

Abschlussbericht

zur Prüfung der Dämmeigenschaften von TMP-Faserstoffen unterschiedlicher Holzarten

Auftraggeber: Ministerium für Umwelt und Forsten
 Kaiser-Friedrich-Straße 1
 55116 Mainz

Auftragnehmer: Technische Universität Kaiserslautern
 Fachgebiet Bauphysik
 Prof. Dr. H. Heinrich
 Erwin-Schrödinger-Straße
 67663 Kaiserslautern

Prüfung der Dämmeigenschaften von TMP-Faserstoffen unterschiedlicher Holzarten

Inhalt

1	Zielsetzung der Forschungsarbeit	1
2	Material und Methoden.....	6
2.1	TMP-Faserstoff.....	6
2.2	Methoden	12
2.2.1	Messung im Zweiplattengerät	12
2.2.2	Ermittlung der Materialdichte	17
2.2.3	Statistische Auswertung	17
3	Ergebnisse	18
3.1	Wärmeleitfähigkeit von konditioniertem TMP	18
3.2	Wärmeleitfähigkeit von absolut trockenem TMP.....	20
3.3	Vergleich der Wärmeleitfähigkeit von konditioniertem und absolut trockenem TMP	22
4	Diskussion	24
5	Zusammenfassung	28
	Literatur.....	29

1 Zielsetzung der Forschungsarbeit

Dämmen ist eine Schutzmaßnahme, um das Durchdringen von Wärme und Schall durch eine Bauteil möglichst gering zu halten. Wärmedämmungen beispielsweise werden dann eingesetzt, wenn ein Gebäude den Ansprüchen der Energieeinsparverordnung genügen soll. Ein ausschlaggebender Kennwert solcher Materialien ist die Wärmeleitfähigkeit, welche die Wärmemenge beschreibt, die unter definierten Bedingungen durch einen Stoff hindurchströmt [1] [6] [7].

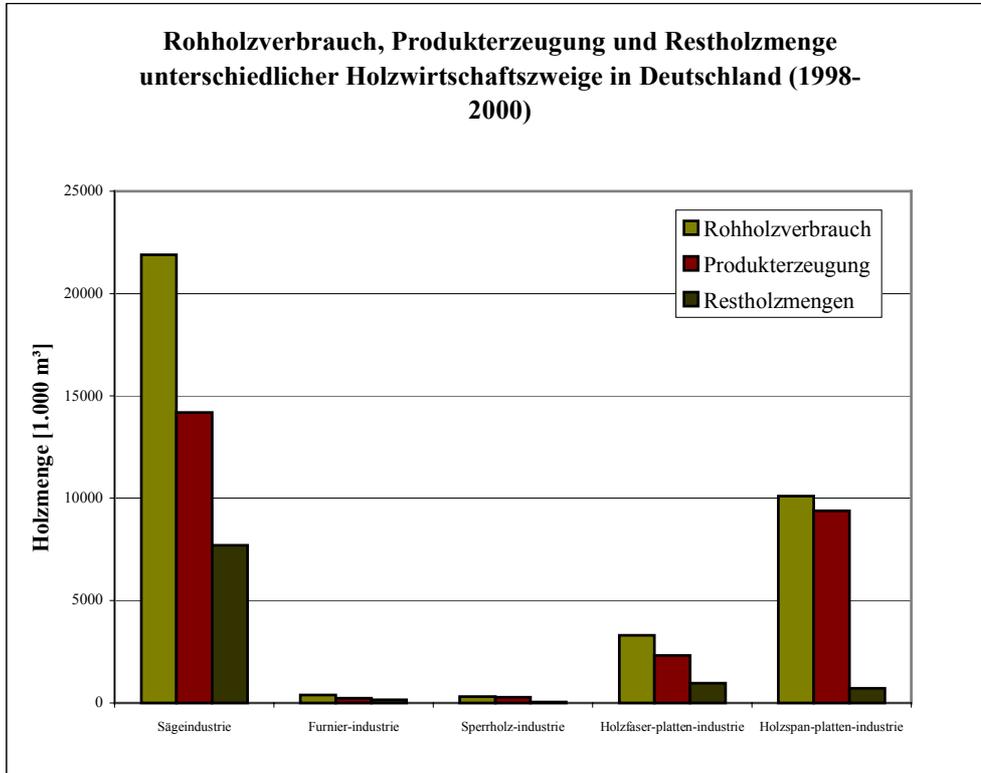
Die Wärmeleitfähigkeit von Dämmstoffen variiert von 0,025 W/(mK) bis 0,10 W/(mK). Durch die gestiegenen Anforderung an den Wärmeschutz, 1995 in der Wärmeschutzverordnung und 2002 in der Energieeinsparverordnung, werden heute meist Wärmedämmstoffe für Außenbauteile mit einer Wärmeleitfähigkeit von circa 0,025 W/(mK) bis 0,045 W/(mK) eingebaut [1] [7].

Holz stellt aufgrund seiner Zellstruktur bereits einen natürlichen Dämmstoff dar. Das trockene Holz bildet mit seinen Zellwänden luftgefüllte Poren. Deswegen hat Vollholz bereits mit einer Wärmeleitfähigkeit von circa 0,1 W/(mK) an sich schon eine gewisse Dämmwirkung. Ausschlaggebend dafür sind die Rohdichte, der Porenanteil, der Feuchtegehalt und die Temperatur. Außerdem verhält sich Vollholz hinsichtlich der Wärmeleitfähigkeit anisotrop. Sie ist parallel zur Faserrichtung des Holzes etwa doppelt so groß wie senkrecht zur Faser [1] [5].

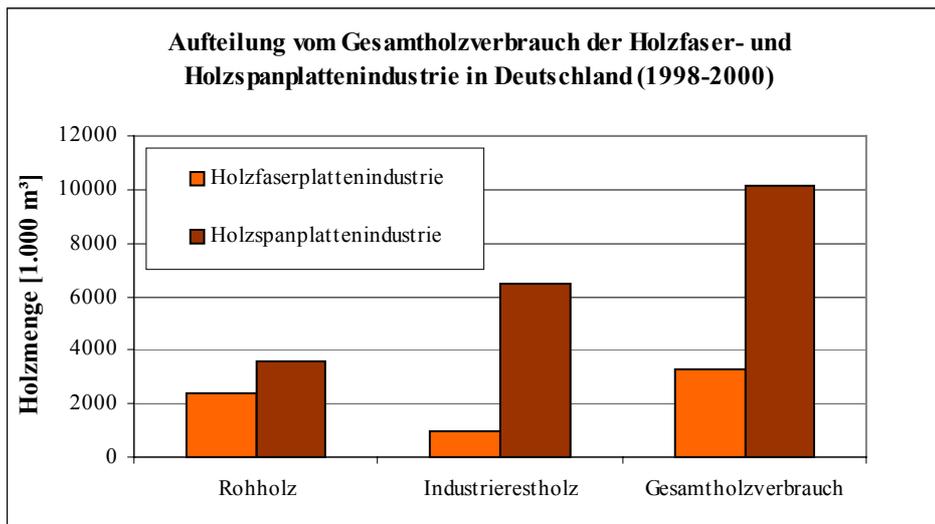
Wird Holz zu Holzwolle, Holzspänen oder Holzfasern zerkleinert, wirkt sich dies in der Bildung zusätzlicher Lufträume aus, so dass solche Materialien noch bessere Dämmeigenschaften besitzen als der massive Ausgangsstoff [2]. Darüber hinaus reduziert die Verarbeitung die Holzanisotropie,

Die Holzverarbeitung macht es möglich, Rest- und Durchforstungshölzer für die Herstellung von Dämmstoffen zu verwerten (siehe Bild 1 und 2), so dass Sie nicht mit anderen Verwendungen um den Rohstoff Holz konkurrieren [1]. Restholz fällt bei der holzverarbeitenden Industrie wie beispielsweise in Sägewerken oder bei der Papierherstellung an. Dieses Material wird bei der

Produktion der Holzfaserdämmstoffe unter Druck- und Hitzeeinwirkung mechanisch zu Holzstoff zerfasert.



▪ **Bild 1:** Rohholzverbrauch, Produkterzeugung und Restholzmengen unterschiedlicher Holzwirtschaftszweige in Deutschland (1998-2000), [14]



▪ **Bild 2:** Aufteilung vom Gesamtholzverbrauch der Holzfaser- und Holzspanindustrie in Deutschland (1998-2000), [14]

Anwendungsbeispiele von Wärmedämmstoffen aus Holz im Hochbau sind [2]:

- geneigtes Dach
- Außenwand
- Holzständerwand

Unabhängig von der Holzart lässt sich der TMP-Faserstoff zu Dämmplatten oder als loser Dämmstoff weiterverarbeiten [1] [2]. Dämmplatten aus Holz werden beispielsweise als Ausbauplatte zur Untersparren- oder Trittschalldämmung oder im Wärmedämmverbundsystem einer Außenwand eingesetzt. Holzfaserdämmstoffe in Form von Dämmplatten werden nach DIN 68755 „Holzfaserdämmstoffe für das Bauwesen“ produziert.

Holzfaserdämmplatten bestehen zu 90 % aus Nadelholzfäsern (Fichte, Tanne, Kiefer) sowie Wasser und eventuell Bindemittel. Das im Ausgangsmaterial enthaltene Lignin übernimmt die Funktion eines Bindemittels, es müssen keine zusätzlichen chemischen Stoffe eingesetzt werden. Die Holzfasern werden mit Wasser vermengt, gepresst, getrocknet und zu Platten geschnitten [11].

▪ *Tabelle 1: Bauphysikalische Kennwerte für Dämmstoffe aus Holzfasern [1]*

	Holzfäsern, lose	Holzfäsern als Matten, Platten
Dichte ρ [kg/m ³]	30-60	160-250
Baustoffklasse	B2	B1
Wärmeleitfähigkeit λ [W/mK]	0,040	0,040-0,060
Diffusionswiderstandszahl μ [-]	1 - 2	4 - 9

Demgegenüber eignen sich lose Schüttungen beispielsweise als Einblasdämmstoff zum Befüllen von Hohlräumen in Wänden. Anders als Dämmplatten gibt es für sie keine DIN-Norm, vielmehr werden sie über eine bauaufsichtliche Zulassung geprüft.

Der klassische Holzstoff, mit Hilfe von Steinschleifern erzeugt, wird Holzschliff genannt [17]. Der Vorteil von Holzstoff gegenüber Holzspänen ist die hohe Ausbeute zwischen 90 und 98 %, bezogen auf das eingesetzte Holz. Man erhält also aus 100 kg trockener Holzsubstanz 90 bis 98 kg Holzstoff. [22]

Thermomechanischer Holzstoff oder Faserstoff (TMP = thermo-mechanical pulp) wird durch Mahlen zwischen Stein- oder Metallplatten von erhitzten, das heißt gedämpften Holzschnitzeln in Scheibenmühlen (Refinern) gewonnen [4] [17] [22].

TMP-Faserstoff (Bild 3) enthält einzelne Tracheiden bzw. deren Bruchstücke und Tracheidenbündel [4]. Durch den unterschiedlichen Zellaufbau der Hölzer weist der TMP-Faserstoff in der Staubbildung bei Einbau des Materials Unterschiede auf. TMP-Faserstoff aus Buchen- und Pappelholz staubt beispielsweise wesentlich stärker als TMP-Faserstoff aus Fichten- oder Kiefernholz.



▪ Bild 3: REM-Aufnahme von TMP-Faserstoff [19]

Nach [4] liegen bauphysikalische Untersuchungen über unterschiedlich aufbereitetes Fichtenholz vor. Es wurde bei TMP im Vergleich mit Hobel-, Sägespänen und extrudiertem Holzstoff die geringste Wärmeleitfähigkeit von 0,039 W/mK bei einer mittleren Dichte von circa 54 kg/m³ gemessen (siehe Tabelle 2). TMP kann aufgrund der ermittelten Wärmeleitfähigkeit als Wärmedämmstoff

bezeichnet werden [4]. Gegenüber Holzschliff weist TMP einen höheren Faserlangstoffanteil und eine höhere Fortreißfestigkeit auf. TMP wird hauptsächlich in Zeitungsdruck- als auch in Feinpapieren eingesetzt [17].

- *Tabelle 2: Minimum der Wärmeleitfähigkeit in Abhängigkeit von der Materialdichte bei unterschiedlichen Zerkleinerungsformen von Fichtenholz nach [4]*

Zerkleinerungsgrad von Fichtenholz	Materialdichte [kg, atro/m³]	Wärmeleitfähigkeit [W/(mK)]
Sägespäne	200	0,054
Hobelspäne	109	0,046
Extrudierter Holzstoff	104	0,044
Thermomechanischer Refiner-Holzstoff	54	0,039

Vergleichende Untersuchungen über den Einfluss der Holzart auf die Wärmeleitfähigkeit von TMP-Faserstoff wie zum Beispiel Fichte und Kiefer als Nadelholz oder Buche und Pappel als Laubholz gibt es bisher nicht.

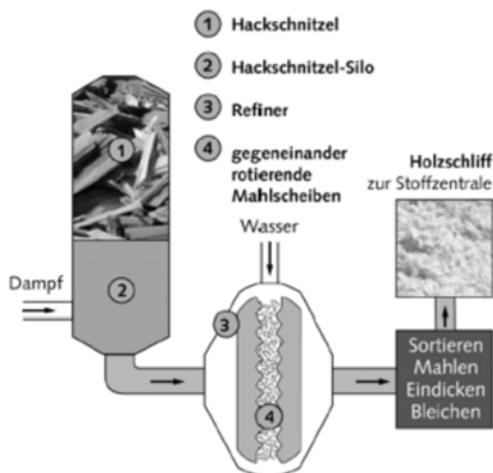
Deshalb wurden in dieser Forschungsarbeit, durchgeführt am Fachgebiet Bauphysik der Technischen Universität Kaiserslautern, die Wärmedämmeigenschaften von TMP-Faserstoff aus Fichte, Kiefer, Buche und Pappel untersucht. Das Ziel der durchgeführten Untersuchungen war eine Überprüfung der Wechselwirkung Dichte und Wärmeleitfähigkeit in Abhängigkeit von der Holzart mit dem Hintergrund die Dämmeigenschaften von losen Dämmstoffen aus Holz durch den gezielten Einsatz einer oder mehrerer Holzart zu optimieren.

2 Material und Methoden

2.1 TMP-Faserstoff

Der TMP-Faserstoff für die Untersuchungen der vorliegenden Studie wurde aus vier unterschiedlichen, heimischen Holzarten hergestellt. Gewählt wurden zwei häufig vorkommende Nadelholzarten, Fichte (Bild 5 und 6) und Kiefer (Bild 7 und 8), und zwei Laubholzarten, Buche (Bild 9 und 10) und Pappel (Bild 11 und 12). Das Holz wurde als Vollholz bei der Holzhandlung Wickert GmbH & Co. in Landau gekauft. Über seine Herkunft liegen keine genaueren Angaben vor.

Aus entrindeten Brettern der unterschiedlichen Holzarten wurden Hackschnitzel in einem Trommelhacker hergestellt, die das Ausgangsmaterial beim thermomechanischen Refinerverfahren* bilden (Bild 4). Die Hackschnitzel wurden im Refiner bei 150 °C unter Zugabe von Wasser über eine Dauer von 5 Minuten gekocht und dann zwischen gegeneinander rotierenden Mahlsteinen zerfasert [22]. Aus 10 bis 12 kg Vollholz mit einer Darrdichte von 500 bis 600 kg, at/m³ wurden 0,4 bis 0,5 m³ TMP-Faserstoff hergestellt. Im Anschluss wurden die Fasern auf eine Restfeuchte von ca. 8 % getrocknet und in Säcken verpackt.



▪ Bild 4: Thermomechanische Holzstoffherstellung [22]

Der TMP der unterschiedlichen Holzarten wurde entweder vor der Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit im Klimaschrank bis zur Gewichtskonstanz bei 23 °C und 80 % relativer Feuchte über circa 3 bis 4 Wochen konditioniert oder bei 105 °C bis zur Gewichtskonstanz im Wärmeschrank getrocknet.

Die Konditionierung der Proben bei 23 °C und 80 % relativer Feuchte entspricht einer ungünstigen Annahme der klimatischen Verhältnisse für organische Faserstoffe nach den Vorgaben des Deutschen Instituts für Baustoffe und Bauteile (DIBT) in Berlin.

* Die Herstellung des TMP wurde am Wilhelm-Klauditz-Institut für Holzforschung in Braunschweig durchgeführt.



Bild 5: TMP-Faserstoff Fichte

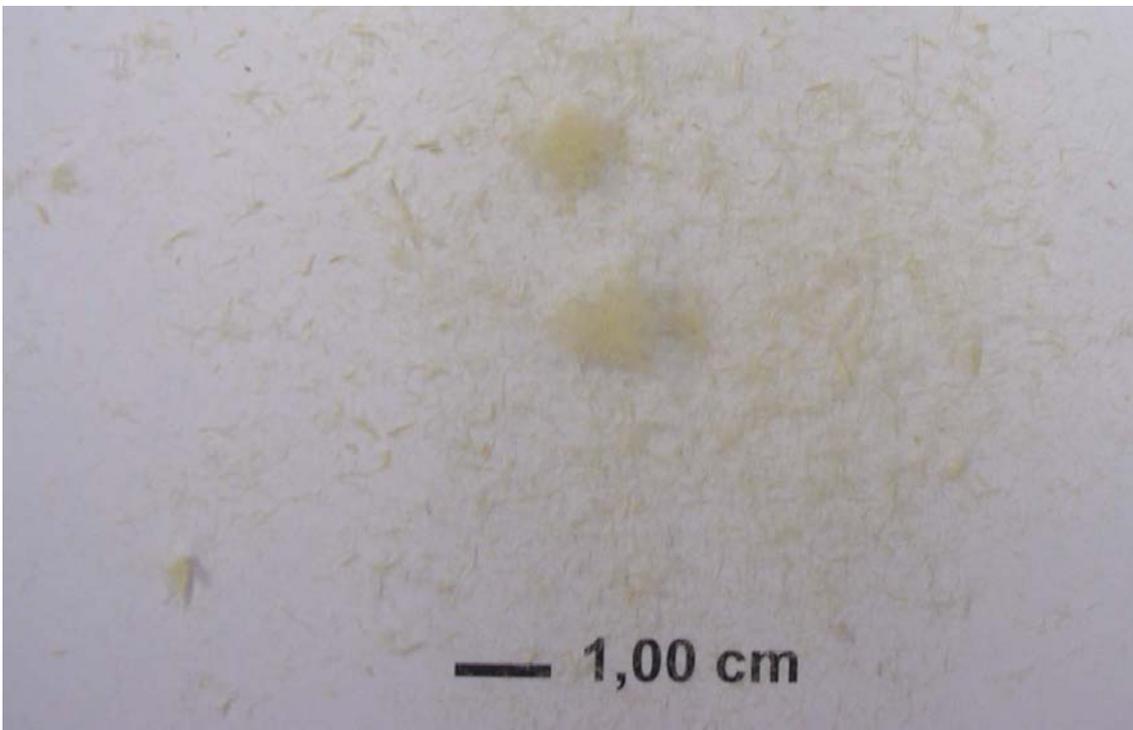


Bild 6: TMP-Fasern Fichte



Bild 7: *TMP-Faserstoff Kiefer*

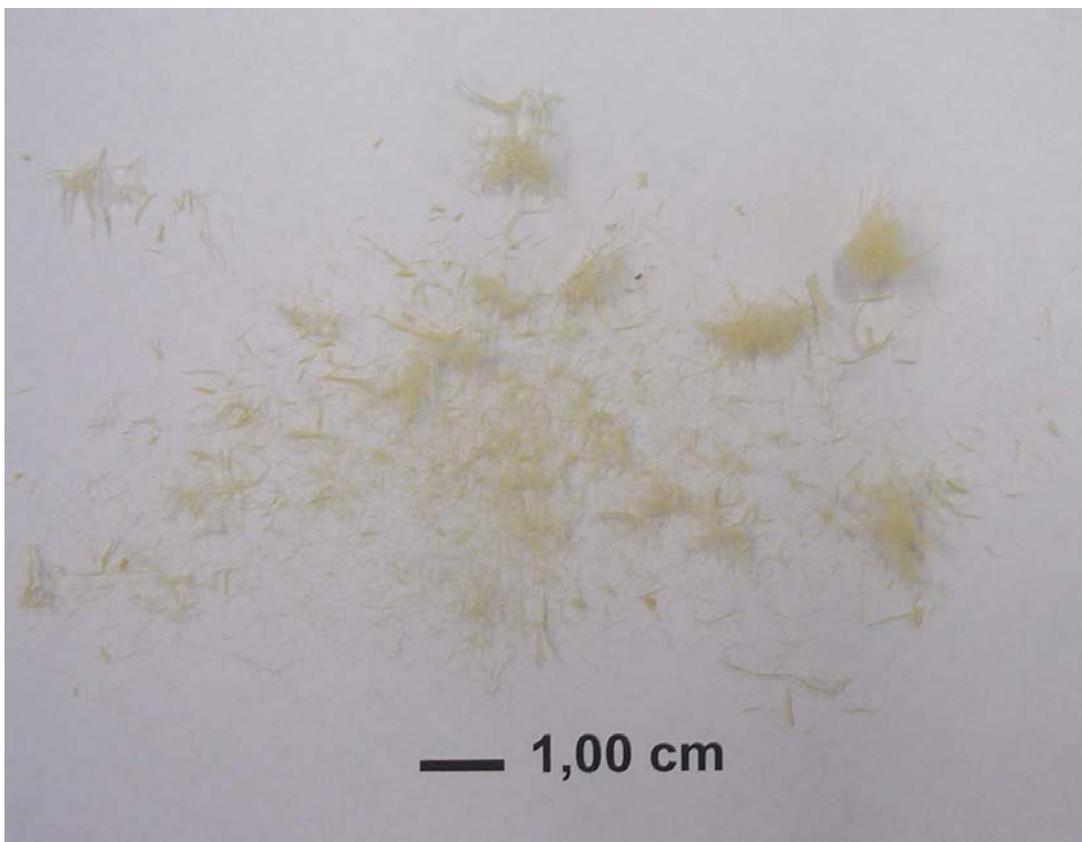


Bild 8: *TMP-Fasern Kiefer*



Bild 9: TMP-Faserstoff Buche

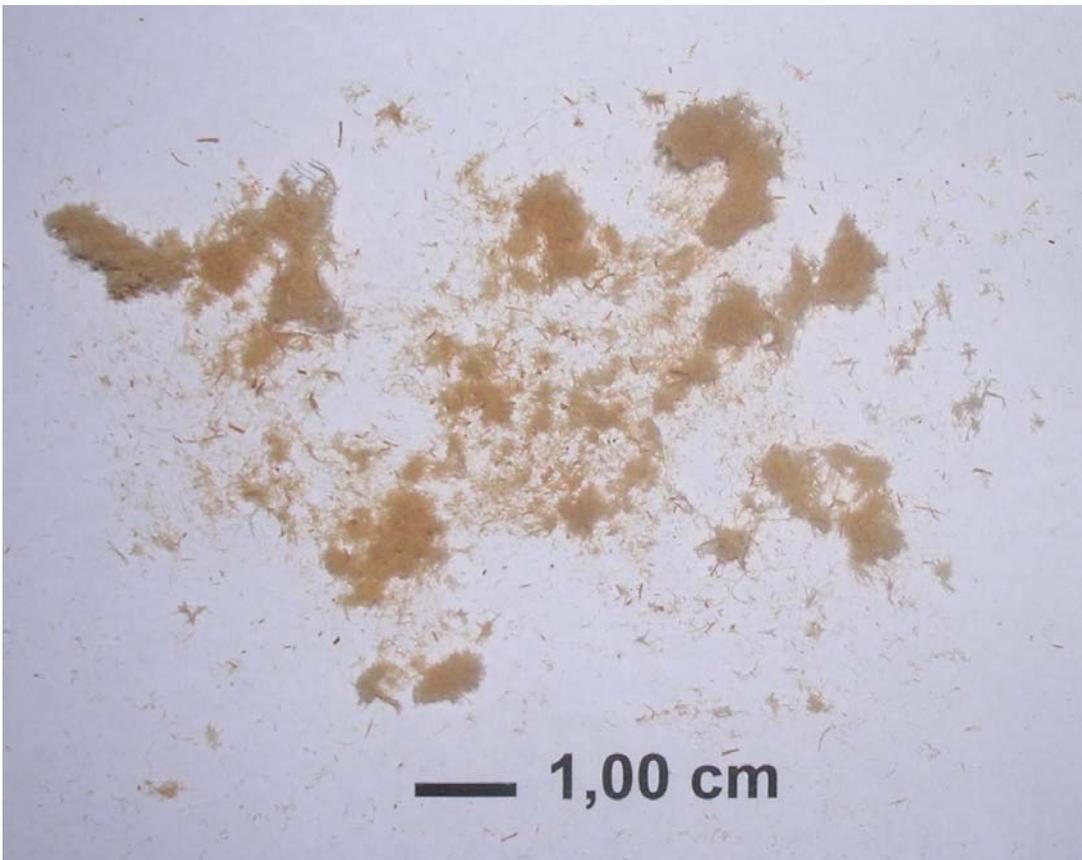


Bild 10: TMP-Fasern Buche



Bild 11: TMP-Faserstoff Pappel

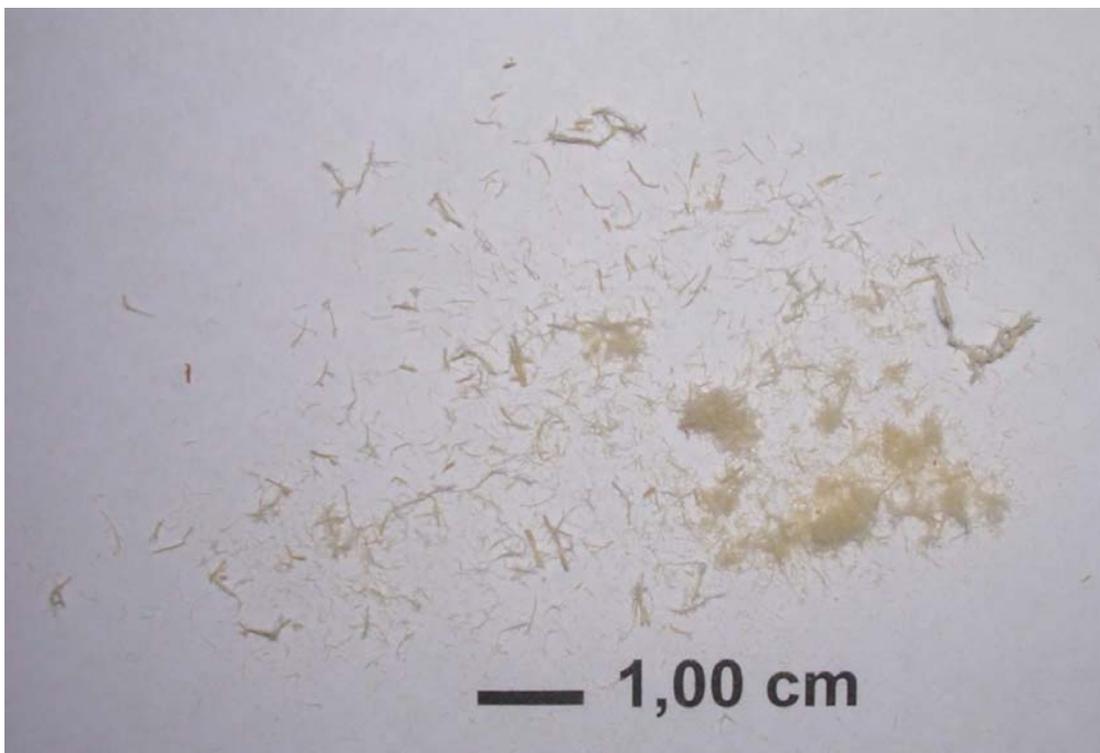


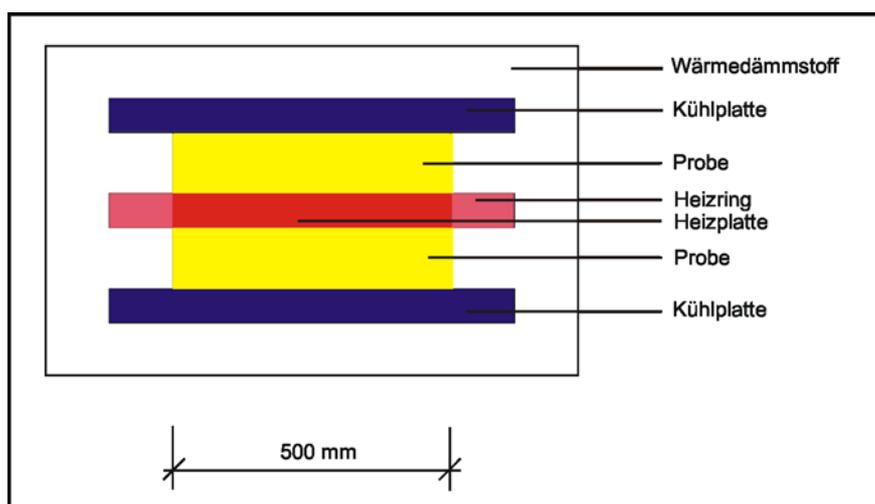
Bild 12: TMP-Fasern Pappel

2.2 Methoden

Die Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit der Proben aus TMP wurde im Fachgebiet Bauphysik der Technischen Universität Kaiserslautern nach den Vorgaben der DIN 52612 im sogenannten „Zweiplattengerät“ durchgeführt.

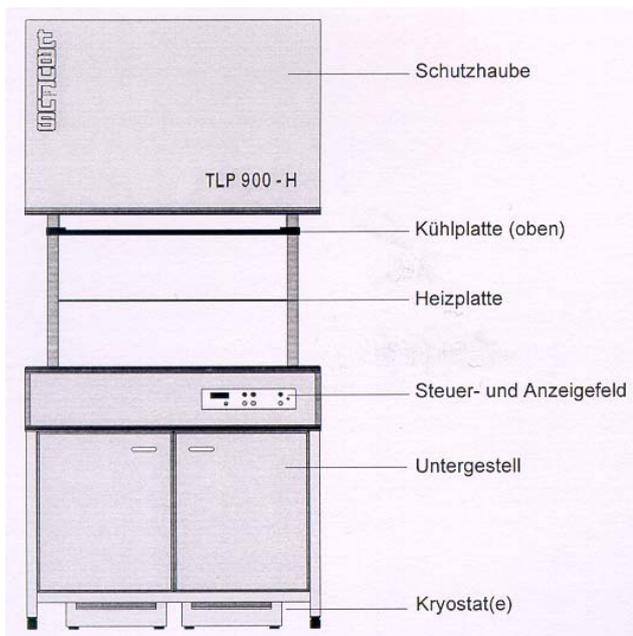
2.2.1 Messung im Zweiplattengerät

Beim Zweiplattenverfahren werden zwei nach Material und Abmessungen möglichst identische Proben zwischen zwei Kühlplatten (oben und unten) und eine elektrische Heizplatte in der Mitte (Bild 13) eingebaut. Der Wärmestrom zwischen dem Probenmaterial verläuft von der Heizplatte senkrecht zur jeweiligen Kühlplatte. Der Wärmestrom durch das Probenmaterial wird durch definierte Temperaturdifferenzen zwischen Heizplatte und Kühlplatte erzeugt und erfasst. Fehler durch einen seitlich gerichteten Wärmestrom werden durch einen Schutzheizring um die Heizplatte und eine Probenschutzring aus Polystyrolplatten um die Proben herum minimiert (Bild 16). Außerdem wird die Messkammer durch eine gedämmte Schutzhaube gegenüber Umwelteinflüssen und einen Wärmeaustausch mit der Umgebungsluft abgeschirmt.



▪ Bild 13: Schematische Darstellung vom Zweiplattenverfahren

Die Anlage zur Ermittlung der Wärmeleitfähigkeit nach dem Zweiplattenverfahren besteht aus der Messkammer mit der Messanordnung, den Kryostaten für die Temperierung der Kühlplatten, dem Messsystem bestehend aus Steuer-, Mess- und Regeleinheit und einem Leitreechner. Für die durchgeführten Untersuchungen wurde die Messanlage TLP 900 – H (TAURUS Daten- und Messtechnik GmbH, Weimar) verwendet (Bild 14 und 15).



▪ *Bild 14: Bauteile vom Zweiplattengerät TLP 900 – H [18]*



▪ *Bild 15: Messanlage TLP 900 – H im Labor Gebäude 67 der TU Kaiserslautern*

Probeneinbau

In die Messkammer des TLP 900 - H wurden Proben mit einer Abmessung von 500 x 500 mm eingebaut. Die Dicke der Proben war variabel. Beim Einbau der Proben wurden jeweils zwischen Probe und Kühlplatte bzw. Heizplatte Thermoelemente angeordnet. Zur genauen Positionierung waren diese auf einer Folie fixiert (Bild 13 und 15). Mit den Thermoelementen wurden die Oberflächentemperaturen auf 0,01 °C genau gemessen und an den Leitrechner weitergeleitet. Zwischen den Platten und der Probe durften sich keine Lufteinschlüsse bilden, da diese das Messergebnis stark beeinflussen.

Zum Probeneinbau wurden Schutzhaube, obere Kühlplatte und Heizplatte angehoben und der Probenschutzring aus Polystyrolplatten aufgelegt. Danach wurde die untere Probe auf die untere Thermoelementfolie nach den entsprechenden Markierungen angeordnet (Bild 16 und 17).



▪ *Bild 16: Untere Probe mit Probenschutzring im Zweiplattengerät*



▪ *Bild 17: Auflegen der Thermoelementfolie auf die untere Probe*

Sobald die untere Probe mit Probenschutzring und Thermoelementfolie eingebaut war, wurde die Heizplatte wieder heruntergefahren. Die Arbeitsschritte beim Probeneinbau oberhalb der Heizplatte entsprachen denen der unteren Probe.



▪ *Bild 18: Oberer Probenschutzring wurde aufgelegt, Probe konnte eingebaut werden.*



- *Bild 19: Eingebaute obere Probe mit aufgelegter Thermoelementfolie*

Die obere Kühlplatte konnte nun wieder nach unten gefahren werden (Bild 20) und die Schutzhaube wurde geschlossen.



- *Bild 20: Obere Kühlplatte wurde nach unten gefahren, Schutzhaube konnte nun vor dem Start der Messung geschlossen werden.*

Messung

Die Wärmeleitfähigkeit jeder Probe wurde in 3 Wiederholungen bei einer Temperaturdifferenz von 10 K zwischen Heiz- und Kühlplatte gemessen. Die

Temperaturdifferenzen wurden so erzeugt, dass sich die Wärmeleitfähigkeiten bei Probenmitteltemperaturen von 5, 15 und 25 °C ermitteln ließen. Die Messungen wurden jeweils dann vorgenommen, wenn sich Temperaturkonstanz eingestellt hatte. Jede Einzelmessung dauerte circa 8 Stunden. Mit den Wärmeleitfähigkeiten der 3 Temperaturstufen wurde eine Regressionsgerade berechnet, aus der die Wärmeleitfähigkeit λ_{10g} als Kennwert für 10 °C Proben temperatur abgeleitet wurde.

2.2.2 Ermittlung der Materialdichte

Das Probenmaterial wurde lose in die Polystyrolschutzringe vom Zweiplattengerät eingestreut. Die Einbauhöhe entsprach jeweils der Höhe des Probenschuttrings. Das Probenvolumen wurde aus dem Mittelwert der gemessenen Dicke der vier Eckpunkte und der Grundfläche mit 50 x 50 cm berechnet. Nach dem Ausbau wurde jede Probe auf 1 g genau gewogen. Aus Probenmasse und -volumen wurde die Materialdichte im eingebauten Zustand im Zweiplattengerät ermittelt.

2.2.3 Statistische Auswertung

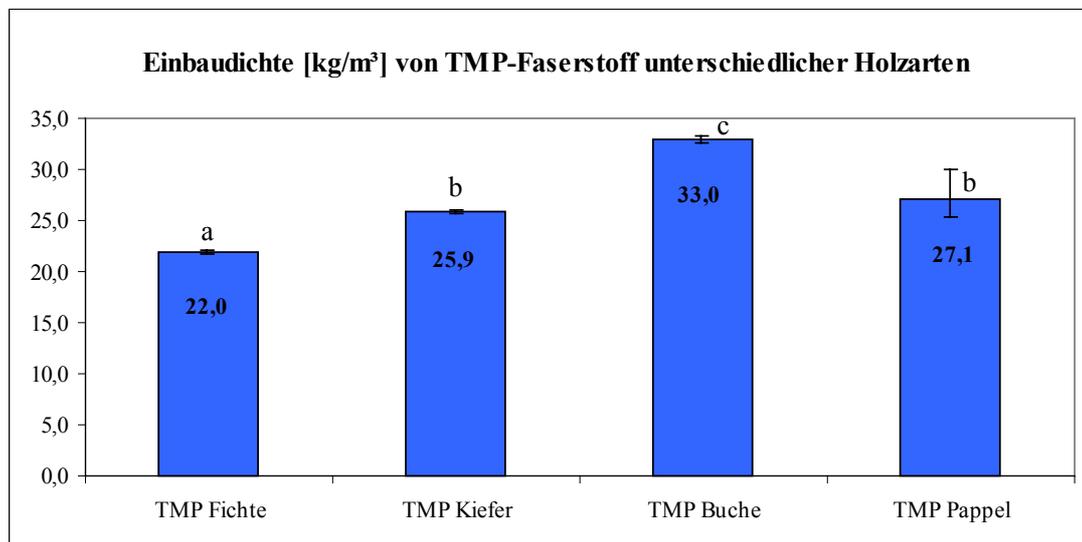
Mit den 3 Wiederholungen jeder Messung wurden Mittelwert und Standardabweichungen berechnet. Die Einflüsse der Baumart oder Materialzustand wurden mittels einfaktorieller Varianz und Regressionsanalysen untersucht. Homogene Gruppen wurden mittels Scheffés multiplex kontraste analysiert. Die homogenen Gruppen sind in den Abbildungen des Ergebnisteils mit einheitlichen Indizes gekennzeichnet. Beschreibende Statistik, Varianzanalysen und Scheffés multiplex kontraste wurden in einem Excel-Sheet berechnet.

3 Ergebnisse

3.1 Wärmeleitfähigkeit von konditioniertem TMP

Die holzartenbedingten Unterschiede der Wärmeleitfähigkeit von TMP-Faserstoff wurden anhand der bei 23 °C und 80 % rel. F. konditionierten Proben aus Fichte, Kiefer, Buche und Pappel an jeweils 3 Proben untersucht (vgl. 2.1).

Zur Messung der Wärmeleitfähigkeit im Zweiplattengerät wurde der TMP-Faserstoff, wie in Kap. 2.2.1 beschrieben, lose in die Polystyrolringe eingestreut. Nach der Messung wurde die Einbaudichte nach Kap. 2.2.2 ermittelt.

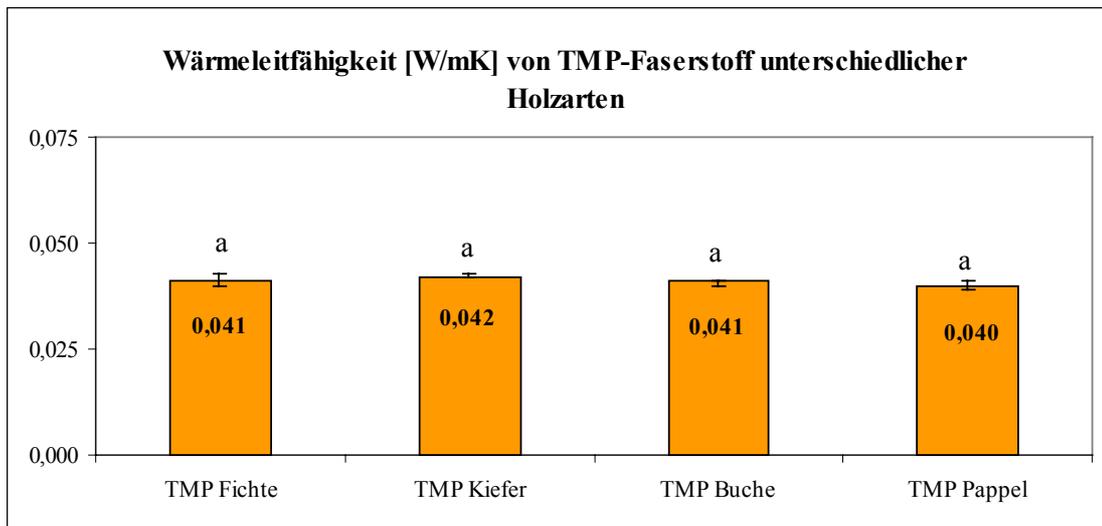


▪ Bild 21: Mittelwerte der Einbaudichte [kg/m³] von konditioniertem TMP-Faserstoff unterschiedlicher Holzarten

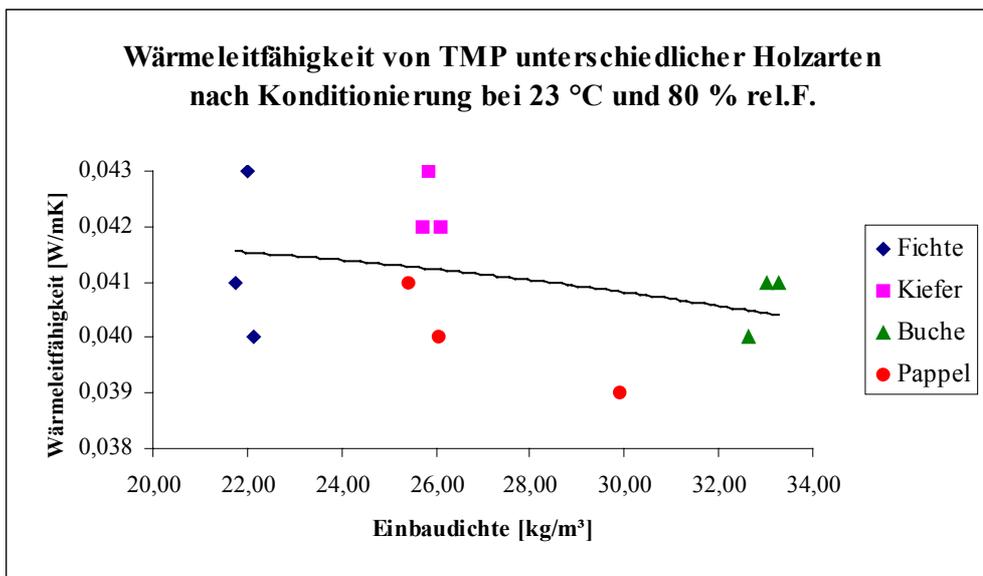
Die Proben unterschieden sich hinsichtlich der Einbaudichten signifikant holzartenspezifisch voneinander (Bild 21). TMP-Faserstoff aus Fichte war mit einer Einbaudichte von $22,0 \text{ kg/m}^3 \pm 1,0 \%$ deutlich weniger dicht als der TMP-Faserstoff der anderen Holzarten. TMP-Faserstoff aus Kiefer und Pappel sind hinsichtlich Einbaudichte mit $25,9 \text{ kg} \pm 0,8 \%$ bzw. $27,1 \text{ kg} \pm 10,3 \%$ einander ähnlich. TMP-Faserstoff aus Buche wies mit $33,0 \text{ kg} \pm 1,0 \%$ eine um ca. 50 % höhere Einbaudichte als Fichte auf (Bild 21).

Die größte Wärmeleitfähigkeit zeigte TMP-Faserstoff aus Kiefer mit $0,0424 \text{ W/mK} \pm 2,4 \%$ und die geringste TMP-Faserstoff aus Pappel mit $0,0407 \text{ W/mK}$

± 2,5 % (Bild 22). Die Unterschiede zwischen diesen Werten sind allerdings kleiner als 5 %. Es ließen sich somit bei der vorgegebenen Anzahl der Proben keine signifikanten, durch die Holzart bedingten Unterschiede der Wärmeleitfähigkeit von TMP-Faserstoffen beobachten. Bei allen unter Normklima konditionierten Proben wurde ohne Unterschied der Holzart durchschnittlich eine Wärmeleitfähigkeit von circa 0,041 W/mK ± 4,9 % gemessen. Offensichtlich kommt der durch die Holzart bedingten Einbaudichte keine Bedeutung für die Wärmeleitfähigkeit zu (Bild 23).



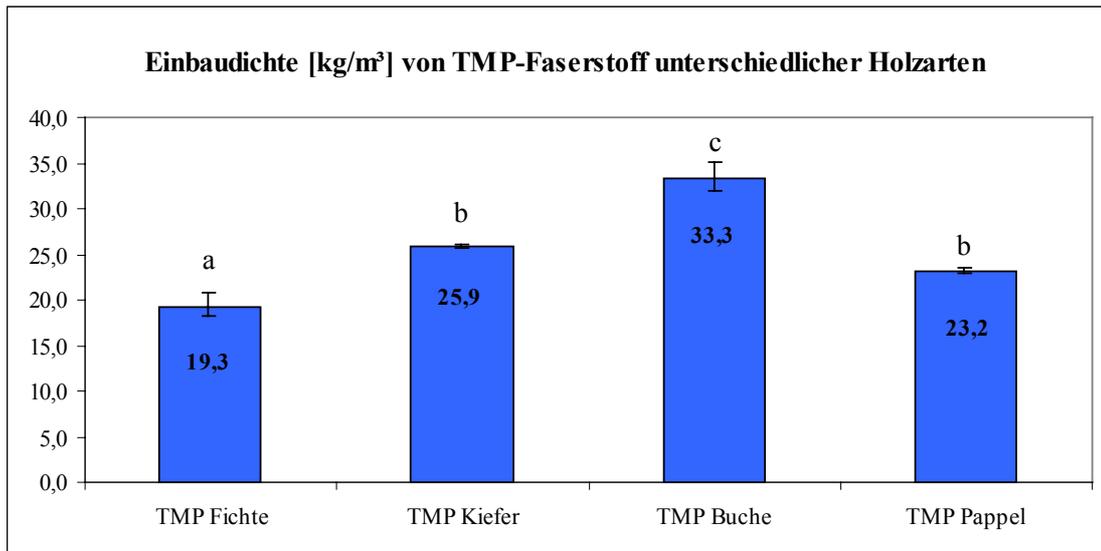
▪ Bild 22: Mittelwerte der Wärmeleitfähigkeit [W/mK] von konditioniertem TMP-Faserstoff unterschiedlicher Holzarten



▪ Bild 23: Mittelwerte der Messergebnisse für Wärmeleitfähigkeit und Einbaudichte von TMP-Faserstoff unterschiedlicher Holzarten nach Konditionierung im Klimaschrank bei 23 °C und 80 % relativer Feuchte

3.2 Wärmeleitfähigkeit von absolut trockenem TMP

Neben dem konditionierten TMP-Faserstoff wurde die Wärmeleitfähigkeit von absolut trockenem TMP-Faserstoff unterschiedlicher Holzarten untersucht. Die Proben wurden im Wärmeschrank bei 105 °C bis zur Gewichtskonstanz getrocknet und wie bereits in Kap. 3.1 beschrieben untersucht.

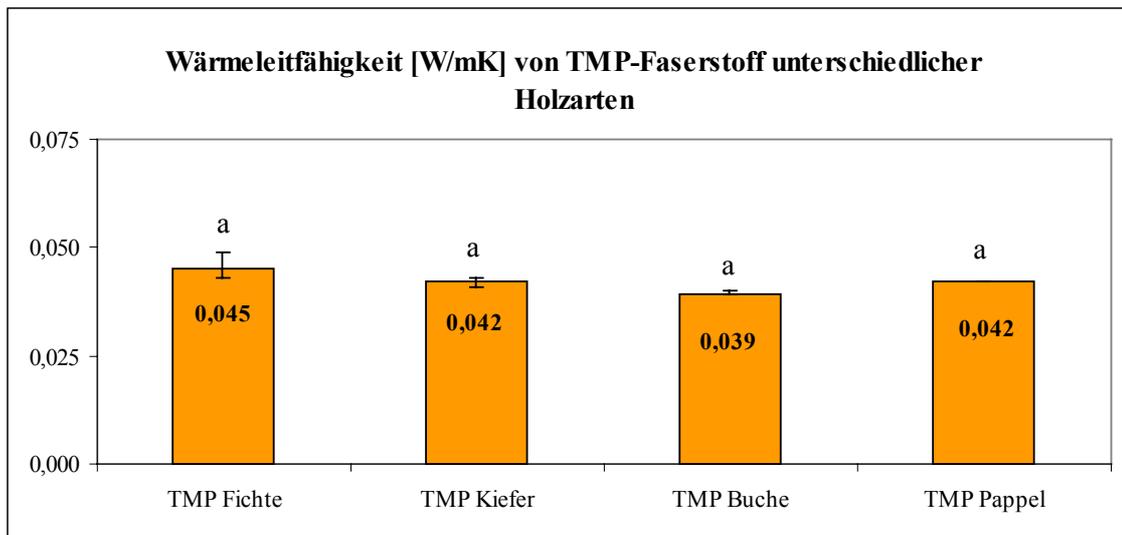


▪ Bild 24: Mittelwerte der Einbaudichte [kg/m³] von absolut trockenem TMP-Faserstoff unterschiedlicher Holzarten

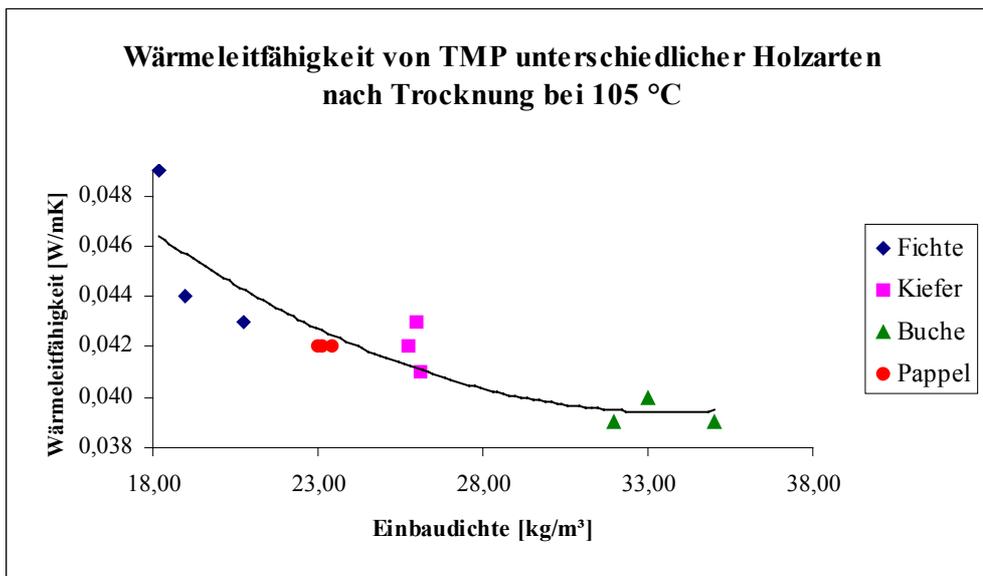
Auch bei absolut trockenem TMP-Faserstoff unterschieden sich die Proben hinsichtlich der Einbaudichten signifikant holzartenspezifisch voneinander (Bild 24). TMP-Faserstoff aus Fichte war mit einer Einbaudichte von $19,3 \text{ kg/m}^3 \pm 7,5 \%$ deutlich weniger dicht als der TMP-Faserstoff der anderen Holzarten. TMP-Faserstoff aus Kiefer und Pappel sind hinsichtlich Einbaudichte mit $25,9 \text{ kg} \pm 0,7 \%$ bzw. $23,2 \text{ kg} \pm 5,1 \%$ einander ähnlich. TMP-Faserstoff aus Buche wies mit $33,3 \text{ kg} \pm 1,1 \%$ auch hier eine um ca. 50 % höhere Einbaudichte als Fichte auf (Bild 24).

Die größte Wärmeleitfähigkeit zeigte TMP-Faserstoff aus Fichte mit $0,045 \text{ W/mK} \pm 8,9 \%$ und die geringste TMP-Faserstoff aus Buche mit $0,039 \text{ W/mK} \pm 2,6 \%$ (Bild 25). Die Unterschiede zwischen diesen Werten liegen bei circa 10 %. Es ließen sich somit auch keine signifikanten, durch die Holzart bedingten Unterschiede der Wärmeleitfähigkeit von TMP-Faserstoffen beobachten. Bei allen absolut trockenen Proben wurde ohne Unterschied der Holzart

durchschnittlich eine Wärmeleitfähigkeit von circa $0,042 \text{ W/mK} \pm 16,2 \%$ gemessen. Offensichtlich kommt der durch die Holzart bedingten Einbaudichte auch dann keine Bedeutung für die Wärmeleitfähigkeit zu, wenn das Material absolut trocken ist. Demgegenüber machten die Untersuchungen des trockenen Materials deutlich, dass die Wärmeleitfähigkeit von TMP-Faserstoffen mit abnehmender Dichte wächst. So leitet das Material mit einer Dichte von lediglich 18 kg/m^3 20 % mehr Wärme als solches mit einer doppelt so großen Dichte (Bild 26).



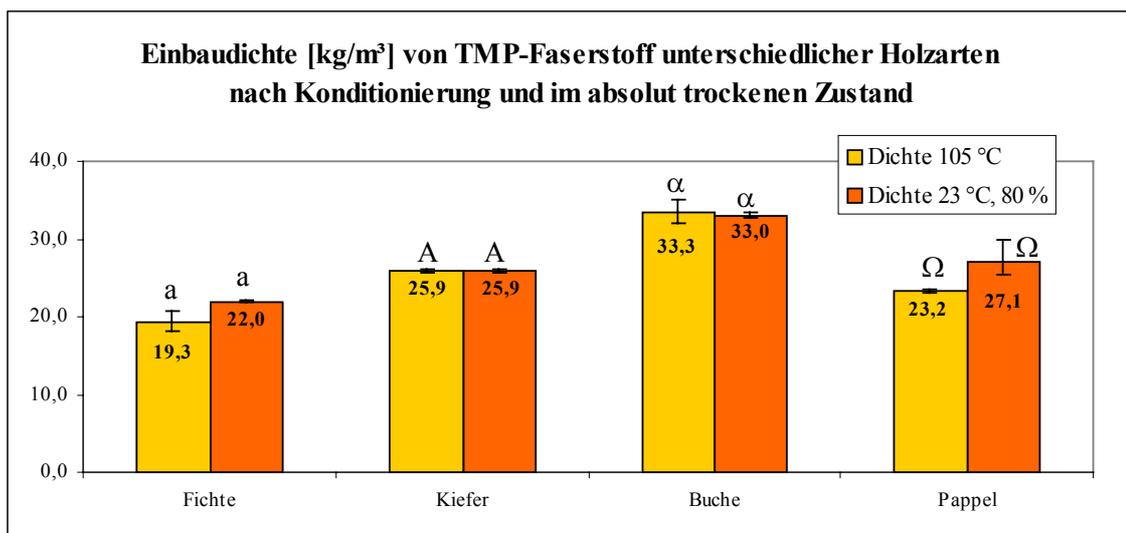
▪ Bild 25: Mittelwerte der Wärmeleitfähigkeit [W/mK] von absolut trockenem TMP-Faserstoff unterschiedlicher Holzarten



▪ Bild 26: Mittelwerte der Messergebnisse für Wärmeleitfähigkeit und Einbaudichte von absolut trockenem TMP-Faserstoff unterschiedlicher Holzarten

3.3 Vergleich der Wärmeleitfähigkeit von konditioniertem und absolut trockenem TMP

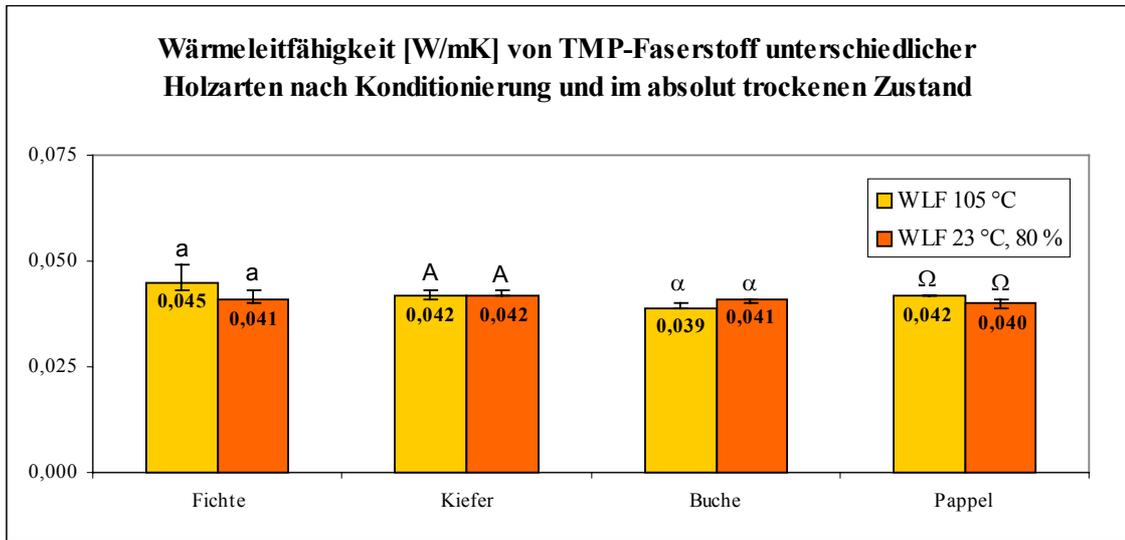
Der bei 105 °C auf Gewichtskonstanz getrocknete TMP-Faserstoff aus Fichte und Pappel war bei $19,3 \text{ kg/m}^3 \pm 6,8 \%$ bzw. $23,3 \text{ kg/m}^3 \pm 1,0 \%$ signifikant um circa 10 bzw. 20 % weniger dicht als der bei Normklima konditionierte TMP-Faserstoff dieser Holzarten mit $22,0 \text{ kg/m}^3 \pm 0,9 \%$ bzw. $27,1 \text{ kg/m}^3 \pm 9,0 \%$ (Bild 27). Diese Masseabnahme schlug sich jedoch nicht in der Wärmeleitfähigkeit nieder. Vielmehr glichen die Wärmeleitfähigkeiten von normklimatisiertem TMP-Faserstoff aus Fichte und Pappel mit $0,0414 \text{ W/mK} \pm 3,1 \%$ bzw. $0,400 \text{ W/mK} \pm 3,3 \%$ dem absolut trockenen Material mit $0,0453 \text{ W/mK} \pm 7,1 \%$ bzw. $0,0416 \text{ W/mK} \pm 0,2 \%$ weitgehend (Bild 28).



▪ Bild 27: Mittelwerte der Einbaudichte [kg/m³] von absolut trockenem und konditioniertem TMP-Faserstoff unterschiedlicher Holzarten im Vergleich

Im Gegensatz zu TMP-Faserstoff aus Fichte und Pappel war der absolut trockene TMP-Faserstoff aus Kiefer und Buche nicht weniger dicht als bei Normklima konditioniertes Material (Bild 27). Auch die Proben dieses Materials unterschieden sich in ihren Wärmeleitfähigkeiten nicht voneinander (Bild 28), sondern wiesen einheitlich Wärmeleitfähigkeiten von $0,042 \text{ W/mK} \pm 2,4 \%$ (normklimatisierter und absolut trockener TMP-Faserstoff aus Kiefer) bzw.

0,041 W/mK \pm 2,5 % (normklimatisierter und absolut trockener TMP-Faserstoff aus Pappel) auf.



- **Bild 28:** Mittelwerte der Wärmeleitfähigkeit [W/mK] von absolut trockenem und konditioniertem TMP-Faserstoff unterschiedlicher Holzarten im Vergleich

4 Diskussion

Einfluss der Konditionierung auf die Wärmeleitfähigkeit

Holz ist ein hygroskopisches Material. Die Feuchte der Umgebungsluft bestimmt den Feuchtegehalt des Holzes, und diese Holzfeuchte wiederum ist maßgebend für die Abmessungen des Holzes. Durch diese Eigenschaft kann Holz schwinden, d.h. Feuchtigkeit abgeben und sein Volumen etwas reduzieren, und auch dazu im Gegensatz quellen, Feuchtigkeit aufnehmen und sein Volumen vergrößern. Man spricht davon, dass „Holz arbeitet“ [5], [8], [9], [10].

Holz kann eine gewisse Wassermenge aufnehmen oder abgeben, wenn es hinreichend lange einem konstanten Klima mit bestimmter relativer Luftfeuchte und Lufttemperatur ausgesetzt wird. Für Holz und Holzwerkstoffe wird dieses Feuchtgleichgewicht in Abhängigkeit vom umgebenden Klima experimentell ermittelt. Die Ergebnisse werden in Sorptionsisothermen grafisch dargestellt. Für Holz, cellulosehaltige, pflanzliche und teilweise auch tierische Stoffe ist der Verlauf der Sorptionskurven S-förmig. Die Adsorptions- und Desorptionskurve bilden eine Schleife, die auch als Hysterese der Sorption bezeichnet wird [5], [8], [9], [10].

Bei den konditionierten Proben aus TMP-Faserstoff stellt sich im TMP-Faserstoff eine massebezogene Stofffeuchte von etwa 15 % ein. Ein Unterschied der Wärmeleitfähigkeit zwischen konditioniertem und absolut trockenem TMP-Faserstoff wurde nicht festgestellt. Dies lässt sich dadurch erklären, dass das Wasser vom Feststoff der Faserwände aufgenommen wird und somit der Volumenanteil an Luftporen und Fasern gleich bleibt.

Die Wärmeleitfähigkeit von konventionelle Dämmstoffen aus Mineralfasern ($\lambda = 0,035$ bzw. $0,040$ W/mK) beispielsweise wird durch den Einfluss von Wasser ($\lambda = 0,2$ W/mK) wesentlich schneller erhöht und damit verschlechtert als von Holzfaserdämmstoffen. Mineralfaserdämmstoffe bestehen aus Glaswolle oder Steinwolle. Glaswolle wird im allgemeinen aus circa 60 % Altglas wie Sand, Soda und Kalk hergestellt. Steinwolle besteht aus Gestein wie z.B. Kalkstein,

Diabasgestein, Basalt oder Dolomit. Bei sehr unterschiedlichen Produktionsverfahren der einzelnen Hersteller liegt das Grundprinzip im Einschmelzen der Rohstoffe bei circa 1200 °C bis 1600 °C in einem Schmelzofen, der Zerkleinerung der Schmelze und der nachfolgenden Weiterverarbeitung unter Zugabe von Kunstharzen als Bindemittel. Der Faseranteil beträgt mindestens 90% [11]. Mineralfaserdämmstoffe sind nicht hygroskopisch. Durch Einwirkung von Feuchtigkeit auf diese Materialien, kann Wasser mit einer wesentlich höheren Wärmeleitfähigkeit in die Luftporen dieser Wärmedämmstoffe gelangen und somit die Dämmeigenschaften verschlechtern [7].

Bei dem untersuchten, getrockneten TMP-Faserstoff aus Fichte und Pappel war die Materialdichte signifikant geringer als der konditionierte TMP-Faserstoff. Selbst hier war kein Einfluss auf die Wärmeleitfähigkeit festzustellen.

Einfluss der Materialdichte auf die Wärmeleitfähigkeit

Nach [4] wurden bereits Untersuchungen zur Wärmeleitfähigkeit an TMP-Faserstoff von Fichte vorgenommen. Hier wurden aus der Wechselwirkung von Materialdichte und Wärmeleitfähigkeit für TMP-Faserstoff aus Fichte ein Minimum der Wärmeleitfähigkeit von $\lambda_{10,ir} = 0,039 \text{ W/mK}$ bei einer Materialdichte von 54 kg, atro/m^3 ermittelt. Bei zunehmender bzw. abnehmender Materialdichte steigt die Wärmeleitfähigkeit des TMP-Faserstoffs jeweils an. Offensichtlich war das Material dieser Untersuchungen mit einer geringeren Dichte zu locker in das Zweiplattengerät eingebaut. Der Minimalwert der Wärmeleitfähigkeit wurde bei den Messungen vermutlich noch nicht erreicht.

Die Untersuchungsergebnissen der vorliegenden Studie entsprechen diesen Erkenntnissen (vgl. Bild 26). Bei den 3 Messungen von TMP-Faserstoff einer Holzart mit gleicher Konditionierung wurde jeweils eine ähnliche Materialdichte eingebaut. Dadurch wurden auch bei der Wärmeleitfähigkeit dieser Messreihen nahezu gleiche Werte gemessen. Die Wärmeleitfähigkeit unter Variation der Einbaudichte bei TMP-Faserstoff einer Holzart wurde explizit nicht untersucht.

Beim getrockneten TMP-Faserstoff ist festzustellen, dass die Wärmeleitfähigkeit bei den größten Dichten am geringsten war.

Einfluss der Holzart auf die Wärmeleitfähigkeit

Bei Vollholz unterscheiden sich die einzelnen Holzarten durch unterschiedliche Wärmeleitfähigkeiten, die durch die Zellstruktur des Stoffes stark beeinflusst werden [8], [9]. Nach der Herstellung von TMP-Faserstoff und Einbau des Materials als losen Dämmstoff, ist dieser Einfluss nur noch sehr gering vorhanden. Die Holzart, aus der TMP-Faserstoff hergestellt wird, beeinflusst die Wärmeleitfähigkeit des Stoffes kaum.

TMP-Faserstoff als Wärmedämmstoff

TMP-Faserstoff mit einer Wärmeleitfähigkeit von durchschnittlich 0,040 W/mK ist generell als Wärmedämmstoff geeignet ist. Die Wärmeleitfähigkeiten der Wärmedämmstoffe sind in Wärmeleitfähigkeitsgruppen (WLG) zusammengefasst, um die Anzahl der sich unterscheidenden Werte für die wärmeschutztechnische Berechnung zu begrenzen. In der folgenden Tabelle 3 sind verschieden Wärmeleitfähigkeitsgruppen von Dämmstoffen aus nachwachsenden Rohstoffen und konventionellen Dämmstoffen im Vergleich dargestellt.

▪ *Tabelle 3: Wärmeleitfähigkeitsgruppen von verschiedenen Dämmstoffen nach [7] [1]*

Stoffart	Wärmeleitfähigkeitsgruppe									
	020	025	030	035	040	045	050	055	060	
Dämmstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen										
Holzfasern					•	•	•	•	•	
Holzspäne						•				
Kork						•	•	•		
Hanf					•	•				•
Flachs					•					
Zellulose					•	•				
Schafwolle					•					

Stoffart	Wärmeleitfähigkeitsgruppe									
	020	025	030	035	040	045	050	055	060	
Konventionelle Dämmstoffe										
Phenolharz-Hartschaum			•	•	•	•				
Polystyrol-Hartschaum			•	•	•					
Polyurethan-Hartschaum		•	•	•						
Polyurethan-Ortschaum				•						
Faserdämmstoffe				•	•	•	•			
Schaumglas						•	•	•	•	

5 Zusammenfassung

Im Rahmen dieser Forschungsarbeit wurden die Wärmedämmeigenschaften von TMP-Faserstoff aus Fichte, Kiefer, Buche und Pappel untersucht. Das Ziel war eine Überprüfung der Wechselwirkung Dichte und Wärmeleitfähigkeit in Abhängigkeit von der Holzart mit dem Hintergrund die Dämmeigenschaften von losen Dämmstoffen aus Holz durch den gezielten Einsatz einer Holzart zu optimieren.

Die Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit der Proben aus TMP wurde im Fachgebiet Bauphysik der Technischen Universität Kaiserslautern nach den Vorgaben der DIN 52612 im sogenannten „Zweiplattengerät“ durchgeführt.

Bei der Auswertung der Ergebnisse wurde festgestellt, dass der Einfluss der Konditionierung, der Materialdichte und der Holzart auf die Wärmeleitfähigkeit besonders gering ist. TMP-Faserstoff mit einer Wärmeleitfähigkeit von durchschnittlich $0,040 \text{ W/mK}$ ist generell als Wärmedämmstoff geeignet ist.

Um genauere Aussagen über die Zusammenhänge der physikalischen Eigenschaften von TMP-Faserstoff unterschiedlicher Holzarten zu treffen, ist es notwendig eine höhere Anzahl von Proben zu untersuchen.

Kaiserslautern, 28.02.2004

Prof. Dr. H. Heinrich

Dipl.-Ing. B. Hering

Literatur

- [1] *Heinrich, H.; Hering, B.:* Untersuchung der Verwendung von Holz als Dämmstoff zur Wärme- und Schalldämmung im Baubereich, Abschlussbericht zum Forschungsauftrag der Struktur- und Genehmigungsdirektion Süd, Forschungsanstalt für Waldökologie und Forstwirtschaft Rheinland-Pfalz, Kaiserslautern, 2003
- [2] *Heinrich, H.; Hering, B.:* Holz als Dämmstoff zur Wärme- und Schalldämmung im Baubereich, gi (Heft 5) 2004, S. 245-257
- [3] *Karus, M.; Kaup, M.; Lohmeyer, D.:* Studie zur Markt und Preissituation bei Naturfasern (Deutschland und EU) Gülzower Fachgespräche – Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V., Gülzow, 2000
- [4] *Vogel, K.:* Die Eignung von Holz als Wärmedämmstoff – Vergleichende Untersuchungen von Spänen und Fasern, Dissertation, Ludwig-Maximilians-Universität München, Forstwissenschaftliche Fakultät, Shaker Verlag, 1999
- [5] *Niemz, P.:* Physik des Holzes und der Holzwerkstoffe, Leinfelden-Echterdingen: DRW-Verlag, 1993
- [6] DIN 4108 – 2: Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden , 2003
- [7] *Fischer, H.-M.; Jenisch, R.; Klopfer, H.; Freymuth, H.; Richter, E.; Petzold, K.:* Lehrbuch der Bauphysik, 4. Auflage, Stuttgart: Teubner Verlag, 1997
- [8] *Bruce-Hoadley, R.:* Holz als Werkstoff, Ravensburger Holzwerkstatt, Band 1, Ravensburg: Ravensburger Verlag, 1990
- [9] *Sell, J.:* Eigenschaften und Kenngrößen von Holzarten, Zürich: Baufachverlag, 1997
- [10] *Lohmann, U.:* Holzhandbuch, 2. Auflage, Rosenheim: DRW Verlag, 1982
- [11] *Reyer, E.; Willems, W.; Müller, A.; Flertmann, C.:* Kompendium der Dämmstoffe, Ruhr-Universität Bochum, Lehrstuhl für Baukonstruktionen, Ingenieurholzbau und Bauphysik, Bochum: Fraunhofer IRB Verlag, 1997
- [12] *Natterer, J.; Herzog, T.; Volz, M.:* Holzbau Atlas, Augsburg: Rudolf-Müller-Verlag, 1991

- [13] *Fuehres, M.; Faul, L.*: Bewertung natürlicher, organischer Faserdämmstoffe
Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, 2000
- [14] *Frühwald, A.; Pohlmann, C.M.; Wegener, G.*: Holz – Rohstoff der Zukunft,
nachhaltig verfügbar und umweltgerecht, Informationsdienst Holz, Deutsche
Gesellschaft für Holzforschung e.V., München, 2001
- [15] DIN 52612: Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit mit dem Plattengerät, 1979
- [16] DIN 68755: Holzfaserdämmstoffe für das Bauwesen, 2000
- [17] *Berthold, K.*: Lexikon der Holztechnik, Leipzig: VEB Fachverlag Leipzig, 1990
- [18] *Taurus Daten+Messtechnik GmbH*: Bedienungsanleitung TLP 900-H, Weimar:
1998
- [19] *Schindel, K.*: Die Röntgenmikroanalyse von Lignin als Untersuchungsmethode
für Holz und Holzwerkstoffe, Dissertation, Georg-August-Universität Göttingen,
Fakultät für Forstwissenschaften und Waldökologie, Göttingen, 1998
- [20] *Scheidung, W.*: Untersuchungen zur Wärmeleitfähigkeit von Holzfaserstoff, Holz
als Roh- und Werkstoff, 58 (2000), S.177-181
- [21] *Kollmann, F.; Malmquist, L.*: Über die Wärmeleitzahl von Holz und
Holzwerkstoffen, Holz als Roh- und Werkstoff, 14 (1956), S.201-204
- [22] *Verband Deutscher Papierfabriken, Adenauerallee 55, 53113 Bonn*:
Infobroschüre: Papier machen – Information zu Rohstoffen und
Papierherstellung, 2004

Anhang