

## **Ergebnisse des Teilprojekt 5.2**

### **Berichtszeitraum:**

01.08.2005 – 31.12.2008

### **Vorhabensbezeichnung:**

Verwertungsorientierte Untersuchungen der Holzart *Fagus sylvatica* (Buche) zur Herstellung von umweltfreundlichen, organisch gebundenen Dämmstoffen (TP 5.2)

### **Am Teilprojekt beteiligte Personen:**

Prof. Dr. A. Kharazipour (Projektleiterin)

Büsgen-Institut

Abt: Molekulare Holzbiotechnologie & Technische Mykologie

Büsgenweg 2

37077 Göttingen

Georg Avramidis (Bearbeiter)

HAWK

Hochschule für Angewandte Wissenschaft und Kunst

Fakultät N

Von-Ossietzky-Strasse 99

37085 Göttingen

## **1) Aufgabenstellung**

Ziel des Teilprojektes war die Eignung von Buchen- und Küstentannenfasern zur Herstellung von Dämmplatten in einem Nassverfahren und anschließender Trocknung im Mikrowellenofen zu untersuchen. Das im Nassverfahren geformte Faservlies wurde durch Wasserentzug auf einen Wasseranteil von ca. 120% vorgetrocknet und mittels Mikrowellentechnik auf eine Ausgleichsfeuchte von 5% endgetrocknet. Die vorhandene Mikrowellentechnik sollte dabei so adaptiert werden, dass eine schnelle und kostengünstige Trocknung der Dämmstoffe ermöglicht wird.

## **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 Büsgeninstitut) und der Fricke und Mallah Microwave Technology GmbH bearbeitet. Es ist dem Förderkonzept von Forschungs- und Entwicklungsvorhaben auf dem Gebiet zur nachhaltigen Waldwirtschaft „Projekt Forst-Holz-Wertschöpfungskette“ der BMBF zuzuordnen. Im Förderkonzept „Forschung zur nachhaltigen Waldwirtschaft 2004“ formuliert das BMBF u. a. folgende Schwerpunkte: „Erschließung von Wertschöpfungspotenzialen entlang der Forst-Holz-Ketten“. Als Priorität wird in diesem Bereich auch die Nutzung von Waldholz im Allgemeinen und die Nutzung von Buchenholz und Buchenfaserstoff zur Produktion neuartiger Verbundwerkstoffe im Speziellen angesehen, die aus schwer vermarktbar und schwachen Buchenholzsortimenten hergestellt werden können. Neue Einsatzbereiche solcher Dämmstoffe und Dämmplatten sind das Baugewerbe, der Innenausbau und der Bereich der Schall- und Wärmeisolierung. Im Einzelnen sollten folgende Oberziele des Förderkonzepts verfolgt werden:

- Der Einsatz von Buchenholzfasern bei der Herstellung hochwertiger Dämmstoffe liefert einen positiven Beitrag zum Klimaschutz durch die weitgehende CO<sub>2</sub>-Neutralität und die damit verbundene Schonung fossiler Ressourcen.
- Die Schaffung eines neuen Betätigungsfeldes für Wirtschaft und Wissenschaft und eine verbesserte Integration technischer Produkte wie Dämmstoffe in die natürlichen Stoffkreisläufe.
- Die Eröffnung einer Einkommensalternative für die deutsche Forstwirtschaft durch die Veredelung und Vermarktung des Buchenfaserstoffes durch die Herstellung neuartiger Dämmplatten.

Es handelte sich um eine innovative, zukunftsorientierte Forschung auf Basis nachwachsender Rohstoffe, über das zunächst schwerpunktmäßig im Labor- und Technikumsmaßstab Untersuchungen zur Erweiterung des bestehenden Wissens betrieben werden mussten. Um das Vorhaben in der Praxis zu etablieren, musste dann das Verfahren in einem industrieähnlichen Maßstab erprobt werden.

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

- Prüfung und Optimierung der Entwässerung des Faservlieses nach einer Nassvliesbildung.
- Optimierung der Trocknung mittels einer Mikrowellentrocknung unter Berücksichtigung unterschiedlicher Temperaturen und Stärken des Dämmstoffes.
- Vergleich des Energiebedarfs und des Wirkungsgrades zwischen konvektiver Trocknung und mikrowellenbasierter Trocknung.
- Untersuchung der Trocknungsdynamik der Mikrowellen getrockneten Nassvliese und Vergleich mit konvektiv getrockneten Nassvliesen.
- Untersuchung der Fasermorphologie der Dämmstoffplatten nach der Mikrowellentrocknung mittels Licht- und Rasterelektronenmikroskopie.
- Untersuchung des Wärmeeintrags und der Temperaturverteilung bei der Mikrowellentrocknung.
- FTIR-Spektroskopie und Vergleich der ungetrockneten Fasern, der Mikrowellen getrockneten Fasern und der konvektiv getrockneten Fasern hinsichtlich der Veränderung funktioneller Gruppen.
- Steigerung der Festigkeit der Buchenholzdämmplatten mittel Zugabe von Kartoffelpülpe.

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

In den vergangenen Jahren konnte sich die Mikrowellentechnik in verschiedenen industriellen Sektoren als effiziente Trocknungsmethode etablieren. 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. Bei der Mikrowellenheizung wird elektromagnetische Energie direkt in das zu erwärmende Material eingekoppelt, dort von Molekülgruppen absorbiert und in Wärmeenergie konvertiert, daraus folgt dass die Temperatur in diesen Materialien viel schneller ansteigt als bei der

konventionellen (konvektiven) Trocknung. Diese Eigenschaften wurden ebenso für das Trocknen von im Nassverfahren hergestellten biologischen Werkstoffen untersucht, wie zum Beispiel Kleie basiertes Verpackungsmaterial. Für die Produktion von Holzfaser basierten Dämmplatten ohne Bindemittel wird nur der Formungsprozess im Nassverfahren angewandt. Die Bindekräfte des Holzes und die Verzahnung der Fasern untereinander resultieren in stabilen Dämmstoffplatten, so dass es möglich ist auf Bindemittel zu verzichten.

Die Trocknung von Holzfaserdämmstoffen bei industrieller Herstellung erfolgt bislang 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 bis 220 °C bei diesem Herstellungsverfahren für 20 mm starke Holzfaser-Dämmplatten üblich. Konvektives Trocknen für Dämmplatten von mehr als 20 mm Dicke erfordert zusätzlichen Zeitaufwand und ist deshalb nicht kosteneffizient und wird industriell nicht ausgeführt. Dickere Dämmplatten werden deshalb durch Verkleben dünnerer Dämmplatten hergestellt.

### *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
- Scheidung W (1998) Entwicklung, Herstellung und Untersuchung wesentlicher Eigenschaften wasserglasgebundener Holzfaserdämmplatten aus Fichtenholz, Dresden
- 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

Die Firma FRICKE UND MALLAH lieferte, nach speziellen im Teilprojekt 5 ermittelten Vorgaben, einen Mikrowellendurchlaufrockner mit dem alle nachfolgenden Mikrowellentrocknungen ausgeführt wurden. Als Vergleich zur herkömmlichen, industriellen Konvektionstrocknung wurden darüber hinaus Trocknungsversuche in einem Labortrockenschrank bei einer Temperatur von 170 °C vorgenommen, was der Trocknungstemperatur bei konventioneller (konvektiver) industrieller Trocknung entspricht.

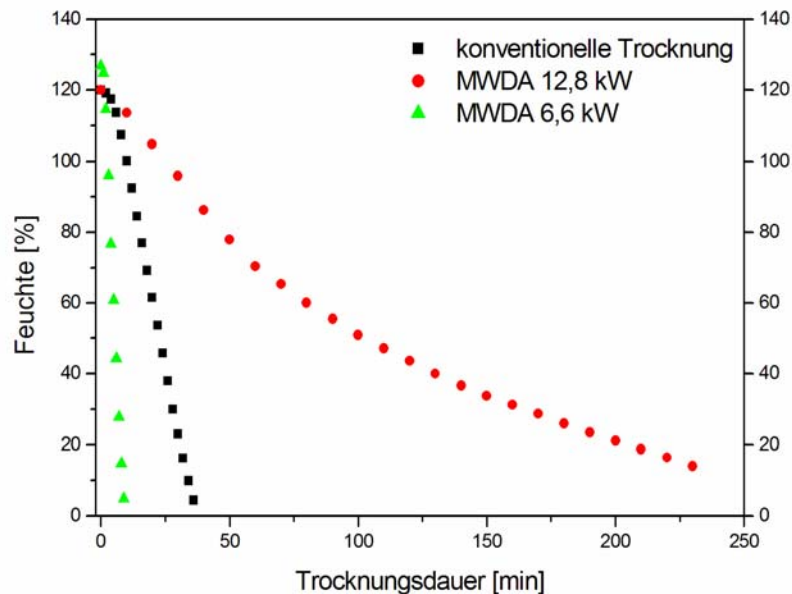
Die Untersuchungen konzentrierten sich auf eine nähere Untersuchung der Trocknungsdynamik und Untersuchungen der Eigenschaften des Trocknungsgutes im Vergleich zu konventionell getrockneten Dämmplatten und zum Ausgangsmaterial.

Außerdem wurden Dämmplatten aus reinen Buchenfasern sowie Dämmplatten auf Basis von Küstentannenfasern hergestellt und auf ihre chemischen Eigenschaften mittels FT-IR-Analyse sowie ihre thermodynamischen Eigenschaften untersucht. Des Weiteren wurden REM-Aufnahmen von konventionell und Mikrowellen getrockneten Dämmstofffasern erstellt, um, bedingt durch die unterschiedlichen thermischen Belastungen des Materials, etwaige Unterschiede in der Morphologie zu festzustellen. Ferner wurden weitere Versuche zur Temperaturverteilung und Trocknungsdynamik durchgeführt.

### 1.1 Vergleich der Trocknungsdynamik im Mikrowellendurchlaufrockner und im Trocknungsschrank

Nach Testreihen die mit dem von der Firma Fricke und Mallah gelieferten Mikrowellendurchlaufrockner (MWDA 12,8 kW) durchgeführt wurden, erwies sich 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 120x65x50 cm<sup>3</sup> auf; außerdem wurde auf die Absorberzonen verzichtet, wodurch die Energiedichte in der Behandlungszone wesentlich erhöht wird. Nachteil ist dass das Gerät, während des Trocknungsvorgangs, durch Gitterbleche an Ein- und Ausgang abgeschlossen werden muss. Einen Durchlauf simuliert man durch hin und herfahren des Trocknungsgutes auf dem Transportband des Gerätes. Trotzdem ist es berechtigt, die erhaltenen Werte auf eine industriell skalierte Anlage (30m-50m) zu extrapolieren, denn die auf einer solchen (offenen) Anlage installierten Absorberzonen sind klein gegen die Dimensionen einer solchen Anlage

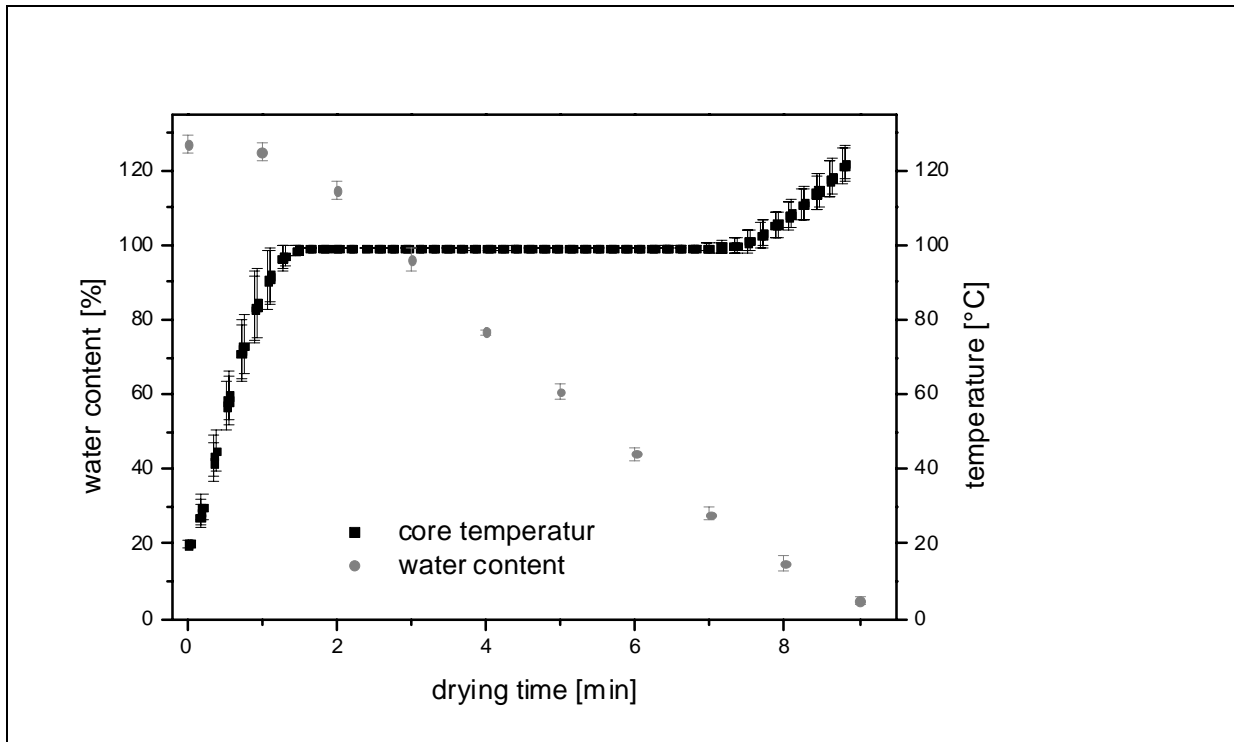
und damit vernachlässigbar. Abbildung 1 zeigt den Trocknungsverlauf eines 40 mm dicken Buchenvlieses mit einer Eingangsfeuchte von ca. 120 % bei herkömmlicher Trocknung im Trockenschrank, bei Trocknung in der MWDA 12,8 kW und bei Trocknung in der MWDA 6,6 kW.



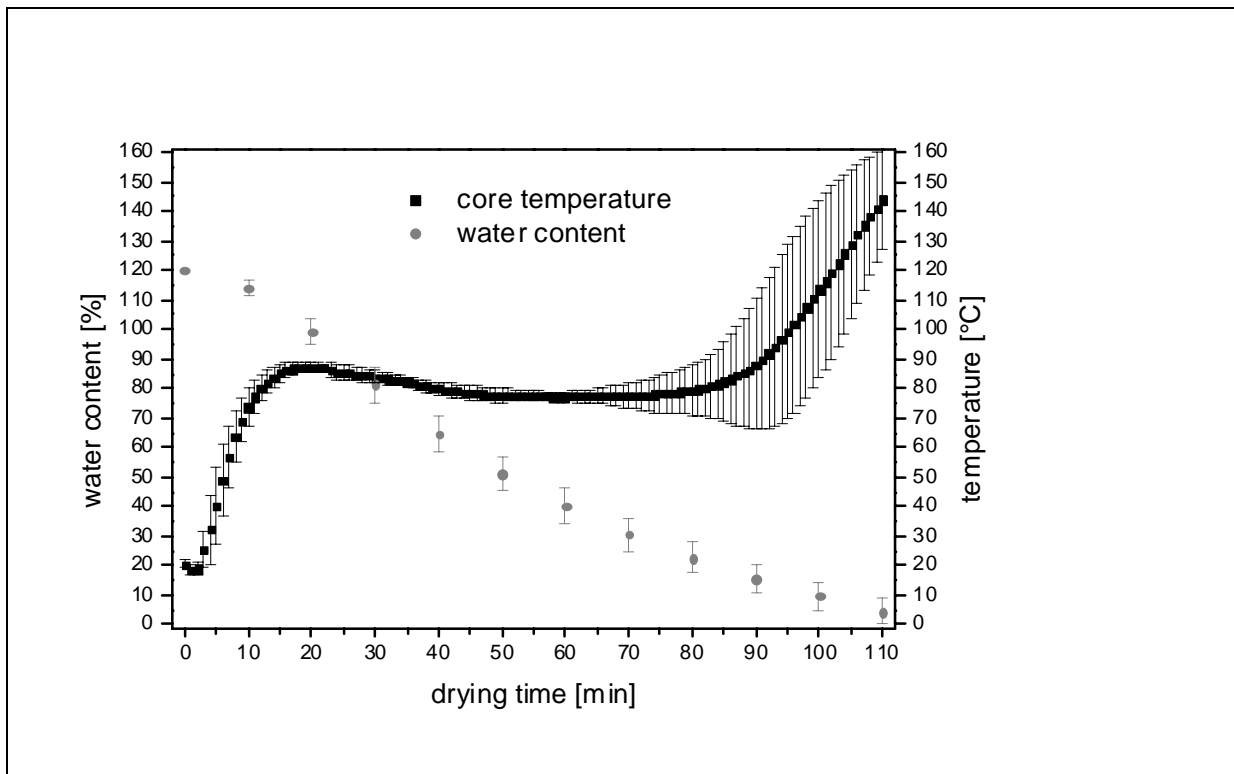
**Abbildung 1:** Trocknungsdauer und Feuchtigkeitsverlauf bei konventioneller Trocknung und MW-Trocknung im MWDA 12,8 kW und im MWDA 6,6 kW.

Abbildung 2 und 3 zeigen den detaillierten Trocknungs- und Temperaturverlauf der Dämmstoffvliese in der Mikrowelle (MWDA 6.6) bzw. im Trocknungsschrank für Dämmstoffvliese von 20 mm Dicke. Die Trocknungskurve für konvektives Trocknen (Abb. 2) (Trockenschrank) zeigt einen exponentiellen Abfall, die Trocknungsrate verminderte sich mit fortschreitender Zeit. Der Trocknungsprozess ist nach 110 min abgeschlossen. Die Kerntemperatur erreicht nach 20 min ein Maximum von 87 °C. Mit fortschreitender Trocknung fällt die Temperatur auf 77°C durch den isolierenden Effekt der trockenen Fasern und den Kühlungseffekt der Evaporation. Nach 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 2:** Feuchtigkeitsverlauf und Kerntemperatur bei Mikrowellentrocknung



**Abbildung 3:** 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, 40 und 50 mm Dicke durchgeführt. Tabelle 1 fasst die Ergebnisse dieser Versuche zusammen. In allen Fällen war es möglich die Dämmplatten in einem Bruchteil der Zeit zu trocknen, welcher für konvektiv getrocknete Dämmplatten nötig ist. So ist es möglich, mittels Mikrowellentechnologie, Dämmplatten von mehr als 20 mm Dicke herzustellen, wobei auf das Verkleben dünnerer Dämmplatten verzichtet werden kann. Betrachtet man den Verlauf der Trocknungszeiten mit zunehmender Plattendicke fällt auf, dass der Trocknungsprozess mit zunehmender Materialdicke effizienter wird.

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

**Tabelle 1:** Trocknungszeiten für 20, 30, 40 und 50 mm Plattendicke.

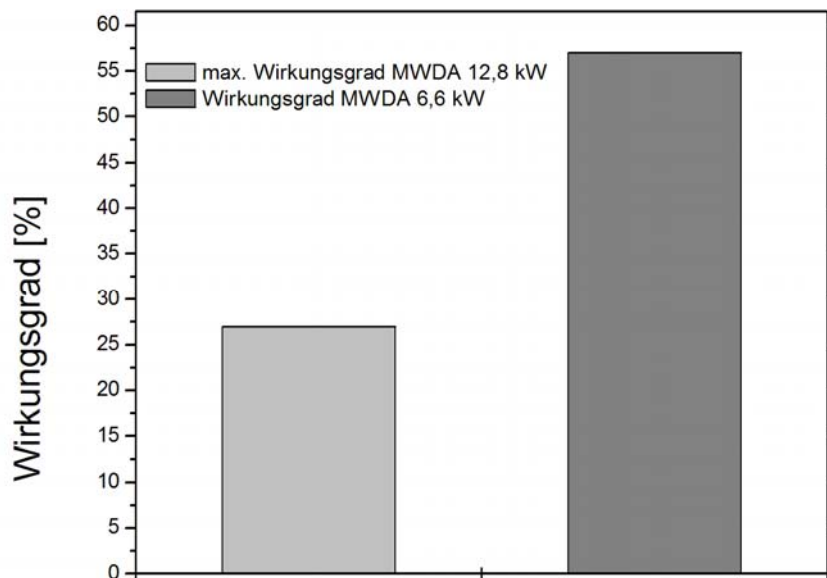
## 1.2 Wirkungsgrad

In Abbildung 4 ist der Wirkungsgrad der MWDA 12,8 kW und MWDA 6,6 kW dargestellt. Der Wirkungsgrad ist der Quotient 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 mittels eines an der HAWK gebauten Leistungsmessgerätes erfasst, die Leistung zur Aufheizung bzw. Verdampfung wird aus der Menge des verdampften Wassers berechnet:

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

Der Wirkungsgrad der MWDA 6,6 kW ist mit 57% mehr als doppelt so groß wie der der MWDA 12,8 kW. Dabei ist zu beachten 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 auf 11%,

während die 6,6 kW Anlage schon bei ca. 1,2 Kg Trocknungsgut einen Wirkungsgrad von 57% aufweist.



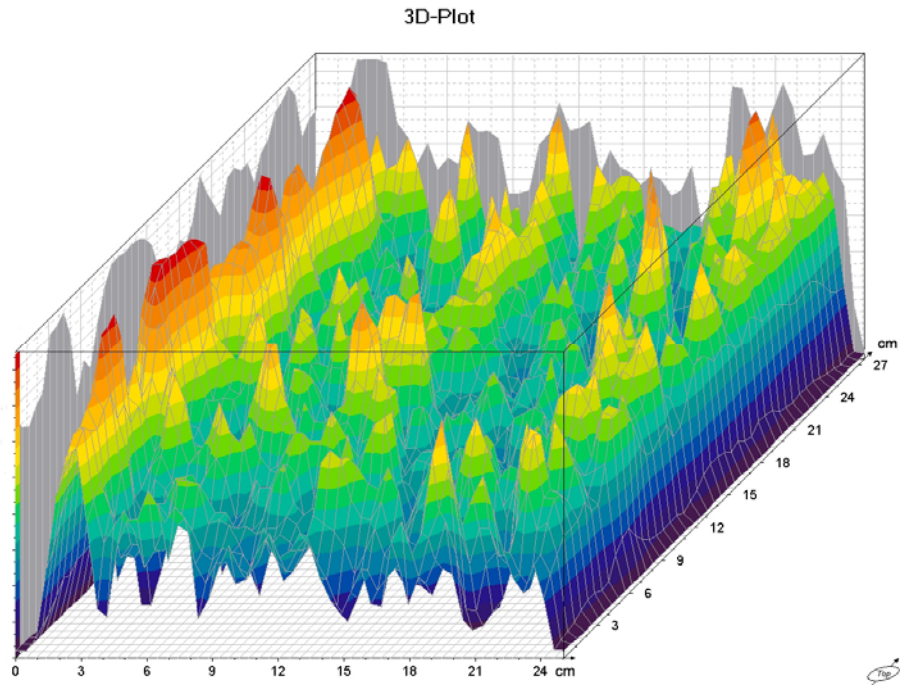
**Abbildung 4:** Wirkungsgrade der MWDA 12,8 kW und der MWDA 6,6 kW.

Der totale Energieverbrauch der 6,6 KW Anlage für die Trocknung von 20 mm dicken Dämmstoffvliesen lag bei 4700 KJ pro Kilogramm verdampften Wassers, was im Bereich des Energieverbrauchs der Trocknung für typische industrielle (konvektive) Durchlauftrockner liegt.

### 1.3 Temperaturverteilung

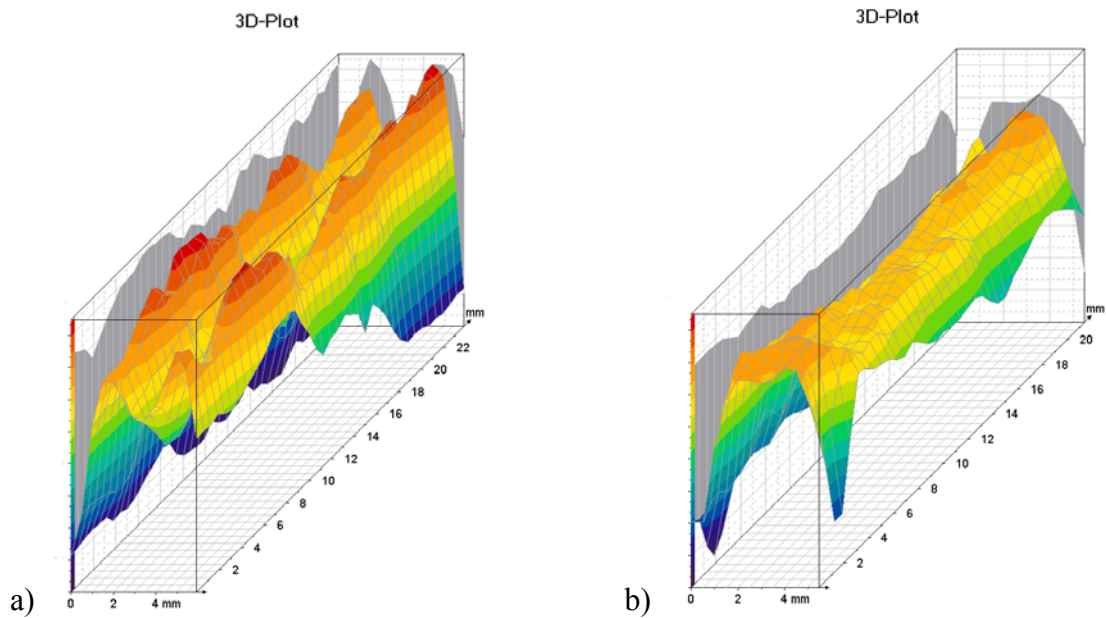
Um die Temperaturverteilung der MWDA 6,6 kW auf der Vliesoberfläche und im Vlies zu dokumentieren, wurden mittels einer Infrarotkamera Aufnahmen von mikrowellengetrockneten Dämmstoffvliesen erstellt und anschließend mit einer speziellen Software bearbeitet. Die Messungen erfolgten bei einem Restfeuchtegehalt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

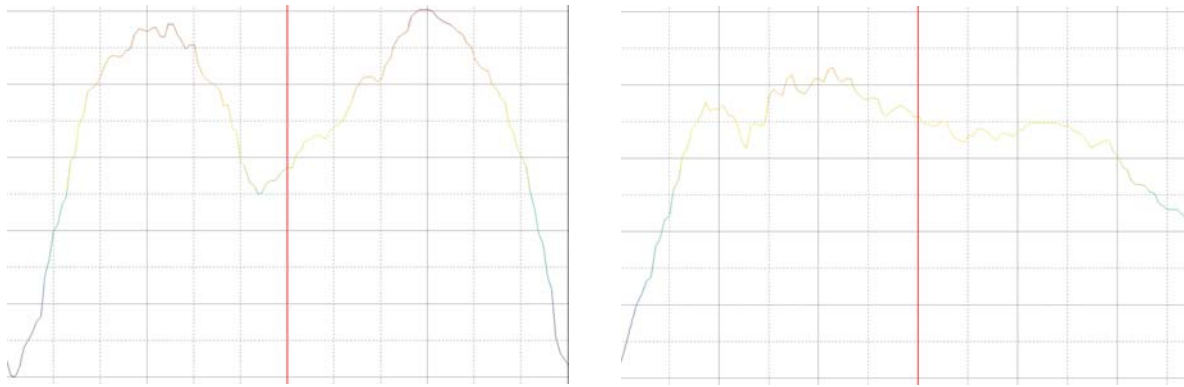
In Abbildung 5 ist die Temperaturverteilung an der Oberfläche eines Dämmvlieses nach Durchlauf durch die MWDA 6,6 kW dargestellt.



**Abbildung 5:** Infrarotaufnahme einer mikrowellengetrockneten Dämmplatte. Die Aufnahmen wurden direkt nach dem Trocknungsvorgang erstellt.

Die Darstellung zeigt eine weitgehend homogene Temperaturverteilung auf der Oberfläche des Trocknungsgutes.





**Abbildung 6:** Temperaturverteilung bei konventioneller Trocknung (links) und Mikrowellentrocknung (rechts).

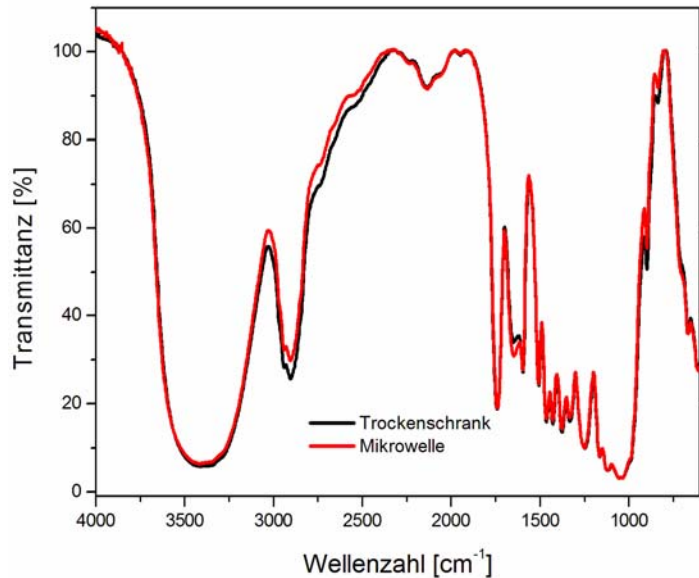
Abbildung 6 zeigt die Temperaturverteilung in einer Dämmplatte die im Trockenschrank getrocknet wurde (a) und einer Dämmplatte die in der MWDA 6,6 kW (b) getrocknet wurde (Farben entsprechen relativen Temperaturen). Darunter sind die entsprechenden Temperaturprofile im Querschnitt dargestellt. Damit wird deutlich dass mit einer MW-basierten Trocknung das Trockengut von innen nach außen getrocknet wird und so zu signifikant reduzierten Trocknungszeiten führt.

#### 1.4 FT-IR-Analyse

Im Rahmen dieses Projektes wurde untersucht ob Unterschiede zwischen herkömmlich getrockneten und mikrowellengetrockneten Vliesen erkennbar sind, zusätzlich wurde unbehandeltes Grundmaterial im Hinblick auf eine signifikante Änderung beim Trocknungsvorgang untersucht.

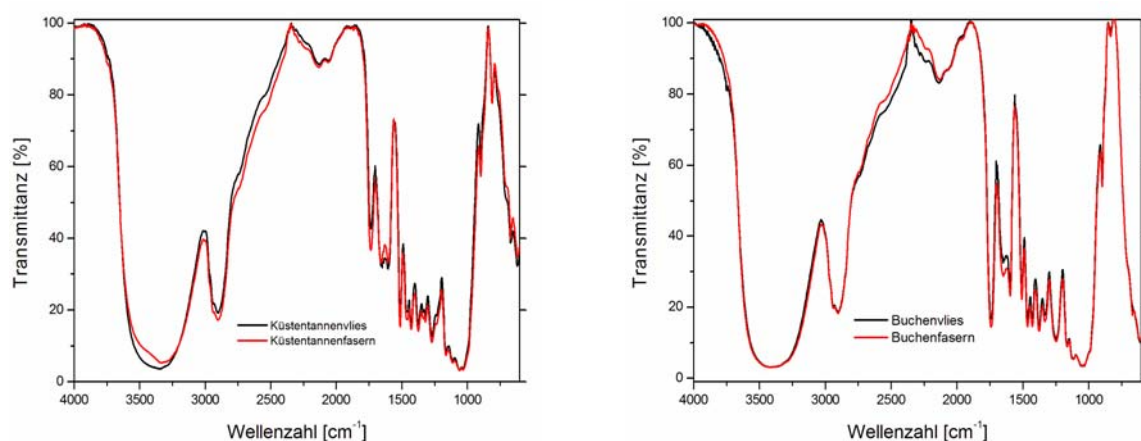
##### *Probenpräparation und Auswertung:*

Für die Probenpräparation werden 1mg Fasern mit 300mg in einem Achatmörser gemahlen und innig vermischt. Die so hergestellte Mischung wird in eine Pressform überführt und für 2 min einer Kraft von ca.  $10^5$  N ausgesetzt. Danach werden die so hergestellten Proben in Transmittanz 100-mal gescannt. Eine Linie entspricht dem Mittel aus 5 Messungen. Die so erhaltenen Spektren werden mit Hilfe einer Auswertesoftware einer Basislinienkorrektur unterzogen und normalisiert, dadurch ist ein direkter Vergleich der Spektren möglich.



**Abbildung 7:** IR-Spektren von konventionell und MW-getrockneten Dämmstoffvliesen.

Abbildung 7 zeigt die IR-Spektren von konventionellen und MW-getrockneten Dämmstoffvliesen (Buche). Die Absorptionsbanden bei  $2900\text{ cm}^{-1}$  und  $890\text{ cm}^{-1}$  sind der Streck- bzw. Pendelschwingung von Methylgruppen zugeordnet. Deren Abnahme bei der Mikrowellentrocknung und die Zunahme der C-O-Streckschwingung bei  $830\text{ cm}^{-1}$  weist auf eine verstärkte Oxidation des Dämmstoffmaterials (Küstentanne) bei der MW-Trocknung hin. Um eine Beeinflussung des Grundmaterials (Holzfasern) durch eine Mikrowellentrocknung zu untersuchen, wurden auch diese einer FT-IR-Analyse unterzogen.



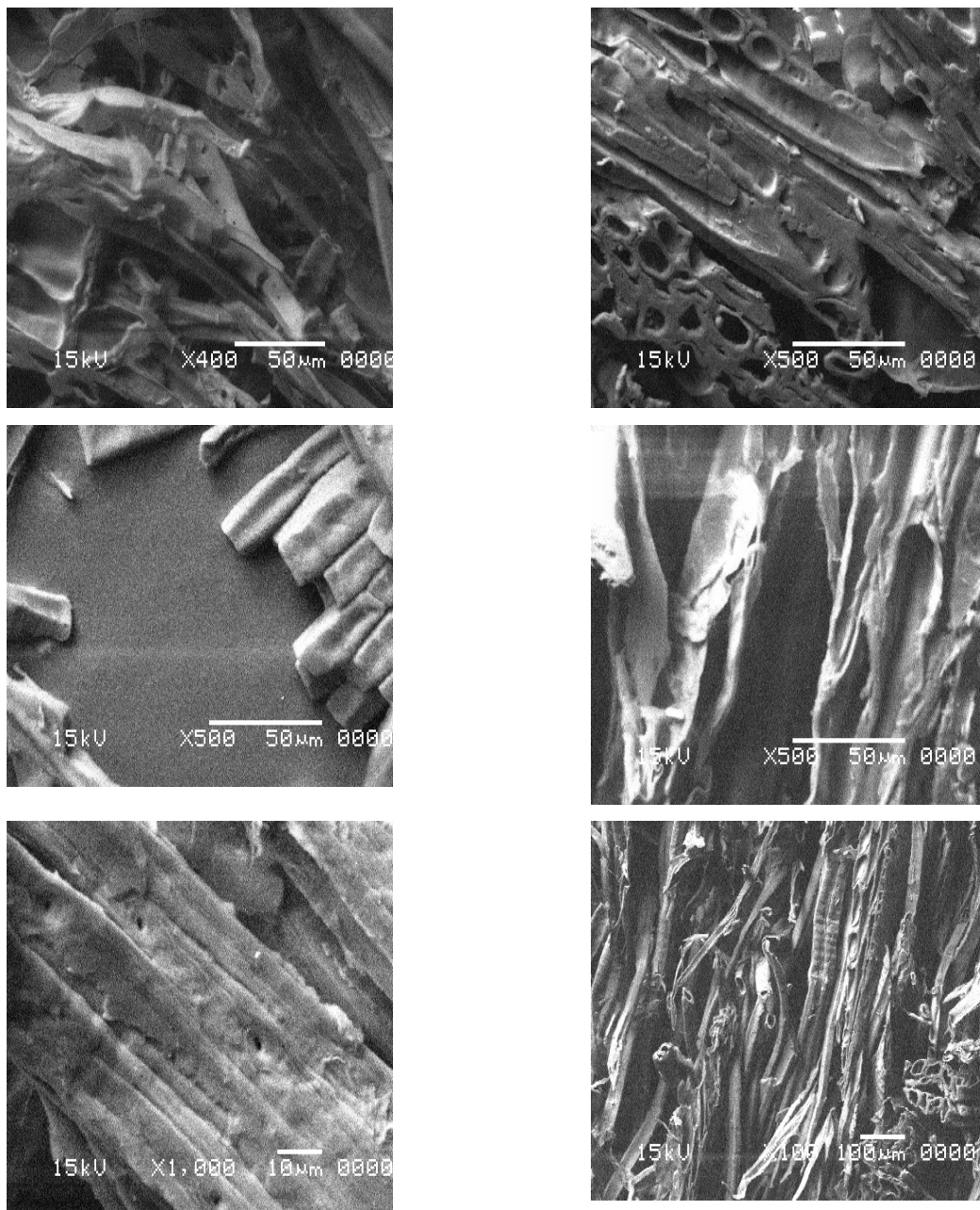
**Abbildung 8:** IR-Spektren von Küstentannen- und Buchenfaseren und Küstentannen- und Buchenfaservliesen die in der MWDA 6,6 kW getrocknet wurden.

Abbildung 8 zeigt Vergleichsspektren von Küstentannen- bzw. Buchenfaseren und Mikrowellentrockneten Dämmstoffvliesen aus denselben Materialien. Dabei zeigten sich

bei Küstentannenfasern ein Abbau von Methylgruppen und eine stärkere Absorption der OH-Banden (bei  $3500\text{ cm}^{-1}$ ) und der C-O-Streckschwingung durch die Mikrowellentrocknung. Die Buchenfasern bleiben bei der Mikrowellentrocknung weitgehend unbeeinflusst.

### 1.5 Untersuchungen mit dem Rasterelektronenmikroskop

Um morphologische Unterschiede in der Faserstruktur von konventionell getrockneter und Mikrowellen getrockneter Buchen- bzw. Küstentannefaser aufzuzeigen wurden Rasterelektronische Aufnahmen der Fasern erstellt (Abb. 9).

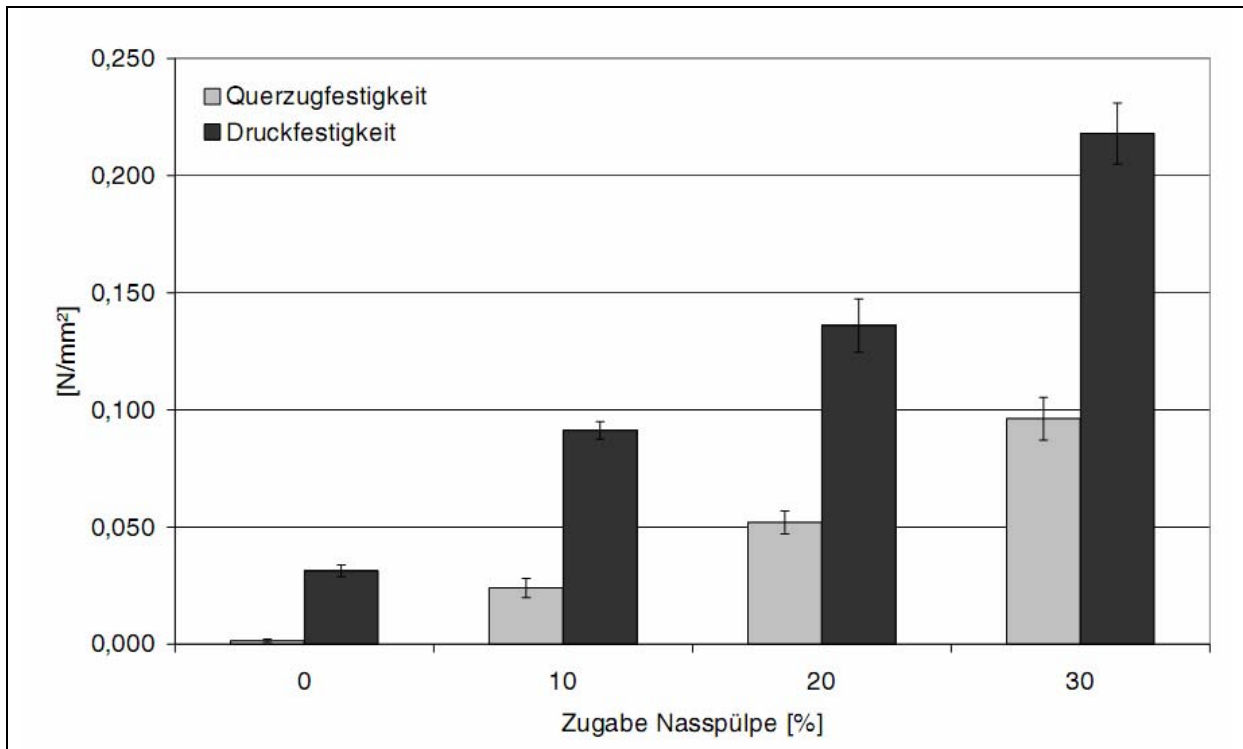


**Abbildung 9:** REM-Aufnahmen von konventionell (links) und MW-getrockneten (rechts) Fasern bei 200-1000facher Vergrößerung

Die MW-getrockneten Fasern wirken deformiert, die konventionell getrockneten Fasern scheinen in ihrer Morphologie weniger beeinträchtigt, was sich auch in einer Änderung der Querkzugfestigkeit bei konventionell und MW-getrockneten Dämmvliesen zeigen sollte. Im weiteren Verlauf der Untersuchungen zeigte sich, dass die Streuung der einzelnen Probenpräparate so groß war, dass auf weitere Untersuchungen mit dem Rasterelektronenmikroskop verzichtet wurde.

### 1.6 Versuche mit Kartoffelpülpe

Aus Buchenholz hergestellte Holzfaser-Dämmplatten unterscheiden sich äußerlich kaum von industriell hergestellten Holzfaser-Dämmplatten aus Nadelholz. Lediglich die etwas dunklere Textur der Buchenfasern lässt auf ein anderes Ausgangsmaterial schließen. Auch die Beimischung von Kartoffelpülpe verändert die äußere Erscheinung der Holzfaser-Dämmplatten nicht. Beim Zuschneiden und Abschleifen der Holzfaser-Dämmplatten aus Buchenholz fiel allerdings der relativ schlechte Faserzusammenhalt der Platte auf. Eine mögliche Ursache dafür kann die recht kurze Faserlänge der TMP-Buchenfasern sein. So stellte die bei der Trockensiebung ermittelte Faserfraktion unter 1 mm mit 70 % den größten Massenanteil dar. Durch Beimischung von 10 % Kartoffelpülpe zur Fasersuspension ließen sich allerdings Holzfaser-Dämmplatten mit einer festeren Struktur und einer deutlichen Verbesserung der Säge- und Schleifeigenschaften herstellen. In Abbildung 10 sind die Querkzugfestigkeit und die Druckfestigkeit bei 10 % Stauchung der hergestellten Holzfaser-Dämmplatten dargestellt. Generell erzielten die Holzfaser-Dämmplatten, die ohne Zugabe von Kartoffelpülpe hergestellt wurden, die geringsten Festigkeitswerte. Die Querkzugfestigkeit erreicht bereits ab einer Zugabe von 10 % Kartoffelpülpe Festigkeiten von industriell hergestellten Holzfaser-Dämmplatten aus Nadelholz.



**Abbildung 10:** Festigkeitseigenschaften von mit Nasspülpe gebundenen Holzfaser-Dämmplatten aus Buchenholz.