

nalmaterial über die strittigen und von zwei noch nicht untersuchten Arten zukommen lassen, wofür wir unseren ganz besonderen Dank aussprechen möchten.

Das Ergebnis der Untersuchung über die Korrelation zwischen dem Auftreten von Markstrahltracheiden-Zähnen und submikroskopischen Hoftüpfelwarzen lautet wie folgt (vgl. Tabelle 1 auf S. 248 unserer vorerwähnten Arbeit):

Pinusart	Markstrahltracheiden-Zähne	Hoftüpfelwarzen
Sekt. 5 Eupitys Spach P. Mercusii Jungh. et De Vriese (2 verschiedene Holzmuster)	±	±
Sekt. 8 Australes Loud. P. oocarpa Schiede (3 Muster)	+	+
Sekt. 9 Khasia Mayr P. insularis Endl.	- -	+
Sekt. 10 Pseudostrobus Endl. P. Montezumae Lamb. (Marknähe) (Rindennähe)	-+	+
P. rudis Endl. (Astholz)	+	+
(Astholz)	+	+
(Stammholz)	+	+
P. pseudostrobus Lindl. (Stammholz)	+	+

Dieses ergänzende Material erlaubt, die in unserer ersten Arbeit unentschieden gebliebenen Fragen zu beantworten. In der Sektion 10 Pseudostrobus war die Korrelation (+ +) von *Pinus rudis* durchbrochen worden. Wir haben daher diese Gruppe besonders sorgfältig untersucht. In einigen Schnitten durch Holz von *Pinus Montezumae* und *Pinus rudis* wurden sehr wenige oder sogar nur vereinzelte Hoftüpfelwarzen gefunden. Bei Heranziehung eines größeren Untersuchungs-Materials findet man jedoch das Merkmal warzige Hoftüpfelinnenwände regelmäßig, wie Bild 3 (*P. rudis*, Astholz) und Bild 4 (*P. rudis*, Stammholz) zeigen. Es ist uns nicht gelungen festzustellen, wovon die Ausbildung vieler oder nur weniger Warzen abhängt.

Warzenführende Tüpfel wurden in Ast- und Stammholz, in marknahen und rindennahen Jahrringen sowohl von ganz jungen als auch von alten Stämmen gefunden. Jedenfalls ist das Merkmal „warzige Hoftüpfel“ in der Sektion Pseudostrobus, soweit wir die Arten untersuchen konnten, bei Berücksichtigung eines größeren Materials überall vertreten und durchwegs mit dem Auftreten von Markstrahltracheiden-Zähnen positiv korreliert.

In der Sektion 9 Khasia war bei *Pinus khasia* als einzigem Beispiel die Kombination — +, d. h. glatte Markstrahltracheiden-Wände und Hoftüpfelwarzen, gefunden worden. Es ist nun interessant, daß die Philippinen-Kiefer *Pinus insularis* (Bild 2) diese ungewöhnliche Kombination auch zeigt, so daß es sich offenbar um ein Sektionsmerkmal handelt.

Als interessante Species erwies sich die Sumatra-Kiefer *Pinus Mercusii*. Diese Art wird von Pilger auf Grund ihrer Morphologie in die Sektion 5 Eupitys eingegliedert, deren Vertreter holzanatomisch alle durch die Kombination + +, d. h. Zähne und Warzen, ausgezeichnet sind. Bei *Pinus Mercusii* ist nun die Bildung von Markstrahltracheiden-Zähnen nur sehr schwach angedeutet, so daß lediglich leicht ondulierte oder fast glatte Wände vorliegen. Auch Warzen findet man nur spärlich, und oft ist hierfür ein langes Suchen notwendig (Bild 1). *Pinus Mercusii* besitzt daher die Kombination ± ± und fällt dadurch aus dem Rahmen der Sektion Eupitys mit ihren auffallend deutlichen Zähnen und Warzen. Man darf daher die Frage stellen, ob sie wirklich in jenen Verwandtschaftskreis gehört.

Als Gesamtergebnis ergibt sich eine auffallende Kopplung der starken, schwachen oder fehlenden Ausbildung von Zähnen und Warzen (+ +, ± ±, — —). Nur die Sektion Khasia (— +) fügt sich dieser Korrelation nicht. Dem Merkmal Hoftüpfelwarzen kommt daher ein ähnlich hoher systematischer Wert zu, wie dem in der Holzbestimmung allgemein verwendeten Merkmal Markstrahltracheiden-Zähne.

Über den Einfluß höherer Temperaturen auf die elektrische Holzfeuchtigkeitsmessung nach dem Widerstandsprinzip*)

Von Rudolf Keylwerth und Detlef Noack, Reinbek

Einleitung — Elektrische Eigenschaften des Systems: Holz-Wasser — — Einflußgrößen bei der elektrischen Holzfeuchtigkeitsmessung nach dem Widerstandsprinzip: Einfluß von Meßgerät und Meßanordnung — Einfluß des Holzes — Einfluß der Feuchtigkeitsverteilung im Holz — Einfluß der Temperatur des Holzes — — Versuchsbedingungen: Versuchsanordnung I — Versuchsanordnung II — — Versuchsergebnisse — Kontinuierliche elektrische Holzfeuchtigkeitsmessung während der künstlichen Holz Trocknung — Zusammenfassung — Schrifttum

Einleitung

Bei der Planung und Durchführung dieser Arbeit standen 3 Ziele im Vordergrund:

1. Die Zusammenfassung und Diskussion der bisherigen Untersuchungsergebnisse über den elektrischen Widerstand

* Auszug aus der Diplomarbeit von D. Noack, Universität Hamburg, Reinbek 1955. Der auf der Holztagung der Deutschen Gesellschaft für Holzforschung (DGfH) in Bad Honburg am 25. November 1955 unter dem Titel: „Elektrische Holzfeuchtigkeitsmessung während der künstlichen Holz-trocknung“ gehaltene Vortrag berichtete zusammenfassend über die hier näher ausgeführten Ergebnisse.

des Holzes und über die Methodik der Holzfeuchtigkeitsbestimmung auf der Grundlage der elektrischen Widerstandsmessung.

2. Die Erweiterung unserer Kenntnis über den Zusammenhang zwischen Temperatur und elektrischem Widerstand des Holzes als Grundlage der elektrischen Holzfeuchtemessung im Bereich höherer Temperaturen von 20° bis 110° C.

3. Die Untersuchung der praktischen Anwendungsmöglichkeiten der so gewonnenen Grundlagenkenntnisse auf die kontinuierliche elektrische Holzfeuchtigkeitsmessung während der künstlichen Holz Trocknung.

Im Original der Diplomarbeit ist ferner eine — hier nicht wiedergegebene — ausführliche Untersuchung über die Genauigkeit des nach dem Darrverfahren ermittelten Holzfeuchtigkeitsgehaltes zu finden. Es ergab sich, daß diese Genauigkeit — bedingt durch Versuchsapparatur und Versuchsraum — mühelos in den Grenzen < ± 0,2% (abs.) gehalten werden kann. Beim Darrverfahren ist daher der resultierende Gesamtfehler zur Hauptsache von Anteilen

nichtwässriger flüchtiger Bestandteile im Holz bestimmt und deshalb immer positiv.

Elektrische Eigenschaften des Systems: Holz — Wasser

Darrtrockenes Holz besitzt einen sehr hohen Isolationswiderstand, so daß es von H. L. Curtis (nach 13), E. Nusser (21) und A. J. Stamm (25) mit einem spezifischen Widerstand $\geq 1,6 \cdot 10^{14} [\Omega \cdot \text{cm}]$ unter die besten Isolatoren eingereiht wird. Da der spezifische Widerstand fester hygroskopischer Nichtleiter aber sehr empfindlich auf äußere Einflüsse — wie Art und Größe der angelegten Spannung, Unterschiede in der Zusammensetzung, der Temperatur und besonders dem Feuchtigkeitsgehalt des Nichtleiters — reagiert, stellt er keine wohldefinierte Eigenschaft des Isolators dar (12,32). So wurde gefunden, daß der Widerstand des Holzes senkrecht zur Faser $R [\Omega]$ unterhalb des Fasersättigungsbereiches nahezu exponentiell mit zunehmendem Holzfeuchtigkeitsgehalt $u [\%]$ abnimmt (9, 21, 26). Für diesen Widerstandsabfall fand A. J. Stamm (nach 2) im Holzfeuchtigkeitsbereich 8 bis 18% die Beziehung:

$$\lg R = -0,2 \cdot u + 11,5, \quad (1a)$$

während E. Nusser (21) für die wichtigsten europäischen Holzarten (Ausnahme: Pappel) im gleichen Holzfeuchtigkeitsbereich bei 15°C und Abweichungen $< \pm 1,5\%$ Holzfeuchtigkeit die Abhängigkeit

$$\lg R = -0,32 \cdot u + 13,25 \quad (1b)$$

ermittelte. Die entsprechende Gleichung der Eichkurve des Siemens & Halske-Holzfeuchtigkeitsmeßgerätes² bei Abweichungen von der Eichkurve $< \pm 0,5\%$ Holzfeuchtigkeit lautet:

$$\lg R = -0,29 \cdot u + 11,78. \quad (1c)$$

C. G. Suits und M. E. Dunlap (30) haben darauf hingewiesen, daß die Abhängigkeit des elektrischen Widerstandes vom Holzfeuchtigkeitsgehalt in dem erweiterten Feuchtigkeitsbereich bis etwa $u = 28\%$ besser durch die doppelt-logarithmische Beziehung

$$\lg (\lg R) = b \cdot u \quad (2a)$$

erfaßt werden kann. Wie Bild 1 zeigt, ergibt die Anwendung dieser Beziehung auf die Eichkurve des Siemens & Halske-Holzfeuchtigkeitsmeßgerätes im Holzfeuchtigkeitsbereich 3 bis 23% eine nahezu exakte Erfüllung der Gleichung:

$$\lg [\lg (R) - 4] = -0,0322 \cdot u + 1,009. \quad (2b)$$

Oberhalb Fasersättigung besteht keine derartige logarithmische Abhängigkeit, vielmehr nimmt der Widerstand von Fasersättigung bis zum völlig wassergesättigtem Zustand nur etwa 20- bis 50fach ab (25, 29); folglich haben in diesem Bereich die später zu besprechenden Einflußgrößen eine relativ starke Wirkung, so daß vom gemessenen Widerstand des Holzes nicht immer ohne weiteres auf den Holzfeuchtigkeitsgehalt geschlossen werden kann.

Die starke, annähernd millionenfache Zunahme der elektrischen Leitfähigkeit bei einer Änderung des Holzfeuchtigkeitsgehaltes von 0 auf 30% und die verhältnismäßig geringe Erhöhung vom Fasersättigungsbereich bis zur völligen Sättigung zeigen, daß die elektrische Leitfähigkeit mit der inneren Oberfläche des Holzes in engstem Zusammenhang steht. So glaubt A. J. Stamm (25, 27), daß die Leitfähigkeit des Holzes zu einem Teil auf der Ge-

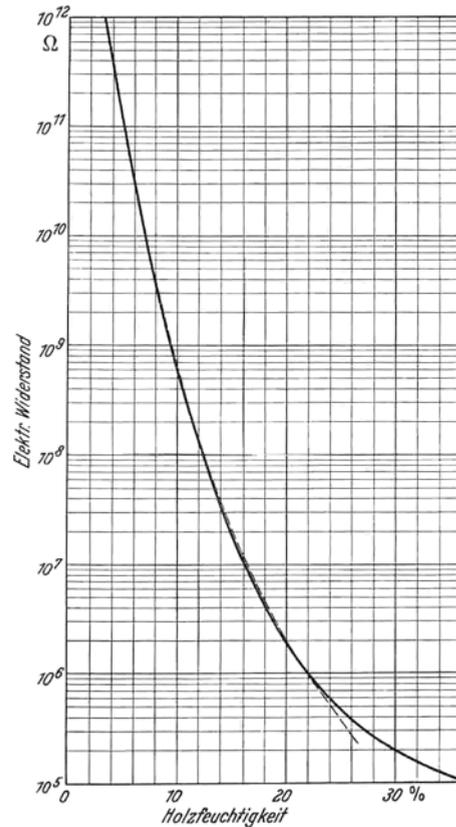


Bild 1. Eichkurve des Siemens & Halske - Holzfeuchte-meßgerätes (Eichtemperatur 20°C) und die ermittelte Näherungsgleichung $\lg [\lg (R) - A] = -B \cdot u + C$.

genwart löslicher, aus der Holzstruktur nicht völlig auswaschbarer Elektrolyte beruht, zu einem anderen großen Teil aber auf eine Vergrößerung der Oberflächenleitfähigkeit von Wasser und verdünnten Lösungen zurückzuführen ist, die ihre Ursache in der größeren Leitfähigkeit der Helmholtzschen Doppelschichten hat (26). Zur Begründung dieser Annahme wird angeführt: 1. Die Leitfähigkeit des Holzes beim Fasersättigungspunkt beträgt etwa das 10fache derjenigen des Wassers als Lösung (27). 2. Elektroosmotische Untersuchungen an (0,4 bis 2 mm) dünnen wassergesättigten Holzproben zeigen, daß die Leitfähigkeit in longitudinaler Richtung nur etwa das 2- bis 3-fache der Leitfähigkeit in radialer oder tangentialer Richtung beträgt (26). Würde die Leitfähigkeit allein auf der elektrolytischen Leitfähigkeit des Kapillarwassers beruhen, so müßte sie in longitudinaler Richtung die Leitfähigkeiten der beiden anderen strukturellen Richtungen des Holzes mehrere 100mal übertreffen und dürfte die Leitfähigkeit des Kapillarwassers als Lösung nicht übersteigen. 3. Auch unterhalb Fasersättigung bleibt die obige Relation der Widerstände in den verschiedenen strukturellen Richtungen des Holzes erhalten. 4. Bei Anlegung einer Gleichspannung an feuchtes Holz wird durch Elektroosmose ein Feuchtigkeitsgefälle in Richtung des Stromflusses erzeugt (26, 31). 5. Eine Zerfaserung des Holzes hat keinen — oder nur einen ganz geringen — Einfluß auf die Beziehung des elektrischen Widerstandes zum Feuchtigkeitsgehalt; somit ist die Leitfähigkeit nicht abhängig von der Faser-Faser-Bindung (23).

Nach D. R. Briggs (1) dagegen hat die Oberflächenleitung nicht den Charakter einer ionischen Leitfähigkeit entlang der Helmholtzschen Doppelschichten, sondern eher die Natur einer Leitfähigkeit auf Grund der Adsorption des Wassers auf der inneren Oberfläche in einer Form, die den elektrischen Strom leitet. Adsorptionskräfte be-

² Die Eichkurve des Siemens & Halske - Holzfeuchtigkeitsmeßgerätes wurde uns freundlicherweise von der Firma Siemens & Halske AG., Wernerwerk für Meßtechnik, Karlsruhe, zur Verfügung gestellt. Wir möchten der Firma an dieser Stelle nochmals unseren Dank sagen.

wirken eine monomolekulare Orientierung der polaren Wassermoleküle auf der inneren Oberfläche des Holzes, wobei das Wasser in diesem monomolekular-verteilten Zustand auf ein kleineres Volumen zusammengepreßt wird, als der polymolekularen Form des normalen Wassers entspricht. Mit Kling und Lassieur nimmt D. R. Briggs an, daß Wasser in monomolekularem Zustand ein Leiter der Elektrizität ist. Die starke Zunahme des elektrischen Widerstandes unterhalb Fasersättigung läßt sich dann durch Unterbrechungen und Unregelmäßigkeiten des Feuchtigkeitsfilmes auf der inneren Oberfläche des Holzes deuten (2, 18, 33).

Aus der Temperaturabhängigkeit des Widerstandes darrtrockenen Birkenholzes schließen J. D. Clark und J. W. Williams (3), daß die Leitfähigkeit als ein ionischer Prozeß zu erklären ist. Die im Holz auch ohne Feuchtigkeit in ionischer Form vorliegenden elektrolytischen Verunreinigungen sind danach in zwei Phasen verteilt: als auf der Oberfläche der Bausteineinheiten adsorbierte Ionen und als Ionen, die sich im freien Zustand zwischen den Bausteinen befinden und deren Wanderung unter dem Einfluß eines elektrischen Feldes einen Stromfluß hervorruft. Bei Temperaturerhöhung erfolgt in einem endothermen Prozeß die Freigabe adsorbierter Ionen, woraus eine Erhöhung der Leitfähigkeit resultiert. In ähnlicher Weise nehmen E. J. Murphy und H. H. Lowry (17) an, daß bei Einwirkung eines elektrischen Feldes auf einen Nichtleiter adsorbierte Ionen desorbiert werden und sich in Richtung des Feldes bewegen. Daher ist die Leitfähigkeit des Isolators nicht konstant, sondern nimmt mit der Erhöhung der Feldstärke zu (16).

J. M. Yavorsky (36) zeichnet folgendes Bild: In einem Dielektrikum führen freie Elektronen und Ionen Schwingungen um ihre Gleichgewichtslage aus. Bei Errichtung eines elektrischen Feldes werden diese freien Elektronen und Ionen die Stromleitung übernehmen; hinzutreten aber eine Verlagerung der Elektronen innerhalb der Atome, der Atome innerhalb der Moleküle, eine Verschiebung adsorbierter Ionen und eine Rotation polarer Moleküle. Der resultierende Strom durch ein heterogenes Dielektrikum wie Holz setzt sich daher aus einer freien Elektronen- und Ionenleitung und einer Verschiebung adsorbierter Ionen und polarer Moleküle zusammen.

Einflußgrößen bei der elektrischen Holzfeuchtigkeitsmessung nach dem Widerstandsprinzip

Da die elektrische Leitfähigkeit des Holzes nicht nur vom Feuchtigkeitsgehalt und von der Temperatur abhängig ist, sondern in ihrer Höhe auch durch das Meßgerät und die Meßanordnung, die Holzeigenschaften und die Feuchtigkeitsverteilung im Holz bestimmt wird, ist eine kurze Kennzeichnung der Größe dieser Einflußfaktoren notwendig.

Einfluß von Meßgerät und Meßanordnung

Die sehr hohen Anforderungen an das Meßgerät, die sich aus der in Bild 1 dargestellten Widerstandscharakteristik des Holzes ergeben, kann die moderne elektrische Meßtechnik weitgehend erfüllen. So wird für den Siemens & Halske-Holzfeuchtigkeitsmesser für die Einhaltung der Eichkurve ein fabrikmäßig bedingter Fehler von $< \pm 0,5\%$ Holzfeuchte angegeben¹.

Der Anschluß des Holzes in den Stromkreis des Meßgerätes erfolgt durch Elektroden, die durch Differenzierung ihrer Form den verschiedenen praktischen Anwendungen angepaßt sind. Während bei den Einschlag-

elektroden für dickere Hölzer und Stempелеlektroden für Furniere der Elektrodenabstand konstant ist, ändert er sich bei gegenüberliegenden Plattenelektroden mit der Holzdicke. Entsprechend Bild 2 findet aber bei Holz, das die Elektrodenflächen überragt, Stromleitung auch außerhalb des Elektrodenflächenbereichs durch Randstreuung — analog der Randwirkung kreisförmiger Plattenkondensatoren — statt (21); diese Randstreuung wächst bei konstanter

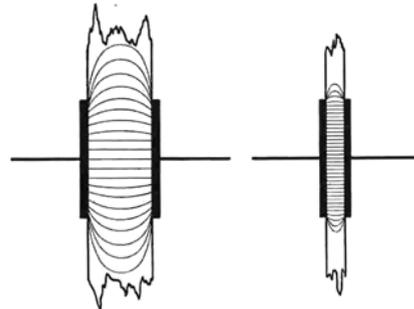


Bild 2. Schema des Stromlinienverlaufes bei gegenüberliegenden Plattenelektroden.

Elektrodenfläche mit der Holzdicke und hat zur Folge, daß auch bei größeren Holzdicken keine Feuchtigkeitsmeßfehler auftreten.

Zunehmender Elektrodenanpreßdruck gegen das Holz vermindert den beim Stromübergang zwischen Elektroden und Holz bestehenden Übergangswiderstand (6, 20, 21, 28). Untersuchungen an Holz mit glatter Oberfläche zeigten jedoch, daß eine Steigerung des Anpreßdruckes über 2 kg/cm^2 nur noch eine vernachlässigbar geringe Abnahme des Übergangswiderstandes nach sich zieht (21). — Da der Anpreßdruck ins Holz geschlagener Spitzen- oder Messerelektroden nicht meßbar und regulierbar ist, ist bei Verwendung dieser Elektrodenarten zu beachten, daß durch Verringerung des Anpreßdruckes mit der Zeit eine Zunahme des Übergangswiderstandes eintritt, die nach H. Kühne und H. Strässler (14) innerhalb der ersten 24 h eine Abnahme des Holzfeuchtigkeitsmeßwertes um etwa $0,5\%$ (abs.) hervorruft, während bei weiterer Ausdehnung der Versuchsdauer der Übergangswiderstand konstant bleibt.

Einfluß des Holzes

Der elektrische Widerstand des Holzes in longitudinaler Richtung ist etwa halb so groß wie der in radialer Richtung, das entspricht unter Fasersättigung einem Holzfeuchtigkeitsmeßfehler von etwa 1% (abs.), während sich die Widerstände in radialer und tangentialer Richtung nur wenig unterscheiden (28). Ein bestimmbarer gesetzmäßiger Einfluß der Rohwichte auf den elektrischen Widerstand konnte von vielen Forschern nicht festgestellt werden (6, 20, 21, 24, 28), obwohl Hiruma (nach 2) und andere Forscher (5, 36) berichten, daß in der Regel eine Abnahme des Widerstandes mit zunehmender Rohwichte zu erkennen sei.

Je nach der Eichung des Meßgerätes schwankt der durch die Holzart hervorgerufene Meßfehler (4, 6, 14, 21). Nach E. Nusser (21) halten sich aber die Einflüsse der Hauptholzarten Mitteleuropas (Ausnahme: Pappel) innerhalb der Fehlergrenze $\pm 1,5\%$ Holzfeuchte.

Den geringen Einfluß hohen Harzgehaltes auf die elektrische Leitfähigkeit zeigen Untersuchungen von A. J. Stamm (24) an harzreichem Holz von Southern yellow pine. Obgleich nach dem Darrverfahren höhere Feuchtigkeitsgehalte ermittelt wurden, stimmten die elektrisch gemessenen Holzfeuchten sehr gut mit den nach dem Destillationsverfahren erhaltenen Werten überein.

¹ Briefliche Mitteilung der Firma Siemens & Halske AG, Wernerwerk für Meßtechnik, Karlsruhe.

Auch die im Holz befindliche Menge wasserlöslicher Salze beeinflusst den elektrischen Widerstand (20, 21, 28). So erhöht sich die elektrische Leitfähigkeit einer Probe nach Absorption von 1,1% NaCl auf das Vierfache des Ausgangswertes (28). Zu beachten ist, daß der Aschengehalt der europäischen Hölzer in der Regel sehr gering ist (0,2 bis 0,6%) (20) und daß große Teile der Aschenkomponenten im Holz als wasserunlösliche Salze von Cu, Mg, Fe und Al vorgelegen haben, die die elektrische Leitfähigkeit nach analogen Untersuchungen an Baumwolle (18, 34) wohl nicht merkbar beeinflussen. Da aber eine Aufnahme von 1,1% NaCl die außerordentliche Erhöhung des Aschengehaltes um 0,59% bedeutet, dürften die normalen kleinen Schwankungen im naturalen Aschengehalt nur einen geringen Fehler in der elektrischen Holzfeuchtigkeitsanzeige hervorrufen.

Größere Meßfehler dagegen können bei Holz mit Oberflächenverunreinigungen durch Lagerung in der Nähe von Gaswerken oder chemischen Fabriken und bei salz-impregniertem Holz auftreten (6, 14).

Einfluß der Feuchtigkeitsverteilung im Holz

A. J. Stamm (24, 28) und andere Forscher (6, 7, 8, 21, 22) weisen darauf hin, daß bei einem Feuchtigkeitsgefälle im Holz je nach Elektrodenart durch die verschiedene Anordnung der elektrischen Widerstände verschiedener feuchter Holzschichten bei der Bestimmung der mittleren Holzfeuchtigkeit Meßfehler auftreten. Ihre Größe wurde unter Annahme exponentieller Abhängigkeit des elektrischen Widerstandes von der Holzfeuchtigkeit von E. Nusser (21) theoretisch berechnet. Da die Holzschichten verschiedenen elektrischen Widerstandes bei gegenüberliegenden Plattenelektroden hintereinandergeschaltet sind (vgl. Bild 3a), wirken sich die höheren Widerstände der trockeneren Außenschichten stark auf den Gesamtwiderstand aus. So zeigen die Berechnungen von E. Nusser, daß bei einer Feuchtigkeitsverteilung zwischen den Elektroden nach einer Parabel 2. Ordnung durch einen Holzfeuchtigkeitsunterschied $du = u_i - u_a$ von 6,5% (abs.) ein Meßfehler von -1,5% Holzfeuchtigkeit hervorgerufen wird. Durch Verwendung gegenüberliegender Nadelelektroden mit einer Nadellänge von $1/10$ der Holzdicke wird der Einfluß großer

Feuchtigkeitsgefälle stark zurückgedrängt, so daß theoretisch erst ein Feuchtigkeitsunterschied du von etwa 20% einen Meßfehler von -1,5% Holzfeuchtigkeit nach sich zieht.

Bei nebeneinanderstehenden, sich über die ganze Holzdicke erstreckenden Einschlagelektroden vollzieht sich der Stromfluß infolge Parallelschaltung der einzelnen Widerstände (vgl. Bild 3b) vor allem in den Schichten geringsten elektrischen Widerstandes, so daß vom Meßgerät Feuchtigkeiten angezeigt werden, die über der mittleren Holzfeuchte liegen. So ruft bei parabelförmiger Holzfeuchtigkeitsverteilung über dem Brettquerschnitt ein Holzfeuchtigkeitsunterschied du von 9% einen Meßfehler von +1,5% Holzfeuchtigkeit hervor.

Erstrecken sich die Einschlagelektroden nicht über die gesamte Holzdicke, so tritt neben die seitliche Randstreuung der Stromlinien in den einzelnen Widerstandsschichten eine zusätzliche Streuung an den Elektrodenenden, die um so größeren Einfluß hat, je feuchter die unterhalb der Elektrodenenden befindlichen Holzschichten sind. Bei Verwendung nebeneinanderliegender Nadelelektroden mit einer Nadellänge von $1/4$ der Holzdicke fand A. J. Stamm (24) empirisch, daß die gemessenen Holzfeuchtigkeiten bei „normalem Feuchtigkeitsgefälle“ nur wenig von der Durchschnittsfeuchtigkeit abwichen, während bei Verwendung gegenüberliegender Plattenelektroden große Meßfehler auftraten.

Fehlerhafte Messungen ergeben sich auch bei hoher Oberflächenfeuchtigkeit (hervorgerufen z. B. durch Regen, Nebel oder hohe relative Luftfeuchte), weil die Elektroden über den geringen Widerstand der feuchten Außenschichten kurzgeschlossen werden (5, 6, 8, 19, 20, 21, 24, 28).

Einfluß der Temperatur des Holzes

Die starke Abhängigkeit der elektrischen Leitfähigkeit fester Elektrolyte von der Temperatur erfaßten E. Rasch und F. W. Hinrichsen (nach 32) durch die Gleichung:

$$\lambda = A \cdot e^{-B/T} \tag{3}$$

wenn λ [$\Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$] die spezifische Leitfähigkeit und T [$^{\circ}\text{K}$] die absolute Temperatur des Isolators sind.

Die gleiche Beziehung konnten J. W. Clark und J. W. Williams (3) für darrtrockenes Birkenholz im Temperaturbereich 65 bis 110°C aufstellen.

Eine Gegenüberstellung der Temperaturabhängigkeit des elektrischen Widerstandes von einem Thüringer Glas [nach Fulda (32)], von darrtrockenem Birkenholz [nach Versuchsergebnissen von J. D. Clark und J. W. Williams (3)] und von Fichtenholz verschiedener Feuchtigkeit [nach eigenen Messungen] in Bild 4 zeigt, daß der durch den Einfluß höherer Temperaturen hervorgerufene Widerstandsabfall von Holz geringer Feuchtigkeit analog zu dem Widerstandsabfall fester Isolatoren verläuft, während bei höheren Holzfeuchtigkeiten der Temperatureinfluß zurücktritt und sich oberhalb Fasersättigung in seiner Größenordnung dem Temperatureinfluß auf elektrolytische Lösungen nähert.

Den Einfluß der Temperatur feuchten Holzes auf die Anzeige elektrischer Holzfeuchtigkeitsmeßgeräte untersuchten M. E. Dunlap und E. R. Bell (6) für den unteren Temperaturbereich -35 ... +35°C. Während sie, wie aus Bild 5 hervorgeht, einen wachsenden Temperatureinfluß mit Zunahme der Holzfeuchtigkeit feststellten, fanden O. Takechi und O. Inose (31) für den verhältnismäßig kleinen Temperaturbereich +10 ... +36°C eine Abnahme des Temperatureinflusses mit steigendem Holzfeuchtigkeitsgehalt. Nach O. Takechi und O. Inose gilt im unter-

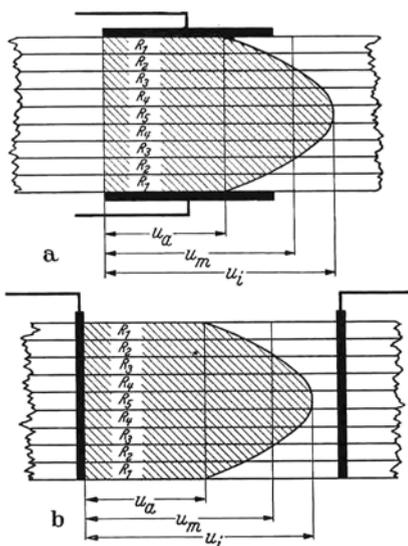


Bild 3. Schema der Anordnung der Widerstände verschieden feuchter Holzschichten R_n und des parabelförmigen Holzfeuchtigkeitsverlaufes u (Parabel 2. Ordnung) bei: a gegenüberliegenden Plattenelektroden und b nebeneinanderstehenden Einschlagelektroden (nach E. Nusser); u_i = maximale Holzfeuchtigkeit in der Brettmitte; u_m = mittlere Holzfeuchtigkeit, u_a = minimale Holzfeuchtigkeit an der Brett Oberfläche.

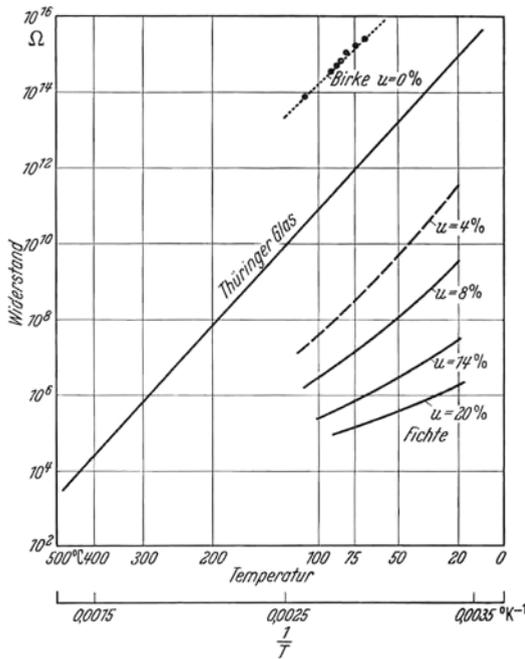


Bild 4. Temperatur-Widerstandskurve eines Thüringer Glases (nach Fulda), darrtrockenen Birkenholzes (nach J. D. Clark und J. W. Williams) und Fichtenholzes verschiedener Feuchte (nach eigenen Messungen).

suchten Temperaturbereich für den elektrischen Widerstand des Holzes R [MΩ] (Holzart: *Chamaecyparis obtusa* S. et Z.), die Temperatur ϑ [°C] und die Holzfeuchtigkeit u [%] innerhalb des Holzfeuchtigkeitsbereiches 14 ... 21 % die exponentielle Beziehung:

$$R = K \cdot u^{-a} \cdot e^{-(b+c \cdot u) \cdot \vartheta} \quad (4a)$$

Durch Ermittlung der Konstanten K , a , b und c aus ihren Versuchsergebnissen erhielten sie die empirische Gleichung:

$$R = 1,826 \cdot 10^{15} \cdot u^{-10,98} \cdot e^{-(0,1354 + 0,00369 \cdot u) \cdot \vartheta} \quad (4b)$$

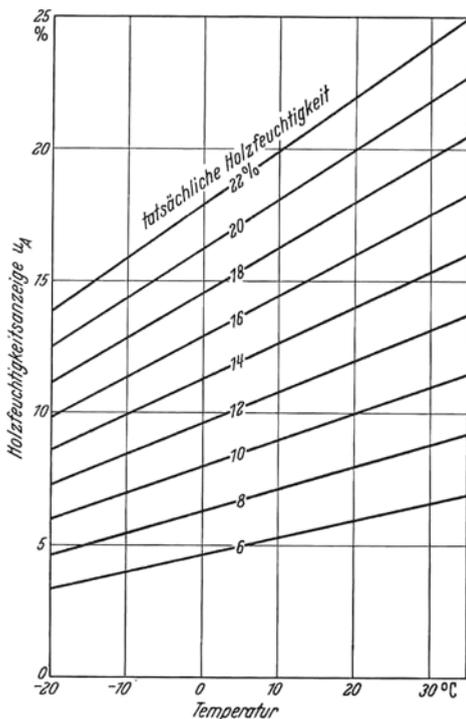


Bild 5. Abhängigkeit der Anzeige elektrischer Holzfeuchtigkeitsmeßgeräte nach dem Widerstandsprinzip von Feuchtigkeitsgehalt und Temperatur des Holzes (gezeichnet nach einem Nomogramm von M. E. Dunlap und E. R. Bell).

Für das von M. E. Dunlap und E. R. Bell (6) angegebene Nomogramm läßt sich die einfache Beziehung

$$u_A = m \cdot \vartheta + u \quad (5a)$$

aufstellen, wenn u_A [%] die Feuchtigkeitsanzeige des Meßgerätes und m und u Funktionen der Holzfeuchtigkeit u sind. So ergibt sich im Temperaturbereich $-35 \dots +35^\circ \text{C}$ folgender Ausdruck für den Temperatureinfluß auf die Anzeige elektrischer Holzfeuchtigkeitsmeßgeräte:

$$u_A = (0,00865 \cdot u + 0,0141) \cdot \vartheta + 0,827 \cdot u - 0,28. \quad (5b)$$

Die von K. Egner (7) und W. Lange (15) nach dem Nomogramm von M. E. Dunlap und E. R. Bell vorgenommenen Extrapolationen bis zu Temperaturen von 100°C gehorchen ebenfalls der Gleichung (5b).



Bild 6. Das Siemens & Halske - Holzfeuchtigkeitsmeßgerät.

Versuchsbedingungen

Zur Ermittlung des Temperatureinflusses oberhalb 20°C auf den elektrischen Widerstand von Fichtenholz diente das Siemens & Halske - Holzfeuchtigkeitsmeßgerät (Bild 6). Dieses Gerät hatten wir durch vorangegangene Eichversuche hinreichend genau kennengelernt.

Vor Beginn der eigentlichen Untersuchungen wurden verschiedene Arten von Elektroden geprüft. Gegenüberliegende Plattenelektroden haben z. B. den Vorteil, daß sich ihr Anpreßdruck gegen die Holzoberflächen leicht regulieren läßt. Trotzdem konnten sie nicht in Anwendung kommen, da sie eine verhältnismäßig große Holzoberfläche bedecken und somit gerade an der Meßstelle die Einstellung der Gleichgewichtsholzfeuchtigkeit erschweren und verzögern. Hinzu kommt noch, daß kleine Feuchtigkeitsgefälle im Holz zu relativ hohen Meßfehlern führen, wenn mit gegenüberliegenden Plattenelektroden die elektrischen Widerstände der verschieden feuchten Holzschichten hintereinandergeschaltet werden. Auch die Einschlagelektroden des Siemens-Gerätes mußten für die Versuche ausgeschaltet werden, da eine Lockerung dieser Elektroden durch den Schwindungsprozeß des Holzes während der Trocknung eintritt. Werden gewöhnliche Holzschrauben als Elektroden verwendet, so ist zwar eine genaue Messung des Anpreßdruckes gegen das Holz ebenfalls

nicht möglich, dagegen zeigten aber Testversuche keine Zunahme des Widerstandes mit der Zeit, wie sie H. Kühne und H. Strässler (14) für Einschlagelektroden beobachteten. Selbst bei scharfer Trocknung von 80 auf 6% Holzfeuchtigkeit trat keine Lockerung der Schraubenelektroden ein. Aus diesem Grunde wählten wir Holzschrauben als Elektroden, und zwar inchromierte Stahlschrauben (Versuchsordnung I) und Messingschrauben (Versuchsordnung II), um eine Erhöhung des Übergangswiderstandes zwischen Holz und Elektroden durch Oxydation und Korrosion der Schrauben zu verhindern.

Für die Proben diente völlig fehlerfreies, astreines Fichtenholz verschiedener Herkunft ($\rho_0 = 0,37$ bis $0,44 \text{ g/cm}^3$).

Die notwendige gleichmäßige Temperatur- und Feuchtigkeitsverteilung im Probenkörper wurde durch zwei völlig verschiedene Versuchseinrichtungen erzielt, deren Anordnung und Betrieb kurz beschrieben werden sollen.

Versuchsordnung I

Als Versuchsordnung I wurde ein automatisch regelbarer Klimaschrank mit eingebauter Waage gewählt (Bild 7). Beim Anschluß der Holzprobe $50 \cdot 50 \cdot 50 \text{ mm}^3$, Elektrodenabstand 20 mm bei senkrecht zur Faser verlaufender Meßstrecke, Elektroden Eindringtiefe 25 mm) in den Stromkreis des Meßgerätes war zu beachten, daß die hochhohmige Isolierung der Elektrodenleitungen des Siemens-Gerätes höheren Temperaturen nicht ausgesetzt werden darf. Daher mußten in der Meßkammer des Klimaschranks unisolierte, versilberte Kupferleitungen verlegt werden (Bild 8). Hierbei wurde die Elektrodenleitung *a* in der Kammer an Erde geschlossen und über Erde zum Meßgerät geführt. Die Elektrodenleitung *b* dagegen wurde von der Holzprobe frei durch den Kammerraum zu einer von der Firma Siemens & Halske AG speziell angefertigten Durchführung (Bild 9) geleitet und in ihr in einer hochisolierenden Quarzglas-kapillare durch die Kammerwand geführt. Mit Hilfe der über einen Transformator stufenweise regulierbaren Heizung konnte eine Kondensation von Wasserdampf am Durchbruch durch die Kammerwand vermieden werden. Testversuche ergaben, daß die Schaltung der Elektrodenleitungen nach Bild 8 keinen Einfluß auf die Holzfeuchtigkeitsanzeige des Meßgerätes ausübt.

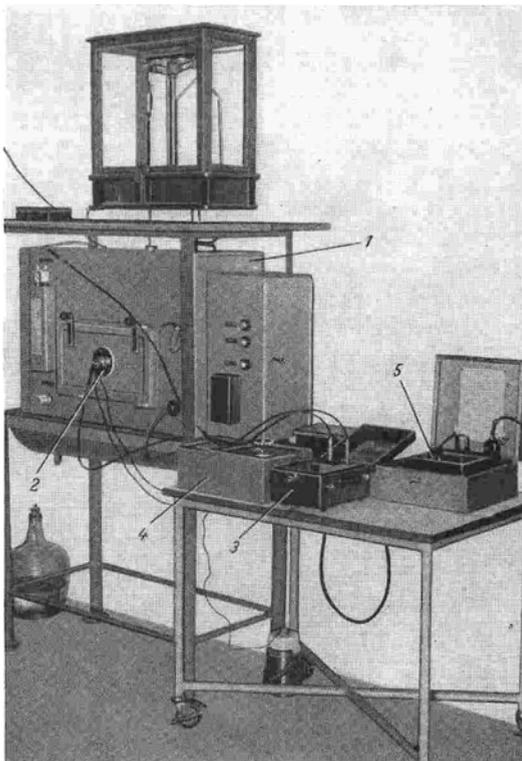


Bild 7. Gesamtansicht der Versuchsanordnung I. 1. Automatisch regelbarer Klimaschrank, 2. Heizbare Durchführung, 3. Siemens & Halske - Holzfeuchtigkeitsmeßgerät, 4. Mehrpoliger Umschalter für Thermoelemente, 5. Millivoltmeter.

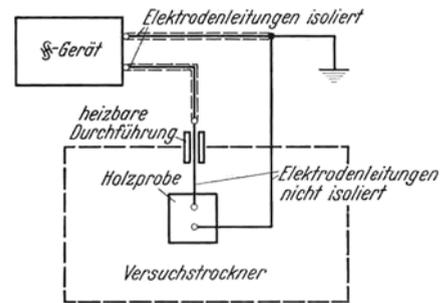


Bild 8. Schematisches Schaltbild der Versuchsanordnung I.

Eine Kontrolle der jeweiligen Temperatur der Holzprobe und der gleichmäßigen Temperaturverteilung in ihr erfolgte mit Hilfe von Thermoelementen an einer zweiten in der Meßkammer befindlichen Holzprobe.

Nach mehrtägigem Klimatisieren bei Temperaturen von etwa 70°C wurde die Probe stufenweise auf verschiedene Temperaturen im Bereich 20 bis 110°C erwärmt und auf den einzelnen Temperaturstufen hinreichend lange klimatisiert. Dabei wurde die relative Feuchtigkeit der Kammerluft nach einem von R. Keylwerth (10) aufgestellten Nomogramm der Abhängigkeit der Gleichgewichtsholzfeuchtigkeit von der Psychrometeranzeige gesteuert, um eine Änderung der Holzfeuchtigkeit während einer Versuchsreihe zu vermeiden. Eine Kontrolle erfolgte durch Wägung der Holzprobe auf der eingebauten Waage (Genauigkeit der Waage: $\pm 0,005 \text{ g}$). Dabei zeigte es sich, daß innerhalb einer Versuchsreihe nur sehr geringe Holzfeuchtigkeitsänderungen von wenigen Zehntel Prozent (abs.) auftraten.

Versuchsordnung II

Die Mängel der Versuchsanordnung I — nämlich einmal der große Zeitaufwand für die Klimatisierung auf jeder Temperaturstufe und zum anderen der starke Einfluß des Kammerklimas auf die Gleichgewichtsholzfeuchtigkeit — regten zur Konstruktion einer völlig andersartigen Versuchsapparatur an (Bild 10), bei der sich die zylindrische Holzprobe (Durchmesser 60 mm, Höhe 50 mm).

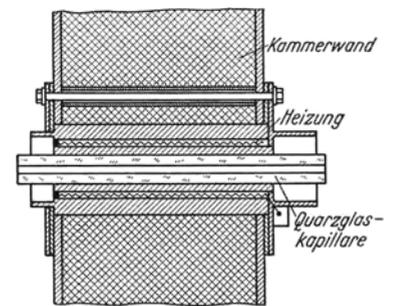


Bild 9. Schnittzeichnung der heizbaren, hochisolierenden Durchführung der Elektrodenleitung *b* durch die Kammerwand.

Elektrodenabstand 24 mm, Elektroden-eindringtiefe 35 mm) in einem Metallbad einer Fünftoff-Legierung (Bi, Cd, Pb, Sn, In) mit dem extrem niedrigen Schmelzpunkt von 47°C befindet. Da das Metallbad die Holzprobe völlig von der Luft abschließt, kann bei Temperaturen bis zu 100°C durch den Einfluß des umgebenden Klimas keine Veränderung der Gleichgewichtsholzfeuchtigkeit stattfinden. So ist nach der einmaligen Herstellung einer konstanten Feuchtigkeitsverteilung über die Holzprobe nur noch auf eine konstante Temperaturverteilung bei den einzelnen Temperaturstufen zu achten. Diese konstanten Temperaturen wurden mit Hilfe eines Umlaufthermostaten erzeugt.

Um die Schraubenelektroden gegen die Metallschmelze zu isolieren, ist auf die zylindrische Holzprobe eine hochisolierende Polyvinylkarbazol-Kunststoffplatte Luvican M 170 hoher thermischer Stabilität gesetzt. Ein Eindringen der Metallschmelze zwischen Isolierplatte und Holzprobe (was zum Kurzschluß der Elektroden führen würde) verhinderten entsprechend angeordnete Gummidichtungen.

Die so vorbereitete Holzprobe bestimmter Holzfeuchtigkeit wurde in die Metallschmelze getaucht und zur Erzielung einer gleichmäßigen Feuchtigkeitsverteilung mehrere Tage Temperaturen von 80 bis 90°C ausgesetzt. Anschließend erfolgte die elektrische Holzfeuchtigkeitsmessung bei den einzelnen Temperaturstufen im Temperaturbereich 20 bis $> 100^\circ\text{C}$ (wobei die obere Temperaturgrenze durch die Gleichgewichtsholzfeuchtigkeit in reinem Heißdampf bei Atmosphärendruck

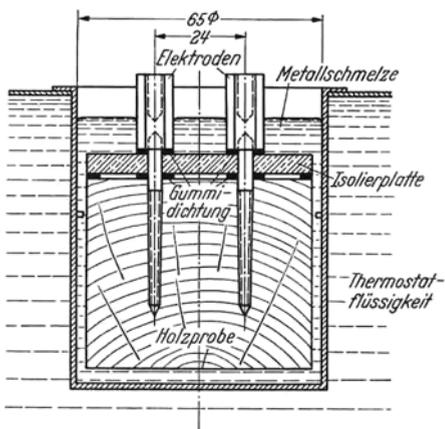


Bild 10. Schnittzeichnung der Holzprobe der Versuchsanordnung II.

bestimmt war). Zur Messung selbst wurde die Probe so weit aus der Metallschmelze gehoben, daß die Oberfläche der Isolierplatte etwa 4 mm über deren Spiegel lag. Um auch elektrische Holzfeuchtigkeitsmessungen bei niederen Temperaturen (20 bis 50°C) — d. h. bei erstarrter Metallegierung — durchführen zu können, wurden die Elektroden vor Erstarren der Schmelze durch besondere Buchsen gegen das Metallbad abgeschirmt.

Versuchsergebnisse

Der Temperatureinfluß bei Holzfeuchtigkeitsanzeigen unter Fasersättigung

Die gewonnenen Versuchsergebnisse bei Holzfeuchtigkeitsanzeigen unter Fasersättigung sind in Bild 11 wiedergegeben.

Da bei Versuchsanordnung I durch den Einfluß des Klimas geringe Schwankungen der Gleichgewichtsholzfeuchtigkeit zwischen den einzelnen Temperaturstufen unvermeidlich waren, mußten die Anzeigen des Siemens-Gerätes auf die

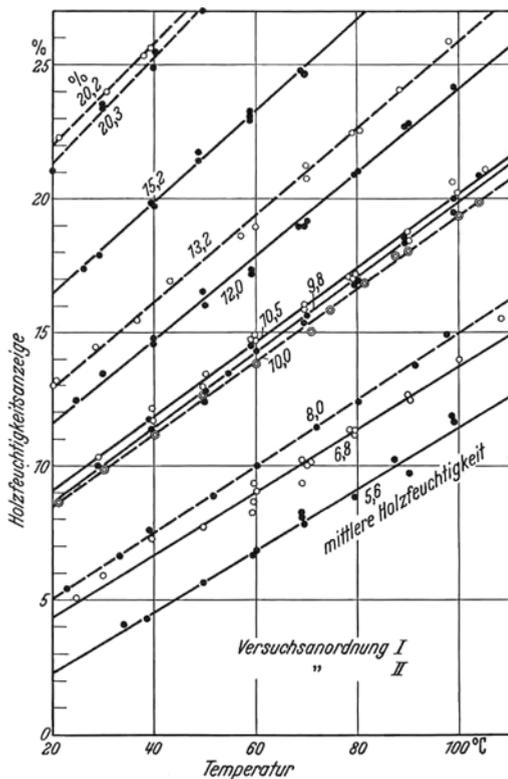


Bild 11. Abhängigkeit der Anzeige des Siemens & Halske-Holzfeuchtigkeitsmeßgerätes von Feuchtigkeitsgehalt und Temperatur des Holzes (Ausgleichsgeraden nach dem Gaußschen Ausgleichsprinzip).

mittlere Holzfeuchtigkeit der jeweiligen Versuchsreihe umgerechnet werden.

Bild 11 zeigt, daß — analog zu dem von M. E. Dunlap und E. R. Bell (6) angegebenen Nomogramm für den unteren Temperaturbereich —35 ... +35°C (vgl. Bild 5) — auch für den Temperaturbereich 20 ... 110°C bei konstantem Holzfeuchtigkeitsgehalt eine lineare Abhängigkeit zwischen der elektrischen Holzfeuchtigkeitsanzeige und der Temperatur des Holzes aufgestellt werden kann.

Bei den Versuchsreihen mit mittleren Holzfeuchtigkeiten $\bar{u} > 9\%$ liegen die sich als Schnittpunkt der Ausgleichsgeraden mit der 20°C-Achse (= Eichtemperatur des Meßgerätes) ergebenden Holzfeuchtigkeiten innerhalb der Genauigkeit der elektrischen Holzfeuchtigkeitsmessung von $u \pm 1,5\%$ (abs.). Da wegen der linearen Abhängigkeit ferner vermutet werden darf, daß sich Fehler in der Anzeige der Holzfeuchte bei 20°C auch in der Holzfeuchtigkeitsanzeige bei höheren Temperaturen im gleichem Sinne fortsetzen, wurde diese „Schnittpunktholzfeuchte bei 20°C“ als tatsächliche mittlere Holzfeuchtigkeit der Probe während der Versuchsreihe angesehen und der weiteren Auswertung zugrunde gelegt.

Bei den Versuchsreihen mit mittleren Holzfeuchtigkeiten $\bar{u} < 8\%$ dagegen bestehen große Differenzen zwischen u und der „Schnittpunktholzfeuchte bei 20°C“. Eine Überprüfung ergab, daß die Fehler durch die Ungenauigkeit der Anzeige des Siemens-Gerätes im Bereich niedriger Holzfeuchten hervorgerufen wurden. Aus diesem Grunde wurden die Versuchswerte dieser Versuchsreihen zu der Ermittlung der allgemeinen Abhängigkeit nicht mit herangezogen.

Die rechnerische Erfassung der Ausgleichsgeraden der Versuchswerte führt ebenfalls zu der Beziehung (5a), und zwar erhält man für den Temperaturbereich 20 bis 110°C einen Einfluß der Temperatur auf die Anzeige des elektrischen Holzfeuchtigkeitsmeßgerätes von:

$$u_A = (0,0041 \cdot u + 0,104) \cdot \theta + 0,92 \cdot u - 2. \quad (5c)$$

Der Einfluß höherer Temperaturen auf den elektrischen Widerstand des Holzes wurde ausschließlich an Fichtenholzproben untersucht; somit gilt die gefundene Abhängigkeit streng genommen nur für Fichtenholz. Da sich aber nach E. Nusser (21) die wichtigsten europäischen Holzarten bei 15°C in der elektrischen Holzfeuchtigkeitsanzeige innerhalb des Fehlerrahmens von etwa $\pm 1,5\%$ (abs.) halten und da ein gleicher Temperatureinfluß für alle Holzarten angenommen werden darf, kann auch bei den übrigen europäischen Holzarten mit der Gültigkeit des für die Fichte gefundenen Temperatureinflusses innerhalb des Fehlerrahmens $\pm 1,5\%$ Holzfeuchte gerechnet werden.

Eine in Bild 12 erfolgte Gegenüberstellung des von M. E. Dunlap und E. R. Bell angegebenen Temperatureinflusses — erfassbar durch Gleichung (5b) — und der eigenen Versuchsergebnisse — erfassbar durch Gleichung (5c) — zeigt, daß bis zu Holzfeuchtigkeiten von etwa 16% ein stärkerer Temperatureinfluß gefunden wurde, während bei Holzfeuchtigkeiten über 16% eine gute Übereinstimmung festzustellen ist.

Durch die Anwendung der Gleichung 5c auf die Näherungsgleichung der Eichkurve des Siemens-Holzfeuchtemessers (Gleichung 2b) ergibt sich als Temperatureinfluß bezogen auf den elektrischen Widerstand des Holzes die im Widerstandsbereich $5 \cdot 10^5 \dots 10^{10} [\Omega]$ gültige Abhängigkeit:

$$\lg [\lg (R) - 4] = -(0,000132 \cdot u + 0,00335) \cdot \theta - 0,0296 \cdot u + 1,073 \quad (2c)$$

Der Temperatureinfluß bei Feuchtigkeitsanzeigen über Fasersättigung

Zu den Versuchsreihen konnten nur Proben mit einer mittleren Holzfeuchtigkeit unter Fasersättigung herangezogen werden, da oberhalb Fasersättigung Gleichgewichte

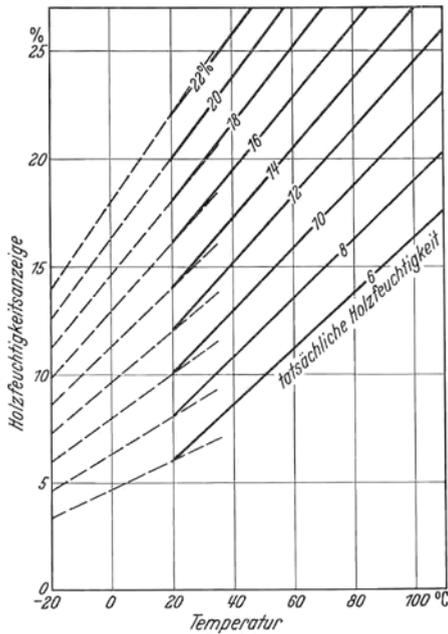


Bild 12. Abhängigkeit der Holzfeuchtigkeitsanzeige elektrischer Holzfeuchtigkeitsmesser von Feuchtigkeitsgehalt und Temperatur des Holzes. Gegenüberstellung des von M. E. Dunlap und E. R. Bell für den Temperaturbereich - 35... + 35° C angegebenen Temperatureinflusses und der eigenen Versuchsergebnisse für den Temperaturbereich 20...110° C.

zwischen Holz und Wasser — und somit gleichmäßige Feuchtigkeitsverteilungen im Probekörper — ausgeschlossen sind. Der elektrische Widerstand der Proben mittlerer Holzfeuchtigkeiten $\geq 15\%$, wurde aber durch den Einfluß höherer Temperaturen so weit erniedrigt, daß mit dem Zusatzgerät des Siemens & Halske-Holzfeuchtigkeitsmessers Feuchtigkeitsanzeigen über Fasersättigung gemessen werden mußten, die im Nomogramm 1 mit eingezeichnet wurden. Dabei konnte der wahrscheinliche Verlauf der Widerstandsabnahme relativ feuchten Holzes mit der Temperatur nur angedeutet werden, weil die geringe Zahl der Versuchswerte eine statistisch gesicherte Angabe verbietet.

Kontinuierliche elektrische Holzfeuchtigkeitsmessung während der künstlichen Holz Trocknung

Neben dem Darrverfahren hat die elektrische Holzfeuchtigkeitsmessung nach dem Widerstandsprinzip eine große Bedeutung für die Holzfeuchtigkeitskontrolle während des Fertigungsprozesses erlangt. In einem sehr wichtigen Abschnitt des Produktionsablaufes der künstlichen Holz Trocknung ist man aber bis heute meist auf die unständliche und zeitraubende Darrprobenentnahme angewiesen, da nur wenige Trocknungsanlagen eine laufende Bestimmung der mittleren Holzfeuchtigkeit während der Trocknung durch Wägung der gesamten Trockencharge zulassen. Auf der Grundlage von Extrapolationen des von M. E. Dunlap und E. R. Bell (6) angegebenen Temperatureinflusses hat als erster K. Egner (7) systematische Versuche einer elektrischen Holzfeuchtigkeitsmessung wäh-

rend einer künstlichen Schnittholz Trocknung bei 60° C (Fichte, Brettstärke 50 mm) durchgeführt und die laufende elektrische Messung des Holzfeuchtigkeitsgehaltes während der künstlichen Holz Trocknung vorgeschlagen.

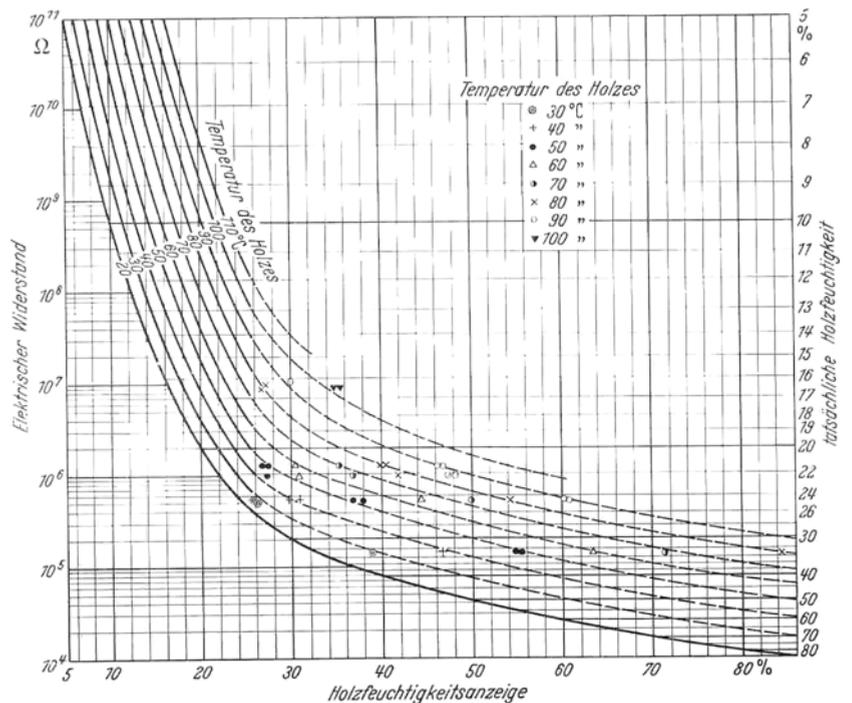
Im Gegensatz zu den oben beschriebenen Versuchen zur Ermittlung des Temperatureinflusses auf den elektrischen Widerstand des Holzes treten während des Trockenvorganges im Holz Temperatur- und Feuchtigkeitsgefälle auf. Zur Klärung der Frage, ob sich die hierdurch hervorgerufenen Einflüsse berücksichtigen lassen und somit eine elektrische Holzfeuchtigkeitskontrolle während der künstlichen Holz Trocknung erfolgversprechend erscheint, wurde der Verlauf der elektrischen Holzfeuchtigkeitsanzeige während dreier Schnittholz Trocknungen aufgenommen. Hierfür wurde die hochisolierende heizbare Durchführung, die bei Versuchsanordnung I Verwendung fand (Bild 6), in die Kammerwand einer Heißdampf Trocknungsanlage (Bauart Benno Schilde Maschinenbau AG, Bad Hersfeld) eingebaut und elektrische Feuchtigkeitsmessungen während der Endphase von zwei Versuchstrocknungen an Buchenschnittholz (Brettstärke 30 mm) und einer Versuchstrocknung an Kieferschnittholz (Brettstärke 45 mm) durchgeführt.

Als Elektroden dienten zwei versilberte Stahlschrauben (5 mm Φ), die ins Kernholz eines Brettes der Stapelmitte eingeschraubt wurden (Elektrodenabstand 24 mm bei senkrecht zur Faser verlaufender Meßstrecke, Eindringtiefe der Elektroden = gesamte Brettstärke). Der Anschluß der Elektroden in den Stromkreis des Meßgerätes erfolgte analog dem Schaltbild von Bild 8, nur besaß die Elektrodenleitung *b* zwischen Durchführung und Elektrode Neopren-Isolierung, da eine freie Führung dieser Leitung durch die Kammerluft nicht möglich war.

Die Messung der Innentemperatur des Holzes erfolgte mittels Thermoelement in unmittelbarer Nähe der Meßstrecke der elektrischen Holzfeuchtigkeitsmessung.

Am Ende jeder Versuchstrocknung wurde die mittlere Holzfeuchtigkeit u_M des Brettteiles, in den die Elektroden eingeschraubt waren, nach dem Darrverfahren bestimmt. Laufende Gewichtsmessungen des gesamten Trockengutes zeigten den Verlauf von u_M während der Trocknungen.

In Bild 13, 14 und 15 sind der Trocknungsverlauf in der Endphase der Versuchstrocknungen und die Versuchser-



Nomogramm 1: Ermittlung der tatsächlichen Holzfeuchtigkeit aus der Holzfeuchteanzeige des Siemens-Gerätes bei verschiedener Holztemperatur und Ermittlung des elektrischen Widerstandes.

gebnisse der elektrischen Holzfeuchtigkeitsmessung aufgezeichnet. Dabei wurden in den Diagrammen folgende Abkürzungen verwendet:

- T_{trocken} [°C] = Trockentemperatur der Kammerluft,
- T_{feucht} [°C] = Feuchttemperatur der Kammerluft,
- $T_{\text{im Holz}}$ [°C] = Innentemperatur des Holzes,
- u_m [%] = mittlere Holzfeuchtigkeit des Brettteiles, in den die Elektroden eingeschraubt waren,
- $u_{s\&H}$ [%] = Holzfeuchtigkeitsanzeige des Siemens-Gerätes,
- $u_{\text{max } s\&H}$ [%] = Holzfeuchtigkeitsanzeige des Siemens-Gerätes auf 20°C bezogen = maximaler Feuchtigkeitsgehalt des Brettquerschnittes zwischen den Elektroden,
- u_{G1} [%] = dem Kammerklima entsprechende Gleichgewichtsholzfeuchtigkeit,
- $u_{m \text{ s\&H}}$ [%] = aus $u_{\text{max } s\&H}$ und u_{G1} errechnete mittlere Holzfeuchtigkeit.

In trocknendem Holz sind Temperatur- und Feuchtigkeitsgefälle im allgemeinen einander entgegengerichtet. Wie die Untersuchungen von K. Egner (7) bestätigen, liegt der geringste elektrische Widerstand zwischen den Schrauben-

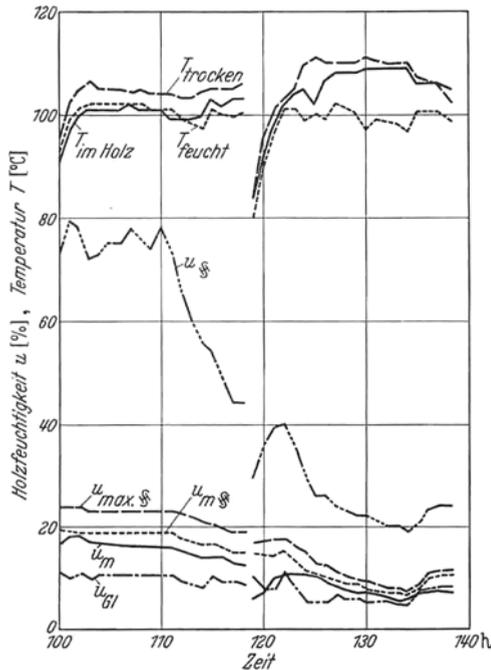


Bild 13. Versuchstrocknung 1 (Buche, 30 mm dick).

elektroden, der wegen der Parallelschaltung der Einzelwiderstände praktisch den Gesamtwiderstand der Messung bestimmt, in der Schicht maximaler Holzfeuchtigkeit in der Brettmitte, denn: 1) ist das Temperaturgefälle in der Regel schwächer ausgeprägt als das Feuchtigkeitsgefälle, und 2) erzielt bei Holzfeuchtigkeiten unter Fasersättigung erst ein Temperaturgefälle von 5 bis 10°C auf den elektrischen Widerstand des Holzes die Wirkung eines Feuchtigkeitsgefälles von 1% Holzfeuchtigkeit. Aus diesem Grunde wurde angenommen, daß die Feuchtigkeitsanzeigen des elektrischen Holzfeuchtigkeitsmeßgerätes in ihrer Höhe durch den maximalen Feuchtigkeitsgehalt in der Brettmitte und durch die Temperatur des Holzes an dieser Stelle bestimmt sind. Bezieht man daher die Feuchtigkeitsanzeigen des Siemens-Gerätes $u_{s\&H}$ durch Berücksichtigung des Temperatureinflusses auf 20°C, so erhält man die maximale Holzfeuchtigkeit in der Brettmitte $u_{\text{max } s\&H}$. Da die Feuchtigkeitsverteilung über die Brettstärke

etwa nach einer Parabel 2. Ordnung verläuft (13) und da die Holzfeuchtigkeit in den Randzonen des Brettes der Gleichgewichtsholzfeuchte des jeweiligen Kammerklimas u_{G1} entsprechen dürfte, läßt sich aus $u_{\text{max } s\&H}$ und u_{G1} leicht der mittlere Feuchtigkeitsgehalt des Brettes $u_{m \text{ s\&H}}$ errechnen.

Natürlich können die Messungen während der künstlichen Holz Trocknungen nur als Testversuche gewertet werden. Um allgemeine Aussagen über den Fehler $\Delta u = u_m - u_{m \text{ s\&H}}$ machen zu können, der bei der elektrischen Holzfeuchtigkeitsmessung während der künstlichen Holz Trocknung auftritt, sind weitere Versuchstrocknungen erforderlich.

Die bisher gewonnenen Ergebnisse unserer Untersuchungen lassen aber folgendes erkennen:

1. Bei Holzfeuchtigkeiten anzeigen des Meßgerätes unter 25% Holzfeuchte ist eine Holzfeuchtigkeitsbestimmung im allgemeinen Fehlerrahmen der elektrischen Holzfeuchtemessung von $\pm 1,5\%$ (abs.) möglich, soweit die Meßwerte nicht durch Oberflächenfeuchtigkeit — hervorgerufen z. B. durch Dämpfen (Versuchstrocknung 1: 136. bis 138. Trocknenstunde) — verfälscht werden.
2. Wenn die maximalen Holzfeuchtigkeiten im Brett zwar unter Fasersättigung liegen, die Feuchtigkeitsanzeigen des Meßgerätes als Folge höherer Temperaturen aber über

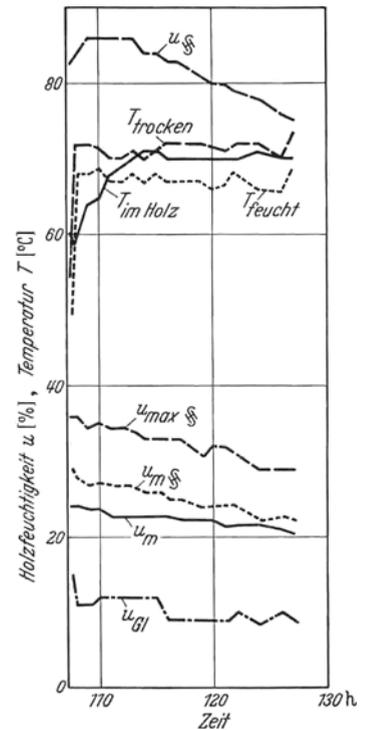


Bild 14. Versuchstrocknung 2 (Buche, 30 mm dick). Bei der Ermittlung der Gleichgewichtsholzfeuchtigkeit u_{G1} wurde ihre Verminderung, eingetreten durch Dämpfen des Holzes bei 100°C vor der Trocknung, berücksichtigt.

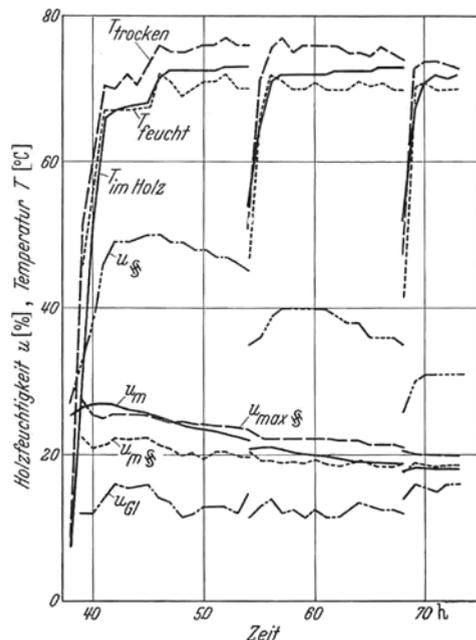


Bild 15. Versuchstrocknung 3 (Kiefer, 45 mm dick).

25% Holzfeuchte betragen — wenn also zu den Messungen das Siemens-Zusatzgerät herangezogen werden muß —, erweitert sich der auftretende Fehlerrahmen bei der elektrischen Holzfeuchtmessung bis auf etwa $\pm 3\%$ (abs.). Ein größerer Fehler ist bei Versuchstrocknung 1 um die 120. Trocken-h dadurch eingetreten, daß die Trocknung bei der 118. h für 8 h unterbrochen werden mußte und beim nochmaligen Trocknungsbeginn erst gedämpft wurde.

3. Bei maximalen Holzfeuchtigkeiten im Brett oberhalb Fasersättigung (Versuchstrocknung 2: bis etwa zur 119. Trocken-h) ist infolge der Widerstandscharakteristik des Holzes und der unkontrollierbaren Feuchtigkeitsverteilung im Brett eine Ermittlung der mittleren Holzfeuchtigkeit mittels elektrischer Holzfeuchtmessung mit großen Fehlern verbunden.

Die Testversuche führen zu der Schlußfolgerung, daß die elektrische Holzfeuchtmessung mit genügender Genauigkeit die drei Voraussetzungen zur technisch und wirtschaftlich richtigen Steuerung einer künstlichen Holz-trocknung wohl vermitteln kann; nämlich:

1. die Kenntnis des Zeitpunktes, zu dem das Trockengut den Fasersättigungsbereich unterschreitet,
2. die Kenntnis des groben Verlaufes des mittleren Feuchtigkeitsgehaltes zwischen Fasersättigung und Endfeuchte und
3. die Kenntnis des Zeitpunktes, zu dem das Trockengut die angestrebte Endfeuchte erreicht.

Im Falle praktischer Messungen wäre es notwendig, mehrere Meßstellen am Trockenstapel zu verteilen und an einen Umschalter anzuschließen, um Zufälligkeiten einer Einzelmessung zu erkennen. Eine automatische Registrierung z. B. mittels schreibender Meßgeräte, die keine technischen Schwierigkeiten bereitet, erleichtert dabei die Kontrolle (Bild 16).

Die Ergebnisse unserer Untersuchungen über den physikalischen Zusammenhang zwischen Temperatur und elektrischem Widerstand des Holzes können vermutlich nicht nur auf die Schnittholz-trocknung nutzbringend angewendet werden. Es scheint uns, daß besonders die Furnier-trocknung notwendig einer laufenden Messung und Kontrolle der Furnierfeuchtigkeit bedarf. In den letzten Jahren sind auch schon verschiedene Vorschläge zu diesem Problem

vorgelegt worden (11, 37, 38). Die gefundene stetige Abhängigkeit des elektrischen Widerstandes des Holzes von Feuchtigkeitsgehalt und Temperatur ermöglicht es jetzt, an heißen Furnieren im Auslaufsfeld des Trockners die Holzfeuchtigkeit elektrisch zu bestimmen. Da Temperatur- und Feuchtigkeitsinfluß auf den elektrischen Widerstand des Holzes einander entgegengerichtet sind, ist hierbei die Kenntnis der Furniertemperatur von besonderer Bedeutung, weil Feuchtigkeitsnester in der Furnierbahn geringere Temperaturen besitzen und somit bei Annahme einer konstanten Furniertemperatur nicht in ihrem vollen Ausmaß vom Meßgerät angezeigt werden. Auch eine geeignete Elektrodenform für eine kontinuierliche Messung an der laufenden Materialbahn müßte entwickelt werden, wobei für derartige Elektroden möglicherweise Korrekturen der Eichkurve erforderlich sind.

Zusammenfassung

Die vorstehende Arbeit brachte zunächst eine Zusammenstellung und Diskussion unserer bisherigen Kenntnis über den elektrischen Widerstand von Holz, der bisher gewonnenen Ergebnisse auf dem Gebiet der elektrischen Holzfeuchtigkeitsbestimmung und der verschiedenen Einflußgrößen auf die Anzeige elektrischer Holzfeuchtigkeitsmeßgeräte nach dem Widerstandsprinzip.

In den folgenden Untersuchungen wurde — analog zu dem von M. E. Dunlap und E. R. Bell für den Temperaturbereich $-35 \dots +35^\circ\text{C}$ aufgestellten Nomogramm — auch für den Temperaturbereich $20 \dots 110^\circ\text{C}$ eine lineare Abhängigkeit der Anzeige elektrischer Holzfeuchtigkeitsmeßgeräte von der Temperatur des Holzes bei konstantem Holzfeuchtigkeitsgehalt gefunden; es ergab sich bei Holzfeuchtigkeiten bis zu etwa 16%, ein stärkerer Temperatureinfluß, als ihn M. E. Dunlap und E. R. Bell angeben, während bei Holzfeuchtigkeiten über 16%, eine gute Übereinstimmung festzustellen ist. Für die Temperatur-Widerstands-Holzfeuchtigkeitsabhängigkeit ließ sich eine empirische Gleichung aufstellen.

Auf den Versuchsergebnissen aufbauend erfolgten kontinuierliche elektrische Holzfeuchtigkeitsmessungen während dreier künstlicher Holz-trocknungen. Dabei zeigte es sich, daß die elektrische Holzfeuchtigkeitsmessung mit genügender Genauigkeit die drei Voraussetzungen zur technisch und wirtschaftlich richtigen Steuerung einer künstlichen Holz-trocknung wohl vermitteln kann, nämlich: 1. die Kenntnis des Zeitpunktes, zu dem das Trockengut den Fasersättigungsbereich unterschreitet, 2. die Kenntnis des groben Verlaufes des mittleren Feuchtigkeitsgehaltes zwischen Fasersättigung und Endfeuchte und 3. die Kenntnis des Zeitpunktes, zu dem das Trockengut die angestrebte Endfeuchte erreicht. Auf die Anwendungsmöglichkeit der kontinuierlichen elektrischen Holzfeuchtigkeitsmessung zur Kontrolle der Furniertrocknung wird hingewiesen.

Schrifttum

1. Briggs, D. B.: Surface Conductance. Colloid Symposium Monograph Vol. VI. The Chemical Catalog Company, New York, 1928. — 2. Brown, H. P., A. J. Panshin und G. C. Forsaith: Textbook of Wood Technology, Vol. 2, 1952. — 3. Clark, J. D. und J. W. Williams: The Electrical Conductivity of Commercial Dielectrics and its Variation with Temperature. The Journal of Physical Chemistry Bd. 37 (1933), H. 4, S. 419/431. — 4. Dawe, E. W.: The Status of the Moisture Meters. Wood (London) Bd. 15 (1950), H. 9, S. 330. — 5. DeLumborst, W. J.: Measuring Moisture with Electric Meters. Wood (Chicago) Bd. 4 (1949), H. 9, S. 18/19, 40. — 6. Dunlap, M. E. und E. R. Bell: Electrical Moisture Meters for Wood. U.S. Dep. of Agriculture, For. Prod. Lab., Madison, Wis., Rep. No. 1660, October 1951. — 7. Eguier, K.: Zur Steuerung der künstlichen Holz-trocknung. Holz-Zbl.

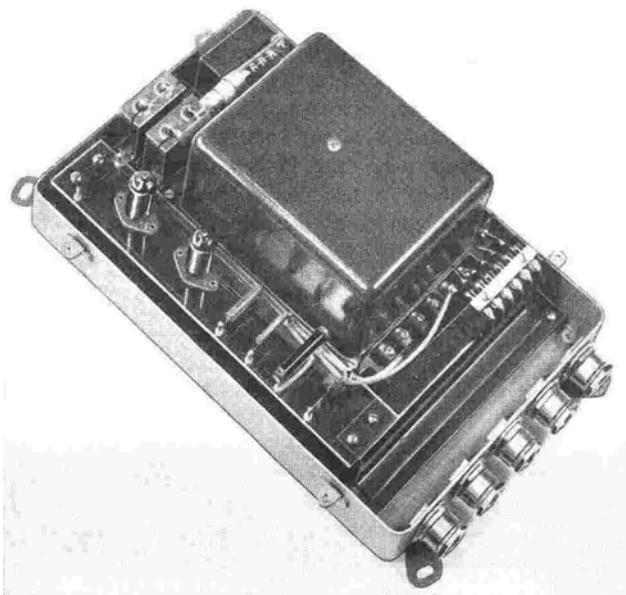


Bild 16. Elektrischer Schnellfeuchtemesser mit Gleichspannungsverstärker mit Netzanschlußgerät, Bauart: Siemens & Halske.

- Jg. 79 (1953) Nr. 83, S. 911/913. — 8. Graham, R. D.: Resin Coated Electrodes. Wood (Chicago) Bd. 5 (1950), H. 9, S. 20, 46/47. — 9. Hasselblatt, M.: Der Wasser-Dampfdruck und die elektrische Leitfähigkeit des Holzes in Abhängigkeit von seinem Wassergehalt. Zeitschr. f. anorg. und allg. Chemie Bd. 154 (1926), S. 375/385. — 10. Keylwerth, R.: Die Kammertrocknung von Schnittholz (Betriebsblatt). Holz als Roh- und Werkstoff Bd. 9 (1951), H. 7, S. 289/292. — 11. Knight, R. A. G., T. F. S. Carruthers und A. M. Thomas: The Risborough Naiad. Wood (London) Bd. 16 (1951), H. 14, S. 416/417. — 12. Kohlrausch, F.: Praktische Physik, Band 2, Berlin und Leipzig 1943, S. 320. — 13. Kollmann, F.: Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe, 2. Aufl., Bd. I, Berlin 1951: Springer-Verlag. — 14. Kühne, H. und H. Strässler: Über die Bestimmung der Holzfeuchtigkeit. Schweizer Archiv Bd. 18 (1952), H. 8, S. 264/275. — 15. Lange, W.: Die elektrische Holzfeuchtigkeitsmessung nach dem Widerstandsverfahren. Siemens & Halske AG. Wernerwerk für Meßtechnik 1953. — 16. Murphy, E. J.: Electrical Conduction in Textiles III. The Journal of Physical Chemistry Bd. 33 (1929), S. 509/532. — 17. Murphy, E. J. und H. H. Lowry: The Complex Nature of Dielectric Absorption and Dielectric Loss. The Journal of Physical Chemistry Bd. 34 (1930), H. 3, S. 598/620. — 18. Murphy, E. J. und A. C. Walker: Electrical Conduction in Textiles. The Journal of Physical Chemistry Bd. 32 (1928), H. 12, S. 1761/1786. — 19. Myer, J. E. und L. W. Rees: Electrical Resistance of Wood with Special Reference to the Fiber-Saturation Point. N. Y. State College of Forestry, Syracuse, Univ. Technical Publication No. 19, 1926. — 20. Nowak, A.: Entwicklung der Meßgeräte zur Feststellung der Holzfeuchtigkeit. Mitteilungen des Fachausschusses für Holzfragen beim VDI und DfV, H. 28, Berlin 1940, S. 11ff. — 21. Nusser, E.: Die Bestimmung der Holzfeuchtigkeit durch die Messung des elektrischen Widerstandes. Forschungsberichte Holz. Fachausschuß für Holzfragen, H. 5, Berlin 1938. — 22. Ogura, T. und K. Onuma: On the Computation of Moisture Distribution in Wood by Means of Electric Resistance. Bulletin of the Government Forest Experiment Station Meguro, Tokyo, No. 53, Juli 1953. — 23. Seborg, C. O. und A. J. Stamm: Sorption of Water Vapor by Paper-Making Materials. Ind. and Eng. Chem. Bd. 23 (1931), H. 11, S. 1274. — 24. Stamm, A. J.: An Electrical Conductivity Method of Determining the Moisture Content of Wood. Ind. and Eng. Chem., Analytical Edition Bd. 2 (1930), H. 3, S. 240ff. — 25. Stamm, A. J.: Colloid Chemistry of Cellulosic Materials. U.S. Dep. of Agriculture, Miscellaneous Publication No. 240, Washington D. C., Juni 1936. — 26. Stamm, A. J.: Electroendosmose through Wood Membranes. Colloid Symposium Monograph Vol. IV, The Chemical Catalog Company, New York 1926. — 27. Stamm, A. J.: The Capillary Structure of Softwoods. Journal of Agricultural Research Bd. 38 (1929), H. 1, S. 23/67. — 28. Stamm, A. J.: The Electrical Resistance of Wood as a Measure of its Moisture Content. Ind. and Eng. Chem. Bd. 19 (1927), H. 9, S. 1024/1025. — 29. Stamm, A. J.: The Fiber-Saturation Point of Wood as obtained from Electrical Conductivity Measurements. Ind. and Eng. Chem., Analytical Edition Bd. 1 (1929), H. 1, S. 94/97. — 30. Suits, C. G. und M. F. Dunlap: Gen. El. Rev. 1931: 706, zit. bei F. Kollmann (13). — 31. Takechi, O. und O. Inose: Analyses on the Fundamental Properties of Electric Resistance of Wood II (On the Electric Resistance of Wood in Relation to the Moisture Content and the Temperature). Scientific Reports of the Matsuyama Agricultural College, No. 10, March 1953, S. 13/33. — 32. Tubandt, C.: Leitfähigkeit und Überführungszahlen in festen Elektrolyten. Handbuch der Experimentalphysik, Bd. 12, 1. Teil III, Leipzig 1932: S. 384/469. — 33. Walker, A. C.: Effect of Atmospheric Humidity and Temperature on the Relation between Moisture Content and Electrical Conductivity of Cotton. The Journal of the Textile Institute (Manchester) Bd. 24 (1933), H. 3, T 145/T 160. — 34. Walker, A. C.: Moisture in Textiles. Journal of Applied Physics Bd. 8 (1937), H. 4, S. 261/268. — 35. Walker, A. C. und M. H. Quell: Influence of Ash Constituents on the Electrical Conduction of Cotton. The Journal of Textile Institute (Manchester) Bd. 24 (1933), H. 3, S. T 123/T 130. — 36. Yavorsky, J. M.: A Review of Electrical Properties of Wood. State University of New York, College of Forestry, Syracuse, Technical Publication No. 73, 1951. — 37. Stetig arbeitendes Anzeigegerät für die Holzfeuchtigkeit. Holz als Roh- und Werkstoff Bd. 10 (1952), H. 6, S. 252. — 38. Elektrische Feuchtigkeitsmesser zur kontinuierlichen Messung an laufenden Materialbahnen. Holz als Roh- und Werkstoff Bd. 13 (1955), H. 3, S. 113. —

Untersuchungen über den Harzaustritt bei der Holz Trocknung

Von Boris Koljo, Stockholm

Mitteilung aus dem Mechanisch-technologischen Institut der Schwedischen Holzforschungsanstalt

Einleitung — Vorkommen des Harzes — Einige Tatsachen über die chemische Zusammensetzung des Harzes — Untersuchung über den Harzaustritt bei Kiefern — Kernholz bei verschiedenen Temperaturen — Bestimmung der Erweichungstemperatur des Harzes verschiedener Nadelhölzer — Vorgang des Harzaustritts — Untersuchungen über Farbveränderungen des Harzes — Zusammenfassung — Schrifttum.

Einleitung

In der schwedischen Sägeindustrie hat man die Beobachtung gemacht, daß die Anwendung von höheren Temperaturen bei der künstlichen Holz Trocknung mit feuchter Luft für die Export-Schnittware ungünstige Eigenschaften zur Folge hat. Es handelt sich um dunkle Verfärbung des Holzes, vermehrten Harzaustritt und Ausfall von trockenen Ästen.

Auf Grund gesammelter Erfahrungen schätzt man die Temperatur, die nicht überschritten werden soll, auf 50°C. Dieses gilt mit besonderer Berücksichtigung des Harzaustritts. Nähere Untersuchungen über den Harzaustritt sind aber nicht durchgeführt worden.

Auch im Zusammenhang mit der Hochtemperaturtrocknung sind diese Erscheinungen diskutiert worden.

Über den Temperatureinfluß auf die Holzfarbe ist in der Fachliteratur mehrfach das Wort ergriffen worden. Zu

nennen wären die Arbeiten von C. G. Schwalbe und W. Ender (1), F. Kollmann (2) und A. J. Stamm (3). Neuere Untersuchungen von H. Kübler (4) und F. Kollmann und L. Malmquist (5) mit spektographischen Messungen der „relativen Weiße“ im Zusammenhang mit hohen Trocknungstemperaturen haben gezeigt, daß die Abnahme der „relativen Weiße“, d. h. die rötliche Verfärbung im Bereich bis 70°C gering, von 70° bis 140° mäßig und über 140° bis 160° stark ist. Laut K. Egner (6) und H. Kübler (4) ist der wesentliche Grund für die Holzverfärbung im Zusammenhang mit der Trocknung mehr in der Holz- und Luftfeuchtigkeit als in der Temperatur zu suchen.

Betreff des Ausfalls der Äste hat F. Kollmann (5) gefunden, daß festgewachsene gesunde Äste bei der Trocknung mit Temperaturen über 100°C sich nicht lockern, Schwarzäste dagegen fallen oberhalb 100° mit vermehrter Häufigkeit aus. Das gilt sowohl für Laub- als auch für Nadelhölzer.

Was den vermehrten Harzaustritt gewisser Nadelhölzer (Kiefer und Fichte) bei Hochtemperaturtrocknung betrifft, so fehlen diesbezügliche Untersuchungen. Im Schrifttum findet man nur spärliche Hinweise, so z. B. beschreibt K. Egner (6) einen Trocknungsversuch von 24 mm Fichtenbrettern bei 100°C von $u_a = 30,5\%$ auf $u_r = 10,3\%$: „Die