



**Berner Fachhochschule**

Hochschule für Architektur, Bau und Holz HSB  
Burgdorf, Biel

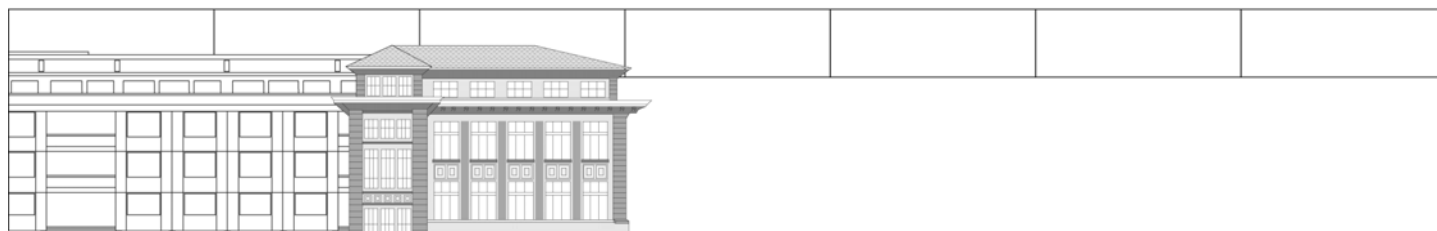
Abteilung F+E

# Forschungsbericht

## Schlussbericht

### Mikrowellenbehandlung als Alternative zur phytosanitären Hitzebehandlung von Holz: Machbarkeitsstudie

Bericht Nr.	2656-SB-01
Auftrag Nr.	2656. DWH
Klassifizierung	Öffentlich
Gegenstand	Technischer Holzschutz
Datum	13.09.2005



Auftraggeber	BUWAL Eidg. Forstdirektion Fond zur Förderung der Wald und Holzforschung Postfach 3003 Bern
Adresse der Forschungsstelle	Hochschule für Architektur, Bau und Holz HSB Abteilung F+E, Werkstoffe und Holztechnologie Solothurnstrasse 102, CH-2504 Biel Tel / Fax +41 (0)32 344 0 341 / 391
Verfasser	Martin Lehmann et. al.
Abteilungsleiter	Marc-André Gonin
Einheitsleiter	Dr. Frédéric Pichelin

Projektverantwortlicher Dr. Ernst Zürcher

HSB

[www.hsb.bfh.ch](http://www.hsb.bfh.ch)



## ABSTRACT

Keywords: Holzschutz, Mikrowellenbehandlung, Hitzebehandlung, ISPM 15, Thermographie, Durchlaufverfahren

Um die Verschleppung von Quarantäneorganismen mittels Verpackungsholz zu verhindern wurde der internationale Standard ISPM 15 erarbeitet. Dieser schreibt vor, dass Holz, welches für Verpackungen verwendet wird, phytosanitär behandelt sein muss. Der ISPM 15 beschreibt zwei Behandlungsverfahren. In der Schweiz ist nur die Hitzebehandlung zugelassen jedoch nicht die Begasung mit Methylbromid. Die wichtigsten Exportländer der Schweiz ausserhalb der EU verlangen eine Behandlung für Holzverpackungen. Für die Hitzebehandlung nach ISPM 15 muss das Holz über den ganzen Querschnitt für 30 Minuten auf mindestens 56°C erwärmt werden.

Im Rahmen dieses Projektes wurden die technische und wirtschaftliche Machbarkeit der Mikrowellenbehandlung im Durchlaufverfahren für Verpackungsmaterialien aus Holz untersucht. Die Versuche wurden in einer Multimode Mikrowellenanlage mit einer Betriebsfrequenz von 2,45 GHz durchgeführt. Die Temperaturverteilung an der Oberfläche und im Innern des Holzes wurde mittels einer Infrarot Thermographiekamera gemessen. Die wirtschaftliche Machbarkeit wurde anhand einer Abklärung der Marktsituation und den Energiekosten durchgeführt.

Die Ergebnisse zeigen, dass Holz mittels Mikrowellen in kürzester Zeit über das gesamte Volumen erwärmt werden kann. Die Aufheizphase für 50 mm dicke Klotzbretter liegt bei ein bis zwei Minuten. Diese Aufheizphase dauert bei den momentan angewandten, konventionellen Verfahren mehrere Stunden, hierzu kommt noch die Aufwärmzeit der Trocknungskammer auf die Solltemperatur. Eine weitere Reduktion der Behandlungszeit scheint möglich zu sein, da zu erwarten ist, dass die Mikrowellen einen direkten Einfluss auf die Insekten haben. Dies wurde im Rahmen dieses Projekts jedoch nicht untersucht. Die technische Machbarkeit der Hitzebehandlung in einer Mikrowellenanlage mittels Durchlaufverfahren wurde im Rahmen dieses Projektes bewiesen, eventuell in Kombination mit dem konventionellen Verfahren. Die Wirtschaftlichkeit kann in anbeacht der momentanen Marktlage in der Schweiz zunächst nicht garantiert werden. In Ländern mit tieferen Energiekosten könnte die Methode jedoch durchaus auch wirtschaftlich interessant sein.

Keywords: timber preservation, microwave treatment, heat treatment, ISPM 15, thermography, online treatment

In order to prevent the distribution of harmful invasive alien species (pests and pathogens) with solid wood packing materials (SWPM), the international ISPM 15 standard was developed. This standard requires a phytosanitary treatment of all SWPM. The ISPM 15 describes two different methods: The heat treatment and the fumigation with methyl bromide. In Switzerland only the heat treatment is allowed. The main export nations of Switzerland, beyond EU borders, demand a phytosanitary treatment of the SWPM. The heat treatment, as described in the standard requires a minimum temperature of 56°C over the whole section of the timber for 30 minutes.

The objective of the project was to conduct a technical and economical feasibility study of online heat treatment, in means of using a microwave applicator. For this research, a multimode microwave applicator (working on the 2.45 GHz frequency) was used. Infrared thermography was used to measure the temperature distribution on the surface and in the specimens. For the economical feasibility study a market study and a calculation of the energy costs was done.

The results showed that it is possible to heat timber with a microwave applicator to the desired temperature within shortest time. In 50 mm boards, the desired temperature was reached after about one to two minutes. In commercially used, conventional heat treatment this takes several hours, not including the time needed to heat up the entire chamber. Further time reductions seem to be possible due to the fact that the microwaves have a deadly impact on insects. The study of this effect was beyond the scope of the project so further research is needed. The results of the project showed that the heat treatment in means of using an online microwave applicator is technically feasible, possibly in combination with conventional heating methods. The economical feasibility could not be proven at present for an implementation in Switzerland. This is due to the high energy costs and the situation on the Swiss timber market. In countries with lower energy costs or with further reducing the treating time, the method could be implemented economically. In order to achieve this goal further research is needed.



**INHALTSÜBERSICHT**

<b>1</b>	<b>AUSGANGSLAGE</b>	<b>4</b>
<b>2</b>	<b>ZIELSETZUNGEN</b>	<b>5</b>
<b>3</b>	<b>FORSCHUNGSPLAN</b>	<b>6</b>
<b>4</b>	<b>PROJEKTORGANISATION</b>	<b>7</b>
<b>5</b>	<b>MATERIAL UND METHODEN</b>	<b>7</b>
<b>6</b>	<b>EXPERIMENTELLE RESULTATE</b>	<b>10</b>
<b>7</b>	<b>WIRTSCHAFTLICHKEITSANALYSE</b>	<b>20</b>
<b>8</b>	<b>SCHLUSSFOLGERUNGEN</b>	<b>22</b>
<b>9</b>	<b>BESTIMMUNGEN ZU DIESEM FORSCHUNGSBERICHT</b>	<b>24</b>
<b>10</b>	<b>VERZEICHNISSE</b>	<b>25</b>
	<b>ANHANG A: RESULTATE</b>	<b>27</b>
	<b>ANHANG B: STATISTIK FÜR SCHNITTHOLZPREISE</b>	<b>29</b>
	<b>ANHANG C: STATUS DES ISPM 15 IN DEN BETEILIGTEN LÄNDERN</b>	<b>31</b>
	<b>ANHANG D: PROJEKTBETEILIGTE</b>	<b>33</b>
	<b>SPEZIFISCHE LITERATURRECHERCHE</b>	<b>35</b>

## INHALTSVERZEICHNIS

<b>1</b>	<b>AUSGANGSLAGE</b>	<b>4</b>
<b>2</b>	<b>ZIELSETZUNGEN</b>	<b>5</b>
	2.1 Wissenschaftlich .....	5
	2.2 Technisch .....	5
	2.3 Wirtschaftlich .....	5
<b>3</b>	<b>FORSCHUNGSPLAN</b>	<b>6</b>
	3.1 Arbeitspaket 1: Spezifische Literaturrecherche .....	6
	3.2 Arbeitspaket 2: Technische Vorversuche .....	6
	3.3 Arbeitspaket 3: Messtechnik .....	6
	3.4 Arbeitspaket 4: Regelungskonzept .....	6
	3.4.1 Arbeitsschritt 4.1: Behandlung eines Standardmusters .....	6
	3.4.2 Arbeitsschritt 4.2: Behandlung eines Musters mit variablen Dimensionen und Anfangsfeuchten .....	6
	3.4.3 Arbeitsschritt 4.3: Korrelation zwischen der Oberflächen- und der Kerntemperatur .....	7
	3.5 Arbeitspaket 5: Wirtschaftlichkeitsanalyse .....	7
<b>4</b>	<b>PROJEKTORGANISATION</b>	<b>7</b>
<b>5</b>	<b>MATERIAL UND METHODEN</b>	<b>7</b>
	5.1 Mikrowellendurchlaufanlage .....	7
	5.2 Prüfkörper .....	8
	5.3 Technische Vorversuche .....	9
	5.4 Arbeitspaket 4: Regelungskonzept .....	9
<b>6</b>	<b>EXPERIMENTELLE RESULTATE</b>	<b>10</b>
	6.1 Technische Vorversuche .....	10
	6.2 Messtechnik .....	13
	6.3 Regelungskonzept .....	15
	6.3.1 Behandlung einer Standardprobe .....	15
	6.3.2 Behandlung von Proben variabler Grösse und Feuchte .....	17
	6.3.3 Korrelation der Oberflächen- und Kerntemperatur .....	18
	6.4 Technische Erkenntnisse .....	19
<b>7</b>	<b>WIRTSCHAFTLICHKEITSANALYSE</b>	<b>20</b>
	7.1 Marktstudie .....	20
	7.2 Wirtschaftlichkeit .....	21
<b>8</b>	<b>SCHLUSSFOLGERUNGEN</b>	<b>22</b>
<b>9</b>	<b>BESTIMMUNGEN ZU DIESEM FORSCHUNGSBERICHT</b>	<b>24</b>
	9.1 Umfang des Forschungsberichtes .....	24
<b>10</b>	<b>VERZEICHNISSE</b>	<b>25</b>
	10.1 Tabellenverzeichnis .....	25
	10.2 Abbildungsverzeichnis .....	25
	10.3 Literaturverzeichnis .....	26
	<b>ANHANG A: RESULTATE</b>	<b>27</b>
	<b>ANHANG B: STATISTIK FÜR SCHNITTHOLZPREISE</b>	<b>29</b>

<b>ANHANG C: STATUS DES ISPM 15 IN DEN BETEILIGTEN LÄNDERN</b>	<b>31</b>
<b>ANHANG D: PROJEKTBETEILIGTE</b>	<b>33</b>
<b>SPEZIFISCHE LITERATURRECHERCHE</b>	<b>35</b>
<b>1 MIKROWELLEN</b>	<b>39</b>
1.1 Grundlagen .....	39
1.2 Funktion der Erwärmung.....	40
1.3 Wärme ist Teilchenbewegung.....	41
1.4 Bauteile von Mikrowellenanlagen .....	41
1.5 Vorteile und Risiken der Mikrowellentechnologie .....	43
<b>2 MIKROWELLENTROCKNUNG</b>	<b>44</b>
2.1 Dielektrische Eigenschaften des Holzes' .....	44
2.2 Einflüsse auf die Dielektrizitätskonstante von Holz .....	44
2.3 Holz Trocknung mittels Mikrowellen.....	45
2.4 Lacktrocknung mittels Mikrowellen .....	46
<b>3 EINFLUSS DER MIKROWELLEN AUF HOLZSCHÄDIGENDE INSEKTEN</b>	<b>47</b>
3.1 Dielektrische Eigenschaften von Lebewesen, insbesondere Insekten.....	47
3.2 Technologie zur Verhinderung der Einfuhr holzerstörender Insekten in die USA ....	48
3.3 Dielektrische- und Mikrowellenverfahrenstechnologien zur phytosanitären Behandlung von Verpackungsholz .....	48
<b>4 PASTEURISIEREN/STERILISIEREN MITTELS MIKROWELLEN</b>	<b>48</b>
4.1 Abtötung von Mikroorganismen in Korkzapfen .....	49
4.2 Die Wirkung von Mikrowellen auf luftübertragbare Mikroorganismen .....	49
4.3 Schimmelpilzbekämpfung mittels Mikrowelle .....	49
<b>5 WIRTSCHAFTLICHE MACHBARKEIT</b>	<b>49</b>
<b>6 SICHERHEIT</b>	<b>51</b>
6.1 Norm: Sicherheitsanforderungen für industrielle Mikrowellen-Einrichtungen .....	51
6.1.1 Kennzeichnung .....	51
6.1.2 Schutz gegen Streustrahlung.....	51
6.2 Norm: Sicherheitsabstände.....	51
6.3 Messinstrumente.....	51
<b>7 ZUSAMMENFASSUNG</b>	<b>52</b>
<b>8 VERZEICHNISSE</b>	<b>53</b>
8.1 Abbildungsverzeichnis .....	53
8.2 Tabellenverzeichnis .....	53
8.3 Literaturverzeichnis .....	53

## 1 Ausgangslage

Mit Verpackungsmaterial aus Rohholz sind in den letzten Jahren Quarantäneorganismen verschleppt worden. Jüngste Beispiele dafür sind der asiatische Laubholzbockkäfer (Österreich 2001) und Kiefernholz nematoden *Bursaphelenchus xylophilus* (Portugal, Deutschland 2001) [4] die in Südostasien beheimatet sind. Die Einführung des ISPM-15 Standards [11] durch das Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL) in der Schweiz, der seit Januar 2004 in Kraft gesetzt ist, soll mithelfen, die phytosanitäre Qualität der exportierten Holzverpackungen zu verbessern und dadurch die Ausbreitung schädlicher Organismen zu reduzieren.

Betroffen von dem neuen phytosanitären Standard sind Verpackungsmaterialien aus Holz, wie Kisten, Verschlüge, Trommeln, Paletten sowie ähnliche Ladungsträger, die ganz oder teilweise aus unverarbeitetem\*, massivem Laub- und Nadelholz gefertigt sind.

Der ISPM-15 Standard schreibt vor, dass das Verpackungsholz bzw. das Verpackungsmaterial aus unverarbeitetem Laub- und Nadelholz vollständig entrindet ist und einer phytosanitären Behandlung unterzogen werden muss. Allgemein zulässige Methoden sind die Hitzebehandlung (Kerntemperatur 56 °C während 30 Minuten) oder die Begasung mit Methylbromid. In der Schweiz wird seit Januar 2004 lediglich die Hitzebehandlung angewendet. Zusätzlich zu diesen Behandlungen muss deren korrekte Durchführung durch eine offizielle Pflanzenschutzstelle oder durch eine vom Eidgenössischen Pflanzenschutzdienst zugelassene Kontrollinstanz überwacht und sichergestellt werden.

Die Hitzebehandlung wird aktuell während der gängigen Trocknungsverfahren in Frischluft-Ablufttrockenkammern durchgeführt. Ca. 80% des verwendeten Verpackungsholzes in der Schweiz entspricht laut BUWAL diesen neuen Anforderungen. Trotzdem hat die Einführung des ISPM-15 Standards eine Verteuerung des Verpackungsmaterials aus Holz verursacht, welche von den Betrieben getragen werden muss [5].

Die um den Standard zu erreichen nötigen Hitzebehandlungszeiten setzen sich zusammen aus der Aufheizzeit der Kammer, aus den für verschiedene Anfangstemperaturen und Holzdickenbereiche aufgeführten Werten bis zum Erreichen der Soll-Kerntemperatur und aus den geforderten 30 Minuten. Je nach Holzdicke und Anfangstemperatur kann die Hitzebehandlung zwischen 1 und 15 Stunden dauern [10]. Diese Behandlungszeiten sind verhältnismässig lang, da es sich bei dem angewendeten Hitzebehandlungsverfahren um eine konventionelle Erwärmung in einem geregelten Kammerklima handelt. Die vorgeschlagenen Behandlungszeiten verursachen in der Regel einen höheren Zeit- und Kostenaufwand für die Verpackungsmaterialhersteller. Um die durch die Einführung des ISPM-15 Standards entstehenden Mehrkosten auszugleichen, gilt es nun, eine Alternativ-Methode zu finden, um weiterhin eine wirtschaftliche Herstellung des Verpackungsmaterials aus Schweizer Holz für den Export zu gewährleisten.

Im Entwurf des United States Department of Agriculture, (USDA) [14] über die unterschiedlichen Behandlungen von Verpackungsmaterial aus Holz wird die Mikrowellenbestrahlung als mögliche zukünftige Alternative zur Hitzebehandlung genannt, die weiterer Forschung bedarf, bevor sie als machbare oder wirtschaftliche Methode betrachtet werden kann.

Das Prinzip der Mikrowellenerwärmung basiert wie bei der Hochfrequenzerwärmung auf den dielektrischen Eigenschaften des Holzes. Bei der Mikrowellenerwärmung liegt das Gut im Dipol-Strahlungsfeld, wogegen bei der Hochfrequenzerwärmung das Erwärmungsgut als Dielektrikum zwischen die Platten eines Kondensators gebracht wird. Die Vorteile der Mikrowellentechnik sind bekannt. Im Vergleich zu konventionellen Behandlungen (Trocknung, Aushärtung von Klebstoffen, Sterilisation) steigt hier die Temperatur im Werkstück prinzipiell unabhängig von der Ofentemperatur und der Umgebungsluft an. Die Umwandlung von elektrischer Energie in Mikrowellen und die weitere Umwandlung in Wärme ist sehr wirksam. Verzögerungen durch eine Aufheizphase finden praktisch nicht statt und die Bedingungen können über die elektrische Leistung schnell geändert und überwacht werden. Die Mikrowellenenergie kann in einem Prozess gezielt in einem dafür notwendigen Zeitfenster eingesetzt werden. Die Erwärmung eines Werkstoffes mittels Mikrowellenenergie findet, materialabhängig, von Innen nach Aussen statt. Somit ist eine rasche, räumliche Erwärmung der Materialien möglich. Dies kann, abhängig vom Material, eine Energie- und Zeitminimierung bedeuten.

Gemäss dem ISPM-15-Standard [13], der auf dem USDA- Entwurf basiert, werden andere Behandlungen oder Verfahren für Holzverpackungsmaterial zukünftig anerkannt, wenn

---

\* Im Gegensatz zu: *verarbeitetem Holz* = Holzprodukte aus Holzbestandteilen, welche während der Verarbeitung geleimt, erhitzt oder gepresst wurden (Spanplatten, Sperrholz, Furniere, Holzwohle, Sägemehl)



nachgewiesen werden kann, dass sie ein geeignetes Mass an phytosanitären Schutz gewährleisten. Die Mikrowellenbestrahlung wird im ISPM 15 -Standard neben anderen Bestrahlungsmethoden wie Elektronen-, Röntgen- und Gammastrahlen, als mögliche Massnahme zur Anerkennung\* aufgeführt. Sie bleibt unter Beobachtung und neue Forschungsergebnisse können zur Einführung dieser Methode leiten.

Diesbezüglich wurden im Rahmen dieses Projektes die technische und wirtschaftliche Machbarkeit der Mikrowellenbehandlung im Durchlaufverfahren für Verpackungsmaterialien aus Holz für Schweizer Verhältnisse untersucht. Es wurde ein Regelungskonzept für eine Mikrowellenanlage auf Laborebene entwickelt, welches erlaubt, Holz gemäss ISPM-15-Standard qualitätsgesichert mit Wärme zu behandeln. In diesem Zusammenhang wurde parallel zu den wissenschaftlichen Untersuchungen eine Markt- und Wirtschaftlichkeitsstudie durchgeführt. Durch die Mikrowellenbehandlung wurde parallel zur Erwärmung die Holzfeuchte über das gesamte Volumen reduziert, was das Risiko eines Befalls durch Holzpilze minimiert. An dieser Stelle ist jedoch explizit zu erwähnen, dass im vorliegenden Projekt nicht die Mikrowellentrocknung von Holz, sondern lediglich die Möglichkeit der Wärmebehandlung von Holz mittels Mikrowellen zur Erreichung des ISPM-15 Standards untersucht wurde.

## 2 Zielsetzung und Fragen

Das Ziel dieses Projektes ist die Machbarkeit der Hitzebehandlung gemäss ISPM 15 mittels eines Durchlaufverfahren in einer Mikrowellenanlage abzuklären. Hierfür wurden die folgenden Fragestellungen untersucht.

### 2.1 Wissenschaftlich

- Was ist die optimale Messtechnik um die geforderte Kerntemperatur von 56°C über das gesamte Volumen im Mikrowellenfeld während und nach dem Behandlungsprozess zu kontrollieren und aufzuzeichnen?
- Kann durch die Mikrowellenbehandlung die im ISPM-15-Standard geforderte Kerntemperatur von 56°C über das gesamte Volumen erreicht und für 30 Minuten gehalten werden?
- Unter welchen Ausgangsbedingungen wird durch die Mikrowellenbehandlung, nach Einhaltung der vorgeschriebenen Behandlungszeit und Temperatur, über das gesamte Volumen eine Holzfeuchtigkeit < 20 % erreicht, was ein Risiko des Befalls durch Holzpilze minimiert?
- Ist die Frequenz von 2,45 GHz für alle Holzarten am besten geeignet, bzw. gibt es art-spezifische Unterschiede?
- Ferner: mit welcher Methode kann die Holzfeuchtigkeit über das gesamte Volumen nach der Mikrowellenbehandlung effizient gemessen und kontrolliert werden?

### 2.2 Technisch

- Welche Verweilzeiten und welcher elektrische Leistungsverbrauch sind notwendig in Abhängigkeit der Ausgangsholzfeuchte, der Temperatur, der Holzoberfläche, der Holzart und der unterschiedlichen Dimensionen des Holzes zur Erreichung des phytosanitären Standards?
- Gibt es dimensionsspezifische Grenzen bei der Mikrowellenbehandlung?
- Wie muss die Regelungstechnik des Mikrowellenofens konzipiert sein, damit die Mikrowellenbehandlung, in Abhängigkeit der Oberflächentemperatur des Holzes während des Prozessdurchlaufs, so gesteuert werden kann, dass der phytosanitäre Standard energieeffizient erreicht wird?

### 2.3 Wirtschaftlich

- Können auf Grund der Projektergebnisse kürzere Behandlungszeit-Kombinationen als bei der konventionellen Hitzebehandlung definiert werden?
- Ist durch die Mikrowellentechnik, im Vergleich zur konventionellen Hitzebehandlung nach ISPM-15-Standard, eine effiziente und wirtschaftliche Wärmebehandlung von Verpackungsmaterialien aus Holz möglich? Wenn ja, unter welchen Voraussetzungen?

---

\* Andere Massnahmen zur Anerkennung ist im ISPM 15 wie folgt definiert: Andere Behandlungen oder Verfahren für Holzverpackungsmaterial die nachweisbar ein geeignetes Mass an phytosanitären Schutz gewährleisten

- Welcher Anteil am Verpackungsholz ist für inländische Zwecke bestimmt, welcher für den Export?
- Wie gross ist das potentielle Marktvolumen für Mikrowellenanlagen zur Behandlung von Verpackungsholz zum Export?

Später entstanden:

- Gibt es eventuell eine Möglichkeit, Mikrowellenbehandlung und die konventionelle Behandlung zu kombinieren?

### **3 Forschungsplan**

Die Forschungsarbeiten wurden in fünf Arbeitspakete unterteilt. Das Arbeitspaket 4 wurde zusätzlich in drei Arbeitsschritte unterteilt. Für jedes Arbeitspaket und jeden Arbeitsschritt wurden spezifische Ziele definiert. Die Fragen aus Kapitel 2 sind teilweise in mehreren Arbeitspaketen behandelt und in den Arbeitspaketen wird mehr als nur eine Frage behandelt.

#### **3.1 Arbeitspaket 1: Spezifische Literaturrecherche**

Erstellen einer spezifischen, auswertenden Literaturstudie zum Thema Mikrowellenbehandlung von Massivholz bezogen auf die Anforderungen des ISPM-15-Standards. Die allgemeinen Effekte der Mikrowellenbehandlung in Anlehnung an die offenen Fragen des ISPM-15-Standards sind bekannt. Das theoretische Prozessfenster (Aufwärmphase & Temperaturerhaltung) der Wärmebehandlung mittels Mikrowellen kann somit definiert werden.

#### **3.2 Arbeitspaket 2: Experimentelle Vorversuche**

Palettenholz und andere Verpackungsmaterialien aus Holz werden in unterschiedlichen Dimensionen hergestellt. Um den notwendigen Energieverbrauch abschätzen zu können werden technische Vorversuche der Mikrowellenbehandlung mit Kanthölzern für die Fertigung von Einwegpaletten mit den Dimensionen 50 x 150 x 500 mm (Standardprüfkörper) der wichtigsten Holzart Fichte mit definierter Holzfeuchte und Ausgangstemperatur durchgeführt. Die Temperatur des Brettes kann während der Mikrowellenbehandlung über das gesamte Volumen erhöht und die Holzfeuchtigkeit gesenkt werden. Eine einfache Messtechnik wird vom parallel bearbeiteten Arbeitspaket 3 (Messtechnik) übernommen. Der Leistungsverbrauch sowie die Verweilzeit im Mikrowellenofen für den Standardprüfkörper sind am Ende der technischen Vorversuche bekannt.

#### **3.3 Arbeitspaket 3: Messtechnik**

Testen von verschiedenen Temperatur- und Feuchtemesstechniken. Die Kerntemperatur von Standardkanthölzern wie in Arbeitspaket 2 verwendet kann, während oder mindestens direkt nach der Mikrowellenbehandlung gemessen und kontrolliert werden. Die optimale Temperatur- und Holzfeuchtemesstechnik ist definiert.

#### **3.4 Arbeitspaket 4: Regelungskonzept**

Die Regelung der Mikrowellenanlage wird zur Erreichung des ISPM-15-Standards (TK= 56 °C, 30 min) für variable Prüfkörper mit bekannten Feuchtigkeiten und Ausgangstemperaturen angepasst und mittels der in Arbeitspaket 3 definierten Messtechnik überprüft. Die technische Machbarkeit der Mikrowellenbehandlung kann somit abgeklärt werden. Dies erfolgt in unterschiedlichen Arbeitsschritten:

##### **3.4.1 Arbeitsschritt 4.1: Behandlung von Standardmuster**

Durch die Regelung des Mikrowellenofens wird die Kerntemperatur auf 56 °C in Standardprüfkörpern während 30 min gehalten und eine Senkung der Holzfeuchtigkeit auf < 20 % über das gesamte Volumen erreicht.

##### **3.4.2 Arbeitsschritt 4.2: Behandlung von Prüfkörper mit variablen Dimensionen und Anfangsfeuchten**

Durch die Regelung der Mikrowellenanlage wird die Kerntemperatur auf 56 °C in variablen Prüfkörpern während 30 min gehalten und eine Senkung der Holzfeuchtigkeit auf < 20 % über das gesamte Volumen erreicht.

### 3.4.3 Arbeitsschritt 4.3: Korrelation zwischen der Oberflächen- und der Kerntemperatur

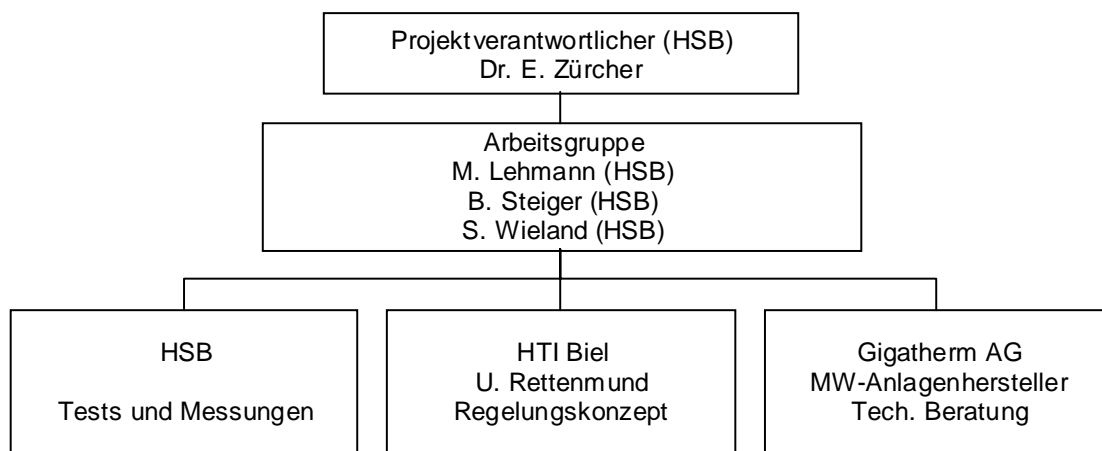
Die Mikrowellenanlage kann mit Hilfe der Messung der Oberflächentemperatur effizient geregelt werden. Das Erreichen der Qualität nach ISPM-15-Standard kann überprüft und nachgewiesen werden.

### 3.5 Arbeitspaket 5: Wirtschaftlichkeitsanalyse

Die Behandlungszeiten zur Erreichung des phytosanitären Standards und der Energieverbrauch zur Behandlung unterschiedlicher Dimensionen sind bekannt und können mit der konventionellen Hitzebehandlung nach ISPM-15-Standard verglichen werden. Die wirtschaftliche Machbarkeit kann bewertet werden. Das Marktpotential für Mikrowellenanlagen ist bekannt.

## 4 Projektorganisation

Das Projekt wurde durch die Abteilung F+E der Hochschule für Architektur, Bau und Holz, HSB in Biel geleitet. Die HSB arbeitete auf der Stufe der Durchführung mit der HTI, Biel und der Firma Gigatherm von Grub (AR) zusammen.



## 5 Material und Methoden

### 5.1 Mikrowellendurchlaufanlage

Die Mikrowellenanlage an der HSB in Biel hat zehn Magnetronen mit einer Nennleistung von je 1 kW und arbeitet mit einer Frequenz von 2.45 GHz. Die Anlage ist als "multimode cavity" konzipiert. Das zu behandelnde Holz wird auf einem Transportband durch die Anlage geführt.

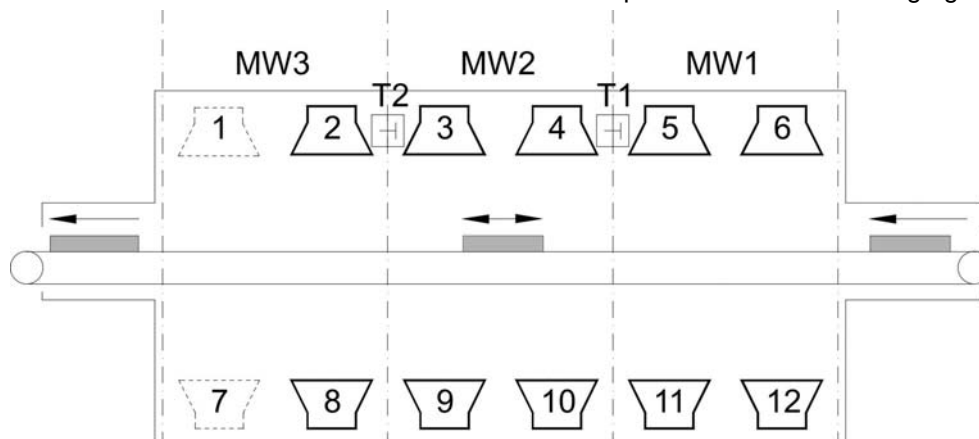


Abbildung 1: Schematische Darstellung der Mikrowellenanlage an der HSB. (die Mikrowellensender 1 und 7 sind nicht montiert; T1 und T2 symbolisieren die Position der IR-Temperatursensoren)

Der Eintritt des Holzes beeinflusst das elektrische Feld im Innern des Ofens. Dies und die Tatsache, dass es sich um einen Multimode Applikator handelt, macht eine Messung oder

Berechnung der Feldstärke sehr aufwändig. Die Feldstärke (E), ist vom Anlagehersteller nicht bekannt und ist schwierig zu modellieren, diese wäre aber nötig um Modelle und theoretische Ansätze über die Erwärmung des Holzes bilden zu können. Die Formeln, welche in der Literatur [2] präsentiert sind, ermöglichen die Berechnung der Temperatur in Abhängigkeit der Bestrahlungszeit unter Berücksichtigung des Energieverlustes durch Feuchtigkeitswanderrungen im Holz. Diese Berechnungen erfordern aber genaue Angaben über die dielektrischen Eigenschaften von Holz und die Eigenschaften der Mikrowellenanlage, insbesondere ist es nötig die modes („Mikrowellenfeldtopographie“), welche sich in der Anlage bilden zu verstehen, beides ist aber nicht vorhanden. Des Weiteren ist die dielektrische Erwärmung kein statischer sondern ein dynamischer Vorgang. Die Ladung in der Mikrowellenanlage hat einen Einfluss auf das Mikrowellenfeld, dieses hat wiederum einen Einfluss auf die Ladung. Im Falle von Holz ist dies nicht nur eine Erwärmung sondern auch eine temperaturbedingte Änderung der dielektrischen Eigenschaften, was wiederum einen Einfluss auf das Mikrowellenfeld hat. Aus diesen Gründen wurde auf eine Modellierung der Erwärmung des Holzes verzichtet, insbesondere da sich der Temperaturverlauf über den Holzquerschnitt mit einfacheren Mitteln visualisieren lässt.

## 5.2 Prüfkörper

Die Versuche wurden an Prüfkörpern aus Fichtenholz (*Picea abies* Karst.) unterschiedlicher Dimensionen, wie in den jeweiligen Arbeitspaketen definiert, durchgeführt. Das Holz für die Versuche wurde von der Firma Zaugg Emballeur AG (Biel) zur Verfügung gestellt. Die Abmessungen der Prüfkörper entsprachen denen gängigen Palettenholzes und wurden basierend auf den Erkenntnissen aus der spezifischen Literaturrecherche festgelegt.

Die Prüfkörper werden in der Mikrowellenanlage behandelt. Die Oberflächentemperatur sowie die Temperaturverteilung in der Mitte und an der Oberfläche der Prüfkörper werden gemessen. Die Oberflächentemperatur so wie die Temperaturverteilung werden mit der Thermographiekamera gemessen und dokumentiert. Die dazu verwendete Kamera ist eine "Flir ThermaCAM® S60". Die Feuchtigkeit wird mittels Darmmethode nach der Wärmebehandlung bestimmt. Die verdunstete Wassermenge wird anhand von Wägungen vor und nach der Mikrowellenbehandlung bestimmt.

Es werden Prüfkörper mit zwei verschiedenen Holzfeuchten behandelt. Zu diesem Zweck wurde ein Teil der Prüfkörper im Klima 20°C, 98% r.h. konditioniert, was eine Holzfeuchte von etwa 28% ergibt. Der andere Teil wurde im Klima 23°C, 53 % r.h. gelagert was eine Holzfeuchte von etwa 10% ergibt. Die Proben wurden vor der Behandlung jeweils bis zur Gewichtskonstanz konditioniert.

Tabelle 1: Prüfkörperserien des Arbeitspaketes 2 und 3

Serie	Anzahl Prüfkörper in der Serie	Ausgleichsfeuchte	Abmessung [mm]
A	20	28%	50/150/500
B	20	10%	50/150/500

Tabelle 2: Prüfkörperserien des Arbeitspaketes 4

Serie	Anzahl Prüfkörper in der Serie	Ausgleichsfeuchte	Behandlung	Abmessung [mm]
A	4	28%	kontinuierlich	50/150/500
B	4	28%	pulsierend	50/150/500
C	4	10%	kontinuierlich	50/150/500
D	4	10%	pulsierend	50/150/500
E	4	10%	kontinuierlich	50/150/1000
F	4	28%	kontinuierlich	50/150/1000
G	4	28%	pulsierend	50/150/1000
H	4	10%	pulsierend	50/150/1000

\* In einer Multimode-Mikrowellenanlage entstehen immer verschiedene modes was zu einer inhomogenen Verteilung der Feldstärke (E) im innern der Anlage führt dies wird mit einer Translation der Ladung kompensiert.

### 5.3 Technische Vorversuche

Basierend auf der in Arbeitspaket 1 durchgeführten spezifischen Literaturrecherche wurde das theoretische Prozessfenster (Aufwärmzeit plus 30 min Haltezeit) der Wärmebehandlung definiert und die Rahmenbedingungen (Abmessung, Klima) für die technischen Vorversuche zur Wärmebehandlung eines Standardkantholzes festgelegt. Hierbei wurde als Erstes untersucht, ob die Position des zu erwärmenden Gutes auf dem Transportband einen Einfluss auf die zu erreichende Temperatur hat. Um sicher zu stellen, dass keine Streuung durch unterschiedliche dielektrische Eigenschaften der Ladung entsteht, wurden Temperaturmessungen an Proben von einem Liter Wasser in einem rechteckigen Glasbehälter (100 x 120 mm) mit konstanter Ausgangstemperatur von 14°C durchgeführt. Diese Messungen geben Hinweise darauf, an welcher Stelle die zu behandelnden Holzproben auf dem Transportband platziert werden sollen, um eine bestmögliche Ausnützung der MW-Strahlung zu erreichen. Bei diesen Versuchen wurde ebenfalls der Einfluss der Position der Magnetronen im Ofen (oben / unten) auf die Endtemperatur des Wassers untersucht. Des Weiteren wurde mittels Thermofaxpapier getestet, ob es auf der Ebene des Transportbandes Stellen in der MW-Anlage gibt welche einer erhöhten Strahlung ausgesetzt sind. Zu diesem Zweck wurde eine die Mikrowellenanlage ausfüllende, auf dem Transportband liegende Melamin-Kunststoffplatte mit befeuchtetem Thermopapier beschichtet und während 30 Sekunden bestrahlt. Das Transportband war bei diesem Versuch ausgeschaltet.

In weiteren Vorversuchen wurde untersucht, ob ein Unterschied in den Temperaturgradienten im Innern der Prüfkörper feststellbar ist, in Abhängigkeit der Position (oben / unten) der eingeschalteten Magnetronen. Ebenfalls wurde bei diesen Versuchen ermittelt, ob eine Abhängigkeit zwischen der Ausgangsholzfeuchte und der erreichten Temperatur nach der Behandlung besteht. Innerhalb dieser Versuchsreihen wurden ausserdem die Messmethoden, welche im parallel laufenden Arbeitspaket 3 definiert wurden, zur Ermittlung der Temperatur- und Holzfeuchte untersucht und für die weiteren Versuche festgelegt, sowie der Temperaturverlauf im Holz visualisiert.

Diese Versuchsreihen wurden mit gleich bleibenden Einstellungen an der Mikrowellenanlage behandelt, um die variablen auf ein Minimum zu reduzieren und klare Aussagen formulieren zu können. Es wurden Standard Versuchskörper (50/150/500mm) mit zwei verschiedenen Holzfeuchten getestet. Die erste Serie wurde im Normalklima (23°C/50%r.F.) gelagert. Die zweite Serie wurde im Klima 20°C und 98% Luftfeuchte gelagert. Nach der Mikrowellenbehandlung wurden die Versuchskörper gespalten und der Temperaturverlauf im Innern des behandelten Holzes mittels Thermografie gemessen. Der Feuchteverlust der Proben während der Mikrowellenbehandlung wurde ebenfalls ermittelt.

### 5.4 Regelungskonzept

Bei den Versuchsreihen in Arbeitspaket 4 werden Proben von unterschiedlicher Grösse und Feuchte behandelt. Die geforderte Temperatur von 56°C wird über 30 Minuten gehalten. Die Leistung der Mikrowellensender wird über ein EDV-gestütztes Programm oberflächentemperaturabhängig geregelt. Bei der Hälfte der zu behandelnden Versuchskörper wird die Leistung der Mikrowellen nach dem Erreichen von 56°C gedrosselt. Bei den anderen Proben werden die Magnetronen beim Erreichen von 56°C von kontinuierlichem auf pulsierenden Betrieb umgeschaltet. Das heisst, die Magnetronen werden nur alle 20 Sekunden für ca. fünf Sekunden mit voller Leistung eingeschaltet. Die Dauer der Bestrahlung wird oberflächentemperaturabhängig gesteuert, mit dem Ziel, dass sie nur möglichst wenig über 56°C liegt. Der Stromverbrauch wird während der Behandlung aufgezeichnet. Bei dieser Versuchsreihe wird speziell die technische Machbarkeit der Behandlung untersucht. Der Einfluss der Eigenschaften der Versuchskörper und der Behandlungsmethode (kontinuierlich / pulsierend) auf den Stromverbrauch wird gemessen und aufgezeichnet, um dadurch Aussagen zur Wirtschaftlichkeit des Verfahrens treffen zu können. Auch bei diesen Versuchen wurde der Wasserverlust während der Behandlung gemessen. Zu diesem Zweck wurde das Holz vor und direkt nach der Behandlung gewogen. Diese Messungen erlauben die Bestimmung, wie gross die Änderung der Feuchte in der Mikrowellenanlage ist. Diese Angaben sind wichtig um den Feuchteverlust der Probe zu bestimmen, was für die Dimensionierung des Ventilators in einer industriellen Mikrowellenanlage benötigt wird. Der Zweck dieses Ventilators ist es die Feuchte aus dem Innern der Mikrowellenanlage abzutransportieren um Kondenswasserbildung zu verhindern. Im Falle von Kondenswasserbildung würde das Wasser und dadurch die Wände der Anlage erwärmt, dies würde zu einer markanten Leistungseinbusse führen.

## 6 Experimentelle Resultate

### 6.1 Technische Vorversuche

Bei den Versuchen mit Wasser und Thermopapier muss berücksichtigt werden, dass die Resultate nur Anhaltspunkte liefern, da die Ladung einen Einfluss auf die Verteilung der Feldstärke in der Anlage hat. Die Temperaturmessungen an Wasserproben, welche im Durchlaufverfahren erhitzt wurden zeigten, dass die Position der Ladung auf dem Transportband keinen signifikanten Einfluss auf die Endtemperatur hat ( $\pm 0.1\text{K}$ ). Die Messungen mit unterschiedlichen Leistungen der Magnetronen entsprachen den Erwartungen. Bei diesen Messungen wurde auch festgestellt, dass bei einer Bestrahlung mit nur den oberen Magnetronen das Wasser weniger erwärmt wurde als wenn nur die unteren Mikrowellensender in Betrieb waren. Dies deutet darauf hin, dass jene Magnetronen einen grösseren Verlust aufweisen. Bei den Versuchen mit dem Thermopapier waren die Positionen der Eintrittsöffnung der Mikrowellenstrahlung teilweise anhand von schwarzen Flecken auf dem Papier sichtbar (Abbildung 2). Da die Behandlung der Prüfkörper im Durchlaufverfahren geschieht, kann davon ausgegangen werden, dass dies keinen Einfluss auf die Ergebnisse hat.



Abbildung 2: Thermopapier, mit einer Melaninplatte als Unterlage, welches während 30 Sekunden in fixer Position mit Mikrowellen in der Anlage der HSB bestrahlt wurde. Die dunklen Stellen (rot eingekreist) zeigen die Position von vier der fünf darunter liegenden Eintrittsöffnungen der Mikrowellen, wobei einer nur schwach und einer gar nicht sichtbar ist.

Die Eindringtiefe der Mikrowellen ins Holz wurde rechnerisch ermittelt (1) [8]. Die verwendeten Werte für die dielektrische Konstanten wurden der Literatur [12] entnommen. Als Eindringtiefe wird die Tiefe bezeichnet an welcher die elektrische Feldstärke auf das  $e^{-1}$  Fache ihres Wertes an der Oberfläche des Werkstückes gesunken ist. Die Berechnung der Eindringtiefe der Mikrowellen ins Holz ergab, dass bei der gewählten Abmessung der Standardprobe eine durchgehende Erwärmung gewährleistet ist. Dies wurde mittels Temperaturmessungen bestätigt. Die Eindringtiefe ist abhängig von der dielektrischen Konstante, diese ist wiederum abhängig von der Mikrowellenfrequenz, der Darrdichte, Feuchte und Temperatur des Holzes. Mit steigender Holzfeuchte und Darrdichte nimmt die Eindringtiefe ab; mit steigender Temperatur nimmt sie zu. Diese Veränderungen sind deutlicher unter dem Fasersättigungspunkt als darüber [12]. Die Berechnungen ergaben, dass bei sägefrischem Holz mit einer hohen Darrdichte bei grösseren Querschnitten Schwierigkeiten entstehen könnten, den Querschnitt bis in die Mitte zu erwärmen. Bei Holz mit einer Darrdichte von  $0.5\text{ t/m}^3$  und einer Feuchte von 100% ist die Eindringtiefe senkrecht zu den Fasern bei  $20^\circ\text{C}$  noch ungefähr 4 cm. Da bei einer Multimode Anlage, wie sie für die Versuchsdurchführung verwendet wurde, die Ladung von allen Seiten bestrahlt wird, können Hölzer, bei welchen die kleinere Abmessung maximal die doppelte Eindringtiefe beträgt, problemlos behandelt werden. Mit einer tieferen Frequenz könnte die Eindringtiefe erhöht werden. Es gilt jedoch zu beachten, dass aus gesetzlichen, technischen und wirtschaftlichen Gründen höchstens noch die Frequenz von 0.915 GHz resp. 0.922 GHz als geeignet betrachtet werden kann. Diese Frequenz ist jedoch teurer in der Generierung als diejenige von 2.45 GHz.

Die dielektrische Konstante von Holz ist primär von der Dichte und der Holzfeuchte abhängig. Artspezifische, strukturelle und chemische Unterschiede haben jedoch auch einen Einfluss auf die dielektrischen Eigenschaften von Holz. Die unterschiedlichen Werte für die Eindringtiefe verschiedener Holzarten können mehrheitlich mit den verschiedenen, spezifischen Dichten erklärt werden.

\*  $e = 2,718281828\dots$

$$\delta_P = \frac{1}{2\alpha} = \frac{1}{\frac{4\pi}{\lambda} \sqrt{\epsilon'_{r\perp} \frac{\sqrt{1 + \tan^2 \delta_{\perp}} - 1}{2}}} \quad (1)$$

$\delta_P$  = Eindringtiefe der Mikrowellen

$$\alpha = \text{Attenuationsfaktor} = \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\epsilon'_{r\perp} \frac{\sqrt{1 + \tan^2 \delta_{\perp}} - 1}{2}}$$

$\lambda$  = Wellenlänge im Vakuum (bei 2.45GHz 122mm)

$\epsilon'_{r\perp} = \frac{\epsilon'_{\perp}}{\epsilon'_0}$  = realer\* Teil der relativen\*\* dielektrischen Konstanten

$\epsilon'_0$  = realer\* Teil der elektrischen Feldkonstanten =  $8.85418 \cdot 10^{-12} \frac{\text{As}}{\text{Vm}}$

$\tan \delta_{\perp} = \frac{\epsilon''_{r\perp}}{\epsilon'_{r\perp}} = \frac{\epsilon''_{\perp}}{\epsilon'_{\perp}}$  = Verlustwinkel

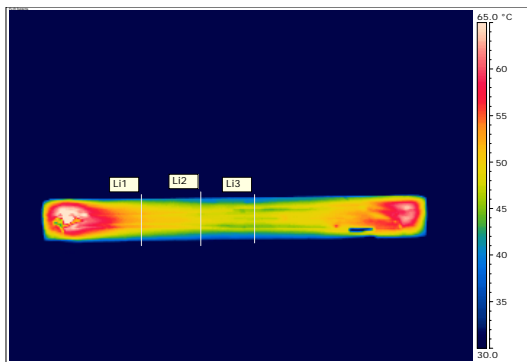
$\epsilon''_{r\perp} = \frac{\epsilon''_{\perp}}{\epsilon''_0}$  = imaginärer\* Teil der relativen\*\* dielektrischen Konstanten

\*die dielektrische Konstante ist eine Imaginäre Zahl  $\epsilon = (\epsilon' - j\epsilon'')$

\*\* $\epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0}$  = relative dielektrische Konstante  $\epsilon_0$  = elektrische Feldkonstante

Die Messwerte der Untersuchung zur Abhängigkeit der Temperaturgradienten in Bezug auf die Position der eingeschalteten Magnetronen zeigten, dass es keinen sichtbaren Unterschied in der Temperaturverteilung über den Holzquerschnitt gibt, wenn nur die unteren, oberen oder alle Magnetronen eingeschaltet sind. Dies ist auf die Konstruktionsart der Anlage zurück zu führen.

a)



b)

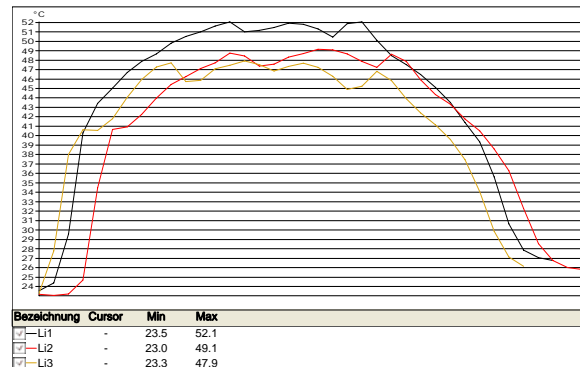


Abbildung 3: Temperaturverteilung über den Prüfkörperquerschnitt nach erfolgter Erwärmung in der Mikrowellenanlage mit nur den oberen Magnetronen im Betrieb. a) Thermografische Aufnahme des gespalteten Prüfkörpers. b) Auswertung der Linien 1 bis 3. Die Unregelmäßigkeiten sind mit der Struktur der gespalteten Oberfläche erklärbar.

Bei den ersten Versuchen der Serien A und B (Tabelle 1) wurde das im ISPM 15 Standard geforderte Halten der Temperatur von 56°C für 30 Minuten vorerst bewusst nicht berücksichtigt, da im ersten Schritt nur das Aufwärmverhalten des Holzes zu beobachten war.

Der Wasserverlust während der Behandlung war sehr gering. Bei den Proben mit einer durchschnittlichen Holzfeuchte von 26,8% war der Verlust bei durchschnittlich 0,7%. Obschon die Stirnseiten der Proben nicht versiegelt waren, kann davon ausgegangen werden, dass der Feuchtigkeitsverlust in der Probenmitte nahezu Null beträgt. Dies lässt sich durch die Probengeometrie und der Behandlungszeit von nur 2,5 Minuten erklären. Die geforderte Temperatur wurde nicht bei allen Proben erreicht. Dies war aber auch nicht das Ziel dieser Versuchsreihen, sondern es sollte der Einfluss der Dichte und Holzfeuchte auf die Endtemperatur untersucht werden. Zu diesem Zweck wurden die Einstellungen an der Mikrowellenanlage nicht variiert um die Resultate vergleichbar zu halten. Bei diesen Versuchen wurde gezeigt, dass es möglich ist, die Temperatur kontrolliert über das gesamte Volumen des Holzes zu erhöhen, ohne dass das Holz dabei sichtbaren Schaden nimmt.

Die Versuchsreihen zeigten zudem, dass die Holzfeuchte einen sichtbaren Einfluss auf die während der Behandlung erreichte Temperatur hat. Je feuchter das Holz vor der Behand-

lung, desto niedriger ist die Temperatur, welche bei gleich bleibender Leistung und Verweilzeit in der Mikrowellenanlage erreicht wird (Abbildung 4).

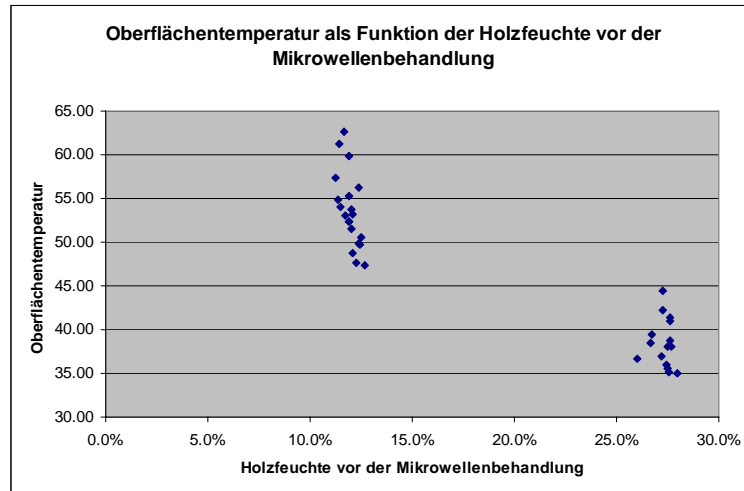


Abbildung 4: Oberflächentemperatur nach einer Mikrowellenbestrahlung von 2,5 min in Abhängigkeit der Holzfeuchte vor der Mikrowellenbehandlung.

Es wurde auch eine Abhängigkeit zwischen der Rohdichte der einzelnen Proben und der erreichten Temperatur festgestellt (Abbildung 5). Je höher die Rohdichte umso tiefer ist die Temperatur, welche bei einer Behandlung mit gleich bleibender Leistung und Verweilzeit in der Mikrowellenanlage erreicht wird. Diese beiden Ergebnisse bestätigen die in der spezifischen Literaturrecherche gewonnenen Erkenntnisse, dass der Feuchtegehalt von Holz einen deutlichen Einfluss auf dessen Dielektrizitätskonstante hat und diese mit zunehmendem Feuchtegehalt und/oder zunehmender Rohdichte grösser wird, was einen deutlichen Einfluss auf das Erwärmungsverhalten des Holzes hat. Es ist anzunehmen, dass diese Abhängigkeit auch über dem Fasersättigungspunkt besteht. Die Abhängigkeit der Temperatur von der Rohdichte kann einerseits damit erklärt werden, dass der Verlustwinkel ( $\text{tg}\delta$ ) mit höherer Darrdichte zunimmt und andererseits mit dem erhöhten Wassergehalt des Holzes mit höherer Rohdichte. Die höhere Holzfeuchte hat zur Folge, dass der Verlustwinkel ( $\text{tg}\delta$ ) grösser ist, was eine erhöhte Energieaufnahme im Mikrowellenfeld mit sich zieht aber auch, dass die spezifische Wärmekapazität und die Masse erhöht wird. Der zweite Effekt ist klar überwiegend.

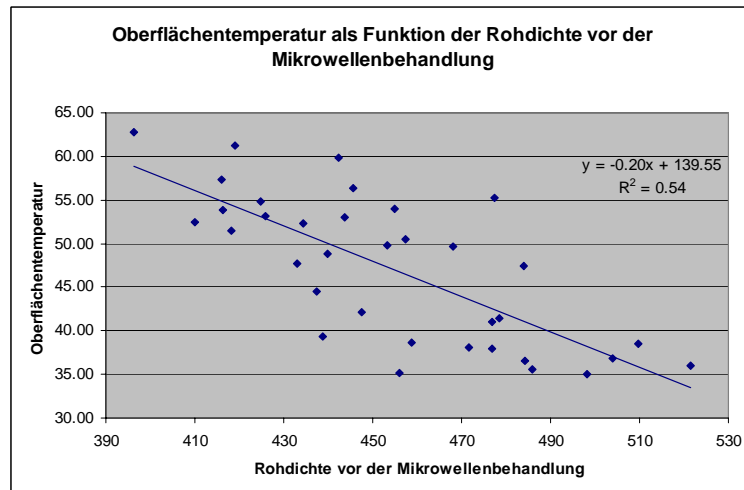


Abbildung 5: Oberflächentemperatur nach einer Mikrowellenbestrahlung von 2,5 min in Abhängigkeit der Rohdichte vor der Mikrowellenbehandlung.

Die Abhängigkeit der erreichten Temperatur von der Darrdichte der einzelnen Proben war nicht so deutlich (Abbildung 6). Dies lässt sich damit erklären, dass der Verlustwinkel von Wasser viel höher ist als der von Holz und die Rohdichte mit steigendem Wassergehalt der Probe steigt. Die Darrdichte hingegen ist unabhängig der Holzfeuchte zur Zeit der Behandlung des Probekörpers.



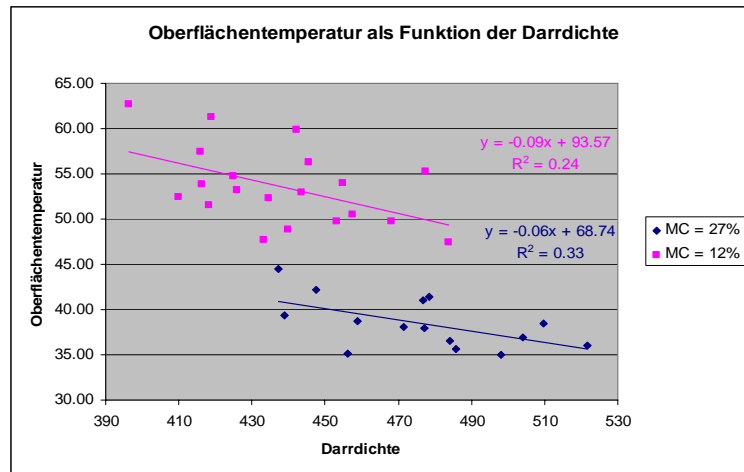


Abbildung 6: Oberflächentemperatur nach einer Mikrowellenbestrahlung von 2,5 min in Abhängigkeit der Darrdichte

## 6.2 Messtechnik

Bei der Temperaturmessung im Mikrowellenfeld muss beachtet werden, dass die Strahlung die Messwerte beeinflussen kann. Zusätzlich sind metallische Sensoren problematisch in einer Mikrowellenanlage. Die oft verwendeten K-Drähte können im MW-Feld nicht eingesetzt werden, da das MW-Feld elektrische Spannungen in den Drähten induziert und so die Messungen verfälscht. Die bereits installierten strahlungsgeschützten Infrarotsensoren (Abbildung 1) messen die Oberflächentemperatur an zwei Punkten in der Anlage (Abbildung 7). Da bei der Behandlung in der Mikrowellenanlage die Versuchskörper einer hin und her Translation ausgesetzt sind (Abbildung 1), befindet sich nicht dauernd eine Probe unter den Sensoren. Da die Oberflächentemperatur des Transportbandes deutlich unter der Zieltemperatur der Behandlung liegt, ist gut erkennbar zu welchem Zeitpunkt eine Probe unter dem Sensor liegt. Die Unregelmäßigkeiten in der holzprobenbezogenen Temperaturkurve haben ihre Ursache in der Struktur des Holzes (Äste, Jahrringe, Harzgallen), in der mikrowellenbedingten Temperaturverteilung in der Ladung (Abbildung 8) und im Einfluss der Mikrowellenstrahlen auf die IR-Sensoren (rote Kreise in Abbildung 7). Die Unterschiedliche Stärke des Einflusses auf die Sensoren 1 und 2 ist auf die Position der Sensoren im Zusammenhang mit den „modes“, welche sich in der Anlage bilden, zurück zu führen.

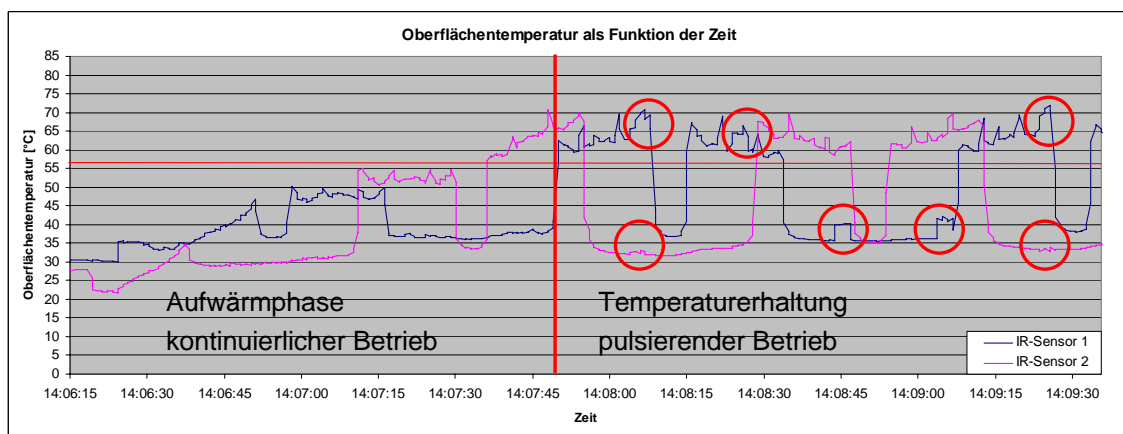


Abbildung 7: Temperaturkurven in Funktion der Zeit zu Beginn der Behandlung mit Aufwärmphase. Die roten Kreise zeigen den Einfluss der Mikrowellenstrahlung auf die IR-Sensoren. (Die tiefen Temperaturen sind Messungen zu einem Zeitpunkt als keine Probe unter dem Sensor lag)

Mittels Thermographiekamera ist es möglich, die Temperaturverteilung an der Oberfläche des behandelten Holzes kurz nach dem Verlassen der Anlage zu messen (Abbildung 8). Zu diesem Zweck muss die Probe aber aus der Anlage genommen werden, was eine kleine zeitliche Verzögerung mit sich bringt und eine dadurch bedingte schwache Abweichung. Die Bilder der Thermographiekamera visualisieren die Temperaturverteilung an der Oberfläche der Probe. Dadurch kann festgestellt werden an welcher Stelle die Temperatur am tiefsten liegt was massgebend ist für die Regelung der Anlage während der ISPM 15 Behandlung. Um die Temperatur-

verteilung im Innern des Holzes zu messen, muss die Probe gespalten werden. Danach ist es nicht mehr möglich, die Behandlung dieser Probe fortzusetzen; dies bedeutet, dass die Kontrolle der Innentemperatur nur mittels Stichproben durchgeführt werden kann.

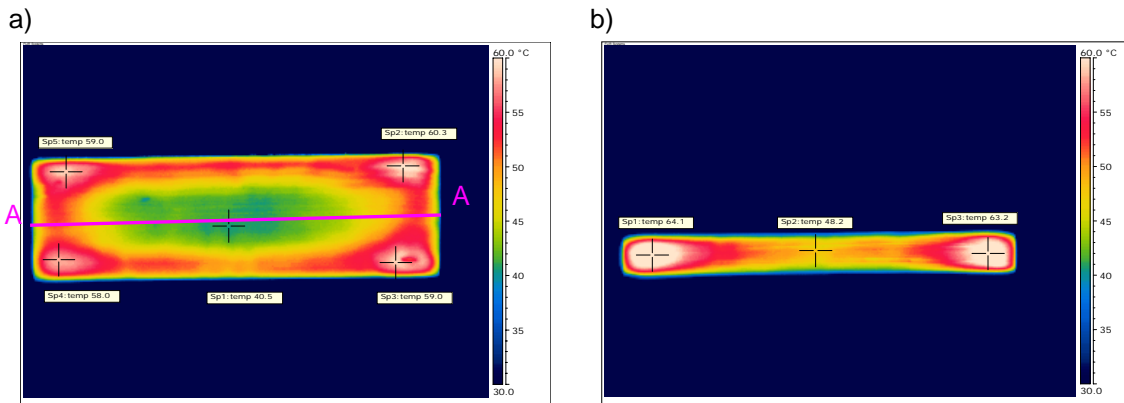


Abbildung 8: Typische Temperaturverteilung nach einer Erwärmung mittels Mikrowellen einer Astfreien Standardprobe aus Arbeitspaket 2. a) Thermographische Ansicht der Oberfläche b) Thermographische Ansicht der gespaltenen Probe (Schnitt A-A)

Faseroptik ist die einzige Temperaturmessmethode, welche unbeeinflusst von Mikrowellenstrahlung ist. Messungen mittels Faseroptik würden die Kontrolle der Innentemperatur an verschiedenen Punkten online während der Behandlung erlauben. Ein Gerät, welches solche Messungen durchführen kann, ist aber mit hohen Investitionen verbunden; diese liessen sich für eine Machbarkeitsstudie im Umfang dieses Projektes nicht begründen.

Für die Bestimmung der Holzfeuchte nach der Behandlung wurde eine Darrprobe aus der Mitte der Versuchskörpers herausgeschnitten. Dies erlaubt, insbesondere bei den 1000 mm langen, Proben die Bestimmung der Holzfeuchte ohne Eindeinfluss.

In diesem Projekt wurde für die Temperaturmessung Thermographie sowie die fix eingebauten IR-Sensoren eingesetzt. Die Messungen der IR Sensoren wurden online aufgezeichnet (Abbildung 11) und während der Behandlung überprüft. Die Thermographiebilder, einer mittels Mikrowelle erwärmten Standardprobe (Abbildung 8a) zeigen die typische Temperaturverteilung eines rechteckigen Körpers, welcher von einer Seite bestrahlt wurde. Die heissen Punkte in den Ecken sind auf den Einfluss des Körpers auf das elektrische Feld in der Mikrowellenanlage zurückzuführen, dies wird auch „Focusing effect“ genannt und ist in der Literatur mehrfach beschrieben [2]. Im Schnitt (Abbildung 8b) ist deutlich zu erkennen, dass die Kerntemperatur höher als die Oberflächentemperatur ist. Auf den Thermografiebildern ist deutlich zu sehen, dass sich die Äste stärker erhitzen als das umliegende Holz; teilweise sind auch die Jahrringe zu erkennen (Abbildung 9). Dies erlaubt es die Kontrolle der Zieltemperatur in der ganzen Probe mittels online Messung der Oberflächentemperatur entlang der Messlinie durchzuführen (Abbildung 9a). Dies gilt für Dicken, welche kleiner sind als die doppelte Eindringtiefe der Mikrowellen ins Holz (1).

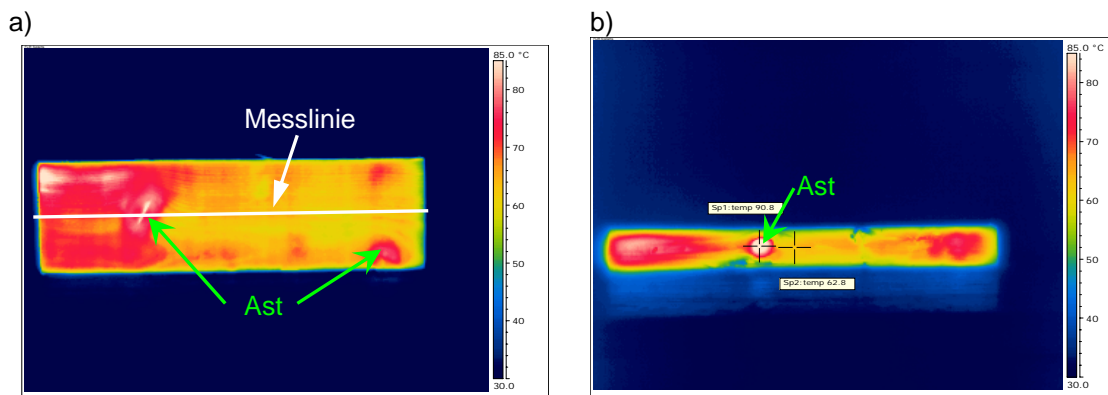


Abbildung 9: Typische Temperaturverteilung nach einer Erwärmung mittels Mikrowellen einer Standardprobe aus Arbeitspaket 2. a) Oberflächentemperatur einer Probe mit Ästen (grüne Pfeile) wobei auch der Verlauf der Jahrringe erkennbar ist. b) Schnitt durch eine Probe mit Ast; die kühlen Stellen, welche optisch wie Einbuchtungen aussehen, sind Holzsprenkel, die vom Holz abstehen.

Für die Bestimmung des Energieverbrauches wurde der Stromverbrauch der ganzen Anlage gemessen. Danach wurde der Strombedarf der einzelnen Komponenten (wie Förderband, Ventilator, etc.) ermittelt, um den Stromverbrauch der Magnetron berechnen zu können.

### 6.3 Reglungskonzept

Wie sich in den Vorversuchen zeigte, ist es möglich, das Erreichen der geforderten Temperatur mittels Messungen an der Oberfläche zu kontrollieren (Abbildung 15). Dazu sind die zwei eingebauten IR Sensoren geeignet (Abbildung 1). Thermografische Aufnahmen der Proben nach der ISPM 15 Behandlung zeigten, dass die Kerntemperatur auch nach der Behandlung höher ist als die Oberflächentemperatur (Abbildung 10). Somit kann das Erhalten der Temperatur während der ganzen Behandlung über die Oberflächentemperatur kontrolliert werden.

Um volle Flexibilität zu gewährleisten und gleichzeitig den Programmieraufwand auf ein erträgliches Mass zu reduzieren, wurde beschlossen, das Reglungskonzept nur teilweise zu automatisieren. Die Intensität der Mikrowellensender und das Transportband wurden manuell über den PC angesteuert. Für eine industrielle Anlage kann dies in einem weiteren Schritt automatisiert werden. Die Messungen wurden automatisiert und online auf dem PC dargestellt, dies ermöglichte eine ständige Kontrolle der Temperatur.

Zu Beginn der Behandlung, in der Aufwärmphase bis über 56°C, wurden die Proben mit voller Mikrowellenleistung bestrahlt. Nach dem Erreichen der Zieltemperatur über die gesamte Probenoberfläche wurde die Leistung reduziert. Dies wurde bei der Hälfte der Proben pulsierend gemacht, das heisst die Mikrowellensender wurden nur alle 20 Sekunden für eine kurze Dauer (ca. fünf Sekunden) mit voller Leistung eingeschaltet. Die Dauer, für welche die Sender eingeschaltet wurden, war abhängig von der Temperatur des Holzes und wurde während der Behandlung angepasst. Bei der anderen Hälfte der Proben wurde die Leistung der Mikrowellensender auf ungefähr 16% bis 12% gedrosselt und die Proben kontinuierlich bestrahlt. Auch bei diesem Verfahren wurde die Leistung während der Behandlung den Temperaturen des Holzes angepasst damit die Probentemperatur immer knapp über 56°C lag (Abbildung 11).

Um eine gleichmässige Erwärmung der Proben zu gewährleisten, wurden die Proben einer Translation ausgesetzt. Zu diesem Zweck wurden die Proben in der Mikrowellenanlage hin und her gefahren; dies ermöglichte ebenso die Messung der Oberflächentemperatur über die gesamte Länge der Proben und es wurde verhindert, dass eine Stelle der Probe immer im Bereich einer erhöhten Leistungsdichte liegt und dadurch überhitzt würde.

#### 6.3.1 Behandlung einer Standardprobe

Die Behandlung 15 der Standardproben (50 x 150 x 500 mm) gemäss ISPM zeigte, dass es möglich ist die geforderte Mindesttemperatur von 56°C während 30 Minuten zu halten ohne dabei das Holz zu überhitzen. Bei diesen Versuchen wurde auch gezeigt, dass die Oberflächentemperatur auch nach der ISPM 15 Behandlung tiefer ist als die Temperatur im Innern der Probe (Abbildung 10).

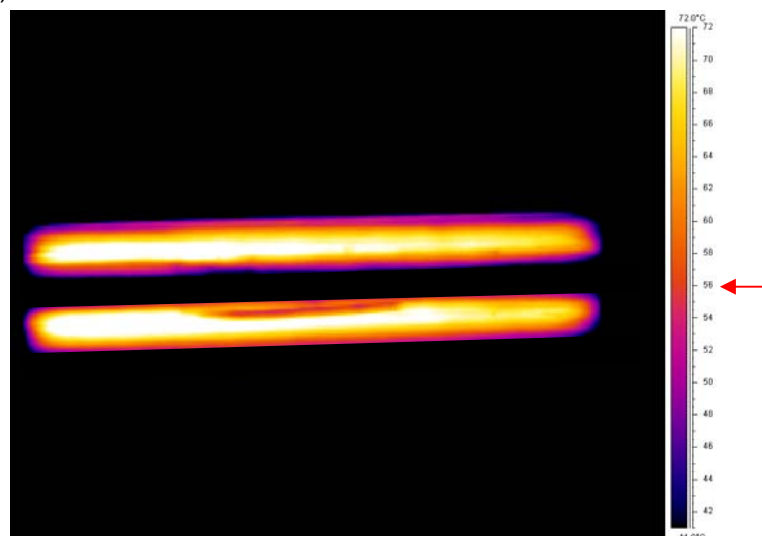


Abbildung 10: Thermographische Aufnahme einer gespalteten Standardprobe nach der ISPM 15 Behandlung mittels Mikrowelle (von beiden Hälften und die Innenseiten zeigend). Es ist deutlich zu sehen, dass das Zentrum der Probe wärmer ist als die Oberflächen.

Sowohl die pulsierende als auch die kontinuierliche aber reduzierte Bestrahlung erwies sich als technisch machbar. Die Temperatur konnte während, den im ISPM 15 geforderten, 30 Minuten über 56°C gehalten werden (Abbildung 11 und Abbildung 12). Das halbautomatisierte Regelungskonzept erwies sich als gute Lösung für den Laborbetrieb.

Die Oberflächentemperaturmessungen zeigten, dass gegen das Ende der Behandlung die Oberflächentemperatur gegen die Hirnflächen der Probe abnimmt (Abbildung 12). Es kann angenommen werden, dass in diesen Zonen die Holzfeuchte durch den erhöhten Wasserverlust durchs Hirnholz tiefer lag als im Zentrum und die Energieabsorption dadurch an diesen Stellen geringer war.

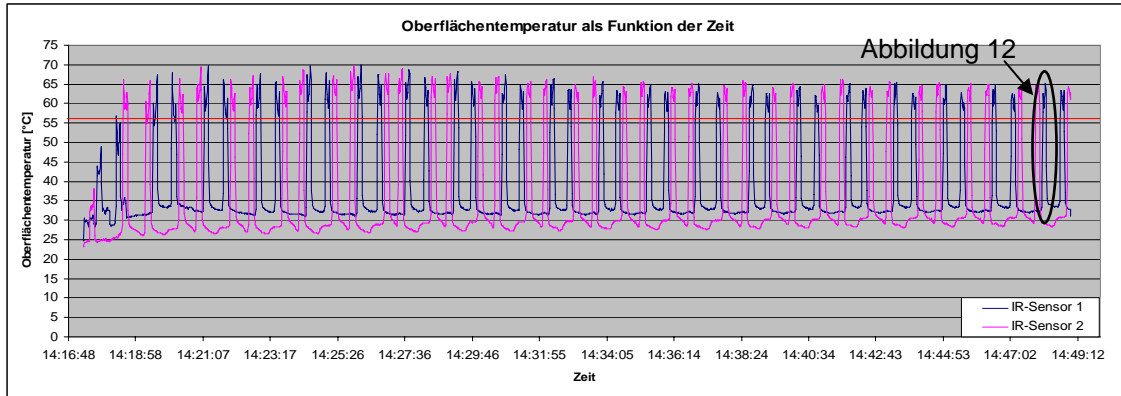


Abbildung 11: Aufzeichnung der Oberflächentemperaturmessung einer Standardprobe während der ISPM 15 Behandlung. Die tiefen Temperaturen sind Messungen zu einem Zeitpunkt, als keine Probe unter dem Sensor lag

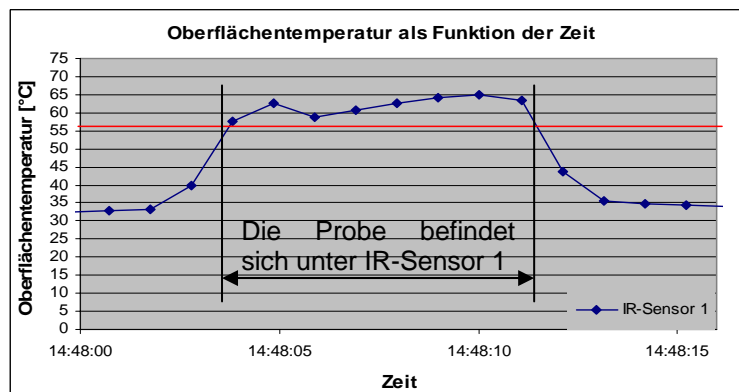


Abbildung 12: Ausschnitt aus der Temperaturkurve des IR-Sensors 1 in Abbildung 11.

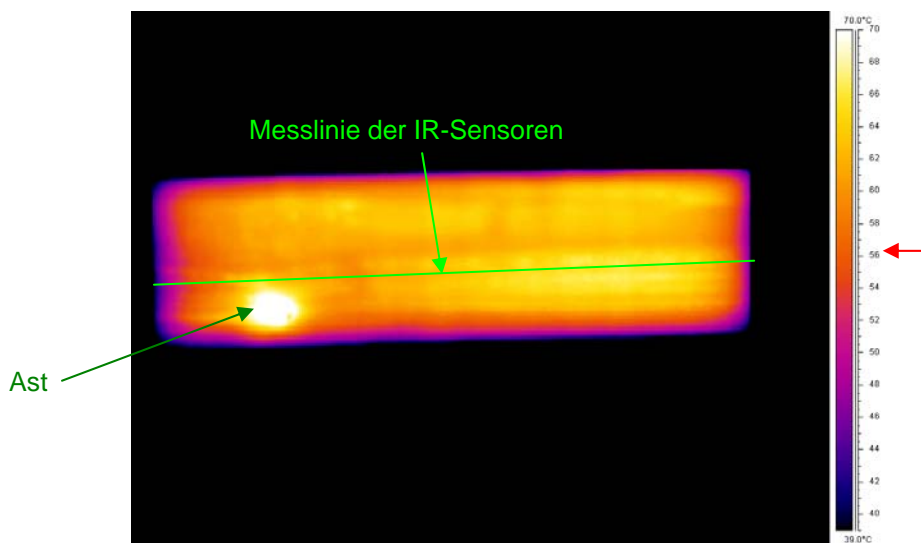


Abbildung 13: Thermographische Aufnahme der Probenoberfläche aus Abbildung 11 und Abbildung 12 nach der ISPM 15 Behandlung mit ungefährem Verlauf der IR-Temperaturmessung. Der Ast bewirkte eine lokal erhöhte Temperatur.

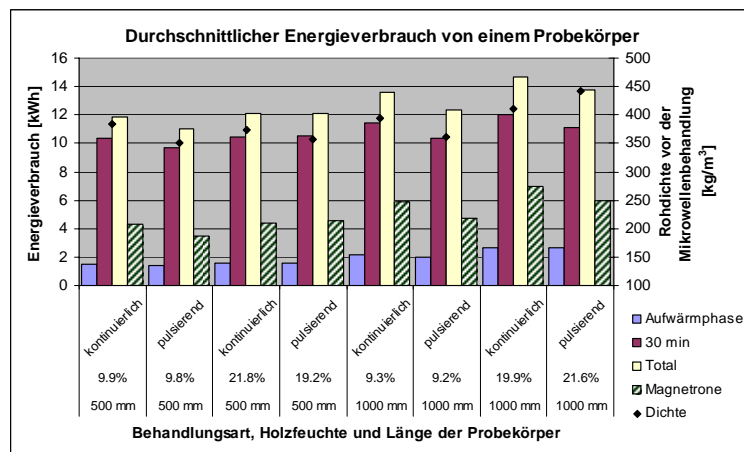
### 6.3.2 Behandlung von Proben variabler Grösse und Feuchte

Der Verlust an Holzfeuchte während der Behandlung ist im Anbetracht der kurzen Behandlungszeit gross (Tabelle 3). Dies ist insbesondere bei den Proben mit einer Holzfeuchte um den Fasersättigungsbereich aufgefallen. Das Holz wurde während der Behandlung von ungefähr 28% Holzfeuchte auf circa 20% im Zentrum der Probe getrocknet, dies ohne äusserlich sichtbaren Schaden zu nehmen. Dies lässt darauf schliessen, dass die Mikrowellen einen Einfluss auf die Feuchtwanderung im Holz haben und diese beschleunigen. Die Senkung der Holzfeuchte ergibt einen besseren Schutz gegen Pilzbefall. Im ISPM 15 Standard ist jedoch keine maximale Holzfeuchte vorgeschrieben; die Holzfeuchte des behandelten Holzes hat aber trotzdem einen Einfluss auf die Qualität der Behandlung.

*Tabelle 3: Resultate der ISPM 15 Behandlung; in jeder Serie waren vier Proben. Die Unterschiede zwischen pulsierender und kontinuierlicher Behandlung erwiesen sich als statistisch nicht signifikant.*

Serie	Ausgleichsfeuchte bevor MW Behandlung	Behandlung	Abmessung [mm]	Gesamtenergieverbrauch [kWh]	Energieverbrauch Magnetron [kWh]	Feuchte nach MW Behandlung [%]	Feuchteverlust [g]	Feuchteverlust [%]
A	28%	kontinuierlich	50/150/500	12.1	4.4	21.8%	90	8.3%
B	28%	pulsierend	50/150/500	12.1	4.6	19.2%	113	11.0%
C	10%	kontinuierlich	50/150/500	11.8	4.3	9.9%	32	2.5%
D	10%	pulsierend	50/150/500	11.1	3.5	9.8%	36	3.1%
E	10%	kontinuierlich	50/150/1000	13.6	5.9	9.3%	73	2.9%
H	10%	pulsierend	50/150/1000	12.3	4.7	9.2%	72	3.0%
F	28%	kontinuierlich	50/150/1000	14.7	6.9	19.9%	194	8.2%
G	28%	pulsierend	50/150/1000	13.7	6.0	21.6%	190	7.5%

Die Versuche mit unterschiedlichen Probengrössen zeigten, dass der Energieverbrauch in der Mikrowellenanlage, welche für diese Untersuchungen gebraucht wurde, nicht linear steigt mit zunehmender Ladung (Anhang A Tabelle 6, Abbildung 14). Dies lässt sich zu einem dadurch erklären, dass die Ventilatoren und auch das Transportband einen grossen Teil der Energie (6.1 kWh) verbrauchen. Dieser Energieverbrauch ist mehr oder weniger unabhängig von der behandelten Holzmenge. Aber auch der Energieverbrauch der Magnetron steigt in der Anlage an der HSB nicht proportional zur behandelten Holzmenge (Anhang A Tabelle 6, Abbildung 14). Dies kann dadurch begründet werden, dass bei grösseren Holzproben in der Mikrowellenanlage der Verlust geringer ist, denn die Chancen, dass die Mikrowellen aufs Holz treffen, bevor sie in die Absorber gehen, sind grösser als bei kleineren Proben, was zu einer höheren Effizienz der Anlage führt.



*Abbildung 14: Durchschnittlicher Energieverbrauch der Proben für die ISPM 15 Behandlung in der Mikrowellenanlage der HSB. ("Aufwärmphase" steht für den Energieverbrauch zur Erwärmung auf 56°C, "30 min" für den Energieverbrauch um die Temperatur auf 56°C zu halten, "Total" für den Energieverbrauch der gesamten ISPM Behandlung, "Magnetron" für den Energieverbrauch der Magnetron während der gesamten Behandlung)*



Der Energieverbrauch bei den Proben, welche nach dem Erreichen der 56°C pulsierend behandelt wurden, ist tendenziell geringer als bei den Proben bei denen die Leistung der Magnetron einfach reduziert wurde. Da zur Aufheizung auf die geforderte Temperatur in beiden Behandlungsweisen die Magnetron kontinuierlich mit voller Leistung liefen, kann davon ausgegangen werden, dass der pulsierende Betrieb energieeffizienter ist. Dies insbesondere da die Kühlventilatoren der Magnetron bei der Anlage an der HSB auch bei pulsierendem Betrieb ständig gelaufen sind, was aber nicht notwendig wäre.

Bei diesen Versuchen wurde die technische Machbarkeit einer Hitzebehandlung gemäss ISPM 15 von Holz mit unterschiedlichen Dimensionen somit bewiesen.

### 6.3.3 Korrelation der Oberflächen- und Kerntemperatur

Die Untersuchungen über die Korrelation der Oberflächentemperatur zur Kerntemperatur wurden an den Standardproben aus Arbeitspaket 2 durchgeführt. Als Kerntemperatur wurde die tiefste Temperatur, welche auf der thermographischen Aufnahme im innern der gespalteten Probe gemessen wurde angenommen. Als minimale Oberflächentemperatur wurde die tiefste Temperatur der thermografischen Aufnahme beider Oberflächen angenommen. Es gilt jedoch zu beachten, dass es sich um eine semi-quantitative Auswertung handelt. Die Korrelation ist eindeutig und es zeigt sich, dass die Oberflächentemperatur signifikant tiefer liegt als die Kerntemperatur (Abbildung 15).

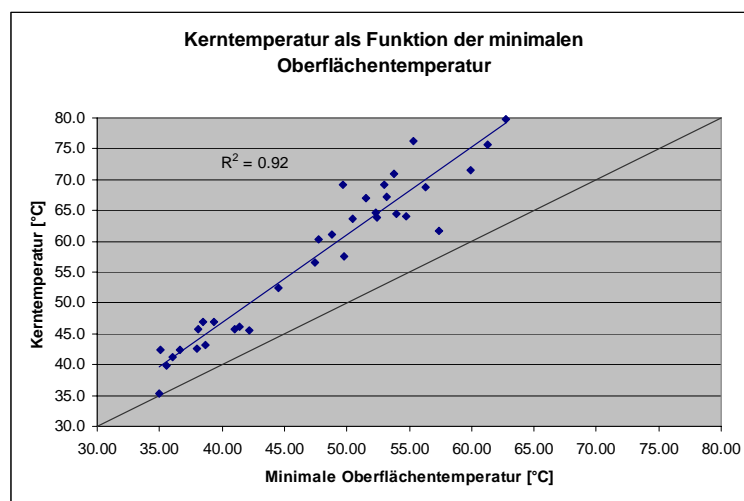


Abbildung 15: Oberflächentemperatur in Abhängigkeit der Temperatur im innern des Holzes.

Da eine semi-quantitative Auswertung genügend aussagekräftig ist für dieses Projekt, wurde darauf verzichtet, die Proben nach der vollständigen ISPM 15 Behandlung statistisch auszuwerten. Die Thermografischen Aufnahmen zeigen deutlich, dass die Kerntemperatur auch nach der kompletten Behandlung höher ist als an der Oberfläche (Abbildung 16).

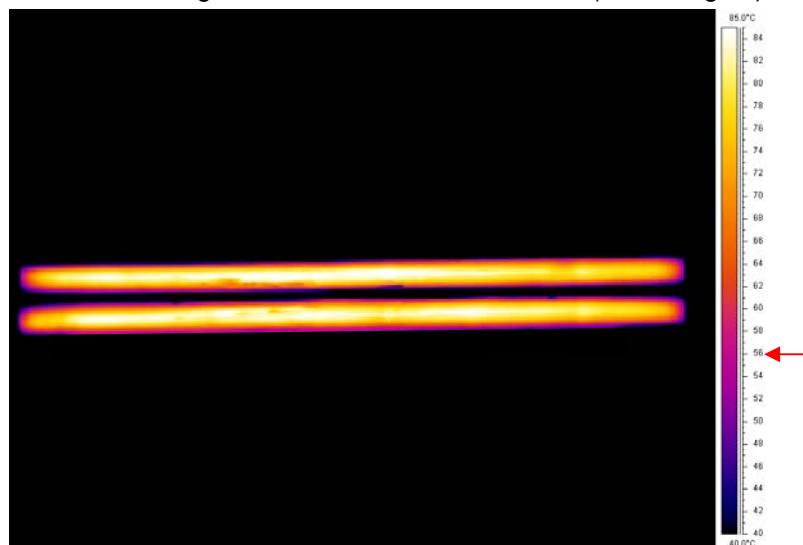


Abbildung 16: Temperaturverteilung im innern des Holzes nach ISPM 15 Hitzebehandlung mittels Mikrowellen. Die erhöhte Kerntemperatur ist deutlich sichtbar.

#### 6.4 Technische Erkenntnisse

Mittels der Mikrowellenanlage der HSB ist es möglich, die Hitzebehandlung gemäss ISPM 15 durchzuführen. Durch die Mikrowellenbehandlung kann die im ISPM-15-Standard geforderte Kern-Temperatur von 56°C über das gesamte Volumen erreicht und für 30 Minuten gehalten werden. Die Erwärmung der Proben ist in ein bis zwei Minuten abgeschlossen. Danach muss die Temperatur nur noch für 30 min auf den geforderten 56°C gehalten werden. Somit ist die gesamte Behandlung nach 32 Minuten abgeschlossen, dies bei einer Dimension von 50/150/1000 mm, was einem Volumen von 0.0075 m<sup>3</sup> entspricht. Die Behandlungsdauer ist somit weniger dimensionsabhängig und um ein Vielfaches kürzer als bei der konventionellen Behandlung mittels einer Frisch- / Ablufttrocknungskammer. Diese Ergebnisse bestätigen die in der spezifischen Literaturrecherche unter Kapitel 5 (Wirtschaftliche Machbarkeit) dargestellten Ergebnisse von Antti A. L. [1] und den theoretischen Annahmen zur Hitzebehandlungszeit des HSB Teams nach ISPM 15 für Fichtenholz (Literaturrecherche Tabelle 2). Nach den Darstellungen von Antti A. L. [1] war die für eine Hitzebehandlung vorgeschriebene Behandlungstemperatur von 56°C im Holz nach 6 min Mikrowellenbestrahlung erreicht. Mit der nach ISPM-15 Standard vorgeschriebenen Behandlungszeit von 30 min ergab sich somit für die Mikrowellenbehandlung eine theoretische Behandlungszeit von 36 min für die Behandlung ähnlicher Dimensionen mit einem Volumen von 0.0078 m<sup>3</sup>, was der im Projekt ermittelten Behandlungszeit von 32 min für ein Volumen von 0.0075 m<sup>3</sup> nahe kommt.

Die Oberflächentemperatur war bis zum Ende der Behandlung tiefer als im Innern des Holzes. Dies hat den Vorteil, dass für die Überwachung der Behandlung und Prozesssicherheit die Messung und Kontrolle der Oberflächentemperatur ausreichend ist. Die Temperatur im Bereich der Äste ist immer höher als die des umgebenden Holzes, somit stellen Äste für diese Behandlungsmethode keinen Nachteil dar.

Bei einer vorgeschriebenen Verweilzeit von einer halben Stunde in der Mikrowellenanlage wird die schnelle Mikrowellenbehandlung von ca. 2 Minuten (Aufwärmphase) auf 32 Minuten erhöht. Diesem Verhältnis entsprechend wird die technische Kapazität der Anlage um das 16fache reduziert. Aus diesem Grund wird eine kombinierte Methode vorgeschlagen: Hierbei wird das Holz nach der Erwärmung in der Mikrowellenanlage auf Solltemperatur in eine geheizte Kammer geführt und dort für 30 Minuten bei der verlangten Temperatur gelagert. Technisch gesehen kann diese Lagerung über einen Querförderer geschehen und dadurch wäre es möglich, die Behandlung ohne Handling durchzuführen (Abbildung 17). Die Erwärmung der Kammer könnte mittels der warmen Abluft aus der Mikrowellenanlage und den Sendern erfolgen, wodurch die Anlage energetisch optimal genutzt werden könnte. Ergänzend zu dieser Quelle könnte Wärmeenergie aus Restholz verwendet werden. Die Wirtschaftlichkeit einer solchen Anlage müsste aber in einem weiteren Schritt noch abgeklärt werden. Insbesondere müsste überprüft werden, zu welchem Anteil die Abwärme reicht, um die Wärmekammer zu heizen. Eine solche Anlage müsste im Dauerbetrieb laufen da sonst viel Energie für die Aufheizung der Wärmekammer benötigt würde. Dies kann jedoch einen Verlust an Flexibilität mit sich bringen.

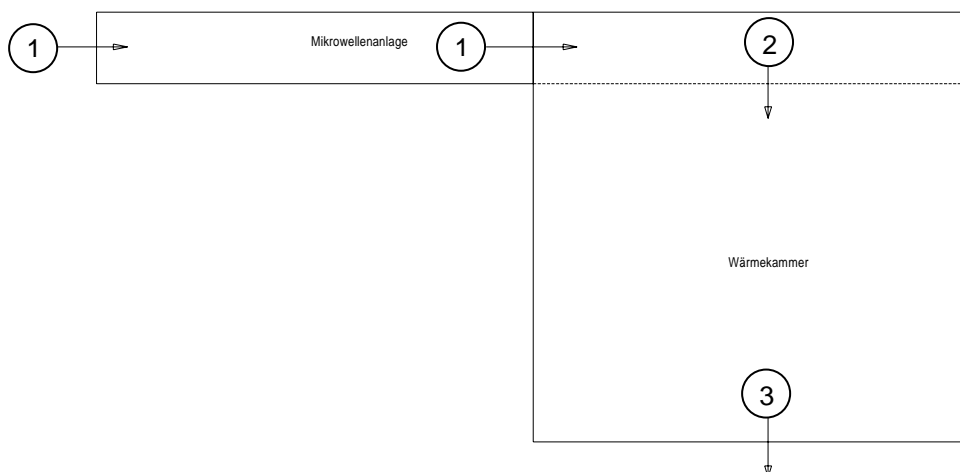


Abbildung 17: Grundrisssskizze der vorgeschlagenen kombinierten Behandlungsanlage.  
 1) Laufende Förderung durch die Mikrowellenanlage (nach 2 min) 2) Übergang in die Wärmekammer 3) Entnahme aus der Wärmekammer (nach 32 min)

Die in Abbildung 15 vorgeschlagene Behandlungsmethode bestätigt einige in der spezifischen Literaturrecherche dargestellten Untersuchungen aus der Lack- und Holz Trocknung mittels Mikrowellen, welche ebenfalls zeigten, dass bei manchen Anwendungen die Vorteile der

Mikrowellentrocknung erst dann voll zur Geltung kommen, wenn sie in Kombination mit anderen Trocknungsverfahren eingesetzt wird. So befasst sich Lee. H.W. [7] zum Beispiel mit der kombinierten Mikrowellen- und Konvektionstrocknung von Holz. Die Ergebnisse zeigten, dass durch den kombinierten Mikrowellen- und Konvektionstrocknungsprozess 6 resp. 4 mal so hohe Trocknungsgeschwindigkeiten für 25 resp. 50 mm dickes Holz erzielt werden können.

Um die Energieeffizienz und die Sicherheit einer industriellen Mikrowellenanlage zu steigern ist es ratsam, die Öffnungen auf eine minimale Dimension zu verkleinern. Es muss geprüft werden, ob es möglich ist, die Anlage nicht mittels Absorber sondern Reflektoren abzudichten: dies würde den Energieverlust bedeutend reduzieren. Dies ist aber bei einer „multimode-cavity“ technisch schwierig, im speziellen wenn grosse nicht verschliessbare Öffnungen benötigt werden. Die Ein- und Austrittsstellen, für den Materialdurchfluss, welche bei einer Mikrowellenanlage zur Hitzebehandlung gemäss ISPM 15 benötigt werden, müssen im technischen Sinn bei der verwendeten Mikrowellenfrequenz als grosse Öffnungen betrachtet werden. Jegliche Modifikationen bringen mit sich, dass sich das elektrische Feld und die „modes“ in der Anlage ändern. Es muss beachtet werden, dass bei einer „multimode-cavity“ mindestens zwei Abmessungen ein Vielfaches der Wellenlänge sein müssen, was bei einer Frequenz von 2.45 GHz 244mm entspricht.

Im Rahmen des Projekts konnte somit die technische Machbarkeit der Mikrowellenbehandlung im Durchlaufverfahren für Verpackungsmaterialien aus Holz nachgewiesen werden.

## 7 Wirtschaftlichkeitsanalyse

In diesem Teil des Projektes ging es darum, die wirtschaftliche Machbarkeit der Hitzebehandlung gemäss ISPM 15 mittels Mikrowellen zu überprüfen. Zu diesem Zweck wurde eine fokussierte Marktanalyse durchgeführt sowie die Energiekosten einer solchen Anlage berechnet.

### 7.1 Marktstudie

Eine Verpackung, welche in den Export über die EU-Grenzen hinaus geht, muss für die wichtigsten Exportländer eine Hitzebehandlung gemäss ISPM 15 durchlaufen haben. Die Auflistung der Länder, welche diese Behandlung fordern ist im Anhang C ersichtlich (Tabelle 8). Mit China, USA, Kanada, Australien, Neuseeland, Indien und Korea fordern die Hauptexportländer von der schweizerischen Verpackungsindustrie eine Behandlung. Darunter befinden sich Länder mit sehr grossem Wirtschaftswachstum. Die Holzmengen in Abbildung 18 beruhen auf den Angaben des Verbandes der schweizerischen Holzverpackungs- und Palettenindustrie (VHPI; Herr Pierre Clenin). Pro Jahr werden in der Schweiz etwa 50'000 bis 80'000 m<sup>3</sup> hitzebehandeltes Holz verarbeitet, was ungefähr der Hälfte des Holzes, welches in der Verpackungsindustrie verarbeitet wird (ohne Paletten) umfasst. Der Marktwert von ISPM 15 Holz liegt pro m<sup>3</sup> nur ca. SFr. 15.- über dem Wert von nicht behandeltem Holz. Dieser Preis basiert auf Angaben von befragten Sägereien und Verpackungsfirmen. Die Auswirkung der ISPM 15 Behandlung auf den Durchschnittspreis der Kistenbretter ist gering (Tabelle 7).

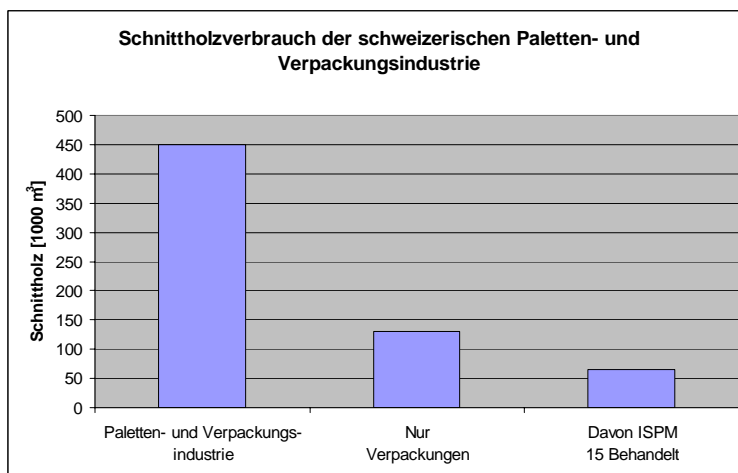


Abbildung 18: Jährlicher Schnittholzverbrauch der schweizerischen Paletten und Verpackungsindustrie.



## 7.2 Wirtschaftlichkeit

Die wirtschaftliche Bewertung der Mikrowellen-Behandlung zur Erreichung des ISPM-15 Standards erfolgte anhand der Ermittlung des Stromverbrauchs sowie der Energiekosten/m<sup>3</sup>. Im Rahmen des Projekts wurde kein ausführlicher Wirtschaftlichkeitsvergleich, Kostenvergleich mit konventionellen ISPM 15 Behandlungsmethoden vorgenommen. Die gemessenen Werte des Energiebedarfs beziehen sich ausschliesslich auf die Labor-Mikrowellenanlage der HSB. Diese Anlage war ursprünglich für eine andere technische Anwendung konzipiert, so dass die Komponenten nicht optimal aufeinander abgestimmt sind, was dazu führt, dass der Energiebedarf dieser Anlage für die Anwendung zur ISPM 15 Behandlung relativ hoch ist und die Anlage im Verhältnis zur Probengrösse überdimensioniert ist. Einige der Magnetronen erbringen nicht mehr die zu erwartende Nennleistung, was ebenfalls einen negativen Einfluss auf die Ermittlung des effektiven Stromverbrauchs für die Behandlung hatte. Messungen an der Anlage ergaben, dass mit dem Einbau eines Abstimmbolzens der Wirkungsgrad etwa verdoppelt werden könnte. Unter diesen Aspekten wurde der Stromverbrauch für eine Anlage, welche speziell für die ISPM 15 Behandlung von Verpackungsholz konzipiert ist, anhand von Kennzahlen berechnet.

Der Stromverbrauch einer industriellen Anlage kann unterteilt werden in den Verbrauch der Magnetronen (inkl. Kühlung derselben), des Ventilators welcher die feuchte Luft aus der Anlage bläst, des Transportbandes und der Steuerung. Gemäss den Angaben der Firma Gigatherm (Hr. Steiner) lässt sich der Energieverbrauch der Magnetronen während der Aufheizphase durch das Verdoppeln der Energie, welche theoretisch benötigt wird um das Holz aufzuwärmen, berechnen (2). Diese lässt sich wiederum mit der Spezifischen Wärmekapazität von Holz errechnen. Die spezifische Wärmekapazität von Holz ist abhängig von der Holzart und der Holzfeuchte (Tabelle 4). Diese Methode der Energiebedarfsberechnung ist in der Industrie üblich, um die Wirtschaftlichkeit einer Mikrowellenanlage zu überprüfen; sie findet auch in der Forschung Anwendung.

$$E = \Delta T c \rho \quad (2)$$

E = Energiebedarf um 1 m<sup>3</sup> Fichtenholz um  $\Delta T$  zu erwärmen [kWh]

$\Delta T$  = Temperatur Differenz [K]

c = Spezifische Wärmekapazität  $\left[ \frac{\text{kWh}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \right]$   $\left( 1 \text{ kWh} = 3.6 \cdot 10^6 \text{ Ws} = 3.6 \cdot 10^6 \text{ J} \right)$

$\rho$  = Rohdichte  $\left[ \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$

Tabelle 4: Spezifische Wärmekapazität in kJ/kgK von vier einheimischen Holzarten für unterschiedliche Holzfeuchten [9]

Holzart \ Holzfeuchte	0%	5%	10%	20%	50%	100%
Fichte	1.35	1.51	1.63	1.80	2.18	2.80
Kiefer	1.41	1.54	1.66	1.87	2.33	2.80
Eiche	1.45	1.59	1.67	1.91	2.37	2.79
Buche	1.46	1.60	1.71	1.92	2.31	2.83

Für die Werte in Tabelle 5 wurde eine durchschnittliche Erwärmung um 60°C angenommen, was einer Ausgangstemperatur von etwa 10°C entspricht, dies unter Berücksichtigung der Temperaturverteilung und der zu erreichenden mindest Temperatur. Um den Energiebedarf der Magnetronen für das Halten der Temperatur ermitteln zu können, wurde die benötigte Energie für die Reduzierung der Holzfeuchte berechnet (3) und diese wiederum verdoppelt. Der Energieverlust durch Konvektion wurde mit 10% angenommen.

$$E = m L_v \quad (3)$$

E = Energiebedarf um die Holzfeuchte zu reduzieren

m = Masse des verdunsteten Wassers (entspricht der Holzfeuchte-Differenz)

$L_v$  = Spezifische Verdampfungswärme von Wasser bei Normaldruck  $= 2.256 \cdot 10^6 \frac{\text{J}}{\text{kg}}$

Der Stromverbrauch des Ventilators, des Transportbandes und der Steuerung wurde aufgrund der Messungen an der Mikrowellenanlage in Biel berechnet. Diese Werte wurden dann auf einen m<sup>3</sup> Holz aufgerechnet. Bei dieser Umrechnung wurde berücksichtigt, dass die

Anlage in Biel betreffend der Transportbandgrösse und Ventilatorenleistung im Verhältnis zu der Probengrösse überdimensioniert ist.

Da in der Verpackungsindustrie meist Fichte eingesetzt wird, wurden die Energieberechnungen in Tabelle 5 mit den Kennzahlen dieser Holzart durchgeführt.

Als Grundlage für die Energiekostenberechnung diente der Strompreis von Energie Service Biel/Bienne für die Industrie. Es wurde der Hochtarif von 14.44 Rp./kWh eingesetzt [15].

*Tabelle 5 Mittels Kennzahlen ermittelter Stromverbrauch und Energiekosten / m<sup>3</sup> Fichte einer Mikrowellen Sterilisations-Anlage für Fichtenholz*

Ausgangsholzfeuchte [%]	Rohdichte [kg/m <sup>3</sup> ]	Energieverbrauch Erwärmung [kWh/m <sup>3</sup> ]	Energiekosten Erwärmung [CHF/m <sup>3</sup> ]	Energieverbrauch ISPM 15* [kWh/m <sup>3</sup> ]	Energiekosten ISPM 15* [CHF/m <sup>3</sup> ]
10%	440	27	3.80	41	5.90
20%	480	32	4.60	61	8.80
50%	600	48	7.00	111	16.00
100%	800	83	12.00	171	24.60

\* Diese Werte beinhalten den Stromverbrauch / Kosten für die komplette ISPM 15 Behandlung (inkl. Aufwärmen).

Da das Holz zum Zeitpunkt der Behandlung schon angetrocknet oder Lufttrocken ist, kann davon ausgegangen werden, dass die Holzfeuchte zwischen 20% und 50% liegt. Die Berechnungen mittels Kennzahlen zeigen, dass eine Sterilisation mittels Mikrowelle, mit dem momentanen Mehrpreis (CHF 15.00 / m<sup>3</sup>) für die ISPM 15 Behandlung auf dem Markt, nur konkurrieren kann, falls die Behandlungsdauer reduziert werden kann. Weitere Kostenreduktionen sind möglich mit einer Verlagerung der ISPM 15 Behandlung von den Sägereien in die Verpackungsfirmen: dadurch kann das Holzlager in den Verpackungsbetrieben reduziert werden, da nur unbehandeltes Holz, welches bei Bedarf während dem Verarbeitungsprozess behandelt wird, gelagert werden muss. Zusätzlich muss bei einer Behandlung nach dem Zuschnitt auf die Endmasse ein kleineres Volumen bearbeitet werden, im Vergleich zu einer phytosanitären Massnahme auf der Stufe Sägerei; dies ermöglicht eine weitere Kostenreduktion.

Die Ergebnisse des im Projekt ermittelten Gesamtenergieverbrauchs für die ISPM 15 Behandlung (Tabelle 5) sind deutlich höher, als die Werte in der spezifischen Literaturrecherche unter Kapitel 5. Dies kann dadurch erklärt werden, dass in der theoretischen Berechnung der Literaturrecherche nur die Energie zur Erwärmung und Erhaltung der Temperatur berücksichtigt wurde, nicht aber die Energie, welche das im Holz enthaltene Wasser verdunstet.

## 8 Schlussfolgerungen

Im Rahmen dieses Projektes konnte die technische Machbarkeit der Mikrowellenbehandlung gemäss ISPM 15 für Verpackungsmaterialien aus Holz nachgewiesen werden. Die Erwärmung der Proben auf 56°C ist in ein bis zwei Minuten erreicht. Anschliessend muss die Temperatur nur noch für 30 min auf den geforderten 56°C gehalten werden, womit die gesamte Behandlung nach 32 Minuten abgeschlossen ist.

### 8.1 Wissenschaftlich

- Die Messungen der Temperaturverteilung mittels Thermographieaufnahmen haben gezeigt, dass es möglich ist eine industrielle Anlage im Durchlaufverfahren mittels Infrarot-Temperatursensoren, welche die Oberflächentemperatur des Holzes messen effizient zu regeln. Dadurch wird eine hohe Prozesssicherheit gewährleistet. Durch Aufzeichnen der Daten kann eine Rückverfolgbarkeit gewährleistet werden.
- Die Temperatur der zu behandelnden Hölzer kann mittels Mikrowellen in kürzester Zeit (in diesem Projekt dauerte es maximal 2 min) über das ganze Volumen zerstörungsfrei und kontrolliert auf 56°C angehoben werden.
- Des Weiteren zeigte sich, dass die Mikrowellen den Feuchtetransport im Holz beschleunigen. Hierbei wurde die Holzfeuchte durch die Behandlung von Proben mit einer Ausgangsfeuchte von ungefähr 28% während der 32 Minuten dauernden Behandlung auf teilweise unter 20 % gesenkt, was zusätzlich einen besseren Schutz gegen Pilzbefall bedeuten kann.
- Es gilt zu beachten, dass aus gesetzlichen, technischen und wirtschaftlichen Gründen neben dem 2.45GHz Band höchstens noch die Frequenz von 0.915 GHz resp. 0.922

GHz als sinnvoll betrachtet werden kann. Die dielektrische Konstante von Holz und somit die Eindringtiefe der Mikrowellen ist primär von der Dichte und der Holzfeuchte abhängig. Artsspezifische, strukturelle und chemische Unterschiede haben jedoch nur einen beschränkten Einfluss auf die dielektrischen Eigenschaften von Holz. Bei den in der Verpackungsindustrie verwendeten Dimensionen und Holzfeuchten ist die Eindringtiefe, welche mit 2.45GHz erreicht wird, meist ausreichend für eine durchgehende Erwärmung.

- Die Messung der Holzfeuchte in der Mitte des Versuchskörpers mittels der Darrofenmethode erwies sich als geeignet für dieses Projekt.
- Ebenfalls in diesem Projekt gewonnene Erkenntnisse zeigen ein weiteres mögliches Einsatzgebiet der Mikrowellen kombiniert mit Thermographie. Diese könnten zu Asterkennung im Holz eingesetzt werden. Da die Äste nach einer Mikrowellenbestrahlung wärmer sind als das Holz, welches sie umgibt, wäre eine automatische Erkennung möglich. Die Wirtschaftlichkeit und die Genauigkeit einer solchen Anlage müssten jedoch in einem spezifischen Projekt abgeklärt werden.

## 8.2 Technisch

- Die Aufwärmphase in einer Mikrowellenanlage dauert etwa 2 min, was zu einer gesamten Behandlungszeit von 32 Minuten führt. Der Energiebedarf ist abhängig von der initialen Holzfeuchte und für 20% bei 61kWh/m<sup>3</sup> und für 50% bei 111kWh/m<sup>3</sup>.
- Bei Holz mit einer Darrdichte von 0.5 t/m<sup>3</sup> und einer Feuchte von 100 % ist die Eindringtiefe senkrecht zu den Fasern bei 20°C noch ungefähr 4 cm. Da bei einer Multimode Anlage, wie sie für die Versuchsdurchführung verwendet wurde, die Ladung von allen Seiten bestrahlt wird, können Hölzer bei welchen die kleinere Abmessung maximal die doppelte Eindringtiefe beträgt problemlos behandelt werden. Dies bedeutet, dass die in der Verpackungsindustrie üblicherweise verwendeten Dimensionen behandelt werden können.
- Bei der Ermittlung der wirtschaftlichen Machbarkeit dieser Hitzebehandlung gemäss ISPM 15 zeigte sich, dass nach dem Erreichen der Soll-Temperatur der pulsierende Betrieb der Mikrowellenanlage tendenziell energieeffizienter ist, als der kontinuierliche Betrieb mit gedrosselter Leistung der Mikrowellensender.

## 8.3 Wirtschaftlich

- An dieser Stelle sollt noch einmal betont werden, dass die Behandlungszeit von 32 min für ein Kantholz von 50 mm Dicke ein Vielfaches kürzer ist als die Behandlungszeit bei der konventionellen Hitzebehandlung in einer Fisch- / Ablufttrocknungskammer.
- Im Rahmen des Projekts wurde der Wirtschaftlichkeitsvergleich, Kostenvergleich mit konventionellen ISPM 15 Behandlungsmethoden nur nach generellen Aspekten vorgenommen. Bei der momentanen Marktlage in der Schweiz und dem heutigen Wissensstand über die Biologie von Insekten im Mikrowellenfeld kann noch nicht garantiert werden, dass die Behandlung mittels Mikrowellen kostengünstiger ist. Es ist jedoch anzunehmen, dass durch diese Methode die momentanen Mehrkosten von ISPM 15 behandeltem Holz auf dem Markt reduziert werden können. Um die Behandlungszeit zu verkürzen und das Verfahren somit wirtschaftlicher machen zu können, müsste das Verhalten der Insekten in einer Multimode Mikrowellenanlage in einem weiteren Projekt untersucht werden..
- Pro Jahr werden in der Schweiz etwa 50'000 bis 80'000 m<sup>3</sup> hitzebehandeltes Holz verarbeitet, was ungefähr der Hälfte des Holzes welches in der Verpackungsindustrie insgesamt verarbeitet wird entspricht.
- Ein weiterer Vorteil der Mikrowellenbehandlung ist, dass die Qualitätssicherung einer Behandlung nach dem Zuschnitt bedeutend einfacher ist, als bei einer Behandlung Prozess aufwärts in der Sägerei. Die Gefahr des Befalls durch Insekten nach der Behandlung ist bei der Sterilisation direkt vor dem Zusammenbau um ein vielfaches geringer, als wenn das Holz nach der Behandlung noch im Holzlager, eventuell sogar noch neben unbehandeltem Holz, gelagert wird.
- Eine interessante, weiter zu untersuchende Variante besteht in der Kombination von Mikrowellen (zur Aufwärmung) mit der konventionellen Hitzebehandlung (zur Einhaltung der Normtemperatur während 30 min).

Auf Grund der technischen Erkenntnisse kann davon ausgegangen werden, dass die Skepsis der Holzwirtschaft gegenüber der Mikrowelle abgebaut werden sollte. Am richtigen Ort und auf

die richtige Art und Weise eingesetzt, kann sie eine Qualitätssteigerung bringen und auch wirtschaftlich sein. Die Aussagen betreffend der Wirtschaftlichkeit beziehen sich auf die aktuelle Situation im Schweizer Energie- und Holzmarkt. Es muss jedoch betont werden, dass in Ländern mit tieferen Energiepreisen (wie zum Beispiel die USA) eine ISPM 15 Behandlung mit Mikrowellen wirtschaftlich interessant sein kann.

## **9 Bestimmungen zu diesem Forschungsbericht**

Der Bericht wurde klassiert als: Öffentlich

Dieser Bericht darf nicht ohne Genehmigung der HSB auszugsweise vervielfältigt werden. Jegliche Veröffentlichung des Berichtes oder Teilen davon bedarf der schriftlichen Zustimmung der HSB.

Ein Original dieses Berichtes wird von der HSB für 5 Jahre aufbewahrt.

Dieser Bericht ist nur mit den Unterschriften des Abteilungsleiters F+E, des Leiters F+E Werkstoffe und Holztechnologie und des Projektverantwortlichen gültig.

### **9.1 Umfang des Forschungsberichtes**

Dieser Forschungsbericht besteht aus dem Titelblatt, dem Abstract und 55 Seiten inkl. Anhang.

Biel, 13.09.2005

Hochschule für Architektur, Bau und Holz HSB, Burgdorf, Biel

## 10 Verzeichnisse

### 10.1 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Prüfkörperserien des Arbeitspaketes 2 und 3 .....	8
Tabelle 2:	Prüfkörperserien des Arbeitspaketes 4 .....	8
Tabelle 3:	Resultate der ISPM 15 Behandlung in jeder Proben Gruppe waren vier Proben.	17
Tabelle 4:	Spezifische Wärmekapazität in kJ/kgK von vier einheimischen Holzarten für unterschiedliche Holzfeuchten [9] .....	21
Tabelle 5:	Mittels Kennzahlen ermittelter Stromverbrauch und Energiekosten / m <sup>3</sup> Fichte einer Mikrowellen Sterilisations-Anlage für Fichtenholz .....	22
Tabelle 6:	Resultate der ISPM 15 Behandlung mittels Mikrowelle .....	27
Tabelle 7:	Entwicklung des Schnittholzpreises in der Schweiz [5].....	29
Tabelle 8:	Inkraftsetzung und Status des ISPM 15 in den beteiligten Länder (per 14. März 2005). [16].....	31

### 10.2 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Schematische Darstellung der Mikrowellenanlage an der HSB.....	7
Abbildung 2:	Thermopapier, welches während 30 Sekunden in fixer Position mit Mikrowellen in der Anlage der HSB bestrahlt wurde.....	10
Abbildung 3:	Temperaturverteilung über den Prüfkörperquerschnitt nach erfolgter Erwärmung in der Mikrowellenanlage mit nur den oberen Magnetronen im Betrieb.....	11
Abbildung 4:	Oberflächentemperatur nach einer Mikrowellenbestrahlung von 2,5 min in Abhängigkeit der Holzfeuchte.....	12
Abbildung 5:	Oberflächentemperatur nach einer Mikrowellenbestrahlung von 2,5 min in Abhängigkeit der Rohdichte .....	12
Abbildung 6:	Oberflächentemperatur nach einer Mikrowellenbestrahlung von 2,5 min in Abhängigkeit der Darrdichte .....	13
Abbildung 7:	Temperaturkurven in Funktion der Zeit zu Beginn der Behandlung mit Aufwärmphase.....	13
Abbildung 8:	Typische Temperaturverteilung nach einer Erwärmung mittels Mikrowellen einer Astfreien Standardprobe aus Arbeitspaket 2.....	14
Abbildung 9:	Typische Temperaturverteilung nach einer Erwärmung mittels Mikrowellen einer Standardprobe aus Arbeitspaket 2.....	14
Abbildung 10:	Thermographische Aufnahme einer gespaltenen Standardprobe nach der ISPM 15 Behandlung mittels Mikrowelle .....	15
Abbildung 11:	Aufzeichnung der Oberflächentemperaturmessung einer Standardprobe während der ISPM 15 Behandlung.....	16
Abbildung 12:	Ausschnitt aus der Temperaturkurve des IR-Sensors 1 in Abbildung 11. ....	16
Abbildung 13:	Thermographische Aufnahme der Probenoberfläche aus Abbildung 11 und Abbildung 12 nach der ISPM 15 Behandlung mit ungefährtem Verlauf der IR-Temperaturmessung.....	16
Abbildung 14:	Durchschnittlicher Energieverbrauch der Proben für die ISPM 15 Behandlung mittels Mikrowelle in der Anlage an der HSB. ....	17
Abbildung 15:	Oberflächentemperatur in Abhängigkeit der Temperatur im innern des Holzes..	18
Abbildung 16:	Temperaturverteilung im innern des Holzes nach ISPM 15 Hitzebehandlung mittels Mikrowellen die erhöhte Kerntemperatur ist deutlich sichtbar. ....	18
Abbildung 17:	Grundrisssskizze der vorgeschlagenen kombinierten Behandlungsanlage. ....	19
Abbildung 18:	Jährlicher Schnittholzverbrauch der schweizerischen Paletten und Verpackungsindustrie.....	20

### 10.3 Literaturverzeichnis

1. Antti A. L. (1995): Microwave Drying of pine and spruce, Holz als Roh- und Werkstoff 53: 333-338, Springer Verlag
2. Brodie Graham (2003): Analytical solutions to the microwave heating problem in slabs, cylinders and spheres of Agar gel. in: 9<sup>th</sup> International Conference on Microwave and High Frequency Heating, Loughborough (University Press) (in English)
3. Bundesamt für Umwelt Wald und Landschaft (BUWAL) (2003): ISPM-15-Standard - Anforderungen und Umsetzung in die Praxis
4. Bundesamt für Umwelt Wald und Landschaft (BUWAL) (2003): ISPM-15-Standard - Der neue phytosanitäre Standard für Holzverpackungen
5. Bundesamt für Statistik (BFS) und Bundesamt für Umwelt Wald und Landschaft (BUWAL) (2004) Wald und Holz in der Schweiz, Jahrbuch 2004, BFS (Neuenburg)
6. Hochschule für Architektur, Bau und Holz (HSB) (2003): Kommission für Technologie und Innovation (KTI) Forschungsprojekt Nr. 4608.2: Trocknung bzw. Härtung von farblosen und pigmentierten Ultraviolett härtender und Zweikomponenten Wasserlacksystemen auf Holz oder Holzwerkstoffen mittels Mikrowellen und der Kombination Mikrowellen-Ultraviolett-Trocknung (Biel/Bienne)
7. Lee H. W. (2003): Combined Microwave and Convective Drying of Korean Wood Species, 8th International IUFRO Wood Drying Conference, Brasov, Romania, Proceedings, 146 - 149
8. Metaxas A.C. and R.J. Meredith (1993): Power Engineering Series 4; Industrial Microwave Heating; Peter Peregrinus LTD (London) (in English)
9. Niemz P. (1993): Physik des Holzes und der Holzwerkstoffe, DRW-Verlag (Leinfelden-Echterdingen)
10. Richter K. (2004): Wärmebehandlung ISPM 15, 5. Internationales Seminar für die Holz- und Forstindustrie, 26. -27. März 2004, (St. Gallen)
11. Secretariat of the International Plant Protection Convention (Publication No.15, March 2002): International Standards for Phytosanitary Measures, Guidelines for Regulating Wood Packaging Material in International Trade, Food and Agriculture Organization of the United Nations, (Rom) (in English)
12. Torgovnikov G. I. (1993): Dielectric Properties of Wood and Wood-Based Materials, Springer-Verlag (Berlin) (in Englisch)
13. Unger, Vogt-Arndt (Stand Sep. 2003): Internationaler Standard für Pflanzengesundheitliche Massnahmen, Richtlinie zur Regelung von Holzverarbeitungsmaterial im internationalen Handel, Arbeitsübersetzung der BBA, Abt. Pflanzengesundheit
14. United States Department of Agriculture (October 2002): Importation of Solid Wood Packing Material, Draft Environmental Impact, Statement (in English)
15. [www.esb.ch](http://www.esb.ch) Homepage von Energie Service Biel/Bienne
16. [www.swiss-shippers.ch](http://www.swiss-shippers.ch) Homepage von Swiss Shippers' Council

**Anhang A: Resultate***Tabelle 6 Resultate der ISPM 15 Behandlung mittels Mikrowelle*

#	Seitens	Ausgang-Ausgleichs-feuchte [%]	Behandlung	Abmessung [mm]	Energie-verbrauch [kWh]	Energie-verbrauch Magnetronen [kWh]	Feuchte nach MW Behandlung [%]	Feuchte-verlust [g]	Feuchte-verlust [%]
1	A	28%	kontinuierlich	50/150/500	12.2	4.5	21.5%	102	9.2%
2	A	28%	kontinuierlich	50/150/500	12.0	4.4	21.8%	82	7.6%
3	A	28%	kontinuierlich	50/150/500	12.2	4.6	21.6%	96	9.1%
4	A	28%	kontinuierlich	50/150/500	11.9	4.1	22.5%	80	7.4%
5	B	28%	pulsierend	50/150/500	12.0	4.4	18.2%	114	11.3%
6	B	28%	pulsierend	50/150/500	12.7	5.1	18.3%	120	12.1%
7	B	28%	pulsierend	50/150/500	12.2	4.6	19.5%	114	11.1%
8	B	28%	pulsierend	50/150/500	11.7	4.1	20.6%	104	9.6%
9	C	10%	kontinuierlich	50/150/500	12.1	4.5	10.3%	32	2.6%
10	C	10%	kontinuierlich	50/150/500	11.9	4.3	9.1%	36	2.9%
11	C	10%	kontinuierlich	50/150/500	11.6	4.0	9.6%	30	2.4%
12	C	10%	kontinuierlich	50/150/500	11.8	4.3	10.5%	30	2.2%
13	D	10%	pulsierend	50/150/500	11.0	3.4	9.8%	34	3.3%
14	D	10%	pulsierend	50/150/500	10.5	2.9	10.6%	30	2.4%
15	D	10%	pulsierend	50/150/500	10.5	2.9	10.8%	28	2.1%
16	D	10%	pulsierend	50/150/500	12.3	4.7	7.8%	50	4.6%
17	E	10%	kontinuierlich	50/150/1000	13.5	5.9	8.1%	84	3.7%
18	E	10%	kontinuierlich	50/150/1000	13.7	6.1	9.0%	82	3.5%
19	E	10%	kontinuierlich	50/150/1000	13.7	5.9	10.7%	54	1.9%
20	E	10%	kontinuierlich	50/150/1000	13.5	5.7	9.4%	72	2.4%
21	F	28%	kontinuierlich	50/150/1000	14.8	7.2	17.9%	185	8.4%
22	F	28%	kontinuierlich	50/150/1000	14.6	6.9	19.4%	212	9.8%
23	F	28%	kontinuierlich	50/150/1000	15.3	7.4	20.7%	204	7.0%
24	F	28%	kontinuierlich	50/150/1000	14.0	6.3	21.4%	176	7.6%
25	G	28%	pulsierend	50/150/1000	14.2	6.5	20.3%	188	7.6%
26	G	28%	pulsierend	50/150/1000	14.4	6.7	18.6%	242	9.8%
27	G	28%	pulsierend	50/150/1000	13.3	5.6	21.3%	164	7.1%
28	G	28%	pulsierend	50/150/1000	13.0	5.2	26.1%	164	5.4%
29	H	10%	pulsierend	50/150/1000	12.3	4.7	10.0%	56	2.6%
30	H	10%	pulsierend	50/150/1000	12.3	4.7	8.9%	82	3.3%
31	H	10%	pulsierend	50/150/1000	12.2	4.6	8.8%	72	2.9%
32	H	10%	pulsierend	50/150/1000	12.5	4.9	9.2%	76	3.1%





## Anhang B: Statistik für Schnittholzpreise

Tabelle 7: Entwicklung des Schnittholzpreises in der Schweiz [5]

➔ 7.2

### Produzentenpreisindex Schnittholz 2003–2004

#### Indice des prix à la production des sciages 2003–2004

Basis: Sept.–Dez. 2000=100 / Base: sept.–déc. 2000=100

Sortimente	Jan.–April Jan.–Avril	Mai–Aug. Mai–Août	Sept.–Dez. Sept.–Déc	Jan.–April Jan.–Avril	Mai–Aug. Mai–Août	Veränderung in % z. Variation en % par rap.		Assortiments
	2003	2003	2003	2004	2004	Vorperiode Pér. préc.	Vorjahr Année préc.	
<b>Nadelholz (Fichte/Tanne)</b>	1	2	3	4	5	6	7	<b>Résineux (épicéa/sapin)</b>
Konstruktionsholz, nach Liste	97,0	97,6	97,5	97,6	97,5	- 0,1	- 0,1	Bois de charpente sur liste
Klotzbretter, I./II. Klassen	97,9	98,4	98,0	97,7	97,1	- 0,6	- 1,3	Planches en plots, classe I / II
Schalbretter, roh, fix breit	99,7	101,3	102,5	103,1	105,3	2,2	4,0	Planches de coffrage, brutes I / II
Hetzerbretter N, fix breit	99,2	99,4	98,4	98,2	97,8	- 0,4	- 1,6	Lattes pour lamellé-collé N
Kantholz 8/12, gekappt	96,2	96,3	95,9	95,5	93,4	- 2,1	- 2,9	Carrelets 8/12
Verpackungskantholz	98,0	99,4	98,4	97,5	98,2	0,7	- 1,2	Carrelets d'emballage
Kistenbretter, Breitware 1)	95,5	95,9	95,5	96,2	95,9	- 0,3	- 0,0	Planches pour caisses 1)
Dachlatten	93,4	94,6	93,4	97,2	99,2	2,1	4,9	Lattes à tuiles
Doppellatten	94,7	95,0	96,7	95,3	95,2	- 0,1	0,2	Doubles lattes
	94,1	94,9	94,7	95,7	93,6	- 2,1	- 1,3	

1) Auswirkung des Standards für Holzverpackungen - ISPM 15

1) Effet de la norme pour les matériaux d'emballage en bois - NIMP 15

Quelle: Bundesamt für Statistik, Holzpreisstatistik

Source: Office fédéral de la statistique, Statistique des prix du bois

➔ 7.3

### Durchschnittspreise für Nadel schnittholz (Fichte / Tanne) 2003–2004

#### Prix moyens des sciages résineux (épicéa/sapin) 2003–2004

Gewogene Durchschnitts-Verkaufspreise von inländischen Schnittwaren

Prix de vente moyens pondérés des sciages vendus produits en suisse

Sortimente	Jan.–April Jan.–Avril	Mai–Aug. Mai–Août	Sept.–Dez. Sept.–Déc	Jan.–April Jan.–Avril	Mai–Aug. Mai–Août	Veränderung in % z. Variation en % par rap.		Assortiments
	2003	2003	2003	2004	2004	Vorperiode Pér. préc.	Vorjahr Année préc.	
<b>Nadelholz (Fichte/Tanne)</b>	1	2	3	4	5	6	7	<b>Résineux (épicéa/sapin)</b>
Konstruktionsholz, nach Liste	Fr./m³	Fr./m³	Fr./m³	Fr./m³	Fr./m³	%	%	Bois de charpente sur liste
Klotzbretter, I./II. Klassen	374,61	376,72	375,21	372,97	371,05	- 0,5	- 1,5	Planches en plots, classe I/II
Schalbretter, roh, fix breit	632,74	637,78	643,64	649,83	662,68	+ 2,0	+ 3,9	Planches de coffrage, brutes I/II
Hetzerbretter N, fix breit	285,56	282,01	279,09	277,37	276,01	- 0,5	- 2,1	Lattes pour lamellé-collé N
Kantholz 8/12, gekappt	324,18	326,09	324,93	322,25	313,42	- 2,7	- 3,9	Carrelets 8/12
Verpackungskantholz	274,93	269,33	266,88	261,83	263,80	+ 0,8	- 2,1	Carrelets d'emballage
Kistenbretter, Breitware	215,51	215,46	214,91	216,77	216,29	- 0,2	+ 0,4	Planches pour caisses
Dachlatten	220,31	220,47	217,68	226,59	231,19	+ 2,0	+ 4,9	Lattes à tuiles
Doppellatten	367,84	370,63	377,16	370,79	370,33	- 0,1	- 0,1	Doubles lattes
	377,18	383,94	382,96	386,13	378,10	- 2,1	- 1,5	

1) Auswirkung des Standards für Holzverpackungen - ISPM 15

1) Effet de la norme pour les matériaux d'emballage en bois - NIMP 15

#### Wichtiger Hinweis an die Benutzer:

- Für die Markttendenzen des Schnittholzes ist die Tabelle 7.2 zu benutzen.

- Die Werte der Tabelle 7.3 sind als gewichtete Durchschnitte entsprechend der Marktbedeutung der meldenden Sägereien berechnet worden.

#### Remarque importante pour l'utilisateur:

- Pour déterminer les tendances du marché des sciages, veuillez utiliser le tableau 7.2.

- Les moyennes du tableau 7.3 ont été pondérées en fonction de la part de marché des scieries participant au relevé.

Quelle: Bundesamt für Statistik, Holzpreisstatistik

Source: Office fédéral de la statistique, Statistique des prix du bois



**Anhang C: Status des ISPM 15 in den beteiligten Ländern***Tabelle 8: Inkraftsetzung und Status des ISPM 15 in den beteiligten Länder (per 14. März 2005). [16]*

Country	WTO Notification Rule Announced	Effective Adjustment Period	Treatment PN Infested Country	Remarks
USA	June 6, 2003 Sept. 24, 2004 US Final Rule announced on Sept. 16, 2004	Sept. 16, 2005 One year from Sept. 16 is an adjustment period.	HT MB Not Specified	After the publication date, unmarked WPM will be notified to US Importers and to NPPO of exporting country.
Canada	March 18, 2003 4th Revision effective June 1, 2004	Canada has set up the implementation target date: April 1, 2005 Sept. 16, 2005 is strict enforcement date	HT MB Not Specified	Very strict rules for the markings on Dunnages in vessels or in marine containers.
Mexico	December 10, 2003 Publicizes on Gazette November 26, 2003	Sept. 16, 2005 NAFTA Countries have taken a uniform action	HT ( incl. KD, CPI ) only MB not accepted	Stamp or Brand only. Label/Seal not accepted. Markings are necessary on Dunnages but not too strict.
China	December 8, 2003 January 30, 2005 Detailed rule announced on Feb. 22, 2005	January 1, 2006	HT MB Strict MB fumigation standard for coniferous wood from PN infested countries	PN Infested Country Japan, Korea, North Korea, Taiwan, Hong Kong, US, Canada, Mexico, Portugal
Japan	Studying implementation of the ISPM No.15 No concrete plan at this moment			The design of the marking is round shape not in conformity with ISPM guidelines by some reason
Korea	July 11, 2003 December 23, 2003	June 1, 2005 Announcement posted on Website	HT MB HT only for coniferous wood from PN infested countries	PN Infested Country Japan, China, Taiwan, US, Canada, Mexico, Portugal
New Zealand	April 29, 2003 April 16, 2003	New Zealand has its own regulations but also is accepting the wooden packages in compliant with the ISPM No.15 required	HT MB Not Specified	N Z and Australia have very strict regulations on wooden packages and require certificate accompany the cargo.
Australia	G/SPS/N/AUS/164 June 21, 2004 Posted on AQIS website Current rule & new rule can be selected	September 1, 2004 Wood packaging in the Container can be accepted if treated in accordance with ISPM#15	HT MB should be by Australian Standard, Also requires Shippers' Declaration	If violated, (1) Treatment (2) Destroy (3) Re-export
Indonesia	March 9, 2004 ?	No Intention to implement ISPM No.15 for imports	Currently requiring MB fumigation and Certificate.	Export marking System is established
Philippines	June 3, 2004 Addendum July 20, 2004	Rules partially effective from Jan 1, 2005 (Treatment needed but no marking necessary) Rules fully applied from June 1, 2005	Rule is strictly in line with ISPM No.15	Established the export marking rules and the import regulations at the same time.
Taiwan	April 19, 2004 ? G/SPS/N/TPKM/30 ?	Effective date unknown		Planning no import restriction
India	March 3, 2004 G/SPS/N/IND/12 February 6, 2004 Notification to postpone dated March 29, 2004	November 1, 2004 B/L date	Treatment is according to ISPM No.15 but marking is not required If Certificate is presented, No Inspection involved.	Certificate is required ISPM No.15 Marking is additionally accepted. Rule revised as of May 31, 2004
Switzerland	February 5, 2004	New effective date: March 1, 2005 in order to synchronize with EU.	HT MB	Non EU Member Rule is basically in line with the ISPM No.15
EU	November 10, 2003 Each Member country to make the regulatory amendments on existing phytosanitary rules. 2004/102/EG	New effective date March 1, 2005 Wooden Packaging Materials made prior to the effective date is waived until December 31, 2007	HT MB HT MB should be OK	DB (Debarking) marking required, however the rule is extended until March 1, 2006
Turkey	October 5, 2004 G/SPS/N/TUR/4	New effective date is January 1, 2006	HT MB	Rule is basically in line with the ISPM No.15

Nigeria	No WTO SPS notification, but PQPH.62/vol. V/78 Announced on: August 16, 2004	September 30, 2004	HT MB Certificate is not required if in accordance with ISPM No. 15	Not exactly in line with ISPM No. 15
South Africa	WTO SPS notification Made on April 27, 2004 March 5, 2004	January 1, 2005	HT MB Both HT and MB accepted even from PN infested countries	PN Infested Country No restrictions
Brazil	WTO Notification on October 1, 2004 Emergency Rule dated Jan.6, 2004	Established the rule for the export treatment and marking system.		Requires treatment and marking as per ISPM No.15 for those countries having implemented ISPM No.15 for import cargoes.
Colombia	July 9. 2004 G/SPS?/N/COL/85	Effective date extended. Sept. 16, 2005	Posted the message on the website.	Export marking System is established
Chile	G/SPS/N/CHL/170 August 26, 2004	Effective June 1, 2005	Draft Agriculture and Livestock service resolution governing the entry into (available in Spanish)	Quarantine Regulations governing the entry into Chile of Wood Packaging material (3 pages)
Peru	G/SPS/N/PER/87 February 16, 2005	Export rule from March 1, 2005	Implementation date of the import rule unknown. (available in Spanish)	Mostly in line with ISPM No. 15
Costa Rica	August 20, 2004 G/SPS/N/CRI/35	Effective date unknown		

WTO Notification: The date on which SPS Notification was submitted to WTO for the intention to change the quarantine regulations.

Rule Announced: The date on which the new rule in line with ISPM No. 15 was or will be announced.

Effective: The effective date of the newly implemented rule. Certain countries are setting up the adjustment period.

Treatment: The methods of treating the wooden packaging materials. Heat treatment is shown as HT and Methyl Bromide Fumigation

PN Infested Country: The country where Pinewood Nematode - *Bursaphelenchus xylophilus* is recognized. Some countries admit HT.

Remarks: Some countries have strict rules for the marking requirements of the Dunnages used in the vessels or in the containers.

**Anhang D: Projektbeteiligte****Projektverantwortlicher:**

Dr. Ernst Zürcher  
Hochschule für Architektur, Bau und Holz,  
HSB  
Solothurnstrasse 102  
2504 Biel  
Fon +41 32 344 03 67  
Fax +41 32 344 03 91  
ernst.zuercher@bfh.ch

Martin Lehmann  
Hochschule für Architektur, Bau und Holz,  
HSB  
Solothurnstrasse 102  
2504 Biel  
Fon +41 32 344 03 21  
Fax +41 32 344 03 91  
marin.lehmann@bfh.ch

Benjamin Steiger  
Hochschule für Architektur, Bau und Holz,  
HSB  
Solothurnstrasse 102  
2504 Biel  
Fon +41 32 344 03 14  
Fax +41 32 344 03 91  
benjamin.steiger@bfh.ch

Stefanie Wieland  
Hochschule für Architektur, Bau und Holz,  
HSB  
Solothurnstrasse 102  
2504 Biel  
Fon +41 32 344 03 43  
Fax +41 32 344 03 91  
stefanie.wieland@bfh.ch

**Forschungspartner:**

Ulrich Rettenmund  
Hochschule für Technik und Informatik, HTI  
Quellgasse 21  
2501 Biel  
Fon +41 32 321 63 69  
Fax +41 32 321 65 00  
ulrich.rettensmund@hti.bfh.ch

**Wirtschaftspartner:**

Gigatherm AG  
René Weber  
Halten 120  
9035 Grub  
Fon +41 71 898 04 20  
Fax +41 71 898 04 05  
weber@gigatherm.ch

Gigatherm AG  
Rupert Steiner  
Halten 122  
9035 Grub  
Fon +41 71 898 35 01  
Fax +41 71 898 35 09  
steiner@erdseices.ch

**Projektunterstützung:**

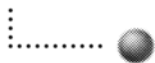
Zaugg Emballeur AG  
Werner Zaugg  
Industrie Gaswerk Nord  
8952 Schlieren  
Fon +41 44 732 40 40  
Fax +41 44 732 40 50  
info@zauggag.com

Zaugg Emballeur AG  
Iwan Heuer  
Schwanengasse 3  
2503 Biel  
Fon +41 32 323 72 53  
Fax +41 32 323 72 78  
iwan.heuer@zauggag.com





**Berner Fachhochschule**

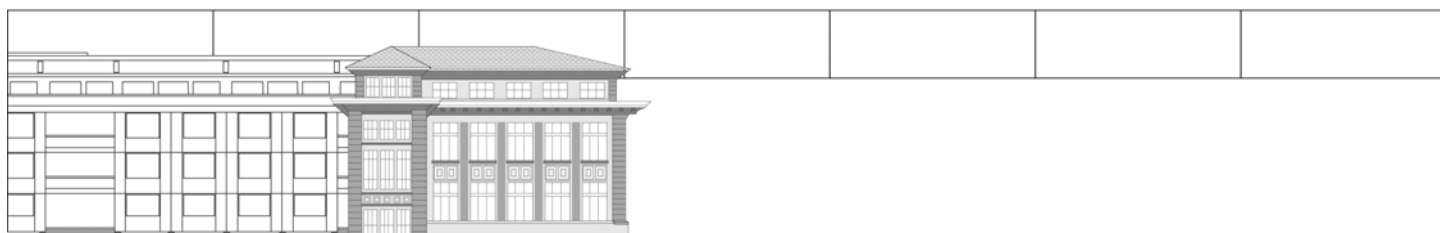


Hochschule für Architektur, Bau und Holz HSB  
Burgdorf, Biel

Abteilung F+E

# Spezifische Literaturrecherche

zum Projekt: "Mikrowellenbehandlung als  
Alternative zur phytosanitären Hitzebehand-  
lung von Holz: Machbarkeitsstudie  
(Gesuchsnummer BUWAL 2004.09)



Datum

17.08.04

Adresse des  
Gesuchstellers

Hochschule für Architektur, Bau und Holz HSB  
Abteilung F+E, Werkstoffe und Holztechnologie  
Solothurnstrasse 102, CH-2504 Biel  
Tel / Fax +41 (0)32 344 0 341 / 391

Verfasser

Wieland Stefanie et al.

Abteilungsleiter

Marc-André Gonin

Einheitsleiter

Frédéric Pichelin

Projektverantwortlicher Ernst Zürcher

HSB

[www.hsb.bfh.ch](http://www.hsb.bfh.ch)





**INHALTSÜBERSICHT DER LITERATURRECHERCHE**

<b>1</b>	<b>MIKROWELLEN</b>	<b>39</b>
<b>2</b>	<b>MIKROWELLENTROCKNUNG</b>	<b>44</b>
<b>3</b>	<b>EINFLUSS DER MIKROWELLEN AUF HOLZSCHÄDIGENDE INSEKTEN</b>	<b>47</b>
<b>4</b>	<b>PASTEURISIEREN/STERILISIEREN MITTELS MIKROWELLEN</b>	<b>48</b>
<b>5</b>	<b>WIRTSCHAFTLICHE MACHBARKEIT</b>	<b>49</b>
<b>6</b>	<b>SICHERHEIT</b>	<b>51</b>
<b>7</b>	<b>ZUSAMMENFASSUNG</b>	<b>52</b>
<b>8</b>	<b>VERZEICHNISSE</b>	<b>53</b>

**DETAILLIERTES INHALTSVERZEICHNIS DER LITERATURRECHERCHE**

<b>1</b>	<b>MIKROWELLEN</b>	<b>39</b>
1.1	Grundlagen .....	39
1.2	Funktion der Erwärmung.....	40
1.3	Wärme ist Teilchenbewegung.....	41
1.4	Bauteile von Mikrowellenanlagen .....	41
1.5	Vorteile und Risiken der Mikrowellentechnologie .....	43
<b>2</b>	<b>MIKROWELLENTROCKNUNG</b>	<b>44</b>
2.1	Dielektrische Eigenschaften des Holzes' .....	44
2.2	Einflüsse auf die Dielektrizitätskonstante von Holz <sup>6</sup> .....	44
2.3	Holztrocknung mittels Mikrowellen.....	45
2.4	Lacktrocknung mittels Mikrowellen .....	46
<b>3</b>	<b>EINFLUSS DER MIKROWELLEN AUF HOLZSCHÄDIGENDE INSEKTEN</b>	<b>47</b>
3.1	Dielektrische Eigenschaften von Lebewesen, insbesondere Insekten.....	47
3.2	Technologie zur Verhinderung der Einfuhr holzzerstörender Insekten in die USA ....	48
3.3	Dielektrische- und Mikrowellenverfahrenstechnologien zur phytosanitären Behandlung von Verpackungsholz .....	48
<b>4</b>	<b>PASTEURISIEREN/STERILISIEREN MITTELS MIKROWELLEN</b>	<b>48</b>
4.1	Abtötung von Mikroorganismen in Korkzapfen .....	49
4.2	Die Wirkung von Mikrowellen auf luftübertragbare Mikroorganismen .....	49
4.3	Schimmelpilzbekämpfung mittels Mikrowelle .....	49
<b>5</b>	<b>WIRTSCHAFTLICHE MACHBARKEIT</b>	<b>49</b>
<b>6</b>	<b>SICHERHEIT</b>	<b>51</b>
6.1	Norm: Sicherheitsanforderungen für industrielle Mikrowellen-Einrichtungen .....	51
6.1.1	Kennzeichnung .....	51
6.1.2	Schutz gegen Streustrahlung.....	51
6.2	Norm: Sicherheitsabstände.....	51
6.3	Messinstrumente.....	51
<b>7</b>	<b>ZUSAMMENFASSUNG</b>	<b>52</b>
<b>8</b>	<b>VERZEICHNISSE</b>	<b>53</b>
8.1	Abbildungsverzeichnis .....	53
8.2	Tabellenverzeichnis .....	53
8.3	Literaturverzeichnis.....	53

# 1 Mikrowellen

## 1.1 Grundlagen<sup>1</sup>

Mikrowellen wurden 1864 von J. C. Maxwell vorhergesagt und 1888 erstmals experimentell durch H. Herz nachgewiesen. Die Idee der Übertragung von Leistung durch Mikrowellen wurde 1899 von N. Tesla vorgeschlagen und schon zwei Jahre später durch eine Übertragung eines Signals über den Atlantik erfolgreich verwirklicht. 1937 entwickelte W. W. Hansen, ein Begründer der Mikrowellentechnologie, das Klystron (Mikrowellenerzeuger) für militärische Zwecke. Das eingebaute Klystron in Flugzeugen störte das gegnerische Radar, indem es mit der selben Frequenz zurück strahlte. Die Radaranlage konnte so die Flugzeuge nicht mehr erkennen. Von da an wurden Mikro-wellen in vielen Gebieten der wissenschaftlichen Forschung und des täglichen Lebens genutzt.

Der Begriff Mikrowelle bezeichnet den Teil des elektromagnetischen Spektrums mit einer Frequenz von 300 MHz bis 300 GHz (Gigahertz), welches Wellenlängen zwischen 1 m und 1 mm entspricht.

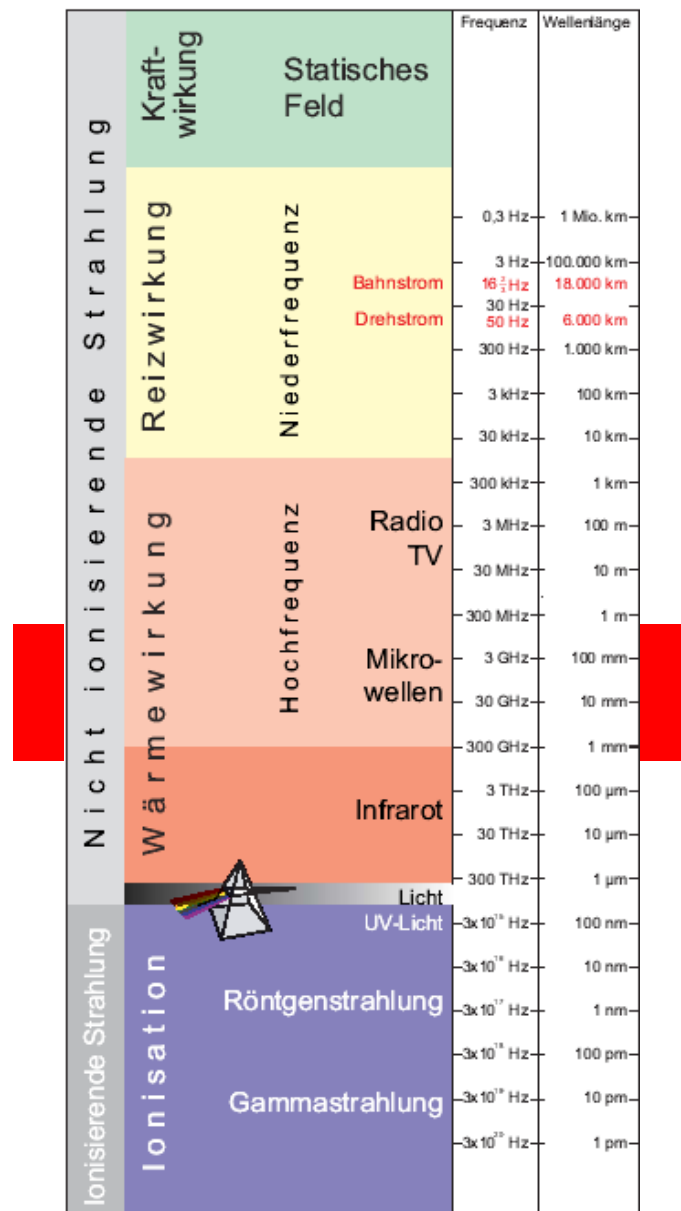


Abbildung 1: Übersicht über die verschiedenen elektromagnetischen Strahlenkategorien

<sup>1</sup> Prof. Dr. U. Hartmann (2003): Mikrowellen, Institut für Experimentalphysik, Universität des Saarlandes, Saarbrücken, <http://www.uni-saarland.de/fak7/hartmann/lehre/Mikrowellen/Kapitel1.pdf>

Aufgrund der kurzen Wellenlänge können sich Mikrowellen leicht durch Luft und die obere Atmosphäre fortbewegen. Mittels Parabolantennen können sie fokussiert werden. Deshalb werden sie heute extensiv im Bereich der Satellitenkommunikation, besonders in aktuellen GPS-Systemen, verwendet.

Im Bereich der Anwendung im täglichen Leben sind die beiden besten Beispiele der Mikrowellenherd und das Handy. Handys profitieren von den immer kleiner werdenden Bauteile für die Mikrowellenerzeugung und arbeiten bei ungefähr 900 - 1800 MHz. Die hohe abgestrahlte Leistung direkt am Kopf des Benutzers (bis zu 2 Watt) lassen das Handy allerdings in letzter Zeit in gesundheitlicher Hinsicht zu einem viel diskutierten Thema werden.

Zur Zeit gelten die folgenden Grenzwerte:

Tabelle 1: Grenzwerte für die Frequenz von 2.45 GHz

Frequenz = 2.45 GHz	Arbeitsplatz	Öffentlichkeit
elektrische Feldstärke	137 V/m	61.4 V/m
magnetische Feldstärke	0.36 A/m	0.16 A/m
Flussdichte	50 W/m <sup>2</sup>	10 W/m <sup>2</sup>

Elektromagnetische Felder lassen sich in ein elektrisches Feld  $E$  (V/m) und ein magnetisches Feld  $H$  (A/m) zerlegen. Im Fernfeld, d.h. ab einem gewissen Abstand von der Quelle (3x der Wellenlänge) sind E- und H-Feld streng miteinander verbunden.

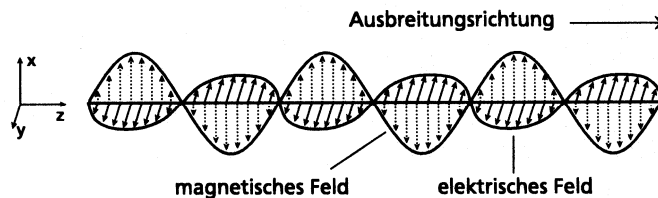


Abbildung 2: Orthogonaler Zusammenhang des elektrischen und magnetischen Feldes

## 1.2 Funktion der Erwärmung

In privaten Mikrowellengeräten und in den meisten Industrie-Anlagen wird elektromagnetische Strahlung mit einer Frequenz von 2,45 GHz (2'450'000'000 Hz) bzw. einer Wellenlänge von 122.4 mm benutzt.

Ihre Wirkung auf Materie, d. h. auch auf lebende Organismen, ist nach heutigem Kenntnisstand rein thermischer Art, es findet also im Gegensatz zu den kurzwelligen Strahlen wie Röntgen- oder Gammastrahlen keinerlei ionisierende Wirkung statt, welche Auswirkungen auf das Erbgut haben könnte.

Die Wechselwirkungen, welche elektromagnetische Strahlung mit Materie eingehen kann, hängt sehr stark von der Energie der Strahlung ab. Bei Zusammenstößen von elektromagnetischen Wellen mit Molekülen werden im Mikrowellenbereich normalerweise weder Schwingungen noch Elektronen angeregt. Die dazu nötige Energie reicht nicht aus. Mikrowellen sind jedoch in der Lage beim Kontakt mit Materie ihre Energie in Form von Rotationsenergie auf die Materie zu übertragen, weil sie in Form eines Wechselfeldes auftreten, d.h. das getroffene Molekül richtet entsprechend dem aufgebauten Feld aus.

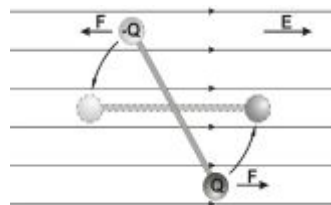


Abbildung 3: Rotation der Moleküle nach wechselnden, elektromagnetischen Feldlinien

Damit allerdings die Energie der Welle als Rotationsenergie auf das getroffene Teilchen übertragen werden kann, muss dieses ein permanentes Dipolmoment besitzen. Nur dann kann es mit der Welle in Wechselwirkung treten. Das bedeutet, dass beispielsweise einzelne Atome keine Wechselwirkungen mit Mikrowellen eingehen, da ein Atom kein Dipolmoment besitzt. Z. B. Stickstoff und Sauerstoff besitzen kein permanentes Dipolmoment und können deshalb die Energie der Strahlung nicht absorbieren. Wasser, welches in den meisten Nahrungsmitteln in erheblichen Mengen vorhanden ist, ist dagegen ein recht starker Dipol und ist demzufolge sehr

gut in der Lage, die Energie aufzunehmen und in Molekülrotationen umzusetzen<sup>2</sup>. Einzelne Wassermoleküle werden mit einer Strahlung von etwa 15 GHz am effizientesten erwärmt. Weil bei dieser Frequenz die ersten Moleküle am Rand die meiste Energie der Strahlung aufnehmen, ist die Eindringtiefe sehr gering.

### 1.3 Wärme ist Teilchenbewegung<sup>2</sup>

Materie speichert Wärme, indem sich die Atome bzw. die Moleküle stärker bewegen. Diese Bewegung kann dabei entweder die Schwingung um die Ruhelage sein (z. B. bei Feststoffen), eine ungeordnete Molekülschwingung, eine Bewegung mit großer Geschwindigkeit durch den Raum (Translation, nur Gase und Flüssigkeiten) oder die Rotation von Molekülen.

Ein Körper in einem bestimmten Wärmezustand emittiert seinerseits elektromagnetische Energie im Infrarotbereich, die Wärmestrahlung, welche nicht an Materie gebunden ist und nur wegen der Verstärkung der Teilchenbewegung im Rezeptor oder Messgerät (z. B. unsere Haut oder dem Thermometer) als Wärme empfunden wird.

Wenn nun also durch Mikrowellen Dipolmoleküle, wie etwa das Wassermolekül, zu rotieren angeregt werden, dann führt es dazu, dass sich das Wasser erwärmt. Von dem Wasser aus kann die Wärme gleichmäßig über alle Materialien (also auch den Teller) verteilt werden. Dieser Verteilungsprozess ist allerdings vergleichsweise langsam und dauert eine gewisse materialspezifische Zeit.

### 1.4 Bauteile von Mikrowellenanlagen<sup>3</sup>

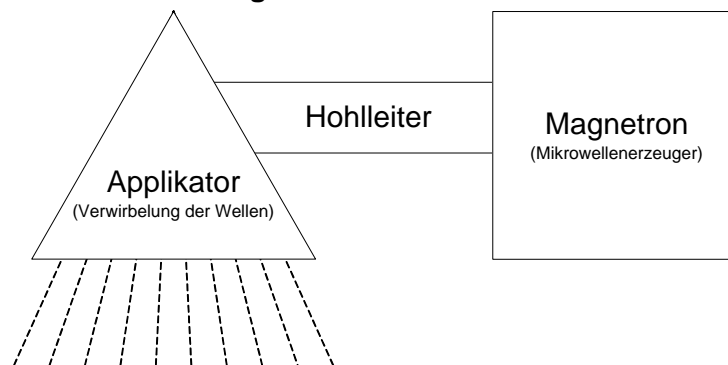


Abbildung 4: Schematische Darstellung der Mikrowellenerzeugung und -übertragung

Mikrowellen im industriellen Leistungsbereich werden im allgemeinen mittels sogenannter Magnetrons (Abbildung 5) erzeugt. Am einfachsten lässt sich die Funktion eines Magnetrons mit der einer Pfeife vergleichen. Wenn in der Pfeife ein Luftstrom über eine scharfe Kante streicht, entsteht im Pfeifenkörper eine Schwingung. Im Magnetron wird ausgehend von der Glühkathode ein Elektronenstrom erzeugt, der durch das Magnetfeld der beiden Ringmagnete in eine kreisförmige Bahn umgelenkt wird. Dabei streichen die Elektronen entlang der Schlitze in der Anode und regen Schwingungen in den Resonatorkammern an.

<sup>2</sup> [www.wiefunktioniertdaseigentlich.de/technik/mikrowelle.html](http://www.wiefunktioniertdaseigentlich.de/technik/mikrowelle.html)

<sup>3</sup> EL-A Verfahrenstechnik GmbH, veröffentlicht in VERFAHRENSTECHNIK 23, 1989, Nr. 6

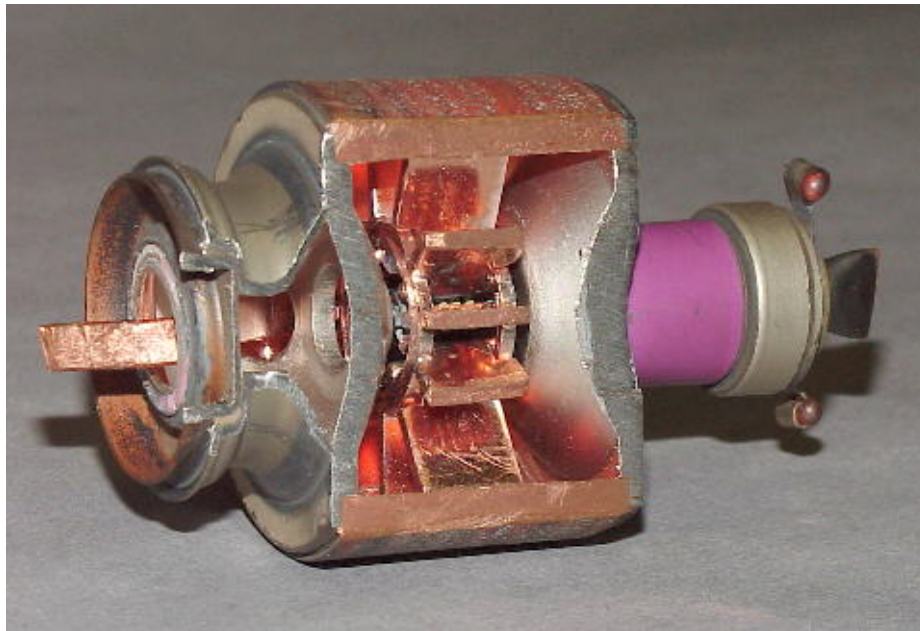


Abbildung 5: Ein der Länge nach aufgeschnittener Magnetron

Die Übertragung der Mikrowelle vom Generator (Magnetron) zu einem geeigneten Applikator erfolgt in einem sogenannten Rechteckhohlleiter aus einem gut leitenden Metall. Die Geometrie dieses Hohlleiters ist abhängig von der Frequenz der zu leitenden Mikrowelle. Vom Applikator wirkt die Mikrowelle auf das zu erwärmende Produkt ein. Dieser kann ganz verschiedene Geometrien aufweisen und sowohl als Resonator als auch als Multimode-Applikator ausgeführt sein. Der Applikator ist immer ein metallischer Hohlraum, an dessen Wänden die Mikrowellen möglichst verlustfrei reflektiert werden und nicht ins Freie austreten können. Volumetrisch grosse Applikatoren sind immer als Multimode-Applikatoren ausgebildet, d.h. die Mikrowellen werden vollkommen unregelmässig reflektiert und können sich in beliebiger Weise überlagern. Die Geometrie erlaubt die Ausbreitung von vielen möglichen Wellenlängen (Modes), welche bei der Reflexion entstehen. In solch einem Applikator entsteht immer ein typisches Interferenzbild, d.h. Auslöschung von Wellenenergie bzw. Verstärkung von Wellenenergie, welches abhängig ist von der Geometrie des Applikators und der Art und Menge sowie Positionierung des Mikrowellen absorbierenden Produktes. Die Energieverteilung in solch einem Applikator kann durch zusätzliche Massnahmen verbessert werden.

Neben dem Multimode-Applikator gibt es für spezielle Anwendungen noch so genannte Resonanz-applikatoren, d.h. Applikatoren deren Geometrie so gewählt ist, dass sich nur eine, einzige Wellenlänge darin ausbreiten kann. Als Sonderform eines solchen Applikators ist der Hohlleiterapplikator zu betrachten, d.h. ein Applikator in Form eines Rechteckhohlleiters, in welchen durch entsprechende Einführschlitze das Produkt in relativ dünner Schicht transportiert werden kann. In solchen Applikatoren kann ein sehr homogenes und sehr starkes Feld erzeugt werden.

Kontinuierlich arbeitende Mikrowellenanlagen benötigen für den Produkt-Ein- und Austritt beim Applikator noch Schleusen, welche angepasst sind an die Art und Geometrie des einzubringenden Produktes. Kleinvolumige Produkte können relativ verlustfrei durch sogenannte Reflexionsschleusen gefördert werden, wobei diese geometrisch so ausgebildet sind, dass die Mikrowelle sich in der Schleusenöffnung überhaupt nicht ausbreiten kann und somit auch nicht austritt. Grossvolumigere Produkte oder auch höhere Produktdurchsätze werden durch kombinierte Reflexions- und Absorptionsschleusen gefördert, wobei zunächst eine Reflexionszone die Mikrowellen so transformiert, dass diese möglichst wieder in den Applikator reflektiert werden. Die dann noch verbleibende Mikrowellenrestenergie wird in speziellen Absorbern in Wärme umgesetzt.

Als zusätzliche Bauteile für eine komplette Mikrowellenanlage werden noch die Kühleinrichtungen für die Verlustleistung der Magnetrons benötigt, welche entweder als Wasserkühlung oder als Luftkühlung ausgeführt sind. Diese sind nötig, da die elektrische Energie aus dem Netz nur zu rund 50 bis 60% als Hochfrequenzenergie abgestrahlt wird. Die Differenzenergie wird im Magnetron in Wärme umgesetzt und muss als Verlust betrachtet werden, wenn nicht im gleichen Prozess Wärme mit relativ niedrigem Temperaturniveau benötigt und direkt wieder verwendet wird.

## 1.5 Vorteile und Risiken der Mikrowellentechnologie<sup>4</sup>

Der erfolgreiche Einzug die Mikrowellentechnologie in den Alltag begann bereits in den 60er Jahre. Mikrowellengeräte sind aus vielen modernen Küchen, insbesondere Grossküchen, fast nicht mehr wegzudenken, und auch die Lebensmittelindustrie setzt die "schnelle Welle" häufig ein. Die Hauptverkaufsargumente der Geräte-Hersteller sind die Verkürzung und Vereinfachung der Mahlzeitenzubereitung, die Bequemlichkeit und die verminderten Kosten für die Elektrizität, die bei der herkömmlichen Erwärmung verwendet wird. Die *Schweizerische Krebsliga* spricht in einer Broschüre über Krebs und Ernährung von "schonender Zubereitungsart".

Die Mikrowellentechnologie ist jedoch bis heute Objekt von kontroversen Diskussionen geblieben, wo wissenschaftliche Fakten und Spekulationen sich durchmischen. Das Problem der elektromagnetischen Strahlen ("Elektrosmog"), verursacht durch Handys, Datenkommunikation, Stromnetze und auch Mikrowellen wird oft als Übel der schnelllebigen Informationsgesellschaft angesehen. Andererseits spielen wirtschaftliche Interessen bei den Auseinandersetzungen eine wichtige Rolle.

Prof. Bernard Blanc machte 1991 mit dem Schweizer Umweltbiologe Dr. H. U. Hertel der *Universität von Lausanne* eine Untersuchung über die Auswirkung von Mikrowellen behandelte Nahrung auf den menschlichen Organismus<sup>5</sup>. Ihre Studie erbrachte den Beweis, dass Nahrung, die im Mikrowellenofen zubereitet wurde, unmittelbar nach der Aufnahme auffällige Veränderungen im Blut von Probanden bewirkte. Die Autoren beschrieben diese als zum Teil hochsignifikant und zogen daraus den Schluss, dass hier der Beginn eines pathologischen Prozesses, wie z. B. bei der Entstehung von Krebs vorlag.

Prof. Blanc (ehem. Institut für Biochemie, ETH Lausanne) hat sich in der Fernsehsendung *Kassensturz* vom 28.01.92 und gegenüber der Presse in aller Form von der Präsentation und von der durch ihn mitverfassten Interpretation dieser Forschungsergebnisse distanziert. Gleichwohl gab er gegenüber der *Basler Zeitung* im Februar 1992 zu: "Das heisst aber nicht, dass weitere Forschung unterbleiben darf, denn die Veränderungen im Blut geben doch Hinweise darauf, dass durch die Bestrahlung etwas im Körper geschieht."

Selten hat ein Bericht eine so heftige Reaktion hervorgerufen wie die Schweizer Studie über die Unverträglichkeit von mikrowellenbehandelter Nahrung: Journalisten und Mikrowellengegner, Industrie und Handel traten auf den Plan und lieferten sich eine heisse Schlacht, die bis heute andauert.

Der *Fachverband Elektroapparate für Haushalt und Gewerbe Schweiz* (FEA) klagte gegen Dr. Hertel, mit der Begründung, er habe gegen das Gesetz über unlauteren Wettbewerb verstossen. Das Gericht gab dem Fachverband recht und verurteilte Dr. H. U. Hertel. Prof. Michael Teuber, ordentlicher Professor für Lebensmittelmikrobiologie an der ETH Zürich, der als Gutachter für den FEA geladen war, hatte nach eigenen Aussagen Hertels Studie nie gesehen, bezeichnete sie aber dennoch "als wissenschaftlich nicht nachprüfbar". In seiner Stellungnahme zur Sicherheit von Mikrowellenherden vom 29.02.92 schrieb er dazu: "Die Veröffentlichung kann beim jetzigen Stand des Wissens und sorgfältiger Abwägung aller bekannten Wirkungen der Mikrowelle nur als unverantwortliche und tendenziöse Panikmache bezeichnet werden, für die es keinerlei gesicherten und nachprüfbaren Anlass gibt." Er verwies das Gericht auf eine in Arbeit befindliche Dissertation<sup>6</sup>, für welche er als Referent verantwortlich zeichnete. Diese würde, wie er versicherte, die Unschädlichkeit von Mikrowellenbestrahlung beweisen, dies sei schon an den ersten Resultaten erkennbar. Die Arbeit wurde 1994 schließlich vorgelegt – in aller Stille. Sie beschreibt die Untersuchung thermischer Einwirkungen von Mikrowellen auf Bakterien, mit Schwerpunkt auf möglichen genetischen Veränderungen. Sie konnte aber die erste Studie nicht widerlegen.

Dieses Beispiel zeigt die Schwierigkeiten im Umgang mit unsichtbaren und normalerweise nicht spürbaren Vorgänge. Die Gesellschaft versucht nach bestem Wissen und Gewissen einen Kompromiss der Regulierung zu finden.

---

<sup>4</sup> <http://www.naturalscience.org/de/journal/artikel/mikrowellen.html>

<sup>5</sup> Blanc, B. H. / Hertel, H. U. (1992): Comparative Study about the Influence on Man by Food Prepared Conventionally and in the Microwave-Oven

<sup>6</sup> Guillaume-Gentil, O. (1994): Quantitative Bestimmung der thermischen Einwirkung von Mikrowellen (2,450 GHz) auf sensitive mikrobiologische Systeme: Lebensfähigkeit, Mutagenese, DNA-Reparatur, Enzymaktivitäten und Plasmidtransformation. – Dissertation, ETH, Zürich



## 2 Mikrowellentrocknung

Die Trocknung von Produkten mittels Mikrowellen ist eine der jüngsten und interessantesten Verfahrensmöglichkeiten der thermischen Trocknung. Das Prinzip ist, wie schon erwähnt, eine dielektrische Erwärmung, bei der das Erwärmungsgut im Strahlungswechselfeld liegt. Die Mikrowellentechnik eignet sich somit für alle Trocknungsaufgaben mit wässrigen Bestandteilen oder Lösemitteln, welche ein Dipolmoment, d.h. eine hohe Dielektrizitätskonstante aufweisen. Die Vorteile der Mikrowellentechnik für solche Trocknungsaufgaben sind bekannt. Im Vergleich zu konventionellen Behandlungen (Konvektionstrocknung, Aushärtung von Klebstoffen mittels direkter Wärme-einwirkung) steigt hier entsprechend der verwendeten elektrischen Leistung die Temperatur im Werkstück linear an, prinzipiell unabhängig von der Ofentemperatur und der Umgebungsluft. Die Umwandlung von elektrischer Energie in Mikrowellen und die weitere Umwandlung in Wärme ist relativ zur Behandlungsdauer sehr wirksam. Verzögerungen durch eine Aufheizphase finden praktisch nicht statt und die Bedingungen können über die elektrische Leistung schnell geändert und überwacht werden. Die Mikrowellenenergie kann in einem Prozess gezielt in einem dafür notwendigen Zeitfenster eingesetzt werden. Die Erwärmung eines Werkstoffes mittels Mikrowellenenergie findet, materialabhängig, von Innen nach Aussen statt. Somit ist eine räumliche, homogene Erwärmung der Materialien möglich. Dies kann, abhängig vom Material, eine Energie- und Zeitminimierung bedeuten.

Da Holz auf Grund seiner hygroskopischen Eigenschaften in unterschiedlichem Mass Wasser enthält (Wassergehalt frisch eingeschlagen z. T. > 150 % (Splint) bis darrtrocken 0 %) wurden die Möglichkeiten des Einsatzes dieser interessanten Verfahrenstechnologie der thermischen Trocknung in den Bereichen der Trocknung, Acetylierung von Massivholz und Spänen für die Holzwerkstoffherstellung sowie Lacktrocknung auf Holz und Holzwerkstoffen erforscht und schon seit längerem technisch angewendet. Hierbei sind die dielektrischen Eigenschaften des Holzes von grosser Bedeutung, welche im folgenden beschrieben werden.

### 2.1 Dielektrische Eigenschaften des Holzes<sup>7, 8</sup>

In Abhängigkeit von dem Wassergehalt hat Holz unterschiedliche dielektrische Eigenschaften. Es kann in darrtrockenem Zustand (Holzfeuchte 0%) als guter Isolator und in luft- bzw. halbtrockenem Zustand (Holzfeuchte < 0 - 30 %) als Halbleiter betrachtet werden. Bei Erreichen und Überschreiten des Fasersättigungsbereichs (Holzfeuchte  $\geq 30$  %) sind keine nennenswerten Isoliereigenschaften mehr vorhanden. Als Kenngrösse für die dielektrischen Eigenschaften werden die *relative Dielektrizitätskonstante*  $\epsilon_{\text{rel}}$  sowie der *dielektrische Verlustwinkel*  $\vartheta$  bzw.  $\tan\vartheta$  verwendet. Die Dielektrizitätskonstante von Wasser beträgt etwa 81, die von darrtrockenem Holz 2 bis 3. Die dielektrischen Verluste im Holz entstehen bei der Mikrowellenbestrahlung, weil Mikrowellen in der Lage sind, beim Kontakt mit Materie, ihre Energie in Form von Rotationsenergie auf die Materie zu übertragen, d.h. die getroffenen Wassermoleküle mit ihrem Dipolcharakter richten sich nach dem ständig wechselnden Feld aus. Damit verbunden sind molekulare Reibungsvorgänge, die Wärmeenergie frei geben.

### 2.2 Einflüsse auf die Dielektrizitätskonstante von Holz<sup>6</sup>

Der Feuchtegehalt von Holz hat einen deutlichen Einfluss auf dessen Dielektrizitätskonstante. Mit zunehmendem Feuchtegehalt wird die Konstante grösser. Die Ursache dafür ist in den unterschiedlichen Dielektrizitätskonstanten von darrtrockenem Holz und Wasser zu suchen. Gleichzeitig ist ein deutlicher Einfluss der Messfrequenz erkennbar: je grösser die Messfrequenz, desto kleiner wird die Dielektrizitätskonstante.

Die Struktureigenschaften von Holz haben ebenso einen Einfluss. Die Dielektrizitätskonstante steigt mit zunehmender Dichte und abnehmendem Faserwinkel. Die Unterschiede zwischen radialer und tangentialer Richtung sind gering.

Der Einfluss auf die dielektrischen Eigenschaften von Holz wurde unter anderem auch von Olmi R. et al. (2000)<sup>9</sup> untersucht. Die Forscher charakterisierten die dielektrischen Eigenschaften von fünf Holzarten, bei unterschiedlichen Holzfeuchten (Waldfähre, Pappel, Rosskastanie, Eiche und Nussbaum) im Frequenzbereich von 2 bis 3 GHz, insbesondere bei 2.45 GHz.

<sup>7</sup> Niemz P. (1993): Physik des Holzes und der Holzwerkstoffe, DRW-Verlag Weinbrenner

<sup>8</sup> Bosshard, H.-H., (1974): Holzkunde II - Zur Biologie, Physik und Chemie des Holzes. Birkhäuser-Verlag, Basel-Boston-Stuttgart

<sup>9</sup> Olmi R. et al. (2000): Dielectric Properties of Wood from 2 to 3 GHz, The journal of microwave power & electromagnetic energy, Volume 35, Number 3



Die Ergebnisse zeigten, dass bei einer identischen Ausgleichfeuchte (13 %) der fünf Holzarten, die dielektrischen Konstanten jeder Holzart bei gleicher Frequenz unterschiedlich sind. So hatte Pappelholz eine dielektrische Konstante von 2,2, Nussbaum von 2,6, Eiche von 3,0 und Roskastanie von 2,7 bei Bestrahlung mit einer Frequenz von 2,45 GHz. Ebenso wurden unterschiedliche Dielektrizitätskonstanten für Frühholz und Spätholz bei Pappel gemessen. Die Ergebnisse dieser wissenschaftlichen Arbeit bestätigen somit, dass sowohl die Struktureigenschaften von Holz, die Holzart, sowie die Holzfeuchte frequenzabhängig einen Einfluss auf die dielektrischen Eigenschaften haben.

### 2.3 Holz Trocknung mittels Mikrowellen

Die technische Entwicklung der Holz Trocknung durch dielektrische Erwärmung wurde vor Jahrzehnten gestartet. So berichtete Abramenko, S.N. 1934<sup>10</sup> in Russland über seine ersten Versuche, Holz in einem hochfrequenten elektrischen Feld zu trocknen. Wie bei der Hochfrequenz Trocknung ist das Prinzip der Mikrowellentrocknung eine dielektrische Erwärmung. Im Unterschied zur Hochfrequenz Trocknung liegt bei der Mikrowellentrocknung das Erwärmungsgut im Dipol-Strahlungsfeld, wogegen bei der Hochfrequenz Trocknung das Erwärmungsgut als Dielektrikum zwischen die Platten eines Kondensators gebracht wird. Ausserdem werden bei der Mikrowellentrocknung andere Frequenzen als bei der Hochfrequenz Trocknung angewendet und sie ist eine der jüngsten Verfahrensmöglichkeiten zur Trocknung von Produkten.

Im Bereich der Holz Trocknung betonen viele Autoren (Dedic 1995<sup>11</sup>, Antti 1992<sup>12</sup>, Zheng 1994<sup>13</sup>, Turner et al. 1991<sup>14</sup>, 1993 a<sup>15</sup>, b<sup>16</sup>) die Vorteile der Mikrowellentrocknung gegenüber der konventionellen Trocknung, wie die Trocknungszeitverkürzung im Zusammenhang mit einer höheren Trocknungsgeschwindigkeit (Feuchtigkeitsreduzierung in %/min). Mikrowellentrockner für Holz können als kontinuierliche oder Kammetrockner ausgeführt sein. Hierbei werden verschiedene Verfahrenstechnologien wie die Vakuum-Mikrowellentrocknung, die Kombination aus konventioneller und Mikrowellentrocknung oder eine reine Mikrowellentrocknung angewendet, welche unterschiedliche Vor- und Nachteile sowie Prozesszeiten mit sich bringen.

Leiker M. und Adamska M.A. (2004)<sup>17</sup> untersuchten den energetischen Wirkungsgrad und die Trocknungsgeschwindigkeiten bei der Vakuummikrowellentrocknung von Holz. Hierzu wurden Buche-, Ahorn- und Fichteplatten in einer Pilot- und Laboranlage getrocknet, um den energetischen Wirkungsgrad zu ermitteln. Um Materialschäden zu vermeiden, wurde der Prozess mittels einer Oberflächentemperaturmessung kontrolliert. In der Labor-Vakuumkammer befand sich ein einzelner Magnetron mit einer maximalen Leistung von 1,2 kW und einer Frequenz von 2,45 GHz. Die Pilotvakuummikrowellenanlage arbeitete mit zwei Magnetrons und einer maximalen Leistung von 2,0 kW und ebenfalls einer Frequenz von 2,45 GHz. Abhängig von der Anfangsfeuchte und Holzart wurden in beiden Anlagen energetische Wirkungsgrade von bis zu 80 % erreicht. Für Buche wurden Trocknungsgeschwindigkeiten von 1,0 – 4,5 %/min erreicht. Die Ergebnisse zeigten, dass durch die Anwendung der Vakuum- Mikrowellentrocknung, im Vergleich zur konventionellen Kammetrocknung, die Trocknungszeiten drastisch verkürzt werden können.

Auch Dedic A. et al. (2001)<sup>18</sup> führten, auf Grund von experimentellen Versuchen, einen Vergleich zwischen der Mikrowellen- und Dampftrocknung von Buchen- und Weisstannenholz durch. An den Proben wurde die Intensität des Entfeuchtungsprozesses bestimmt. Der eingesetzte Mikrowellentrockner arbeitete mit einer Frequenz von 1,3 GHz, wobei die Trocknungs-

<sup>10</sup> Abramenko, S.N. (1934): The drying of wood by electric currents of high-frequency. Woodworking UDSSR 10: 65-68

<sup>11</sup> Dedic A. (1995): Analysis of the Specificity of the Process of Convective Wood Drying. M.Sc. thesis. Faculty of Mechanical Engineering, Belgrade, Yugoslavia, (in Serbia)

<sup>12</sup> Antti A. (1992): Microwave drying of hardwood: simultaneous measurements of pressure, temperature and weight reduction, Forest Product Journal 42: 49-54

<sup>13</sup> Zheng Z (1994): Analysis of Heat and Mass Transfer Characteristics in Drying Processes of Porous Mediums by Microwave. 9<sup>th</sup> International Drying Symposium, Gold Coast, Australia

<sup>14</sup> Turner IW, Jolly PG (1991): The Modeling of Combined Microwave and Convective Drying of a Wet Porous Material, Drying Technology, 9: 1209-1270

<sup>15</sup> Turner IW, Puiggali JR, Jomaa W (1993a): An Investigation of Combined Microwave and Convective Drying of Wood: Part I. The Mathematical Model

<sup>16</sup> Turner IW, Puiggali JR, Jomaa W (1993b): An Investigation of Combined Microwave and Convective Drying of Wood: Part II. Simulations and Experimental Results

<sup>17</sup> Leiker M. und Adamska M.A. (2004): Energy efficiency and drying rates during vacuum drying of wood, Holz als Roh- und Werkstoff 62, 203-208, Springer Verlag

<sup>18</sup> Dedic A., Zlatanovic M. (2001): Some aspects and comparison of microwave drying of beech (*Fagus moesiaca*) and fir wood (*Abies alba*), Holz als Roh- und Werkstoff 59, 246-249, Springer Verlag

temperatur konstant auf 70 °C gehalten wurden. Die Untersuchungen ergaben, dass für die Trocknung von Weisstanne mehr Energie notwendig ist, als für Buchenholz. Der Energieverbrauch für die Trocknung eines Stapels von 10 Brettern mit insgesamt 0.0048 m<sup>3</sup> betrug annähernd 7.6 kWh, welches niedriger ist als bei der Dampftrocknung. Auch diese Forschungen ergaben, dass die Trocknung unter Mikrowellenbestrahlung 13 mal schneller vor sich geht, als bei konvektiver Trocknung. Als Möglichkeit zur Optimierung des Trocknungsprozesses schlagen die Forscher eine kontinuierlich durchlaufene Mikrowellenanlage vor.

Lee. H.W. (2003)<sup>19</sup> befasste sich mit der kombinierten Mikrowellen- und Konvektionstrocknung von Holz. Er untersuchte den Einfluss der Heisslufttemperatur auf die Trocknungscharakteristik der Mikrowellen, um den kombinierten Mikrowellen- und Konvektionstrocknungsprozess für Holz zu optimieren. Die Versuche wurden in einem Mikrowellentrockner mit einer Frequenz von 2.45 GHz und einer maximalen Leistung von 700 W durchgeführt. Zusätzlich wurde auf 100°C erwärmte Luft in den Mikrowellenofen eingeblasen. Ebenso wie in den vorher beschriebenen Forschungsarbeiten zeigten die Ergebnisse, dass durch den kombinierten Mikrowellen- und Konvektionstrocknungsprozess 6 resp. 4 mal so hohe Trocknungsgeschwindigkeiten für 25 resp. 50 mm dickes Holz erzielt werden können.

Die Vorteile der Mikrowellentrocknung gegenüber der konventionellen Trocknungsmethoden führen jedoch nicht bei jeder Anwendungsform dazu, dass ein Mikrowelleneinsatz vorteilhaft ist. Torgovnikow G. (1997)<sup>20</sup> befasste sich mit der Untersuchung der technischen und wirtschaftlichen Machbarkeit des Einsatzes von Mikrowellen zur Trocknung von Spänen zur Herstellung von Spanplatten. Dabei werden sogenannte Trommeltrockner angewandt. Einer der Nachteile dieser Trocknungsart ist die Verringerung der Spänegrösse durch Reibung während der Rotation im Trommeltrockner sowie die Holzfeuchtigkeitsunterschiede unter den einzelnen Spänen nach der Trocknung. Dies führt dazu, dass sich die Trocknungszeit verlängert und die Späne auf 1-1.5 % Holzfeuchtigkeit getrocknet werden müssen. Dies verschlechtert die physikalischen Eigenschaften der Späne und bedeutet höhere Trocknungskosten. Hierbei wurde erforscht, wie die Mikrowellentechnologie dies verbessern kann. Die Untersuchungen zeigten, dass die Absorption der Mikrowellenenergie vor allem in den feuchtesten Zonen der Späne stattfindet, wodurch der Mikrowellentrocknungsprozess eine automatische Feuchtigkeitsangleichung in den Spänen hervorruft. Eine Verbesserung der Trocknungsqualität durch die Mikrowellentechnik wird vor allem dann erreicht, wenn die Holzfeuchte der Späne bereits unter 15 % liegt. Ebenso ist der elektrische Energieverbrauch für die Mikrowellentrocknung der Späne nicht vorteilhaft. Im Gegensatz zu den vorher beschriebenen Forschungsarbeiten zeigten die Ergebnisse, dass die Mikrowellentechnik für diese spezielle Anwendung nicht geeignet ist, da die Trocknungskosten bei einem industriellen Einsatz erhöht würden.

## 2.4 Lacktrocknung mittels Mikrowellen

Die Mikrowellentrocknung von Wasserlacken auf unterschiedlichen Werkstoffen ist in den letzten Jahren intensiv erforscht worden. Versuche über die Technik der Lackierung von Kunststoffen wurden am Institut für Kunststoffprüfung und Kunststoffkunde der Universität Stuttgart von V. Bräutigam et al. (2001)<sup>21,22</sup> durchgeführt. Die Untersuchungen zeigten, dass die Trocknungs- und Vernetzungszeiten der Lacksysteme durch die Mikrowellenanwendung im Vergleich zur konventionellen Trocknung verkürzt werden können. Weitere Untersuchungen zeigten jedoch auch, dass die bisherigen Verfahren, welche Mikrowellenstrahlung zur Trocknung von Beschichtungsstoffen auf Metallen und Kunststoffen einsetzen, für eine industrielle Serienlackierung, nur eingeschränkt nutzbar sind, da die dafür erforderliche Prozesssicherheit bezüglich vorkommender Blasenbildung in der Basislackschicht noch nicht gegeben ist<sup>23</sup>.

<sup>19</sup> Lee H. W. (2003): Combined Microwave and Convective Drying of Korean Wood Species, 8th International IUFRO Wood Drying Conference, Brasov, Romania, Proceedings, 146 - 149

<sup>20</sup> Torgovnikow G. (1997): Microwave Drying of Wood chips for Particleboard, *Conference on Microwave and High Frequency Heating*, 1: 216-19. Bologna, Italy: Lo Scazabeo

<sup>21</sup> Bräutigam V. et al., 3 (2001): Mikrowellentrocknung von Wasserlacken - Dielektrische Eigenschaften von Lacksystemen, mo-Metalloberflächen, 55, S. 51

<sup>22</sup> Bräutigam V. et al., 8 (2001): Mikrowellentrocknung von Wasserlacken Prozessparameter und qualitativer Vergleich mit der Umlufttrocknung, mo-Metalloberflächen, 55, S. 37 - 42

<sup>23</sup> Wehner J., Schrade K.W. (2002), Neue Mikrowellentechnologie für die Lacktrocknung, *Journal für Oberflächentechnik*, No. 7/2002

Zwei an der HSB\* durchgeführte Projekte (Mikrowelle I<sup>24</sup> (1999) & Mikrowelle II<sup>25</sup> (2003)) befassten sich mit der Anwendung der Mikrowellentechnologie zum Trocknen von Wasserlacksystemen auf Holzwerkstoffen. In beiden Projekten konnte nachgewiesen werden, dass die Mikrowellentrocknung im Vergleich zu konventionellen Trocknungsmethoden eine sehr effiziente Methode ist, welche Energie- und Kostenersparnisse mit sich bringt. In beiden Projekten konnten die Energiekosten im Vergleich mit konventionellen Trocknungsmethoden um bis zu 40 % gesenkt werden. Die Untersuchungen zeigten aber auch, dass die Vorteile der Mikrowellentrocknung erst dann voll zur Geltung kommen, wenn sie in Kombination mit anderen Trocknungsverfahren eingesetzt wird.

Diese eindeutigen Vorteile des Einsatzes von Mikrowellen bei der Lacktrocknung haben dazu geführt, dass es seit kurzer Zeit eine Anlage der Firma GIARDINA<sup>26,27</sup> auf dem Markt gibt, die sogenannte MOS®-Technologie, welche zur Trocknung von UV- und 2-Komponenten Wasserlacken bereits in 4 Firmen industriell eingesetzt wird.

### 3 Einfluss der Mikrowellen auf holzschädigende Insekten

Die Mikrowellen besitzen weitere Eigenschaften, welche zur Abtötung von holzerstörenden Insekten eingesetzt werden können. Hierbei macht man sich die Eigenschaft der Mikrowellen zunutze, dass der Grad der Erhitzung vom Feuchtegehalt des zu erhitzenden Mediums abhängig ist. Speziell bei Holz mit niedrigeren Feuchtigkeiten werden die Schädlinge wesentlich schneller als das Holz erhitzt. Der tiefe Gerinnungspunkt des Eiweisses der Insekten wird dabei überschritten und die Schädlinge werden vernichtet.

#### 3.1 Dielektrische Eigenschaften von Lebewesen, insbesondere Insekten

Nelson S.O. (2001)<sup>28</sup> beschreibt die Wechselwirkung zwischen elektromagnetischen Feldern und Insekten sowie deren dielektrische Eigenschaften. Der Autor liefert eine eingehende Literaturstudie über die Messungen der dielektrischen Eigenschaften von Insekten sowie die Ermittlung der optimalen Frequenz zum selektiven Erhitzen von Insekten. So wurde erstmals 1960 von Nelson und Whitney<sup>29</sup> über Messungen der dielektrischen Eigenschaften von Getreidekäfern in Reis bei 40 MHz berichtet. 1972/73<sup>30</sup> wurden von Nelson umfassende Versuche über den Einfluss unterschiedlicher Frequenzen durchgeführt, wobei Frequenzen zwischen 10 und 100 MHz als die am vielversprechendsten ermittelt wurden. Dies wurde 1974<sup>31</sup> von Nelson und Stetson bestätigt. Nach der eingehenden Literaturstudie werden vom Autor in vergangenen Forschungsarbeiten ermittelte dielektrischen Konstanten und Verluste von Insekten dargestellt und zusammengefasst. Dies zum Vergleich von Messungen der Dielektrizitätskonstanten und -verluste aus jüngsten mikrowellenbasierten Forschungsarbeiten. Aus dem Vergleich der gesammelten Daten geht hervor, dass die dielektrischen Eigenschaften der Insekten von der angewendeten Frequenz, der Temperatur und des Feuchtegehalts des umgebenden Materials, sowie des Wassergehalts der Insekten abhängig sind. Unterschiedliche Dielektrizitätskonstanten und -verluste zeigen sich ebenfalls zwischen einem Insektenkörper und einer Ansammlung von Insekten im Material. Ebenso wurden Unterschiede zwischen männlichen und weiblichen Insekten im Bereich des Insektenleibs beim Einsatz verschiedenen Frequenzen sowie zwischen unterschiedlichen Insektenarten festgestellt.

\* Hochschule für Architektur, Bau und Holz HSB, Biel - Switzerland

<sup>24</sup> KTI Forschungsprojekt Nr. 3519.1 (1999): Lacktrocknung bzw. -härtung von flüssigen Beschichtungsstoffen auf Holz oder Holzwerkstoffen mittels Mikrowellen

<sup>25</sup> KTI Forschungsprojekt Nr. 4608.2 (2003): Trocknung bzw. Härtung von farblosen und pigmentierten Ultraviolett härterender und Zweikomponenten Wasserlacksystemen auf Holz oder Holzwerkstoffen mittels Mikrowellen und der Kombination Mikrowellen-Ultraviolett-Trocknung

<sup>26</sup> Maggiore G. (2003): Wasserlacke auf Möbeln trocknen, besser lackieren! Nr. 17, Oktober 2003, S.4

<sup>27</sup> MOS® Technologie macht Unterschied (2003): <http://www.giardinagroup.com/home/docs/frameNews.htm>

<sup>28</sup> Nelson S.O. (2001): Dielectric properties of insects. The journal of microwave power and electromagnetic energy, Vol.36 No.1, S.47-56

<sup>29</sup> Nelson S.O., Whitney W.K. (1960): Radio frequency electric fields of stored grain insect control, Trans. ASAE 3(2): 133-137,144

<sup>30</sup> Nelson S. O. (1973b): Insect-control studies with microwaves and other radio-frequency energy, Bul. Entomomol. Soc. Amer. 19(3): 157-163

<sup>31</sup> Nelson S.O. (1974): Comparative effectiveness of 39- and 2450-MHz electric fields for control of rice weevils in wheat, J. Econ. Entomol. 67 (5): 592-595

### 3.2 Technologie zur Verhinderung der Einfuhr holzerstörender Insekten in die USA

Fleming M. et al. (2000)<sup>32</sup> untersuchten die Bekämpfung von Insekten und deren Larven mittels Mikrowellen, welche in Verpackungsholz vorkommen können. In Testwürfeln mit einer Kantenlänge von ca. 100 mm (4 inch) wurden an definierten Stellen Schädlinge platziert. Durch die Bestrahlung mit Mikrowellen von 900 Watt Leistung wurden alle Schädlinge nach 5 bis 30 Sekunden abgetötet. Dies erfolgte wie schon erwähnt auf Grund ihres hohen Anteils an Wasser. Hierbei zeigte sich ebenfalls der Einfluss der Holzfeuchte: Je höher die Holzfeuchtigkeit war, desto besser wurden die Mikrowellen absorbiert. Andererseits wurden die Schädlinge wesentlich schneller als das Holz erhitzt und getötet, wenn das Holz eine niedrigere Holzfeuchte hatte. Die Forscher kamen zum Schluss, dass die Mikrowellenbehandlung eine zeitsparende Alternative zu der konventionellen Wärmebehandlung darstellen kann, deren Parameter jedoch weiter optimiert werden müssen.

### 3.3 Dielektrische- und Mikrowellenverfahrenstechnologien zur phytosanitären Behandlung von Verpackungsholz

Auch Janowiak J.J. (Projektstart 01/2003)<sup>33</sup> befasst sich mit der Ermittlung der Machbarkeit der Mikrowellenbehandlung als Alternativmethode zur konventionellen Hitzebehandlung. Erste Vorversuche zeigten ähnliche Ergebnisse wie bei Fleming M. et al. Hierbei wurden Untersuchungen an Standardholzkanteln unterschiedlicher Holzarten durchgeführt, die künstlich mit lebenden Larven des asiatischen Laubholzbockkäfers infiziert wurden. Die Prüfkörper hatten eine Kantenlänge von ca. 10x10x10 cm sowie 10x10x25 cm, die Holzfeuchte wird nicht erwähnt. Angewendet wurde eine Mikrowellenstrahlung von 1.45 GHz. Temperaturmessungen erfolgten sowohl für die konventionelle Hitzebehandlung als auch für die Mikrowellenbehandlung. An allen Temperaturmesspunkten innerhalb der Blöcke wurden nach 0.5 - 5 Minuten Mikrowellenbestrahlung 60 °C erreicht, im Unterschied zu den 70 – 123 Minuten, die für die konventionelle Hitzebehandlung nötig sind. Weitere Versuche mit Blöcken aus grünem und trockenem Holz zeigten, dass die Larven in feuchtem Holz nach 3,5 Minuten mit einer Mikrowellenleistung von 900 Watt getötet werden und dass nur 5 Sekunden notwendig sind um die Larven in den trockenen Holzblöcken zu töten. Diese ersten Vorversuche zeigen, dass mittels Mikrowellenbehandlung die Larven des asiatischen Laubholzbockkäfers in Verpackungsholz effizient abgetötet werden können.

## 4 Pasteurisieren/Sterilisieren mittels Mikrowellen

Organische Produkte aus dem Nahrungsmittel- und pharmazeutischen Bereich wie auch Abfälle aus dem Krankenhausbereich lassen sich, mit Hilfe der Mikrowellenerwärmung in sehr kurzer Zeit mit relativ geringem Aufwand pasteurisieren\* und in einigen Fällen auch sterilisieren<sup>\*\*</sup>. Gerade die bei industriellen Anlagen übliche Frequenz von 2.45 GHz mit einer Wellenlänge von 12.2 cm regt die Wasser Dipol-Moleküle zu Schwingungen an, die in Temperaturbereiche führen können, welche sterilisierend wirken. Dieser weitere Vorteil der Mikrowellen hat dazu geführt, dass in jüngster Zeit an neuen, innovativen Verfahren gearbeitet wird, mittels denen Mikroorganismen in Saatgut<sup>35</sup> aber auch in Holzprodukten oder Luft abgetötet oder bekämpft werden.

<sup>32</sup> Fleming M., Hoover K. et al. (2000): Technologies for Preventing Introductions of Exotic Wood-Boring Insects into the United States, <http://uvm.edu/albeetle/research/eradication.html>

<sup>33</sup> Janowiak J.J.(2003): Dielectric and microwave application for the Phytosanitary Treatment of Wood Packing Material (Project start date: 09/01/03, Expected completion date: 08/31/05). Methyl Bromide Transitions Program (MBT), Cooperative State Research, Education and Extension Service

\*pasteurisieren: auf Temperaturen von etwas weniger als 100°C kurz erhitzen zur weitgehenden Vernichtung von krankheitserregenden Bakterien [nach dem frz. Mediziner Louis Pasteur, 1822-1895]

\*\* sterilisieren: keimfrei machen, entkeimen durch Erhitzen auf 100 bis 130°C

<sup>34</sup> EL-A Verfahrenstechnik GmbH (1989): Einsatz von Mikrowellenanlagen in der thermischen Verfahrenstechnik, Verfahrenstechnik Nr. 6, 1989

<sup>35</sup> H. Ganzelmeier (2003): Entwicklungstendenzen bei der Pflanzenschutztechnik, DLG (Deutsche Landwirtschaftsgesellschaft e.V.), Pressemitteilung Nr. 33

#### 4.1 Abtötung von Mikroorganismen in Korkzapfen

Ein EU-Projekt<sup>36</sup> befasste sich mit dem Einsatz von Mikrowellen bei der Produktion von Korkzapfen. Da Wärme von aussen kaum in den Wärmeisolator Kork eindringt, muss sie dort erzeugt werden, wo sie benötigt wird. Mikrowellen durchdringen den Kork vollständig und werden in Wärme umgewandelt, wenn sie auf Wassermoleküle treffen. Diese Wärme erhöht somit den Dampfdruck all jener Stoffe, die geruchlich wahrgenommen werden können und fördert somit deren Verdunstung. Dadurch verringert sich der Gehalt an flüchtigen Stoffen und der Kork wird somit sensorisch gereinigt. Hinzu kommt, dass auch die Korkmikroorganismen anteilmäßig viel mehr Wasser enthalten, als das umgebende Korkgewebe. Sie erhalten mehr Energie, mit dem Effekt, dass sie sich stärker erhitzen und dadurch absterben. Dies entspricht einer Sterilisierung der Korkzapfen. Das in diesem EU-Projekt entwickelte Delfin®-Verfahren<sup>37</sup> wird aktuell in der Industrie zur Reinigung von Korken eingesetzt.

#### 4.2 Die Wirkung von Mikrowellen auf luftübertragbare Mikroorganismen

Hamid M. et al. (2001)<sup>38</sup> befassten sich mit der Möglichkeit Luft, mittels Mikrowellen von Mikroorganismen, in diesem Fall von Pilzsporen und Bakterien sowie von Tuberkulosebakterien, zu dekontaminieren. Die Forschungsidee entstand daraus, dass bis jetzt noch wenig Erfahrung im Bereich der Entseuchung von Luft in speziellen Luftkreisläufen besteht, wie sie z. B. in Flugzeugen oder in Operationssälen vorkommen. In solchen Situationen ist es wichtig, die Verbreitung spezieller Mikroorganismen zu unterbinden, da sie eine Gefahr für die Gesundheit darstellen, wenn sie von Raum zu Raum und von Land zu Land übertragen werden.

Das Verfahren besteht aus einem Luftkreislauf, in welchem die Luft in einer Kammer mittels Mikrowellen mit einer Frequenz von 2.45 GHz sterilisiert wird. Bei den experimentellen Versuchen wurden Mikroorganismen von kontaminiertem Weizenstroh durch ein Vibrationsverfahren in den Luftkreislauf gebracht. Die Ergebnisse der Untersuchung zeigten, dass Pilze leicht mittels 2.45 GHz Mikrowellenstrahlung zerstört werden können. Mit steigender Bestrahlungszeit konnte auch eine Verminderung von Bakterien in der Luft festgestellt werden. Nach einer Bestrahlungszeit von 20 Minuten blieb die Anzahl der Bakterienkolonien in der Luft jedoch konstant. Mittels Mikrowellen können also nicht alle Bakterien aus der Luft eliminiert werden. Was die Tuberkulosebakterien betrifft, lassen die Ergebnisse vermuten, dass diese mittels Mikrowellenbestrahlung von 2.45 GHz spezifisch kontrolliert werden können. Um eine endgültige Aussage hierzu treffen zu können, sind jedoch weitere Experimente notwendig. Abschliessend kann noch keine definitive Aussage getroffen werden, dass das von Hamid M. et al. entwickelte Verfahren effizient und technisch machbar in einem gängigen Luftkreislauf einsetzbar ist, da es noch mit unterschiedlichen Parametern getestet werden muss.

#### 4.3 Schimmelpilzbekämpfung mittels Mikrowelle

S. Steinbach (2003)<sup>39</sup> diskutiert die Möglichkeiten der Schimmelpilzbekämpfung mittels Mikrowellen in Holzbauteilen und Deckenkonstruktionen. Die Bestrahlung der Bauteile erfolgt dabei in Intervallen. Durch die Intervallerhitzung zwischen 70 und 80 °C lassen sich Fruchtkörper und Strangmyzelien von Pilzen in den Starrezustand überführen<sup>40</sup>. Dadurch kann die Schimmelbildung an der Oberfläche der Bauteile in kurzer Zeit beseitigt und abgesaugt werden. Die Wirkung der Mikrowellen auf Pilze über das ganze Volumen von Bauteilen muss jedoch noch weiter untersucht werden.

### 5 Wirtschaftliche Machbarkeit

In Ergänzung zu dieser spezifischen Literaturrecherche sollen auch Informationen zur wirtschaftlichen Machbarkeit der Mikrowellenbehandlung von Verpackungsholz geliefert wer-

<sup>36</sup> EU-CRAFT Project BRST965089 - Development of an innovative technique for the production of microbial and chemical inactive wine and champagne cork stoppers

<sup>37</sup> <http://www.delfin-corks.com/>

<sup>38</sup> Hamid M., Thomas T., El-Saba A., Stapleton W., Sakla A., Rhaman A., Byrne P., VanLandingham D., McCombs C. (2001): The effect of microwaves on airborne microorganisms. The journal of microwave power and electromagnetic energy, Vol.36 No.1, S.37-45

<sup>39</sup> Steinbach S. (2003): Mikrowellentechnik - nur für Bautrocknung oder auch zur Bekämpfung von Schadorganismen? , Vortrag Informationsseminar Schimmelpilze und Feuchtigkeit, IBW - Institut für Bauen und Wohnen e.V., Aurich

<sup>40</sup> Dr. Lehmann & Sohn GmbH, Homepage der Mikrowellen- und Bautiefentrocknung, <http://www.mikrowellenbautrocknung.de/anwendung.htm>

den. Diese muss immer vor dem Hintergrund der Behandlungszeiten bei der zur Zeit eingesetzten Hitzebehandlung nach ISPM-15 Standard<sup>41</sup> gesehen werden.

Um Holz gemäss dem ISPM-15 Standard mit Wärme zu behandeln, muss die Temperatur im ganzen Volumen des Holzes mindestens 56°C während mindestens 30 Minuten betragen. Für einige Länder wird zudem eine Behandlungstemperatur bei der konventionellen Wärmebehandlung von 70 bzw. 74 °C vorgeschrieben.

Die nötigen Hitzebehandlungszeiten, um diesen Standard zu erreichen, setzen sich aus der Aufheizzeit der Kammer und der eigentlichen Behandlungszeit des Holzes zusammen. Die letztere Behandlungszeit ist abhängig von der Holzdicke und der Anfangstemperatur und kann zwischen einer und 15 Stunden dauern (siehe dazu Richter 2004<sup>42</sup>).

Weil einfache Vergleiche des Energieverbrauchs der Behandlung mit unterschiedlichen Methoden fehlen, können nur die Parameter und deren Einflüsse betrachtet werden. Die Holz-trocknung mittels Mikrowellen betreffend wurde in den letzten Jahren in wissenschaftlichen Forschungsarbeiten der Energieverbrauch für die Trocknung sowie die Trocknungszeiten ermittelt. Daraus lässt sich ein wirtschaftliches Fenster ableiten.

Antti A. L. (1995)<sup>43</sup> ermittelte die Trocknungszeiten mittels Mikrowellen für Fichten und Kiefernholz. Die kürzesten Trocknungszeiten für 40 - 50 mm dickes Holz, bei einer Trocknung von 50 % auf 8 % Holzfeuchtigkeit und einer Trocknungstemperatur von 70 °C betrugen 5.2 h für Kiefern- sowie 3.2 h für Fichtenholz. Hierfür war ein Energieverbrauch von 400 bzw. 365 kWh/m<sup>3</sup>, notwendig. Die in einigen Ländern für eine Hitzebehandlung vorgeschriebene Behandlungstemperatur von 70 °C war im Holz, nach den Darstellungen von Antti A. L. jedoch schon nach 6 min Mikrowellenbestrahlung erreicht. Mit der nach ISPM-15 Standard vorgeschriebenen Behandlungszeit von 30 min ergibt sich somit für die Mikrowellenbehandlung eine theoretische Behandlungszeit von 0.6 h für ein Volumen von 0.0078 m<sup>3</sup>.

Laut der Tabelle über die Behandlungszeiten nach ISPM-15 Standard sind für 40-60 mm dickes Holz Behandlungszeiten von 4 - 6 h vorgeschrieben, zuzüglich der Aufheizzeit der Kammer bis zur Solltemperatur. Davon ausgehend, dass es sich bei der Kammer um eine Zu-/Abluft Kammer handelt würde dies, bei einer Ausgangsholzfeuchtigkeit von 50 % und einer Kammererwärmung auf 70 °C nach den Literaturangaben von GLOOR ENGINEERING<sup>44</sup> einen Energieverbrauch von 250 kWh/m<sup>3</sup> für die Trocknung von 40 m<sup>3</sup> Fichtenholz bedeuten.

Basierend auf den Literaturangaben kann man also annehmen, dass für die Mikrowellenbehandlung zwar ein höherer Energieverbrauch als bei der konventionellen Hitzebehandlung in einer Zu-/Abluftkammer notwendig ist, sich dieser jedoch durch die kürzere Behandlungszeit reduziert.

*Tabelle 2: Vergleich theoretischer ermittelter Behandlungszeiten und Gesamtenergieverbräuche zwischen Wärmebehandlung mittels Mikrowellen und konventioneller Hitzebehandlung*

	MW-Kammer	Zu-/Abluftkammer
Holzdicke	40 - 50 mm	> 40 - 60 mm
<b>Behandlungszeit</b>	<b>0.6 h</b>	<b>4-6 h (exkl. Aufheizzeit bis zur Sollkammertemperatur)</b>
Spezifischer Energieverbrauch	400 respektive 365 kWh/m <sup>3</sup> getrocknetem Holz	250 kWh/m <sup>3</sup> getrocknetem Holz
Durchschnittliche Leistungsdichte	40 respektive 66 kW/m <sup>3</sup>	3 kW/m <sup>3</sup>
<b>Gesamtenergieverbrauch für Behandlungszeit</b>	<b>39 kWh/m<sup>3</sup></b>	<b>45 kWh/m<sup>3</sup> (inkl. Aufheizzeit bis zur Sollkammertemperatur)</b>

<sup>41</sup> BUWAL (Oktober 2003): ISPM-15-Standard - Der neue phytosanitäre Standard für Holzverpackungen

<sup>42</sup> Richter K. (2004): Wärmebehandlung ISPM 15, 5. Internationales Seminar für die Holz- und Forstindustrie, 26. -27. März 2004, St. Gallen, Schweiz

<sup>43</sup> Antti A. L. (1995): Microwave Drying of pine and spruce, Holz als Roh- und Werkstoff 53: 333-338, Springer Verlag

<sup>44</sup> <http://www.energie.ch/themen/industrie/saegereien/techno.htm#Holztrocknung>



Wie unter Punkt 3.3 erwähnt, ermittelte auch Janowiak J.J. (2003)<sup>45</sup> eine starke Zeitverkürzung durch den Einsatz von Mikrowellen. An allen Temperaturmesspunkten innerhalb des Holzes bei den von ihm durchgeführten Versuche wurden nach 0.5 - 5 Minuten Mikrowellenbestrahlung 60 °C erreicht, im Unterschied zu 70 – 123 Minuten für die konventionelle Hitzebehandlung.

Aus den Erkenntnissen der Literaturrecherche ist also anzunehmen, dass eine wirtschaftliche Machbarkeit der Mikrowellenbehandlung von Verpackungsholz, zumindest auf Grund der Trocknungszeiten und Energieverbräuche - Anlagenkosten nicht berücksichtigt möglich ist.

## 6 Sicherheit

Die Gefahr bei der Mikrowellenstrahlung ist die stille, unsichtbare und geruchslose Einwirkung auf das Behandlungsgut, die nähere Umgebung und den Menschen. Wenn sie als Wärme wahrgenommen wird, ist der Grenzwert um ein exponentiell vielfaches überschritten worden. Die Sicherheit für den Menschen ist eine Grundanforderung an eine Industrieanlage. Sie kann durch die Kombination von verschiedenen Massnahmen gewährleistet werden. Bei einer Mikrowellenanlage muss der Strahlungsausstritt minimiert werden. Der Benutzer muss über die Risiken von Öffnungen informiert sein und sie verschliessen können oder verhindern, dass ins Innere der Behandlungskammer gegriffen werden kann. Zudem wäre es möglich, einen Sensor zu tragen, der eine Überdosis frühzeitig erkennt.

### 6.1 Norm: Sicherheitsanforderungen für industrielle Mikrowellen-Einrichtungen<sup>46</sup>

Es werden nur die wichtigsten Punkte angesprochen. Für den sicheren Betrieb gilt jedoch die ganze Norm.

#### 6.1.1 Kennzeichnung

Neben dem Typenschild mit allen nötigen Angaben muss bei allen Öffnungen klar vor der Mikrowellenstrahlung gewarnt werden.

#### 6.1.2 Schutz gegen Streustrahlung

Bei "normalen Betriebsbedingungen" darf die Leistungsdichte an keiner Stelle, die 5 cm vom Anlageteil entfernt ist, den Grenzwert von 50 W/m<sup>2</sup> (entspricht 5 mW/cm<sup>2</sup>) überschreiten. Bei "aussergewöhnlichen Betriebsbedingungen" darf das Doppelte nicht überschritten werden.

Um die Streustrahlung auf einem zulässigen Wert zu halten, muss die Anlage gewartet und in gutem Zustand gehalten werden.

### 6.2 Norm: Sicherheitsabstände<sup>47</sup>

Grundsätzlich schreibt die Norm vor, dass jeder Gefahrenbereich konstruktiv vor dem Berühren geschützt werden muss. Für die Länge des Armes werden 850 mm angenommen.

### 6.3 Messinstrumente

Messinstrumente sind notwendig, um Gefahrenzonen zu finden und um Grenzwerte zu überprüfen. Die Norm (DIN EN 60519-6) schreibt den Besitz eines Messinstrumentes vor, wenn die Anlage in Betrieb ist.

Auf dem Markt sind verschiedene Instrumente von diversen Herstellern erhältlich, deren Funktionsumfang stark variiert. Die Geräte müssen auf die zu messende Strahlung abgestimmt sein.

Einige Anbieter:

<http://www.narda-sts.com>

<http://www.ets-lindgren.com>

<sup>45</sup> Janowiak J.J.(2003): Dielectric and microwave application for the Phytosanitary Treatment of Wood Packing Material (Project start date: 09/01/03, Expected completion date: 08/31/05). Methyl Bromide Transitions Program (MBT), Cooperative State Research, Education and Extension Service

<sup>46</sup> DIN EN 60519-6, Sicherheit in Elektrowärmeanlagen, Teil 6: Sicherheitsanforderungen für industrielle Mikrowellen-Erwärmungseinrichtungen, Oktober 2002

<sup>47</sup> DIN EN 294, Sicherheit von Maschinen, Sicherheitsabstände gegen das Erreichen von Gefahrenstellen mit den oberen Gliedmassen, 1992

## 7 Zusammenfassung

Ziel der im Rahmen des Projekts: "Mikrowellenbehandlung als Alternative zur phytosanitären Hitzebehandlung von Holz: Machbarkeitsstudie" (Gesuchsnummer BUWAL 2004.09) durchgeführten spezifisch, auswertenden Literaturrecherche zum Thema Mikrowellenbehandlung von Massivholz in Anlehnung an den ISPM-15 Standard war die Sammlung von umsetzbaren bisherigen Erkenntnissen. Die Literaturstudie stellt die experimentellen Arbeiten, welche von Bedeutung für das Projekt sind in einer Synthese dar. Sie liefert die folgenden notwendigen Informationen, welche für die Durchführung des Projekts von Bedeutung sind:

- Die Einflüsse auf die Dielektrizitätskonstante von Holz sind bekannt. Insbesondere sind nun die Dielektrizitätskonstanten unterschiedlicher Holzarten und Holzfeuchten bei der im Projekt verwendeten Frequenz von 2.45 GHz bekannt
- Trocknungszeiten, Trocknungsgeschwindigkeiten, und Leistungsverbräuche für bestimmte Holzarten, -dimensionen und -feuchten sowie Möglichkeiten zur Optimierung der Mikrowellenbehandlung sind bekannt.
- In den zitierten Artikeln wurden Methoden und Messinstrumente erwähnt, die für die Messung der Temperatur des Holzes und Kontrolle der Holzfeuchtigkeit während der Mikrowellenbehandlung für das Projekt von Wichtigkeit sind
- Für bestimmte Anwendungen ist die Senkung der Energiekosten sowie eine Verkürzung der Trocknungszeiten mittels der Mikrowellentechnik im Vergleich mit konventionellen Trocknungsmethoden möglich. Abhängig von der Anwendung zeigt die Literaturrecherche mit welchen Methoden die Trocknungszeiten verkürzt werden können
- Der Einfluss auf die dielektrischen Eigenschaften von Insekten ist bekannt. Es wurden wichtige Informationen über die Wirkung von Mikrowellen auf biologischer Ebene bei der Bekämpfung und Zerstörung von Schadorganismen (Pilzen und Insekten) erhalten
- Die Sicherheitsanforderungen im Umgang und mit und für den Einsatz der Mikrowellentechnik sind bekannt.

Basierend auf der Literaturstudie kann nun das theoretische Prozessfenster der Wärmebehandlung mittels Mikrowellen definiert werden. Die Rahmenparameter und deren Einfluss bei einer phytosanitären Behandlung sind bekannt. Somit können die Rahmenbedingungen für die technischen Vorversuche zur Wärmebehandlung eines Standardkantholzes festgelegt werden.



## 8 Verzeichnisse

### 8.1 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Übersicht über die verschiedenen elektromagnetischen Strahlenkategorien.....	39
Abbildung 2: Orthogonaler Zusammenhang des elektrischen und magnetischen Feldes.....	40
Abbildung 3: Rotation der Moleküle nach wechselnden, elektromagnetischen Feldlinien .....	40
Abbildung 4: Schematische Darstellung der Mikrowellenerzeugung und -übertragung .....	41
Abbildung 5: Ein der Länge nach aufgeschnittener Magnetron .....	42

### 8.2 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Grenzwerte für die Frequenzform-holzbau is an association of the leading universities in timber house construction.

The aim of the association is to strengthen the education in the domain timber house construction. This is done in cooperation with the timber industry.

nz von 2.45 GHz..... 40

Tabelle 2: Vergleich theoretischer ermittelter Behandlungszeiten und Gesamtenergieverbrauch zwischen Wärmebehandlung mittels Mikrowellen und konventioneller Hitzebehandlung .....	50
--	----

### 8.3 Literaturverzeichnis

1. Prof. Dr. U. Hartmann (2003): Mikrowellen, Institut für Experimentalphysik, Universität des Saarlandes, Saarbrücken,  
<http://www.uni-saarland.de/fak7/hartmann/lehre/Mikrowellen/Kapitel1.pdf>
2. [www.wiefunktioniertdaseigentlich.de/technik/mikrowelle.html](http://www.wiefunktioniertdaseigentlich.de/technik/mikrowelle.html)
3. EL-A Verfahrenstechnik GmbH, veröffentlicht in VERFAHRENSTECHNIK 23, 1989, Nr. 6
4. <http://www.naturalscience.org/de/journal/artikel/mikrowellen.html>
5. Blanc, B. H. / Hertel, H. U. (1992): Comparative Study about the Influence on Man by Food Prepared Conventionally and in the Microwave-Oven
6. Guillaume-Gentil, O. (1994): Quantitative Bestimmung der thermischen Einwirkung von Mikrowellen (2,450 GHz) auf sensitive mikrobiologische Systeme: Lebensfähigkeit, Mutagenese, DNA-Reparatur, Enzymaktivitäten und Plasmidtransformation. – Dissertation, ETH, Zürich
7. Niemz P. (1993): Physik des Holzes und der Holzwerkstoffe, DRW-Verlag Weinbrenner
8. Bosshard, H.-H., (1974): Holzkunde II - Zur Biologie, Physik und Chemie des Holzes. Birkhäuser-Verlag, Basel-Boston-Stuttgart
9. Olmi R., Bini M., Ignesti A. and Riminesi. C. (2000): Dielectric Properties of Wood from 2 to 3 GHz, The journal of microwave power & electromagnetic energy, Volume 35, Number 3, 135 - 143
10. Abramenko, S.N. (1934): The drying of wood by electric currents of high-frequency. Woodworking UDSSR 10: 65-68
11. Dedic A. (1995): Analysis of the Specificity of the Process of Convective Wood Drying. M.Sc. thesis. Faculty of Mechanical Engineering, Belgrade, Yugoslavia, (in Serbia)
12. Antti A. (1992): Microwave drying of hardwood: simultaneous measurements of pressure, temperature and weight reduction, Forest Product Journal 42: 49-54
13. Turner IW, Jolly PG (1991): The Modeling of Combined Microwave and Convective Drying of a Wet Porous Material, Drying Technology, 9: 1209-1270
14. Turner IW, Puiggali JR, Jomaa W (1993a): An Investigation of Combined Microwave and Convective Drying of Wood: Part I. The Mathematical Model
15. Turner IW, Puiggali JR, Jomaa W (1993b): An Investigation of Combined Microwave and Convective Drying of Wood: Part II. Simulations and Experimental Results
16. Zheng Z (1994): Analysis of Heat and Mass Transfer Characteristics in Drying Processes of Porous Mediums by Microwave. 9<sup>th</sup> International Drying Symposium, Gold Coast, Australia

17. Leiker M. und Adamska M.A. (2004): Energy efficiency and drying rates during vacuum drying of wood, Holz als Roh- und Werkstoff 62, 203-208, Springer Verlag
18. Dedic A., Zlatanovic M., 4 (2001): Some aspects and comparison of microwave drying of beech (*Fagus moesiaca*) and fir wood (*Abies alba*), Holz als Roh- und Werkstoff 59: 246-249
19. Lee H. W. (2003): Combined Microwave and Convective Drying of Korean Wood Species, 8th International IUFRO Wood Drying Conference, Brasov, Romania, Proceedings, 146 - 149
20. Torggovnikov G. (1997): Microwave Drying of Wood chips for Particleboard, *Conference on Microwave and High Frequency Heating*, 1: 216-19. Bologna, Italy: Lo Scazabeo
21. Bräutigam V., Graf. M., Emmerich R., 3 (2001): Mikrowellentrocknung von Wasserlacken - Dielektrische Eigenschaften von Lacksystemen, mo-Metalloberflächen, 55, S. 51
22. Bräutigam V., Hegemann B., Schüler P., 8 (2001): Mikrowellentrocknung von Wasserlacken Prozessparameter und qualitativer Vergleich mit der Umlufttrocknung, mo-Metalloberflächen, 55, S. 37 - 42
23. Wehner J., Schrade K.W. (2002), Neue Mikrowellentechnologie für die Lacktrocknung, Journal für Oberflächentechnik, No. 7/2002
24. KTI Forschungsprojekt Nr. 3519.1 (1999): Lacktrocknung bzw. -härtung von flüssigen Beschichtungsstoffen auf Holz oder Holzwerkstoffen mittels Mikrowellen
25. KTI Forschungsprojekt Nr. 4608.2 (2003): Trocknung bzw. Härtung von farblosen und pigmentierten Ultraviolett härtender und Zweikomponenten Wasserlacksystemen auf Holz oder Holzwerkstoffen mittels Mikrowellen und der Kombination Mikrowellen-Ultraviolett-Trocknung
26. Maggiore G. (2003): Wasserlacke auf Möbeln trocknen, besser lackieren! Nr. 17, Oktober 2003, S.4
27. MOS®Technologie macht Unterschied (2003):  
<http://www.giardinagroup.com/home/docs/frameNews.htm>
28. Nelson S.O. (2001): Dielectric properties of insects .The journal of microwave power and electromagnetic energy, Vol.36 No.1, S.47-56
29. Nelson S.O., Whitney W.K. (1960): Radio frequency electric fields of stored grain insect control, Tans. ASAE 3(2): 133-137,144
30. Nelson S. O. (1973b): Insect-control studies with microwaves and other radio-frequency energy, Bul. Entomomol. Soc. Amer. 19(3): 157-163
31. Nelson S.O. (1974): Comparative effectiveness of 39- and 2450-MHz electric fields for control of rice weevils in wheat, J. Econ. Entomol. 67 (5): 592-595
32. Fleming M., Hoover K. et al. (2000): Technologies for Preventing Introductions of Exotic Wood-Boring Insects into the United States,  
<http://uvm.edu/albeetle/research/eradication.html>
33. Janowiak J.J.(2003): Dielectric and microwave application for the Phytosanitary Treatment of Wood Packing Material (Project start date: 09/01/03, Expected completion date: 08/31/05). Methyl Bromide Transitions Program (MBT), Cooperative State Research, Education and Extension Service
34. EL-A Verfahrenstechnik GmbH (1989): Einsatz von Mikrowellenanlagen in der thermischen Verfahrenstechnik, Verfahrenstechnik Nr. 6, 1989
35. H. Ganzelmeier (2003): Entwicklungstendenzen bei der Pflanzenschutztechnik, DLG (Deutsche Landwirtschafts-Gesellschaft e.V.), Pressemitteilung Nr. 33
36. EU-CRAFT Project BRST965089 - Development of an innovative technique for the production of microbial and chemical inactive wine and champagne cork stoppers
37. <http://www.delfin-corks.com/>
38. Hamid M., Thomas T., El-Saba A., Stapleton W., Sakla A., Rhaman A., Byrne P., VanLandingham D., McCombs C. (2001): The effect of microwaves on airborne microorganisms. The journal of microwave power and electromagnetic energy, Vol.36 No.1, S.37-45
39. Steinbach S. (2003): Mikrowellentechnik - nur für Bautrocknung oder auch zur Bekämpfung von Schadorganismen? , Vortrag Informationsseminar Schimmelpilze und Feuchtigkeit, IBW - Institut für Bauen und Wohnen e.V., Aurich

40. Dr. Lehmann & Sohn GmbH, Homepage der Mikrowellen- und Bautiefentrocknung, <http://www.mikrowellenbautrocknung.de/anwendung.htm>
41. BUWAL (Oktober 2003): ISPM-15-Standard - Der neue phytosanitäre Standard für Holzverpackungen
42. Richter K. (2004): Wärmebehandlung ISPM 15, 5. Internationales Seminar für die Holz- und Forstindustrie, 26. -27. März 2004, St. Gallen, Schweiz
43. Antti A. L. (1995): Microwave Drying of pine and spruce, Holz als Roh- und Werkstoff 53: 333-338, Springer Verlag
44. <http://www.energie.ch/themen/industrie/saegereien/techno.htm#Holztrocknung>
45. Janowiak J.J.(2003): Dielectric and microwave application for the Phytosanitary Treatment of Wood Packing Material (Project start date: 09/01/03, Expected completion date: 08/31/05). Methyl Bromide Transitions Program (MBT), Cooperative State Research, Education and Extension Service
46. DIN EN 60519-6, Sicherheit in Elektrowärmeanlagen, Teil 6: Sicherheitsanforderungen für industrielle Mikrowellen-Erwärmungseinrichtungen, Oktober 2002
47. DIN EN 294, Sicherheit von Maschinen, Sicherheitsabstände gegen das Erreichen von Gefahrenstellen mit den oberen Gliedmassen, 1992