTE

Produktstärke	10 und 5 mm
Wärmeleitfähigkeit gemessen nach EN 12667 bei 10°C	0.0131 W/(mK)
Temperaturbeständigkeit	-200°C bis +200°C
Raumgewicht	150 kg/m³
Druckfestigkeit bei 10% Stauchung	70 Kpa
Druckfestigkeit bei 25% Stauchung	210 Kpa
Diffusionswiderstandszahl	11 µ
Äquivalente Luftschichtdicke sd	0.11 m
Wasserabweisend	0.83 mWS
Brandwiderstand	Euronorm C nach EN 13501-1