

Zeitschrift: Bulletin de l'Association suisse des électriciens
Herausgeber: Association suisse des électriciens
Band: 43 (1952)
Heft: 25

Artikel: Dielektrische Hochfrequenz-Erwärmung
Autor: Goldstein, A.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-1057919>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 09.02.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

BULLETIN

DE L'ASSOCIATION SUISSE DES ELECTRICIENS

Dielektrische Hochfrequenz-Erwärmung

Vortrag, gehalten an der 16. Hochfrequenztagung des SEV vom 8. Mai 1952 in Basel,
von A. Goldstein, Baden

621.364.15

Die theoretischen Grundlagen der dielektrischen Erwärmung und ihr Zusammenhang mit dem molekularen Gefüge von Isolierstoffen werden erläutert. An die Beschreibung von Hochfrequenzgeneratoren schliessen sich Beispiele praktischer Anwendungen des Verfahrens in der Kunstharztechnik, der Holz-, Textil- und Lebensmittelindustrie, aus welchen sich wesentliche Einsparungen im Vergleich zu anderen Erwärmungsarten ergeben.

Die Verwendung hochfrequenter Ströme zu Erwärmungszwecken hat in zwei voneinander ganz verschiedenen technischen Gebieten Eingang gefunden, einerseits für die Erwärmung von Metallen durch elektromagnetische Induktion von Wechselströmen im Arbeitsstück, anderseits für die Erwärmung von elektrisch isolierenden Stoffen durch die dielektrischen Verluste im elektrischen Hochfrequenz-Wechselfeld. Beiden Anwendungen ist die Erzeugung der Wärme im Arbeitsgut selbst gemeinsam.

Theoretisch und auch praktisch als unliebsame Begleiterscheinung in der Hochspannungstechnik als Ursache von Wärmedurchschlägen sind die dielektrischen Verluste schon seit dem vorigen Jahrhundert bekannt; die ersten Untersuchungen über deren Frequenzabhängigkeit stammen von Maxwell. Zur atomphysikalischen Erklärung der Dielektrika hat Debye sehr wesentlich beigetragen. Die erste industrielle Anwendung der dielektrischen Erwärmung mit Hochfrequenz wurde wohl von Leduc für die Vulkanisierung von Kautschuk verwirklicht. Im grossen Stil fand das Verfahren aber erst in den dreissiger Jahren Eingang zum Vorwärmern von aushärtbaren Kunstharzpressstoffen, nachdem es gelungen war, Röhren und Generatoren grösserer Leistungen für genügend hohe Frequenzen zu bauen. Andere Anwendungen in der Holz-, Textil- und Nahrungsmittelindustrie folgten.

Für die dielektrische Erwärmung werden, um eine genügende Leistungskonzentration im Arbeitsgut zu erzielen, Frequenzen von 10^6 Hz bis 10^9 Hz verwendet; dies entspricht Wellenlängen von 300 m bis 30 cm. Die Notwendigkeit, so hohe Frequenzen zu verwenden, folgt aus dem physikalischen Verhalten elektrisch isolierender Werkstoffe im elektrischen Wechselfeld. Legt man an einen Plattenkondensator in Luft mit der Kapazität C_0 eine Wechselspannung U von der Frequenz f , so fliesst in den Zuleitungen ein der Spannung um 90° voreilender Ladestrom $I_0 = U 2\pi f C_0$. Bringen wir nun zwischen die Platten des Kondensators ein Iso-

Exposé des bases théoriques du chauffage par pertes diélectriques, en relation avec la structure moléculaire des isolants. La description des générateurs haute fréquence est suivie de nombreux exemples pratiques, avec application du procédé dans la technique des résines synthétiques, l'industrie du bois, des textiles et de l'alimentation. Mise en évidence des avantages économiques considérables par rapport aux autres méthodes industrielles de chauffage.

liermaterial, Glas, Holz, Bakelit, so beobachten wir folgendes:

1. Der Strom I wird bei konstant gehaltener Spannung U um einen Faktor ϵ , die Dielektrizitätskonstante des Materials, grösser als der Ladestrom I_0 des Luftkondensators.

2. Der Strom eilt der Spannung nicht mehr um $\varphi = 90^\circ$ vor, sondern um einen kleineren Winkel $\varphi = 90^\circ - \delta$, wobei δ als der Verlustwinkel des Materials bezeichnet wird.

In der Tat nimmt jetzt das Material im Kondensator die Leistung auf:

$$P = UI \cos \varphi = UI \operatorname{tg} \delta = UI_0 \epsilon \operatorname{tg} \delta$$

$\epsilon \operatorname{tg} \delta$ bezeichnet man als die Verlustziffer des Materials. Setzen wir für I_0 den Wert ein, so ergibt sich schliesslich, dass die pro Volumeneinheit vom behandelten Stoffe aufgenommene Leistung dem Quadrat der elektrischen Feldstärke E , der Frequenz f , der Dielektrizitätskonstanten ϵ und dem $\operatorname{tg} \delta$ des Verlustwinkels δ proportional ist.

Es gilt:

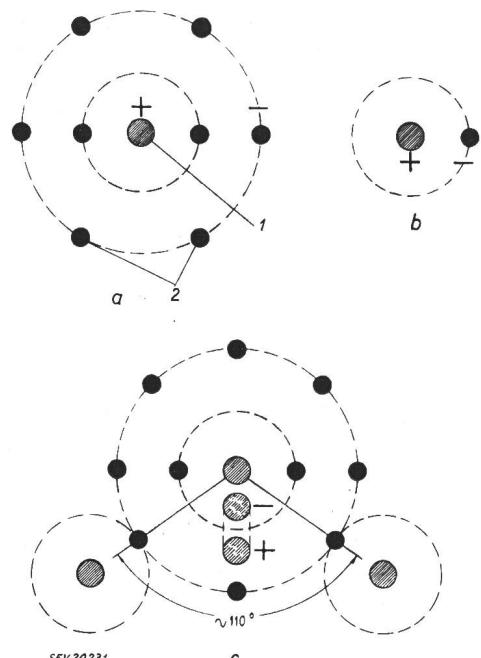
$$P = 0,556 f E^2 \epsilon \operatorname{tg} \delta \text{ kW/m}^3, \text{ wobei}$$

f Frequenz in MHz
 E Feldstärke in kV/m

In dieser Beziehung sind ϵ und $\operatorname{tg} \delta$ durch das Material gegeben, die Feldstärke E ist durch die Durchschlagsfestigkeit des Behandlungsgutes oft nach oben begrenzt. Somit ist eine genügende Leistungskonzentration, die praktisch in den Grenzen von 200 bis 10 000 kW/m³ liegt, nur durch die Wahl einer genügend hohen Frequenz f zu erreichen.

Die Dielektrizitätskonstante ϵ und der Verlustwinkel δ lassen sich aus dem Aufbau isolierender Stoffe erklären. Ihre Elementarteilchen sind Träger gleich grosser positiver und negativer elektrischer Ladungen, welche durch innermolekulare Kräfte zusammengehalten werden. Es seien genannt: Atomkern und Elektronenhülle im Atom, positive und negative Atome in der chemischen Bindung des Moleküls oder im Kristallgitter. Auf diese La-

dungsträger wirken im elektrischen Feld entgegengesetzt gerichtete Kräfte, welche die Schwerpunkte der positiven und negativen Ladungen etwas gegeneinander verschieben, die Materie polarisieren. Da-



Das Wasser als Dipol
a Sauerstoffatom $8O^{16}$ (1 Atomkern, 2 Elektronen); b Wasserstoffatom $1H^1$; c Wassermolekül H_2O

halten, so ist ihnen von aussen mehr Ladung zur Kompensation des Innenfeldes zuzuführen, mit anderen Worten: der Ladestrom erhöht sich um den Faktor ϵ . Noch andere chemische Verbindungen, z. B. Wasser, haben schon durch den Aufbau polarisierte Moleküle (siehe Fig. 1).

Die Wasserstoff-Atome sind unsymmetrisch an das Sauerstoff-Atom angelagert. Die Elektronen der Wasserstoff-Atome ergänzen die äussere Elektronenhülle des Sauerstoffs, wodurch dieser elektrisch negativ und die Wasserstoff-Atome positiv werden. Es entsteht ein Dipol. Im elektrischen Feld werden die normalerweise willkürlich liegenden Achsen der Elementardipole gleichgerichtet; die Dielektrizitätskonstante solcher Stoffe ist sehr hoch, z. B. $\epsilon = 80$ für Wasser. Viele makromolekulare Substanzen, Kunstharze, Holz, Textilien haben ebenfalls polarisierte Moleküle. Eine vierte Art der Polarisation entsteht, wenn eine leitende Flüssigkeit, z. B. eine ionisierte wässrige Lösung, in vielen kleinen, voneinander durch isolierendes Material getrennten Räumen vorhanden ist, was vielfach für feuchte organische Substanzen, z. B. Holz, Textilien, zutrifft. Diese «eingesperrten» Ionen verschieben sich innerhalb der begrenzten Räume und erzeugen so dort das innere Gegenfeld.

Im elektrischen Wechselfeld schwingen die beschriebenen vier Arten von gebundenen Ladungsträgern, eingesperrte Ionen, polarisierte Moleküle, Atome im Molekül oder Kristallgitter und schliess-

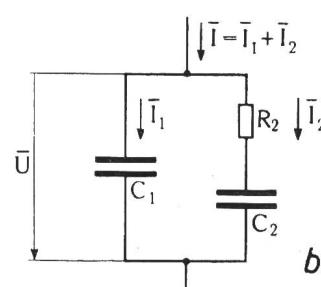
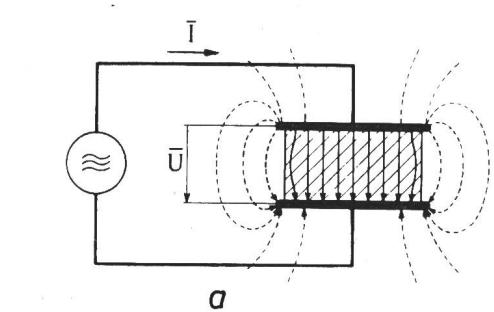
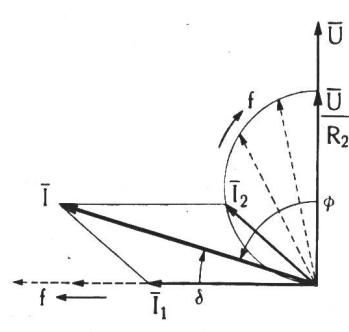
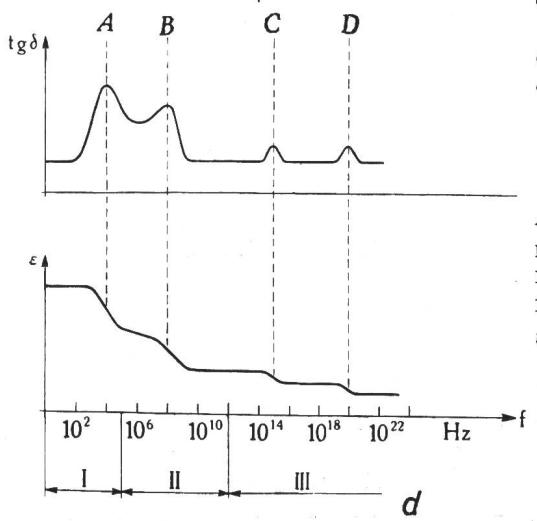


Fig. 2

Das Prinzip der dielektrischen Hochfrequenzwärmung



SEV 20232



durch entsteht in deren Innern ein dem von aussen angelegten entgegengesetztes elektrisches Feld. Will man die Spannung an den Kondensatorplatten beim Einführen des Behandlungsgutes gleich gross be-

lich Atomkerne und Elektronenhülle. Je nach dem, ob ein Material eine oder mehrere Arten der Polarisation aufweist, ändert sich sein Verhalten. Bei langsamem Feldänderungen, niedrigen Frequenzen,

vermögen alle Ladungsträger ohne Phasenverschiebung zu folgen. Der Ladestrom, mit andern Worten ϵ , ist gross und rein kapazitiv, die Verluste, $\operatorname{tg} \delta$, hingegen sind klein. Mit steigender Frequenz tritt bei verlustbehafteten Dielektrika innere Reibung bei der Bewegung der Ladungsträger in Erscheinung und bewirkt ein Zurückbleiben ihrer Bewegung hinter der treibenden Kraft, dem elektrischen Feld. Gleichzeitig sinkt auch die Amplitude der Bewegung. Im Stromkreis, der den Arbeitskondensator speist, äussert sich dies als eine Nacheilung und Reduktion des Ladestromes. ϵ sinkt und $\operatorname{tg} \delta$ steigt, das Behandlungsgut nimmt jetzt Wirkleistung auf. Fig. 2 zeigt den Verlauf [2] ¹⁾. Jede Polarisationsart hat dieses Verhalten bei einer ihr zugehörigen Frequenz f_0 . Steigt die Frequenz darüber hinaus, so vermögen die betreffenden Ladungsträger überhaupt nicht mehr zu folgen. ϵ wird noch kleiner und $\operatorname{tg} \delta$ geht wieder zurück. Die charakteristischen Frequenzen erstrecken sich von einigen kHz für Ionisationspolarisation bis ins optische Gebiet für die Polarisation der Elektronenhülle.

Bei jeder charakteristischen Frequenz sinkt ϵ und $\operatorname{tg} \delta$ hat ein Maximum. In Fig. 2 sind mit *A* die Ionenverschiebung, mit *B* die Dipolorientierung, mit *C* und *D* die atomische und elektronische Polarisation bezeichnet. Nur die ersten beiden Arten tragen zur dielektrischen Erwärmung bei und gehen oft ineinander über. Das von Murphy und Morgan vorgeschlagene Ersatzschema für das Dielektrikum, bestehend aus einem Kondensator C_1 , zu welchem die Serieschaltung eines zweiten Kondensators C_2 mit einem Widerstand R_2 parallel liegt, veranschaulicht die Verhältnisse [1]. Bei kleiner Frequenz sind die zugehörigen Ströme I_1 und I_2 beides Blindströme. Mit steigender Frequenz bleibt I_2 immer mehr zurück, wodurch der mit dem resultierenden Strom I verknüpfte Verlustwinkel δ steigt. Bei noch

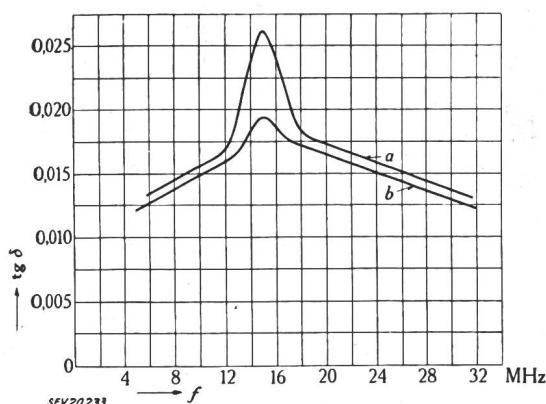


Fig. 3
Verlustwinkel δ von Zucker in Funktion der Frequenz f
a nasser Zucker mit ca. 2 % Feuchtigkeit
b trockener Zucker

höherer Frequenz ist I_2 reiner Wirkstrom. I_1 ist jedoch, da der Frequenz umgekehrt proportional, um vieles grösser geworden, wodurch $\operatorname{tg} \delta$ wieder sinkt. Als Beispiel sei der Verlauf des Verlustfaktors von Zucker in Fig. 3 gezeigt, welcher bei 15 MHz ein deutliches Maximum aufweist [3]. Kurve *a*

¹⁾ siehe Literatur am Schlusse der Arbeit.

ist nass, Kurve *b* trocken gemessen. Die Maxima sind aber wie bei den meisten interessierenden Stoffen, im bei HF-Erwärmung verwendeten Frequenzbereich nicht sehr ausgeprägt. Mit steigender Temperatur verschieben sich die Maxima gegen höhere Frequenzen.

Der beschriebene Mechanismus der dielektrischen Erwärmung macht es klar, warum nur die Verwendung hochfrequenter Ströme bei vielen Dielektrika genügend Verluste für eine wirksame Aufheizung erzeugt. Die Erwärmung des Behandlungsgutes von innen heraus ergibt dabei eine viel gleichmässigere Wärmeverteilung in dessen Innern als eine Aufheizung von aussen, insbesondere deshalb, weil schlechte Elektrizitätsleiter auch meistens schlechte Wärmeleiter sind. Fig. 4 zeigt dies sehr eindrücklich am Beispiel einer 150 mm dicken Holzschicht. Zwischen Heizplatten von 150 °C entsteht erst nach 6...8 Stunden eine einigermassen ausgeglichene Temperaturverteilung. Mit Hochfrequenzwärmung

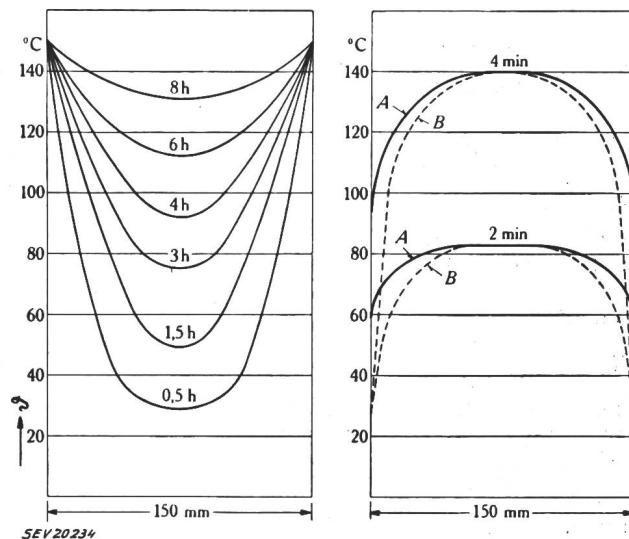


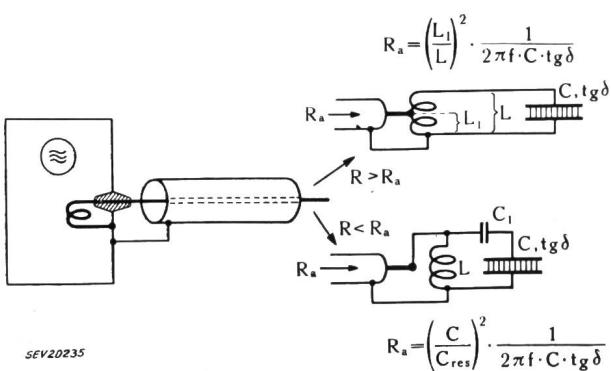
Fig. 4

links: Temperaturverteilung bei Anwendung von Heizplatten von 150 °C
rechts: Temperaturverteilung bei Anwendung von Hochfrequenzwärmung mit 300 kW/m³
A mit Wärmeisolation; B ohne Wärmeisolation

wird das gleiche Resultat in wenigen Minuten erreicht. Die Kurven beziehen sich auf eine Leistungskonzentration von 300 kW/m³, wobei die Kurven *A* mit, die Kurven *B* ohne Wärmeisolation der Elektrodenplatten gelten. Die Umkehr des Temperaturverlaufes ist augenfällig, bei HF-Erwärmung ist die heißeste Zone innen.

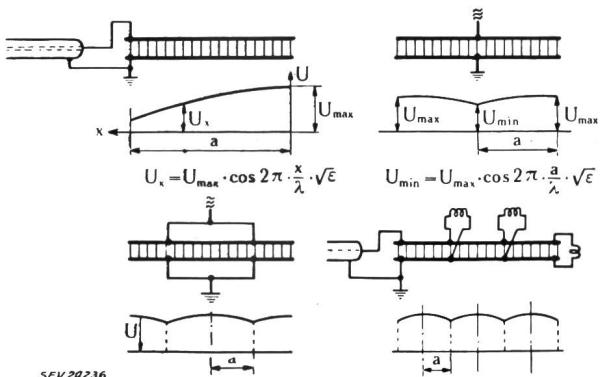
Bei der Erwärmung von kleineren Materialmengen pro Charge, z. B. Kunstharzpreßstoffen, kann der Behandlungskondensator unmittelbar auf dem Generator angeordnet werden und bildet meistens einen Bestandteil des Oszillatorschwingkreises. Für viele andere Industrien, z. B. Verleimung von Sperrholzplatten in Pressen, Durchlauftrocknungsöfen in der Textilindustrie, verlangt die Fabrikationseinrichtung eine Trennung des Behandlungskondensators vom Generator. Dies bringt Probleme der Anpassung der äusseren Belastung an die nun notwendigen Hochfrequenzleitungen und an den

Generator mit sich. Für eine gute Energieübertragung dürfen auf den Leitungen keine stehenden Wellen auftreten. Bedingung hiefür ist Abschluss der Leitung mit einem Ohmschen Widerstand, welcher dem Wellenwiderstand der Leitung von praktisch $50\ldots200\ \Omega$ gleich ist. Am Eingang der Leitung, an den Generatorklemmen, stellt diese dann einen angenähert gleich grossen Widerstand dar.



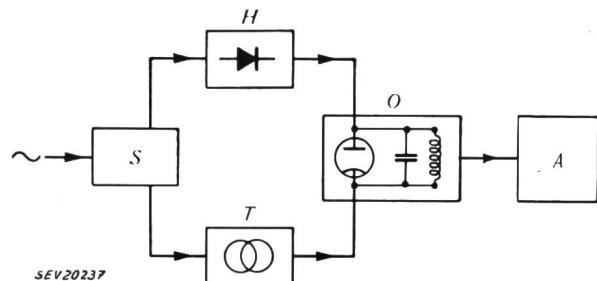
Der Generator ist so auszulegen, dass er bei Belastung mit dem Wellenwiderstand der Leitung seine Nennleistung abgibt. Auf der Belastungsseite wird dem Behandlungskondensator C eine Induktivität L parallel geschaltet und das ganze auf die Generatorfrequenz abgestimmt. Die Belastung ist dann ein Ohmscher Widerstand und hat den Wert $R = \frac{1}{2\pi f C \operatorname{tg} \delta}$, welcher kleiner oder grösser als der für die Aufnahme der Nennleistung notwendige Abschlusswiderstand R_a der Leitung sein kann. Fig. 5 zeigt die Anpassung für beide Fälle. Durch Ausbildung der Abstimmspule als Autotransformator wird R_a reduziert, durch Serieschaltung eines Kondensators C_1 zum Behandlungskondensator vergrössert.

Besondere Massnahmen sind bei Verwendung räumlich ausgedehnter Behandlungskondensatoren



erforderlich, da dann ungleichmässige Spannungsverteilungen vorkommen können. Sind die Dimensionen in der gleichen Grössenordnung wie ein Vier-

tel der Wellenlänge der Arbeitsfrequenz — bei 20 MHz sind dies 3,75 m — so verhält sich der Arbeitskondensator wie eine gleichmässig und schwach belastete elektrische Leitung, bei welcher ja die Spannung vom Speisepunkt gegen das offene Ende hin ansteigt. Fig. 6 zeigt die Verhältnisse. Spannungsunterschiede bedeuten ungleichmässige Erwärmung und dürfen in der Regel 10 % der Speisespannung nicht überschreiten.



Die Spannungsdifferenz hängt vom Abstand a zwischen dem Speisepunkt und dem freien Ende des Behandlungskondensators ab. Es ist $U_{\min} = U_{\max} \cdot \cos 2\pi \frac{a}{\lambda} \sqrt{\epsilon}$. Bei z. B. $f = 15\ \text{MHz}$ und $a = 1\ \text{m}$ wird die Spannungsdifferenz 6,5 %. Durch



Speisung des Arbeitskondensators in der Mitte oder an mehreren Punkten wird a ein Bruchteil der Kondensatorlänge. Die Aufteilung der parallelen Ab-

stimminduktivität in mehrere Spulen, die man längs des Kondensators verteilt, leistet denselben Dienst für den Ausgleich der Spannungsverteilung.

Hochfrequenzgeneratoren für industrielle Zwecke müssen einfach und robust aufgebaut sein. Aus dem Blockschema Fig. 7 geht der prinzipielle Aufbau hervor. Von einer Steuerung *S* werden der Heiztransformator *T* und der Hochspannungsgleichrichter *H* zur Speisung des Leistungsröhrrenoszillators *O* geschaltet. Dieser speist die Arbeitsvorrichtung *A*, welche den Behandlungskondensator und ein Abstimmglied enthält. Fig. 8 zeigt den Aufbau eines 4-kW-Generators. Das Gerät ist in mehrere Einheiten gemäss dem Blockschema unterteilt, welche für sich verdrahtet und leicht zugänglich sind. Unter-



4-kW-Hochfrequenzgenerator, 27 MHz, für dielektrische Erwärmung mit offenem Behandlungskondensator

halb des Hochfrequenzteiles *O* erkennt man den Ventilator für die Luftkühlung der Oszillatroröhren. Im Gleichrichterteil *H* ist die Netzzuleitung über Störschutz-Kondensatoren geführt, um das Abfließen von Hochfrequenzströmen in das Netz zu verhindern. Im Steuerteil *S* sind alle notwendigen Schalter, Kontroll-Lampen und Schutzrelais für die Bedienung und Überwachung untergebracht. Ein Zeitschalter gestattet die genaue Dosierung der Behandlungsdauer. Fig. 9 zeigt den Generator für dielektrische Erwärmung bei 27 MHz mit aufgebautem Behandlungskondensator. Der hintere Teil der Haube enthält eine Abstimminduktivität. Der ganze Generator ist vollständig geschlossen und abgeschirmt, der Hochfrequenzteil sogar zweifach. Dies ist notwendig, um Abstrahlungen und dadurch verursachte Radiostörungen auf ein Minimum zu reduzieren. Grundbedingung für die Wirksamkeit dieser Massnahmen ist eine sorgfältige Hochfrequenz-Erdung der Geräte im Betriebe. Fig. 10 stellt

einen Generator von 25 kW Leistung und 15 MHz dar. Die Trennung des Hochfrequenzgenerators vom Gleichrichter erleichtert die Aufstellung bei engen Platzverhältnissen. Auch dieses Gerät ist luftgekühlt. Unterhalb der Steuerung ist die zum An-

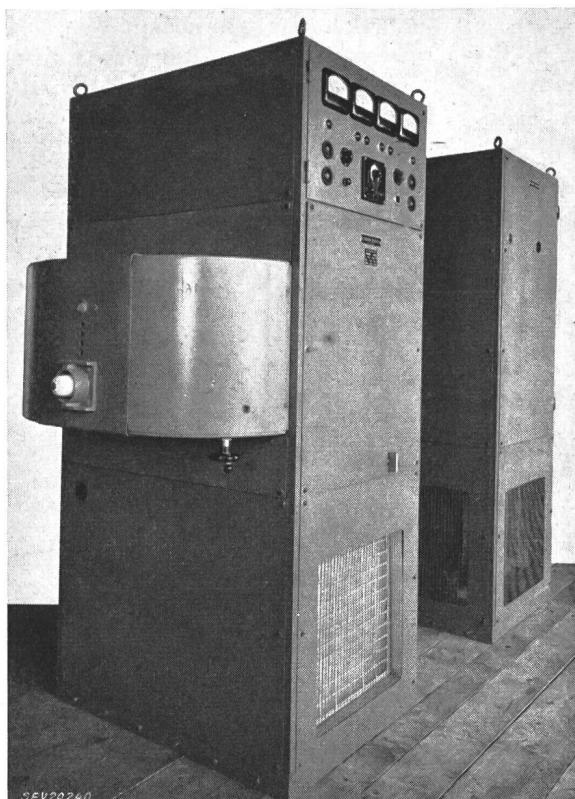


Fig. 10
25-kW-Hochfrequenzgenerator, 15 MHz, für dielektrische Erwärmung mit separatem Anodenspannungsgleichrichter

schluss einer konzentrischen Hochfrequenzleitung ausgebildete Ausgangsklemme sichtbar. Sie ist über eine schwenkbare Spule angeschlossen zur Leistungsregulierung mit variabler induktiver Kopplung an die Oszillatospule. Der Generator ist zur Speisung grösserer Objekte, wie Pressen und Durchlauföfen, vorgesehen, welche oft über Hochfrequenz-

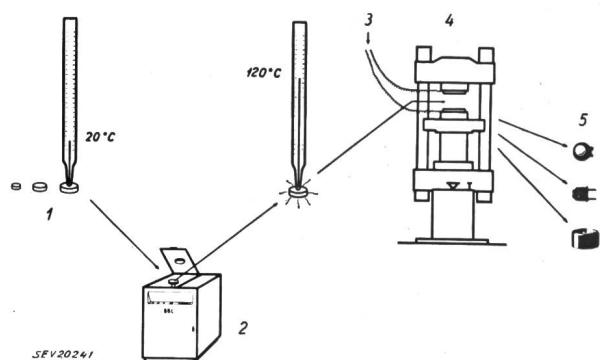


Fig. 11
Prinzip der Pressfroherwärmung mit Hochfrequenz
1 Presslinge; 2 Hochfrequenz-Erwärmung; 3 Wärme; 4 Presse;
5 Fertigfabrikate

leitungen angeschlossen werden, da sie nicht unmittelbar neben dem Generator aufgestellt werden können. In diesem Falle wird der Behandlungskonden-

sator mit einer parallelegeschalteten Induktivität auf die Arbeitsfrequenz abgestimmt, so dass in der Zuleitung nur der Wirkstrom für die aufzubringende Leistung und kein Blindstrom fliesst.

Die industriellen Anwendungen der dielektrischen Hochfrequenzwärmung sind ausserordentlich vielseitig und nehmen ständig zu. Wie schon gesagt, war die Vorwärmung aushärtbarer Kunstharzpreßstoffe das erste in grösserem Maßstab in die Industrie eingeführte Verfahren. In Fig. 11 ist das Vorgehen illustriert. Die im HF-Generator auf

mung die Presszeit auf $1/3$ bis $1/5$ verkürzt wird. Entsprechend erhöht sich die Produktion pro Presse. In Fig. 13 sehen wir die Anordnung der HF-Generatoren in einem Presswerk; pro Presse wird ein Generator benötigt.

Ein weiteres wichtiges Anwendungsgebiet findet die HF-Erwärmung heute in der Holzindustrie. Hier hat die Hochfrequenzenergie insbesondere für Verleimungen Eingang gefunden. Als Leime sind die gleichen aushärtbaren Kunstharze, wie sie in den Presswerken verwendet werden, am besten geeig-

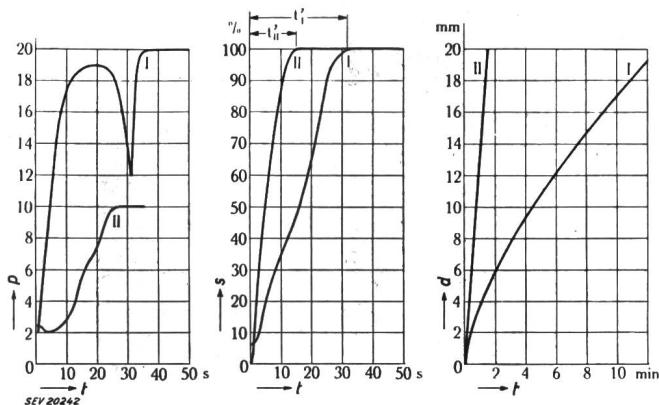


Fig. 12
Kunstharpresen

Pressdruck p , Pressweg s und zulässige Dicke d des Arbeitsgutes in Funktion der Zeit t
I ohne Vorwärmung; II mit Hochfrequenzvorwärmung;
 t' Schliesszeit der Presse

ca. 120 °C vorgewärmten Tablett aus Preßstoff-Pulver werden auf der ebenfalls beheizten Presse in die definitive Form gebracht. Die als Bindemittel verwendeten aushärtbaren Phenol-, Harnstoff- und Melamin-Harze sind einerseits sehr schlechte Wärmeleiter, anderseits haben sie beträchtliche dielektrische Verluste bei Hochfrequenz ϵ variert in den Grenzen 5...12 und $\tan \delta$ von 5...20 Prozent beim fertigen Produkt. Die dadurch ermöglichte rasche und gleichmässige Hochfrequenzvorwärmung des Arbeitsgutes gestattet eine viel bessere Ausnutzung der Pressen. Mit 1 kW HF-Leistung können ca. 250 g Preßstoff in 1 min vorgewärmt werden. Fig. 12 zeigt die Verbesserung des Pressvorganges. Die Kurven I sind mit, die Kurven II ohne HF-Vorwärmung ge-

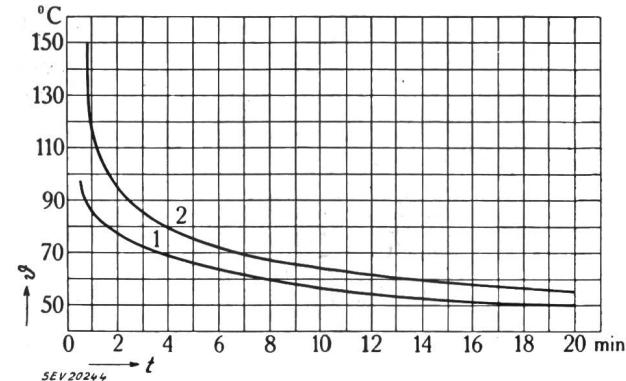


Fig. 14
Heissverleimung von Holz

Temperatur S in Funktion der Abbindezeit t
1 Harnstoff-Formaldehyd-Leim mit Beschleuniger
und 25 % Füllstoff (Mehl); 2 Phenol-Formaldehyd-Leim mit
Beschleuniger, ohne Füllstoff

net. Harnstoff- und Melaminharzverleimungen sind zudem kaltwasserbeständig, Phenolharz ist auch gegen kochendes Wasser widerstandsfähig. Die Abbindezeiten sinken rasch mit steigender Temperatur, wie Fig. 14 für Phenol-Formaldehydleim (1) und Harnstoff-Formaldehydleim (2) zeigt. Die

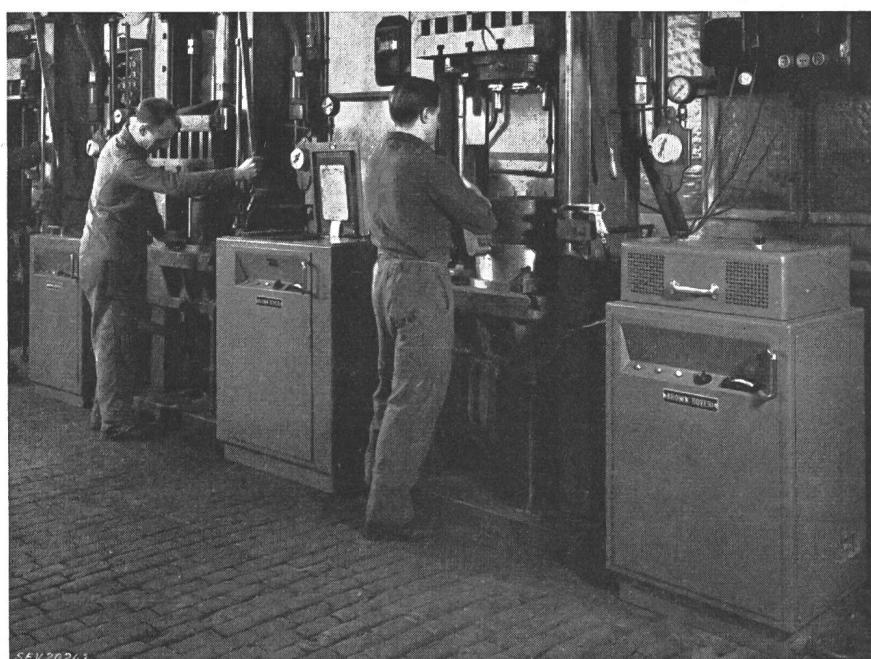
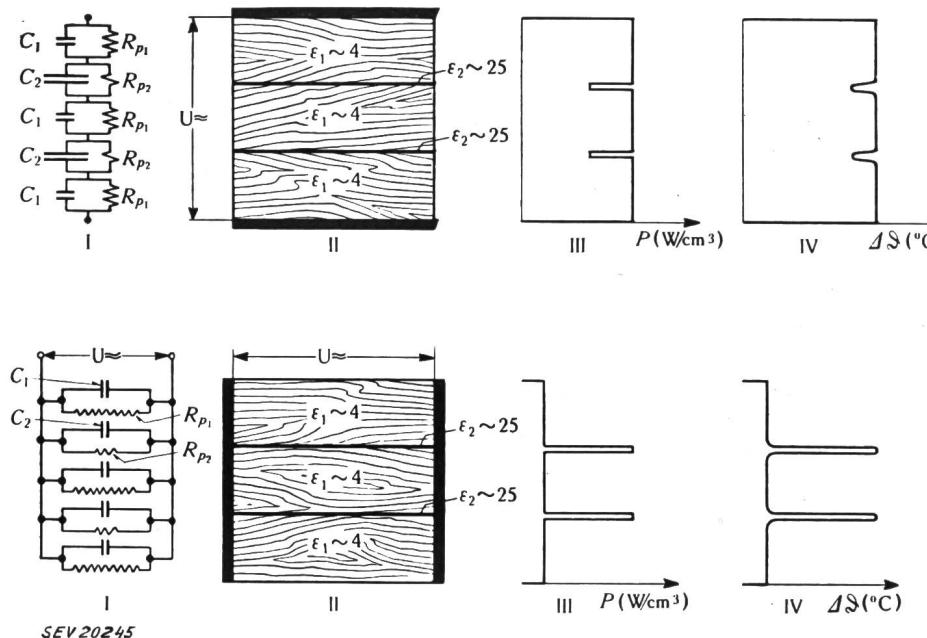


Fig. 13
Hochfrequenzgeneratoren im
Presswerk

messen. Wir sehen, dass der Pressdruck p und auch die Schliessungszeit t' der Presse halbiert werden. Im rechten Diagramm zeigt die Materialstärke d in Funktion der Presszeit t , dass mit HF-Vorwärm-

flüssigen Leime haben sehr hohe Dielektrizitätskonstante ($\epsilon = 25$) und Verluste ($\tan \delta = 0,7$), während für Holz etwa $\epsilon = 4$, $\tan \delta = 5\%$ gelten. Diese Eigenschaften ergeben ganz verschiedene Erwä-

mungen von Holz und Leim, je nach dem, ob die Leimfugen senkrecht oder parallel zu den Feldlinien verlaufen, wie Fig. 15 zeigt. Im ersten Falle fliesst im Leim und im Holz der gleiche HF-Strom und die Wärmeleistungen P pro Volumeneinheit verhalten sich wie die Grössen $(\frac{\tg \delta}{\epsilon})$ beider Stoffe zueinander, d. h. wie 1 : 3 für Leim und Holz. Es muss also das ganze Holz für die Verleimung mit erwärmt werden. Diese Anordnung findet vorzugsweise bei der Verleimung von Sperrholzplatten Verwendung.



Im zweiten Falle liegt am Leim und am Holz die gleiche Feldstärke. Die pro Volumeneinheit erzeugten Wärmeleistungen P in W/cm^3 verhalten sich dann wie die Produkte von $\epsilon \cdot \tg \delta$ beider Stoffe zueinander, d. h. wie 45 : 1, so dass praktisch nur

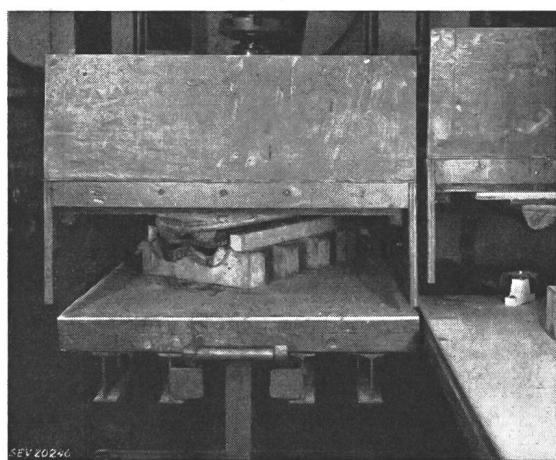


Fig. 16
Verleimung und Pressung von Radiogehäuse-Zierleisten mit Hochfrequenzwärmung

die Leimfuge allein erwärmt wird. Dies ist natürlich sehr wirtschaftlich. Die Feldstärke darf in den Leimfugen 500 V/cm nicht überschreiten, da sonst Durchschläge zu befürchten sind.

In Fig. 16 ist als Beispiel die Verleimung von Sperrholzzierleisten von Radiogehäusen unter der Presse dargestellt. Bei einer Leistung von 2 kW beträgt die Pressdauer 2 min. Die Pressformen aus Holz sind mit Aluminiumblechen als Elektroden ausgeschlagen. Fig. 17 zeigt das Anleimen der Vorderbeine und der Querleiste eines Stuhles, wobei die Leimschicht in der Kraftlinienrichtung des Feldes verläuft. Die Verleimungszeit beträgt nur 35 s. Der ganze Stuhl wird in 11 min in mehreren Arbeitsgängen verleimt. Die Verleimungszeiten sind gegenüber der Heizung mit heissen Platten durchwegs auf $1/6$ bis $1/4$ verkürzt [5].

Eine sehr interessante Anwendung ist die Herstellung grosser Platten, z. B. von Sperrholz in unbeheizten Pressen mit HF-Erwärmung des Behandlungsgutes. Die Pressplatten sind wärmeisoliert und die Erd-Elektroden sind oben und unten. Es wer-

Fig. 15
Dielektrische Erwärmung zur Holzverleimung
oben: Leimfugen quer zu den Feldlinien
unten: Leimfugen in Richtung der Feldlinien
I Ersatzschema; II Elektrodenanordnung; III Leistung P pro Volumeneinheit; IV relative Temperatur ΔS

den 2 Platten gleichzeitig hergestellt und eine metallische Zwischenplatte an die HF-Spannung angeschlossen. Für die Fabrikation von Kunstholzplatten, welche aus zerkleinerten und dann miteinander verleimten Holzabfällen bestehen, ist die gleichmässige rasche Erwärmung mit Hochfrequenz

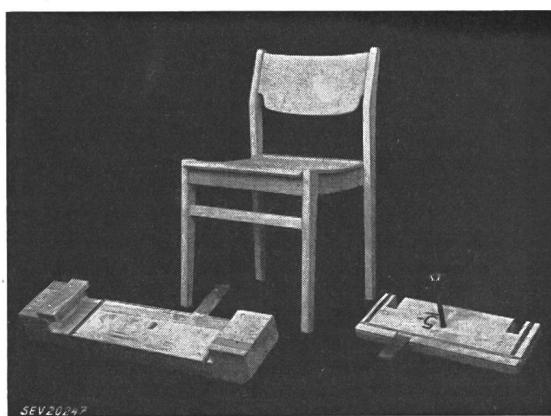


Fig. 17
Hochfrequenzverleimung von Stühlen in mehreren Arbeitsgängen

von innen heraus bis zum Abbinden des Leimes besonders vorteilhaft. Fig. 18 zeigt einen Brown-Boveri-Generator von 25 kW Leistung, der zur Fabrikation von Zimmertüren und Möbelteilen nach

dem Curvi-Board-Verfahren im Betriebe steht. Man erkennt die einstellbare, an der Presse montierte Abstimmvorrichtung. Bei diesem Verfahren werden die Kunsthölzplatten mit einem Rahmen und mit

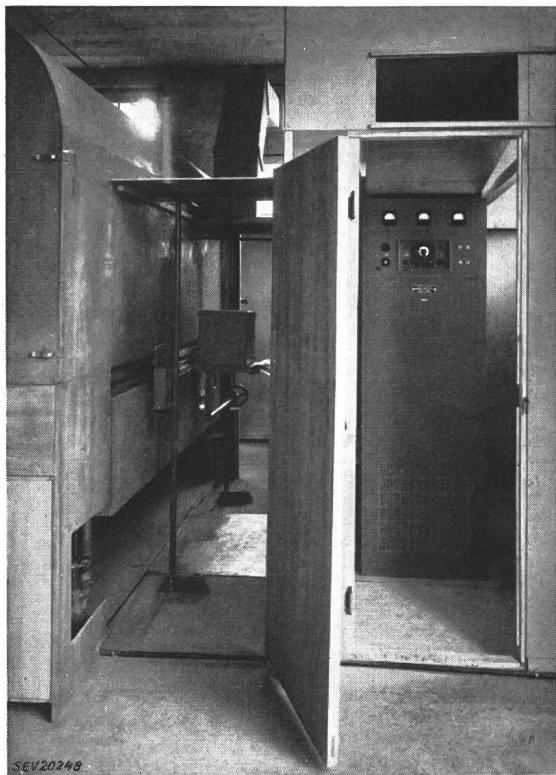


Fig. 18

Herstellung von furnierten Kunsthölzturen nach dem Curvi-Board-Verfahren in der Presse mit einem 25-kW-Hochfrequenzgenerator zur Heissverleimung

beidseitigen profilierten Fournieren in einem einzigen Arbeitsgang geformt, gepresst und verleimt. Mit 25 kW Leistung werden 2 Zimmertüren in 8 min

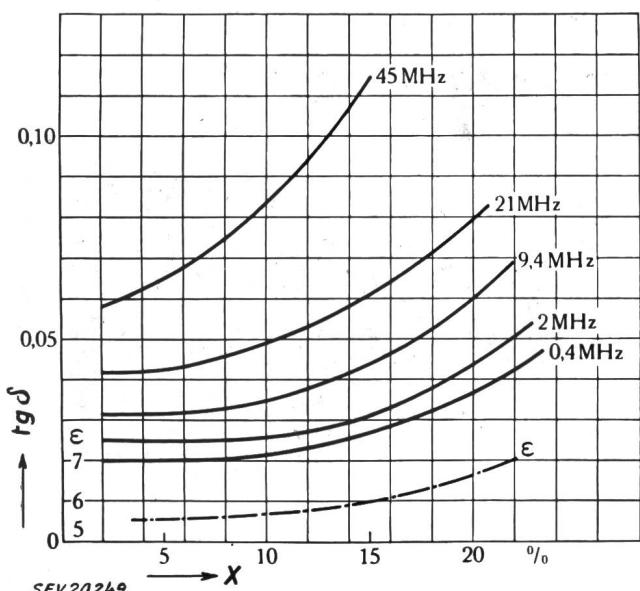


Fig. 19

Dielektrische Eigenschaften des Holzes
Verlustfaktor $\operatorname{tg} \delta$ und Dielektrizitätskonstante ϵ von Weymuts-föhre in Abhängigkeit von der relativen Feuchtigkeit X.
Parameter Frequenz

verleimt. Mit beheizten Pressplatten wäre eine Verleimungszeit von $2\frac{1}{2}$ Stunden notwendig, eine rationelle Fabrikation also ausgeschlossen [3].

Trocknungsprozesse aller Art sind weitere Anwendungsgebiete für die Hochfrequenzwärmung. Eines davon ist die Holztrocknung. Feuchtes Holz hat wesentlich höhere dielektrische Verluste als trockenes, wie die mit Weymutsföhre aufgenommenen Kurven in Fig. 19 zeigen. Andere Hölzer verhalten sich analog. Demzufolge sind beim Anlegen eines konstanten Hochfrequenzfeldes an zu trocknendes Holz die Verluste und damit die Verdampfungsgeschwindigkeit am Anfang gross und werden im Verlaufe des Prozesses mit sinkendem Wassergehalt kleiner. Die Trocknung von Hartholzbalken grösseren Querschnittes ist wegen der Gefahr der Verschalung und Rissbildung ein schwieriges Problem. Beim meist verwendeten Kammerofenverfahren mit Heissdampf dauert die Trocknung bei Temperaturen von 75°C 2...3 Wochen, wobei die Feuchtigkeit von 25...30 % auf 8...10 % reduziert wird. Dabei darf die Luftfeuchtigkeit nur wenige Prozente unterhalb des hygrokopischen

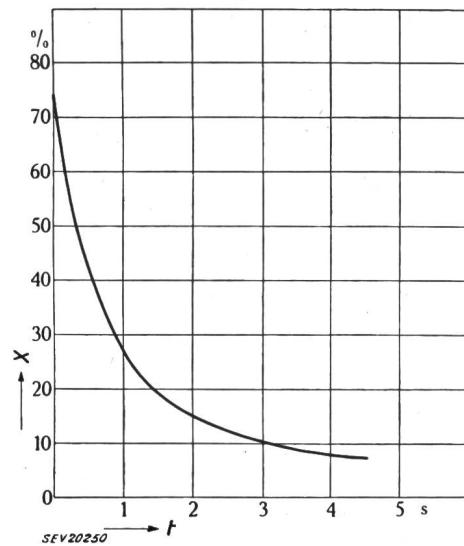


Fig. 20
Garntrocknung
Relative Feuchtigkeit X in Funktion der Zeit t bei Garntrocknung im Hochfrequenzfeld

Gleichgewichts zwischen Luft- und Holzfeuchtigkeit gehalten werden. Nach *Graf* und *Egner* wird bei Trocknung mit 120°C das Holz etwas plastisch, wodurch die Rissempfindlichkeit sinkt und die Trocknungszeit auf 1...2 Tage reduziert werden darf. Bei allen diesen Verfahren besteht beim Holz ein Temperaturgefälle von aussen nach innen und ein umgekehrtes Feuchtigkeitsgefälle. Der Feuchtigkeitsentzug an der Oberfläche muss dem Feuchtigkeitsfluss im Innern des Holzes angepasst werden. Bei Hochfrequenztrocknung entsteht die Wärme im Holz und man kann viel schärfer trocknen. So wurde versuchweise Buchenholz von 10×10 cm Querschnitt in 5 min von 40 % auf 5 % Feuchtigkeit vollständig riss- und verschalungsfrei getrocknet.

Die Hochfrequenzwärmung findet neuerdings auch Eingang in die Textilindustrie, in erster Linie

für Trocknungen. Auch hier ist die Warmlufttrocknung von Garnspulen sehr langwierig, da der Feuchtigkeitssentzug wiederum dem Wassernachfluss von innen nach aussen angepasst werden muss. Bei zu schneller Trocknung ergeben sich später beim Weben und Färben der Stoffe Schwierigkeiten durch Verzug und Ungleichmässigkeit der Farbe. Außerdem ist das zu trocknende Garn beim Beginn des Arbeitsvorganges oft ungleichmässig feucht. Bei Lufttrocknung ist es nur beim vollständigen Was-

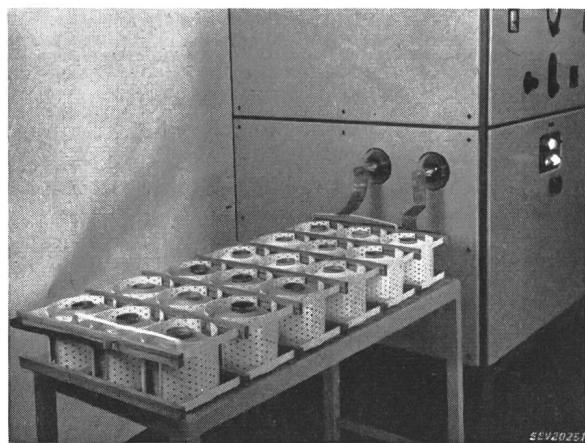


Fig. 21
Trocknung von Garnspulen mit Hochfrequenz

serentzug möglich, diese Differenzen auszugleichen. Oft wird aber im Endzustand eine bestimmte Feuchtigkeit, in der Regel zwischen 5 und 10 %, benötigt. In diesem Falle muss anschliessend an die Trocknung wieder befeuchtet werden.

Bei Hochfrequenzwärmung darf wegen der Wärmeerzeugung im Arbeitsgut selbst ohne Verzugsgefahr viel rascher getrocknet werden. Zudem

ab, während die Erwärmungszeit zunimmt. Dies wegen der wie beim Holz bei höherer Feuchtigkeit grösseren dielektrischen Verluste. Fig. 20 zeigt die an Baumwollgarn gemessene Trocknungskurve. Die Trocknungszeit beträgt nur 4 s und die Endfeuchtigkeit strebt asymptotisch einem von der angelegten Feldstärke abhängigen Endwert zu. Dieses Verhalten führt dazu, Feuchtigkeitsunterschiede im unbehandelten Arbeitsgut im Laufe des Trocknungsprozesses auszugleichen, und gibt die Möglichkeit, direkt und rasch auf eine gewünschte Endfeuchtigkeit zu trocknen. Als Beispiel sei die Trocknung von Garnspulen gezeigt (Fig. 21). Vom tropfnassen Zustand werden die Spulen in 45 min auf 8,5 % Wassergehalt gebracht. Im Grossbetrieb wird im Durchlaufverfahren getrocknet. Ein Transportband gleitet über die geerdete Elektrode, während die Hochfrequenzspannung führende Elektrode sich oberhalb des Arbeitsgutes befindet.

Sandkerne in der Giessereitechnik werden neuerdings ebenfalls im Durchlaufverfahren mit Hochfrequenz getrocknet, wobei Kunstharsbinder die üblichen Öl- und Wachsbinder ersetzen. Bei gegenüber der Ofenbehandlung von 180 °C auf 120 °C gesenkter Temperatur dauert die Trocknung nur noch 2 min statt 2 Stunden. Die Kerne werden glatter und fester und der Ausschuss an Gussteilen sinkt [4].

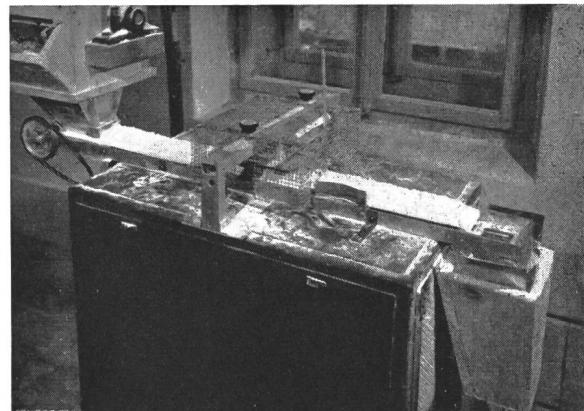


Fig. 23
Versuchsanlage zur Mehlsterilisierung mit Hochfrequenz-Energie im Durchlaufverfahren

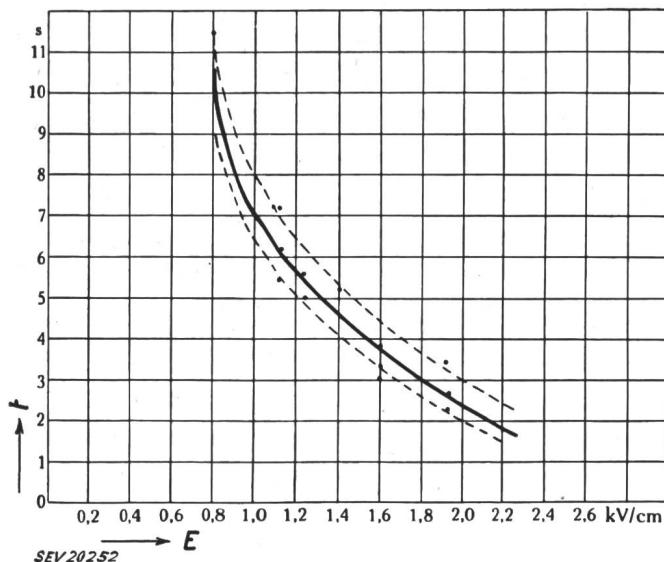


Fig. 22
Tötungszeit t von Mehlmotten in Abhängigkeit der Hochfrequenzfeldstärke E

nimmt bei konstanter Feldstärke die Trocknungs geschwindigkeit von Wolle, Baumwolle und der meisten Kunstfasern mit sinkendem Wassergehalt

Verschiedene Anwendungen der Hochfrequenz eröffnen sich in der Lebensmittelindustrie. In den USA ist die Herstellung von Dörrgemüse und das Auftauen von tiefgekühlten Lebensmitteln bekannt geworden. Eine weitere Anwendung ist die Abtötung schädlicher Insekten und Würmer in Getreide, Mehl, Gries, Haferflocken usw. Das Verfahren beruht darauf, dass lebende Organismen infolge ihres Wasser- und Fettgehaltes sich im Hochfrequenzfeld viel rascher erwärmen als die Cerealien. Fig. 22 stellt die Tötungszeit der Mehlmotte in Funktion der Feldstärke in Luft dar. Bei 1,2 kV/cm beträgt diese maximal 7 s. In dieser Zeit erwärmt sich das Behandlungsgut um 20...30 °C, was ohne jede Schädigung zulässig ist. Fig. 23 zeigt eine Versuchsanordnung zur Mehlsterilisation im Durchlaufverfahren

ren. Der Fluss des Gutes geht vom Einlauftrichter durch die Elektroden des Generators in den Auslauf und von dort direkt in sterilisierte Papiersäcke. Mit 1 kWh HF-Energie können ca. 100 kg Arbeitsgut behandelt werden.

In der Zuckerindustrie sind bei Herstellung von Würfelzucker, Stangenzucker und Zuckerstöcken am Schluss des Arbeitsvorganges 1...2 % Wasser zu entziehen, damit das Produkt haltbar bleibt. Während Ofentrocknung 8...12 Stunden und bei Zuckerstöcken mehrere Tage dauert, kann der Prozess mit HF-Energie auf wenige Minuten verkürzt werden. Dies ermöglicht die Einführung der Fließfabrikation.

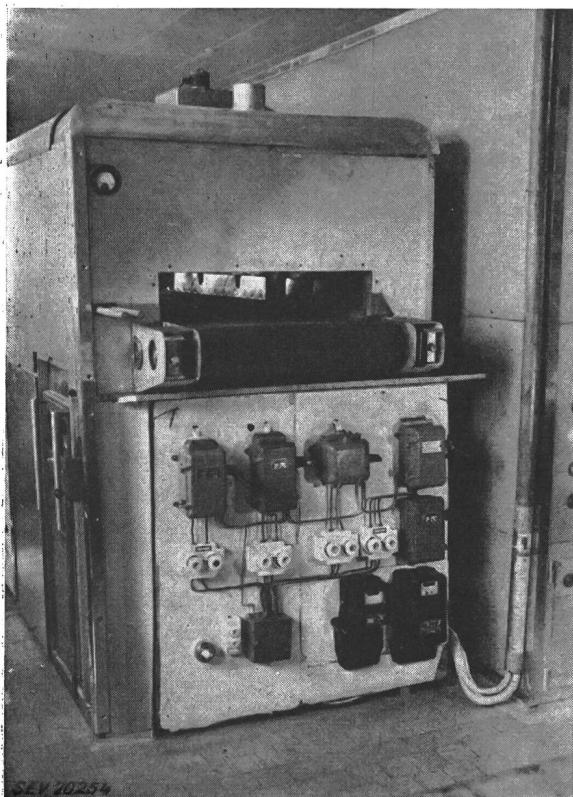


Fig. 24
Versuchsofen mit eingebautem 4-kW-HF-Generator

Sehr interessante Resultate haben sich bei Anwendung der Hochfrequenzwärme beim Backen ergeben. Hier hat ein Verfahren, Hochfrequenz mit Infrarotheizung im HF-IR-Backofen zu kombinieren, neue Wege gewiesen. Die HF-Erwärmung heizt den Teig von innen, wodurch er aufgeht und durchbackt, während die Infrarotbestrahlung gleichzeitig für die Krustenbildung sorgt. Die gleichzeitige Anwendung beider Erwärmungsarten führt zu einem ca. 20 % grösseren Volumen der Backwaren als im gewöhnlichen Backofen. Zudem gestattet die Möglichkeit, sowohl die HF- als auch die IR-Heizung einzeln stetig, stufenlos und rasch zu regulieren, die Qualität des Backgutes sehr genau bezüglich Feuchtigkeitsgehalt, Krustenbildung usw. einzuhalten. In Fig. 24 sehen wir den in der schweizerischen Bäckereifachschule in Luzern aufgestellten Versuchsofen mit dem eingebauten 4-kW-HF-

Generator. Der Ofen arbeitet im Durchlaufverfahren. Das als Stahlgliederkette ausgebildete Transportband mit stetig regulierbarer Geschwindigkeit dient zugleich als Erd-Elektrode und ist in der Höhe verstellbar. Die HF-Elektrode ist ein Drahtnetz, über welchem die Infrarotlampen angeordnet sind. Die beiden Handgriffe dienen zum Verstellen der Abgriffe der eingebauten Abstimminduktivität und das Instrument zur Kontrolle der HF-Spannung. Gebacken wurden Brot, Weggli, Gipfel und Biskuits. Bei Backzeiten von nur 5 min ist der Energieverbrauch wesentlich kleiner als in normalen Elektrobacköfen.

Ein sehr wesentlicher Gesichtspunkt ist die wirtschaftliche Seite der Hochfrequenzwärzung. Elektrowärme ganz allgemein ist veredelte Wärme und teurer als z. B. durch Verbrennen von Kohle erzeugte Wärme. Hochfrequenzwärme aber ist veredelte Elektrowärme. Bei einem Wirkungsgrad von 40...60 % moderner Generatoren ist einschliesslich Amortisation der Röhren mit einem 3...5fachen Preis der HF-Kilowattstunde gegenüber dem Energiepreis ab Netz zu rechnen, also im Mittel mit 15...25 Rp./kWh. Ihre Anwendung ist also, ganz abgesehen von der technischen Durchführbarkeit, nur dort gerechtfertigt, wo sich eindeutige Vorteile bie-ten. Diese können bestehen:

1. In der direkten Verbilligung eines Produktes durch Steigerung der Produktion.
2. In der Verbesserung eines Produktes.
3. In der Lösung von Erwärmungsproblemen, die mit anderen Verfahren nicht möglich ist.

So wurden z. B. in einem Kunstharz-Presswerk durch Einführung der HF-Vorwärmung die Produktion um 20 % erhöht und die Gestehungskosten um 10 % reduziert. Gleichzeitig wurde die Qualität der Produkte wesentlich verbessert.

Bei der Herstellung von Kunsthölzplatten kostet die Erwärmung einer Normalplatte von 34 kg Gewicht mit Dampfheizung 90 Rp./Platte. Durch Einführung der HF-Erwärmung konnten die Kosten auf 36 Rp./Platte einschliesslich Verzinsung und Amortisation des Generators gesenkt werden.

Die Zuckertrocknung kostet mit Abdampf Franken 1.30/100 kg, mit HF-Energie nur noch 60 Rp. pro 100 kg.

Die Kosten der Gusskerntrocknung betragen mit Hochfrequenz ein Drittel der Kosten für Ofentrocknung.

Für die Sterilisierung von Getreide zur Borkäfervernichtung sind bei Verwendung von S-Gas, Methylbromid, 70 Rp./100 kg aufzuwenden. Zudem ist dieses Verfahren nur bei Aussentemperaturen über 9 °C anwendbar. Mit HF-Sterilisation sind nur noch 30 Rp./kg einzusetzen.

Diese Beispiele zeigen, dass die Hochfrequenzwärzung, am richtigen Ort eingesetzt, wirtschaftlich ist. Die bisherige Entwicklung berechtigt uns für die Zukunft dieses interessanten und vielseitigen Gebietes zu den besten Hoffnungen.

Literatur

- [1] Brown, George H., Cyril N. Hoyler und Rudolph A. Bierwirth: *Theory and Application of Radio-Frequency Heating*. New York: van Nostrand 1947.

- [2] Alexander, P. und G. A. Meek: Anwendungen des dielektrischen Erhitzen und Trocknens in der Textilindustrie. Melland Textilber. Bd. 33 (1952), Nr. 2, S. 163...166; Nr. 3, S. 229...230.
- [3] Hochfrequenzwärmung. Sonderheft der Brown Boveri Mitt. Bd. 38 (1951), Nr. 11.
- [4] Hillman, V. E.: Better Cores by Electronic Baking. Iron Age Bd. 166 (1950), Nr. 13, S. 67...69.

- [5] Stel, M. und E. C. Witsenburg: Erhitzung durch hochfrequente Felder. Philips' techn. Rdsch. Bd. 11 (1950), Nr. 8, S. 236...244.

Adresse des Autors:

Dr. Alexander Goldstein, dipl. El. Ing. ETH, Trottstrasse 3, Ennetbaden (AG).

Verfahren und Einrichtung zum Backen mit hochfrequenter und infraroter Energie

Diskussionsbeitrag zu den Ausführungen von A. Goldstein, gehalten an der 16. Hochfrequenztagung des SEV vom 8. Mai 1952 in Basel, von N. Felber, Zürich

Im Juni des letzten Jahres fand in Lugano eine internationale Bäckereiausstellung, ESPA genannt, statt. Zu diesem Anlass wollte die Bäcker- und Konditorenfachschule in Luzern abklären lassen, was von den Mitteilungen über Backofenanlagen, die hochfrequente oder infrarote (von Hellstrahlern stammende kurzwellige Wärmestrahlung) Energie verwerten, zu halten sei, um eventuell einen Versuchsofen an der ESPA zeigen zu können.

Versuche mit Hochfrequenz- oder Infrarot-Energie allein hätten fehlschlagen müssen, da das eine Verfahren keine Kruste, das andere keine Krume ergeben hätte. Versuche, beide Verfahren nacheinander anzuwenden, hatten scheinbar keinen Erfolg. Ein neuer Weg wies der Gedanke, beide Energiearten gleichzeitig auf das Backgut — Brot, Kleingebäck, Biscuits usw. — einwirken zu lassen.

Die Ergebnisse mit einem ersten Versuchsofen — Backfläche $40 \times 50 \text{ cm}^2$ —, der auch an der ESPA vorgeführt wurde, waren ermutigend. Heute wird in der Fachschule Luzern ein grösserer Typ — Backfläche $65 \times 200 \text{ cm}^2$ — nach allen Regeln geprüft¹⁾. Er arbeitet nach dem Durchlaufprinzip. Verfahren und Einrichtung sind patentrechtlich geschützt.

Die Resultate, die mit diesem HF-IR-Durchlaufofen erzielt werden, bestätigen die in ihn gesetzten Erwartungen. Mit geringfügigen Änderungen bei der Vorbereitung der Teige entstehen die als normal bekannten Gebäcke. Der Gärprozess ist nicht mehr so heikel wie für den normalen Ofen. Selbst bei kürzeren Gärzeiten erhält man normale Volumen. Bei der als normal bezeichneten Gärzeit, aber auch bei Übergare fallen die Volumen grösser aus als bisher.

¹⁾ siehe Fig. 24 des Vortrages von A. Goldstein, Seite 1014 dieses Heftes.

Die Leistungsfähigkeit des Ofens ist in Tabelle I durch ein paar Zahlen festgehalten, die sich stets auf eine Backfläche von $1,3 \text{ m}^2$ beziehen.

Leistungsfähigkeit des HF-IR-Durchlaufofens mit einer Backfläche von $1,3 \text{ m}^2$

Tabelle I

Gebäck	Stundenleistung	Durchlaufzeit
Weggli	ca. 1080 Stück	5,5 min
Gipfel	ca. 1020 Stück	5,0 min
Biscuits	ca. 80 kg	2,0 min

Die Energiekosten liegen bei einem Energiepreis von 5 Rp./kWh unter 1 % des Verkaufspreises — beim normalen Ofen beträgt er im Mittel das Doppelte. Für Biscuits ergibt sich ein spezifischer Energieverbrauch von 0,35 kWh/kg Fertigware — im normalen Biscuitofen liegt der entsprechende Wert um 1 kWh/kg herum. Der HF-IR-Biscuitofen ist diesbezüglich also etwa dreimal günstiger. Seine Anschaffungskosten entsprechen etwa den des normalen Ofens, sind aber eher etwas niedriger.

Ein paar Vorteile des HF-IR-Ofens, kurz zusammengefasst: Kurze Backzeiten — die Hälfte, ein Viertel, ja ein Zehntel der bisher üblichen; geringer Platzbedarf bei gleicher Produktion; geringer Stromverbrauch; grössere Volumen des Backgutes.

Adresse des Autors:

Norbert Felber, dipl. El. Ing. ETH, Hägelerweg 7, Zürich 55.

Die Hochfrequenz-Erwärmung von Metallen

Vortrag, gehalten an der 16. Hochfrequenztagung des SEV vom 8. Mai 1952 in Basel, von R. Wälchli, Zürich

621.364.15:621.7

Die nachfolgenden Ausführungen sollen in erster Linie eine Einführung und einen Überblick über die hochfrequente Erwärmung von Metallen geben. Nach der Beschreibung des Skineffektes und der Erklärung der Erzeugung der Wärme im Metall folgt eine eingehende Darstellung der Forderungen der Praxis an die Konstruktion des Generators und deren praktische Lösungen. Sodann werden alle Anwendungsbereiche, wie das Löten, das Härteln, das Anlassen und Vergüten sowie das Schmelzen behandelt und mit einigen wenigen Anwendungsbeispielen belegt.

Aperçu des méthodes de chauffage des métaux par haute fréquence. Description de l'effet pelliculaire et de la production de chaleur dans le métal. Exposé détaillé des exigences posées à la construction du générateur et des solutions pratiques. Tous les domaines d'application sont décrits, notamment le soudage, le recuit, le revenu, la trempe et la fusion, avec quelques exemples concrets.

1. Einleitung

Die Hochfrequenz-Erwärmung wird seit einer Reihe von Jahren in der Industrie angewendet. Dank dem grossen Nutzen, den sie in mancher Hinsicht zeigt, verbreitet sie sich mehr und mehr. Dieser zeigt sich vor allem in besserer Qualität der Produkte, in grösserer Produktion und in billigeren Produktionskosten.

Seit langem ist bekannt, dass man Metalle durch Wirbelströme, hervorgerufen durch ein magnetisches Wechselfeld, erwärmen kann. Die ersten Pa-

tente datieren aus dem Jahre 1850. Das Schmelzen von Metallen mit Hilfe von rotierenden Generatoren war eine der ersten praktischen Anwendungen der Induktionsheizung. Sie geht auf das Jahr 1900 zurück. Röhrengeneratoren jedoch wurden erst später gebaut. Ihre erste Anwendung bestand im Entgasen von Radioröhren. Dank ihrer Vorteile fanden sie in den letzten Jahren schnelle Verbreitung. Durch das Ausarbeiten von Produktionseinrichtungen, wie Vorschub- und Halteeinrichtungen, Drehische sowie Maschinen, die die Eingliederung der