

Die innere Wärme

J. Tomljenovic

Plustherm Point GmbH
Seminarstrasse 102, 5430 Wettingen, Switzerland

ZUSAMMENFASSUNG

Nach anfänglich zögernder Einführung der Hochfrequenzermwärmungsmethoden in der Holzindustrie ist die heutige moderne Leimbinderproduktion und andere Applikationen ohne Hochleistung – Hochfrequenzpressen unvorstellbar. Die Zuverlässigkeit der Hochfrequenzgeneratoren und Pressen, welche heute unseren Kunden zur Verfügung stehen, die hohe Produktionsgeschwindigkeit, die Genauigkeit der Wärmedosierung und die gleichmässige Qualität des Endproduktes machen diese Verleimungstechnik den anderen Methoden überlegen. Mit praktischen Beispielen wird gezeigt, welche Schritte wichtig sind im Design, Modellierung und Produktion bei solchen dielektrischen Erwärmungsgeräten..

EINFÜHRUNG

Bei der Anwendung der Hochfrequenztechnologie, zum Beispiel in der Verleimung, ist das Holz (oder andere tragende Materialien) und der Klebstoff einem dielektrischem Erwärmungsprozess in einem elektrischen Hochfrequenzfeld ausgesetzt (Bild 1)

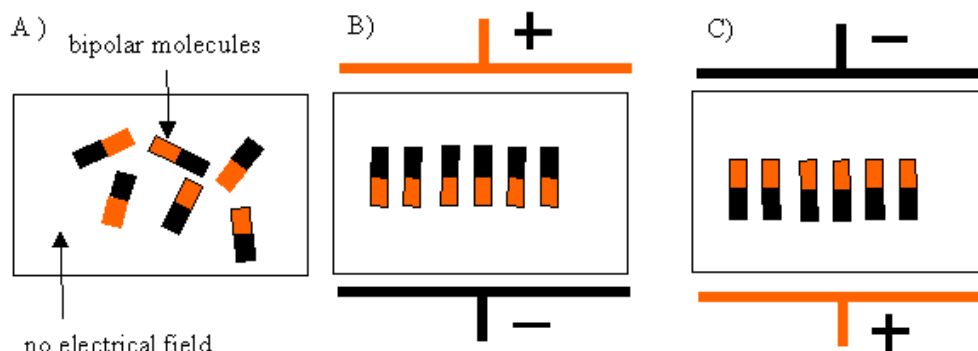


Bild 1.

Bild 1.A zeigt nichtorientierte bipolare Moleküle im Dielektrikum (z. B. Holz oder Leim). Wenn wir das Material zwischen den Elektroden unter Spannung setzen, orientieren sich die gleichen Moleküle wie im Bild 1.B. Falls wir die Polarität umkehren, drehen sich die Moleküle um 180°, und orientieren sich wie im Bild 1.C. Mit stärkerem elektrischen Feld orientieren sich immer mehr Moleküle wie im Bild 1. B/C. Mit Erhöhen der Frequenz des

elektrischen Feldes., bewegen sich die Moleküle schneller, und die Reibung im Material wird höher. Der vereinfachte Zusammenhang zwischen absorbierter Hochfrequenzleistung, (welche thermischer Energie, welche im erwärmten Material erzeugt wird, entspricht) und der Spannung, welche zwischen der Elektroden angelegt wird, ist mit folgender Formel beschrieben:

$$P = k * U^2 * f * \varepsilon * \tan \delta \quad (1)$$

wobei:

k = die Konstante, f = die Frequenz, ε = die dielektrische Konstante,
 U = die Hochfrequenzspannung, $\tan \delta$ = der Verlustfaktor

Weil nur ein paar Frequenzen für die industrielle Anwendungen frei sind (gesetzlich vorgeschrieben), ist die Änderung der Leistung mit Änderung der Frequenz nur von theoretischer Bedeutung. Die Änderung des elektrischen Feldes um Faktor 2 , erhöht die thermische Energie um Faktor 4.

$$E = \frac{\text{Spannung zwischen Elektroden}}{\text{Abstand zwischen Elektroden}} \quad \left[\frac{V}{cm} \right] \quad (2)$$

Dabei ist :

E = die elektrische Feldstärke

Wenn die Hochfrequenzspannung angelegt wird , wechseln die bipolaren Moleküle ihre Richtung einige Million Mal in der Sekunde. Da der Leim, viel grössere dielektrische Verluste hat als das Holz selber, werden unter der Hochfrequenzspannung die Leimfugen intensiver und faster als das benachbarte Holz erwärmt. Holz ist ein sehr heterogenes Material. Die elektrische Eigenschaften hängen nicht nur von der Holzart, sondern auch von der Faserrichtung ab, als auch von der Temperatur, der Holzfeuchtigkeit und der angewendeten Frequenz. Das Holz mit einem Feuchtigkeitsgehalt zwischen 8-12% , was normalerweise für Fertigprodukte in der Holz-industrie verlangt wird, kann im Hochfrequenzfeld als Dielektrikum betrachtet werden. Die mathematischen Formel welche für die Hochfrequenzerwärmung von Isolierstoffen angewendet werden, können auch für Holz angewendet werden. In der nachfolgenden Tabelle 1 sind relative dielektrische Konstante (ε_r) und dielektrische Verluste ($\tan \delta$) für diverse Materialien aufgelistet.

Material	Relative Permittivity	$\tan \delta$
Vacuum	1	0
Air dry	1.006	> 0
Teflon	2	> 0.0001
PVC	3	0.016
Ceramic	10	$0.0005 < \dots < 0.002$
Water	80	1
Wood dry	4	0.05
Wood 60% water	20	0.4
Wood glue dry	3	0.02
wood glue wet	50	0.5

Tabelle 1.

Generell , kann angenommen werden, dass die dielektrische Konstante Epsilon (ϵ), und Verlustfaktor $\tan \delta$, bei gegebener Frequenz mit wachsender Feuchtigkeit einen Verlauf wie im Bild 2 annehmen.

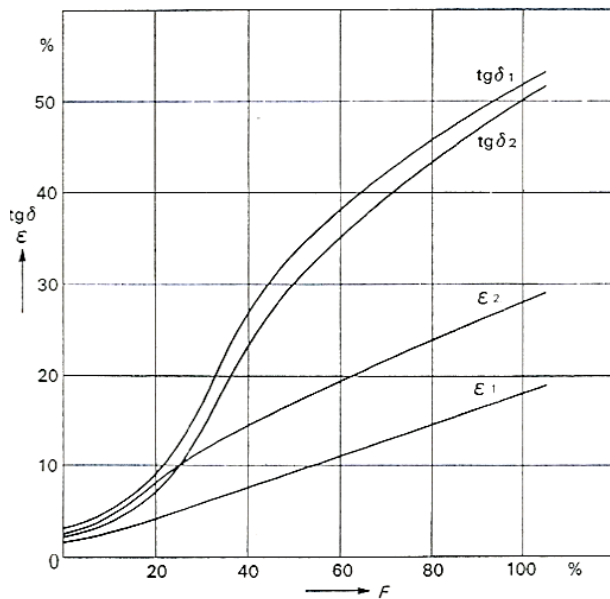


Bild 2
Verlauf der Dielektrizitätskonstante ϵ und des Verlustfaktors $\tan \delta$ für 14 MHz in Abhängigkeit vom Feuchtigkeitsgehalt F für radialgeschnittenes Tannen- und Rotbuchenholz
1 = Tanne 2 = Rotbuche

Ein spezieller Vorteil ist dadurch gegeben , dass der Klebstoff für die Hochfrequenz bis 40 Mal grösseren Verlustfaktor als das zu verleimende Holz hat. Die Leimfuge kann mit Minimum an Energie verleimt werden, weil die Hochfrequenzenergie vor allem in die Fuge geht. Dabei wird der Leim bis 90°C warm , während das Holz praktisch kalt bleibt. Die Verleimungszeit von einigen Stunden (ohne Hochfrequenz) kann auf 2 bis 10 Minuten (je nach Produkt) reduziert werden. Dieses Phänomen, dass die Fuge viel schneller warm als

Holz wird, nennt sich die selektive Erwärmung, und ist wichtigster Vorteil der dielektrischen Erwärmung.

DESIGN , MODELLIERUNG, PRODUKTION

Um die Funktionsstörungen welche durch elektromagnetische Felder entstehen können , zu vermeiden, sind für industrielle Anwendungen nur spezielle Frequenzbänder zugelassen: 13.56,27.12, 40.68, 2450, 5800 und 24'125 MHz , jeder mit einem kleinen Toleranzbereich. Diese Frequenzen sind erhältlich für industrielle, wissenschaftliche und medizinische Anwendungen. Das sind sogenannte ISM (Industrial– Sientific -Medical) Frequenzen . Die meist benützte Frequenz für die Verleimungen in der Holzindustrie ist 13.56MHz +/- 0.05 % . Diese Frequenz erwärmt das Holz durchgehend und gewährleistet eine gleichmässige Spannungsverteilung entlang der Presse.

Die Stabilität der Frequenz ist von sehr grosser Bedeutung , da die Frequenz die ganze Zeit, in vorgegebenen Toleranzen liegen muss. Um das zu erreichen, müssen spezielle Stabilisierungsmassnahmen unternommen werden. Ohne ein Stabilisierungssystem ist es technisch absolut unmöglich, diese Frequenz genug konstant zu halten.

Während des ganzen Verleimungsprozesses wird der Leim polymerisiert und die elektrischen Eigenschaften des Leimes verändern sich ($\tan \delta$, ϵ_r). Die Frequenzregelung sorgt dafür, dass die Frequenz während des ganzen Verleimungsprozesses in garantierten Grenzen bleibt. Gleichzeitig sorgt ein System für die automatische Anpassung, so dass praktisch immer die volle Leistung im zu erwärmenden Material abgegeben wird. Während des Erwärmungsprozesses wird die Spannung entlang der Elektroden, die ganze Zeit gemessen. Dadurch kann jede Unregelmässigkeit in der Spannungsverteilung sofort erkannt werden.

Für praktische Anwendungen sind möglichst grosse Leistungen gefragt. Zum Beispiel, für Leimbinder werden die Generatoren von 100 bis 200kW Ausgangsleistung eingesetzt (160-330kVA vom Netz !) . Bei diesem Leistungslevel ist ein sehr sorgfältiges Design unerlässlich, um eine sichere und störungsfreie Produktion zu sichern. Die Elektrodendimensionen liegen bis 7m in der Länge, und 3m in der Breite. Bei diesen Dimensionen (die Wellenlänge bei 13.56MHz beträgt 22.12m) ist eine gleichmässige Spannungsverteilung sehr wichtig.

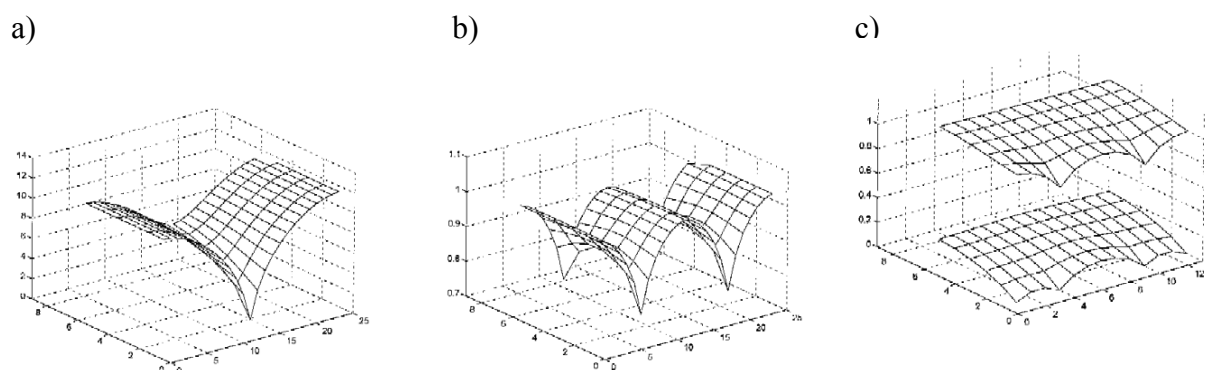


Bild 3. a) schlechte Verteilung, b) mässige Verteilung, c) gute Verteilung

Am Bild 3 ist die Spannungsverteilungs-Optimierung entlang der Elektroden, dreidimensional dargestellt. Diese Optimierung wurde mit SPICE und MATLAB

durchgeführt. Mit speziellen Massnahmen können wir bis zu 10m langen Elektroden eine gleichmässige Spannungsverteilung gewährleisten. Die Spannungsverteilung wird dreidimensional gerechnet, um eine optimale Verteilung entlang der Presse, in der Länge und in der Breite, zu gewährleisten..

Um eine optimale Anpassung zwischen dem Hochfrequenzgenerator und der Presse zu erreichen , werden sogenannte Kaltmessungen (ohne Leistung) mit Netzwerk-Analysator für jede Holzdimension durchgeführt.

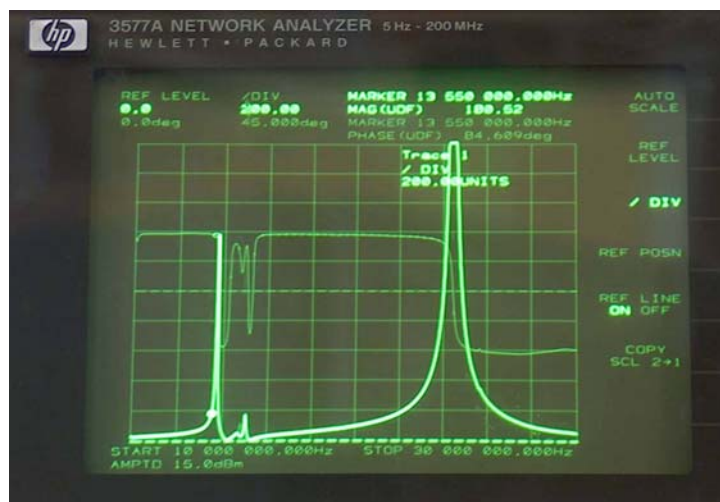


Bild 4. Die Kaltmessungen mit dem Netzwerkanalysator

Bild 3. zeigt den typischen Impedanzverlauf zwischen 10 und 30MHz. Die erste Resonanz ist die Impedanz im Arbeitspunkt , bei 13.56 MHz. Die zweite breite Spitze ist eine parasitäre Resonanz . Es ist wichtig, dass die zweite Harmonische der Arbeitsfrequenz nicht mit dieser Frequenz übereinstimmt.

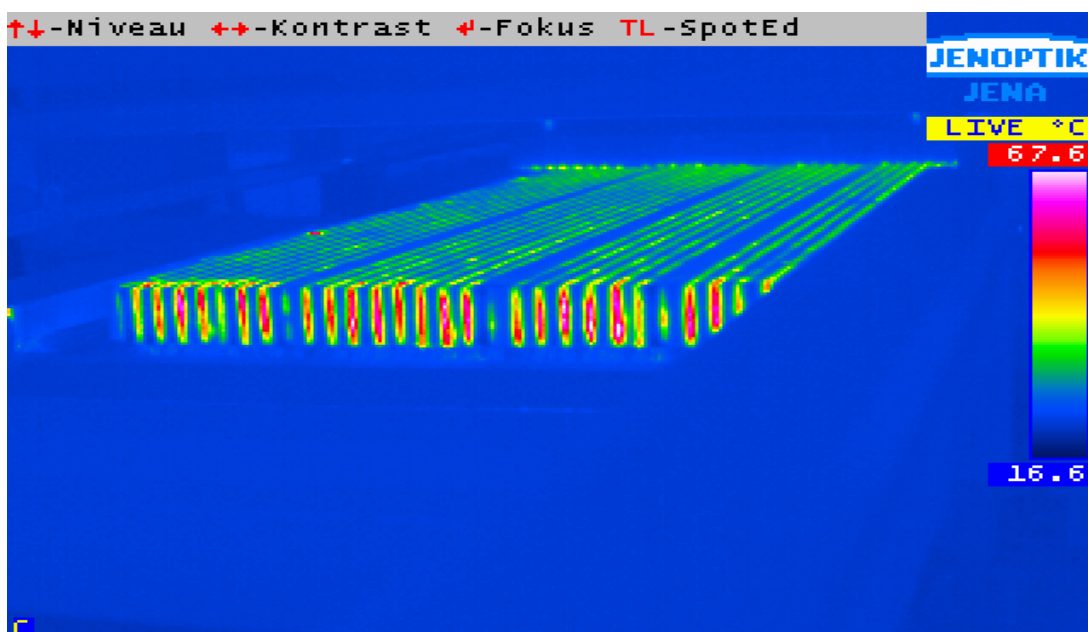


Bild 5. Das Bild aufgenommen mit einer Thermokamera

Bild 4 zeigt die Temperaturverteilung in Brett-schichtholz. Wie ersichtlich, werden nur die Fugen erwärmt. Die sogenannte selektive Erwärmung ist klar ersichtlich. Die typische Temperatur in den Fuge beträgt 80°C. Das Holz zwischen den Fugen erreicht nur 30-35°C. Die Erwärmungszeit, für z.B. 8 cm Brett-schichtholz, beträgt nur 120 Sekunden.

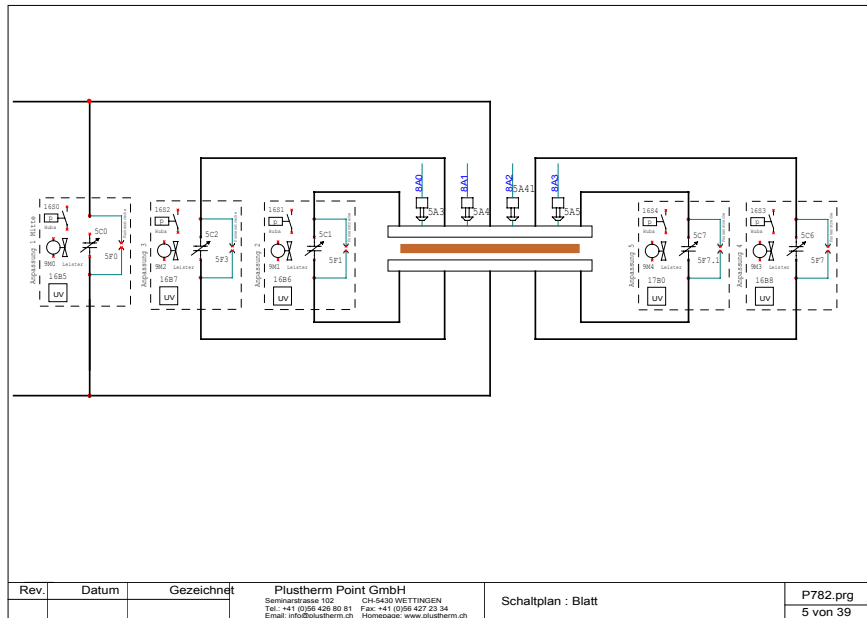


Bild 6. Die Schemata: die Elektroden der Presse und dazugehörige Anpasskomponenten.

Das Bild 6 zeigt alle wichtigen Komponenten, welche notwendig sind, um die gute Anpassung und die optimale Spannungsverteilung entlang der Presse zu erreichen. Die gewählte Lösung benützt die variablen Vakuumkondensatoren für die Anpassung. Dasselbe Resultat kann auch mit variablen Induktivitäten und fixen Kondensatoren erricht werden.

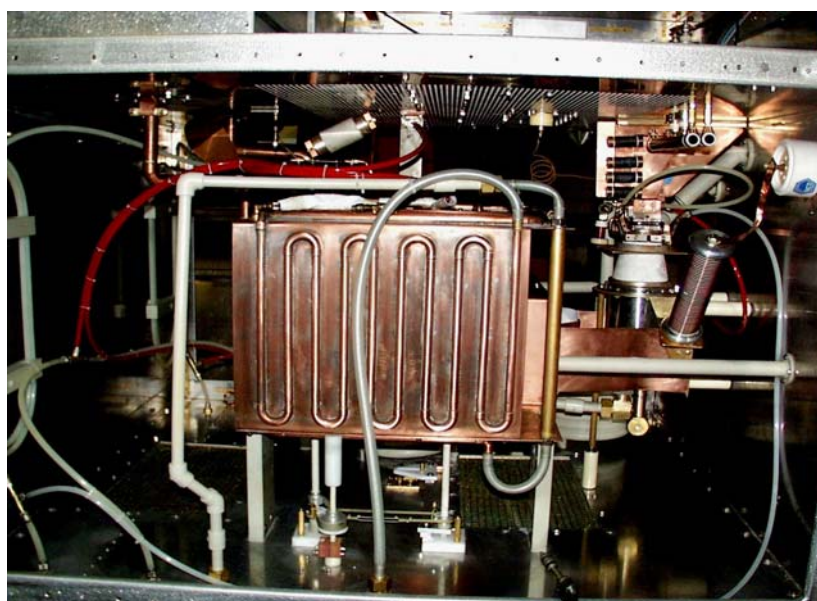


Bild 7. Das Blick ins Innere des 200kW, 13.56 MHz Resonators

Der Resonator im Bild 7 ist wassergekühlt, um eine lange störungsfreie Produktion zu gewährleisten. Im Resonator befinden sich wassergekühlte Vacuumkondensatoren. Die Elektronenröhre ganz rechts ist auch wassergekühlt und kann eine Spitzenleistung von 280kW abgeben.

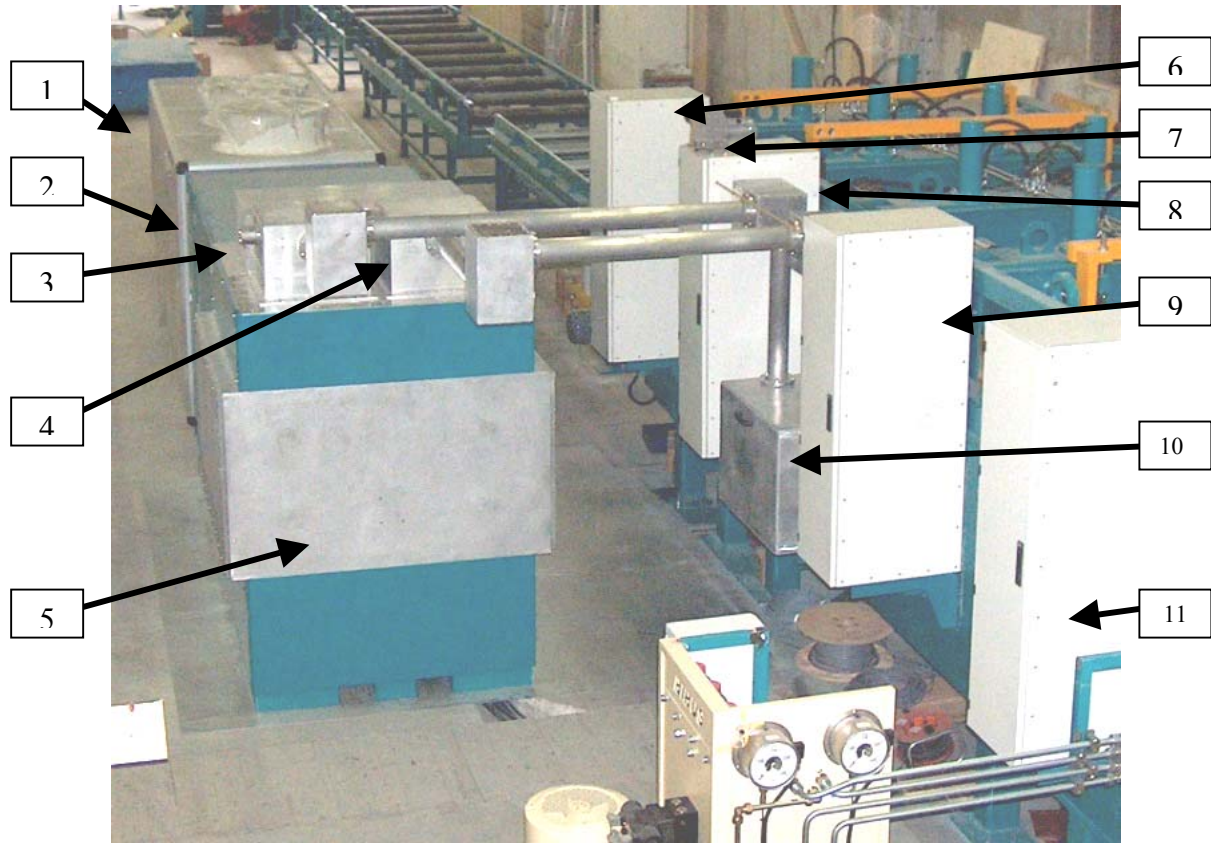


Bild 8. Der Hochfrequenzgenerator und die Presse
(mit freundlicher Genehmigung der Eurolamelle, Frankreich)

Index:

1. Kühlungseinheit
2. DC-Hochspannungsteil des DGX200
3. Hochfrequenzfilter
4. Coaxial - Leitungen
5. Resonator DGX200
6. Anpassung Nummer 1
7. Anpassung Nummer 2
8. Antriebsmotor für die Anpassung Nummer 1-4
9. Anpassung Nummer 3
10. Mittelanpassung
11. Anpassung Nummer 4

Bild 8 zeigt die komplette Ansicht eines 200kW Hochfrequenzgenerators mit der Presse, der Kühlungseinheit und allen notwendigen Anpassungen.

Die Hochfrequenzpressen werden auch in der Produktion von Brettsperholzplatten eingesetzt.



Bild 9. Die Verleimung von Brettsperholzplatten mit zwei Pressen gleichzeitig (mit freundlicher Genehmigung der Firma Mayr-Melnhof Systemholz Gaishorn GmbH)

Eine einzigartige Anlage (Bild 9.) welche im Taktverfahren, mit zwei Pressen gleichzeitig arbeitet, befindet sich bei der Firma Mayr-Melnhof Systemholz Gaishorn GmbH, in Geishorn am See. Dort werden die Platten bis 16.5m Länge und 3m Breite innert wenigen Minuten verpresst und können sofort weiter verarbeitet werden.

Um das Thema abzuschliessen, müssen wir auch andere Anwendungen der Hochfrequenz für die dielektrische Erwärmung erwähnen. Nachfolgend ein kleine Übersicht :

HOLZ

	Vorteile
Trocknung	3 Mal kürzere Prozesszeit als mit Heissluft. Keine Überhitzung. Die Erwärmung ist vernachlässigbar, wenn wenig Wasser im Material vorhanden
Verleimung	100 bis 20 Mal kürzere Prozesszeiten, keine Überhitzung, selektive Erwärmung
Restoration	Eliminierung von Parasiten ohne Chemie . Keine toxischen Prozesse. Details siehe Bild 10

NARUNGSMITTEL

	Vorteile
Auftauen	Kürzere Prozesszeiten (bis Faktor 50). Kleinere bakterielle Kontamination im verpackten Zustand möglich
Backen und Nachbacken	Kürzere Prozesszeit. Getrennte Kontrolle der Oberflächenerwärmungs- und Kernerwärmungsraten
Pasteurisation	Kürzere Prozesszeiten mit bereits verpackten Nahrungsmitteln möglich

VERSCHIEDENES

	Vorteile
Textiltrocknung	Trocknen von Spulen und Ballen ohne Überhitzung
Glassfaser-Trocknung	Trocknen von Spulen und Ballen ohne Überhitzung
Parasitenvernichtung 1mr Getreide	Keine Überhitzung
Papiertrocknung	Kürze Prozesszeit, keine Überhitzung
Büchertrocknung	Keine Überhitzung
Tabaktrocknung	Keine Überhitzung
Farbentrocknung	Kürze Prozesszeit, keine Überhitzung

Ein Beispiel für die Restauration finden wir am Bild 10.

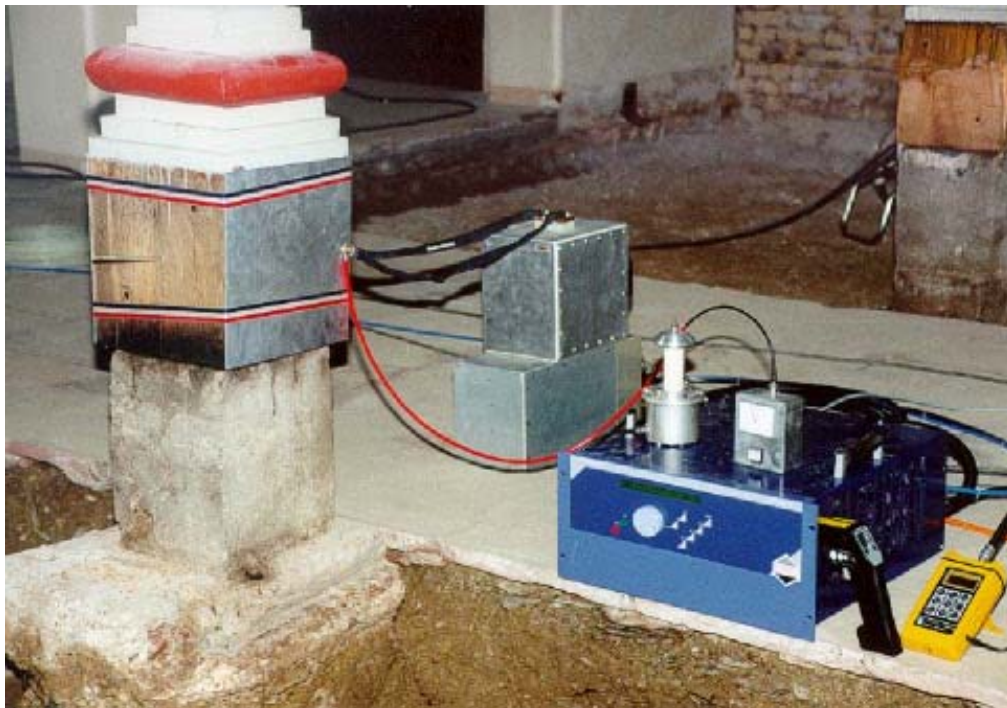


Bild 10. Restauration mit der Hochfrequenztechnik (mit freundlichen Genehmigung der Binker Materialschutz GmbH Westendstraße 3, 91207 Lauf a .d. Pegnitz).

Mit dem Verfahren wie am Bild 10, können sowohl tierische (Insekten) als auch pflanzliche Holzschädlinge (Pilze) im Holz "ohne Chemie" abgetötet werden. Das Verfahren eignet sich besonders zur Lokalbehandlung.

Auch in den Fensterkantenverleimung findet die Hochfrequenzerwärmung statt. Die Fensterrahmen von 50cm bis 400cm werden platzsparend , wie am bild 10 dargestellt, innert kürzester Zeit verleimt.



Bild 11 Fensterkantenverleimung (mit freundlicher Genehmigung der Eggo Kiefer AG, Schweiz)