

**Abschlussbericht des BMBF - Projektes „Buche-  
Küstentanne“  
Teilprojekt 5**

**Berichtszeitraum: 01.08.2005 – 31.12.2008**

**Vorhabensbezeichnung:**

**Verwertungsorientierte Untersuchungen der Holzart *Fagus sylvatica* (Buche) zur Herstellung von umweltfreundlichen, organisch gebundenen Dämmstoffen (TP 5.1)**

**Am Teilprojekt 5.1 beteiligte Personen:**

Prof. Dr. W. Viöl (Projektleiter)

Hochschule für Angewandte Wissenschaft und Kunst HAWK

Fakultät für Naturwissenschaften und Technik

Von-Ossietzky Str. 99

37085 Göttingen

Michael Bartholme (Bearbeiter)

Büsgen-Institut

Abt: Molekulare Holzbiotechnologie & Technische Mykologie

Büsgenweg 2

37077 Göttingen

## **1) Aufgabenstellung**

Das Ziel des vorliegenden Vorhabens war die Entwicklung neuer Dämmstoffe auf Basis von Buchenholzfasern. Dabei sollte eine optimale Kombination von naturnahen Bindemitteln und Buchenfasern entwickelt werden. Gleichzeitig sollten die staubbildenden Buchenfasern durch Kombination dieser Stoffe in einem Nassprozess (Suspension) gebunden werden. Das so geformte Faservlies sollte unter Vakuum durch Wasserentzug vorgetrocknet und anschließend mittels einer Mikrowellen-Trocknung getrocknet werden.

Nach dem Ausbau (Gebrauch) dieser Dämmstoffe soll eine unkomplizierte Entsorgung durch Kompostierung möglich sein. Bei der Kompostierung werden die Dämmstoffe durch die Einwirkung von zahlreichen Bodenmikroorganismen stufenweise verrottet und zum Schluss zu CO<sub>2</sub> mineralisiert (Teilprojekt 6, Prof. U. Kües).

## **2) Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde**

Das Vorhaben wurde in Zusammenarbeit mit der Fakultät für Naturwissenschaften und Technik der Fachhochschule Hildesheim/Holzminde/Göttingen und der Universität Göttingen, Institut für Forstbotanik (jetzt Büsgen-Institut), und der Fricke und Mallah Microwave Technology GmbH bearbeitet. Die Versuche wurden im Technikum des Büsgen-Instituts durchgeführt, wo drei verschiedene Mikrowellentrockner für die Trocknungsversuche zur Verfügung standen. Nach erfolgreichem Abschluss erster Trocknungsversuche in einer Labormikrowelle wurden weitere Versuche mit einem Pilotrockner der Firma Fricke und Mallah durchgeführt. Im Anschluss an diese Versuche wurde dann ein für die Dämmstofftrocknung optimiertes Gerät konzipiert, das von der Firma Fricke und Mallah gebaut und im Technikum aufgestellt wurde. Ein Großteil der Trocknungsversuche wurde nun an diesem Gerät unternommen. Für die Untersuchung der mechanisch-technologischen Eigenschaften der Dämmstoffe stand im Technikum weiterhin eine Prüfmaschine zur Verfügung, mit der Festigkeitsprüfungen an den Dämmstoffen nach einschlägigen Normen durchgeführt werden konnten. Die Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit wurde indes am Wilhelm-Klauditz-Institut (WKI) in Braunschweig durchgeführt.

Das Projekt ist dem Förderkonzept von Forschungs- und Entwicklungsvorhaben auf dem Gebiet zur nachhaltigen Waldwirtschaft „Projekt Forst-Holz-Wertschöpfungskette“ der BMBF zugeordnet.

### **3) Planung und Ablauf des Vorhabens**

Für die Herstellung der Faservliese im Labormaßstab wurde zuerst ein sog. Gießformkasten konstruiert, mit dem es möglich war, Nassvliese mit den Maßen 30 cm x 50 cm herzustellen. In mehreren Versuchsreihen wurden anschließend verschiedene Entwässerungsmethoden (Vakuum und Druck) getestet und die optimale Fasereinwaage für eine festgelegte Zielrohddichte bestimmt. Außerdem wurden unterschiedliche Bindemittelkonzentrationen auf Lignin- und Stärkebasis der Fasersuspension beigegeben und die Anbindung dieser an die Fasern untersucht.

Erste Versuche zur Mikrowellentrocknung erfolgten in einer Labormikrowelle und gaben positive Ergebnisse im Hinblick auf eine Verkürzung der Trocknungszeit der Vliese. Weitere Versuche wurden in einer Industrie-Pilotanlage durchgeführt, welche von der Firma Fricke und Mallah zur Verfügung gestellt wurde. Nach Auswertung aller gewonnenen Ergebnisse wurde in Zusammenarbeit mit dieser Firma eine für die Vliestrocknung optimierte Anlage gebaut und im Technikum des Büsgen-Instituts aufgestellt. Mit dieser Anlage wurden alle weiteren Trocknungsversuche durchgeführt.

### **4) Wissenschaftlicher und technischer Stand**

Zu Beginn der Projektzeit wurden umfangreiche Literaturrecherchen durchgeführt, um den aktuellen wissenschaftlichen und technischen Stand beurteilen zu können. Dabei zeigte sich, dass sich die Mikrowellentechnik in den vergangenen Jahren in verschiedenen industriellen Sektoren als effiziente Trocknungsmethode etablieren konnte. Eine Reihe von Untersuchungen beschäftigten sich in letzten Jahren mit der mikrowellenbasierten Trocknung von Holz und Holzwerkstoffen, so z. B. Hansson und Antti 2003, Seyfarth 2003, Hunt 2005. Generell gilt demnach für das Verfahren der Mikrowellenheizung, dass elektromagnetische Energie direkt in das zu erwärmende Material eingekoppelt, dort von Molekülgruppen absorbiert und in Wärmeenergie konvertiert wird. Daraus folgt, dass die Temperatur in diesen Materialien viel schneller ansteigt als bei der konventionellen (konvektiven) Trocknung.

Die Trocknung von Holzfaserdämmstoffen bei industrieller Herstellung erfolgt bislang dagegen konvektiv in gasbeheizten Trocknern. Ungünstig ist an diesem Verfahren jedoch, dass die Trocknung sehr energie- und zeitaufwendig ist, da sich der Plattenkern aufgrund der guten Dämmeigenschaften der Fasern nur sehr langsam aufheizt. Demzufolge sind Trocknungszeiten von über 2 h bei einer Trocknungstemperatur von 160 °C bis 220 °C bei diesem Herstellungsverfahren für 20 mm starke Holzfaser-Dämmplatten üblich. Konvektives Trocknen für Dämmplatten von mehr als 20 mm Dicke erfordert zudem zusätzlichen

Zeitaufwand, ist daher nicht kosteneffizient und wird industriell nicht ausgeführt. Dickere Dämmplatten werden deshalb bislang noch durch Verkleben dünnerer Dämmplatten hergestellt.

Im Bereich der naturnahen Bindemittel wurden am Büsgen-Institut bereits umfangreiche Forschungsarbeiten durchgeführt. An dieser Stelle sei nur kurz auf die Arbeiten von Müller 2005 und Schöpfer 2006 hingewiesen. In diesem Projekt wurde nun versucht, die positiven Einflüsse dieser Bindemittel bei der MDF-Produktion auf die Herstellung von Dämmstoffen zu übertragen.

### **Referenzliste**

ANSORGE, T. 1997: Beitrag zur Entwicklung von Herstellverfahren für ein stoßabsorbierendes Verpackungsmaterial auf Basis von Getreidekleie, Chemnitz.

HANSSON, L.; ANTTI, A.-L. 2003: The effect of microwave drying on norway spruce woods strength: a comparison with conventional drying. *Journal of Materials Processing Technology* 141 (1): 41-50.

HUNT, J.-R.; GU, H.; WALSH, P.; WINANDY, J.-E. 2005: Development of new microwave-drying and straightening technology for low value curved timber. F. P. Laboratory, United States Department of Agriculture.

LAMPERT, H. 1967: Faserplatten, VEB Fachbuchverlag Leipzig.

MEREDITH, R.-J. 1998: Engineers' handbook of industrial microwave heating. IEE Power Series 25. London: Institution of Electrical Engineers.

METAXAS, A.-C.; MEREDITH, R.-J. 1983: *Industrial Microwave Heating (IEE Power Engineering Series)*. Institution of Engineering and Technology.

MUJUMDAR, A.-S. 1995: Handbook of industrial drying (second edition), New York

MÜLLER, C. 2005: Mechanisch-enzymatischer Aufschluss von Kartoffelpülpe als Bindemittel zur Herstellung von Holzwerkstoffen, Göttingen.

SCHEIDING, W. 1998: Entwicklung, Herstellung und Untersuchung wesentlicher Eigenschaften wasserglasgebundener Holzfaserdämmplatten aus Fichtenholz, Dresden.

SCHÖPPER, C. 2006: Entwicklung eines naturnahen Bindemittels aus nachwachsenden Rohstoffen auf Proteinbasis zur Herstellung von Mitteldichten Faserplatten, Göttingen.

SEYFARTH, R., Leiker, M. and Mollekopf, N. 2003: Continuous drying of lumber in a microwave vacuum kiln. 8<sup>th</sup> International IUFRO Wood Drying Conference.

ZIELONKA, P., GIERLIK E. 1999: Temperature distribution during conventional and microwave wood heating, Volume 57, Issue 4, Aug 1999, Pages 247 - 249. Holz als Roh- und Werkstoff 57 (4): 247-249.

## 5) Ergebnisse

### *Experimentelle Methoden*

Die Herstellung von Holzfaserdämmplatten erfolgt im industriellen Maßstab generell ähnlich wie die Papierherstellung. Die Fasersuspension wird dabei kontinuierlich auf ein Sieb aufgebracht, durch Walzen entwässert und anschließend getrocknet. Für eine Herstellung von Faservliesen im Labormaßstab wurde im Rahmen dieses Projektes ein Gießformkasten konstruiert (Abbildung 1).

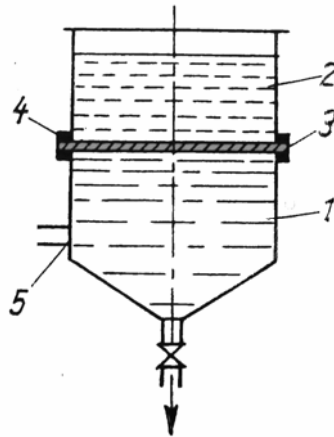


Abbildung 1: Gießformkasten (1. Unterteil, 2. Oberteil, heb- und senkbar, 3. perforierte Kunststoffplatte mit Siebbespannung, 4. Flansche mit Gummileisten, 5. Anschluss für Wassereinfüllung und Vakuumsauger) geändert nach Lampert, 1967

Das Arbeitsprinzip des Gießens besteht in der Einbringung einer dosierten Menge Fasersuspension mit einem Feststoffgehalt von 2-3 % in einen Gießkasten (30 cm × 50 cm), wobei anschließend die mechanische Entwässerung durch Vakuum oder mechanische Pressung mit einem Presstempel erfolgt. Folglich wird infolge der Sedimentation der Fasern auf dem Sieb des Gießkastens ein Faservlies gebildet. Im Laborversuch erfolgte die Vorentwässerung durch Vakuum, allerdings zeigten Vorversuche bereits, dass der Wassergehalt für eine anschließende Trocknung noch zu hoch war. Deshalb wurde dem Vlies vor der Trocknung noch einmal in einer Kaltpresse weiteres Wasser entzogen. Im Ganzen wurden für die Durchführung der Trocknungsversuche Faservliese mit unterschiedlichen Fasereinwaagen (400 g, 500 g, 600 g, 1000 g) hergestellt, um die Korrelation von Fasereinwaage und Plattendicke abschätzen zu können.

Für die Entwässerung wurden Pressdrücke von 50 bar bis 150 bar getestet, wobei sich schließlich ein Pressdruck von 100 bar als optimal erwies, um die Trocknereingangsfeuchte eines Vlieses industrieller Herstellung von ca. 120 % zu erreichen. Die angestrebte

Plattenfeuchte wurde mit geringen Abweichungen getroffen, zugleich konnte damit auch die gewünschte Dichte von 160 kg/m<sup>3</sup> realisiert werden (Tabelle 1).

Tab. 1: Plattenfeuchte nach Vorpressen bei 100 bar, Plattendicke und Rohdichte nach Trocknung bei unterschiedlichen Fasereinwaagen

Faser- Einwaage [g]	Plattenfeuchte [%]			Plattendicke [mm]			Dichte [g/mm <sup>3</sup> ]		
	n	Mittelwert	Stabw.	n	Mittelwert	Stabw.	n	Mittelwert	Stabw.
400	3	122,83	2,47	30	17,41	0,94	30	0,16	0,01
500	3	121,93	1,01	28	21,59	0,58	28	0,16	0,00
600	3	120,53	0,92	30	26,68	1,01	30	0,16	0,00
1000	3	124,67	1,04	20	42,89	1,55	20	0,16	0,01

### **Trocknungsversuche**

Die Trocknungsversuche wurden in drei verschiedenen Mikrowellen durchgeführt:

- Labormikrowelle Panasonic Pro II 1850 W
- Durchlauftrockner Fricke und Mallah MWDA 12,8 kW
- Trockner Fricke und Mallah MWDA 6,6 kW

### ***Trocknungsversuche in der Labormikrowelle und im Trockenschrank***

Abbildung 2 zeigt den Trocknungsverlauf eines 40 mm dicken Buchenvlieses mit einer Eingangsfeuchte von 120 % sowohl bei herkömmlicher Trocknung im Trockenschrank als auch bei einer Trocknung im Mikrowellentrockner. Hier wird deutlich, dass der Trocknungsverlauf bei der Mikrowellentrocknung linear erfolgt und sich wesentlich schneller als bei der Trocknung im Trockenschrank vollzieht.

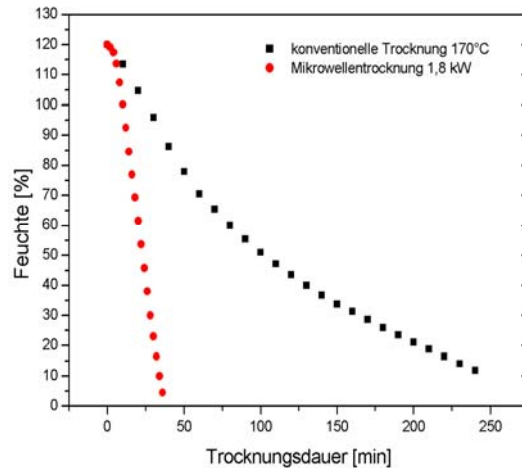


Abbildung 2: Trocknungsdauer und Feuchtigkeitsverlauf bei konventioneller Trocknung und MW-Trocknung

Es wird außerdem ersichtlich, dass der Trocknungsprozess im Trockenschrank bei fortschreitender Trocknungsdauer sehr ineffizient wird, was sich in dem nahezu asymptotischen Kurvenverlauf widerspiegelt. Aus diesem Grund werden derzeit im Nassverfahren industriell hergestellte Dämmplatten lediglich bis zu einer maximalen Dicke von 20 mm produziert. In Abbildung 3 ist hingegen die Temperatur in der Plattenmitte in Abhängigkeit von der Trocknungsdauer dargestellt. Hier fällt auf, dass bei der Mikrowellentrocknung die Temperatur innerhalb kurzer Zeit bis ca. 100 °C ansteigt und im weiteren Verlauf bis auf ca. 95 °C abfällt. Eine Erklärung hierfür ist die Tatsache, dass wenn das Wasser nahezu komplett verdampft ist, die Mikrowellen die Holzsubstanz aufheizen, sodass es zu einem plötzlichen Temperaturanstieg kommt. An dieser Stelle muss der Trocknungsvorgang unterbrochen werden, da eine weitergehende Behandlung des Faservlieses im Mikrowellenfeld zu einem Entzünden der Fasern führen würde.

Bei konventioneller Trocknung wird hingegen erst nach ca. 50 min die Höchsttemperatur von ca. 80 °C in der Plattenmitte erreicht. Im weiteren Trocknungsverlauf fällt diese bis auf ca. 70 °C ab. Der Grund dafür ist die Isolationswirkung der äußeren, zunehmend trocknenden Faserschichten. Insgesamt kann aufgrund der Untersuchungen festgehalten werden, dass der Trocknungsprozess bei der Mikrowellentrocknung schon nach 50 min, bei herkömmlicher Trocknung hingegen erst nach ca. 250 min abgeschlossen ist.



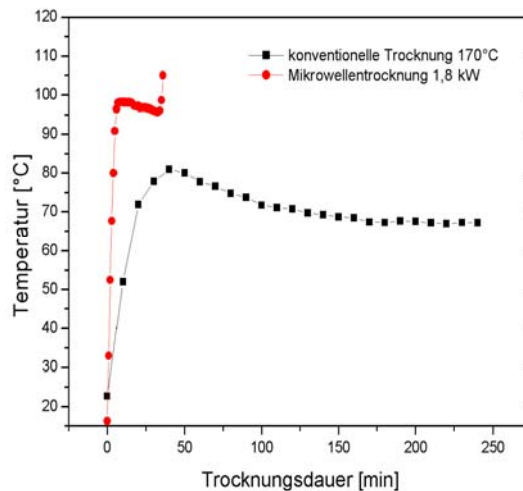


Abbildung 3: Temperaturverlauf und Trocknungsdauer bei konventioneller Trocknung und MW-Trocknung

**Trocknungsversuche mit der Mikrowellendurchlaufanlage MWDA 12,8 kW**

Abbildung 4 zeigt die Trocknungsdauer von Buchendämmplatten unterschiedlicher Dicke bei der Trocknung in der von der Firma Fricke und Mallah bereitgestellten Pilotanlage. Sehr deutlich wird auch hier wieder der Unterschied in der Trocknungsdauer von herkömmlicher Trocknung und Mikrowellentrocknung.

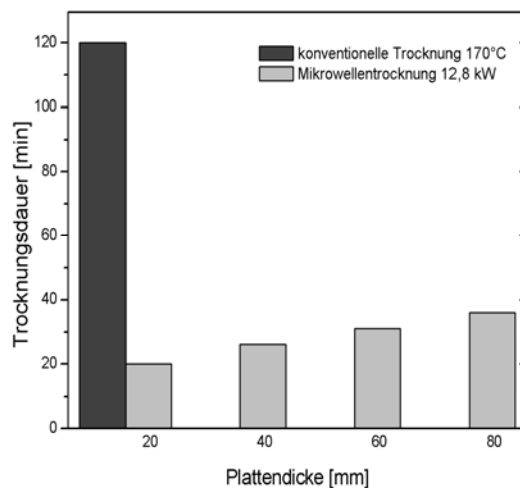


Abbildung 4: Trocknungsdauer von Buchenvliesen bei MW-Trocknung und herkömmlicher Trocknung im Trockenschrank

Während 20 mm starke Dämmplatten bei herkömmlicher Trocknung eine Trocknungsdauer von 120 min bei 170 °C benötigen, ist die Trocknung in der Mikrowelle bereits nach 20 min abgeschlossen. Selbst 80 mm starke Platten konnten bei der Mikrowellentrocknung erfolgreich bis auf eine Restfeuchte von 5 % getrocknet werden. Während – wie oben bereits

angesprochen – größere Plattendicken bei konventioneller Trocknung nur durch eine Verleimung mehrerer Schichten dünner Platten erreicht werden können, liegt ein Vorteil der Mikrowellentrocknung darin, dass die Erzeugung von homogenen, einschichtigen Dämmstoffen großer Dicke möglich ist. Dadurch entfällt im Herstellungsprozess einerseits die schichtweise Verleimung von Einzelplatten, außerdem kann auch noch Bindemittel bei der Herstellung eingespart werden.

In den Untersuchungen ist außerdem deutlich geworden, dass die Mikrowellenbehandlung keinen negativen Einfluss auf die Plattenqualität hatte. Verfärbungen oder Beschädigungen durch die höheren Temperaturen und das schnelle Austreiben des Wassers wurden nicht festgestellt.

Nach Testreihen, die mit dem von der Firma Fricke und Mallah gelieferten Mikrowellendurchlauf Trockner (MWDA 12,8 kW) durchgeführt wurden, stellte sich heraus, dass ein solches Gerät grundsätzlich für die Trocknung von Holzfaservliesen geeignet ist. Für die speziellen Projektanforderungen wurde aber eine modifizierte Version des Gerätes konstruiert: Dieses Gerät (MWDA 6,6 kW) besitzt eine geringere Leistung als das ursprüngliche verwendete Gerät, weist aber einen im Volumen kleineren Trocknungsraum von 120 x 65 x 50 cm<sup>3</sup> auf; außerdem wurde bei diesem speziellen Gerät auf die Absorberzonen verzichtet, wodurch die Energiedichte in der Behandlungszone wesentlich erhöht wird. Ein Nachteil der Anlage ist allerdings, dass das Gerät während des Trocknungsvorgangs durch Gitterbleche an Ein- und Ausgang abgeschlossen werden muss. Einen Durchlauf des Trocknungsgutes wurde für die Versuche durch Oszillation des Trocknungsgutes auf dem Transportband des Gerätes simuliert.

### ***Trocknungsversuche mit der Mikrowellendurchlaufanlage MWDA 6.6 kW***

Die Abbildungen 5 und 6 zeigen den detaillierten Trocknungs- und Temperaturverlauf der Dämmstoffvliese in der Mikrowelle (MWDA 6.6 kW) bzw. im Trocknungsschrank bei Dämmstoffvliesen von 2 mm Dicke. Die Trocknungskurve für konvektives Trocknen im Trockenschrank zeigt in Abb. 5 einen exponentiellen Abfall. Die Trocknungsrate vermindert sich mit fortschreitender Zeit und der Trocknungsprozess ist erst nach 110 min abgeschlossen, wobei die Kerntemperatur nach 20 min ein Maximum von 87 °C erreicht. Mit fortschreitender Trocknung fällt die Temperatur durch den isolierenden Effekt der trockenen Fasern und den Kühlungseffekt der Evaporation auf 77 °C. Nach einer Trocknungszeit von ca. 80 min und einem Wassergehalt von 20 % steigt die Temperatur bis zum Ende des Trocknungsprozesses auf 140 °C. Abbildung 3 zeigt die Trocknungskurve der Mikrowellentrocknung. Die Kurve

verläuft weitgehend linear, der Trocknungsprozess ist im Vergleich zur der konvektiven Trocknung signifikant beschleunigt. Der Trocknungsprozess ist bei der Mikrowellentrocknung nach 9 min abgeschlossen. Die Kerntemperatur steigt dabei innerhalb von 2 min auf 100 °C und bleibt unverändert bis ein Wassergehalt von 30 % erreicht ist. Nach 7 min und einem Wassergehalt unter 30 % tritt ein abrupter Temperaturanstieg auf, wahrscheinlich ausgelöst durch das Fehlen einer evaporativen Kühlung im Kern.

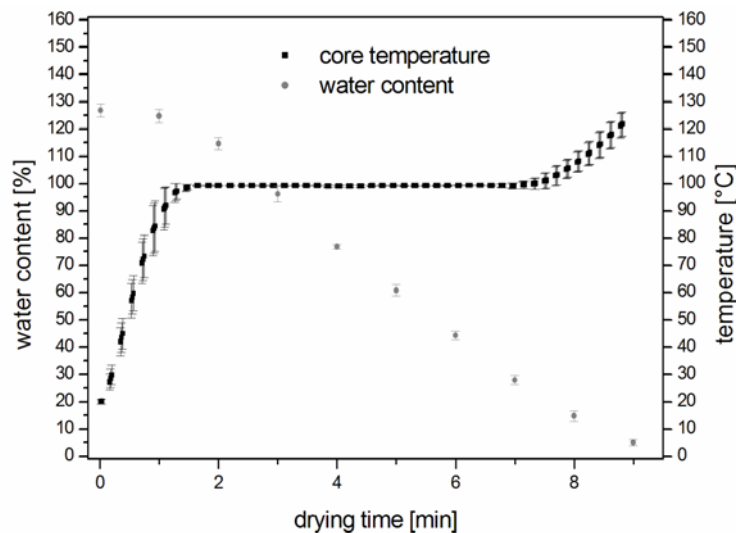


Abbildung 5: Feuchtigkeitsverlauf und Kerntemperatur bei Mikrowellentrocknung

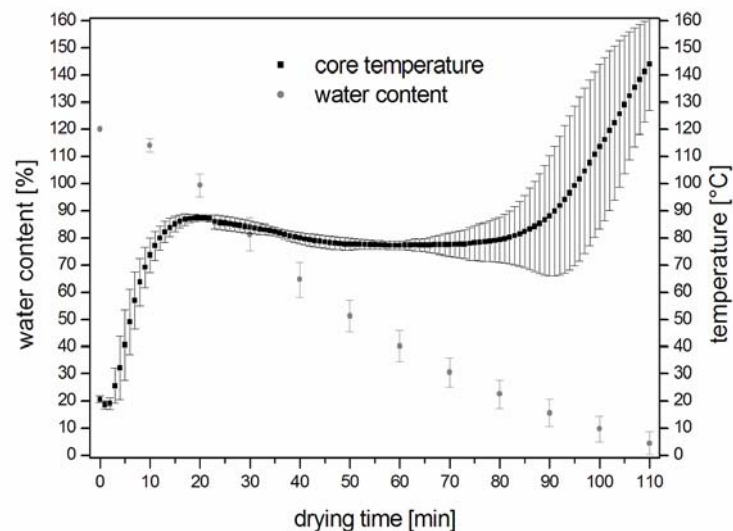


Abbildung 6: Feuchtigkeitsverlauf und Kerntemperatur bei konvektiver Trocknung

Um zu prüfen, ob Dämmplatten mit mehr als 20 mm in einem wirtschaftlich vertretbaren Zeitaufwand hergestellt werden können, wurden zusätzliche Trocknungstests mit Dämmplatten von 30 mm, 40 mm und 50 mm Dicke durchgeführt. Tabelle 2 fasst die

Ergebnisse dieser Versuche zusammen. In allen Tests war es möglich, die Dämmplatten in einem Bruchteil der Zeit zu trocknen, welcher für konvektiv getrocknete Dämmplatten nötig ist. Betrachtet man den Verlauf der Trocknungszeiten mit zunehmender Plattendicke, fällt auf, dass der Trocknungsprozess bei der Mikrowellentrocknung mit zunehmender Materialdicke effizienter wird.

Tabelle 2: Trocknungszeiten für 20, 30, 40 und 50 mm Plattendicke.

Dämmplattendicke	Trocknungszeit Mikrowellentrockner	Trocknungszeit Trockenschrank
20 mm	9 min	110 min
30 mm	11 min	170 min
40 mm	14 min	240 min
50 mm	18 min	330 min

### **Wirkungsgrad**

In Abbildung 7 ist der Wirkungsgrad der MWDA 12,8 kW und MWDA 6,6 kW dargestellt. Unter einem Wirkungsgrad versteht man den Quotienten aus der Energie bzw. Leistung, die zur Aufheizung und Verdampfung des in den Dämmplatten enthaltenen Wassers benötigt wird, und der Leistung, die das Gerät aus dem Netz bezieht. Die in das Gerät eingespeiste Leistung wird dabei mittels eines an der HAWK gebauten Leistungsmessgerätes erfasst, wohingegen die Leistung zur Aufheizung bzw. Verdampfung aus der Menge des verdampften Wassers berechnet wird:

$$P=Q/t = (c_w m_w \Delta T + 2260 \text{ kJ/Kg } m_w)/t$$

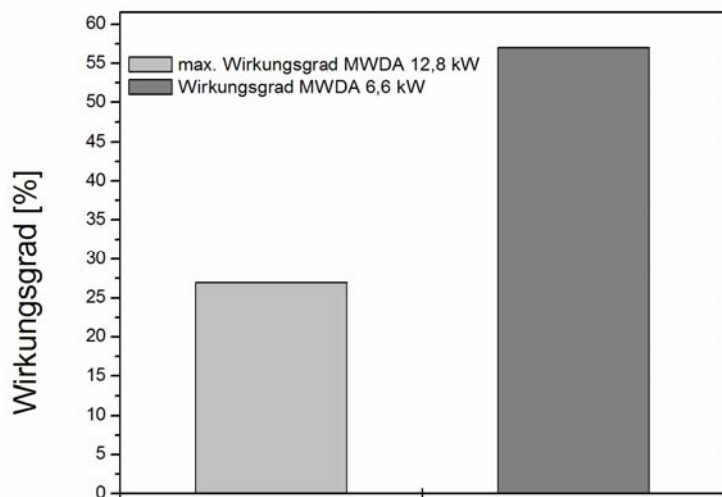


Abbildung 7: Wirkungsgrade der MWDA 12,8 kW und der MWDA 6,6 kW

Der Wirkungsgrad der MWDA 6,6 kW ist mit 57 % mehr als doppelt so groß wie der der MWDA 12,8 kW. Dabei ist festgestellt worden, dass der maximale Wirkungsgrad der 12,8 kW-Anlage nur durch Einbringen einer großen Masse an Trocknungsgut (ca. 7 kg) erreicht

werden konnte, bei geringeren Massen an Trocknungsgut sank der Wirkungsgrad hingegen auf 11 %. Im Gegensatz dazu weist die 6,6 kW-Anlage schon bei ca. 1,2 kg Trocknungsgut einen Wirkungsgrad von 57 % auf. Ein Nachteil der 6,6 kW-Anlage ist das unterdimensionierte Abluftsystem, das bewirkt, dass bei größeren Massen an Trocknungsgut der Wasserdampf nicht schnell genug abtransportiert wird und an den Wänden der Anlage kondensiert.

### ***Mechanische Eigenschaften***

Im Rahmen des Projektes wurden neben Dämmplatten aus reinen Buchenfasern auch Dämmplatten auf Basis von Buchen- und Küstentannenfasern in Mischung hergestellt und auf ihre Festigkeit untersucht. Als Bindemittel kam Kartoffelpülpe<sup>1</sup> (in Form von Nasspülpe und Trockenpülpe) der Firma EMSLANDSTÄRKE zum Einsatz. Hierbei wurden Fasersuspensionen mit Zugabe von 10 %, 20% und 30 % Kartoffelpülpe erzeugt und daraus Faservliese von 30 cm × 50 cm geformt. Die Versuche haben insgesamt gezeigt, dass die Kartoffelpülpe ausgezeichnet an den Fasern anhaftet und zu einer Verbesserung der Festigkeitseigenschaften führt. Die so hergestellten Faservliese wurden anschließend in der Mikrowelle und im Trockenschrank bis zu einer Zielfeuchte von 5 (±3) % getrocknet.

Die Querkzugfestigkeiten der Buchendämmplatten mit unterschiedlich hohen Zugaben von Kartoffelpülpe sind in Abbildung 8 dargestellt. Die Querkzugfestigkeit ist der wichtigste Indikator zur Überprüfung des Faserzusammenhalts in der Platte und deshalb eine wichtige Kenngröße zur Abschätzung der Festigkeitseigenschaften der Platte.

Bei den Untersuchungen stellte sich heraus, dass die Buchendämmplatten bei einem Verzicht auf Bindemittel nur ungenügende Querkzugfestigkeiten ergaben. Aber bereits bei einer Zugabe von 10 % Kartoffelpülpe lagen die Querkzugfestigkeiten in einem akzeptablen Bereich. Bei Zugabe von 20 % Kartoffelpülpe war die Querkzugfestigkeit sogar schon deutlich über vergleichbaren Produkten (z. B. STEICO – STEICOtherm), die bereits auf dem Markt etabliert sind. Allerdings muss hinzugefügt werden, dass viele dieser Produkte aus Nadelholzfasern die geforderten Querkzugfestigkeiten allein schon ohne die Zugabe von Bindemitteln erreichen. Der Grund für die besseren Festigkeitseigenschaften bei diesem Material liegt unter anderem in der größeren Faserlänge der Nadelhölzer, die positive Auswirkungen auf die mechanische Faservernetzung hat und damit den Hauptanteil an den Festigkeitseigenschaften ausmacht.

---

<sup>1</sup> Kartoffelpülpe ist ein Nebenprodukt der Stärkeherstellung aus Kartoffeln. Durch einen Anteil von bis zu 30 % Reststärke und den spezifischen Zellwandbestandteilen des Parenchymgewebes, insbesondere dem Pektin, weist die Pülpe Bindungseigenschaften auf.

Andere Bindemittel auf Basis von technischen Ligninen und Weizenprotein wurden getestet, allerdings konnte bei diesen noch keine ausreichende Fixierung des Bindemittels im Faservlies erreicht und somit auch die Plattenfestigkeit nicht signifikant erhöht werden.

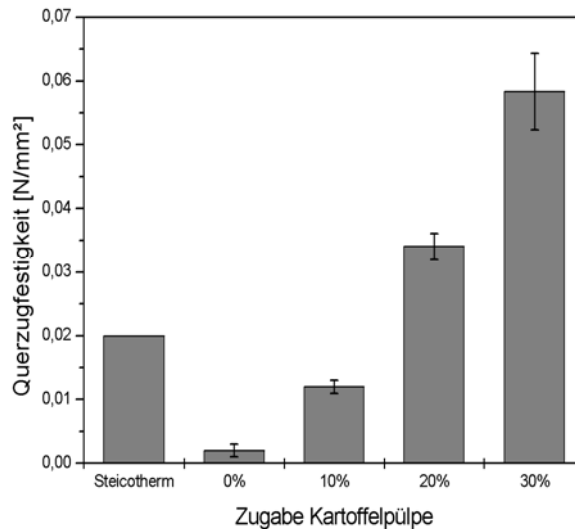


Abbildung 8: Querzugfestigkeit Kartoffelpülpe-gebundener Buchendämmstoffe

### ***Wärmeleitfähigkeit***

Für Holzfaserdämmstoffe ist eine möglichst niedrige Wärmeleitfähigkeit charakteristisch, welche bei industriell hergestellten Platten je nach Rohdichte zwischen 0,039 W/m·K und 0,055 W/m·K liegt (Informationsdienst Holz 2007). Zurzeit wird die Wärmeleitfähigkeit von Dämmstoffen standardmäßig mit dem sogenannten Ein- oder Zwei- Plattenverfahren nach ISO 8302 und/oder DIN EN 12939 ermittelt. Bei diesen Verfahren sind Probegrößen von mehr als 500 mm Kantenlänge, Probendicken von mehr als 5 mm und Messzeiten von einigen Stunden erforderlich. Insbesondere die langen Messzeiten schließen dieses Verfahren für eine schnelle industrielle Prüfung aus.

Um den Wärmeleitwert der Dämmplatten zu bestimmen, wird in der Regel ein Wärmeleitfähigkeitsmessgerät eingesetzt. Da weder am Fachbereich Holzbiologie der Georg-August-Universität noch an HAWK ein solches Gerät vorhanden und die Vergabe eines solchen Auftrages an eine externe Firma sehr teuer ist, wurde mit alternativen Messmethoden versucht, den Wärmeleitwert der Dämmplatten (zumindest im relativen Bezug) zu bestimmen. Ziel ist es festzustellen, ob der Wärmeleitwert  $\lambda$  der Dämmplatten, die mit Bindemitteln hergestellt wurden, sich vom Wärmeleitwert der Dämmplatten unterscheidet, die ohne Bindemittel hergestellt wurden.

Dazu wurde zuerst die Strahlungsleistung einer IR-Lampe als Wärmequelle ermittelt. Anschließend wurden die Dämmplatten in einem definierten Abstand mit der IR-Lampe bestrahlt und der Temperaturanstieg auf der der Strahlungsquelle zugewandten Seite und der (verzögerte) Anstieg auf der der Strahlungsquelle abgewandten Seite aufgenommen. Leider war es aufgrund von Konvektion, Rückstrahlung, inhomogener Oberflächenstruktur und anderer Einflussgrößen nicht möglich,  $\lambda$  oder die Anstiegszeit der Temperatur so genau zu bestimmen, dass man ein relatives Unterscheidungskriterium erhalten konnte.

Für die Messung der Wärmeleitfähigkeit der hergestellten Holzfaserdämmstoffe wurde aus o. g. Gründen das vom WKI entwickelte THB-Verfahren angewandt. Der experimentelle Vergleich mit anderen Messverfahren ergab, dass eine Messunsicherheit unter 3 % erreicht werden kann. Dieser Wert entspricht demjenigen von Plattengeräten nach einschlägigen Normen und ist somit als geeignet für die Untersuchung von Dämmstoffen anzusehen.

Tab. 3: Dichte und Wärmeleitfähigkeit der hergestellten Holzfaser-Dämmplatten

Pülpezugabe [%]	Dichte [g/cm <sup>3</sup> ]	Stabw.	Wärmeleitfähigkeit [W/m·K]	Stabw.
0	0,163	0,004	0,067	0,0005
10	0,2	0,005	0,066	0,0046
20	0,236	0,007	nicht getestet	-
30	0,283	0,006	nicht getestet	-

Die Wärmeleitfähigkeit der im Labor hergestellten Holzfaser-Dämmplatten aus Buchenholz beträgt 0,067 W/m·K, wohingegen Platten mit einer Zugabe von 10 % Kartoffelpülpe und einem Wert von 0,066 W/m·K fast die gleiche Wärmeleitfähigkeit erzielten. Da sich die Wärmeleitfähigkeit eines Stoffes aus dem Wärmeübergang im Festkörper selbst und der Konvektion (also dem Wärmetransport über Luftteilchen in Hohlräumen) zusammensetzt, ist es möglich, dass sich die Kartoffelpülpezugabe – trotz einer Erhöhung der Plattendichte – positiv auf die Hohlraumstruktur und damit auch positiv auf die Wärmeleitfähigkeit auswirkt. Allerdings ist an dieser Stelle anzumerken, dass weitere Untersuchungen zur Überprüfung der Frage notwendig sind, ob sich eine mehr als 10%ige Zugabe von Kartoffelpülpe auf die Wärmeleitfähigkeit auswirken würde.



### ***Temperaturinhomogenitäten, Hotspots und Thermal Runaway***

Grundsätzlich sollte die dielektrische Erwärmung eines homogenen Dielektrikums – in diesem Fall einer Holzfaserdämmplatte – bei homogener Feldstärke und bei vernachlässigbaren Wärmeverlusten zur gleichen Temperatur im gesamten Volumen der zu erwärmenden Stoffe führen. Jedoch sind vor allem letztere Bedingungen kaum zu erfüllen, sodass die dielektrische Erwärmung bei ausreichender Eindringtiefe zu einem Temperaturprofil mit den höchsten Temperaturen im Zentrum des Dielektrikums führt. Darüber hinaus treten bei der Mikrowellenerwärmung sehr große Temperaturgradienten innerhalb der zu erwärmenden Stoffe auf.

Die lokale Aufheizrate hängt quadratisch von der lokalen Feldstärke ab, sodass aus einer inhomogenen Feldstärkenverteilung lokal sehr unterschiedliche Aufheizraten resultieren können. Die Temperaturgradienten werden dabei zum Teil durch Wärmeleitung und durch konvektiven Wärmetransport ausgeglichen. Dabei ist zu beachten, dass bei den Versuchen gerade die geringen Wärmeleitkoeffizienten der Dämmplatten zur Anwendung der dielektrischen Erwärmung führten und somit nur von einem relativ schlechten internen Temperatúrausgleich ausgegangen werden kann.



Abb. 9: Buchendämmplatte mit Bereichen thermischer Zersetzung infolge lokaler Überhitzung (Hotspot)

Lokal erhöhte dielektrische Verluste durch Verunreinigungen, Verdichtungen oder inhomogene Beladungen sowie durch lokale Feldstärkemaxima können zu so genannten „Hotspots“ führen. In diesen Probenbereichen wird infolge der lokal erhöhten Leistungsdichte eine im Vergleich zur restlichen Probe deutlich höhere Temperatur erreicht. Solche Hotspots haben eine typische Größe von wenigen Millimetern und führen zu lokal erhöhten thermischen Beanspruchung des Trocknungsgutes. Grundsätzlich könnte die Temperatur von Hotspots mittels Temperatursensoren bestimmt werden, praktisch ist dies jedoch deshalb nicht durchführbar, weil deren Lage im Dielektrikum kaum vorhersehbar ist. Unter

praxisnahen Bedingungen mit nur einer begrenzten Zahl von Temperatursensoren ist daher meist nur eine verzögerte Erkennung von Hotspots möglich. Durch eine homogene Feldstärke sowie homogene dielektrische Eigenschaften können diese Hotspots aber weitestgehend vermieden werden.

Darüber hinaus wurde in den Versuchen gezeigt, dass bei einer ausreichend hohen Wärmeleitfähigkeit der Probe kaum Hotspots entstehen. Praktisch hat sich dies bei den Dämmplatten mit noch ausreichend hohem Wassergehalt bestätigt.

Die besondere Bedeutung der Hotspots liegt in deren möglicher Ausweitung zum „Thermal Runaway“. Mit zunehmender Temperatur ansteigende dielektrische Verluste im Faservlies können daher zu einem selbstbeschleunigenden Temperaturanstieg in den Hotspot-Bereichen führen. Infolge dieses äußerst kritischen Verhaltens kann sich die Probe in den entsprechenden Bereichen thermisch zersetzen, ein solcher „Thermal Runaway“ kann aber durch einen forcierten internen Wärmeaustausch oder durch die Verringerung des Leistungseintrages verhindert werden. Dazu müssen zunächst jedoch die Hotspots erkannt werden. Dies erweist sich jedoch als äußerst schwierig, da sie meist im inneren der Platte entstehen und daher erst bei Geruchs- oder Rauchentwicklung erkannt werden können. In den Laborversuchen wurde daher versucht, das Entstehen von Hotspots möglichst von vornherein zu verhindern. So wurde die Mikrowellenleistung zum Ende des Trocknungsvorganges drastisch reduziert (auf ca. 25 %) und der Trocknungsvorgang rechtzeitig abgebrochen, um ein Entzünden der Holzfaserdämmplatten zu vermeiden.

### ***Temperaturverteilung***

Um die Temperaturverteilung der MWDA 6,6 kW auf der Vliesoberfläche und im Vlies zu dokumentieren, wurden mittels einer Infrarotkamera Aufnahmen von mikrowellengetrockneten Dämmstoffvliesen erstellt und anschließend mit einer speziellen Software bearbeitet. Die Messungen erfolgten bei einem Restfeuchtegehalt von 10 % und ca. 10 sek nach dem Abschalten der Magnetronversorgung. Das Ziel dieser Messung war es, eventuell auftretende, durch Inhomogenitäten in der Strahlungsverteilung verursachte Temperaturspitzen („Hot Spots“) zu detektieren. eine weitere Zielstellung bestand darin, die Unterschiede in den Trocknungsmechanismen der konventionellen Trocknung und der Mikrowellentrocknung zu ermitteln.

In Abbildung 10 ist die Temperaturverteilung an der Oberfläche eines Dämmvlieses nach Durchlauf durch die MWDA 6,6 kW (Mikrowellentrockner) dargestellt. Die Darstellung zeigt eine weitgehend homogene Temperaturverteilung auf der Oberfläche des Trocknungsgutes.

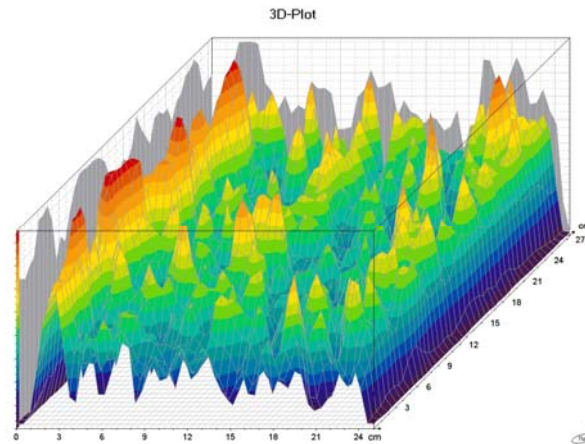


Abb. 10: Infrarotaufnahme einer mikrowellentrockneten Dämmplatte. Die Aufnahmen wurden direkt nach dem Trocknungsvorgang erstellt.

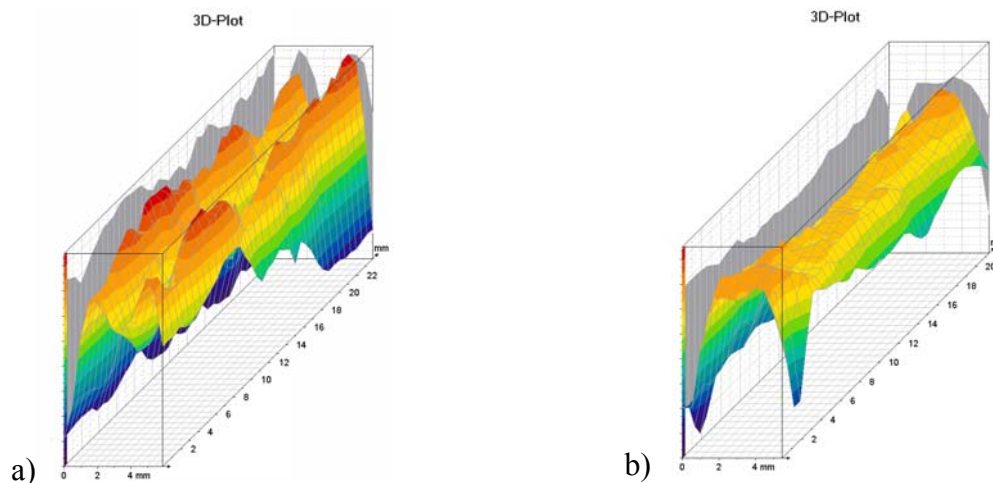


Abb. 11: Temperaturverteilung bei konventioneller Trocknung (a) und Mikrowellentrocknung (b).

Abbildung 11 zeigt hingegen einerseits die Temperaturverteilung in einer Dämmplatte, die im Trockenschrank getrocknet wurde (a), und andererseits die einer Dämmplatte, die in der MWDA 6,6 kW getrocknet wurde (b) (Farben entsprechen relativen Temperaturen). Aus den Abbildungen 10 und 11 wird deutlich, dass mit einer MW-basierten Trocknung im Gegensatz zu einer konventionellen Trocknung das Trockengut von innen nach außen getrocknet wird und es so zu signifikant reduzierten Trocknungszeiten in der Mikrowellentrocknung kommt.