



RAPPORT

Anders Rosenkilde

Elektriska egenskaper hos trä

Träteknik

Anders Rosenkilde

ELEKTRISKA EGENSKAPER HOS TRÄ

Träteknik, Rapport P 0310037

ISSN 1102 - 1071

ISRN TRÄTEK - R -- 03/037 -- SE

Keywords

dielectric properties
electrical properties
electrical resistance
microwave drying

Stockholm oktober 2003

Rapporter från Träteknik – Institutet för träteknisk forskning – är kompletta sammanställningar av forskningsresultat eller översikter, utvecklingar och studier. Publicerade rapporter betecknas med I eller P och numreras tillsammans med alla utgåvor från Träteknik i löpande följd.

Citat tillåtes om källan anges.

Reports issued by the Swedish Institute for Wood Technology Research comprise complete accounts for research results, or summaries, surveys and studies. Published reports bear the designation I or P and are numbered in consecutive order together with all the other publications from the Institute.

Extracts from the text may be reproduced provided the source is acknowledged.

Träteknik – Institutet för träteknisk forskning – betjänar sågverk, trämanufaktur (snickeri-, trähus-, möbel- och övrig träförädlingsindustri), skivtillverkare och byggindustri.

Institutet är ett icke vinstdrivande bolag med industriella och institutionella kunder. FoU-projekt genomförs både som konfidentiella uppdrag för enskilda företagskunder och som gemensamma projekt för grupper av företag eller för den gemensamma branschen. Arbetet utförs med egna, samverkande och externa resurser. Träteknik har forskningsenheter i Stockholm, Växjö och Skellefteå.

The Swedish Institute for Wood Technology Research serves sawmills, manufacturing (joinery, wooden houses, furniture and other woodworking plants), board manufacturers and building industry.

The institute is a non-profit company with industrial and institutional customers. R & D projects are performed as contract work for individual industrial customers as well as joint ventures on an industrial branch level. The Institute utilises its own resources as well as those of its collaborators and outside bodies. Our research units are located in Stockholm, Växjö and Skellefteå.

Innehållsförteckning

	Sid
Sammanfattning	3
Inledning	3
Resistans	4
Fuktkvotens inverkan	4
Temperatures inverkan	5
Övrig påverkan	7
Tillämpningar	9
Dielektricitet	9
Fuktkvotens inverkan	13
Temperatures inverkan	13
Densitetens inverkan	14
Tillämpningar	14
Magnetisk	15
Piezoelektriska egenskaper	15
Litteratur	17

Sammanfattning

De elektriska egenskaperna i trä har stor betydelse för framförallt mätning av fuktkvot och torkning. De elektriska egenskaperna har en stark koppling till träets fuktinnehåll, temperatur, kemiska innehåll och densitet. Föreliggande arbete omfattar en litteraturstudie över träets elektriska egenskaper. Tonvikt har lagts på de egenskaper som har fått störst betydelse för praktisk tillämpning i träindustrin.

Inledning

Träets elektriska egenskaper brukar indelas enligt följande: resistans, dielektricitet, magnetism och piezoelektricitet. Resistans och dielektricitet är de som har fått störst användning i olika tillämpningar. Träets resistiva egenskaper används i elektriska fuktkvotmätare som idag är en världsprodukt, det är därför av väldigt stor vikt att man har kännedom om hur träets resistans beror av träets fuktkvot, temperatur, densitet och kemiska innehåll. Kraven på mätnoggrannhet ökar i takt med ökad specificering av träprodukter, därför har det på senare år tagits fram nya forskningsresultat som skall ligga till grund för ett förbättrat mätinstrument.

De höga kapitalkostnaderna för träprodukterna har medfört att snabba torkningsmetoder har varit föremål för forskning och utveckling. Mikrovågstorkning är en mycket snabb metod att torka trä med. Problemet har varit att metoden varit alldeles för dyr att tillämpa på en kostsam utrustning. Styrningen av mikrovågstorkningen har också varit ett problem med ojämn uppvärmning, vilket kan leda till inre skador eftersom vedstrukturen inte tål hur snabb torkning som helst.

Målet med detta arbete har varit att försöka beskriva hur de elektriska egenskaperna verkar i trä och visa på en del av den litteratur som finns på området.

Resistans

Träets ledningsförmåga påverkas av ett flertal faktorer där fuktkvoten är den som har klart störst inverkan. De inre faktorer som kommer att behandlas här är fuktkvoten, temperaturen, mätriktningen, kemiskt innehåll och densitet. De yttre faktorerna är elektrodtyp, kontaktryck, träets dimension, elektrolytiska effekter, mätspänningens storlek och varaktighet.

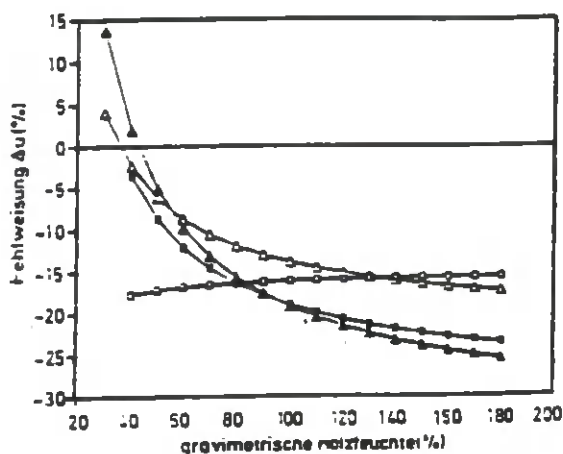
Fuktkvotens inverkan

Resistansen varierar kraftigt med ändrat fuktinnehåll i träet, ökad fuktkvot ger lägre resistans och sänkt fuktkvot ger högre resistans. Fuktkvoten är den faktor som har den klart största inverkan på resistansen. När fuktkvoten sjunker under fibermättnad (ungefär 30 % fuktkvot) ned till 7 % fuktkvot ökar resistansen med en faktor en miljon. Över fibermättnadsfuktkvoten och upp till dess träcellens hålrum lumen är full med fritt vatten minskar resistansen endast med en faktor 50 (James, 1988).

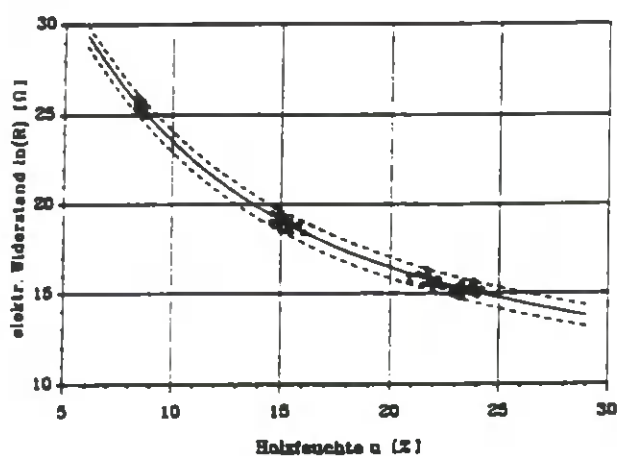
Vid fuktkvoter under fibermättnad sker laddningstransporten med joner i cellväggen. Vid fuktkvoter över fibermättnad sker även laddningstransport med joner i det fria vattnet i cellumen. Denna laddningstransport påverkas enligt Skaar mycket av typen av joner som finns i vattnet. Trä innehåller små mängder vattenlösliga elektrolyter som starkt inverkar på laddningstransporten i det fria vattnet (Kollmann, 1984). Det är därför mycket svårt att mäta fuktkvoten i trä med elektrisk resistans vid fuktkvoter över fibermättnad.

Böhner *et al* (1993) visade att felvisningen i uppmätt fuktkvot varierade från 5 till 25 % vid fuktkvoter över 30 % jämfört med torrviktsmetoden, se figur 1 nedan. Vid fuktkvoter mellan 7 och 18 % är felvisningen mindre än 2 % i fuktkvot enligt Du *et al.* (1991a). I figur 2 visas resistansen som funktion av fuktkvoten för gran enligt Du *et al.* (1991b). Genom mätningar har sambandet mellan fuktkvot och resistans kunnat bestämmas med regressionsanalys. Det första arbetena publicerades av Hiruma (1915), Hasselblatt (1926) och Stam (1927). Sedan dess har flera artiklar publicerats med resistanskurvor för olika träslag. Bland de senaste arbetena finns två artiklar av Du *et al* (1991a, b), där ekvationen anges för sambandet fuktkvot – resistans för bl a furu och gran. Nedan visas i ekvation (1) resistansformeln för gran enligt Du *et al* (1991b). Ett annat arbete om resistanskurvor för furu och gran publicerades av Samuelsson (1990, 1993).

$$\ln(R) = 28,59 \cdot \exp(-0,1350 \cdot u) - 0,153 \cdot u + 17,60 \quad (1)$$



Figur 1. Felvisning i fuktkvot med resistansmätning jämfört med torrviktsmetoden.



Figur 2. Resistansens beroende av träets fuktkvot för gran (Du et al, 1991).

Temperaturens inverkan

Resistansen i trä minskar med stigande temperatur, detta är tvärt emot än för metaller. I metallerna är det elektroner som är laddningsbärare medan det i trä är joner. I trä finns det två former av joner, bundna och fria. Endast de fria jonerna kan transportera laddningar. Antalet fria joner ökar med stigande temperatur, allt enligt Clark och Williams. De definierade den energi som krävs för att frigöra en mol bundna joner, den energin kallas aktiveringsenergi E . Definitionen redovisas i ekvation (2).

Vid fuktkvoter över 10 % minskar aktiveringsenergin med ökande temperatur och fuktkvot (Vermaas, 1983), se figur 3. Minskningen i aktiveringsenergi med stigande fuktkvot beror huvudsakligen av växelverkan mellan vattenmolekyler och joner, vilket försvagar bindningen mellan jonerna och dess sorptionsplatser (Lin, 1965).

$${}^{10}\log R = C + \frac{E}{2,303 \cdot R' \cdot T} \quad (2)$$

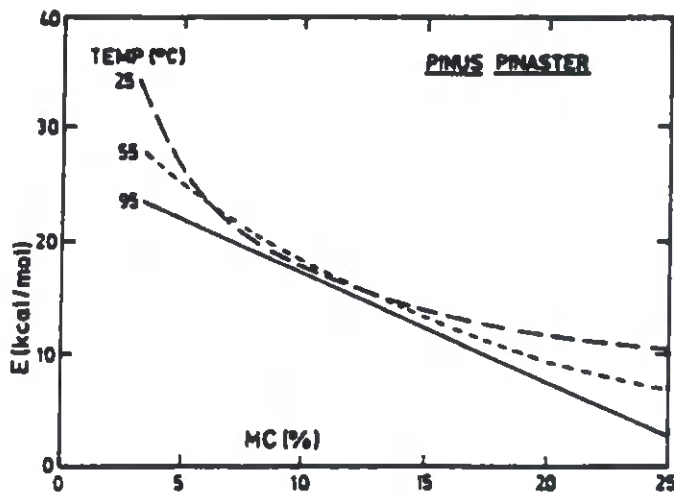
R = resistans i ohm

C = konstant

R' = gas konstant = 1,9858 kcal/kmol °K

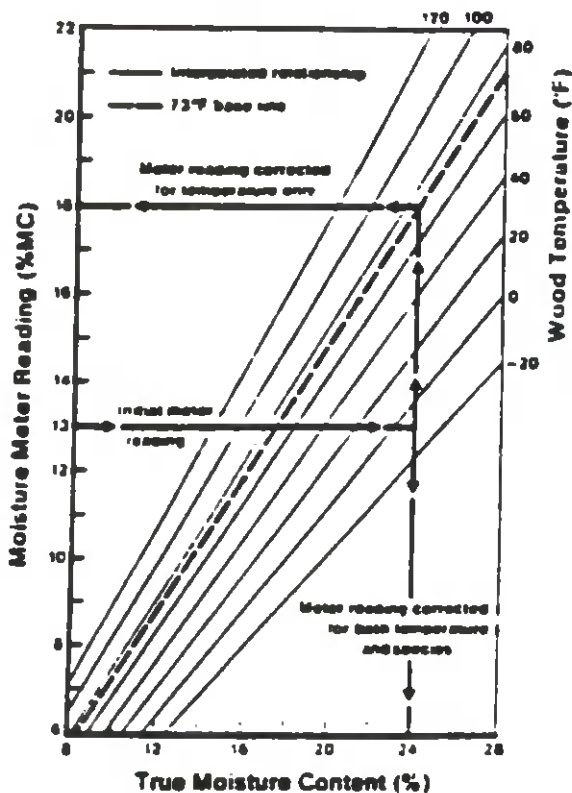
T = absolut temperatur °K

E = aktiveringsenergi kcal/kmol



Figur 3. Aktiveringsenergins beroende av fuktkvot vid tre olika temperaturer (Vermaas, 1983).

Sambandet för resistans i trä och dess temperatur vid fix fuktkvot har varit föremål för många undersökningar. Det arbete som använts mest i praktiken är det av James, (1963). Pfaff och Garrahan (1986) gjorde ett mycket stort arbete där de beskrev hur mätning av fuktkvot med resistansmetoden ska korrigeras för träets temperatur. Detta arbete förbättrade korrigeringen av fuktkvoten vid temperaturer under 0 °C. Vermaas har publicerat ett flertal arbeten där ett från 1983 beskriver temperaturberoendet mycket väl. I figur 4 visas effekten av träets temperatur på avläst fuktkvot för resistiv fuktkvotsmätare.



Figur 4. Effekten av träets temperatur vid fuktkvotsmätning med el-resistiv fuktkvotsmätare för black spruce (Pfaff och Garrahan, 1986).

Övrig påverkan

Mätningens i träet i förhållande till årsringarna påverkar resistansen. Stam (1960) visade att den axiella ledningsförmågan var 1,9 till 3,2 gånger större än i radiell riktning och 2,1 till 3,9 gånger större än i tangentiell riktning.

Kemiskt innehåll i trä påverkar resistansen. Venkateswaran (1973) och Vermaas (1983) visade båda att ökad ligninhalt ger ökad ledningsförmåga. Mineralinnehållet i trä varierar mycket mellan träslagen både med hänsyn till sort och antal (Langwig, 1971). Därför kan man förvänta sig att olika träslag skall ha olika ledningsförmåga. Langwig (1973) har kommit fram till att den elektriska ledningsförmågan är direkt proportionell mot antalet joner, baserat på mätningar av ledningsförmåga och mineralinnehåll.

Densiteten inverkar inte nämnvärt på resistansen för ett fixt träslag. Detta har konstaterats av Venkateswaran (1972) och Langwig (1971) m fl.

De yttre faktorerna som påverkar resistansmätning i trä är elektrodernas utseende, kontakttryck mellan trä och elektrod, träbitens storlek och dimension, elektrolytiska effekter vid elektroderna, mätspänningens storlek och varaktighet (Vermaas, 1975). De viktigaste faktorerna av de ovan nämnda är de elektrolytiska effekterna och mätspänningens storlek och varaktighet. De elektrolytiska effekterna medför en polarisering av joner av olika slag vid

elektrodena, vilket i sin tur medför att strömmen minskar och resistansen ökar exponentiellt med tiden (Welsh, 1978). Welsh föreslog ekvation (3) för beskrivning av strömmens beroende av varaktigheten i mätspänningen.

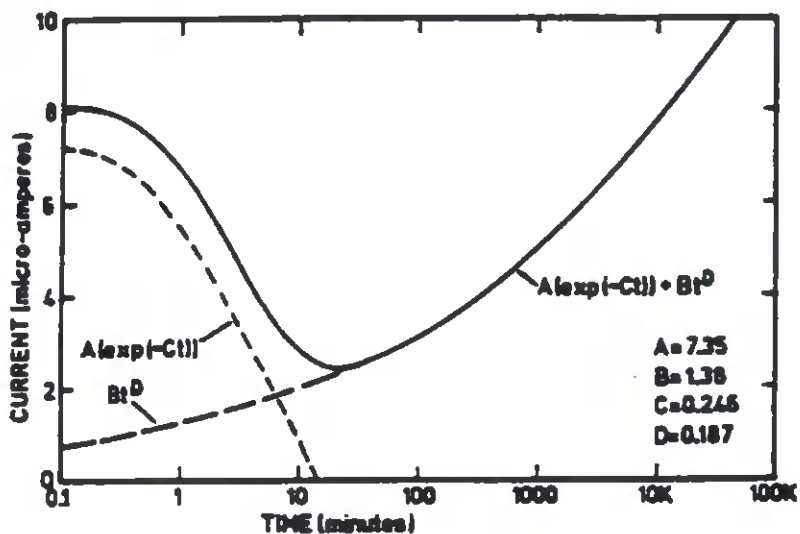
$$I = A \cdot \exp(-C \cdot t) + B \cdot t^D \quad (3)$$

I = strömmen

t = tiden

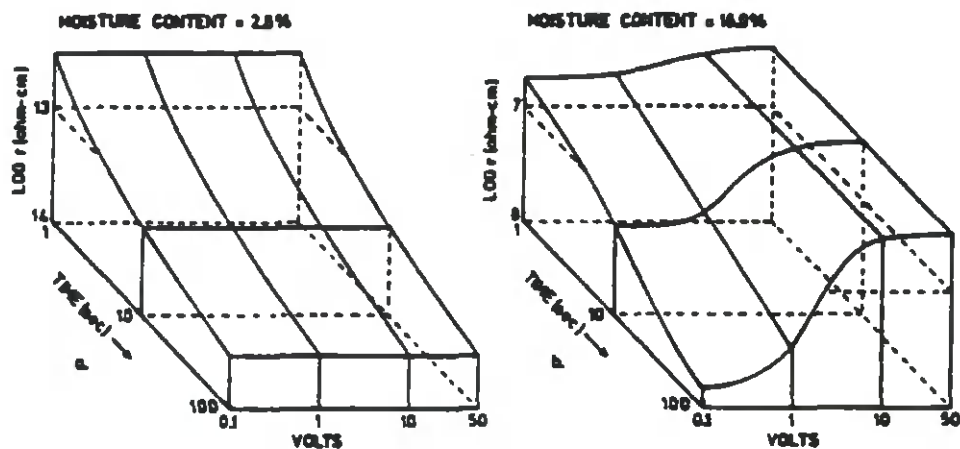
A , B , C och D är konstanter.

I figur 5 visas ekvation (3) som en graf.

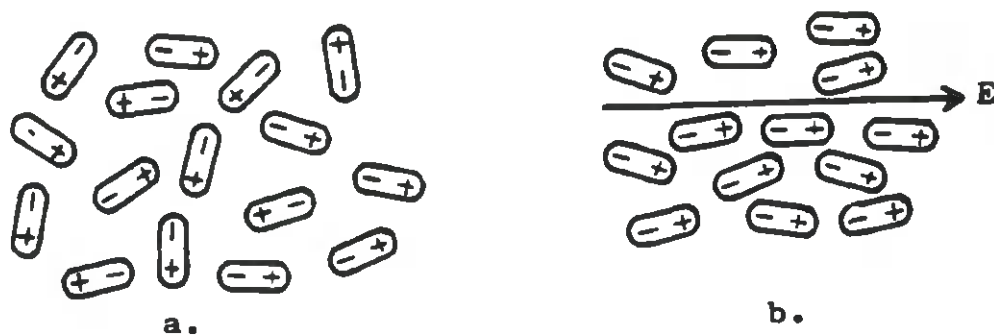


Figur 5. Strömmen som funktion av tiden vid konstant mätspänning i trä (Welsh, 1978).

Mätspänningens storlek och varaktighet och dess påverkan på resistansen visas i figur 6 där det framgår att resistansen ökar med tiden och att resistansen minskar med ökad mätspänning vid högre fuktkvoter (Kuroda och Tsutsumi, 1979). Effekten av mätspänningens varaktighet förklaras av en ökad polarisering vid elektroderna. Effekten av mätspänningens storlek förklaras av att vattenmolekylerna är naturliga dipoler som i opåverkat tillstånd är godtyckligt orienterade. Utsätts träet för ett yttre elektriskt fält, så påverkas varje molekyl av ett vridande moment som vill vrida in molekyl-dipolen i det pålagda fältets riktning, se figur 7. Invidningen av dipolerna i fältets riktning sker så, att deras elektriska potentiella energi blir minimum (Djurle, 1983). Denna invridning medför att träets ledningsförmåga ökar och resistansen minskar.



Figur 6. Elektriska resistansens beroende av mätspänningens storlek och varaktighet (Kuroda och Tsutsumi 1979).



Figur 7. Dipolens orientering utan (a) respektive med yttre (b) elektriskt fält (Djurle, 1983).

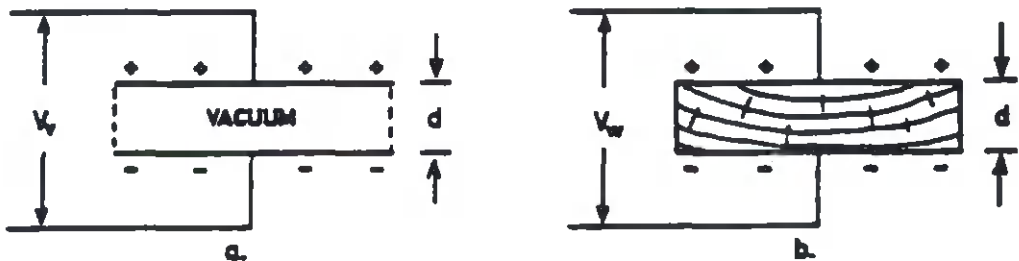
Tillämpningar

Träets resistiva egenskaper används för mätning av fuktkvoten. Detta utförs med instrument som fungerar som en ohmmätare. Det finns idag på marknaden en hel del olika instrument att köpa. Apneseth och Hay (1992) samt Forsén och Tarvainen (2000) har testat de på sågverken vanligaste mätarna. Den största delen av all fuktkvotsmätning i träindustrin sker med elresistiva handinstrument försedda med en hammarelektrod. Hammarelektroden är försedd med två mätstift som är isolerade i hela sin längd utom i ändarna som är kontaktpunkter. Fuktkvoten kan därmed mätas på olika djup i träbiten beroende på hur djupt man slår in mätstiften.

Dielektricitet

De dielektriska egenskaperna för trä är starkt beroende av träets fuktkvot. Andra faktorer som påverkar de dielektriska egenskaperna är densitet, temperatur, mätriktning och växel-

strömsfrekvensen då sådan används. Påverkan av ett elektriskt fält på trä är stor och växelverkan mellan dem resulterar i en ström genom träet. När en växelspanning läggs över träet framträder dess dielektriska egenskaper. Dessa egenskaper karakteriseras främst av två parametrar, relativa dielektricitetskonstanten (ϵ_w) och den dielektriska förlustfaktorn ($\tan\delta$). Den relativa dielektricitetskonstanten för trä definieras som förhållandet mellan spänningen över två plattor i vakuum (V_v) med avståndet d emellan och spänningen (V_w) över samma plattor om trä förs in emellan plattorna, se figur 8. Laddning på plattorna i figur 8 är konstant.



Figur 8. Illustration över laddningsfördelningen mellan två plattor med vakuum emellan (a) och trä emellan (b). V_v = spänning i vakuum, V_w = spänning i trä, d = avståndet mellan plattorna (Skaar, 1988).

Kapacitansen för trä i plattkondensatorn ovan ges av ekvation (4) (Skaar, 1988).

$$C_w = (A\epsilon_w / (11,3 \cdot d)) \cdot 10^{-12} \text{ farads} \quad (4)$$

A = plattornas area

d = plattornas avstånd

ϵ_w = dielektricitetskonstanten för trä

ϵ_0 = dielektricitetskonstanten för vakuum

$1/\epsilon_0 = 11,3 \cdot 10^{-12}$

Mäter man kapacitansen C_w i trä kan alltså relativa dielektricitetskonstanten beräknas enligt ekvation (4). Det är dock svårt att mäta C_w med likström, därför används vanligen växelströmsmätningar. Dielektriska förlustfaktorn för trä definieras som andelen av den tillförda effekten som absorberas av träet under inverkan av ett elektriskt fält. Den absorberade energin övergår till termisk energi, vilket medför att träet blir varmt (Skaar, 1988). En förklaring av denna uppvärmning ges av Antti (1984) och Torgovnikov (1993) som säger att de molekyler som finns i trä verkar som dipoler. När ett elektriskt fält läggs över en träbit vrids dipolerna i fältets riktning. Då fältet ändrar riktning vrids dipolerna ett halvt varv så att de på nytt intar fältets riktning. Denna rotationsrörelse ger upphov till värme. Värmeutvecklingen kan beräknas enligt ekvation (5) (Antti, 1984).

$$P = \pi \cdot f \cdot \epsilon' \cdot \epsilon_0 \cdot \tan\delta \cdot E^2 \quad (5)$$

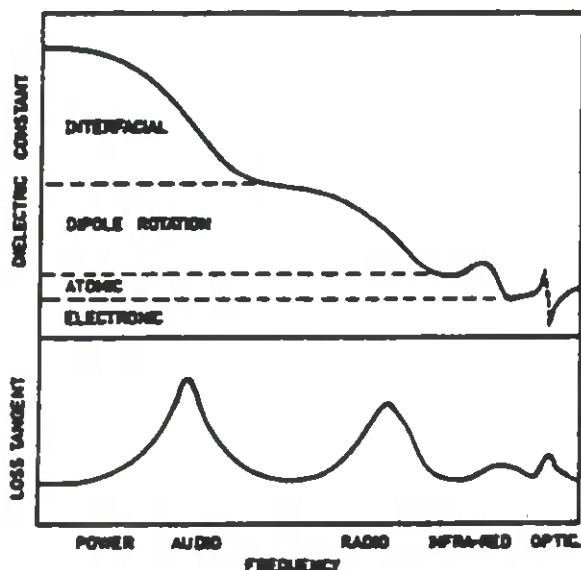
- f = frekvensen
 ϵ' = materialets relativa dielektricitetskonstant
 $\tan\delta$ = förlustfaktorn
 E = elektriska fältstyrkan

När trä är under inverkan av ett växlande elektriskt fält förklaras de dielektriska egenskaperna med polarisationsprocesser. Polarisationseffekter orsakas av omflyttning av laddade partiklar i träsubstanten under inverkan av ett växlande elektriskt fält. Den dielektriska polarisationens intensitet P beror av det pålagda elektriska fältets styrka E . Trä är ett linjärt dielektrikum för vilket ekvation (6) gäller (Torgovnikov, 1993).

$$P = \chi \cdot \epsilon_0 \cdot E \quad (6)$$

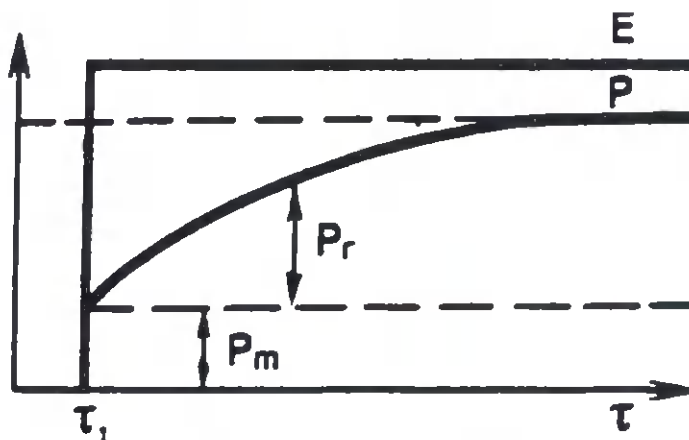
$$\chi = \text{elektrisk susceptibilitet} = \epsilon' - 1$$

Dielektricitetskonstanten är en mätning av polarisationen av atomer och molekyler i trä under inverkan av ett elektriskt fält. Flera olika typer av polarisation kan förekomma i trä, alla kan påverka dielektricitetskonstanten beroende på frekvensen på mätströmmen. De viktigaste typerna av polarisation är enligt Skaar (1988) och Torgovnikov (1993) elektron-, jon-, dipol- och övergångspolarisation (interfacial polarization). De frekvensområden som visat sig viktigast för fuktkvotmätning och uppvärmning är de där dipol- och övergångsmekanismerna är dominanta, se figur 9.



Figur 9. Diagram som visar dielektricitetskonstanten och förlustfaktorn som funktion av pålagd frekvens för ett dielektriskt material (Skaar 1988).

I polarisationseffekten finns en relaxationsdel som släpar efter ändringarna i det pålagda fältet. Detta illustreras i ett diagram i figur 10.



Figur 10. Ökning av polarisationen P vid en snabb ökning av elektriska fältstyrkan E , P_m och P_r är den direkta och relaxationsdelen av polarisationen, τ är tiden (Torgovnikov, 1993).

Det elektriska fältets växlingar i tiden ger en växlande ström i träet. Tätheten i denna ström beskrivs vanligen med ett komplext tal I^* som är summan av tre komponenter, ekvation (7).

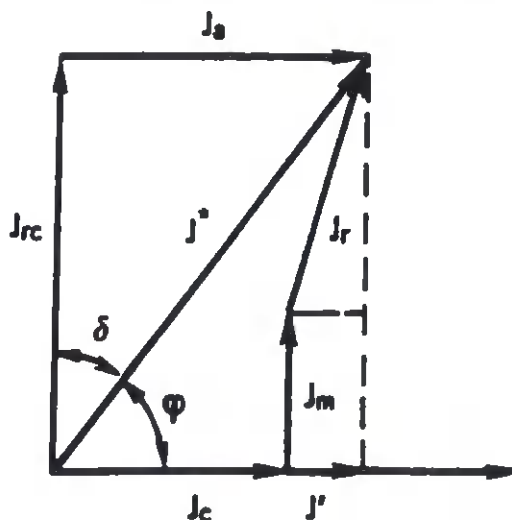
$$I^* = I_c + I_m + I_r \quad (7)$$

I_c = ledningsströmmen

I_m = direkta strömmen

I_r = relaxationsströmmen

Sambandet mellan strömmarna ovan kan också visas grafiskt, se figur 11.



Figur 11. Diagram över strömmarna i trä under inverkan av ett växlande elektriskt fält (Torgovnikov, 1993). I_{rc} = reaktiva strömdelen, I_a = aktiva strömdelen, I' = aktiva strömdelen av I_m , δ = förlustvinkeln, ϕ = fasförskjutningsvinkeln.

De dielektriska egenskaperna hos trä kan också beskrivas genom den komplexa dielektricitetskonstanten (ϵ^*).

$$\epsilon^* = \epsilon' - i\epsilon'' = \epsilon' (1 - i \tan\delta) \quad (8)$$

ϵ' = relativa dielektricitetskonstanten (real del)

ϵ'' = förlustfaktorn (imaginär del)

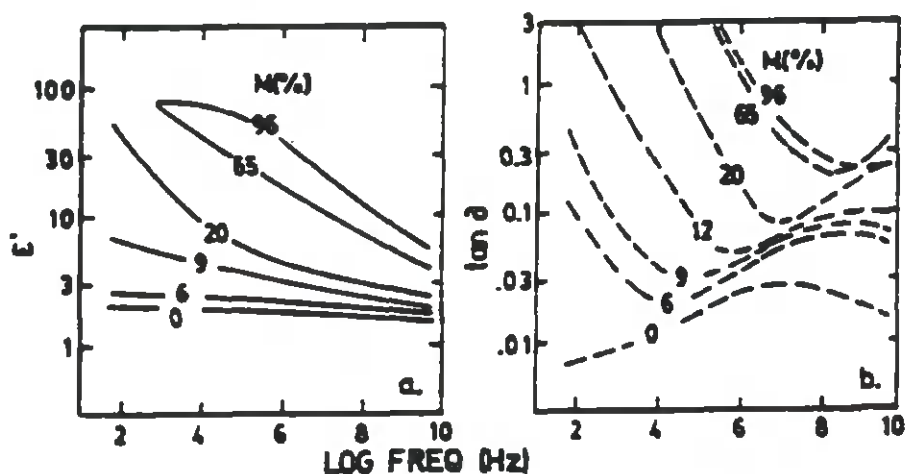
$\tan\delta$ = tangens för förlustvinkeln

i = $\sqrt{-1}$

Denna beskrivning har sina fördelar då man ska beskriva effekten som frigörs i ett dielektrikum och strömtätheten i ett dielektrikum (Torgovnikov, 1993).

Fuktkvotens inverkan

Dielektriska konstanten ϵ' ökar med ökande fuktkvot. Fuktkvotens inverkan ökar när frekvensen på det elektriska fältet minskar, se figur 12. Förlustfaktorn $\tan\delta$ ökar vanligen med fuktkvoten men det omvända erhålls vid vissa kombinationer av fuktkvot, frekvens och temperatur (James, 1988).



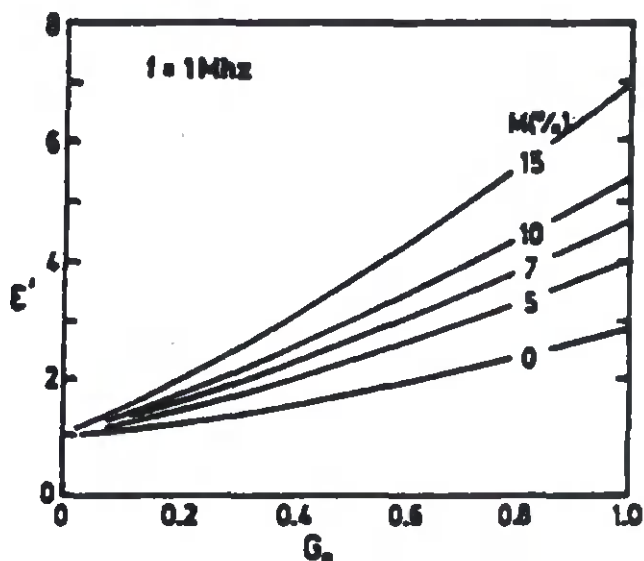
Figur 12. Dielektricitetskonstanten och förlustfaktorn som funktion av frekvensen vid olika fuktkvoter. Kurvorna är för gran vid 20 °C (Skaar, 1988).

Temperaturens inverkan

Dielektricitetskonstanten för trä ökar med stigande temperatur, utom vid väldigt höga fuktkvoter där det motsatta kan förekomma. Ökningen av dielektricitetskonstanten med stigande temperatur visar på förekomsten av termiskt aktiverade polarisationsmekanismer. Dessa mekanismer är troligen övergångspolarisation (interfacial polarization) där det yttre elektriska fältet orsakar laddningsbärare i form av joner att ackumuleras i inre diskontinuiteter. Förlustfaktorn är ingen enkel funktion av temperaturen, den kan både öka och minska med ökande temperatur beroende på frekvens och fuktkvot (James, 1988).

Densitetens inverkan

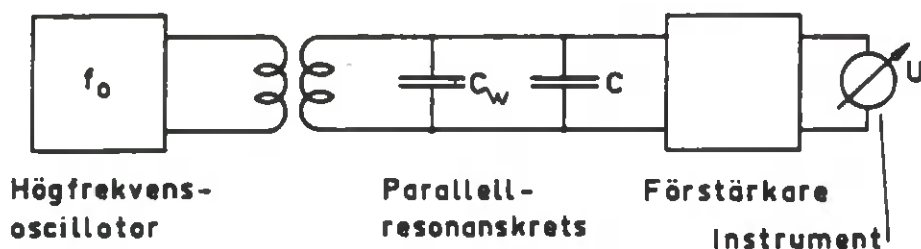
Densiteten påverkar dielektriciteten så att den ökar nästan linjärt med ökande densitet. Förlustfaktorn för torrt trä ökar med stigande densitet. Vid låga densiteter ökar förlustfaktorn mer med ökande densitet än vad den gör vid höga densiteter (James, 1988). I figur 13 visas hur dielektricitetskonstanten beror av densiteten för torrt trä vid några olika fuktkvoter.



Figur 13. Dielektricitetskonstantens beroende av trädets torrdensitet G_0 vid några olika fuktkvoter och frekvensen 1 Mhz (Skaar 1988).

Tillämpningar

De dielektriska egenskaperna används för fuktkvotsmätning och torkning. Fuktkvotsmätning görs genom mätning av trädets kapacitans. Mätning av kapacitansen kan ske enligt figur 14. Spänningen $U-U_0$ är ett mått på kapacitansen för träet, U_0 är spänningen då instrumentet hålls i luft.



Figur 14. Mätprincip för mätning av kapacitans (Lindahl, 1971).

Denna metod har dock inte varit lika framgångsrik som de elresistiva fuktkvotsmätarna. Mätnoggrannheten är oftast sämre på de kapacitiva mätarna, bl a på grund av att de är känsliga för träytans fuktkvot. Fördelen med de kapacitiva fuktkvotsmätarna är att de kan göras beröringsfria, vilket möjliggör montage in-line i produktionen av träprodukter.

Torkning av trä med mikrovågor förekommer endast i liten omfattning p g a den höga kostnaden för utrustningen och elenergin. Forskning på området pågår dock och det som krävs är att utrustningen blir billigare och får ökad livslängd. Det finns också problem med fördelningen av energin i en torksats som kan ge ojämn torkning.

Magnetism

De magnetiska egenskaperna hos ett material karakteriseras av dess magnetiska susceptibilitet (χ). Trä har en väldigt låg magnetisk susceptibilitet, från $-0,2 \cdot 10^{-6}$ till $-0,4 \cdot 10^{-6}$ (Torgovnikov, 1993; Kollmann, 1984). Trä har ibland använts som konstruktionsmaterial som skall ha låg magnetisk påverkan, t ex byggdes minsvepare och stativ till antenner i trä av det skälet.

Piezoelektriska egenskaper

De piezoelektriska egenskaperna i trä upptäcktes av Shubnikov (1940). Dessa egenskaper används inte nämnvärt, men de kan användas för mätning av mekaniska spänningar i trä (Kollmann, 1984). De piezoelektriska egenskaperna uppträder som en elektrisk polarisation av träet då det utsätts för mekaniska spänningar eller tvärtom som mekaniska spänningar då ett elektriskt fält läggs på.

Litteratur

- Antti, L., Morén, T., 1984: Mikrovågsteknik inom sågverks- och träindustrin. (In Swedish.) Högskolan i Luleå, inst för träteknik, Projektrapport 1984:7.
- Antti, L., 1993: Microwave drying of hardwood: Potentials for moisture flux. Licentiate Thesis 1993:08 L, ISSN 0280-8242, Luleå University, Sweden.
- Apneseth, T., Hay, M., 1992: Test av bærbare elektriske fuktighetsmålere. (In Norwegian.) Arbeids rapport, Norsk Treteknisk Institutt, Norge.
- Böhner, G *et al*, 1993: Elektrische Messung hoher Holzfeuchten bei Fichte. (In German.) Holz als Roh- und Werkstoff, 51: 163-166.
- Clark, J.D., Williams, J.W., 1993: The electrical conductivity of commercial dielectrics and its variation with temperature. J. Phys. Chem., 37: 119-131.
- Djurle, E., 1983: Elektricitetslära. (In Swedish.) Teknisk Högskolelitteratur i Stockholm AB, 424 p.
- Du, Q.P. *et al*, 1991a: Die Genauigkeit der elektrischen Holzfeuchtemessung nach dem Widerstandsprinzip. (In German.) Holz als Roh- und Werkstoff, 49: 1-6.
- Du, Q.P. *et al*, 1991b: Widerstandskennlinien einiger Handelshölzer und ihre Messbarkeit bei der elektrischen Holzfeuchtemessung. (In German.) Holz als Roh- und Werkstoff, 49: 305-311.
- Du, Q.P., 1991: Holzartspezifischer eigenschaften auf die elektrische Leitfähigkeit wichtiger Handelshölzer. (In German.) Doctorial Thesis Universität Hamburg, Germany.
- Forsén, H., Tarvainen, V., 2000: Accuracy and functionality of hand held wood moisture content meters. VTT, publication no. 420.
- Galligan, W.L., 1963: Piezoelectric effect in wood. For. Prod. J., 13: 517-524.
- Hasselblatt, M., 1926: Der wasser-dampf-druck und die elektrische Leitfähigkeit des holzes in abhängigkeit von seinem wassergehalt. Zeitschr. f. anorg. und allg. Chemie Bd. 154, s 375-385.
- Hiruma, J., 1915: Extracts Bull. Forestry, Exp. Stat., Merguro, Tokyo, 59.
- James, W. L., 1963: Electric moisture meters for wood. Res. note FPL-08. Madison, U.S. Department of Agriculture.
- James, W.L., 1988: Electric moisture meters for wood. U.S. Dept. of Agric. Gen. Tech. Rep. FPL-GTR-6.
- Kollmann, F., 1984: Solid wood: Volume I. Springer- Verlag, 592 p.

- Kuroda, N., Tsutsumi, J., 1979: Effect of applied voltage on electrical conduction in wood. (In Japanese.) *Mokuzai Gakkaihi*, 25: 757–762.
- Langwig, J.E., 1971: Trace element-electrical conductivity relationships in wood. Phd Thesis. SUNY COLL Environ Sci. For. Syracuse NY, 181 p.
- Langwig, J.E., Meyer, J.A., 1973: Ion Migration in Wood verified by Neutron Activation Analysis. *Wood Sci.*, 6: 39–50.
- Lin, R. T., 1965: A study on the electrical conduction in wood. *For. Prod. J. Nov.*: 506-514.
- Lindahl, P., 1971: Mätning av icke elektriska storheter. (In Swedish.) *Studentlitteratur*, 279 p.
- Pfaff, F., Garrahan, P., 1986: New temperature correction factors for the portable resistance – type moisture meter. *For. Prod. J.* 36: 28–30.
- Samuelsson, A., 1990: Resistanskurvor för elektriska fuktkvotsmätare. (In Swedish.) *TräteknikCentrum, Rapport L 9006029*.
- Samuelsson, A., 1993: Calibration curves for resistance – type moisture meters. Paper presented at 3rd IUFRO International Wood Drying Conference, Vienna, August 18–21, 1992. *Träteknik, Rapport I 9302012*.
- Shubnikov, A. V., 1940: On the tensor piezoelectric moduli of noncrystalline anisotropic media (in Russian). Report in the Division of Physical-Mathematical Sciences of the Academic of Sciences of the USSR (from Bazhenov, V. A., *Piezoelectric properties of wood*, consultant bureau, New York, 1961).
- Skaar, C., 1988: *Wood-water relations*. Springer- Verlag, 283 p.
- Stamm, A.J., 1927: The electrical resistance of wood as a measure of its moisture content. *Ind. Eng. Chem.* 19: 1021-1025.
- Stamm, A.J., 1960: Bound-water diffusion into wood in across-the-fiber directions. *For. Prod. J.*, 10: 524–528.
- Torgovnikov, G. I., 1993: *Dielectric properties of wood and wood-based materials*. Springer-Verlag, Berlin.
- Venkateswaran, A., 1972: A comparison of the electrical properties of milled wood, milled wood cellulose, and milled wood lignin. *Wood Sci.*, 4: 248–253.
- Venkateswaran, A., 1973: Effect of compression on electrical properties of wood and cellulose. *Wood Sci.*, 5: 230–234.

- Vermaas, H.F., 1975: Experimental variables affecting the measurement of the DC resistance of wood. *Holzforschung*, 29: 140–144.
- Vermaas, H.F., 1982: Resistance moisture meters for wood: Part I. *South Afr. For. J.*, 121: 88–92.
- Vermaas, H.F., 1982: Resistance moisture meters for wood: Part II. *South Afr. For. J.*, 122: 70–81.
- Vermaas, H.F., 1983: Resistance moisture meters for wood: Part III. *South Afr. For. J.*, 125: 85–93.
- Weatherwax, R.C., Stam, A.J., 1945: The electrical resistivity of resin treated wood and laminated hydrolysed wood and paper-base plastics. *Elec. Eng. Trans.* 64 (12):833–838.
- Welsh, J.K., 1978: A model for time-dependent DC conduction in moist wood. Phd Thesis. SUNY COLL Environ Sci. For., Syracuse, NY, 248 p.

Detta digitala dokument
skapades med anslag från
**Stiftelsen Nils och Dorthi
Troédssons forskningsfond**

Trätek

INSTITUTET FÖR TRÄTEKNISK FORSKNING

Box 5609, 114 86 STOCKHOLM
Besöksadress: Drottning Kristinas väg 67
Telefon: 08-762 18 00
Telefax: 08-762 18 01

Vidéum Science Park, 351 96 VÄXJÖ
Besöksadress: Lückligs plats 1
Telefon: 0470-59 97 00
Telefax: 0470-59 97 01

Skeria 2, 931 77 SKELLEFT
Besöksadress: Laboratorgränd
Telefon: 0910-28 56 00
Telefax: 0910-28 56 01