



Rheinland-Pfalz

ZENTRALSTELLE DER
FORSTVERWALTUNG

THERMISCHE MODIFIKATION VON TMP-FASERSTOFF



BIRGIT HERING

TECHNISCHE UNIVERSITÄT KAISERSLAUTERN



Landesforsten
Rheinland-Pfalz

Impressum

Herausgeber:

Zentralstelle der Forstverwaltung

Forschungsanstalt für Waldökologie und Forstwirtschaft Rheinland-Pfalz

Hauptstraße 16

D-67705 Trippstadt

Telefon: 0049-6306-911-0, Telefax: 0049-6306-911-200

E-Mail: zdf.fawf@wald-rlp.de

Internet: www.fawf.wald-rlp.de

Verantwortlich:

Verantwortlich im Sinne des Pressegesetzes für den Inhalt sind die Autoren. Aus der Benutzung der Studie können gegenüber der Forschungsanstalt für Waldökologie und Forstwirtschaft Rheinland-Pfalz keine Schadensersatzansprüche geltend gemacht werden. Die Forschungsanstalt ist bemüht, die Studien auf Wahrheit, Inhalte und Herkunft zu prüfen. Sie kann jedoch beispielsweise die Urdaten von Vor-Ort-Erhebungen, gegebenenfalls verwendete Algorithmen und Hintergrundinformationen nicht prüfen.

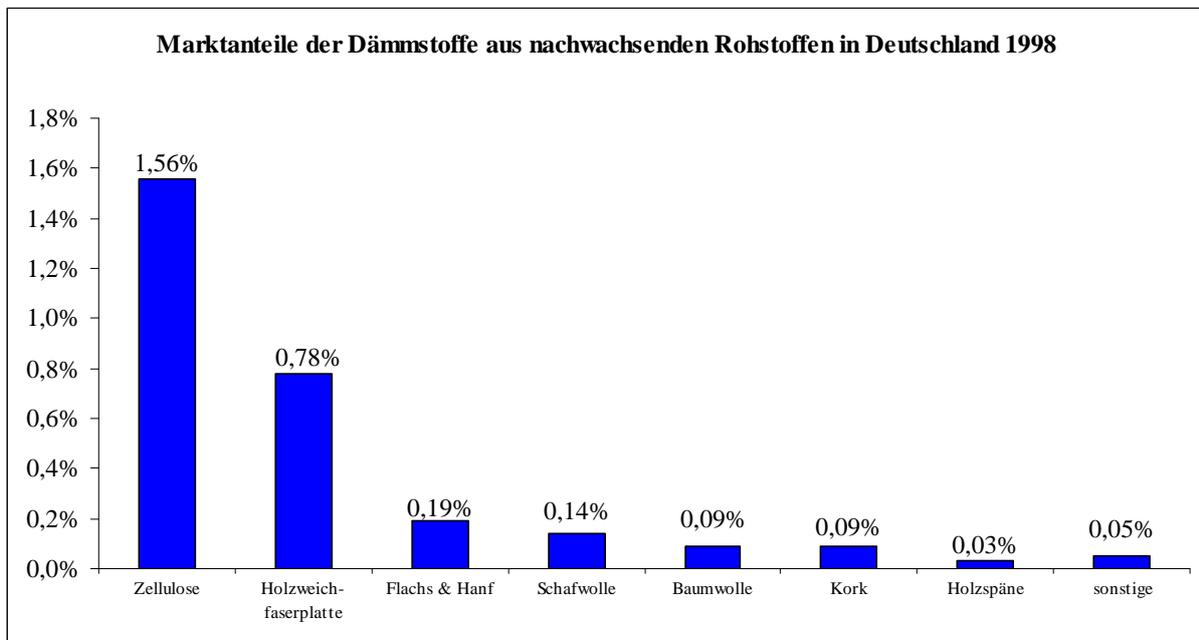
Inhalt

1	Zielsetzung der Forschungsarbeit	4
2	Material und Methoden.....	10
2.1	TMP-Faserstoff.....	10
2.2	Methoden	12
2.2.1	Hitzebehandlung von TMP-Faserstoff	12
2.2.2	Ermittlung der Massenreduktion	16
2.2.3	Ermittlung der Wärmeleitfähigkeit mit dem Zweiplattenverfahren	18
2.2.4	Ermittlung der Materialdichte im Zweiplattengerät	19
2.2.5	Untersuchungen zum Setzungsverhalten.....	20
2.2.6	Statistische Auswertung	21
3	Ergebnisse	22
3.1	Vorversuche	22
3.2	Wärmeleitfähigkeit von unbehandeltem und thermisch modifiziertem TMP-Faserstoff aus Kiefernholz	26
3.3	Setzungsverhalten von unbehandeltem und thermisch modifiziertem TMP-Faserstoff aus Kiefernholz	28
4	Diskussion	30
5	Zusammenfassung	34
6	Literatur.....	36

1 Zielsetzung der Forschungsarbeit

Einsatz von TMP-Faserstoff aus Holz als Wärmedämmstoff

Holz ist im Baubereich der bedeutendste nachwachsende Rohstoff. Es stellt aufgrund seiner Zellstruktur bereits einen natürlichen Dämmstoff dar. Das trockene Holz bildet mit den Zellwänden Poren, die luftgefüllt sind. Deswegen hat Vollholz bereits mit einer Wärmeleitfähigkeit von circa $0,1 \text{ W/(mK)}$ 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] [2]. Wird Holz zu Holzwolle, Holzspänen oder Holzfasern zerkleinert, wirkt sich dies in der Bildung zusätzlicher Lufträume aus. Dies verbessert die Dämmeigenschaften signifikant [3]. Darüber hinaus beseitigt die Verarbeitung die Holzanisotropie, so dass solche Materialien auch in dieser Hinsicht bessere Dämmeigenschaften als der massive Ausgangsstoff besitzen [1].



- **Bild 1: Marktanteile der verschiedenen Dämmstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen [6]**

Holz als Dämmstoff zählt zum Bereich der Dämmstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen. Der Marktanteil dieser Baustoffe im Vergleich zu konventionellen Produkten liegt in Deutschland derzeit bei circa 3% und ist somit noch relativ gering (Bild 1) [27].

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 meist Wärmedämmstoffe für Außenbauteile mit einer Wärmeleitfähigkeit von circa 0,025 W/(mK) bis 0,04 W/(mK) eingebaut [3] [5]. Holzdämmstoffe erreichen in der Regel Wärmeleitfähigkeiten von 0,04 bis 0,06 W/(mK) (Tabelle 1). Im Vergleich zu herkömmlichen Dämmstoffen sind sie dichter und diffusionsoffener (Tabelle 1) [1].

▪ **Tabelle 1: Bauphysikalische Kennwerte für Dämmstoffe aus Holzfasern [3]**

	Holzfasern, lose	Holzfasern 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

Anwendungsbeispiele von Wärmedämmstoffen im Hochbau sind [3]:

- Außenwand
- Holzständerwand
- geneigtes Dach

In allen Anwendungsgebieten lassen sich Dämmstoffe auf Holzbasis einsetzen [44]. Dazu gehört auch Holzstoff [46]. Holzstoff wird mit Hilfe von Steinschlei-

fern erzeugt [7]. 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 [7] [8] [9]. Unabhängig von der Holzart lässt sich TMP-Faserstoff zu Dämmplatten oder als loser Dämmstoff weiterverarbeiten [1] [2].

Lose Schüttungen eignen sich 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 [3].

Nach [8] liegen bauphysikalische Untersuchungen über unterschiedlich aufbereitetes Fichtenholz vor. Es wurde bei TMP im Vergleich zu Hobelspänen, Sägespänen und extrudiertem Holzstoff die geringste Wärmeleitfähigkeit von 0,039 W/mK bei einer mittleren Darrdichte von circa 54 kg/m³ gemessen. TMP kann aufgrund der ermittelten Wärmeleitfähigkeit als Wärmedämmstoff bezeichnet werden [8]. Gegenüber Holzschliff weist TMP einen höheren Faserlangstoffanteil und eine höhere Reißfestigkeit auf. TMP wird hauptsächlich in Zeitungsdruck- und in Feinpapieren eingesetzt [9].

Thermische Holzmodifikation

Der Trend zu natürlichen, umweltfreundlichen Materialien und damit die Vermeidung von Tropenhölzern und Holzschutzmitteln zwingt die Holzindustrie in Europa, neue Wege einzuschlagen. Einer dieser Wege ist die Entwicklung der thermischen Holzmodifikation. Die Vorteile dieser Behandlung sind biologische Resistenz gegenüber holzerstörenden Pilzen oder Insekten, verbesserte Dimensionsstabilität (d. h. modifiziertes Holz arbeitet weniger), geringere Verformung und bei einem Verfahren verbesserte UV-Stabilität [11] [12] [13] [17] [18]. Die thermische Holzmodifikation wird derzeit bei Vollholz für Konstruktionsholz wie beispielsweise Spielplatzgeräte oder bei nicht tragenden Bauelementen wie beispielsweise Fensterrahmen eingesetzt.

Die Hitzevergütung verändert bei Temperaturen über 140 bis 150 °C in einer Inertgasatmosphäre dauerhaft die physikalischen und chemischen Holzeigen-

schaften. Bei diesen Temperaturen hydrolysieren Strukturpolymere wie Hemicellulosen und Lignin in der Zellwand. [11] [12]. Dabei entstehen unter anderem Essigsäure, Methanol, Ameisensäure, Furfurol, Kohlenmonoxid und Kohlendioxid. Die Säuren erniedrigen den pH-Wert des Holzes und beschleunigen die Depolymerisation der Zellwandbestandteile im Holz. Der relative Anteil an Lignin erhöht sich, der Gehalt an Hemicellulose nimmt stark ab und der Cellulosegehalt verringert sich nur leicht [12]. Dies erhöht einerseits die Dauerhaftigkeit und Formstabilität der behandelten Hölzer und lässt sie andererseits versprüden. Je höher die Behandlungstemperaturen sind, umso deutlicher ändern sich die Holzeigenschaften [12].

▪ **Tabelle 2: Wichtige europäische Hitzebehandlungsverfahren [11]**

Verfahrensparameter	Plato-Verfahren (Niederlande)	Thermoholz (Finnland)	Retifikation (Frankreich)	Öl-Hitze-Verfahren (Deutschland)
Temperatur	165 – 185 °C	150 – 240 °C	210 – 240 °C	180-220
Behandlungsdauer	4 – 5 h	0,5 - 4 h	-	2 – 4 h
Gasatmosphäre	Wasserdampf	Wasserdampf	Stickstoff	Bad aus pflanzlichen Ölen
Holzfeuchte vor der Behandlung	waldfrisch bzw. luftgetrocknet	-	circa 12 %	-
Vor- bzw. Nachbehandlung	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 3-5 d Trocknung ▪ 14-16 h Behandlung bei 170-190 °C ▪ 2-3 d Veredelung 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Beheizungsphase ▪ circa 24 h Abkühlung 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ langsames Erhitzen ▪ circa 24 h Abkühlung 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ circa 18 h Aufwärmphase ▪ circa 18 h Abkühlung

Das Prinzip der Strukturveränderung durch thermische Behandlung findet in verschiedenen Verfahren Anwendung (Tabelle 2). Die ersten Veröffentlichungen über Hitzebehandlungsverfahren sind ab 1920 bekannt. Es handelt sich dennoch um eine relativ junge Technik, die in verschiedenen Ländern seit den siebziger Jahren des vergangenen Jahrhunderts unterschiedlich weiterentwickelt wurde

[12]. In den letzten Jahrzehnten hat die Motivation zur Entwicklung eines Verfahrens zum Ersatz von Tropenholz und Holzschutzmitteln gefehlt. Erst durch die Nachfrage nach hitzebehandelten Hölzern zwischen 1990 und 2000 wurde auch die Forschung in diesem Bereich wieder vorangetrieben. Fragestellungen bei der Verfahrensentwicklung waren beispielsweise die Gefahr, dass das Holz ohne abschottendes Gas bei den angewandten Vergütungstemperaturen verbrennt, oder die gleichmäßige Holzerhitzung, ohne die Oberfläche zu verkohlen [11].

Veränderung der Eigenschaften

Eine thermische Modifikation führt beim behandelten Holz zu veränderten Eigenschaften [12] [19] [20]:

- **Mechanische Eigenschaften**

Die Hitzebehandlung verursacht einen Masseverlust des Holzes. Die Härte und das E-Modul des Holzes nehmen aufgrund der Behandlung leicht zu. In der Literatur gibt es verschiedene Angaben zum Einfluss auf die Festigkeitseigenschaften, wie zum Beispiel 0-15 %, 5-25% oder 30-50 % Reduzierung der Festigkeit des Holzes je nach Behandlung. Durch ein bestimmtes Behandlungsverfahren wird allerdings in einer zweiten Behandlungsstufe eine höhere Rohdichte und somit auch eine höhere Festigkeit des Holzes erreicht.

- **Sorptionsverhalten**

Hitzebehandlung bewirkt ein geringeres Sorptionsverhalten und eine Dimensionsstabilisierung des Holzes. Es stellen sich im Vergleich von behandeltem mit unbehandeltem Holz bei gleichem Raumklima geringere Ausgleichsfeuchten ein. Der Fasersättigungspunkt kann auf 12-18 % und das Quell- und Schwindverhalten auf 40-80 % reduziert werden.

- Verhalten gegenüber holzerstörenden Pilzen und Insekten

Hitzebehandeltes Holz besitzt eine erhöhte Resistenz gegenüber holzerstörenden Pilzen und Insekten. In Versuchen wurde hitzebehandeltes Holz mit Pilzsporen und Moderfäulniserregern behandelt. Ein Masseverlust des Holzes von weniger als 3 % wurde festgestellt. Ein Wachstum der Pilze war nicht vorhanden. Von GIEBELER wurden Versuche mit Hausbockkäferlarven durchgeführt und festgestellt, dass sich die Larven in hitzebehandeltem Holz nicht entwickeln konnten und abstarben.

- Wärmeleitfähigkeit

Die Hitzevergütung verbessert die Dämmeigenschaften von Vollholz [30] [31]. So nahm die Wärmeleitfähigkeit von Kiefernholz, das bei ca. 210 °C vergütet wurde, gegenüber unbehandelten Kontrollen um 17 % ab [19]. Die Wärmeleitfähigkeit hängt dabei von der Materialdichte ab [19]. Daneben könnte auch die Ausgleichsholzfeuchte einen Einfluss auf die Wärmeleitfähigkeit ausüben [29].

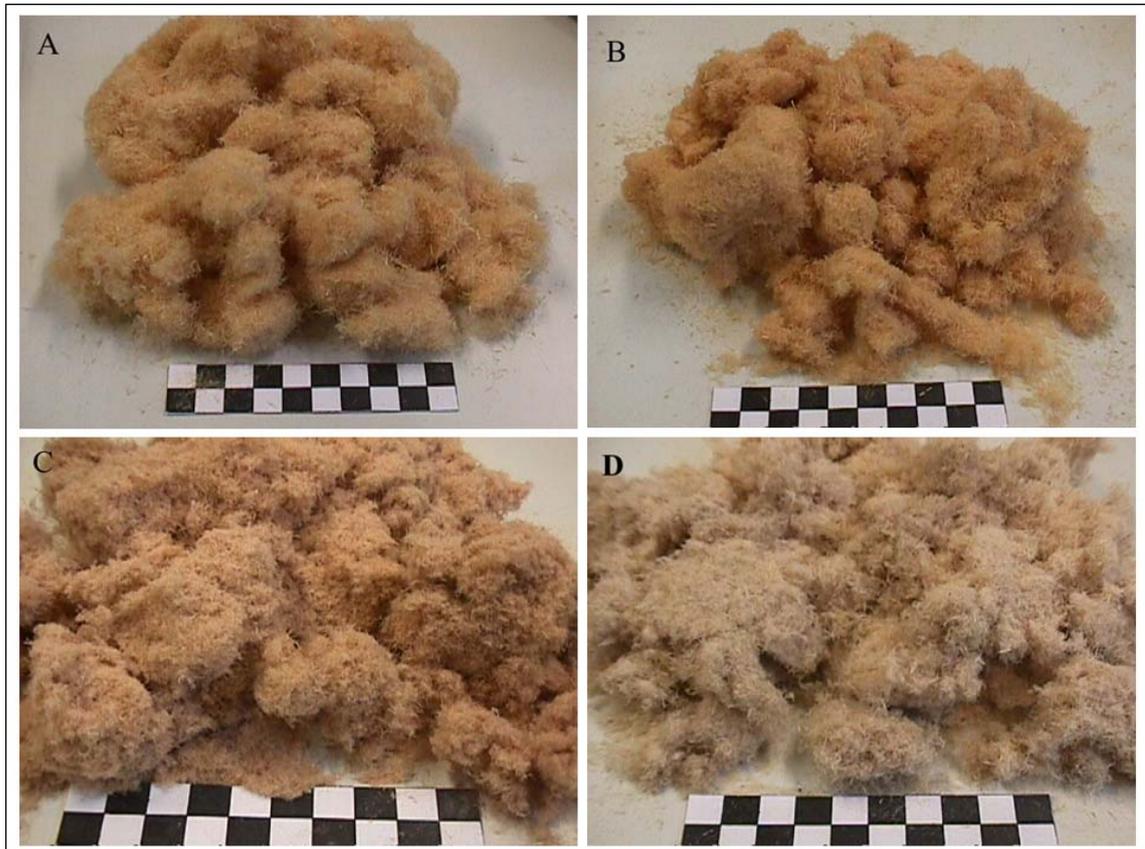
Zielsetzung der Forschungsarbeit

Hitzevergütetes Vollholz weist bessere Wärmedämmeigenschaften als ansonsten identisches unbehandeltes Holz auf [19] [29] [31]. Ob auch TMP-Faserstoff eine weitere Verbesserung durch thermische Behandlung erfährt, ist bisher noch nicht bekannt, aber für mögliche Anwendungen zur Verbesserung von Wärmedämmstoffen sehr interessant. Deshalb wurde in der durchgeführten Studie die Veränderung der Rohdichte von thermisch behandeltem TMP-Faserstoff aus verschiedenen Holzarten (Fichte, Kiefer, Buche und Pappel) genauer betrachtet. Weiterhin wurde an thermisch behandeltem TMP-Faserstoff aus Kiefer die Wärmeleitfähigkeit gemessen und das Setzungsverhalten, welches für die praktische Anwendung als Wärmedämmstoff ein wichtiger Faktor ist, untersucht.

2 Material und Methoden

2.1 TMP-Faserstoff

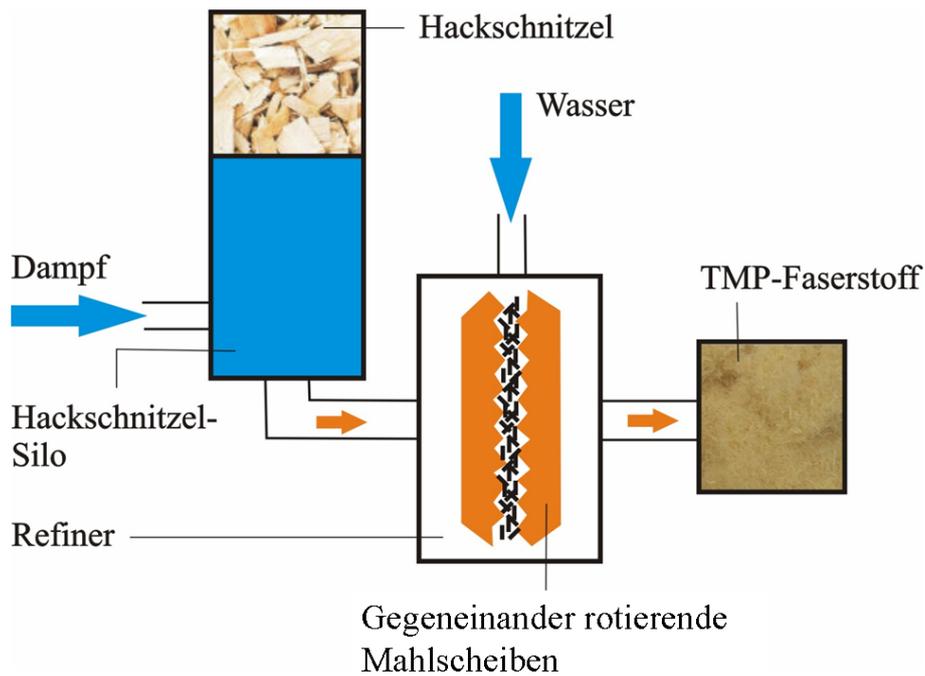
Der zu untersuchende TMP-Faserstoff wurde aus vier unterschiedlichen, heimischen Holzarten (Bild 2) hergestellt. Gewählt wurden zwei häufig vorkommende Nadelholzarten, Fichte und Kiefer, und zwei Laubholzarten, Buche und Pappel. Das Holz wurde als Vollholz bei der Holzhandlung Wickert GmbH & Co. in Landau gekauft. Über seine Herkunft liegen keine genaueren Angaben vor.



- **Bild 2: TMP-Faserstoff aus vier unterschiedlichen Holzarten – Fichte (A), Kiefer (B), Buche (C) und Pappel (D)**

Aus entrindeten Brettern der unterschiedlichen Holzarten wurden Hackschnitzel in einem Trommelhacker hergestellt, die das Ausgangsmaterial beim

thermomechanischen Refinerverfahren* bilden (Bild 3). 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 [9]. Aus 10 bis 12 kg Vollholz mit einer Darrdichte von 500 bis 600 kg/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 3: Schema der thermomechanischen Holzstoffherstellung [9]**

Der TMP der unterschiedlichen Holzarten wurde vor der thermischen Modifikation bzw. der Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit bei 105 °C bis zur Gewichtskonstanz im Wärmeschrank getrocknet.

* Der TMP wurde am Wilhelm-Klauditz-Institut für Holzforschung in Braunschweig hergestellt.

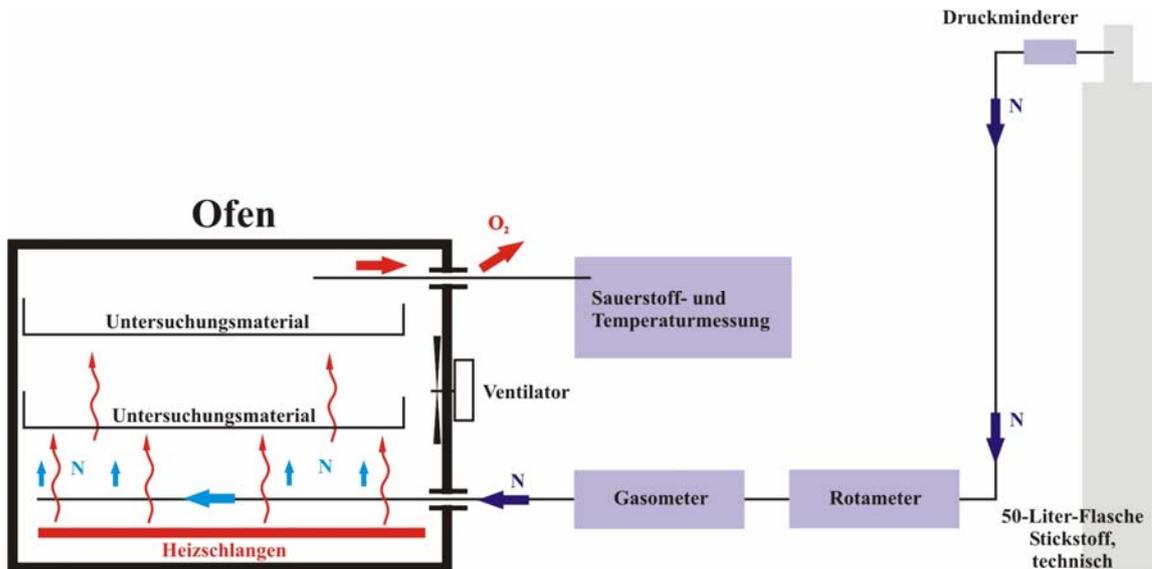
2.2 Methoden

Da zur Messung der Wärmeleitfähigkeit größere Materialproben mit einer Abmessung von 500 x 500 x 50 mm erforderlich sind (vgl. Kap. 2.2.3), wurden in Vorversuchen mit kleineren Proben unterschiedliche Behandlungstemperaturen und -zeiten zur Reduzierung der Rohdichte des Holzes durch die Hitzebehandlung untersucht.

2.2.1 Hitzebehandlung von TMP-Faserstoff

Im Rahmen dieser Forschungsarbeit wurde TMP-Faserstoff aus Fichten-, Kiefern-, Buchen- und Pappelholz thermisch behandelt. Die Zellwandbestandteile der Holzfasern wurden bei erhöhten Temperaturen über 150°C chemisch verändert. Die Behandlung wurde angelehnt an das französische Verfahren der Retifikation in einem Ofen mit Stickstoffatmosphäre vorgenommen [15].

Im Temperaturbereich der Hitzevergütung könnte sich der Faserstoff in einer Atmosphäre mit mehr als 2 Vol.-% Sauerstoff spontan entzünden. Um dies zu verhindern, wurde der Ofen zu Behandlungsbeginn mit Stickstoff geflutet. Auf diese Weise wurde die Sauerstoffkonzentration in der Ofenluft auf Werte von unter 2 % abgesenkt, so dass der Faserstoff nicht verbrennen konnte. Für die Inertisierung wurde technischer Stickstoff mit einem Stickstoffgehalt von mehr als 99,8 % und Restanteilen Sauerstoff, Argon und Wasser verwendet. Um den Sauerstoffgehalt im Ofen mit einer Anfangskonzentration von circa 21 % auf eine Endkonzentration von ≤ 2 % zu senken, wurde eine Spüldauer von 30 Minuten als Berechnungsgrundlage angesetzt. Daraus ergab sich für das Rotameter eine Grundeinstellung von 600 l/h bezogen auf das Ofenvolumen von 0,125 m³.



▪ **Bild 4: Schema des Laboraufbaus zur thermischen Modifikation von TMP-Faserstoff**

Die Proben wurden in mit Aluminiumfolie umwickelte Drahtkörbchen von circa 100 x 100 x 50 mm behandelt. Für die Hitzevergütung wurde darrtrockener TMP-Faserstoff verwendet. Der Faserstoff wurde zu diesem Zweck bei 105 °C auf Gewichtskonstanz getrocknet. Zur Vergütung diente in der vorliegenden Arbeit ein Heraeus UT 6060-Wärmeschrank (Kendro Laboratory Products GmbH, Langenselbold) (Bild 4). Die Stickstoffzufuhr wurde an der unteren Öffnung des Ofens mit Kupferrohren angebracht (Bild 5). Die Kupferrohre wurden im Ofen an der Innenwand direkt über dem Boden geführt und durchlöchert, so dass der Stickstoff gleichmäßig in den Ofen strömen konnte. Über ein Gasometer und ein Rotameter (Bild 6) wurde die Zufuhr des Stickstoffs aus einer 50-Liter-Flasche mit Druckminderer geregelt und kontrolliert. An der oberen Öffnung des Ofens wurden der Sauerstoffgehalt und die Temperatur mit einer rbr-ecom-Sgplus-Messsonde mit Emissionsanalysesystem (rbr Computertechnik GmbH, Iserlohn) überwacht (Bild 5 und 6),

Nach der Klimatisierung der Proben bei 105 °C im Wärmeschrank wurde der Ofen 30 min lang bis zur Behandlungstemperatur aufgeheizt. Das Material wurde über definierte Zeiten hin den konstanten Behandlungstemperaturen ausgesetzt. Danach kühlte der Ofen 30 min lang ab, bevor die Proben entnommen wurden

(Bild 7). Der Wärmeschrank blieb während der gesamten Vergütung stickstoffgeflutet.

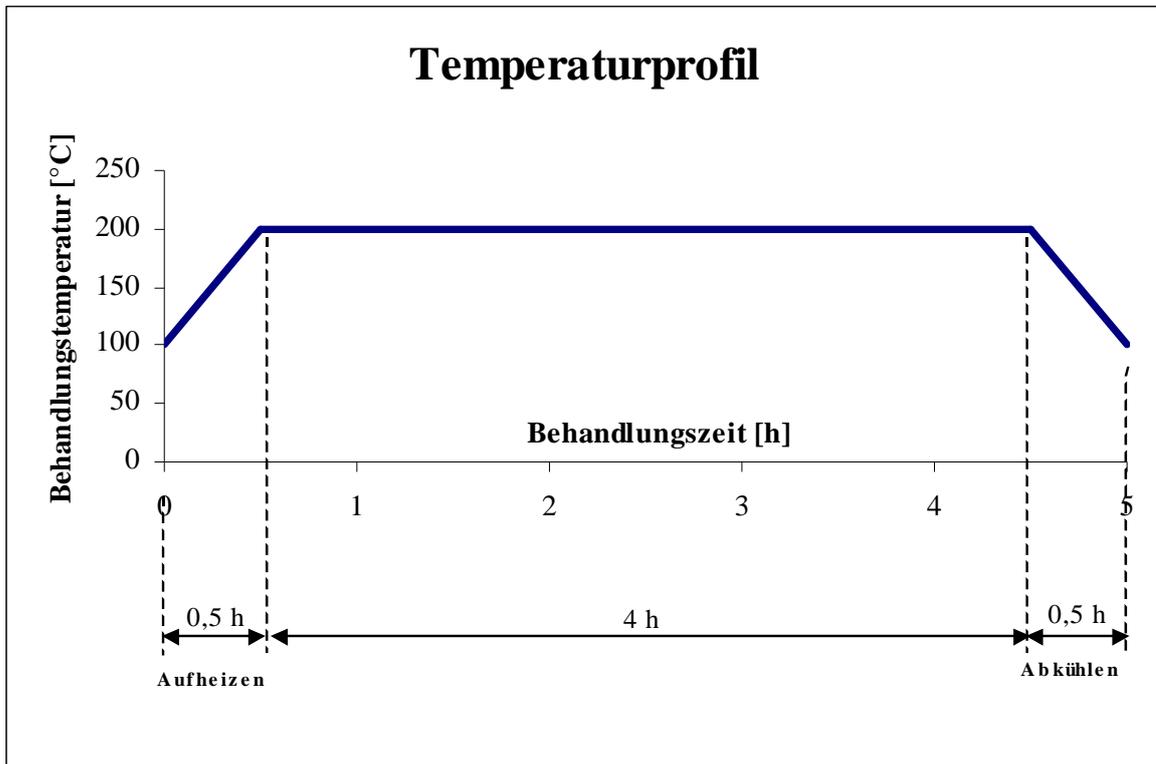


- **Bild 5:** links: Ofen, geöffnet, von vorne; rechts: Ofen von hinten mit Messsonde und Stickstoffzufuhr



- **Bild 6:** links: Sauerstoff- und Temperaturmessgerät; rechts: Gasometer und Rotameter

In der ersten Messreihe wurde die Behandlungstemperatur der thermischen Modifikation zwischen 150 und 250 °C in jeweils 10-Kelvin-Schritten bei konstanter Behandlungszeit von 4 Stunden variiert. Pro Behandlungstemperatur wurden drei Proben je Holzart thermisch modifiziert.

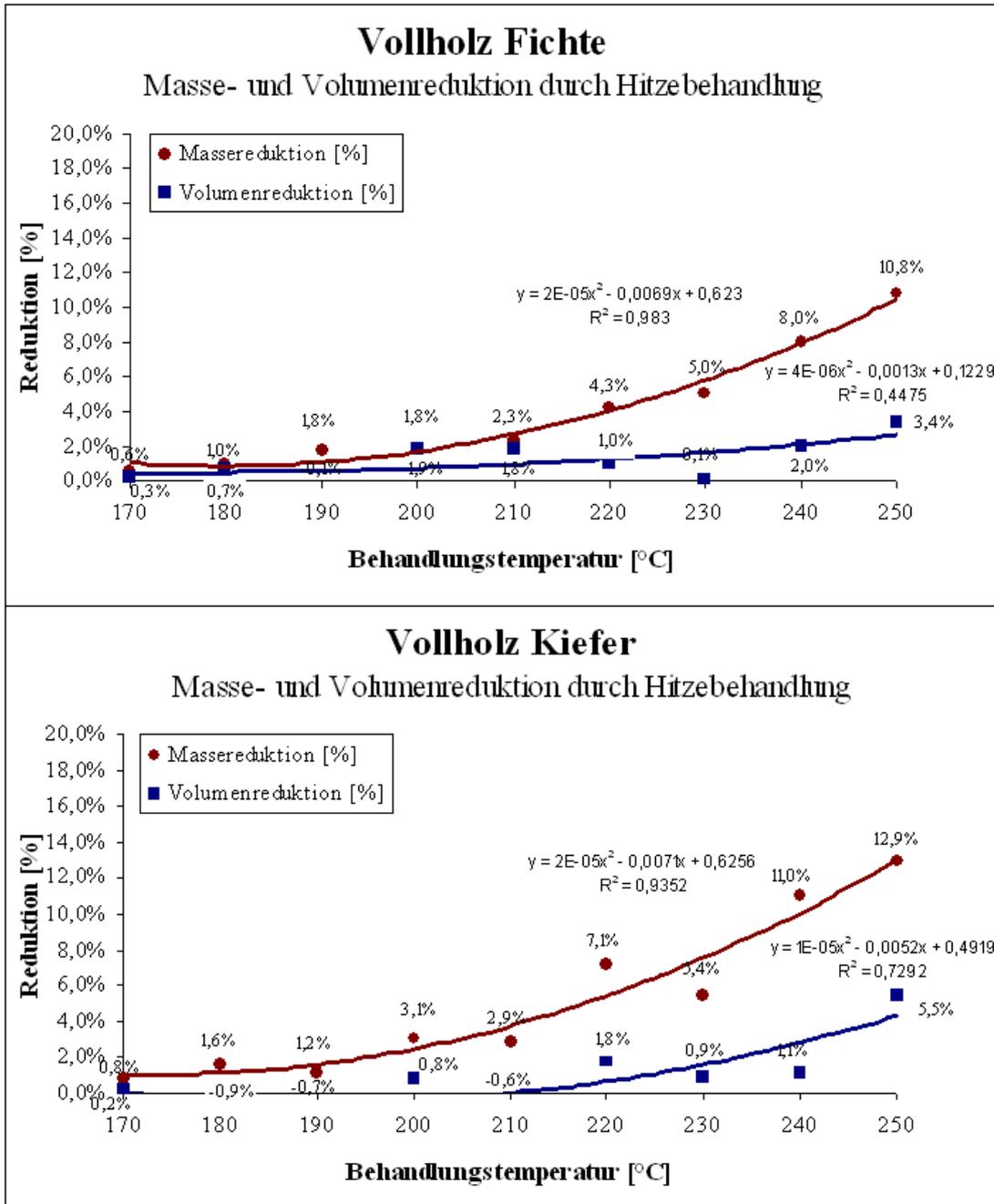


▪ **Bild 7: Temperaturprofil bei der thermischen Modifizierung**

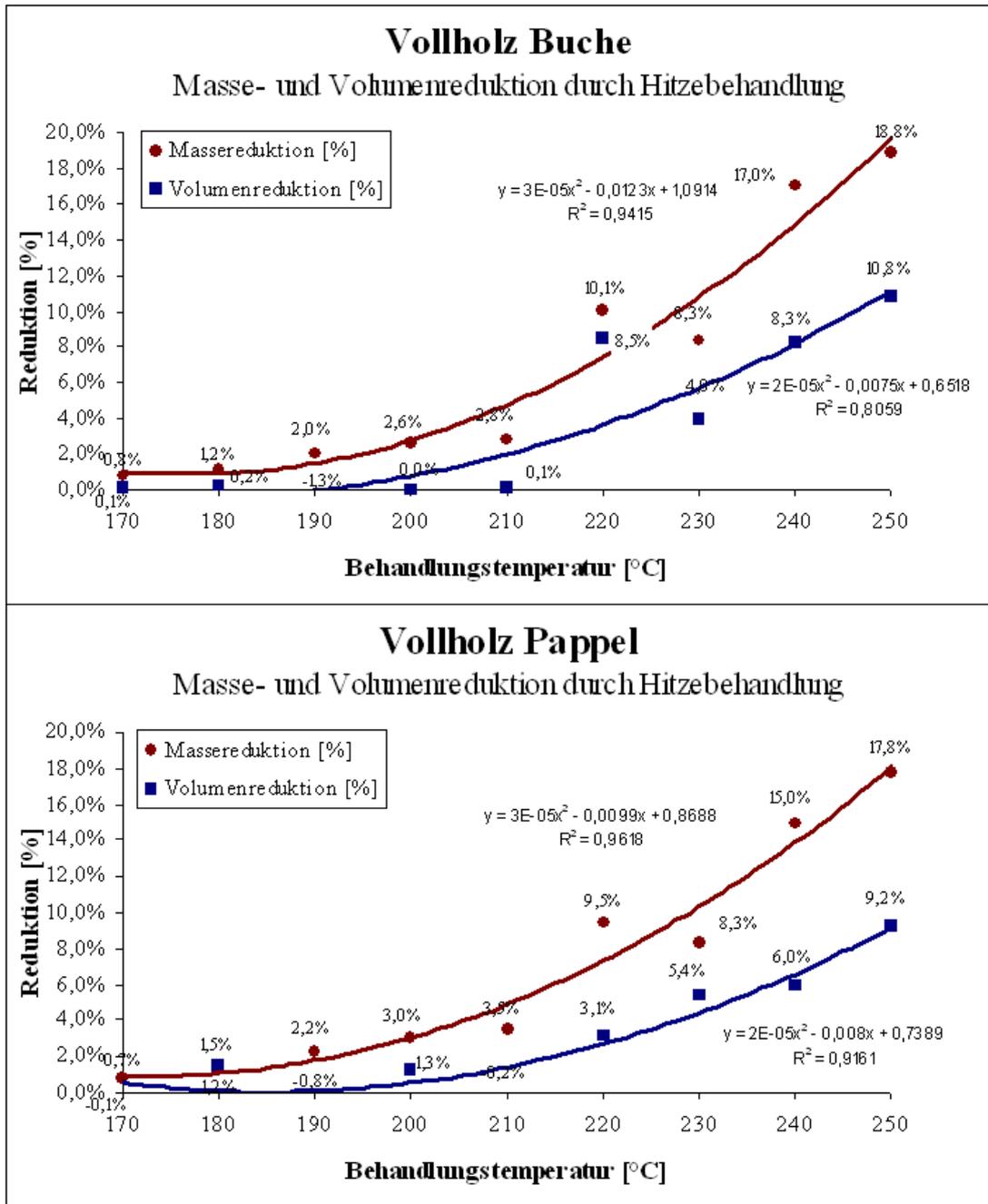
In der zweiten Messreihe wurde die Behandlungszeit bei einer konstanten Behandlungstemperatur von 200 °C variiert. Es wurden jeweils Hitzebehandlungen über 4, 8 und 12 Stunden durchgeführt. Pro Behandlungszeit werden drei Proben je Holzart thermisch modifiziert.

2.2.2 Ermittlung der Massenreduktion

In Vorversuchen mit thermisch modifiziertem Vollholz wurde festgestellt, dass die Reduktion der Rohdichte wesentlich von der Änderung der Masse und weniger von der Änderung des Volumens beeinflusst wird (Bild 8).



▪ Bild 8: Masse- und Volumenreduktion durch thermische Modifikation von Vollholz unterschiedlicher Holzarten (Teil 1)



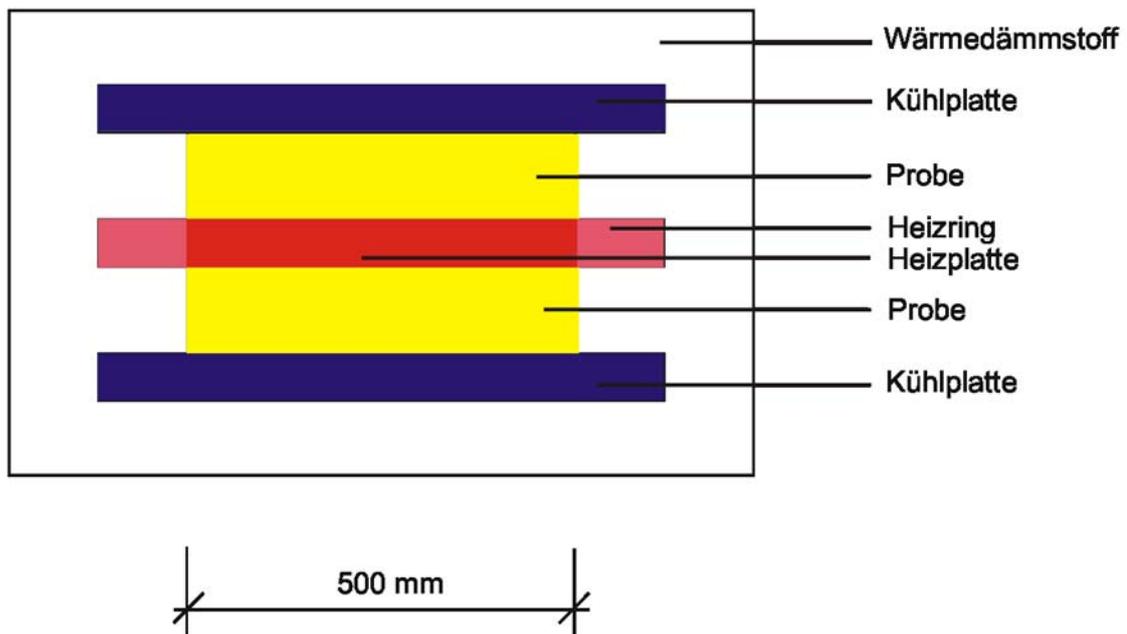
▪ **Bild 8: Masse- und Volumenreduktion durch thermische Modifikation von Vollholz unterschiedlicher Holzarten (Teil 1)**

Dementsprechend beschränkte sich die vorliegende Untersuchung darauf, die Massereduktion der Proben zu bestimmen, um auf die Dichte zu schließen. Als Grundlage hierzu wurde die Dichte des unbehandelten Faserstoffs holzartenweise aus Masse und Volumen hergeleitet. Zu diesem Zweck wurde das Probenmaterial lose in die Probenschalen eingestreut. Die Einbauhöhe entsprach jeweils der Höhe der Schälchen. Vor und nach der thermischen Modifizierung wurde jede

Probe auf 0,1 g genau gewogen. Aus den gemessenen Werten wurde die Massereduktion durch die thermische Modifikation berechnet.

2.2.3 Ermittlung der Wärmeleitfähigkeit mit dem Zweiplattenverfahren

Die Wärmeleitfähigkeit von thermisch modifiziertem TMP-Faserstoff aus Kiefernholz wurde im Zweiplattengerät nach DIN 52612 gemessen [21] [26].



▪ **Bild 9: Schematische Darstellung vom Zweiplattenverfahren**

Dabei werden zwei nach Material und Abmessungen möglichst identische Proben zwischen zwei Kühlplatten (oben und unten) und eine elektrische Heizplatte in der Mitte (Bild 9) 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.

Für die vorliegenden Untersuchungen wurden 500 x 500 mm – Proben variabler Dicke in einer TLP 900 – H – Messanlage (TAURUS Daten- und Messtechnik GmbH, Weimar) auf ihre Wärmeleitfähigkeit hin untersucht. Die Oberflächentemperaturen der Kühl- und Heizplatte wurden auf 0,01 °C genau gemessen. Die Wärmeleitfähigkeit wurde bei Probenmitteltemperaturen von 5, 15 und 25 °C für Temperaturdifferenzen von 10 K ermittelt. Die Messungen begannen, wenn die Probenmitteltemperatur jeweils konstante Werte angenommen hatte. Jede Messung dauerte circa 8 h und wurde dreifach wiederholt.



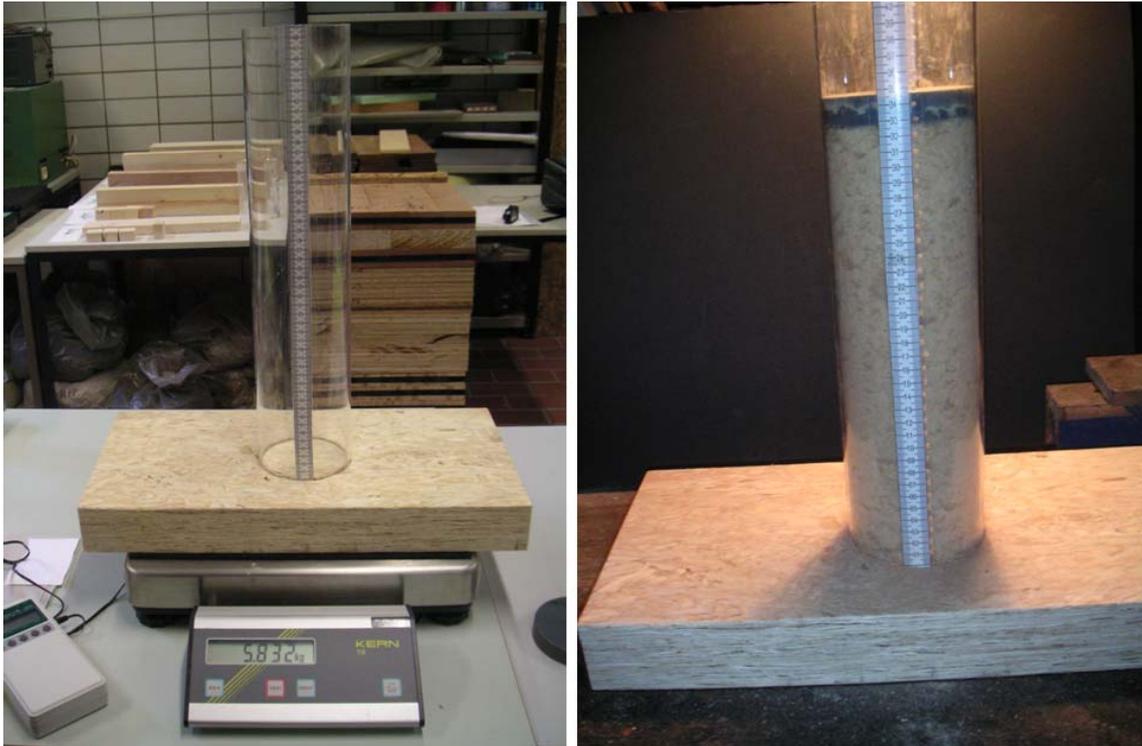
▪ **Bild 10: Eingebaute obere Probe mit aufgelegter Thermoelementfolie**

2.2.4 Ermittlung der Materialdichte im Zweiplattengerät

Das Probenmaterial wurde lose in die Polystyrolschutzringe des Zweiplattengerätes eingestreut. Die Einbauhöhe entsprach jeweils der Höhe des Probenschutzrings. Das Probenvolumen wurde aus dem Mittelwert der gemessenen Dicke der vier Eckpunkte und der Grundfläche mit 500 x 500 mm 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.

2.2.5 Untersuchungen zum Setzungsverhalten

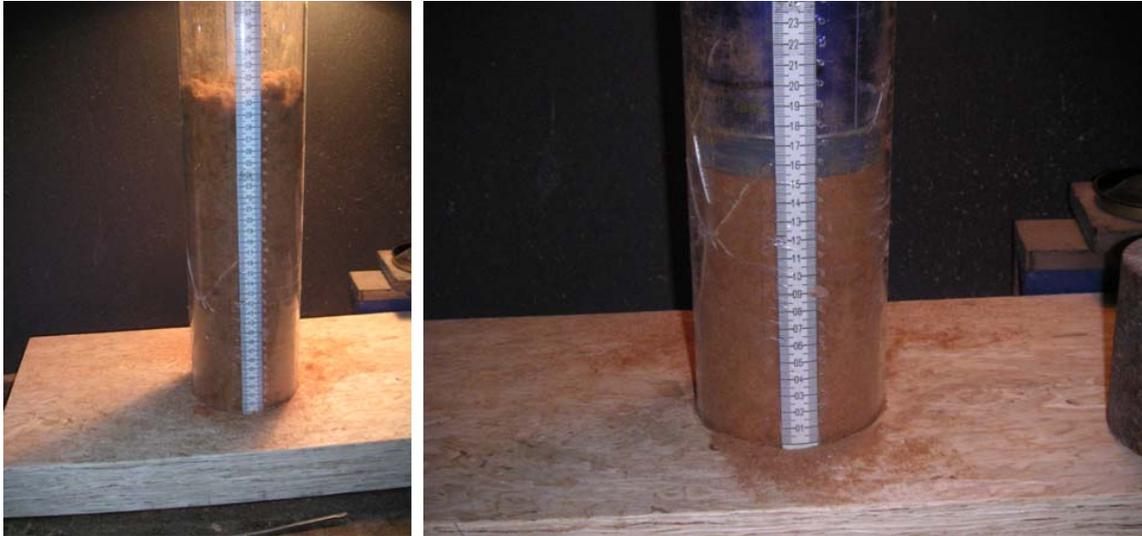
Im Rahmen diese Forschungsvorhabens wurde das Setzungsverhalten von unbehandeltem und thermisch modifiziertem TMP-Faserstoff aus Kiefernholz im Vergleich untersucht. Dies ist für die praktische Anwendung als Wärmedämmstoff ein wichtiger Faktor.



- **Bild 11: Schnellprüfverfahren des Setzungsverhaltens von TMP-Faserstoff, links: Plexiglasrohr, ungefüllt; rechts: Plexiglasrohr, gefüllt**

In einem Schnellprüfverfahren wurde durch die Auflage einer definierten Masse auf den TMP-Faserstoff das Verhalten von unbehandeltem und thermisch modifiziertem (8h, 200 °C) TMP-Faserstoff verglichen. Hierzu wurde ein Plexiglasrohr auf einer Holzplatte senkrecht aufgestellt und befestigt und an zwei gegenüberliegenden Seiten mit je einer Messskala (in mm) beklebt (Bild 11). 100g TMP-Faserstoff wurde lose in das Plexiglasrohr eingestreut, die Oberseite geebnet und die Höhe der Oberseite des TMP-Faserstoffs an der Messskala abgelesen (Bild 11). Danach wurde eine bündig an die innere Wand des Plexiglasrohres anschließende Gewichtsplatte aufgesetzt und erneut an der Messskala die Höhe des eingefüllten TMP-Faserstoffs abgelesen (Bild 11 und

12). Die auf die Gewichtsplatte aufgelegte Masse wurde weiter erhöht und jeweils die Höhe des TMP-Faserstoffs an der Messskala abgelesen. Es wurden jeweils drei Messungen durchgeführt.



- *Bild 12: Schnellprüfverfahren des Setzungsverhaltens von TMP-Faserstoff, links: TMP-Faserstoff, lose eingestreut; rechts: TMP-Faserstoff im Plexiglasrohr mit aufgesetzter Gewichtsplatte*

2.2.6 Statistische Auswertung

Mit den drei Wiederholungen jeder Messung wurden Mittelwert und Standardabweichung berechnet. Die Einflüsse von Baumart oder Materialzustand wurden mittels einfaktorieller Varianz- und Regressionsanalysen untersucht. Homogene Gruppen wurden mittels Scheffés multipler Kontraste analysiert. Die homogenen Gruppen sind in den Abbildungen des Ergebnisteils mit einheitlichen Indizes gekennzeichnet. Beschreibende Statistik, Varianzanalysen und Scheffés multiple Kontraste wurden in einem Microsoft Excel-Sheet berechnet.

3 Ergebnisse

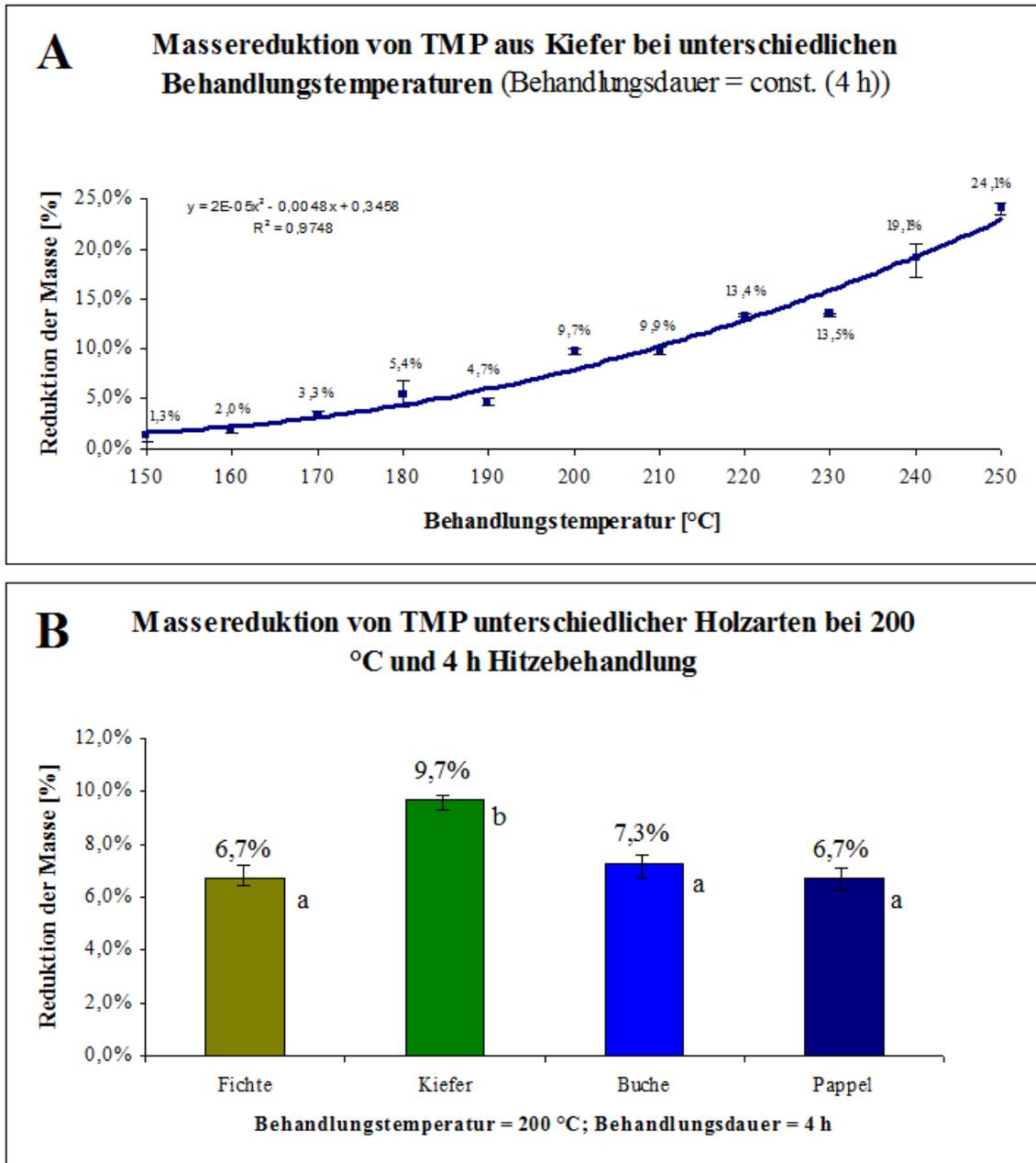
3.1 Vorversuche

Unterschiedliche Behandlungstemperaturen bei konstanter Behandlungsdauer:

Die holzartenbedingten Unterschiede der Massereduktion von TMP-Faserstoff wurden anhand der bei 105 °C getrockneten Proben aus Fichte, Kiefer, Buche und Pappel an jeweils drei Proben untersucht. In der ersten Messreihe wurden unterschiedliche Behandlungstemperaturen bei konstanter Behandlungsdauer untersucht (siehe 2.2.1).

Je heißer der TMP-Faserstoff vergütet wurde, umso mehr verlor er an Masse. Beispielsweise reduzierte bereits eine Behandlungstemperatur von 150 °C die Masse von Kiefern-TMP gegenüber lediglich darrgetrockneten Kontrollen um durchschnittlich $1,3 \% \pm 0,53 \%$. Bei der höchsten Behandlungstemperatur von 250 °C wurde sogar eine Massereduktion von $24,1 \% \pm 2,41 \%$ gemessen (Bild 13, A).

Die Proben der vier Holzarten unterschieden sich hinsichtlich der Massereduktion signifikant voneinander (Bild 13, B). Die Massereduktion von TMP-Faserstoff aus Kiefer war mit $9,7 \% \pm 3,70 \%$ deutlich höher als beim TMP-Faserstoff der anderen Holzarten. TMP-Faserstoff aus Fichte, Buche und Pappel ist hinsichtlich der Massereduktion mit $6,7 \% \pm 0,47 \%$, $7,3 \% \pm 0,58 \%$ bzw. $6,7 \% \pm 0,45 \%$ einander ähnlich (Bild 13, B). Der Unterschied zwischen Kiefer und den restlichen Holzarten liegt bei 2,4 bis 3 %.



- **Bild 13: Massereduktion bei unterschiedlichen Behandlungstemperaturen**

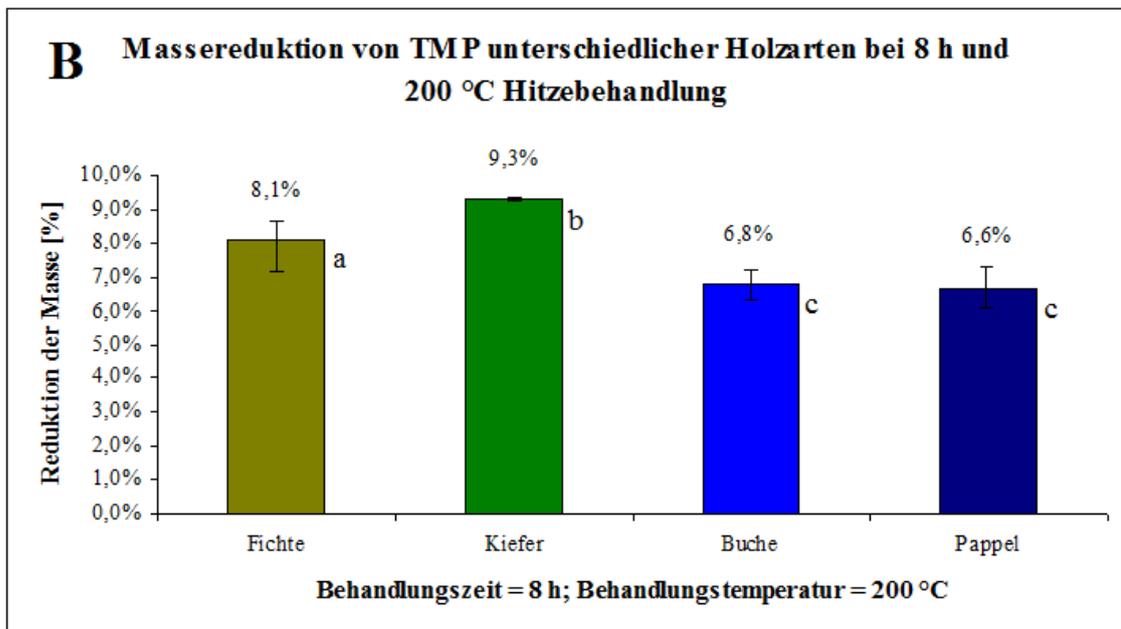
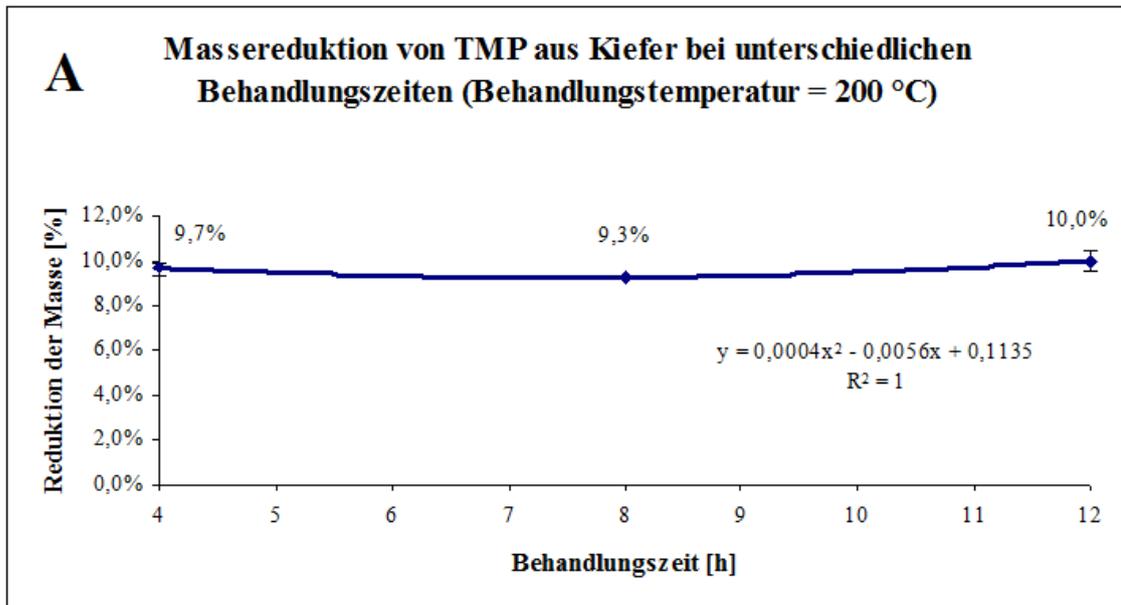
Unterschiedliche Behandlungszeiten bei konstanter Behandlungstemperatur:

Die holzartenbedingten Unterschiede der Massereduktion von TMP-Faserstoff wurden auch in der zweiten Messreihe anhand der bei 105 °C getrockneten Proben aus Fichte, Kiefer, Buche und Pappel an jeweils drei Proben untersucht.

In der zweite Messreihe wurden unterschiedliche Behandlungszeiten bei konstanter Behandlungstemperatur untersucht (siehe 2.2.1).

Die Proben unterschieden sich hinsichtlich der Massereduktion holzartenspezifisch signifikant voneinander (Bild 14, B). Die Massereduktion von TMP-Faserstoff aus Kiefer war mit $9,3 \% \pm 0,07 \%$ deutlich höher als beim TMP-Faserstoff der anderen Holzarten. TMP-Faserstoffe aus Buche und Pappel sind hinsichtlich der Massereduktion mit $6,8 \% \pm 0,44 \%$ bzw. $6,6 \% \pm 0,68 \%$ einander ähnlich (Bild 14, B). Der Unterschied zwischen Kiefer und Buche bzw. Pappel liegt bei $2,5 \%$ bzw. $2,7 \%$. Fichte liegt mit einer Massereduktion von $8,1 \% \pm 0,55 \%$ zwischen den genannten Holzarten.

Der Einfluss der Behandlungsdauer ist sehr gering. Mit zunehmender Behandlungsdauer reduziert sich die Masse des Faserstoffs nicht gleichmäßig. Beispielsweise hat sich die Masse von Kiefern-TMP nach 4 h um $9,7 \% \pm 0,36 \%$ verringert, während sie selbst nach 8 h Behandlung um lediglich $9,3 \% \pm 0,07 \%$ abgenommen hat (Bild 14, A).



▪ **Bild 14: Massereduktion bei unterschiedlichen Behandlungszeiten**

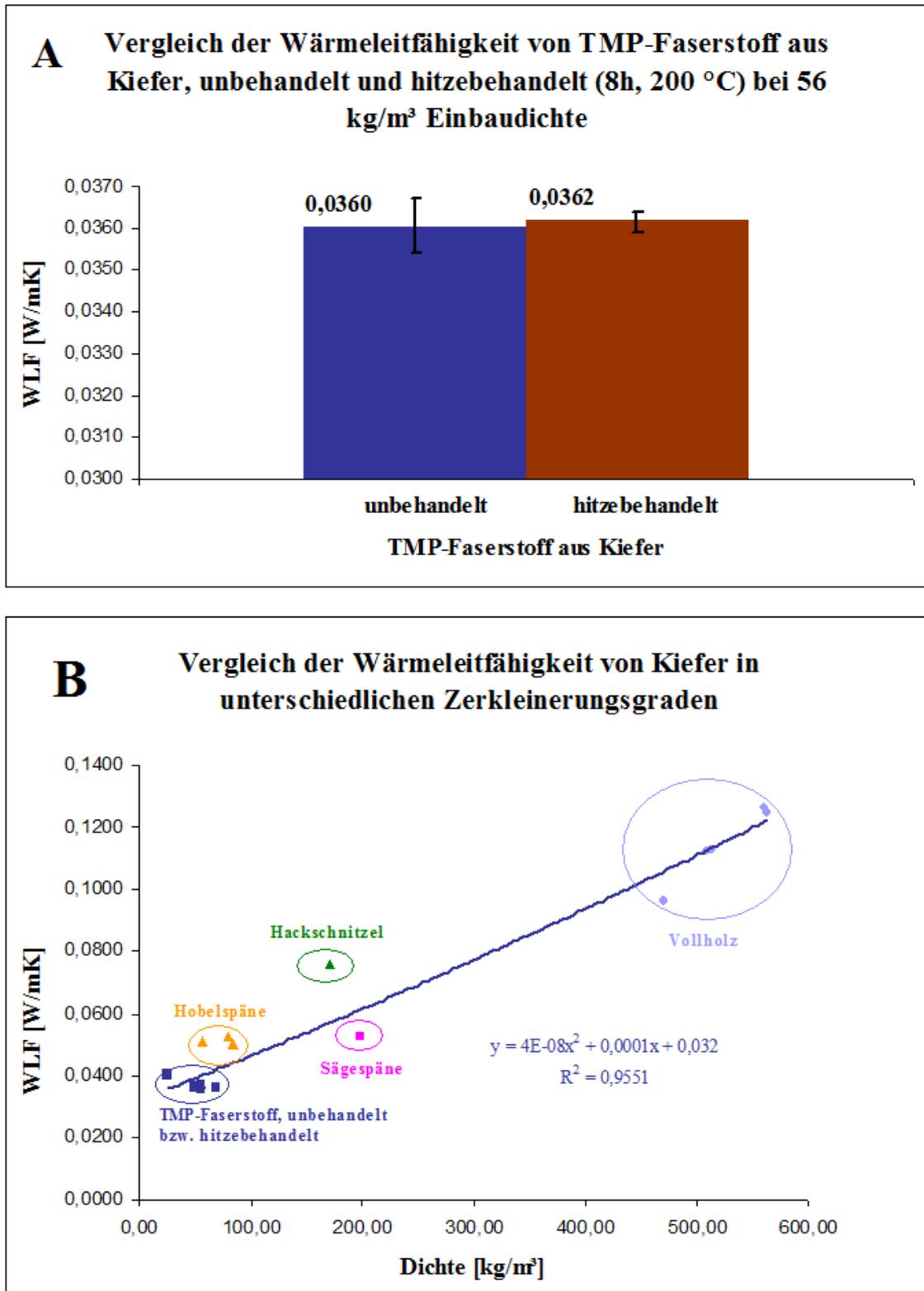
3.2 Wärmeleitfähigkeit von unbehandeltem und thermisch modifiziertem TMP-Faserstoff aus Kiefernholz

Neben der Ermittlung der Massereduktion bei hitzebehandeltem TMP-Faserstoff unterschiedlicher Holzarten wurde die Wärmeleitfähigkeit von unbehandeltem und hitzebehandeltem TMP-Faserstoff Holzarten gemessen. Die Proben wurden im Wärmeschrank bei 105 °C bis zur Gewichtskonstanz getrocknet und wie in Kap. 2.2.3 beschrieben untersucht.

Der bei 200 °C über 8 h hitzebehandelte TMP-Faserstoff weist bei den Vorversuchen eine Massereduktion von 9,3 % \pm 0,07 % auf (vgl. Kap. 3.1). Dies lässt auf eine Reduktion der Rohdichte und der Wärmeleitfähigkeit schließen.

Beim Vergleich der Wärmeleitfähigkeit von unbehandeltem bzw. hitzebehandeltem TMP-Faserstoff aus Kiefer bei gleichen Einbaudichten wurden jedoch keine signifikanten Unterschiede festgestellt (Bild 15 A). Die Werte liegen für unbehandeltes Material bei 0,0360 W/mK \pm 1,88 % bzw. für hitzebehandeltes Material bei 0,0362 W/mK \pm 0,77 %.

Bild 15 B zeigt einen Vergleich der Wärmeleitfähigkeit von Kiefer in unterschiedlichen Zerkleinerungsgraden. Hier liegt sowohl unbehandelter als auch behandelte TMP-Faserstoff im niedrigsten Messbereich bei circa 50 kg/m³ mit einer Wärmeleitfähigkeit von circa 0,040 W/mK.



- *Bild 15: Wärmeleitfähigkeit von TMP-Faserstoff, unbehandelt und hitzebehandelt (A) im Vergleich und verglichen mit anderen Zerkleinerungsgraden (B)*

3.3 Setzungsverhalten von unbehandeltem und thermisch modifiziertem TMP-Faserstoff aus Kiefernholz

Nach Kap. 2.2.5 wurde in einem Schnellprüfverfahren über eine statische Betrachtung das Setzungsverhalten von unbehandeltem und hitzebehandeltem TMP-Faserstoff aus Kiefer verglichen. Die Proben unterscheiden sich hinsichtlich ihres Setzungsverhaltens ab einer Belastung von circa 4 kN/m² signifikant voneinander. Je höher die Belastung, desto größer wird auch der Unterschied im Setzungsverhalten. Bei gleicher Belastung von 7,73 kN/m² stellt sich bei unbehandeltem TMP-Faserstoff eine Dichte von 78,71 kg/m³ ± 0,29 % ein, bei hitzebehandeltem TMP-Faserstoff eine Dichte von 74,78 kg/m³ ± 12,24 %, die deutlich geringer ist als beim unbehandelten TMP-Faserstoff. Die Abweichung liegt hier bei 5,25 % (Bild 16). Nach der Kompression blieb der hitzevergütete TMP-Faserstoff darüber hinaus in seiner Form. (Bild 17).

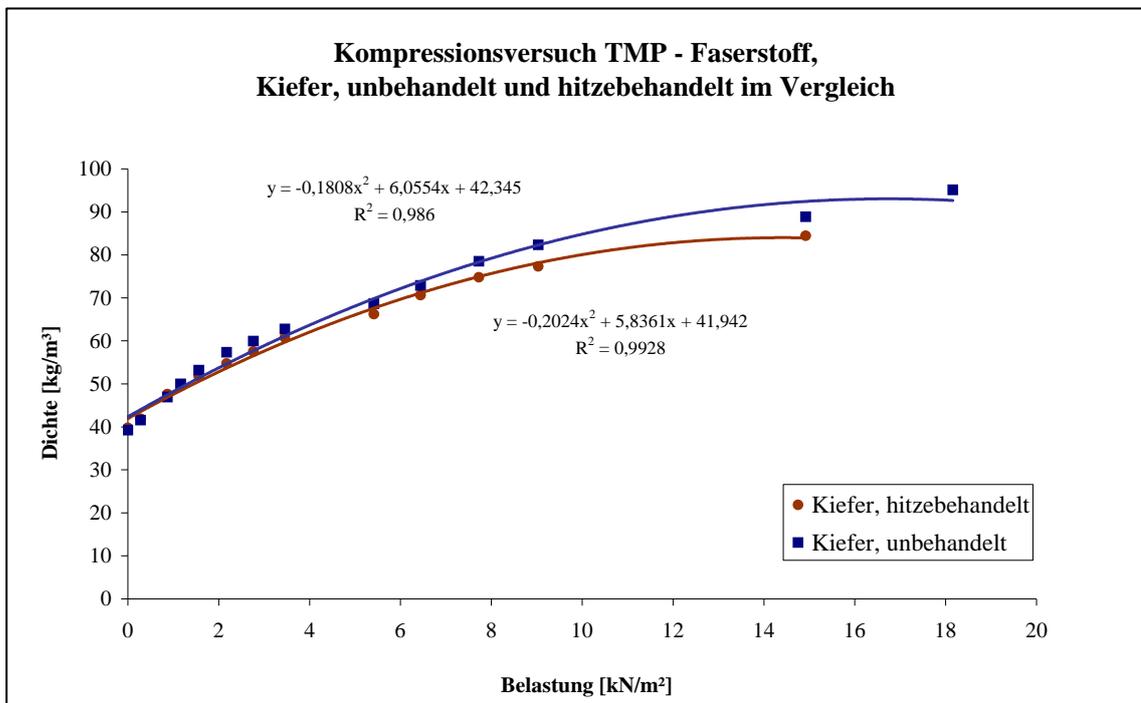


Bild 16: Ergebnisse des Kompressionsversuchs – Vergleich TMP Kiefer behandelt und hitzebehandelt



- *Bild 17: Gepresster TMP-Faserstoff nach einem Kompressionsversuch*

4 Diskussion

Einfluss der Behandlungstemperatur und -zeit auf die Rohdichte

Bei Temperaturen über 150 °C hat die Masse des TMP-Faserstoffs in der Hitzevergütung gegenüber den darrtrockenen Kontrollen merklich abgenommen (vgl. Bild 13 A). In ähnlicher Weise nimmt auch die Masse von Vollholz während der Wärmebehandlung ab [30]. Je höher die Behandlungstemperatur lag, umso mehr verloren die Faserstoffe an Gewicht (vgl. Abb. 13 A). Damit übereinstimmend gibt es auch beim Vollholz einen Zusammenhang zwischen Behandlungstemperatur und Masseverlust [12]. Die Masseänderung gilt als Maß für die Behandlungsstärke bei den Verfahren zur Holzmodifizierung [12]. Dementsprechend dürfte die Methode zur Hitzevergütung, wie sie in der vorliegenden Arbeit vorgestellt wurde, den Holzschliff dem Untersuchungsziel entsprechend verändert haben.

Die Masse des Kiefern-TMP-Faserstoffs reduzierte sich bei einer Temperatur von 200 °C um fast zehn % (vgl. Abb. 13 B). Dies übertrifft die Massereduktionen in kommerziellen Verfahren um 20 bis 50 % [32]. Beispielsweise wurde TMP-Faserstoff unbekannter Herkunft bei 170-200 °C um 4,4 bis 6,7 % leichter [40]. Andererseits erreichen einzelne Behandlungsverfahren abhängig von Holzart und Prozessparametern durchaus Massereduktionen von bis zu 15 % [37]. Offensichtlich wurde der Kiefern-TMP-Schliff dieser Untersuchung im Vergleich zu gängigen Behandlungen stark vergütet, ohne den Rahmen der bekannten Verfahren zu verlassen.

Die Masse des Kiefernmaterials reduzierte sich signifikant stärker als die Massen der anderen Faserstoffe (vgl. Abb. 13 B). Dies könnte sich darauf zurückführen lassen, dass die Wärmebehandlung das Harz aus dem Holz löst [34]. Im Gegensatz dazu scheinen zumindest Fichte und Kiefer in einer Hitzebehandlung unter Wasserdampf gleichviel an Gewicht zu verlieren, obwohl Kiefernholz an ätherischen Inhaltsstoffen reicher als Fichtenholz ist [33]. Buche dagegen hat in anderen Untersuchungen selbst bei über 200 °C lediglich unmerklich an Gewicht

verloren oder musste bereits unter milden Vergütungsbedingungen wesentlich stärkere Masseverluste als die Nadelhölzer hinnehmen [35] [36]. Offensichtlich gibt es derzeit über diese Hinweise hinaus noch keine konsistente Kenntnis der quantifizierten Einflüsse auf den Masseabbau unter Hitze.

Im Gegensatz zur Temperatur hat die Behandlungsdauer keinen merklichen Einfluss auf den Masseverlust von Kiefern-TMP-Faserschstoff (vgl. Bild 14 A). Auch auf die Biegefestigkeit und das Biege-E-Modul von Pappelvollholz unbekannter Dimension hatte die Verweildauer in einer wasserdampffreien Atmosphäre keinen Einfluss [38]. Andererseits gibt es einen Hinweis darauf, dass der Masseverlust und die Biegefestigkeit von Montereykiefernholz (*Pinus radiata* D. Don.) mit der Dauer der Hitzezufuhr zusammenhängen könnten [39]. Demgegenüber hängt die Thermolyse von Holz im Allgemeinen von der Temperatur und dem Temperaturgradienten ab [16]. Temperaturgradienten dürften eher im Vollholz als beim Faserstoff auftreten. Insofern könnte die Einwirkdauer bei Vollholz einen Einfluss auf die Hitzevergütung haben, der sich bei Faserstoff nicht beobachten lässt.

Thermische Holzmodifikation und Wärmeleitfähigkeit

Im Allgemeinen bestimmt die Rohdichte eines Materials seine Wärmeleitfähigkeit linear [44]. Je geringer die Rohdichte eines Materials ist, desto geringer ist auch dessen Wärmeleitfähigkeit [8]. Vor diesem Hintergrund war die Hypothese der vorliegenden Arbeit, die Dichte von TMP-Faserstoff mit Hilfe der Hitzevergütung zu verringern, um die Wärmeleitfähigkeit dieses Materials zu senken. Um eine möglichst hohe Reduktion der Rohdichte bzw. Wärmeleitfähigkeit bei TMP-Faserstoff durch Hitzebehandlung zu erreichen, sind möglichst hohe Behandlungstemperaturen zu wählen. Die Methode der vorliegenden Arbeit wendete eine Temperatur von 200 °C an und erreichte damit Massereduktionen von bis zu 10 %. Dies liegt im oberen Bereich dessen, was derzeit ohne Materialzerstörung erreichbar scheint [37].

Zur Untersuchung der Wärmeleitfähigkeit von unbehandeltem und hitzebehandeltem TMP-Faserstoff aus Kiefer wurden beide Materialien mit gleicher Masse bzw. Dichte ins Zweiplattengerät eingebaut (vgl. Kap. 2.2.4). Entgegen der Hypothese unterschieden sich das unbehandelte und das hitzevergütete Material nicht in ihren Wärmeleitfähigkeiten (vgl. Bild 15 A). Der hitzebedingte Masseverlust des Faserstoffs hat nicht dazu beigetragen, die Wärmeleitung zu unterbinden. Offensichtlich „... führt eine geringe Dichte allein nicht automatisch zu niedrigen Wärmeleitwerten ...“ [41]. Andererseits nimmt die Wärmeleitfähigkeit von wasserglasgebundenen Platten aus Faserstoff, Holzwolle oder Hobelspänen mit der Dichte ab [42]. Allerdings verbessert sich die Dämmwirkung dieser Materialien bei Dichten von weniger als 45-65 kg / m³ nicht mehr [42]. Lose eingestreuter Extruderholzstoff, Hobelspäne und Sägespäne entfalten ihre beste Dämmwirkung bei Dichten von mehr als 100 kg / m³. Das Optimum für lose eingestreuten TMP-Schliff aus Fichtenholz liegt bei über 50 kg / m³ [8]. Der unvergütete und hitzevergütete TMP-Faserstoff der vorliegenden Untersuchung hatte Dichten von etwa 40 kg / m³ (vgl. Abb. 16). Dementsprechend dürfte er den optimalen Dichtebereich für die Dämmwirkung von Holzdämmstoffen unterschritten haben. Die Wärme überträgt sich in so lockerem Material wie dem TMP-Faserstoff nicht mehr alleine über die Kontakte zwischen den Fasern, sondern auch konvektiv und über Strahlung [42]. Zwar verringert die Hitzevergütung die Faserkontakte, indem sie die Mittellamellen mindestens teilweise abbaut [12]. Allerdings dürften zusätzliche Konvektion und Strahlung die dämmtechnischen Vorteile im hitzevergüteten Material aufgehoben haben.

Einfluss der thermischen Holzmodifikation auf das Setzungsverhalten

Nach einer statischen Belastung wies hitzevergüteter TMP-Faserstoff eine geringere Dichte als unbehandeltes Material auf (vgl. Bild 16). Offensichtlich erhöht die Hitzevergütung die Formstabilität des Materials unter Druck. Die Formstabilität des Faserstoffs entspricht nicht der Formstabilität von Vollholz oder Holzwerkstoffen. Zwar verbessert die Hitzevergütung auch bei diesen Materialien die Formstabilität [12] [43]. Dies lässt sich bei den Materialien, in denen die Fasern

in feste Verbände eingegliedert sind, jedoch ausschließlich mit den Ausgleichsfeuchten in Verbindung bringen [12]. Im Gegensatz dazu hängt die Formstabilität loser Dämmstoffe unter anderem vom Setzungswiderstand des Materials unter statischer und/oder dynamischer Belastung ab [8].

„Die Formstabilität [...] ist ein wichtiges Kriterium zum einwandfreien Gebrauch eines Dämmstoffes. Durch Schlitze und Löcher können große Wärmeverluste entstehen, [...]“ [44]. Solche Fehlstellen in der Dämmung entstehen, wenn der Dämmstoff unter Belastung in sich zusammensinkt. Insofern ist das Setzungsverhalten ein wichtiger Bestimmungsgrund für die Qualität eines Dämmstoffs [44]. So können beispielsweise bei der Verwendung von Celluloseflocken Setzungen im Laufe der Jahre die Dämmwirkung mindern [44]. Allerdings ist Cellulose ein vergleichsweise dichtes Material. Die Setzung hängt mit der Materialdichte zusammen [45]. So weist bereits unvergüteter Fichten-TMP-Faserstoff auch unter dynamischer Belastung bei Frequenzen von 0-80 Hz und einer Kraft von 15,6 kN bei der höchsten Frequenz keine nennenswerten Separations- oder Setzungserscheinungen im Bauteil auf [8]. Dementsprechend scheint TMP-Faserstoff bei Einbaudichten von 30 bis 40 kg / m³ für die Praxis tauglich und setzungssicher zu sein [46]. Weitere Sicherheitsreserven in dieser Hinsicht dürfte die Verwendung von hitzevergütetem Faserstoff erschließen.

Nach den Verdichtungsversuchen blieb der hitzevergütete Faserstoff anders als das unvergütete Material ohne weitere Behandlung in Form (vgl. Bild 17). Im Vergleich dazu leiden die Holzfaserdämmplatten, die im Nassverfahren hergestellt werden, unter ihrer geringen Maßhaltigkeit. Darüber hinaus könnten hitzevergütete Faserstoffe den Produktionsaufwand für Holzfaserdämmplatten im Trockenverfahren mindern. Im Gegensatz zu den Erfahrungen dieser Arbeit brauchen solche Platten Latex oder Gummi arabicum als Bindemittel, um ihre Form zu erhalten [47]. Insofern könnte hitzevergüteter TMP-Faserstoff die Dämmplattenherstellung im Nassverfahren durch eine Verbesserung der Maßhaltigkeit und diejenige im Trockenverfahren durch Bindemittelsparnis voranbringen.

5 Zusammenfassung

Im Rahmen dieser Forschungsarbeit wurde der Einfluss der thermischen Modifikation von TMP-Faserstoff unterschiedlicher Holzarten auf die Rohdichte, die Wärmeleitfähigkeit und das Setzungsverhalten untersucht. Das Ziel war eine Überprüfung einer möglichen Verbesserung der genannten Eigenschaften durch die thermische Modifikation mit dem Hintergrund, die Dämmeigenschaften von losen Dämmstoffen aus Holz durch den gezielten Einsatz von thermisch modifiziertem TMP-Faserstoff zu optimieren.

Zu diesem Zweck wurde eine Methode zur Hitzevergütung von Faserstoff in einer Stickstoffatmosphäre entwickelt. Der Faserstoff verliert bei höheren Temperaturen mehr Masse als bei niedrigeren. Die Behandlungsdauer hat dagegen keinen Einfluss auf den thermischen Materialabbau. Den Ergebnissen entsprechend wurde Kiefern-TMP-Faserstoff für die folgenden Untersuchungen acht Stunden lang bei 200 °C vergütet.

Dieses Material wurde vergleichend zu unbehandeltem Faserstoff in einem Zweiplattenmessgerät unter definierter Einbaudichte auf seine Wärmeleitfähigkeit hin untersucht. Hitzevergüteter und unbehandelter TMP-Faserstoff haben bei gleicher Einbaudichte die gleiche Wärmeleitfähigkeit.

Unter statischer Belastung wurde die Verdichtbarkeit der Faserstoffe als Hinweis auf das Setzungsverhalten begutachtet. Insbesondere bei größeren Belastungen erwies sich der unbehandelte Faserstoff als signifikant verdichtungsresistenter als die unbehandelten Kontrollen. Außerdem behält verdichteter Faserstoff aus vergütetem Material anders als bei unbehandeltem dauerhaft seine Form.

Kaiserslautern, 31.12.2004

Prof. Dr. H. Heinrich

Dipl.-Ing. B. Hering

6 Literatur

- [1] *Heinrich, H.; Hering, B.:* Holz als Dämmstoff zur Wärme- und Schalldämmung im Baubereich, Gesundheits-Ingenieur - Haustechnik - Bauphysik - Umwelttechnik (Heft 5) 2004, S. 245-257
- [2] *Niemz, P.:* Physik des Holzes und der Holzwerkstoffe, Leinfelden-Echterdingen: DRW-Verlag, 1993
- [3] *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
- [4] DIN 4108 – 2: Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden , 2003
- [5] *Fischer, H.-M.; Jenisch, R.; Klopfer, H.; Freymuth, H.; Richter, E.; Petzold, K.:* Lehrbuch der Bauphysik, 4. Auflage, Stuttgart: Teubner Verlag, 1997
- [6] *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
- [7] *Berthold, K.:* Lexikon der Holztechnik, Leipzig: VEB Fachverlag Leipzig, 1990
- [8] *Vogel, K.:* Die Eignung von Holz als Wärmedämmstoff – Vergleichende Untersuchungen von Spänen und Fasern, Dissertation, Ludwig-Maximilians-Universität München, Forstwissenschaftliche Fakultät, Shaker Verlag, 1999
- [9] Verband Deutscher Papierfabriken, Adenauerallee 55, 53113 Bonn, Infobroschüre: Papier machen – Information zu Rohstoffen und Papierherstellung, 2004

- [10] *Schindel, K.*: Die Röntgenmikroanalyse von Lignin als Untersuchungsmethode für Holz und Holzwerkstoffe, Dissertation, Georg-August-Universität Göttingen, Fakultät für Forstwissenschaften und Waldökologie, Göttingen, 1998
- [11] *Pöhler-Rotach, E.; Seubert-Hunziker, H.*: Holzchemie, Skript zur Vorlesung Holzkunde II – Teil 2 der ETH Zürich, Professur Holzwissenschaften
- [12] *Leithoff, H.; Peek, R.-D.*: Hitzebehandlung – eine Alternative zum chemischen Holzschutz, 21. Holzschutz-Tagung der DGfH, Rosenheim 1998
- [13] *Stefke, B.; Teischinger, A.*: Methoden der Holzmodifikation, aus Lignovisionen Band 3 – Modifiziertes Holz: Eigenschaften und Märkte, Wien, 2002
- [14] *Militz, H.; Gelbrich, J.*: Übersichtsbericht – Acetyliertes Holz, Forschungsprojekt, Trippstadt: Forschungsanstalt für Waldökologie und Forstwirtschaft Rheinland-Pfalz, 2001
- [15] *Duchez, L.; Guyonnet, R.*: Principles and applications of wood retification to be presented at the 5th World Conference on Timbor Engineering, Lausanne-Montreux – Switzerland, 1998, Centre SPIN, Ecole des Mines de Saint-Etienne
- [16] *Wienhaus, O.*: Modifizierung des Holzes durch eine milde Pyrolyse – abgeleitet aus den allgemeinen Prinzipien der Thermolyse des Holzes, Wissenschaftliche Zeitschrift der Technischen Universität Dresden 48 Heft 2, 1999
- [17] *Rapp, A.O.; Sailer, M.*: Innovative Holzvergütung – neue Einsatzbereiche für Holz, Holz A-R-T 2000. architecture, research, technology: 17. Dreiländer-Holztagung, Luzern 2000
- [18] *Brauer, J.*: Thermoholz - Hitze veredelt Holz zum Bauen, Wohnen, Bausparkasse BHW, 4/2002

- [19] *Prüfinstitut für Bauelemente GmbH*: Hitzevergütetes Holz – Wärmetechnische Eigenschaften von hitzevergütetem Kiefernholz im Vergleich zu unbehandeltem Kiefernholz, Forschungsprojekt, Pirmasens 2000
- [20] *Seegmüller, S.*: Hitzevergütetes Holz – Isothermenberechnungen – Jahrringbreiten des im PIB-Plattenversuch verwendeten Holzes, Forschungsprojekt, Trippstadt, 2000
- [21] DIN 52612: Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit mit dem Plattengerät, 1979
- [22] *Taurus Daten+Messtechnik GmbH*: Bedienungsanleitung TLP 900-H, Weimar: 1998
- [23] *Nitsche, M.*: Bevor`s knallt – Inertisieren vermeidet Explosionen, CHEMIE TECHNIK (Heft 6) 2003, S. 22-26
- [24] *Scheidung, W.*: Untersuchungen zur Wärmeleitfähigkeit von Holzfaserstoff, Holz als Roh- und Werkstoff, 58 (2000), S.177-181
- [25] *Kollmann, F.; Malmquist, L.*: Über die Wärmeleitfähigkeit von Holz und Holzwerkstoffen, Holz als Roh- und Werkstoff, 14 (1956), S.201-204
- [26] *Heinrich, H.; Hering, B.*: Dämmeigenschaften von TMP-Faserstoffen unterschiedlicher Holzarten, Abschlussbericht zum Forschungsauftrag der Struktur- und Genehmigungsdirektion Süd Forschungsanstalt für Waldökologie und Forstwirtschaft Rheinland-Pfalz, Kaiserslautern, 2003
- [27] *Bauer, C.; Blanz, A.; Heinrich, H.*: Nachwachsende Rohstoffe im Bauwesen, Gesundheits-Ingenieur - Haustechnik - Bauphysik - Umwelttechnik, 121 (Heft 3) (2000), S. 143-170

- [28] *Giebler, E.*: Dimensionsstabilisierung von Holz durch Feuchte/Wärme/Druck-Behandlung, Holz als Roh- und Werkstoff, 41 (1983), S. 87-94
- [29] *Niemz, P.*: Thermisch vergütetes Holz in der Schweiz, Holz-Zentralblatt, 133 (2007), S. 1102
- [30] *Niemz, P.*: Herstellung und Eigenschaften von thermovergütetem Holz - Eine Übersicht, Schweizerische Zeitschrift für das Forstwesen, 156 (2005), S. 408-410
- [31] *Finnish Thermowood Association (Hrsg.)*: Thermowood[®] Handbook. Helsinki: WoodFocus Oy
- [32] *Lukowsky, D.; Lehmann, J.; Burk, R.*: Vergütetes Kiefernholz für den Fensterbau, Holz-Zentralblatt, 128 (2002), S. 910-911
- [33] *Metsä-Kortelainen, S.; Antikainen, T.; Viitaniemi, P.*: The water absorption of sapwood and heartwood of Scots pine and Norway spruce heat-treated at 170 °C, 190 °C, 210 °C and 230 °C, Holz als Roh- und Werkstoff, 64 (2006), S. 192-197
- [34] *Syrjänen, T.; Kangas, E.*: Heat treated timber in Finland. Kona, Hawaii: 31. Jahrestreffen der „international research group on wood preservation Section 4 Processes“ am 14.-19.05.2000.
- [35] *Kamden, D.; Pizzi, A.; Jermannaud, A.*: Durability of heat-treated Wood, Holz als Roh- und Werkstoff, 60 (2002), S. 1-6
- [36] *Bächle, F.; Niemz, P.*: Deutlich geringere Quellwerte bei Thermoholz, Holz-Zentralblatt, 133 (2007), S. 622-623, 759-760
- [37] *Grosman, C.*: Marktchancen für hitzebehandeltes Holz in Deutschland: Eigenschaften, Einsatzmöglichkeiten, Verfügbarkeit und Marketing. Trippstadt: Forschungsanstalt für Waldökologie und Forstwirtschaft, 2002
- [38] *Mouras, S.; Girard, P.; Rousset, P.; Permadi, P.; Dirol, D.; Labat, G.*: Propriétés physiques de bois peu durables soumis à un traitement de pyrolyse ménagée, Annals of Forrest Science, 59 (2002), S. 317-326
- [39] *Dimitrova, E.; Hora, G.*: Radiata-Holz für den europäischen Fensterbau? Holz-Zentralblatt, 128 (2002), S. 770

- [40] *Cho, T.; Cho, S.; Koo, J.*: Characteristics of Wood fiber effecting in oil-sorption (II), Korean Forestry Research Institute Journal of Forrest Science, 63 (2000), S. 58-67
- [41] *Scheidung, W.; Dube, H.*: Dämmstoffe aus Extruder-Holzfaserstoff, Holz-Zentralblatt, 128 (2001), S. 1542-1543
- [42] *Scheidung, W.*: Untersuchungen zur Wärmeleitfähigkeit von Holzfaserstoff. Holz als Roh- und Werkstoff, 58 (2000), S. 177-181
- [43] *Paul, W.; Ohlmeyer, M.; Leithoff, H; Boonstra; M.; Pizzi, A.*: Optimizing the properties of OSB by a one-step heat pre-treatment process, Holz als Roh- und Werksstoff, 64 (2006), S. 227-234.
- [44] *Bauer, C.*: Nachwachsende Rohstoffe im Bauwesen. Kaiserslautern: Universität, Integrierte Hochbautechnik. Diplomarbeit (1999), 90 S.
- [45] *Vogel, K.; Tröger, F.*: Lose Dämmstoffe aus Holz. München: Technische Universität (2004), 81 S.
- [46] *Käser, H.*: Lose Holzfasern als marktfähiges Produkt. In: *Institut für Holzfor-*
sung München & Gesellschaft der Freunde und Förderer der Holzfor-
München (Hrsg.): Tagungsband Dämmstoffe aus Holz. 11. Münchener Holzkol-
loquium (1999), S. 38-45
- [47] *Lange, U.*: Holzfaser-Dämmplatten nach dem Trockenverfahren. In: *Institut für*
Holzfor-
München & Gesellschaft der Freunde und Förderer der Holzfor-
München (Hrsg.): Tagungsband Dämmstoffe aus Holz. 11. Münchener
Holzkolloquium (1999), S. 78-84