

**Das Verhalten des Holzes während der Trocknung
im hochfrequenten Wechselfeld**

VON DER
EIDGENÖSSISCHEN TECHNISCHEN
HOCHSCHULE IN ZÜRICH

ZUR ERLANGUNG
DER WÜRDE EINES DOKTORS DER
TECHNISCHEN WISSENSCHAFTEN

GENEHMIGTE
PROMOTIONSARBEIT

VORGELEGT VON
JEAN VODOZ, dipl. Forstingenieur
von La Tour de Peilz

Referent: Herr Prof. Dr. A. Frey-Wyssling

Korreferent: Herr P.D. Dr. H. H. Bosshard



Kat.

Lebensabriß

- 1922 19. März geboren in Baden Kt. Aargau (Schweiz)
- 1929—1938 Besuch der Gemeinde- und Bezirksschule in Baden
- 1942 Maturität an der Kantonsschule Trogen
- 1942—1947 Studium an der Abteilung für Forstwirtschaft der Eidg. Technischen Hochschule Zürich
- 1947 Diplom als Forstingenieur
- 1948 Forstliche Praxis in Norwegen
- 1948 Tätigkeit im „Chantier d'imprégnation de poteaux“ in Yverdon
- 1949—1954 Forschungstätigkeit auf dem Gebiet der Holztechnologie an der Abteilung Holz der Eidg. Materialprüfungs- und Versuchsanstalt in Zürich
- ab 1954 Forschungstätigkeit auf dem Gebiet der Hochfrequenz-Holztrocknung bei der Firma Bremer & Co. in Zürich.

Das Verhalten des Holzes während der Trocknung im hochfrequenten Wechselfeld

The Behaviour of Wood during Drying by Radio Frequency Heating

Von Jean Vodoz, Zürich

*Einleitung — Problemstellung — Material und
Versuchsverfahren — Das Verhalten des Holzes im
hochfrequenten Wechselfeld während der Erwärmungs-
periode — Das Verhalten des Holzes im hochfrequenten
Wechselfeld während der Trocknungsperiode — Zu-
sammenfassung — Schrifttum.*

Einleitung

Seit beinahe 30 Jahren wird in mehreren Ländern versucht, Holz im hochfrequenten Wechselfeld zu trocknen. Soweit bekannt ist, sind aber nur wenige Versuche auf industrieller Grundlage durchgeführt worden, und zwar immer nur in Anlehnung an die mit der üblichen Kammertrocknung gemachten Erfahrungen. Diesen Versuchen war daher nur geringer Erfolg beschieden, und sie mußten immer wieder aufgegeben werden. Die bisher nur laboratoriumsmäßig durchgeführten reinen Hochfrequenz-Holz-

trocknungsversuche ließen die Gefahr starker Rißbildung bei Holzarten mit großem inneren Diffusionswiderstand erkennen und wurden aus diesem und aus wirtschaftlichen Gründen nicht auf die industrielle Holz Trocknung übertragen.

Erst 1953 baute der Schweizer Ingenieur R. C. Bremer in enger Zusammenarbeit mit der Firma Brown Boveri & Cie. in Baden eine wirtschaftliche Hochfrequenz-Holz Trocknungsanlage nach dem Durchlaufprinzip, die es ermöglichte, das zu trocknende Holz einer gesteuerten Wirkung der Hochfrequenzenergie auszusetzen. Zahlreiche Großversuche zeigten bald, daß mit dieser Anlage selbst dicke Holzstücke in sehr kurzer Zeit schadenfrei auf eine ausgeglichene Endfeuchtigkeit heruntergetrocknet werden konnten. Doch tauchten bei der Prüfung verschiedener Holzarten Fragen auf, die durch neue Versuche gelöst

werden mußten¹. Eine dieser Fragen, nämlich die Abhängigkeit der Hochfrequenz-trocknung von der Holzstruktur, soll hier behandelt werden.

Problemstellung

Industrielle Hochfrequenz-Trocknungsversuche hatten gezeigt, daß sich die Holzarten unter gleichen Versuchsbedingungen z. T. sehr verschieden verhalten. Verfeinerte, laboratoriumsmäßige Untersuchungen [52] führten zur Feststellung, daß die unterschiedlichen dielektrischen Eigenschaften der einzelnen Holzarten nicht nur von der Orientierung der Proben im Feld, sondern auch von der anatomischen Struktur des Holzes abhängig sind. Die Vermutung, diese Fragen seien in anderen Ländern schon längst eingehend bearbeitet worden, bestätigte sich nur teilweise. Eine kurze Zusammenfassung der wichtigsten, uns bekannten Arbeiten soll dies zeigen.

Miller, Peterson, Nixon und Chaffey [40] haben die dielektrischen Eigenschaften (durch die Messung der Dielektrizitäts-Konstanten ϵ und des Verlustwinkels $\text{tg } \delta$) der wichtigsten kanadischen Holzarten bei Feuchtigkeiten unter $u = 20\%$ bestimmt. Sie kamen dabei zum Schlusse, ϵ und $\text{tg } \delta$ seien von der Rohwichte und von der Holzfeuchtigkeit, nicht aber von der Holzart abhängig.

Im „Special Report“ Nr. 8 [15] beschreiben Hearmon und Burcham Versuche, die unter Berücksichtigung der Frequenz, der Rohwichte, der Holzfeuchtigkeit und der Faserrichtung an 12 Holzarten durchgeführt wurden. An dünnen Scheiben mit einer höchsten Feuchtigkeit von rd. 20% wurden wiederum ϵ , $\text{tg } \delta$ und die elektrische Leitfähigkeit gemessen. Dabei wurde der Einfluß der Faserrichtung erkannt, nicht aber der Einfluß der Struktur, obschon diese Versuche an Nadelhölzern, ring- und zerstreutporigen Laubbölzern und an tropischen Holzarten durchgeführt worden waren.

Die in Madison durchgeführten Versuche [56] bestätigten, daß die einzelnen Holzarten einen mehr oder weniger großen inneren Diffusionswiderstand aufweisen. Skaar [44] hat die Dielektrizitätskonstante, den Verlustwinkel und den elektrischen Widerstand von 30 Holzarten bei drei Frequenzen und einem Feuchtigkeitsbereich von 0 bis 20% bestimmt. Die Messungen wurden bei allen Holzarten mit transversal verlaufenden Feldlinien, aber nur an 4 Holzarten mit transversal und in Faserrichtung verlaufenden Feldlinien durchgeführt.

Über den Unterschied zwischen den dielektrischen Eigenschaften in radialer und tangentialer Richtung sowie über den Einfluß der Struktur dieser 30 Holzarten wird nichts bekanntgegeben.

Kroener und Pungs haben in verschiedenen Arbeiten [26, 27, 28, 42] das Verhalten von ϵ und $\text{tg } \delta$ von Buche, Eiche und Fichte in einem großen Frequenzbereich, bei Feuchtigkeiten von 0 bis 12% untersucht. Sie haben das Holz ganz schematisch als ein geschichtetes Mischdielektrikum aufgefaßt und rechnerisch die Abhängigkeit der dielektrischen Anisotropie des Holzes von der Makrostruktur bewiesen.

In einer auf eigenen Versuchen aufgebauten theoretischen Abhandlung kamen Nakato und Kadita zu einer ähnlichen Schlußfolgerung [36]. Sie bestimmten die Dielektrizitätskonstante von Hinoki (*Chamaecyparis obtusa* Endl.) und Mizunara (*Quercus crispula* Bl.) bei $u = 0$ bis 15% in radialer und tangentialer Richtung sowie in Faserrichtung und schrieben die auftretenden Unterschiede der makroskopischen Struktur des Holzes zu (Luft + Zellsubstanz).

In einer weiteren Arbeit untersuchten Nakato und Kadita [35] an *Chamaecyparis* die Beziehung zwischen ϵ , $\text{tg } \delta$, Holzfeuchtigkeit und Temperatur. Der geprüfte Feuchtigkeitsbereich war wiederum 0 bis 15% und der Temperaturbereich 10 bis 50° C. Den Einfluß der Feuchtigkeit und der Temperatur auf die dielektrischen Eigenschaften des Holzes, der Zellulose

und der Glukose hat Trapp an Fichte und Buche untersucht [47]. Er hat dabei die Messungen an Holz bei radial und parallel zu den Fasern verlaufenden Feldlinien durchgeführt und Feuchtigkeiten von 0 bis 100% und Temperaturen von 20 bis 100° C gewählt.

Eigentliche Trocknungsversuche haben Hamada, Maku und Kadita [12] an Holzwürfeln durchgeführt. Dabei wurden die Temperatur, die Feuchtigkeit und ihre Verteilung in der Längs- und Querrichtung der Probe gemessen. Ishaq [18] hat den unterschiedlichen inneren Diffusionswiderstand von 4 Holzarten festgestellt, dabei aber den Einfluß der anatomischen Struktur dieser Holzarten nicht weiter verfolgt.

Birjukov [2], der sich eingehend mit Fragen der industriellen Trocknung des Holzes mit Hochfrequenz beschäftigt hat, stellt fest, daß die leitenden und polarisierenden Eigenschaften des Holzes noch ungenügend erforscht sind.

Die zahlreichsten systematischen Trocknungsversuche mit Hochfrequenz wurden durch Pratt und Dean durchgeführt [41]. Das Ziel ihrer Untersuchungen war, in möglichst kurzer Zeit zu ermitteln, welche Holzarten sich mit Hochfrequenz schnell und erfolgreich trocken lassen. Dazu wurde das Problem bewußt von der praktischen Seite her in Angriff genommen und die zeitraubende Ermittlung von Grundlagenkenntnissen auf ein Mindestmaß beschränkt.

Diese Literaturlaufzählung zeigt, daß bereits Angaben über den Einfluß der Orientierung des Holzes im Feld vorliegen, daß aber die Angaben über den Einfluß der anatomischen Struktur auf das Verhalten des Holzes im hochfrequenten Wechselfeld ungenügend sind. Es fällt ferner auf, daß mit wenigen Ausnahmen sein Verhalten stets durch die Dielektrizitätskonstante ϵ und den Verlustwinkel $\text{tg } \delta$ charakterisiert wurde und zudem nur bei Feuchtigkeiten von 0 bis 20%. Über die dielektrischen Eigenschaften des Holzes im Fasersättigungsbereich und darüber ist sozusagen nichts bekannt.

Angesichts dieser ungenügenden Angaben wurde das Ziel verfolgt, durch systematische Versuche die Abhängigkeit der Hochfrequenz-trocknung von der Struktur des Holzes, im besonderen von der Faserrichtung, der Jahrringstellung, der Zerstreut- und Ringporigkeit, der Markstrahlen und der Thyllen zu untersuchen.

Material und Versuchsverfahren

Material

Als Versuchsmaterial wurden folgende Holzarten gewählt:

Buche (*Fagus sylvatica* L.) zerstreutporiges Holz, Gefäße im Frühholz nur wenig größer als im Spätholz. Dickwandige Holzfasern, ungleichmäßig angeordnete Markstrahlen verschiedener Größe. Gefäße oft mit Thyllen verstopft, besonders im Rotkern.

Ahorn (*Acer* sp.) zerstreutporiges Holz, einzeln oder 2 bis 5 gehäuft in radialen Reihen liegende enge Gefäße. Keine Thyllen. Dicke und dünnwandige Holzfasern. Homogene Markstrahlen, 1 bis 8 Zellen breit und 50 bis 70 Zellen hoch.

Eiche (*Quercus* sp.) ringporiges Holz, sehr große Frühholzgefäße \varnothing 100 bis 340 μ , kleine Spätholzgefäße \varnothing 10 bis 50 μ , Gefäße meistens mit Thyllen verstopft. Dickwandige Holzfasern. Markstrahlen treten in zwei Größen auf: einreihige bis zu 30 Zellen hoch und 0,5 bis 1 mm breite Markstrahlen mit 3 bis 10 cm Höhe. Strangparenchym in einreihigen, lockeren Tangentialbändern.

Tanne (*Abies alba* Mill.) Nadelholz mit Tracheiden, die vom Früh- zum Spätholz an Wanddicke zunehmen. Einreihige, nur aus Markstrahlparenchym zusammengesetzte Markstrahlen. Keine Harzgänge.

Aus 4 m langen Stammabschnitten jeder dieser Holzarten wurden jeweils 6 cm dicke Herzbretter herausgeschnitten, diese in Kanteln mit stehenden Jahrringen aufgeteilt und diese wiederum in einzelne Würfel zerschnitten. Da die anatomischen Eigenschaften des Holzes in axialer Richtung einheitlicher sind als in radialer oder tangentialer Richtung, wurden die in der Stammachse übereinanderliegenden Würfel derselben Kantel auf die verschiedenen Versuchsreihen verteilt, während die auf derselben Stammhöhe liegenden Würfel gleichen Versuchsbedingungen unterworfen wurden. Jeder Versuch wurde je nach der Zahl vergleichbarer Würfel zwei- bis viermal wiederholt (Bild 1).

In Abständen von 30 oder 60 cm wurden die Rohwichte und die Anfangsfeuchtigkeit des Untersuchungsholzes be-

¹ Die Versuche wurden im Laboratorium der Firma Bremer & Co. in Wettingen und im Hochfrequenzlaboratorium der Firma Brown, Boveri & Cie. in Baden in Zusammenarbeit mit dem Institut für allgemeine Botanik der Eidgen. Technischen Hochschule in Zürich (Prof. Dr. A. Frey-Wyssling u. Dr. H. H. Bosshard) durchgeführt. Ich möchte an dieser Stelle Herrn Prof. Dr. A. Frey-Wyssling, der die Durchführung der Arbeit angeregt und geleitet hat, meinen besten Dank aussprechen. Gleichzeitig danke ich Herrn R. C. Bremer für sein großzügiges Entgegenkommen, mit dem er diese Arbeit in jeder Hinsicht gefördert hat.

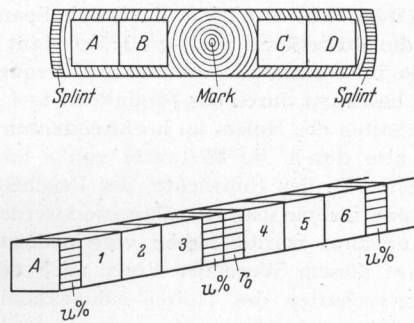


Bild 1. Schema der Probenentnahme. A, B, C, D Kanteln, u % Wassergehaltsprobe, 1...6 Proben (Würfel), r₀ Rohwichte-Probe.

stimmt. Die einzelnen Würfel sind wie üblich an der Luft (31, 32) und über Salzlösungen bis zum Erreichen der gewünschten Feuchtigkeit gelagert und erst dann mit Hilfe einer Hobelkreissäge auf die Abmaße 5 × 5 × 5 cm zugeschnitten worden.

Es wurden insgesamt 502 Versuche durchgeführt (Buche 153, Ahorn 113, Eiche 131, Tanne 105), die sich auf folgende Feuchtigkeitsstufen verteilen:

50% 30% 18% 12% 0%.

Versuchsverfahren

Versuchseinrichtung. Zur Durchführung der Versuche wurde eine Anlage gebaut (52), die es ermöglichte, die Proben im hochfrequenten Wechselfeld beliebig zu orientieren, mit verschiedenen Frequenzen, mit konstanter oder veränderlicher Spannung und mit verschiedenen Elektrodenabständen zu arbeiten, bei fortlaufender Messung der Holztemperatur (Erwärmungsgeschwindigkeit), des Holzgewichtes (Trocknungsgeschwindigkeit) und des Dampfdruckes im Holzinnern. Diese Anlage soll kurz beschrieben werden (Bild 2).

Ein 4 kW-HF-Generator der Firma Brown Boveri & Cie. mit Anpaßglied und Abstimmtrieb (Hochfrequenzleistung 4 kW, Wärmeäquivalent 3440 kcal/h, Frequenz rd. 27/15/10 Mhz) wurde mit einem geerdeten Arbeitstisch versehen. Ferner wurden an die reihenmäßigen Horizontal-Elektroden seitlich verstellbare Vertikalelektroden angebracht. Ein Holzgestell trug eine halbautomatische Waage mit 10-Gramm-Skala (Div. 100 mg), an

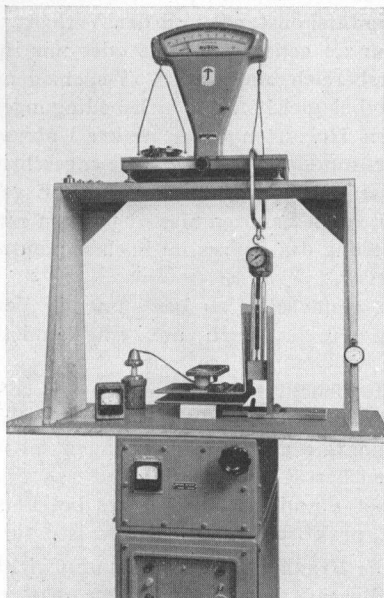


Bild 2. Versuchsanlage zur Prüfung des Verhaltens des Holzes bei der HF-Trocknung.

der die frei zwischen den Vertikal-Elektroden hängende Holzprobe befestigt wurde. Die Gewichtsabnahme konnte während des ganzen Versuches verfolgt werden. Bei bekanntem Anfangsgewicht und Anfangsfeuchtigkeit der Probe konnten die mittlere Feuchtigkeit sowie die Trocknungsgeschwindigkeit errechnet werden.

Die HF-Spannung wurde mit einem HF-Voltmeter, bestehend aus Meßkopf und Instrument, gemessen. Zur Messung der Holztemperatur wurden jeweils zwei enghalsige Toluolthermometer in Bohrlöcher ($\varnothing = 4,5$ mm) gesteckt.

Messung des Dampfdruckes im Holz. Zahlreiche Vorversuche führten zu einer immer größeren Vereinfachung der Druckmessung. Diese wurde schließlich wie folgt durchgeführt: eine mit einem kurzen Gummischlauch versehene Glaspipette wurde in ein in Probemitte angebrachtes Bohrloch hineingedrückt. Das freie Ende der Pipette konnte mittels eines Druckschlauches mit einem Manometer verbunden werden. Versuche haben gezeigt, daß diese einfache Vorrichtung auch bei mehreren atü Druck genügt (Bild 3, 4).

Trogversuche zur Ermittlung der Linien gleichen Potentials. Ergänzungsversuche, deren Ergebnisse später beschrieben werden, wurden mit der „Trogversuchsanlage“ (Bild 5) des Hochfrequenz-Laboratoriums der Firma Brown Boveri & Cie. durchgeführt. Der Trogversuch dient zur Ermittlung der Linien gleichen Potentials an einem Modell, woraus auf die Verteilung der Feldlinien im dielektrischen Feld geschlossen werden kann.

Das Modell wird in einem mit leicht angesäuertem Wasser gefüllten Trog zwischen zwei Elektroden gelegt. Von einer Wechselspannungsquelle wird ein Strom mit Tonfrequenz über einen Spannungsteiler einer Elektrode zugeführt. Eine Sonde, deren Spitze das Wasser (Elektrolyt) berührt, ist mit einem Nullindikator (Oszillograph) verbunden. Mit dieser Sonde werden die Äquipotentiallinien abgetastet und aufgezeichnet (Bild 10 bis 14). Die Dielektrizitätskonstante ϵ wird bestimmt durch das Verhältnis $\epsilon = h : d$, wobei h die Höhe des Wasserspiegels und d der Unterschied zwischen der Höhe des Wasserspiegels und der Höhe des Modells sind.

Die in der Folge gebrauchten Bezeichnungen, Symbole und Abkürzungen sollen hier aufgeführt werden:

- r₀ = Darrohichte (g/cm³)
- G_u = Gewicht der Probe bei der Feuchtigkeit u%
- G_d = Gewicht der gedarrten Probe
- u% = Holzfeuchtigkeit ($u\% = \frac{G_u - G_d}{G_d} \cdot 100$)

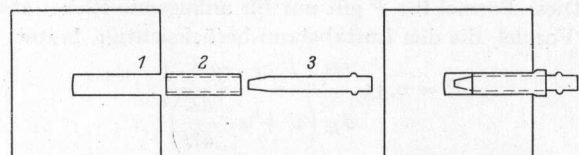


Bild 4. Schema der Anordnung für die Druckmessungen. 1 Bohrloch, 2 Gummischlauch, 3 Glaspipette.

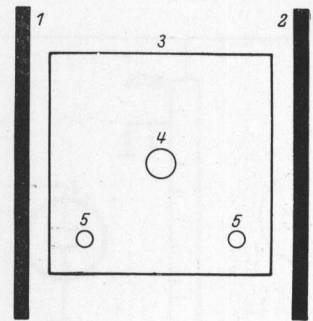


Bild 3. Schema der Bohrloch-anordnung für Temperatur- und Druckmessungen. 1 Hochpotentialelektrode, 2 Elektrode, 3 Holzprobe, 4 Bohrloch für die Druckmessung, 5 Bohrlocher für die Temperaturmessung.

ΔG	= Gewichtsverlust der Proben (g)
t	= Temperatur ($^{\circ}$ C)
p	= innerer Dampfdruck (kg/cm ²)
E	= Wärmehaufnahme je Zeiteinheit als Maß für die Erwärmungsgeschwindigkeit (cal/min)
ϵ	= Dielektrizitätskonstante
$\text{tg } \delta$	= Verlustfaktor
ρ	= spez. elektrischer Widerstand (Ω mm ² /m)
χ	= spez. elektrischer Leitwert ($\chi = 1/\rho$)
\parallel	= Feldlinien verlaufen in Faserrichtung
rad	= Feldlinien verlaufen radial
tg	= Feldlinien verlaufen tangential
\perp	= Feldlinien verlaufen senkrecht zur Faserrichtung, ohne Unterscheidung zwischen radialer und tangentialer Richtung.

Das Verhalten des Holzes im hochfrequenten Wechselfeld während der Erwärmungsperiode

Die Erwärmungsperiode beginnt mit dem Versuch selbst und endet bei beginnender Trocknungsperiode, d. h. bei einsetzender Verdampfung der Holzfeuchtigkeit. Die Erwärmungsperiode hat gegenüber der Trocknungsperiode

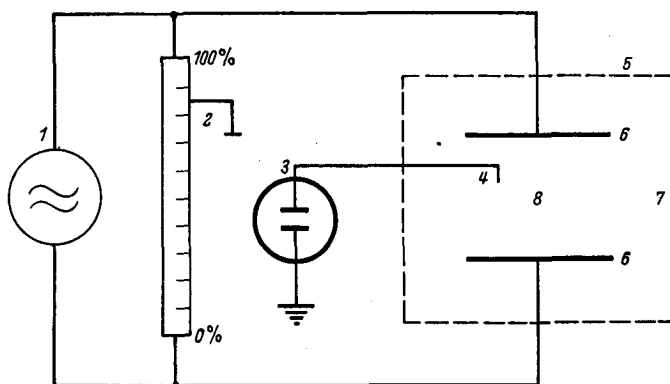


Bild 5. Schema der „Trogversuchsanlage“. 1 Wechselspannungsquelle, 2 Spannungsteiler, 3 Nullindikator (Oszillograph), 4 Sonde, 5 Trogwand, 6 Elektroden, 7 Elektrolyt (Wasser), 8 Modell (Bild 10 u. 11).

den großen Vorteil, genauere Meßwerte zu ergeben, denn die Dimensionen der Holzproben bleiben bis zur einsetzenden Verdampfung der Feuchtigkeit gleich, wodurch auch der Luftabstand zwischen den Holzproben und den Elektroden unverändert bleibt. Die zunächst folgenden Ausführungen werden sich daher jeweils auf die Erwärmungsperiode beziehen.

Dielektrizitätskonstante ϵ und Verlustwinkel $\text{tg } \delta$ von Holz

Die dem Holz zugeführte und in Wärme umgesetzte Hochfrequenzleistung kann angenähert nach folgender Formel errechnet werden:

$$P = U^2 \cdot \omega \cdot \frac{\epsilon \cdot F}{d \cdot 4\pi \cdot 0,9} \cdot \text{tg } \delta \text{ (Watt)}, \quad (1)$$

Hierbei bedeuten

U	= Hochfrequenzspannung in kV
ω	= $2\pi \cdot f$
f	= Frequenz in Mhz (10^6 Hz)
ϵ	= Dielektrizitätskonstante des Holzes
F	= die mit Holz belegte Fläche der Elektrode in cm ²
d	= Holzdicke in cm
$\text{tg } \delta$	= Verlustfaktor des Holzes

Diese Formel für P gilt nur für anliegende Elektroden. Die Formel, die den Luftabstand berücksichtigt, lautet:

$$P = 0,55 \frac{U^2 \cdot F \cdot \epsilon \cdot \text{tg } \delta \cdot f}{d_H \left(1 + \epsilon \cdot \frac{dL}{dH}\right)^2}, \quad (2)$$

mit

d_H	= Holzdicke in cm
d_L	= Luftabstand zwischen Elektrode und Holz in cm

Werden die Faktoren U, f, F, d , also die Spannung, die Frequenz, die Probenform und -größe konstant gehalten, so wird die in Wärme umgesetzte Hochfrequenzenergie angenähert bestimmt durch das Produkt $\epsilon \cdot \text{tg } \delta$.

Das Verhalten des Holzes im hochfrequenten Wechselfeld sollte also durch die Meßwerte von ϵ und $\text{tg } \delta$ in Abhängigkeit z. B. der Rohwichte, der Feuchtigkeit, der Lage des Holzes im Feld usw. charakterisiert werden können. Wie oben erwähnt wurde, haben verschiedene Forscher versucht, auf diesem Wege der Frage nach den dielektrischen Eigenschaften des Holzes näherzukommen. Die Ergebnisse dieser zahlreichen Messungen lassen sich wie folgt zusammenfassen:

Es besteht eine lineare Beziehung zwischen ϵ und der Rohwichte bei gedarrtem Holz. Wird das Holz als Mischdielektrikum aufgefaßt, bestehend aus Holzsubstanz mit einem $\epsilon = 4,5$ und Luft, mit $\epsilon = 1$, so wird verständlich, daß ϵ von schwererem Holz näher bei 4,5 liegt als ϵ von leichterem Holz, dessen Luftanteil größer ist. Der Verlustwinkel $\text{tg } \delta$ wird nur sehr wenig von der Rohwichte beeinflusst. Bei einer Holzfeuchtigkeit, die zwischen 0 und etwa 15% zunimmt, verschärft sich die Beziehung zwischen $\epsilon, \text{tg } \delta$ und der Rohwichte.

Die Dielektrizitätskonstante ist durchweg am größten, wenn die Feldlinien mit der Faserrichtung des Holzes zusammenfallen. Der Unterschied des ϵ bei radialer oder tangentialer Feldlinienrichtung ist gering, doch ist das ϵ bei radialer Richtung der Feldlinien meist größer.

Auch der Verlustwinkel wird durch die Lage des Holzes im Feld stark und im selben Sinne wie die Dielektrizitätskonstante beeinflusst.

Der Einfluß der Holzfeuchtigkeit auf die Dielektrizitätskonstante und den Verlustwinkel wurde nur für niedrige Feuchtigkeiten eingehend untersucht. Die Beziehung zwischen ϵ und u scheint zwischen 0 und rd. 20% linear zu sein, während die Beziehung zwischen $\text{tg } \delta$ und u sehr verwickelt scheint, da sie stark von der Frequenz abhängig ist. Bei der hier interessierenden Frequenz von rd. 15 Mhz steigt die Kurve des $\text{tg } \delta$ bei einer Feuchtigkeit von 0 bis 5% an, von 5 bis etwa 15% flacht sie sich ab, um zwischen 15 bis 20% erneut anzusteigen. Bei höheren Feuchtigkeiten haben Skaar und Trapp Messungen durchgeführt, die aber für ein eindeutiges Ergebnis nicht genügen.

Der Einfluß der anatomischen Struktur des Holzes auf die Dielektrizitätskonstante und den Verlustwinkel wurde wiederum nur an gedarrtem Holz oder nur im untersten Feuchtigkeitsbereich untersucht. Verschiedene Forscher haben einen bei gleichen Versuchsbedingungen zwischen den einzelnen Holzarten auftretenden Unterschied nicht der Struktur, sondern der Rohwichte zugeschrieben.

Aus dieser Zusammenfassung der Ergebnisse der aus der Literatur bekannten Messungen von ϵ und $\text{tg } \delta$ zur Charakterisierung des Holzes im hochfrequenten Wechselfeld geht hervor,

daß das am einfachsten zu bestimmende Verhalten des gedarrten Holzes auch am eingehendsten geprüft wurde,

daß die bei Holzfeuchtigkeiten zwischen 0 bis 20% (meistens aber nur zwischen 0...12%) durchgeführten Messungen von ϵ und $\text{tg } \delta$ gewisse Beziehungen mit einiger Bestimmtheit bestätigen,

daß aber über ϵ und $\text{tg } \delta$ des Holzes bei Feuchtigkeiten über 20% praktisch nichts bekannt ist.

Der für die Praxis der Holztrocknung wichtigste Holzfeuchtigkeitsbereich liegt jedoch über $u = 12\%$. Leider steigt aber die Ungenauigkeit der Messung von ϵ und $\text{tg } \delta$ mit zunehmender Feuchtigkeit zusehends an. Selbst bei ver-

feinerten Versuchseinrichtungen wird der praktische Wert der Meßergebnisse durch die starke Streuung in Frage gestellt.

Diese Überlegung sowie die Berechnung der wahrscheinlichen größten Unsicherheit der Ergebnisse der Messung von ϵ und $\operatorname{tg} \delta$ ergaben, daß das Verhalten des feuchten Holzes im hochfrequenten Wechselfeld durch die Messung von ϵ und $\operatorname{tg} \delta$ nicht mit Sicherheit bestimmt werden kann. Es wurde daher ein Verfahren entwickelt, das es ermöglicht, durch die Messung der Temperatur des Holzes die Erwärmungsgeschwindigkeit der Proben während der Erwärmungsperiode, und durch die Messung der Gewichtsabnahme das Verhalten des Holzes während der Trocknungsperiode, ohne Messung von ϵ und $\operatorname{tg} \delta$, ausgehend von jeder beliebigen Anfangsfeuchtigkeit, charakterisieren zu können.

Die Erwärmungsgeschwindigkeit des Holzes als Maß für sein dielektrisches Verhalten

Das Verfahren zur Bewertung des Verhaltens des Holzes im hochfrequenten Wechselfeld während der Erwärmungsperiode durch die Berechnung der Erwärmungsgeschwindigkeit stützt sich auf folgende Annahmen:

Werden die durch die vereinfachte Temperaturmessung und durch die Wärmeverluste durch Strahlung und Leitung bedingten Ungenauigkeiten vernachlässigt, so läßt sich die je Zeiteinheit durch das Holz aufgenommene Wärmemenge oder die Erwärmungsgeschwindigkeit wie folgt berechnen:

1. Für darrtrockenes Holz:

$$E = \Delta t \cdot G_d \cdot c_m \text{ [cal/min]}, \quad (3)$$

wobei

E = Erwärmungsgeschwindigkeit in cal/min
 Δt = Temperaturunterschied je Zeiteinheit in °C
 G_d = Gewicht der gedarrten Holzprobe in g
 c_m = mittlere spez. Wärme des Holzes = 0,324 cal/g°

2. Für feuchtes Holz:

$$E = \Delta t \cdot G_d \cdot c_m + G_w \cdot c_w \text{ [cal/min]}, \quad (4)$$

wobei

G_d = Gewicht der gedarrten Holzprobe in g
 G_w = Gewicht des in der Probe enthaltenen Wassers in g
 c_w = spez. Wärme des Wassers = 1

Die aus mehreren Versuchen gemittelten Temperaturkurven in Bild 6 und 7 zeigen, daß sich die hier geprüften Holzarten im Darrzustand, bei identischen Versuchsbedingungen verschieden schnell erwärmen. Um bei der vereinfachten Berechnung der durch feuchte Proben aufgenommenen Wärmemenge das unterschiedliche Verhalten der einzelnen Holzarten zu berücksichtigen, wurde die aufgenommene Wärmemenge nicht mit Hilfe der von Kollmann [24] angeführten Formel zur Berechnung der mittl. spez. Wärme des feuchten Holzes

$$c_u = \frac{u + 0,324}{u + 1} \quad (5)$$

berechnet, sondern die durch das Wasser und die durch das Holz aufgenommenen Wärmemengen getrennt bestimmt. Die vom Wasser aufgenommenen cal wurden aus der Temperaturkurve der feuchten Probe (Holz + Wasser) berechnet, während die Berechnung der durch das Holz aufgenommenen cal auf die entsprechenden Kurven für gedarrtes Holz bezogen wurden.

Ein Zahlenbeispiel soll dies zeigen:

Ausgehend von der Temperaturkurve von Bild 6 für Buche mit einer Anfangsfeuchtigkeit von 19%, in Faserrichtung verlaufenden Feldlinien, einer Frequenz von 27 Mhz, einer Spannung von 1,75 kV, einer Holzdicke von 5 cm und einem

Elektrodenabstand von 6 cm, wurde die Erwärmungsgeschwindigkeit wie folgt berechnet:

Darrgewicht der Probe	80,3 g
mittlere Anfangsfeuchtigkeit	18,6 %
Gewicht des in dieser Probe enthaltenen Wassers	15,0 g
Berücksichtigter Zeitbereich	1. bis 4. min

Während dieser Zeitspanne ist der Verlauf der in Bild 6 dargestellten Temperaturkurve praktisch linear. Nach 4 min hatte die Verdampfung der Feuchtigkeit noch nicht begonnen. Die Hochfrequenzleistung P wurde nur zur Erwärmung des Holzes und der Feuchtigkeit aufgebraucht.

Temperatur der feuchten Probe nach der 1. Min. 34° C

Temperatur der feuchten Probe nach der 4. Min. 76° C

$$\Delta t = 42^\circ \text{C}$$

$$\Delta t / \text{min} = \frac{42}{3} = 14^\circ \text{C}$$

Durch die Holzfeuchtigkeit aufgenommene Wärmemenge:

$$E_{\text{Wasser}} = \frac{\Delta t}{\text{min}} \cdot G_w \cdot c_w = 14 \cdot 15 \cdot 1 = 210 \text{ cal/min}$$

Die bei gleichen Versuchsbedingungen erhaltene Kurve für gedarrte Buche ergibt eine Wärmefaufnahme je min und je Gramm Holz von 3,48 cal. Dies ergibt für die 80,3 g schwere Probe:

$$E_{\text{Holz}} = \frac{\text{cal}}{\text{g} \cdot \text{min}} \cdot G_d = 3,48 \cdot 80,3 = 280 \text{ cal/min}$$

Die Erwärmungsgeschwindigkeit dieser feuchten Buchenprobe ist somit in diesem bestimmten Fall gleich:

$$210 + 280 = 490 \text{ cal/min}$$

Wären die Dielektrizitätskonstante ϵ und der Verlustwinkel $\operatorname{tg} \delta$ dieser Proben bekannt, so könnten die aus den Temperaturkurven in cal/min berechneten Erwärmungsgeschwindigkeiten unmittelbar mit den durch P charakterisierten Wärmeleistungen, für die ϵ und $\operatorname{tg} \delta$ maßgebende Faktoren sind, verglichen werden.

$$P = k \cdot \epsilon \cdot \operatorname{tg} \delta \text{ (Watt)}$$

$$E = \Delta t \cdot G_d \cdot c_m + G_w \cdot 1 \text{ (cal/min)}$$

$$1 \text{ kWh} = 860 \text{ kcal}$$

Da die E -Werte nicht Absolut-, sondern Näherungswerte sind, werden im folgenden nicht die Ergebnisse der einzelnen Messungen, sondern vielmehr die mit Hilfe beider Verfahren erkannten Gesetzmäßigkeiten verglichen.

Messung der Erwärmungsgeschwindigkeit E von gedarrtem Holz und Gegenüberstellung dieser Ergebnisse mit Angaben der Literatur über ϵ und $\operatorname{tg} \delta$

Hochfrequenztechnisch gesehen ist das gedarrte Holz ein Mischdielektrikum, das sich zur Hauptsache aus Holzsubstanz und Luft zusammensetzt. Sind die dielektrischen Eigenschaften des gedarrten Holzes bekannt und treten bei identischer Prüfung von feuchtem Holz Unterschiede auf, so können diese dem Einfluß der Feuchtigkeit zugeschrieben werden. Das Verhalten des gedarrten Holzes wird gewissermaßen als Nullpunkt aufgefaßt, von dem aus die Feuchtigkeit des Holzes mitwirkt. Diese Vergleichsgrundlage erleichtert die theoretische Deutung des Einflusses der Feuchtigkeit auf das Verhalten des feuchten Holzes im hochfrequenten Wechselfeld.

Zudem ist das Verhalten des gedarrten Holzes am besten bekannt, was den Vergleich der sich auf die E - und P -Werte stützenden Ergebnisse erleichtert.

Einfluß der Faserrichtung (Feldlinien parallel und senkrecht zur Faserrichtung) auf die Erwärmungsgeschwindigkeit des gedarrten Holzes.

Bild 6 zeigt die gemittelten Temperaturkurven von Buche, Ahorn, Eiche und Tanne bei axialer und transversaler Richtung der Feldlinien

$$\left(t^\circ \perp = \frac{t^\circ \text{rad} + t^\circ \operatorname{tg}}{2} \right)$$

Bei allen vier Holzarten sind die Kurven am steilsten, wenn die Feldlinien mit der Faserrichtung zusammenfallen.

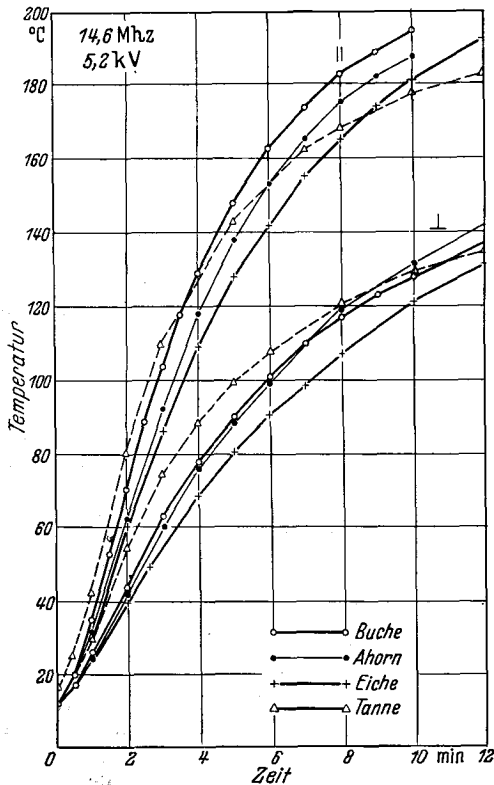


Bild 6. Temperaturkurven von gedarrten Proben von Buche, Ahorn, Eiche und Tanne. || Feldlinien verlaufen axial, ⊥ Feldlinien verlaufen transversal.

Ausgedrückt in cal/min ergeben sich die Werte von Tabelle 1.

Aus Tabelle 1 geht hervor, daß sich die gedarrten Proben von Buche, Ahorn, Eiche und Tanne bei axialer Richtung der Feldlinien 1,8 mal schneller erwärmen als bei transversaler Richtung der Feldlinien. Obschon die Wärmeaufnahme der einzelnen Holzarten verschieden ist, scheint das Verhältnis $E_{||}/E_{\perp}$ unabhängig von der Holzart zu sein.

Skaar hat dieses Verhältnis an 30 Holzarten bestimmt und fand, daß sich $\epsilon_{||}$ zu ϵ_{\perp} verhalten wie:

$$\gamma = 2,86 u = 29,87 \quad (6)$$

wobei γ = prozentualer Mehrwert von $\epsilon_{||}$ gegenüber ϵ_{\perp}
 u = Holzfeuchtigkeit ist. Setzt man

$$u = 0\%, \text{ so wird } \epsilon_{||} : \epsilon_{\perp} \approx 1,3 : 1$$

Kroener hat mit Buche, Eiche und Fichte ähnliche Werte bekommen, ebenso Nakato mit *Chamaecyparis* und *Quercus crispula*.

Für den Verlustwinkel $\text{tg } \delta$ hat Skaar das Verhältnis $\text{tg } \delta_{||} : \text{tg } \delta_{\perp} \approx 2 : 1$ gefunden. Dieses Verhältnis deckt sich mit den Messungen von Trapp an Fichte und Buche und von Kroener an Fichte, Buche und Eiche.

Es ist daraus zu sehen, daß sich die Ergebnisse der hier durchgeführten Versuche, ausgedrückt in cal/min gut mit den Angaben der Literatur decken.

Tabelle 1. Erwärmungsgeschwindigkeit in cal/min von Buche, Ahorn, Eiche und Tanne bei axialer und transversaler Richtung der Feldlinien. 14,6 Mhz; 5,2 kV erste bis vierte Minute (siehe Bild 6).

Holzart	Erwärmungsgeschw. in cal/min		$E_{ }/E_{\perp}$
	$E_{ }$	E_{\perp}	
Buche	1050	540	1,95
Ahorn	950	540	1,75
Eiche	750	405	1,85
Tanne	600	340	1,75

Mittelwert 1,82

Einfluß der Jahrringstellung (radiale und tangentiale Richtung der Feldlinien) auf die Erwärmungsgeschwindigkeit des gedarrten Holzes. In Bild 7 wurden wiederum die aus je 4 Versuchen gemittelten Temperaturkurven von Buche, Ahorn, Eiche und Tanne aufgetragen. Aus dieser Darstellung ist deutlich ersichtlich, daß ein Einfluß der Jahrringstellung bei allen vier Holzarten vorhanden ist, und daß dieser sich durchwegs gleichsinnig verhält (Temperaturkurve radial verläuft steiler als tangential). Vergleicht man Bild 7 mit Bild 6, so

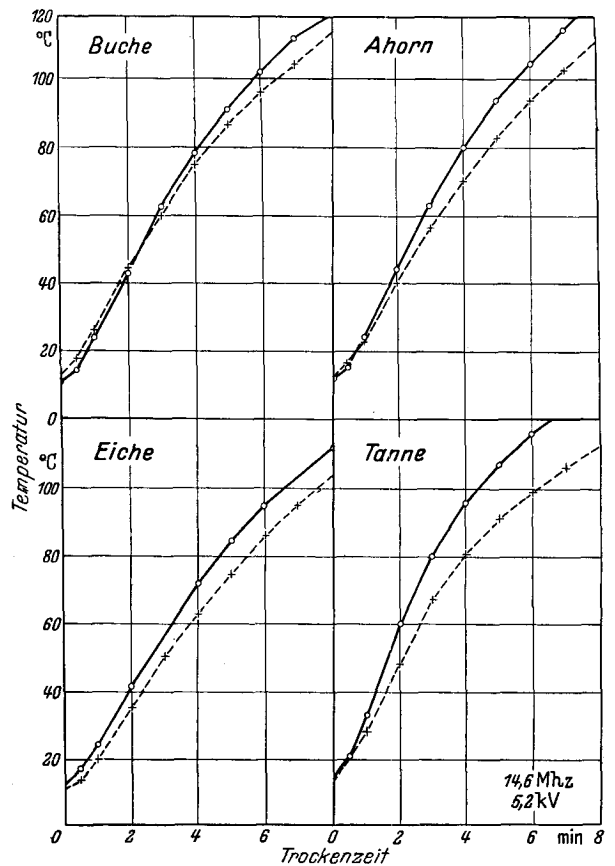


Bild 7. Temperaturkurven von gedarrten Proben von Buche, Ahorn, Eiche und Tanne. 0—0 Feldlinien verlaufen radial, +-----+ Feldlinien verlaufen tangential.

sieht man, daß die Jahrringstellung die Erwärmungsgeschwindigkeit des gedarrten Holzes viel weniger stark beeinflusst als die Faserrichtung. Zwischen den einzelnen Holzarten sind keine nennenswerten Unterschiede vorhanden. Die Buche zeigt die kleinste, die Tanne die größte Anisotropie, die Zahl der Versuche erlaubt es aber nicht, diese Beobachtung zu verallgemeinern (Tabelle 2).

Wenn die Feldlinien radial verlaufen, ist die Wärmeaufnahme des Holzes 1,1 bis 1,2 mal größer, als wenn die Feldlinien tangential verlaufen, der Unterschied ist also bei gedarrtem Holz gering.

Tabelle 2. Erwärmungsgeschwindigkeit in cal/min von Buche, Ahorn, Eiche und Tanne bei radialer und tangentialer Richtung der Feldlinien. 14,6 Mhz; 5,2 kV erste bis vierte Minute (siehe Bild 7).

Holzart	E_{rad}	E_{tg}	E_{rad}/E_{tg}
	Buche	570	
Ahorn	595	510	1,17
Eiche	425	380	1,12
Tanne	375	305	1,23

Skaar [44] hat bei seiner Untersuchung an 30 Holzarten die Jahrringstellung gar nicht berücksichtigt, in der Annahme,

sie hätte keinen Einfluß auf ϵ und $\text{tg } \delta$. Peterson [40] untersuchte das dielektrische Verhalten von Yellow birch und Douglas fir und kam auch zum Schluß, die Jahrringstellung sei bedeutungslos. Hearmon [15] kam nach der Messung von ϵ und $\text{tg } \delta$ an 12 Holzarten zum Schluß, daß $\text{tg } \delta$ stets höher sei, wenn die Feldlinien radial verlaufen, ϵ sei es meistens, aber nicht immer.

Der Arbeit von Kroener [26] sind die Werte in Tabelle 3 entnommen:

Tabelle 3. Werte für ϵ und $\text{tg } \delta$ von darrtrockenem Holz nach Kroener [26].

Holzart	ϵ_{rad}	ϵ_{tg}	$\text{tg } \delta_{\text{rad}}$	$\text{tg } \delta_{\text{tg}}$
Buche	2,02	1,82	300	290
Eiche	2,05	2,00	320	280
Fichte	1,68	1,74	300	330

Nakato [36] hat an Hinoki und Mizunara ähnliche Verhältnisse gefunden wie Tabelle 4 zeigt.

Zusammenfassend kann man sagen, daß bei gedarrtem Holz die Jahrringstellung einen geringen Einfluß auf die Erwärmungsgeschwindigkeit ausübt. Das Holz erwärmt sich aber, mit wenigen Ausnahmen, etwas schneller bei radialer als bei tangentialer Richtung der Feldlinien.

Der Einfluß der Rohwichte auf die Erwärmungsgeschwindigkeit des gedarrten Holzes. Die hier neu ermittelten Versuchswerte genügen nicht, um eine Beziehung zwischen der Rohwichte und der Erwärmungsgeschwindigkeit des Holzes festzustellen. Peterson [40] hat diese Beziehung durch die Messung von ϵ und $\text{tg } \delta$ an

Tabelle 4. Werte für ϵ und $\text{tg } \delta$ von darrtrockenem Holz nach Nakato [36].

Holzart	ϵ_{rad}	ϵ_{tg}	$r_0 \text{ g/cm}^3$
<i>Chamaecyparis obtusa</i>	1,6	1,55	0,40
<i>Quercus crispula</i>	2,25	2,05	0,72

10 kanadischen Holzarten untersucht. Er kam dabei zu folgender Schlußfolgerung: von $r_0 \approx 0,30$ bis $r_0 \approx 0,80 \text{ g/cm}^3$ soll $\text{tg } \delta$ nur sehr wenig ansteigen; die Beziehung zwischen ϵ_{\perp} und r_0 hat er durch eine Gerade ausgedrückt (auf g/cm^3 umgerechnet):

$$\epsilon_{\perp} = 1,93 r_0 + 0,956 \quad (7)$$

Wenn man den Verlustwinkel $\text{tg } \delta_{\perp}$, der angeblich durch die Rohwichte r_0 nur wenig beeinflusst wird, vernachlässigt und die Werte von Tabelle 1 (E_{\perp}) vergleicht mit den nach der Formel von Peterson berechneten Dielektrizitätskonstanten ϵ_{\perp} , so ergibt sich Tabelle 5:

Tabelle 5. Vergleich von E_{\perp} mit den nach Peterson [40] für verschiedene r_0 berechneten ϵ_{\perp} .

Holzart	mittlere r_0	$E_{\perp} \text{ cal/min}$		ϵ_{\perp}	
		Werte aus Tabelle 1	E_{\perp} von Tanne = 1	Werte nach Peterson	ϵ_{\perp} von Tanne = 1
Buche	0,73	540	1,6	2,4	1,4
Ahorn					
Eiche	0,60	405	1,2	2,1	1,2
Tanne	0,40	340	1,0	1,7	1,0

Diese Tabelle zeigt wiederum eine Übereinstimmung zwischen E_{\perp} und ϵ_{\perp} , die die Brauchbarkeit der Größe E in cal/min als Vergleichswert bekräftigt. Zusammenfassend kann man sagen, daß das Verhalten des gedarrten Holzes im hochfrequenten Wechselfeld vor allem von der Faserrichtung und Darr-Rohwichte beeinflusst wird. Ein Einfluß der Struktur des Holzes (Laub- oder Nadelholz,

ring- oder zerstreutporig) wurde nicht erkannt. Auch die Jahrringstellung spielt nur eine untergeordnete Rolle.

Die Auswertung der Temperaturkurven durch die Berechnung des Wertes E in cal/min als Ausdruck der Erwärmungsgeschwindigkeit ermöglicht durchaus den Vergleich der neuen Versuchsergebnisse mit den Angaben der Literatur über ϵ und $\text{tg } \delta$.

Feuchtes Holz als Dielektrikum

Einfluß der Orientierung des Holzes im hochfrequenten Wechselfeld auf sein dielektrisches Verhalten. In Bild 8 sind die Temperaturkurven von Buchenproben verschiedener Anfangsfeuchtigkeit bei verschiedener Orientierung im Feld aufgetragen. Vor allem geht aus dieser Darstellung hervor, daß die Temperaturkurven mit zunehmender Anfangsfeuchtigkeit der Proben steiler werden. Man sieht aber auch, daß oberhalb $u = 20\%$ Unstetigkeiten auftreten; bei axialer und radialer Richtung der Feldlinien fallen die Kurven der Proben mit $u = 33\%$ und $u = 47\%$ zusammen; die Kurven der Proben mit $u = 19\%$ und $u = 33\%$ liegen bei radialer Feldlinienrichtung viel weiter auseinander als bei tangentialer Feldlinienrichtung; ferner sind die Kurven der Proben mit

Tabelle 6. Anisotropie-Koeffizient der Erwärmungsgeschwindigkeit bei axialer und transversaler Feldlinienrichtung (Buche, Ahorn, Tanne:

1,75 kV; 27,4 Mhz; Eiche 1,75 kV; 14,6 Mhz).

$u\%$	Buche	Ahorn	Eiche	Tanne
rd. 15%	1,85	1,65	1,90	1,75
rd. 20%	1,92	—	2,10	1,75

Tabelle 7. Anisotropie-Koeffizient der Erwärmungsgeschwindigkeit bei radialer und bei tangentialer Richtung der Feldlinien.

$u\%$	Buche	Ahorn	Eiche	Tanne
rd. 15%	1,1	1,1	1,4	1,1
rd. 20%	1,1	—	2,0	1,1

$u = 34\%$ und $u = 47\%$ bei radialer Feldlinienrichtung steiler, als wenn die Feldlinien in Faserrichtung verlaufen. Die entsprechenden Temperaturkurven von Ahorn, Eiche und Tanne zeigen einen ganz ähnlichen Verlauf.

Die Werte der Tabelle 6 zeigen, daß der Anisotropie-Koeffizient, der bei gedarrtem Holz im Mittel 1,8 betrug, bis zu einer Holzfeuchtigkeit von rd. 20% unverändert bleibt, trotzdem sich die feuchten Proben schneller erwärmen. Zudem zeigen die Werte der Tabelle 7, daß auch das Verhältnis der Erwärmungsgeschwindigkeit bei radialer und bei tangentialer Richtung der Feldlinien für Buche, Ahorn und Tanne, wie bei gedarrtem Holz, 1,1 beträgt. (Auf das unterschiedliche Verhalten der Eiche wird später eingegangen.)

Daß sich das Verhalten des Holzes oberhalb der „Grenzfeuchtigkeit“ von rd. 20% vollständig ändert, ist aus Bild 9 zu ersehen. Auf der Ordinate sind die Werte der Erwärmungsgeschwindigkeit in cal/min und auf der Abszisse die jeweilige Feuchtigkeit der entsprechenden Proben in % aufgetragen. Die Änderung der E-Werte in Funktion der Holzfeuchtigkeit und der Orientierung der Proben im Feld geht aus dieser Darstellung besonders deutlich hervor.

Die in Bild 8 erkannte Unstetigkeit der Temperaturkurven enthüllt sich als eine Gesetzmäßigkeit, wonach oberhalb $u \sim 20\%$ das Holz mit zunehmender Feuchtigkeit plötzlich je Zeiteinheit bedeutend mehr Wärme aufnimmt,

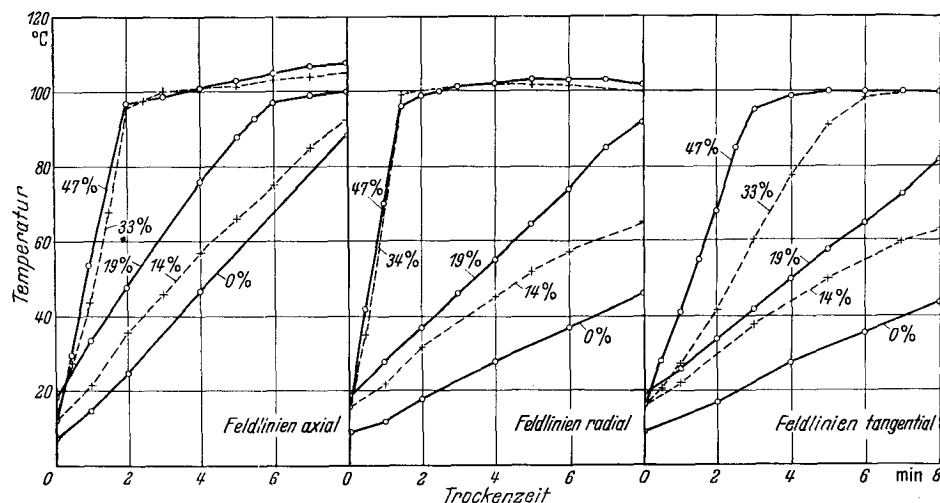


Bild 8. Temperaturkurven von Buchenproben mit verschiedener Anfangsfeuchtigkeit (axiale, radiale und tangentiale Feldlinienrichtung, 27 Mhz, 1,75 kV).

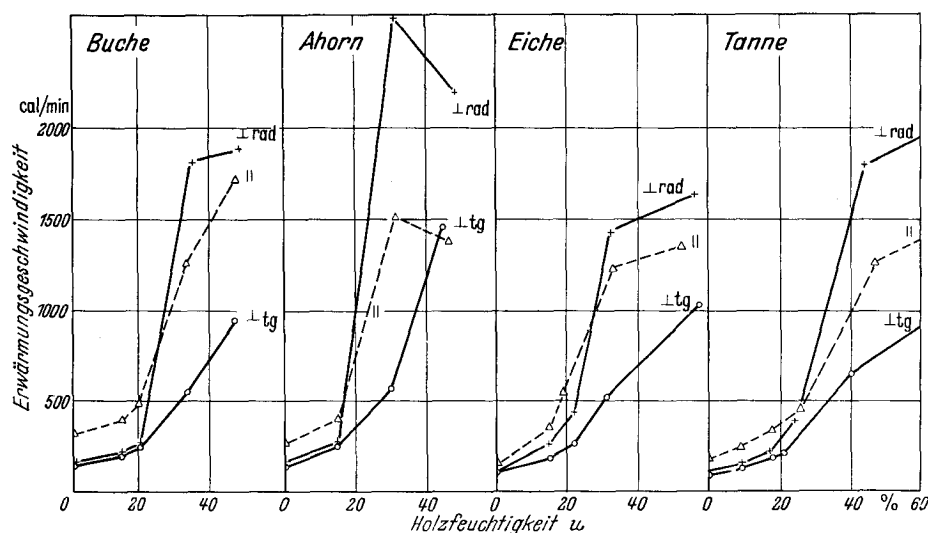


Bild 9. Beziehung zwischen der Erwärmungsgeschwindigkeit, der Feuchtigkeit und der Richtung der Feldlinien. (Die Werte für Buche, Ahorn und Tanne wurden bei 27 Mhz und 1,75 kV ermittelt, die Werte für Eiche bei 14 Mhz und 1,75 kV, sie wurden aber auf 27 Mhz umgerechnet.)

vor allem aber bei radialer Feldlinienrichtung. Auffallend ist auch der Unterschied zwischen der sprunghaften Zunahme der Erwärmungsgeschwindigkeiten der Proben bei radialer Feldlinienrichtung und der stetigen, aber viel geringeren Zunahme der Erwärmungsgeschwindigkeit bei tangentialer Richtung der Feldlinien.

Es soll versucht werden, diese Erscheinungen theoretisch zu deuten. Die Dielektrizitätskonstante ϵ und der Verlustwinkel $\text{tg } \delta$ von Wasser sind viel größer als ϵ und $\text{tg } \delta$ von trockenem Holz. Das Mischdielektrikum Holz + Wasser + Luft muß sich daher mit zunehmendem Wassergehalt schneller erwärmen. Unterhalb $u \sim 20\%$ soll die Beziehung zwischen ϵ und u angenähert linear sein. Zwischen $u \sim 20\%$ und der Fasersättigung fand Skaar durch Messungen an Buckeye (*Aesculus sp.*) eine Exponentialkurve und bei noch höheren Feuchtigkeiten wieder eine lineare Beziehung. In dem hier interessierenden Frequenzbereich von 10^6 bis 10^7 Mhz soll auch die Beziehung zwischen $\text{tg } \delta$ und der Feuchtigkeit bis zu $u \sim 15\%$ linear sein.

Der Arbeit von Trapp [47] sind die Werte in Tabelle 8 entnommen, aus denen der stetige Anstieg der Werte für ϵ und $\text{tg } \delta$ bis rd. 20% deutlich hervorgeht.

Diese spärlichen Angaben über das dielektrische Verhalten des feuchten Holzes enthalten wertvolle Hinweise, genügen aber nicht, um eine allgemein gültige Theorie aufzustellen.

Man darf wohl das in Bild 9 gefundene Verhalten des feuchten Holzes ($u = 20\%$) der Wirkung der elektrischen Leitfähigkeit des Holzes und der durch die Markstrahlen hervorgerufenen Feldkonzentration zuschreiben. Das trockene Holz wirkt als Nichtleiter. Bis zu einer Feuchtigkeit von rd. 10...15% spielt die elektrische Leitfähigkeit im HF-Feld eine untergeordnete Rolle. Zwischen rd. 15% und dem Fasersättigungsbereich nimmt aber die elektrische Leitfähigkeit asymptotisch zu [34, 37], so daß ihr Einfluß auf die Wärmeaufnahme des Holzes plötzlich denjenigen von ϵ und $\text{tg } \delta$ überwiegt. Nach Kollmann [24] vermehrt sich die elektrische Leitfähigkeit des Holzes von 0% bis zum Fasersättigungsbereich annähernd einmillionenfach, bei höherer Feuchtigkeit bis zur völligen Sättigung aber nur noch um das Fünffache. Zudem ist sie in Richtung der chemischen Hauptvalenzen, also in Längsrichtung der Fasern, doppelt so groß wie quer zu den Fasern.

Den Einfluß der anatomischen Struktur des Holzes auf die elektrische Leitfähigkeit hat Tsuneo [49] mittelbar durch zahlreiche Messungen des elektrischen Widerstandes von Todo fir (*Abies sp.*) bewiesen. Um bessere Vergleichswerte zu erhalten, wurden die

Werte von Tsuneo umgerechnet, indem der spez. elektrische Widerstand von gesättigter Todo fir in axialer Richtung der $1,6 \cdot 10^4 \Omega \text{mm}^2/\text{m}$ beträgt, gleich 1 gesetzt wurde (Tabelle 9).

Man ersieht aus Tabelle 9, daß z. B. bei einer Feuchtigkeit von 27,5% der spez. elektrische Widerstand der Todo fir in tangentialer Richtung doppelt so groß ist wie der spez. elektrische Widerstand in radialer Richtung. Die radiale Leitfähigkeit ist also zweimal größer als die tangentiale Leitfähigkeit. Da die Leitfähigkeit in der Längsrichtung der Zellen am größten ist, können bei der radialen Richtung die Markstrahlen als bevorzugte Leiter aufgefaßt werden.

Tabelle 8. ϵ und $\text{tg } \delta$ von Fichte (radial) bei verschiedener Feuchtigkeit (nach Trapp).

$u\%$	10 ⁷ Mhz radiale Feldlinienrichtung		
	ϵ (100°C)	$\text{tg } \delta$ (40°C)	$\text{tg } \delta$ (100°C)
0	2,0	0,028	0,022
3	2,0	0,038	0,028
6,5	2,3	0,045	0,028
9	2,6	0,055	0,033
12,5	3,4	0,050	0,057
20	4,0	0,095	
65	11,0	0,150	
96	12,5	0,158	

Tabelle 9. Spez. elektrischer Widerstand von Tode fir (*Abies sp.*) nach Tsuneo (axial, gesättigt: $1,6 \cdot 10^4 \Omega \text{ mm}^2/\text{m} = 1$ gesetzt).

Feuchtigkeit des Holzes	axial	radial	tangential
7,6%	3 340 000	11 200 000	16 100 000
14,5%	12 600	23 800	31 600
17,0%	1 655	4 080	4 370
25,0%	52	184	200
27,5%	32	59	122
gesättigt	1	16	14

Nach Trendelenburg und Mayer-Wegelin [48] beträgt der prozentuale Volumenanteil des Markstrahlparenchyms bei der Tanne 6 bis 10%, bei der Buche rd. 27% und bei der Eiche rd. 29%. Zudem scheint es nicht ausgeschlossen zu sein, daß die Gerbstoffe der Eiche, die im Markstrahlparenchym eingelagert sind, die elektrolytische Leitfähigkeit der Markstrahlen erhöhen.

Einfluß der Gefäßverteilung in ringporigen und zerstreutporigen Holzarten auf das dielektrische Verhalten. Die Werte der Tabelle 7 zeigen ein unverändertes Verhältnis der Erwärmungsgeschwindigkeit bei radialer und tangentialer Feldlinienrichtung für Buchen-

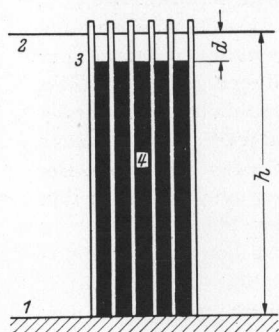


Bild 10. Modell für Trogversuche. 1 Grundplatte, 2 Wasser Spiegel, 3 Metallstäbe, 4 Zylinder aus Isoliermaterial, 5 Anordnung der Zylinder beim Modell, der zerstreutporigen Holzarten, 6 Anordnung der Zylinder beim Modell der ringporigen Holzarten.

und Ahornholz von $u = 0$ bis $\sim 20\%$, während es bei der Eiche von 1,1 bei 0%, über 1,4 bei 15% auf 2,0 bei 20% steigt. Das heißt also, daß sich eine Eichenprobe bei einer Feuchtigkeit von rd. 20% bei radialer Richtung der Feldlinien doppelt so schnell erwärmt wie bei tangentialer Richtung der Feldlinien. Dieses unterschiedliche Verhalten der Eiche, verglichen mit Buche und Ahorn, wurde der Verteilung der Gefäße zugeschrieben. Eiche ist eine ringporige Holzart, während Buche und Ahorn zerstreutporig sind. An schematischen Modellen wurden Trogversuche durchgeführt, die den Einfluß der Gefäßverteilung auf die Erwärmungsgeschwindigkeit des Holzes eindeutig erkennen lassen.

Um bei den Trogversuchen ein klares Bild zu erhalten,

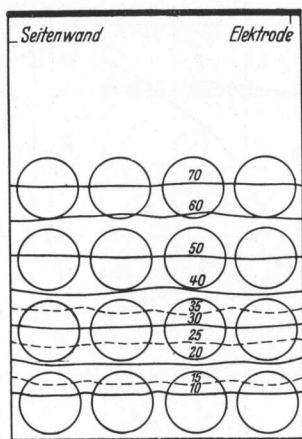


Bild 12. Verlauf der Äquipotentiallinien beim Modell der zerstreutporigen Holzarten.

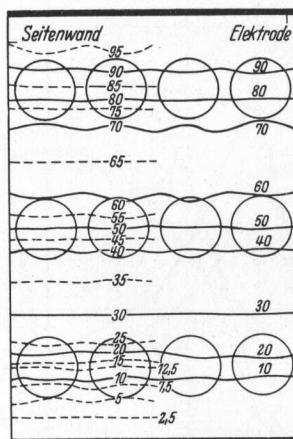


Bild 13. Verlauf der Äquipotentiallinien beim Modell der ringporigen Holzarten \perp rad.

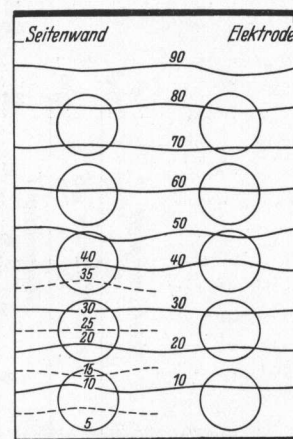


Bild 14. Verlauf der Äquipotentiallinien beim Modell der ringporigen Holzarten \perp tg.

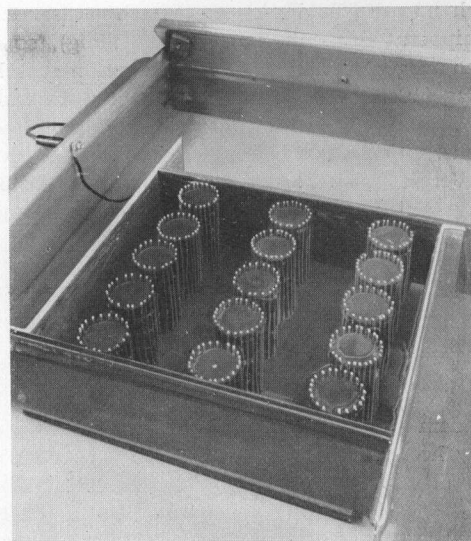


Bild 11. Trogversuch; Modell einer ringporigen Holzart.

wurden die Frühholzgefäße der Eiche und die Tracheen von Buche und Ahorn durch nicht leitende Zylinder (Haefelit) und sämtliche, diese Hohlräume umgebenden Gewebe (Faserzellen, Parenchymzellen) als eine feste Grundmasse (im Modell = Wasser) dargestellt (Bild 10, 11).

Bild 12 zeigt die Äquipotentiallinien beim Modell der zerstreutporigen Holzarten (Buche, Ahorn). Sie sind regelmäßig und in gleichen Abständen verteilt, das Feld ist homogen. Wird dieses symmetrische Modell um 90° gedreht, so bleibt die Verteilung der Äquipotentiallinien dieselbe. Das würde heißen, daß bei den zerstreutporigen Holzarten bei Feuchtigkeit unter 20%, bei denen die elektrische Leitfähigkeit noch nicht mitwirkt, die Feldstärke sowohl bei radialer als bei tangentialer Richtung der Feldlinien in der ganzen Probe gleich groß ist. In Wirklichkeit verursachen die Markstrahlen (die im Modell vernachlässigt wurden) bei radialer Feldlinienrichtung eine leichte Feldkonzentration ($E_{\text{rad}} : E_{\text{tg}} \approx 1,1 : 1$).

Bild 13 zeigt die Verteilung der Äquipotentiallinien beim Modell der ringporigen Holzarten bei radialem Verlauf der Feldlinien und Bild 14 bei tangenialem Verlauf der Feldlinien. In Bild 14 ist das Feld, wie beim Modell der zerstreutporigen Holzarten homogen. Bei radial verlaufenden Feldlinien hingegen konzentrieren sich die Äquipotentiallinien auf die Frühholzgefäßreihen. Denkt

man sich nun die Feldlinien eingezeichnet (sie schneiden die Äquipotentiallinien immer rechtwinklig), so erkennt man eine ausgesprochene Feldkonzentration zwischen den Frühholzgefäßen. Diese Feldkonzentration, die eine intensive Erwärmung mit sich bringt, wird in diesem Fall durch die Markstrahlen ganz besonders verstärkt. Dies erklärt die im Vergleich zu Buche und Ahorn viel größere Erwärmungs-Anisotropie des Eichenholzes in radialer und tangentialer Richtung ($E_{\text{rad}} : E_{\text{tg}} = 1,4(2,0) : 1$).

Das Verhalten des Holzes im hochfrequenten Wechselfeld während der Trocknungsperiode

Ermittlung des Trocknungsverlaufes einiger Holzarten

Nachdem die Gesetzmäßigkeiten des Verhaltens des Holzes während der Erwärmungsperiode erkannt worden waren, stellte sich die Frage, ob diese Gesetzmäßigkeiten auch während der Trocknungsperiode gültig bleiben. Es zeigte sich bald, daß zur Beantwortung dieser Frage zwischen Holzarten mit kleinem und mit ausgeprägtem inneren Diffusionswiderstand unterschieden werden muß. Aus diesem Grunde wurden bei der Untersuchung des Trocknungsverlaufes der einzelnen Proben nicht nur die Temperatur und die Gewichtsabnahme des Holzes, sondern auch der innere Dampfdruck gemessen. Die an Hand der Temperatur-, Gewichts- und Druckkurven erkannten Merkmale des Verhaltens des Holzes während der Trocknungsperiode sollen besprochen werden.

(Bei abnehmender Feuchtigkeit des Holzes und bei Vergrößerung des Luftabstandes d_L durch das Schwinden des Holzes fällt die Spannung. Diese störende Wirkung wurde bei allen Trocknungsversuchen durch Konstanthaltung der Spannung vermindert.)

Trocknungsverlauf in Holzarten mit kleinem inneren Diffusionswiderstand. In Bild 15 sind als typisches Beispiel die Temperaturkurven, die Gewichtsverlustkurven sowie die aus letzteren berechneten Kurven der Holzfeuchtigkeit für Buchenproben mit verschiedener Anfangsfeuchtigkeit und verschiedener Orientierung im Feld dargestellt. Die Temperaturkurven sind von Bild 8 her bereits bekannt. Aus ihrem Verlauf wurden die Einflüsse verschiedener Faktoren auf die Erwärmungsgeschwindigkeit des Buchenholzes während der Erwärmungsperiode abgeleitet. Vor allem wurde damals das unterschiedliche Verhalten der einzelnen Proben je nach ihrer Anfangsfeuchtig-

keit und ihrer Orientierung im Feld festgestellt. Bei genauerer Betrachtung von Bild 15 erkennt man eine deutliche Abhängigkeit des Verlaufes der Gewichtsverlustkurven von der Steilheit der entsprechenden Temperaturkurven in dem Sinne, daß das feuchtere Holz sich nicht nur schneller erwärmt als das weniger feuchte Holz, sondern daß es auch nach Erreichen der Verdampfungstemperatur von rd. 100°C mehr Wärme aufnimmt. Dies hat zur Folge, daß trotz verschiedener Anfangsfeuchtigkeit die einzelnen Proben nach wenigen Minuten dieselbe mittlere Feuchtigkeit erreichen; die in Bild 15 dargestellten Feuchtigkeitskurven nähern sich im Verlauf der Trocknung immer mehr. Um den Vergleich zwischen dem Verhalten des Holzes während der Erwärmungsperiode und der Trocknungsperiode weiter auszudehnen, wurden in Bild 16 die jeweils in der 1., 2., oder 3. usw. Minute verdampften Feuchtigkeitsmengen in Prozent der zu Beginn des Versuches in der Probe enthaltenen Wassermenge (in g) über der Zeit aufgetragen. Bild 16 zeigt den prozentualen Gewichtsverlust der Buche bei drei Anfangsfeuchtigkeiten und drei Feldlinienrichtungen.

Bild 9 ließ erkennen, daß das Holz mit einer Anfangsfeuchtigkeit von 14% während der Erwärmungsperiode nur wenige Kalorien aufgenommen hatte und daß die Erwärmungsgeschwindigkeit bei axialer Feldlinienrichtung doppelt so groß war wie bei transversaler Feldlinienrichtung. Bei 33% Anfangsfeuchtigkeit hingegen war die Wärmeaufnahme bedeutend und die Erwärmungsgeschwindigkeit bei radialer Feldlinienrichtung überzog sogar diejenige der axialen Feldlinienrichtung. Bild 16 zeigt ganz ähnliche Verhältnisse. Bei 14% ist der prozentuale Gewichtsverlust je min sehr gering, bei axialer Feldlinienrichtung aber am größten. Bei 33% hingegen ist der prozentuale Gewichtsverlust in den ersten 3 min bei axialer und radialer Feldlinienrichtung sehr groß, wobei der Gewichtsverlust bei radialer Feldlinienrichtung entsprechend den in Bild 9 festgestellten Verhältnissen in den ersten zwei Minuten größer ist als der Gewichtsverlust bei axialer Feldlinienrichtung. Bei 47% ist wiederum, den Verhältnissen der Erwärmungsperiode entsprechend, der Gewichtsverlust groß, doch der Unterschied zwischen axial und radial geringer. Der Gewichtsverlust bei tangentialer Feldlinienrichtung ist gegenüber 33% wesentlich angestiegen. Auch bei Ahorn (Bild 17) ist die Übereinstimmung der Wärmeaufnahme während der Erwärmungs- und der Trocknungsperiode deutlich zu

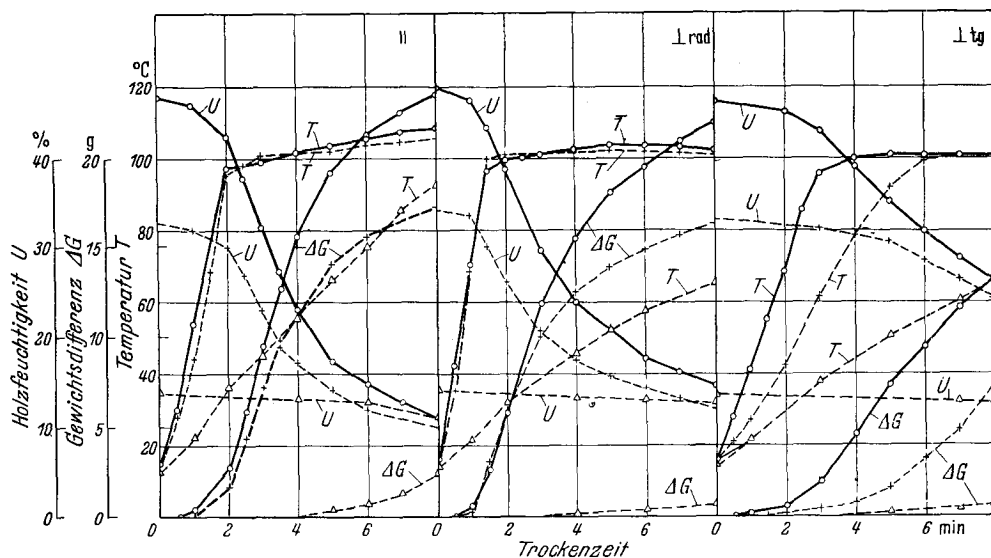


Bild 15. Buche (27 Mhz, 1,75 kV) Temperatur-, Feuchtigkeits- und Gewichtskurven.

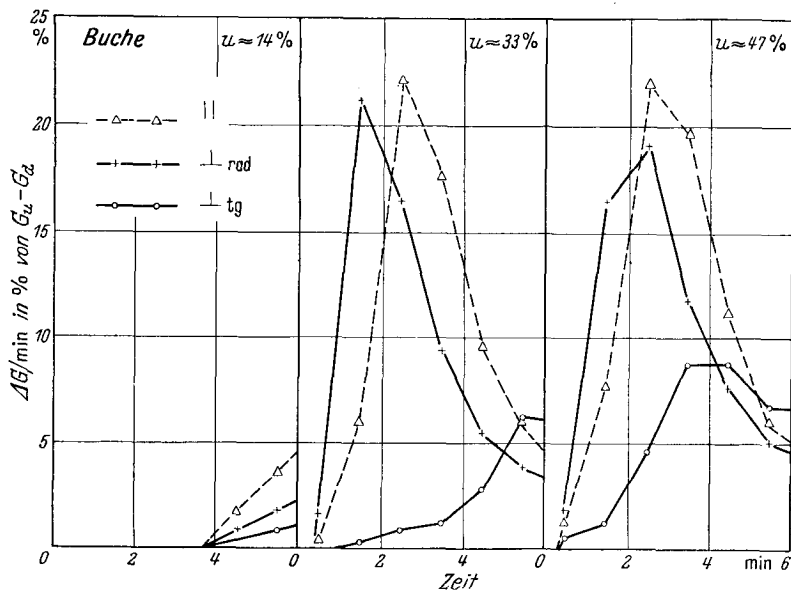


Bild 16. Gewichtsverlust je Minute in % des Gewichtes des zu Beginn der Trocknung in der Probe enthaltenen Wassers, Buche, 27 Mhz, 1,75 kV.

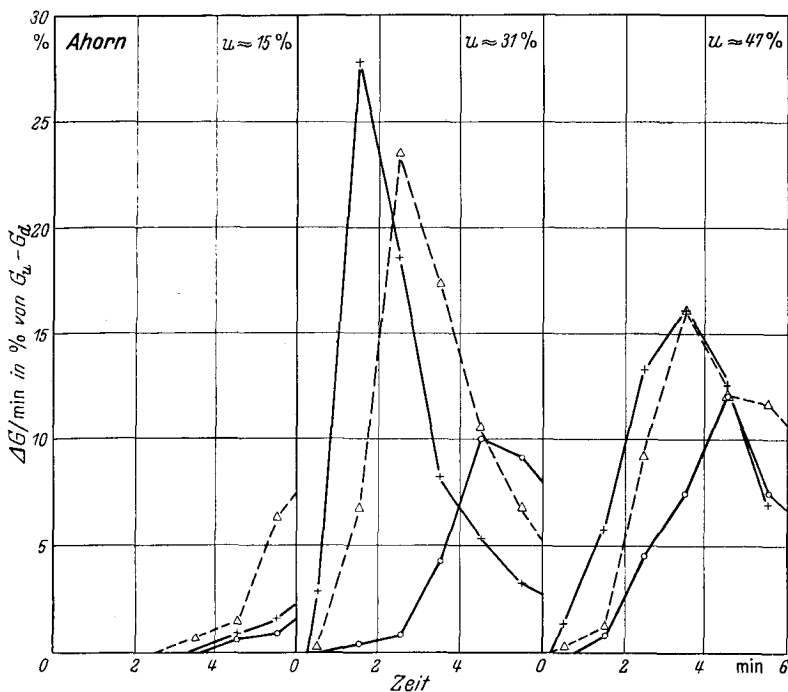


Bild 17. Gewichtsverlust je Minute in % des Gewichtes des zu Beginn der Trocknung in der Probe enthaltenen Wassers, Ahorn, 27 Mhz, 1,75 kV.

erkennen (größte Wärmeaufnahme bei rd. 31%, geringere Wärmeaufnahme bei 47%). Die Frage, weshalb die Ahornproben bei Radial- und in Faserrichtung verlaufenden Feldlinien im Fasersättigungsbereich mehr Wärme aufnehmen als bei höherer Feuchtigkeit, steht noch offen.

Trocknungsverlauf in Holzarten mit ausgeprägtem innerem Diffusionswiderstand. Beim Vergleich der Gewichtsverlustkurven einer Buchenprobe und einer Eichenprobe von prismatischer Form (Bild 18) fällt der unregelmäßige Verlauf der Kurve für Eiche auf. Es scheint, als ob die Trocknung ruckartig erfolgt sei. Bei den bisher untersuchten, würfelförmigen Proben verlief die Trocknung viel regelmäßiger, setzte aber später ein als z. B. bei den entsprechenden Buchen- und Ahornproben. Diese Verspätung, die den einwandfreien Vergleich des Verhaltens des Eichenholzes während der Erwärmungs- und der Trocknungsperiode unmöglich machte, wurde dem inneren

Diffusionswiderstand dieser Holzart zugeschrieben. Danach hätte die während der Trocknungsperiode verdampfende Holzfeuchtigkeit einen Druck zu überwinden, um überhaupt an die Oberfläche zu gelangen. Ist dieser Widerstand lokal überwunden, so strömt Dampf heraus. Da aber fortwährend neuer Dampf gebildet wird, steigt der Druck sofort wieder an. Dies erklärt den stufenartigen Verlauf der Gleichgewichtskurve. Die Gültigkeit dieser Behauptung wurde durch die Messung des inneren Dampfdruckes gezeigt.

Ermittlung des Dampfdruckes in einigen Holzarten während der Hochfrequenz-Trocknung

Bild 19 zeigt den Verlauf der Temperatur, der Gewichtsverlustkurve und der Feuchtigkeit je einer Eichen-Splintprobe und einer Eichen-Kernprobe. Der Unterschied zwischen der regelmäßigen, nach der 10. Minute geradlinig verlaufenden Gewichtsverlustkurve der Splintprobe und der unregelmäßigen Gewichtsverlustkurve der Kernprobe ist besonders auffallend. Bei der Splintprobe, die zudem noch schärfer getrocknet wurde als die Kernprobe, wurde kein Innendruck gemessen. Bei der Kernprobe hingegen stieg die Druckkurve von der 16. Minute an asymptotisch. Nach 22 min entwichen 20 Gramm Wasserdampf und der Druck fiel von 2,25 atü auf 1,15 atü. Der ganz bedeutend größere innere Diffusionswiderstand des Eichenkernholzes gegenüber dem Eichensplintholz kann durch die Anreicherung von Thyllen in den Frühholzgefäßen des Kernholzes erklärt werden. Sind die weitlumigen Frühholzgefäße mit Thyllen verstopft, was im Splint seltener vorkommt, so kann der Wasserdampf nicht mehr ausströmen, der Dampfdruck steigt, bis der innere Diffusionswiderstand überwunden ist. In vielen Fällen entstehen bei zu scharfer Trocknung Innenrisse. Die hier durchgeführten, vereinfachten Messungen genügen leider nicht, um die Beziehung zwischen dem inneren Diffusionswiderstand, dem Dampfdruck und der Festigkeit des Holzes zahlenmäßig zu erfassen. Es sei aber auf die große Ähnlichkeit der Druckkurve der Eichenkernprobe von Bild 19 mit einer klassischen Last-Verformungskurve mit Kriechgrenze, Erschöpfung und Bruch hingewiesen.

Einen weiteren Beweis dafür, daß die Thyllen für die Erhöhung des inneren Diffusionswiderstandes verantwortlich sind, erbringen die in Bild 20 gezeigten Messungen an Buchenproben. Der Verlauf der Feuchtigkeits- und Gewichtsverlustkurven der thyllenarmen, mit B bezeichneten Buchenprobe ist regelmäßig und entspricht den bekannten Kurven anderer Buchenproben. Die Kurven der im Rotkern desselben Brettes entnommenen Probe haben denselben Charakter wie die Kurven der thyllenreichen Eichen-Kernprobe (Bild 19). Die bis zum Zeitpunkt der Zerstörung der Probe asymptotisch ansteigende Druckkurve beweist den großen inneren Diffusionswiderstand des thyllenreichen, rotkernigen Buchenholzes.

Auch bei der Tanne wurde ein Innendruck gemessen. Bild 21 zeigt die für die Tanne typischen Kurven. Die durchgeführten Messungen beweisen, daß der innere Diffusionswiderstand der Tanne viel geringer ist als derjenige

des Eichenkernholzes oder des Buchenrotkernes. Da die Tanne geschlossene Tracheiden besitzt, muß der Dampf von Zellumen zu Zellumen durch die Hoftüpfel, die einfachen Tüpfel und die Zellwände selbst, bis zur Holzober-

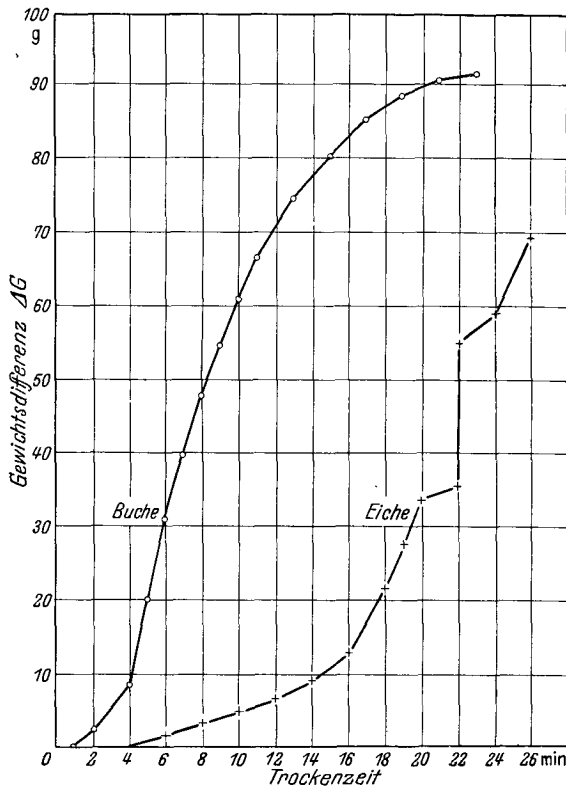


Bild 18. Gewichtungsverlustkurven einer Buchenprobe (ohne Rotkern) und einer Eichenprobe. Buche 5 × 5 × 15 cm, 14 Mhz, 1,75 kV, $u_x = 65\%$. Eiche 5 × 5 × 15 cm, 14 Mhz, 1,2 kV, $u_x = 90\%$.

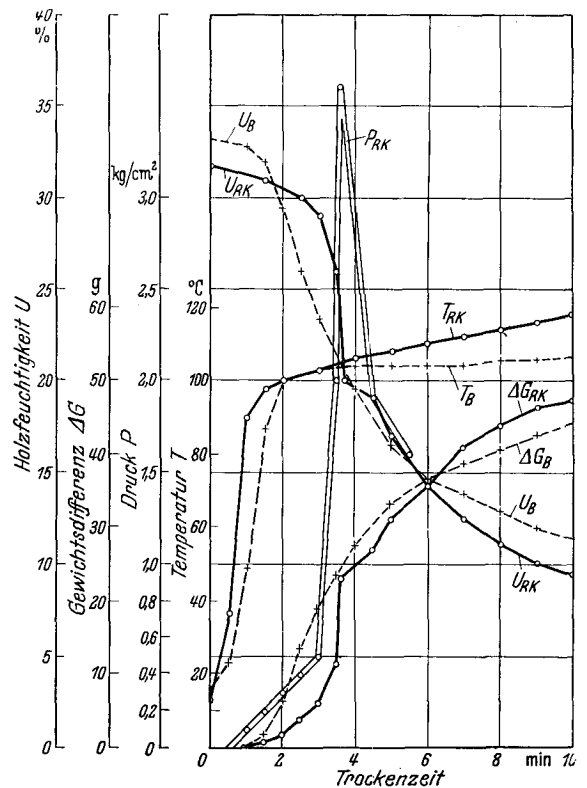


Bild 20. Trocknungsversuche an Buchenprismen (5 × 5 × 15 cm), radiale Feldlinienrichtung. + - - - - + (B) weiße Buchenprobe, 0 - - - - 0 (RK) Buchen-Rotkernprobe, 27 Mhz, 1,75 kV.

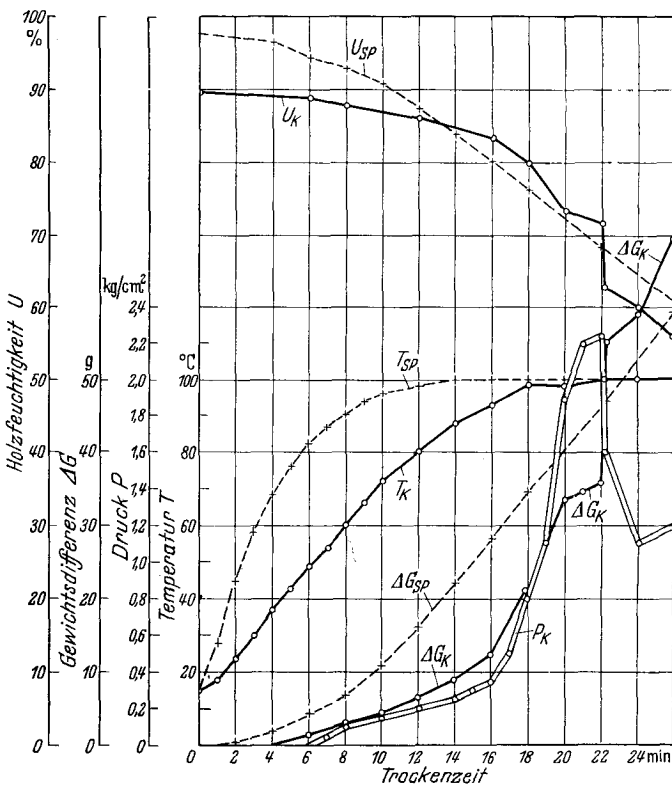


Bild 19. Trocknungsversuche an Eichenprismen (5 × 5 × 15 cm), radiale Feldlinienrichtung. + - - - - + Splintprobe 14 Mhz, 1,75 kV; 0 - - - - 0 Kernprobe 14 Mhz, 1,20 kV. Sp Splint, K Kern, U Holzfeuchtigkeit in %, T Holztemperatur in °C, P Innendruck in kg/cm², G Gewichtsverlust in g.

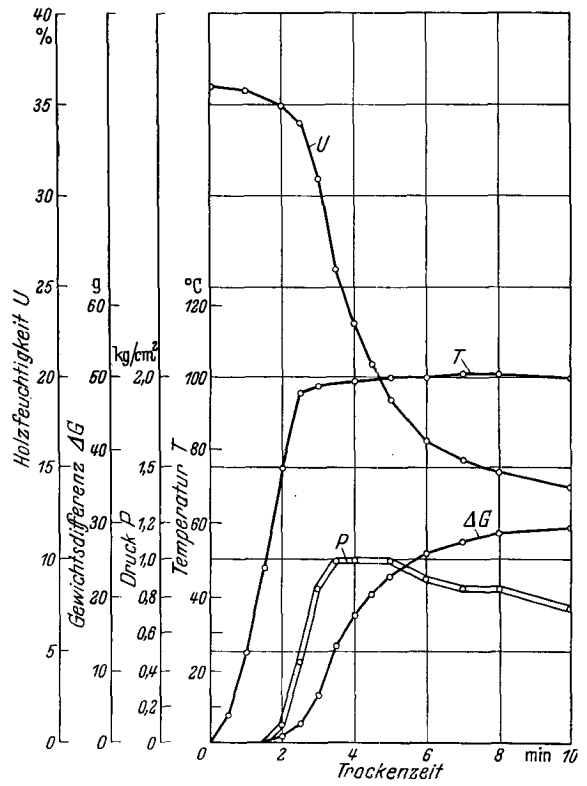


Bild 21. Trocknungsversuch an einem Tannenprisma (5 × 5 × 15 cm), tangentielle Feldlinienrichtung, 27 Mhz, 1,75 kV.

fläche diffundieren. Wahrscheinlich wird der innere Diffusionswiderstand der Tanne zudem noch durch die angeblich irreversible Verklebung der Tori der Hoftüpfel erhöht.

Zusammenfassung

Das Ziel dieser Arbeit war die Untersuchung des Einflusses der Orientierung und der Struktur des Holzes auf die Trocknung im hochfrequenten Wechselfeld. Die Ermittlung der dielektrischen Eigenschaften der Hölzer durch Messung der Dielektrizitätskonstanten und des Verlustwinkels führt nur bei Holzfeuchtigkeiten von etwa 0 bis 20% zu guten Ergebnissen. Es wurde daher ein Verfahren entwickelt, das es ermöglicht, durch die Bestimmung der Temperatur, der Gewichtsabnahme und des inneren Dampfdruckes die Erwärmungsgeschwindigkeit von Proben beliebiger Anfangsfeuchtigkeit zu berechnen. Durch Vergleich der Erwärmungsgeschwindigkeiten der einzelnen Proben konnten verschiedene Gesetzmäßigkeiten im Verhalten des Holzes im hochfrequenten Wechselfeld erkannt werden. Es wurde dabei unterschieden zwischen gedarrtem und feuchtem Holz und zwischen der Erwärmungs- und der Trocknungsperiode.

Erwärmungsperiode

Darrtrockenes Holz

Faserrichtung: Verlaufen die Feldlinien parallel zur Faser (axial), so ist die Wärmeaufnahme stets größer, als wenn sie quer zur Faser verlaufen (transversal).

$$\perp : \parallel \simeq 1,8 : 1$$

Jahrringstellung: Bei den vier untersuchten Holzarten ist die Wärmeaufnahme bei radial verlaufenden Feldlinien stets etwas größer als bei tangential verlaufenden Feldlinien.

$$\perp_{\text{rad}} : \perp_{\text{tg}} \simeq 1,1 : 1$$

Feuchtes Holz

Im Feuchtigkeitsbereich von 0 bis rd. 20% besteht eine direkte und lineare Beziehung zwischen der Wärmeaufnahme des Holzes und seiner Feuchtigkeit. Der beim gedarrten Holz erkannte Einfluß der Faserrichtung und der Jahrringstellung bleibt bestehen.

Im Feuchtigkeitsbereich von rd. 20% bis über die Fasersättigung wird das Verhalten des Holzes im HF-Feld durch die bis zur Fasersättigung sehr rasch ansteigende elektrische Leitfähigkeit des Holzes bestimmt.

Die Wärmeaufnahme bei axialer und radialer Feldlinienrichtung steigt bei zunehmender Ausgangsfeuchtigkeit des Holzes sehr stark an, während diese Zunahme bei tangentialer Richtung der Feldlinien viel geringer ist und allmählicher erfolgt. Die anisotrope Wärmeaufnahme wurde der erhöhten elektrischen Leitfähigkeit des Holzes in der Faserrichtung und den Markstrahlen in radialer Richtung zugeschrieben.

Zerstreut- und Ringporigkeit: Bei der Eiche als ringporige Holzart ist der Unterschied zwischen der Wärmeaufnahme bei radial oder tangential verlaufenden Feldlinien größer als bei den zerstreutporigen Holzarten Buche und Ahorn sowie bei der Tanne.

Trocknungsperiode

Die durchlässigen Holzarten wie Buche (ohne Rotkern) und Ahorn verhalten sich während der Trocknungsperiode gleich wie während der Erwärmungsperiode. Das Verhalten der undurchlässigen Holzarten (Buchenrotkern, Eiche) wird während der Trocknungsperiode durch den inneren Diffusionswiderstand, den der austretende Dampf

überwinden muß, beeinflusst. Der dadurch entstehende Innendruck wird bei der Eiche und dem Buchenrotkern der Verstopfung der Gefäße durch Thyllen zugeschrieben. Der bei der Tanne gemessene Innendruck wird durch die anatomische Struktur der Nadelhölzer erklärt.

Summary

The aim of this study was to investigate the influence of the orientation and the structure of wood on drying with radio-frequency. The determination of the dielectric properties of wood types by measuring the dielectric constants and the loss angle gives reliable results for wood with about 0...20% moisture content. A method was therefore developed which makes it possible to calculate the heating rate of specimens of any desired initial moisture content by determining the temperature, the weight loss and the internal steam pressure.

By comparing the heating rates of the various specimens, some rules governing the behaviour of the wood in a radio-frequency field could be ascertained. A distinction was made between kiln-dried and humid wood, and between the heating and the drying period.

Schrifttum

1. Benson, H. P.: Variation in the Porosity of Twelve Species of Oak, South. Lumb. Reprint March 15, 1942. —
2. Birjukov, W. A.: Holzkammertrocknung im elektrischen Hochfrequenzfeld, Verlag Goslesbumizdat 1950. —
3. Buchmann, S. J., H. Schmitz, u. R. A. Gortner: A Study of Certain Factors Influencing the Movement of Liquide in Wood, J. Physic. Chem. Bd. 39 (1935) S. 102. —
4. Burr, H. K., u. A. D. Stamm: Diffusion in Wood. J. Physic. Colloid Chem. Bd. 51 (1947) S. 240/261. —
5. Dänzer, H.: Über das Verhalten biologischer Körper im Hochfrequenzfeld. Ann. d. Physik 5. Folge Bd. 20 (1934) S. 463/480. —
6. Ebes, K.: Vorming von Thyllen in Geveld Beukenhout, Diss. Wageningen 1937. —
7. Fessel, F.: Hochfrequenzrocknung von Laubhölzern. Versuchsergebnisse. Holz als Roh- und Werkstoff Bd. 10 (1952) H. 6, S. 280/283. —
8. Fessel, K.: Die praktische Durchführung der Holztrocknung im hochfrequenten elektrischen Kondensatorfeld in verschiedenen Ländern. Holz als Roh- und Werkstoff Bd. 14 (1956) H. 2, S. 41/47. —
9. Frey-Wyssling, A.: The Fine Structure of Cellulose Microfibrils. Science Bd. 119 (1954) S. 80/82. —
10. Frey-Wyssling, A.: On the Crystal Structure of Cellulose I. Biochim. Biophysica Acta Bd. 18 (1955) S. 166/168. —
11. Hafner, Th.: Energiebedarf bei der Hochfrequenzwärmerung von nichtleitenden Stoffen. Brown Boveri Mitt. Bd. 28 (1951) S. 344/345. —
12. Hamada, R., T. Maku, u. S. Kadita: Wood Drying by Radio-Heating. Bull. Wood Res. Inst. Kyoto Univers. Bd. 8 (1952) S. 44/54. —
13. Hartmann-Dick: Untersuchungen über die Durchlässigkeit des Holzes bei Druckfiltration. I. Durchlässigkeit für Wasser. Forstwiss. Zbl. Jg. 73 (1954) H. 1/2, S. 40/63. —
14. Harmon, R. F. S.: The High-Frequency Electrical Properties of Wood and Wood-Resin Combinations. Selected Government Res. Rep. Bd. 8 (1952) S. 52/60. —
15. Harmon, R. F. S., u. I. N. Burcham: The Dielectric Properties of Wood. For. Prod. Res. London 1954, Nr. 8, S. 1/19. —
16. Huber, B.: Die physiologische Bedeutung der Ring- und Zerstreuporigkeit. Sonderabdr. aus: Ber. Dtsch. Bot. Ges. Bd. 53 (1935) H. 8. —
17. Inose, O., u. O. Takechi: Analysis on the Fundamental Properties of Electric Resistance of Wood. Scient. Rep. Matsuyama Agric. College 1951 Nr. 6, S. 1/22. —
18. Ishag, S. M.: High-Frequency Drying of Wood. For. Prod. Labor. Rep. Nr. R 1681 Madison/Wisconsin (1947). —
19. Keywerth, R., u. D. Noack: Über den Einfluß höherer Temperaturen auf die elektrische Holzfeuchtigkeitsmessung nach dem Widerstandsprinzip. Holz als Roh- und Werkstoff Bd. 14 (1956) H. 5, S. 162/172. —
20. Kirch, E.: Verluste in technischen Isolierstoffen. E. Z. 1932 H. 39, S. 931/932; H. 40, S. 958/961; H. 42, S. 1007/1010 u. 1021/1022. —
21. Koljo, B.: Über die Mechanik der Flüssigkeitsbewegung bei der Holzimprägnierung. Svenska Träforskningsinst. Mitt. 25 B, (1951). —
22. Koljo, B.: Die Abhängigkeit der Tränkmittel-aufnahme des Holzes von verschiedenen Faktoren unter besonderer Berücksichtigung von Kiefer und Fichte. Holz als Roh- und Werkstoff Bd. 11 (1953) H. 8, S. 303/311. —
23. Kollmann, F.: Untersuchungen über die Ursachen von Schäden bei der Trocknung von grünem Eichenholz. Zugleich:

- Mitt. über Festigkeitsprüfungen an Holz im hochfrequenten Wechselfeld. Svenska Träforskningsinst. Mitt. 21 (1950). — 24. Kollmann, F.: Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe. 2. Aufl. 1. Bd., Berlin, Göttingen Heidelberg: Springer 1951. — 25. Kröll, K.: Die Bewegung der Feuchtigkeit im Nadelholz während der Trocknung bei Temperaturen um 100°. Holz als Roh- und Werkstoff Bd. 9 (1951) S. 176/181 u. S. 216/224. — 26. Kröner, K.: Über die dielektrischen Untersuchungen an Naturhölzern und deren mechanische und chemische Abbauprodukte im großen Frequenzbereich. Diss. Braunschweig 1943. — 27. Kröner, K., u. L. Pungs: Über das Verhalten des dielektrischen Verlustfaktors von Naturholz im großen Frequenzbereich. Abh. Braunschweig. Wiss. Ges. Bd. IV (1952). — 28. Kröner, K., u. L. Pungs: Zur dielektrischen Anisotropie des Naturholzes im großen Frequenzbereich. Holzforsch. Bd. 6 (1952) S. 13/16. — 29. Krpan, T.: Untersuchungen über den Fasersättigungspunkt des Buchen-, Eichen-, Tannen- und Fichtenholzes. Holz als Roh- und Werkstoff Bd. 12 (1954), S. 84/91. — 30. Kühne, H., R. C. Bremer u. Th. Hafner: Hochfrequenz-Holztrocknung. Neue Züricher Ztg. „Beilage Technik“ Nr. 767, März 1954. — 31. Kühne, H., u. J. Vodoz: Untersuchungen über das Schwinden und Quellen einiger schweizerischer Hölzer. Eidg. Materialprüfungsanstalt Zürich, Ber. 179, Dez. 1951. — 32. Kühne, H., H. Fischer, u. J. Vodoz: Über den Einfluß von Wassergehalt, Raumgewicht, Faserstellung und Jahrringstellung auf die Festigkeit und Verformbarkeit schweizerischen Fichten-, Tannen-, Lärchen-, Rotbuchen- und Eichenholzes. Eidg. Materialprüfungs- u. Versuchsanstalt, Zürich, Ber. 183, 1955. — 33. Lindmann, K. F.: Über die Doppelbrechung elektrischer Wellen in Eichenholz. Z. techn. Physik, Bd. 20 (1939), Nr. 3, S. 72/75. — 34. Myer, J. E., u. L. W. Rees: Electrical Resistance of Wood with Special Reference to the Fiber Saturation Point. Techn. Bull. Univers. of Syracuse N. Y. Vol. 26 (1926), Nr. 19, S. 1/22. — 35. Nakato, K., u. S. Kadita: On the Dielectric Properties of Wood in Relation to the Moisture Content and the Temperature. Meet. Jap. For. Soc. Trans. Vol. 63 (1954), S. 271/272. — 36. Nakato, K., u. S. Kadita: On the Dielectric Constant of Oven-dried Wood. J. Japanese For. Soc. Bd. 36 (1954), No. 4, S. 95/100. — 37. Narayanamurti, D.: The Variation of the Electrical Resistance of Indian Timbers with Moisture Content. For. Res. Inst. Dehra Dun Bull. No. 105 (1941). — 38. Narayanamurti, D., u. A. Purushotham: Studies in Permeability, Part. I. A Preliminary Note on the Permeability of Wood and Other Materials to Air. For. Res. Inst. Dehra Dun. Bull. No. 120 (1943). — 39. Narayanamurti, D., V. Ranganathan u. R. S. Ratra: Bewegung von Flüssigkeiten durch Holz. Holz als Roh- und Werkstoff Bd. 9 (1951) H. 11, S. 422/426. — 40. Peterson, R. W.: The Dielectric Properties of Wood. For. Prod. Lab. Canada Mimeograph 0...151 (1953). — 41. Pratt, D. H., u. A. R. Dean: Report on an Investigation into the Drying of Timber by the Application of Radio Frequency Heating. For. Prod. Res. Lab. Princes Risborough Aylesbury, Bucks (Okt. 1951). — 42. Pungs, L.: Holz als Dielektrikum im Hochfrequenzfeld. ETZ, A, Bd. 75 (1954), S. 433/438. — 43. Shinohara, U., S. Otori u. K. Iwata: On the Drying Mechanism of Radio-Frequency Heating. Mem. Fac. Eng., Nagoya Univer. Bd. 4 (1952), No. 1, S. 1/47. — 44. Skaar, Ch.: The Dielectrical Properties of Wood at Several Radio Frequencies. New York State College of Forestry at Syracuse University, Techn. Pub. No. 69 (1948). — 45. Stamm, A. J.: Passage of Liquide, Vapors and Dissolved Materials Through Softwoods. Fro. Prod. Lab. Madison, Techn. Bull. No. 929 (1946). — 46. Takechi, O., u. O. Inose: On the Electric Resistance of Wood in Relation to the Moisture Content and the Temperature. Scient. Rep. Matsuyama Agric. Coll. Jg. 1953 No. 10, S. 13/35. — 47. Trapp, W.: Das dielektrische Verhalten von Holz und Zellulose im großen Frequenz- und Temperaturbereich. Diss. Braunschweig 1945. — 48. Trendelenburg, R., u. H. Mayer-Wegelin: Das Holz als Rohstoff. 2. Aufl. München: Carl Hanser Verlag 1955. — 49. Tsuneo, N.: Study on the Electrical Resistance of *Todo fir*. Meet. Jap. For. Soc. Trans. Bd. 59 (1951), S. 228/231. — 50. Villière, A.: Le Séchage des Bois par courants Haute Fréquence. Rev. Bois, Bd. II (1956), S. 26/31. — 51. Vodoz, J.: Le Retrait et le Gonflement du Bois. J. For. Suisse, Jg. 1953, Nr. 10, S. 1/10. — 52. Vodoz, J.: Eine neue Versuchsanlage zur Prüfung des Verhaltens der verschiedenen Holzarten bei der Hochfrequenz-Trocknung. Holz als Roh- und Werkstoff Bd. 14 (1956), S. 407/409. — 53. Wittkopf, J. J., u. M. D. Mac Donald: Dielectric Properties of Douglas fir at High Frequencies. Oregon State College, Corvallis. Bull. No. 28 (1949). — 54. Wittkopf, J. J., u. M. D. Mac Donald: Dielectric Properties of Ponderosa Pine at High Frequencies. Oregon State College, Corvallis Bulletin No. 29 (1949). — 55. Yavorsky, J. M.: A Review of Electrical Properties of Wood. State University of New York College of Forestry, Syracuse. Techn. Publ. No. 73. — 56. Anonymus: Special Methods of Seasoning Wood: High-Frequency Dielectric Heating. For. Prod. Lab. Madison 5, Wisc. Report No. R1665—7 (1948).