

ANNA JÄNIS
STEFAN NILSSON



FOI är en huvudsakligen uppdragsfinansierad myndighet under Försvarsdepartementet. Kärnverksamheten är forskning, metod- och teknikutveckling till nytta för försvar och säkerhet. Organisationen har cirka 1350 anställda varav ungefär 950 är forskare. Detta gör organisationen till Sveriges största forskningsinstitut. FOI ger kunderna tillgång till ledande expertis inom ett stort antal tillämpningsområden såsom säkerhetspolitiska studier och analyser inom försvar och säkerhet, bedömningen av olika typer av hot, system för ledning och hantering av kriser, skydd mot hantering av farliga ämnen, IT-säkerhet och nya sensorers möjligheter.

Anna Jänis

Stefan Nilsson

Transmissionsegenskaper av material
i frekvensområdet 2-110 GHz och
möjligheter att "se igenom"

Utgivare FOI - Totalförsvarets forskningsinstitut Sensorteknik Box 1165 581 11 Linköping	Rapportnummer, ISRN FOI-R--1861--SE	Klassificering Teknisk rapport
	Forskningsområde 4. Ledning, informationsteknik och sensorer	
	Månad, år December 2005	Projektnummer E3065
	Delområde 42 Spaningssensorer	
	Delområde 2	
Författare/redaktör Anna Jänis Stefan Nilsson	Projektledare Stefan Nilsson	
	Godkänd av Sören Svensson	
	Uppdragsgivare/kundbeteckning FM	
	Tekniskt och/eller vetenskapligt ansvarig Anna Jänis	
Rapportens titel Transmissionsegenskaper av material i frekvensområdet 2-110 GHz och möjligheter att "se igenom"		
Sammanfattning <p>Rapporten redovisar ett arbete inom projektet "Teknisk värdering av nya sensorförmågor för strid i bebyggelse" som gäller experimentell kartläggning av transmissionsegenskaper för olika material i frekvensområdet 2-110 GHz.</p> <p>Material som undersöktes inom projektet var textilier, emballage- och byggmaterial. I rapporten presenteras också en undersökning om hur transmissionsegenskaper ändras beroende på materialets fuktighetsgrad. Denna undersökning baseras på transmissionsmätningar genom läder.</p> <p>Analys av mätresultat visar att lägre frekvenser krävs för att uppnå tillräckligt hög penetration genom byggmaterial. Riktigt låga frekvenser krävs för tillräckligt bra penetration genom ytterväggar och något högre frekvenser för tillräckligt bra penetration genom innerväggar. Penetrationen genom emballagematerial och textilier är hög även vid högre frekvenser. En ökning av materialets fuktighetsgrad medför lägre transmission.</p>		
Nyckelord Transmissionsegenskaper, millimetervågsavbildning, byggmaterial, emballage, textilier, strid i bebyggelse, övervakning		
Övriga bibliografiska uppgifter	Språk Svenska	
ISSN 1650-1942	Antal sidor: 29 s.	
Distribution enligt missiv	Pris: Enligt prislista	

Issuing organization FOI – Swedish Defence Research Agency Sensor Technology Box 1165 SE-581 11 Linköping	Report number, ISRN FOI-R--1861--SE	Report type Technical report
	Programme Areas 4. C4ISTAR	
	Month year December 2005	Project no. E3065
	Subcategories 42 Above water Surveillance, Target acquisition and Reconnaissance	
	Subcategories 2	
Author/s (editor/s) Anna Jänis Stefan Nilsson	Project manager Stefan Nilsson	
	Approved by Sören Svensson	
	Sponsoring agency Swedish Armed Forces	
	Scientifically and technically responsible Anna Jänis	
Report title (In translation) Transmission properties of materials in the frequency range 2-110 GHz and possibilities to "se through"		
Abstract <p>The report presents a work included in the project "Technical evaluation of new sensor abilities to urban warfare" which concerns experimental mapping of transmission properties of different materials in the frequency range 2-110 GHz.</p> <p>Materials which were examined in this project were packaging, clothing and building materials. In this report, an investigation of how transmission properties are changed depending on degree of moisture in the material is also presented. This investigation is based on transmission measurements through leather.</p> <p>An analysis of the measurement results shows that lower frequencies are suitable to get efficient penetration through building materials. Really low frequencies are suitable for efficient penetration through outer walls and somewhat higher frequencies for efficient penetration through inner walls. Penetration through packaging and clothing materials is high even at higher frequencies. Higher degree of moisture in the material brings lower transmission.</p>		
Keywords Transmission properties, millimeter wave imaging, building, packaging, clothing materials, urban warfare, surveillance		
Further bibliographic information	Language Swedish	
ISSN 1650-1942	Pages 29 p.	
	Price acc. to pricelist	

Innehållsförteckning

1	Förord	6
2	Inledning	7
3	Bakgrund	9
3.1	Atmosfärsdämpning	9
3.2	Högupplösande avbildande system	10
4	Resultat	11
4.1	Materialegenskaper	11
4.2	Mätutrustning	12
4.2.1	Materialkaraktisering i vågledare	13
4.2.2	Materialkaraktisering i frirymd.....	15
4.3	Mätresultat och beräkningar	18
4.3.1	Materialkaraktisering av byggmaterial i vågledare	18
4.3.2	Transmissionsmätningar av byggmaterial, emballage och textilier i frirymd	22
4.3.3	Fuktighetsmätningar	25
5	Slutsatser och rekommendationer	28
6	Referenser	29

1 Förord

Arbetet som presenteras i den här rapporten genomfördes inom ramen för två projekt:

- *Teknisk värdering av nya sensorförmågor för strid i bebyggelse*, finansierad av Strategiska forskningskärnor
- *Nanokomponenter i THz-området*, ett av sju projekt inom fas I av Försvarets Nanoteknikprogram.

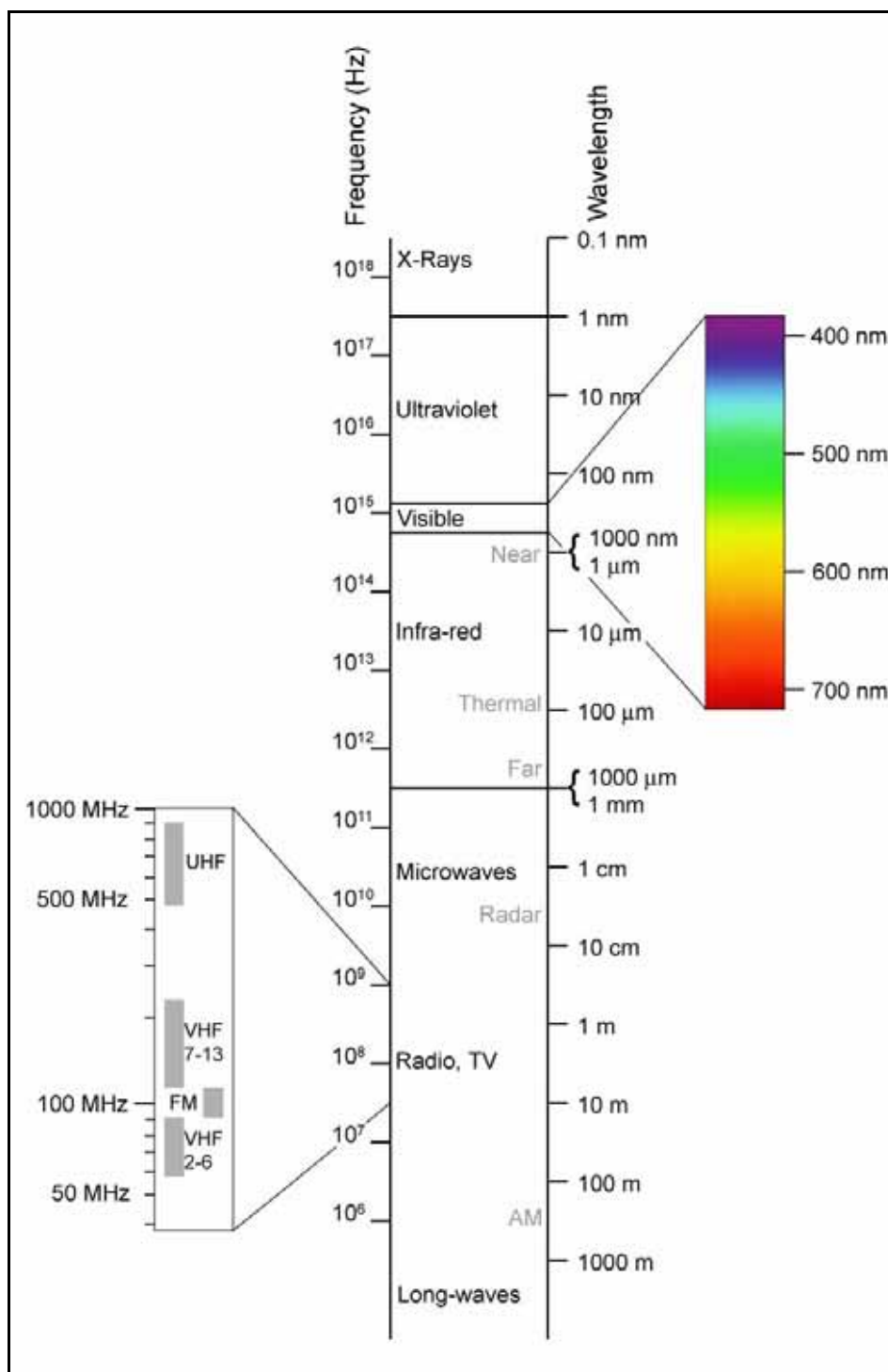
Denna rapport är slutrapport inom det förstnämnda projektet.

Ett stort tack för praktisk hjälp och för givande diskussioner vill vi framföra till våra kollegor:

Staffan Rudner
Jan-Olof Ousbäck
Jan Fagerström
Lars-Göran Heimdahl
Jan Kjellgren
Ain Sume

2 Inledning

Det mänskliga ögat betraktar omvärlden inom ett smalt våglängdsområde, 400-700 nm, av det elektromagnetiska spektrumet (figur 1). De olika våglängderna upplevs i den mänskliga hjärnan som olika färger, där de kortaste är violetta och de längsta röda. Genom att utnyttja också andra våglängdsområden kan vi få en mera komplett bild av omvärlden, vilket i sin tur kan leda fram till nya användningsområden.



Figur 1. Det elektromagnetiska spektrumet.

Under de senaste åren har intresset ökat för att etablera förmåga att "se igenom" olika slags material.

I samband med exempelvis strid i bebyggelse (SIB), finns ett stort behov av att kunna se vad som finns bakom väggar, och då är det viktigt att ha kunskap om transmissionsegenskaperna för olika typer av byggmaterial.

Ett annat angeläget område är övervakning för ökad säkerhet och terrorbekämpning. Där är man mer intresserad av möjligheten att "se igenom" kläder och förpackningar för att hitta undangömda vapen, sprängämnen, narkotika samt farliga biologiska och kemiska ämnen.

I båda fallen är det intressant att skapa en bild av det gömda hotobjektet och detta åstadkoms lämpligen med någon form av radarsystem med lämpligt vald frekvens. Med radarsystem avses här både stationära och mobila, fordons- och handburna system. Mikrovågor har nämligen egenskapen att kunna penetrera olika slags dielektriska material. Radarns förmåga att upplösa objekt i vinkel beror av frekvensen. Ju högre frekvens som används desto bättre blir upplösningen. För en viss given frekvens ökar samtidigt upplösningen med antennens diameter. För att kunna skapa en tolkningsbar bild av objekt i olika storlek behövs en lämplig upplösning hos det avbildande systemet. Små objekt kräver en högre upplösning än större. Vid detektion av människor bakom väggar kan lägre frekvenser användas, medan för fallet med mindre hotobjekt gömda under kläder behövs ofta högre frekvenser.

En frågeställning i detta arbete är att avgöra hur väl olika avbildande system fungerar i frekvensområden som mikrovågor, inklusive millimetervågor (30 - 300 GHz), och även terahertzområdet (100 GHz - 10 THz). Definitionsmässigt är dessa två frekvensområden delvis överlappande.

Med de nämnda applikationerna i åtanke, genomfördes ett antal transmissionsmätningar på olika typer av material. De typer av material som är av intresse i samband med strid i bebyggelse och övervakning var textilier, emballage- och byggmaterial. Byggmaterial kan i sin tur delas i två grupper:

- 1) Byggmaterial för ytterväggar, ytterdörrar och fönster
- 2) Byggmaterial för innerväggar och innerdörrar

Det var bestämt från början att vid mätningarna använda den befintliga mätutrustningen som fungerar i frekvensområdet från 40 MHz till 110 GHz, och därmed undvika inköp av ny dyrbar mätutrustning. På grund av detta blev den högsta frekvensen för mätningarna 110 GHz. Däremot kan man genom att använda de uppmätta materialparametrarna beräkna, och på så sätt prediktera, transmissionen för högre frekvenser – terahertzfrekvenser.

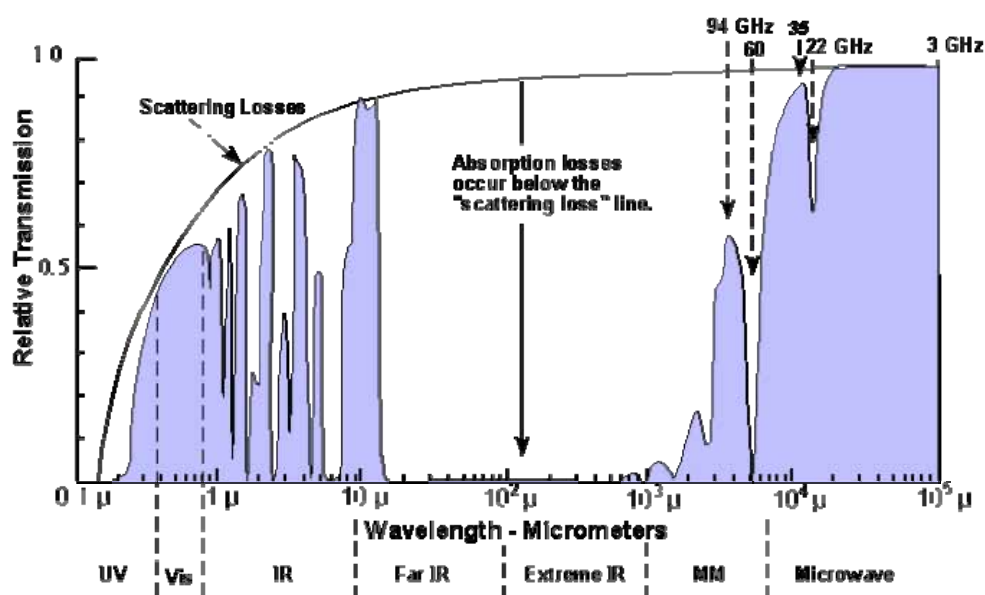
Alla mätresultat skulle struktureras och samlas i en databas för att kunna användas vidare inom dessa två projekt, och även inom andra projekt. Analys av mätdata skulle ge svar på hur lätt, eller svårt, det är för mikrovågor att penetrera olika material, och därefter ge en viss indikation om vilka frekvenser som är fördelaktigast för specifika applikationer.

3 Bakgrund

De frekvensområden som är mest aktuella för att avbilda objekt ”igenom” textilier, emballage- och byggmaterial ligger inom millimetervågs- och terahertzområdet. Bägge har för- och nackdelar beroende på applikationen^{1,2}. Men också lägre frekvensband ned till 2 GHz inryms i denna undersökning.

3.1 Atmosfärsdämpning

Inom millimetervågsområdet finns det ett antal atmosfäriska fönster som är centrerade vid frekvenserna 35, 94, 140 och 220 GHz (figur 2).



Figur 2. Dämpning av elektromagnetiska vågor i atmosfären.

Dämpningskoefficient i ren luft för dessa fönster finns presenterade i tabell 1, där man också kan jämföra med dämpningen vid frekvenser 1 och 10 THz. Från tabellen kan man notera att dämpningen vid 1 THz är ca 500 dB högre än vid 0,1 THz. Vid dåligt väder blir dämpningen i atmosfären högre.

Frekvens THz	Atmosfärisk dämpning dB km ⁻¹
0,035	0,15
0,094	0,6
0,140	2
0,220	8
1	500
10	100

Tabell 1. Atmosfärisk dämpning i ren luft ($T=20^{\circ}\text{C}$, $\text{H}_2\text{O}=7,5 \text{ g m}^{-3}$).

Det är välkänt att millimetervågor dämpas mindre vid dåligt väder, genom damm och rök i jämförelse med till exempel vågor i IR eller det visuella området.

3.2 Högupplösande avbildande system

Högupplösande system baserade på millimetervågor resp. terahertzområdet beaktas. Dessa frekvensområden ger förmåga till såväl hög avståndsupplösning men framförallt hög vinkelupplösning. Förenklat kan sägas att penetrationsförmågan minskar med ökande frekvens, dvs. för många fasta material är penetrationen mycket högre för millimetervågssystem i jämförelse med terahertzsystem.

Millimetervågsavbildning är en ganska välutvecklad teknik och har en lång historia. Redan år 1955 rapporterade Ditchfield & England³ om det första millimetervågsbaserade avbildningssystemet i Storbritannien, vilket ger denna teknik 40 års försprång jämfört med utvecklingen av terahertzsystem.

De kontraster i bilderna som fås med millimetervågssystem uppkommer av skillnader i transmission, reflektion och absorption mellan bakgrund och objekt. Därför är det viktigt att ha kunskap om dessa materialegenskaper.

I terahertzdelen av spektrumet finns det fortfarande svårigheter med att utveckla såväl strålningskällor med hög effekt som tillräckligt känsliga detektorer. År 1995 rapporterade Hu & Nuss⁴ om det första avbildningssystemet i terahertzområdet, som baserades på elektrooptisk tidsdomän-spektroskopi. Denna koherenta teknik ger möjlighet att skapa högupplösta bilder av interna strukturer i objektet i avståndsled.

I terahertzområdet har fasta material absorption som kan hänföras till vibrations- och gittermoder. Gittermoder uppkommer vid högre frekvenser, som till exempel hos polyeten med gittermod vid 2,4 THz. Detta ger möjlighet för terahertzsystem att också ge spektral information och utnyttja de spektrala skillnaderna för att särskilja ett material från ett annat.

Atmosfären har stark absorption i terahertzområdet (figur 2), men denna effekt är inte så starkt begränsande eftersom huvuddelen av tillämpningarna avser korthållsapplikationer. Bland sådana applikationer som utvecklats under senare tid finns medicinsk avbildning och icke förstörande provning.

Terahertzsystem har också möjlighet att användas inom säkerhetsområdet och då finns det två fördelar jämfört med millimetervågssystem.

- 1) Terahertzsystem har högre rymdupplösning jämfört med millimetervågssystem.
- 2) Terahertzsystem ger möjlighet till att få spektrala signaturer, något som inte fås med millimetervågssystem.

4 Resultat

4.1 Materialegenskaper

När den elektromagnetiska strålningen träffar ett medium så reflekteras en del av strålningen vid ytan, medan den andra delen av strålningen tränger in i materialet och absorberas eller transmitteras.

Enligt lagen om energins bevarande är summan av reflektion, R, transmission, T, och absorption, A, alltid detsamma, dvs. $R + T + A = 1$. Genom att känna till två av dessa storheter kan man alltid räkna fram den tredje.

Materialets absorptionsförmåga kan beskrivas med hjälp av relativ permittivitet, ϵ_r , och relativ permeabilitet, μ_r . Dessa storheter skrivs vanligen normerade till värdena i vakuum, ϵ_0 och μ_0 , på följande sätt:

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} = \epsilon_r' - j\epsilon_r''$$

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} = \mu_r' - j\mu_r''$$

Där ϵ_r' och μ_r' är reell del och ϵ_r'' och μ_r'' är imaginär del av respektive permittivitet och permeabilitet. Man kan också skriva dessa samband på ett annat sätt, till exempel för permittivitet:

$$\epsilon_r' = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \cos \delta$$

$$\epsilon_r'' = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \sin \delta$$

Där $\tan \delta = \frac{\epsilon_r''}{\epsilon_r'}$ är den så kallade förlustfaktorn.

Materialets reflektion styrs av impedansen. Om man utgår från att vågen rör sig primärt i ett medium som har impedansen Z_1 och därefter träffar ett medium som har impedansen Z_2 då fås reflektion, R, vid gränsen mellan de två medierna enligt följande:

$$R = \frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2}$$

Där impedansen, Z, definieras av den relativa permeabiliteten μ_r och den relativa permittiviteten ϵ_r :

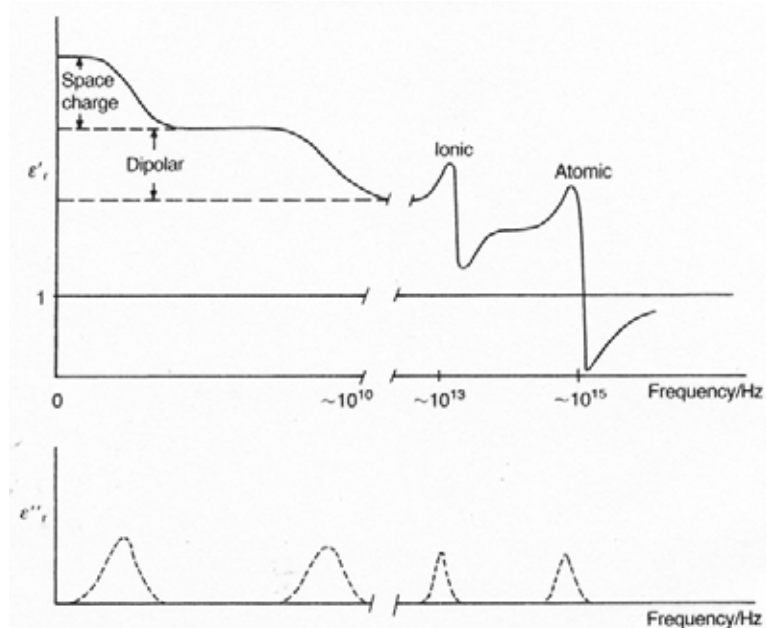
$$Z = Z_0 \sqrt{\frac{\mu_r}{\epsilon_r}}, \text{ där } Z_0 \approx 377\Omega \text{ är impedansen i vakuum.}$$

När ett dielektriskt material, t.ex. textilier, emballage- eller byggmaterial, befinner sig i ett elektriskt fält blir materialet polariserat. Detta händer via ett antal olika polarisationsprocesser som är de olika förlustmekanismerna i materialet.

Dessa polarisationsprocesser är:

- 1) Elektronisk polarisering, sker i alla material och är en liten förskjutning av elektroner i en atom i relation till kärnan.
- 2) Polarisering av joner är en liten förskjutning av katjon- och anjongitter i relation till varandra.
- 3) Orienteringspolarisering sker i material med polära molekyler, som till exempel vatten, där de slumpmässigt orienterade molekylerna orienteras i ett pålagt elektriskt fält.
- 4) Gränstyp polarisering är en process där det sker en begränsad transport av laddningsbärare under påverkan av ett elektriskt fält som resulterar i en koncentration av dessa vid potentialbarriärer som till exempel vakanser, korngränser och föroreningar.

Alla polarisationsprocesser uppträder i materialet vid speciella frekvenser (figur 3) och orienteringspolarisering är den viktigaste förlustmekanismen i mikrovågsområdet. Värt att notera är att förlustmekanismerna är temperaturberoende och högre temperaturer medför större värde på permittiviteten.



Figur 3. Ändring av permittivitet, realdel ϵ'_r och imaginärdel ϵ''_r , med frekvensen.

4.2 Mätutrustning

På FOI i Linköping finns två typer av mätsystem för materialkaraktärisering tillgängliga. Det ena är ett system för reflektions- och transmissionsmätningar av fasta material i vågledare, där man använder en vektoriell nätverksanalysator för mätningar i frekvensområdet 0,04- 40 GHz. Det andra systemet är ett system för reflektions- och transmissionsmätningar av större provpaneler i frirymd där man använder en skalär nätverksanalysator för mätningar i frekvensområdet 2-110 GHz.

4.2.1 Materialkaraktisering i vågledare

Nätverksanalysatorn som användes för materialkaraktisering i vågledare är en vektoriell nätverksanalysator av märket Wiltron 37269B. För att täcka frekvensområdet mellan 0,04 och 40 GHz användes 7 olika vågledare för 7 olika frekvensband (figur 4). Speciella materialprover tillverkades för varje vågledare för att passa in i provhållare vilka är utformade som en del av transmissionslinjen.



Provhållare

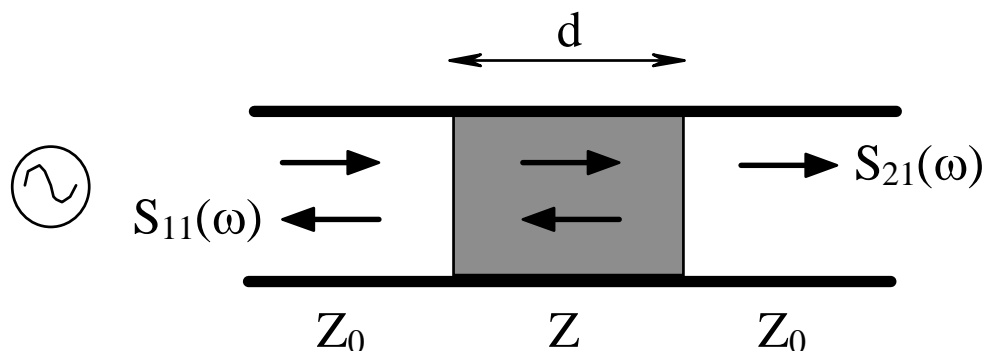
Vågledare Frekvens- band	Frekvens (GHz)
2,54 cm koaxial	0,04 – 4,00
G	3,95 – 5,85
C	5,85 – 8,20
X	8,20 – 12,40
P	12,40 – 18,00
K	18,00 – 26,50
Ka	26,50 – 40,00

Figur 4. Wiltron 37269B vektornätverksanalysator med vågledarfixtur.

För att erhålla god noggrannhet i mätningen krävs att proverna har exakt passform (tolerans 0,01 mm) och passar in i provhållare utan att några luftspringor uppstår. Provets yta skall vara slät och placerad vinkelrätt mot vågledarens axel.

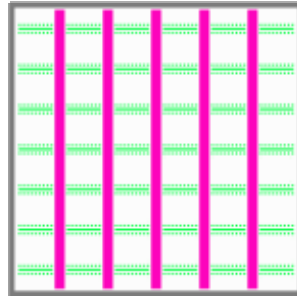
Noggrannheten i mätningarna är hög. För den koaxiala linjen blir mätosäkerheten < 10 % och för rektangulära vågledare blir mätosäkerheten < 5 %. Vissa material var extra svårt att bearbeta, till exempel tegel, och man lyckades inte ta fram helt perfekta prover vilket ledde till att osäkerheten i mätningarna blev högre.

För materialkaraktisering genomfördes 2-portsmätningar (figur 5), som ger möjlighet att mäta amplitud och fas för de reflekterade S-parametrarna, $S_{11}(\omega)$ och $S_{22}(\omega)$, och de transmitterade S-parametrarna, $S_{21}(\omega)$ och $S_{12}(\omega)$.



Figur 5. Provhållare med prov i 2-portsmätning.

Reduktionen av S-parametrarna till provets materialparametrar baseras på att endast en egenmod (t ex TE_{10} , figur 6) existerar i vågledaren. För att minska sannolikheten för excitation av högre ordningens moder använder man tunna prover. Förekomsten av högre moder kan man kontrollera med hjälp av ett Smith-diagram som ska variera mjukt och kontinuerligt när en transmissionsmod exciteras i vågledaren.



Figur 6. Transmissionsmod TE_{10} i vågledare.

Genom att lösa randvillkorsproblemet i figur 5 kan S-parametrarna uttryckas på följande sett:

$$S_{11}(\omega) = \frac{(1-T^2)R}{1-T^2R^2} \quad (1)$$

$$S_{21}(\omega) = \frac{(1-R^2)T}{1-T^2R^2} \quad (2)$$

Där R är reflektionskoefficient, $R = \frac{Z - Z_0}{Z + Z_0} = \frac{\sqrt{\mu_r/\epsilon_r} - 1}{\sqrt{\mu_r/\epsilon_r} + 1}$ (3)

och T är transmissionskoefficient, $T = e^{-j\omega/c\sqrt{\mu_r\epsilon_r}d}$ (4).

Där ω är vågens vinkelfrekvens,
 c är ljushastigheten,
 Z_0 är impedansen för vakuum,
 Z är provets impedans,
 d är provets tjocklek,

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} = \epsilon' - j\epsilon'' \text{ är relativ permittivitet och}$$

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} = \mu' - j\mu'' \text{ är relativ permeabilitet.}$$

Från ekvationerna (1) – (4) kan man se att ur de experimentellt bestämda $S_{11}(\omega)$ och $S_{21}(\omega)$ kan man beräkna ϵ_r och μ_r . Problemet är att lösningen leder till ekvationer av typ $f(x) = x \cdot \tanh x$ som i sin tur har oändligt antal lösningar där bara en lösning har fysikaliskt betydelse.

Genom att välja provets tjocklek som man räknar i antal våglängder i provet, kan man begränsa antalet möjliga lösningar, t.ex. till två. Det kan dock fortfarande vara svårt att bestämma vilken av de två lösningarna som är den rätta. I så fall ska man göra ytterligare en mätning med samma prov, men med en annan tjocklek. Den rätta lösningen är den gemensamma lösningen för de båda mätningarna.

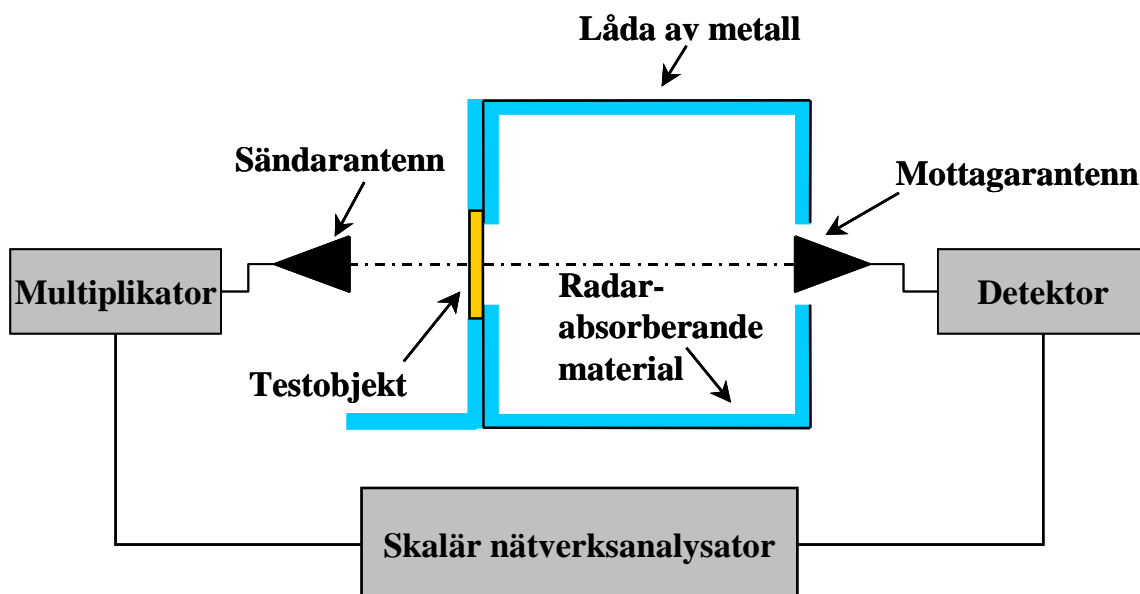
Sammanfattningsvis kan man säga att man i vanliga fall bara behöver göra en mätning av ett prov (2-portsmätning) för att mäta reflekterad och transmitterad signal, och därefter beräkna både ϵ och μ .

Tyvärr är lösningen matematiskt instabil om provets tjocklek $d = \frac{m\lambda_p}{2}$, där $m \neq 1$ och λ_p är våglängd i provet. Detta kan undvikas genom att för varje vågledare och varje prov välja rätt provtjocklek. Detta kan, i sin tur, bara göras om man antingen i förväg har någon uppfattning om provets materialparametrar, eftersom $\lambda_p = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon_r \mu_r}}$, eller om man i förväg exakt vet antingen provets ϵ eller μ .

4.2.2 Materialkaraktisering i frirymd

Frirymdsteknik är en metod för att verifiera paneler utformade som skikt vid högre frekvenser. Metoden kräver ingen kontakt, är icke-destruktiv och används oftast för stora homogena skikt. Den kräver inte speciellt preparerade prover i jämförelse med mätningarna i vågledare. Man kan även mäta på prover som inte har plana ytor. I våra mätningar användes materialprover med en storlek om minst 30x30 cm. För att uppnå denna storlek hos tegel och träpanel placerades flera prover i rad bredvid varandra.

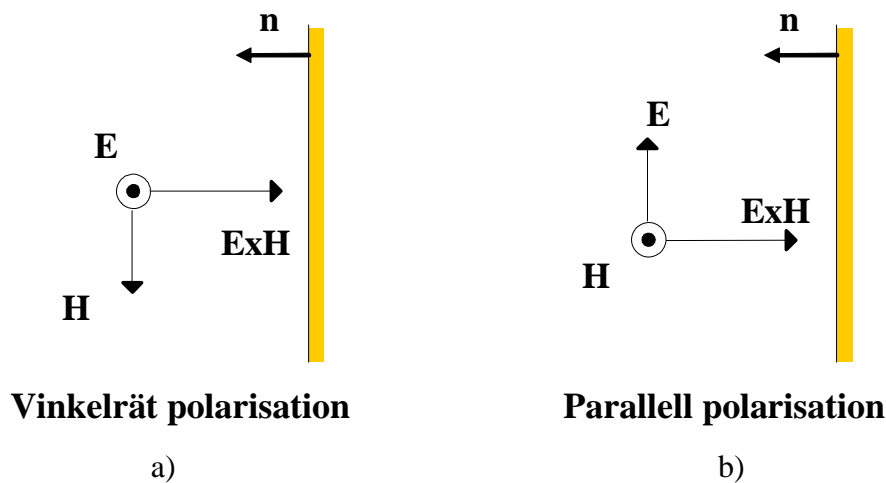
Schematisk bild av transmissionslinje för frirymdsmätningar presenteras i Figur 7. Systemet kalibrerades vid en mätning utan något testobjekt mellan antennerna. Därefter placerades materialprovet mellan sändar- och mottagarantennen, och transmissionen mättes. För att en plan våg ska infalla mot provet bör provet placeras på ett avstånd från sändarantennen som är större än $2D^2/\lambda$, där D är den största dimensionen hos antennen. Å andra sidan vill man göra systemet så litet som möjligt för att minska förluster.



Figur 7. Transmissionslinje för frirymdsmätningar, frekvenser 2-110 GHz.

I vårt system har även en metallåda belagd med radarabsorbenter placerats mellan provobjekt och mottagarantenn för att undvika överhörningen mellan antennerna samt reflektioner utifrån som negativt kan påverka vår signal. Mätosäkerheten hos denna mätmetod ligger på 5-10 %.

Genom att vrida materialprovet 90° kan man ändra polarisation i mätningen från parallell till vinkelrät eller tvärtom. Med vinkelrät polarisation menas fallet då den elektriska fältvektorn \mathbf{E} är vinkelrät mot det plan som definieras av materialets normalvektor \mathbf{n} och den infallande vågens utbredningsvektor \mathbf{ExH} . Med parallell polarisation menas fallet då den elektriska fältvektorn \mathbf{E} är parallell med motsvarande plan. Infallsvinkel definieras som vinkel mellan normalvektorn \mathbf{n} och det infallande fältets utbredningsvektor \mathbf{ExH} .



Figur 8. Definition av a) vinkelrät och b) parallell polarisation, där \mathbf{E} är elektrisk och \mathbf{H} är magnetisk fältvektor och \mathbf{ExH} utbredningsvektor.

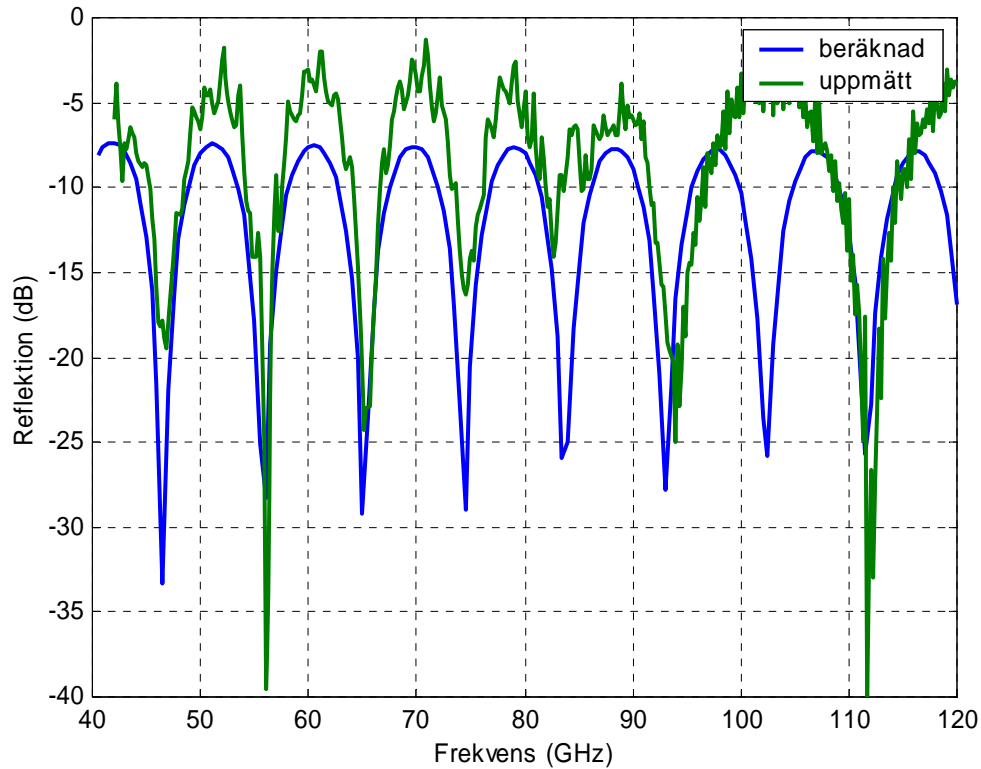
I den här rapporten nämns också parallell polarisation som vertikal polarisation och vinkelrät polarisation som horisontell polarisation.

En skalär nätverksanalysator, Wiltron 54147A, användes för mätningar med arbetsfrekvenser mellan 10 MHz och 20 GHz. För att uppnå högre frekvenser användes tre olika multiplikatorer:

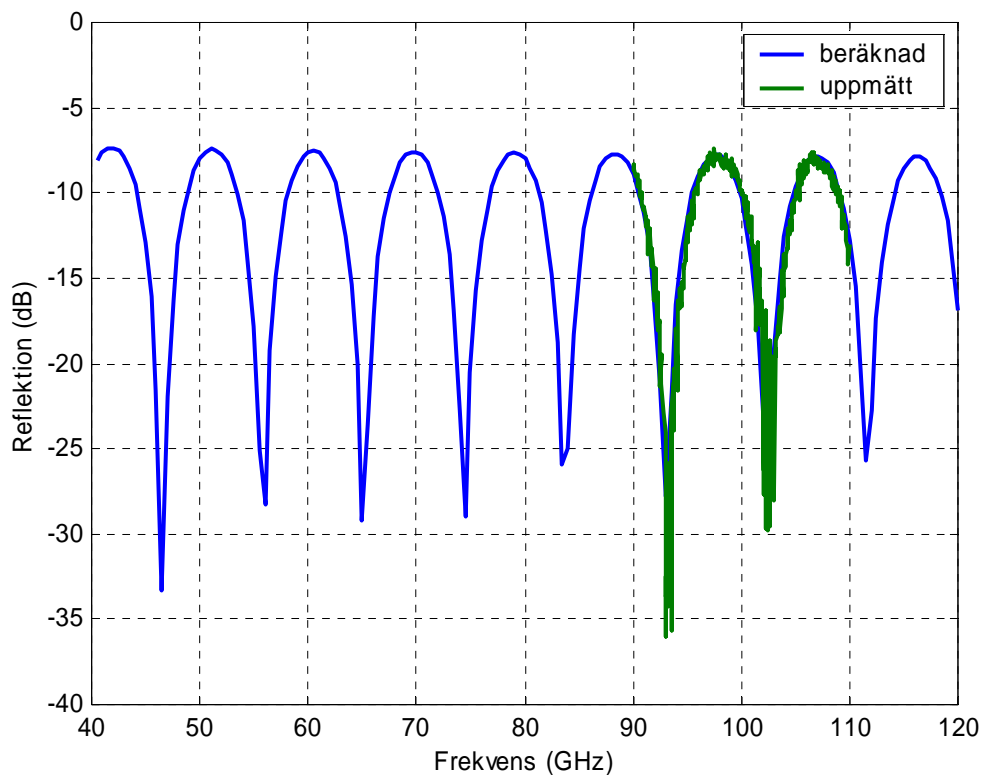
- 2x multiplikator $\rightarrow 2 \times (11-20) \text{ GHz} = 22 - 40 \text{ GHz}$:
- 6x multiplikator A $\rightarrow 6 \times (7-12,5) \text{ GHz} = 42-75 \text{ GHz}$
- 6x multiplikator B $\rightarrow 6 \times (15-18,33) \text{ GHz} = 90-110 \text{ GHz}$

Från början användes en 6 x multiplikator (betecknad A) för att täcka hela det övre frekvensintervallet 42-120 GHz, men mätresultaten i det högsta frekvensområdet avvek från det förväntade. Vid en kontrollmätning mot en plexiglasskiva, vars materialparametrar och tjocklek är kända, visade det sig att denna multiplikator genererade felaktiga frekvenser över 75 GHz. Vid dessa frekvenser genomfördes nämligen endast multiplikation med tre (figur 9, sidan 17).

För att få korrekta mätresultat för frekvenser över 75 GHz användes därför en ny 6 x multiplikator (betecknad B) anpassad för frekvensområdet $6 \times (15-18,33) = 90-110 \text{ GHz}$. En reflektionsmätning med denna multiplikator på samma plexiglasskiva genomfördes och jämfördes med beräknad reflektion (figur 10), som visade att mätresultaten blev korrekta.



Figur 9. Reflektion för plexiglasskiva beräknad samt uppmätt med hjälp av 6 x multiplikator anpassad för frekvensområdet $6 \times (7-12,5) = 42-75$ GHz.



Figur 10. Reflektion för plexiglasskiva beräknad samt uppmätt med hjälp av 6 x multiplikator anpassad för frekvensområdet $6 \times (15-18,33) = 90-110$ GHz.

Sammantaget, inklusive själva nätverksanalysatorn, ger detta oss möjlighet att genomföra mätningar i frekvensområdet 2 - 110 GHz.

4.3 Mätresultat och beräkningar

Eftersom materialkaraktisering i vågledare kräver speciellt tillverkade materialprover med exakt passform, som dessutom ska bibehålla formen, togs det bara fram några prover av sådana material som var lämpliga. Det visade sig också att framtagning av prover för vissa typ av material är en kostsam process och detta ledde till att antalet prover begränsades. För transmissionsmätningar i frirymd behövs det inga speciellt utformade prover och därför genomfördes dessa mätningar på ett betydligt större antal materialprover.

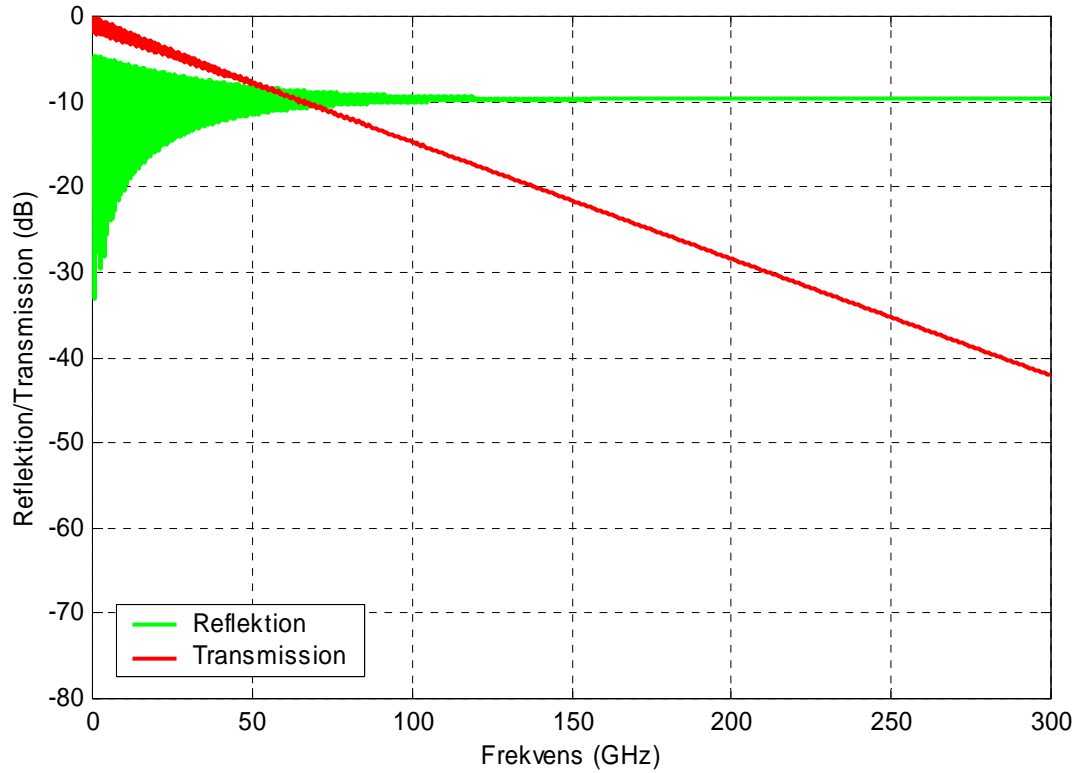
4.3.1 Materialkaraktisering av byggmaterial i vågledare

Reflektion och transmission för fem olika byggmaterial mättes upp i vågledare, vilka sedan användes för att beräkna materialens permittivitet, den reella och den imaginära delen^{5, 6, 7}. Resultaten presenteras i tabell 2 där värdet för permittiviteten är medelvärde för frekvensområdet 0,04 - 40 GHz.

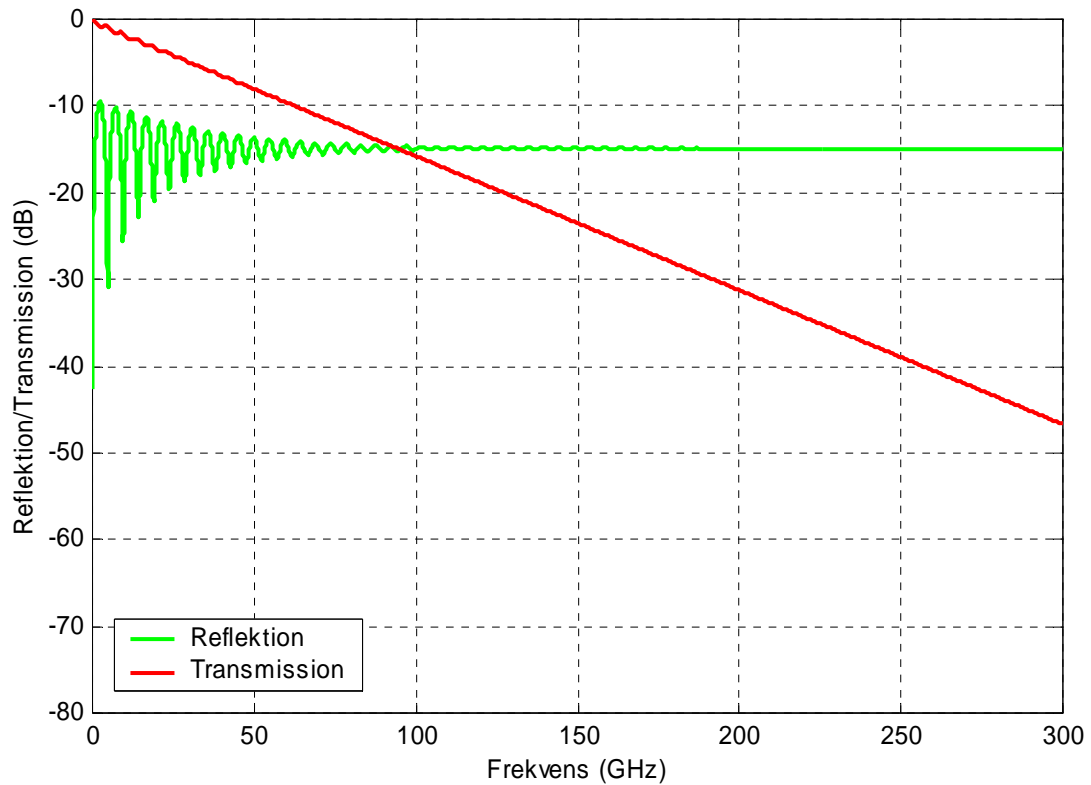
Material	Relativ permittivitet
Tegel	3,907-j0,035
Träpanel	2,066-j0,111
Spånskiva	2,224-j0,130
Gipsskiva	2,311-j0,023
Mineralull	1,056-j0,001

Tabell 2. Beräknad permittivitet för byggmaterial.

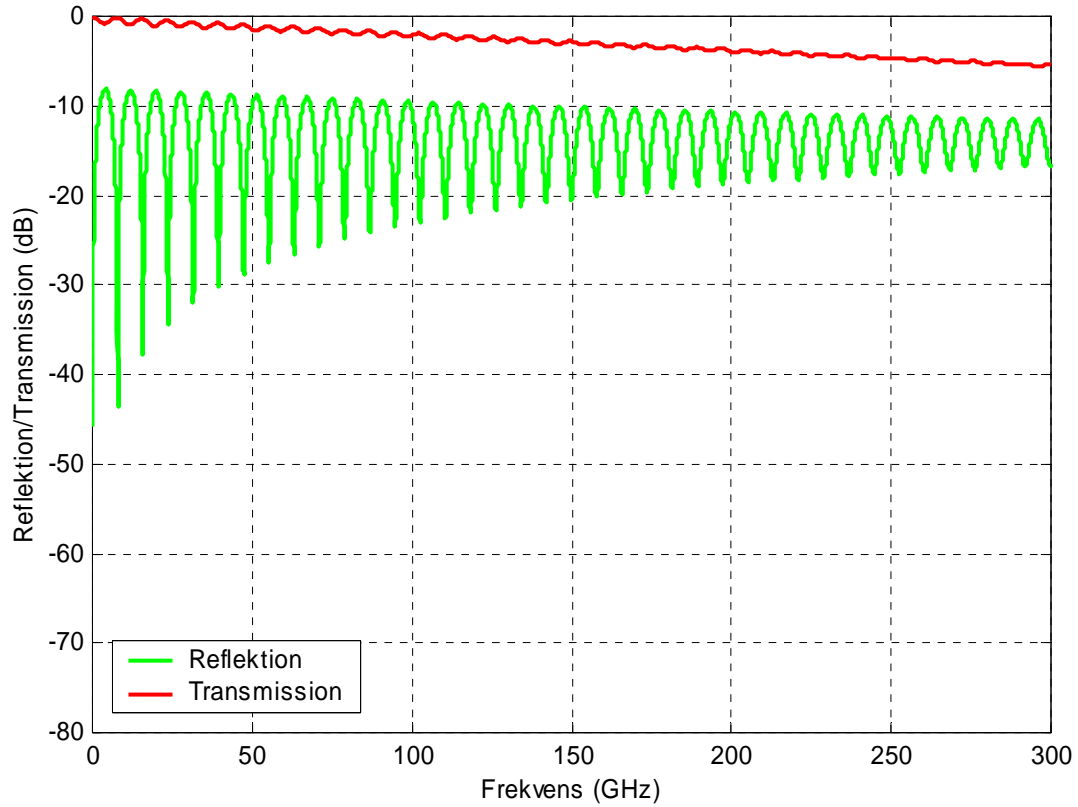
Om man antar att permittiviteten inte ändras nämnvärt med frekvensen, kan permittivitetsvärden angivna i tabell 2 användas för att beräkna reflektion och transmission vid andra frekvenser^{5, 6, 7}. I kommande figur 11-15 presenteras resultaten från beräkningarna för frekvensområdet 1-300 GHz.



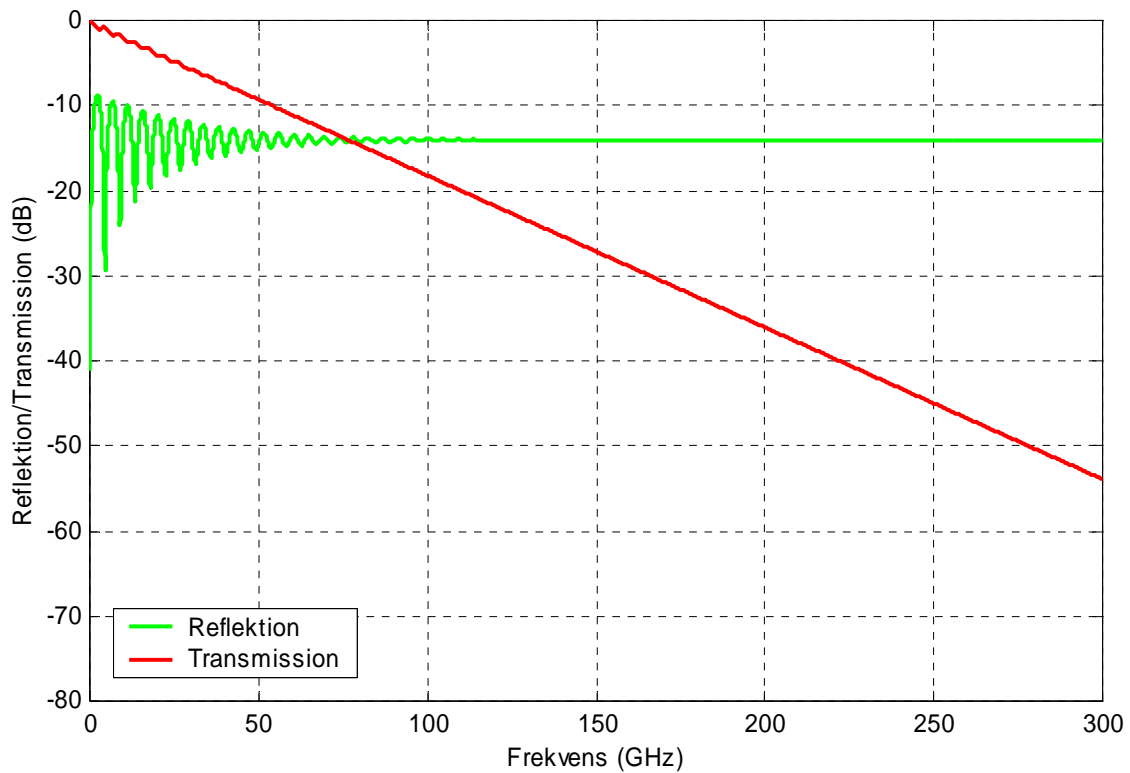
Figur 11. Reflektion/transmission för tegel, tjocklek 85 mm.



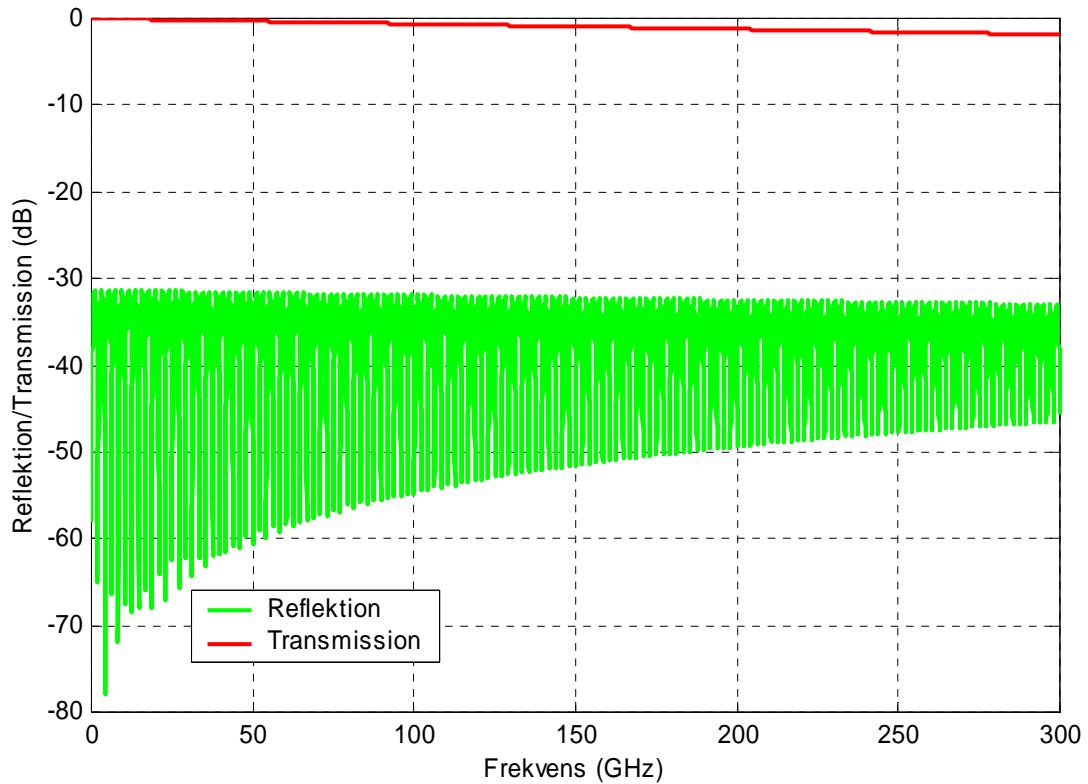
Figur 12. Reflektion/transmission för träpanel, tjocklek 22 mm.



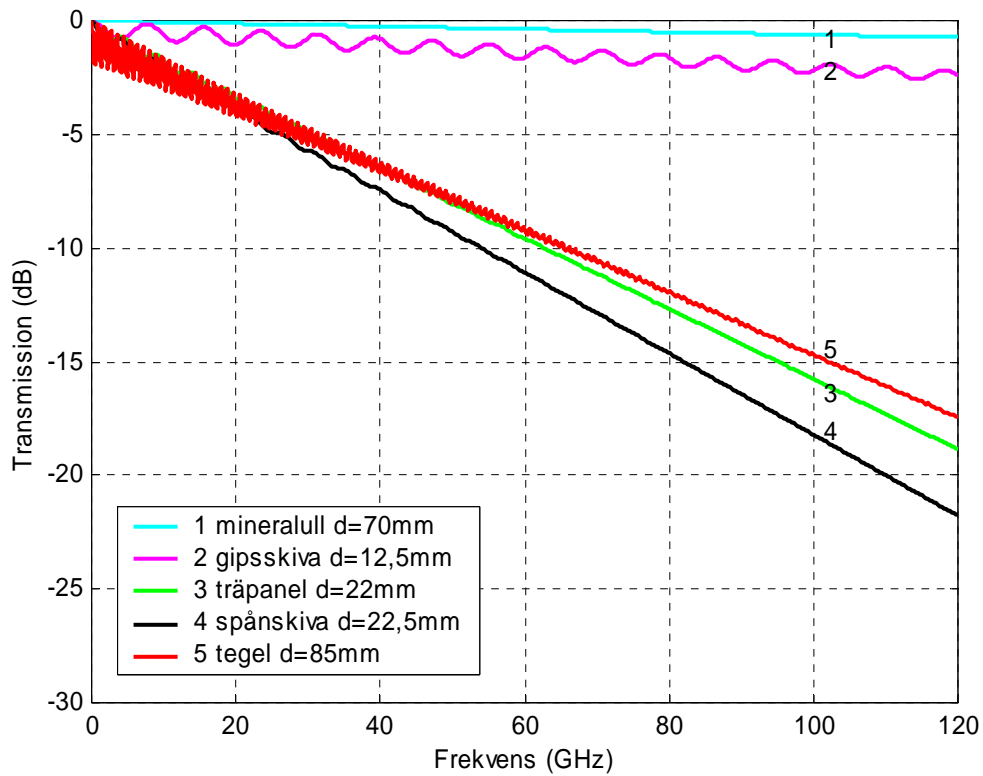
Figur 13. Reflektion/transmission för gipsskiva, tjocklek 12,5 mm.



Figur 14. Reflektion/transmission för spånskiva, tjocklek 22,5 mm.



Figur 15. Reflektion/transmission för mineralull, tjocklek 70 mm.



Figur 16. Beräknad transmission för byggmaterial.

I figur 16 på föregående sida presenteras en sammanställning av transmission beräknad för nämnda byggmaterial i frekvensområde 1-120 GHz.

Resultaten visar att mineralull och gipsskiva har hög transmission medan transmissionen för spånskiva, träpanel och tegel minskar drastiskt med högre frekvens.

4.3.2 Transmissionsmätningar av byggmaterial, emballage och textilier i frirymd

Transmission hos nio byggmaterial, sex emballagematerial och två textilier mättes upp i frirymd. I figur 17 visas de material vars transmission har blivit uppmätt.



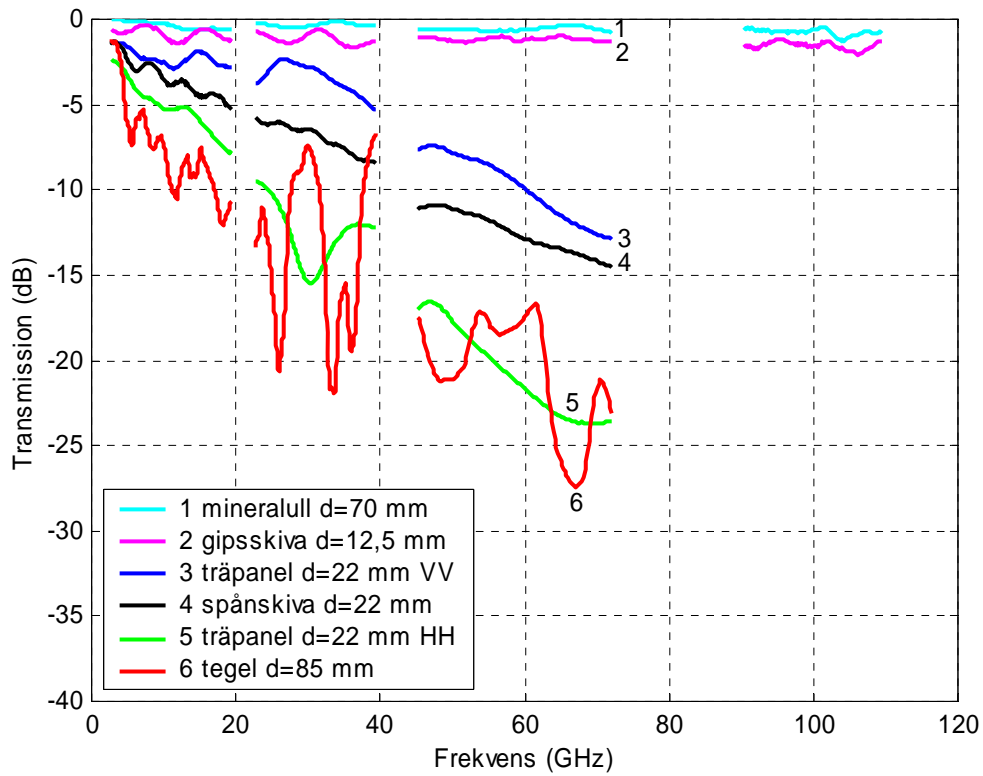
Figur 17. Illustration av de material vars transmission mättes upp.

Fem av byggmaterialen var desamma som karakteriserats i vågledare: tegel, träpanel, spånskiva (tjocklek 22,5 mm), gipsskiva (tjocklek 12,5 mm) och mineralull. De andra fyra byggmaterialen var masonit, glas, plywood och MDF träfiberskiva (Medium Density Fibreboard). Transmission genom dubbel gipsskiva (tjocklek 12,5x2 mm) och tunnare spånskiva (tjocklek 12 mm) mättes också upp.

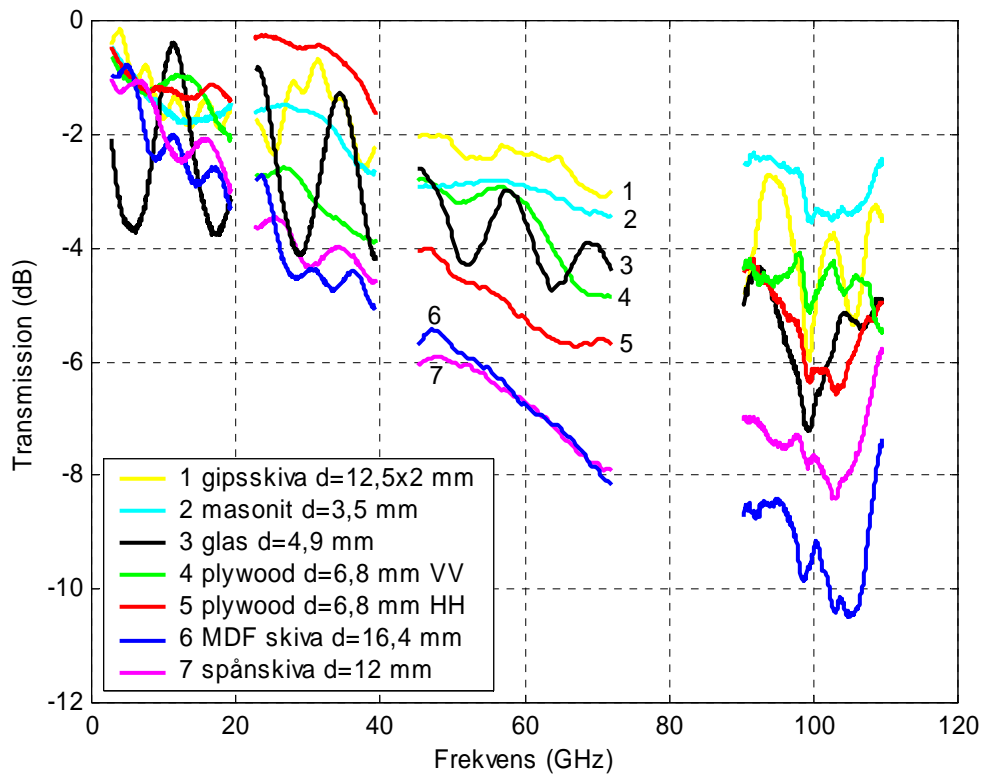
Bland emballagematerialen i plast uppmättes plastpåse, förpackningsplast med luftbubblor och plastpärm samt andra emballagematerial som läder, kartong och wellpapp.

De två typerna av textilier var materialprov av skjorta och jeans, båda av 100 % bomull.

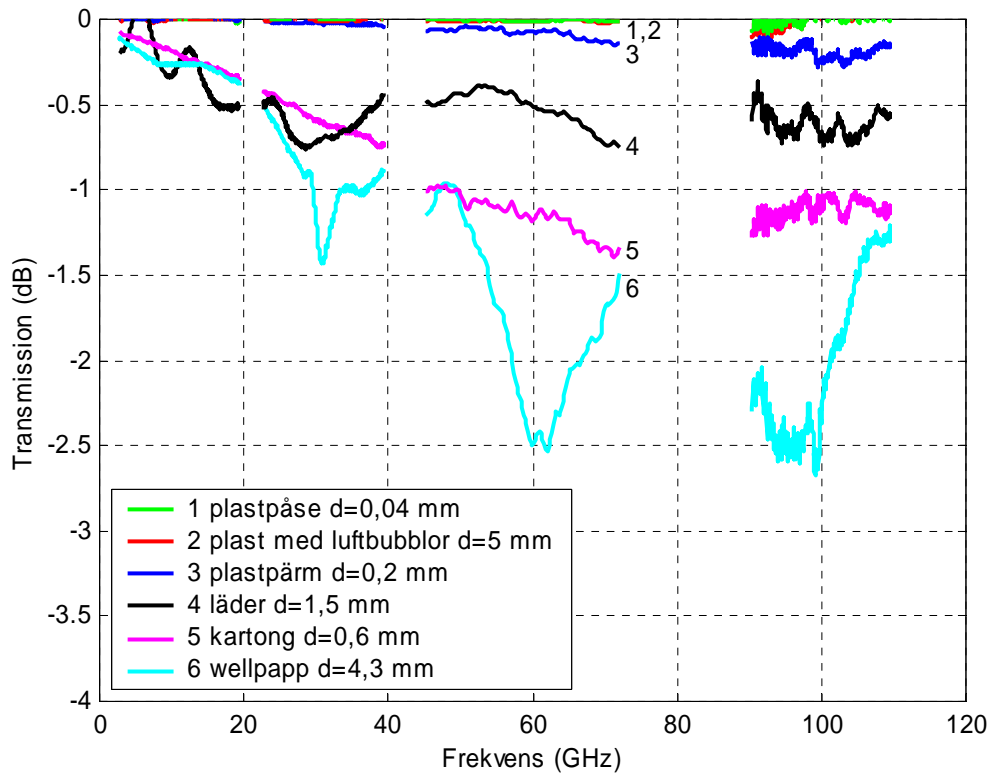
Resultaten av mätningarna presenteras på nästa sida i figur 18-21. Vid jämförelse av transmissionsnivån för olika material, skall hänsyn tas till olika dB-skalor i figur 18-21. I figur 18 är transmissionen för spånskiva, träpanel och tegel inte presenterat för frekvenserna 90 - 110 GHz, på grund av att transmissionen hamnar under brusnivån, som i detta fall ligger mellan 20 - 25 dB.



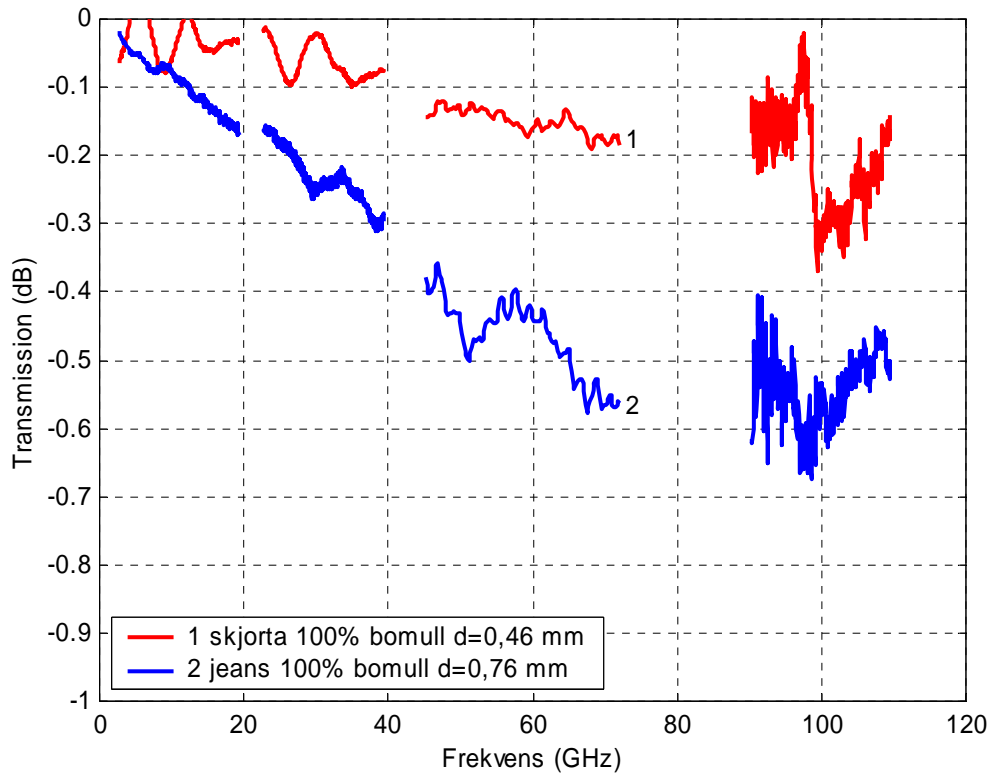
Figur 18. Transmission för byggmaterial uppmätt i frirymd, där d är tjockleken, VV är vertikal polarisation och HH är horisontal polarisation.



Figur 19. Transmission för byggmaterial uppmätt i frirymd, där d är tjockleken, VV är vertikal polarisation och HH är horisontal polarisation



Figur 20. Transmission för emballagematerial uppmätt i frirymd, där d är tjockleken.



Figur 21. Transmission för textilier uppmätt i frirymd, där d är tjockleken.

Transmissionen hos byggmaterial överensstämmer med den transmission som beräknades från materialmätningarna i vågledare (figur 18 och 16). Transmission är hög för mineralull, gipsskiva (även dubbel gipsskiva), masonite, glas och plywood medan den för MDF-skiva, spånskiva, träpanel och tegel minskar drastiskt med frekvensen (figur 18 och 19).

Transmissionen beror givetvis på tjockleken hos materialprovet. Ju tjockare materialprov desto lägre är transmissionen. Detta kan konstateras om man jämför mätningar för enkel och dubbel gipsskiva samt för spånskiva med tjocklek 12 mm och 22 mm.

För träpanel och plywood är det också av betydelse hur träfibrerne är riktade i relation till det elektriska fältet. Transmissionen är högre om den elektriska fältvektorn är parallell med träfibrerne, och lägre om den elektriska fältvektorn är vinkelrät mot träfibrerne. En teori kan vara att träfibrerne har högre dielektricitetskonstant och dominerar i det andra fallet som leder till högre reflektion samt lägre transmission. Denna teori måste dock prövas.

Emballagematerial och textilier uppvisar generellt en hög transmission (figur 20, 21). Som tidigare nämnts beror transmissionen inte bara på materialets egenskaper utan också på materialets tjocklek, därför är transmissionen olika för samma typ av material av olika tjocklek. Exempel på det är transmissionen från tyg av jeans och skjorta, båda av 100 % bomull (figur 21), där skjortan är lite mera transparent på grund av mindre tjocklek. Samma tendens ser man hos, till exempel, plastmaterial och papper av olika tjocklek (figur 20).

Man skall notera att alla mätningar genomfördes med torra material (normal luftfuktighet). Fukt i materialet leder till minskad transmission.

4.3.3 Fuktighetsmätningar

I verkligheten utsätts material för fukt av olika slag. Det kan vara olika luftfuktighet, regn och kläder utsätts även för transpiration. Detta resulterar i att material kommer att ha olika fuktighetsgrad som påverkar materialets transmissionsegenskaper.

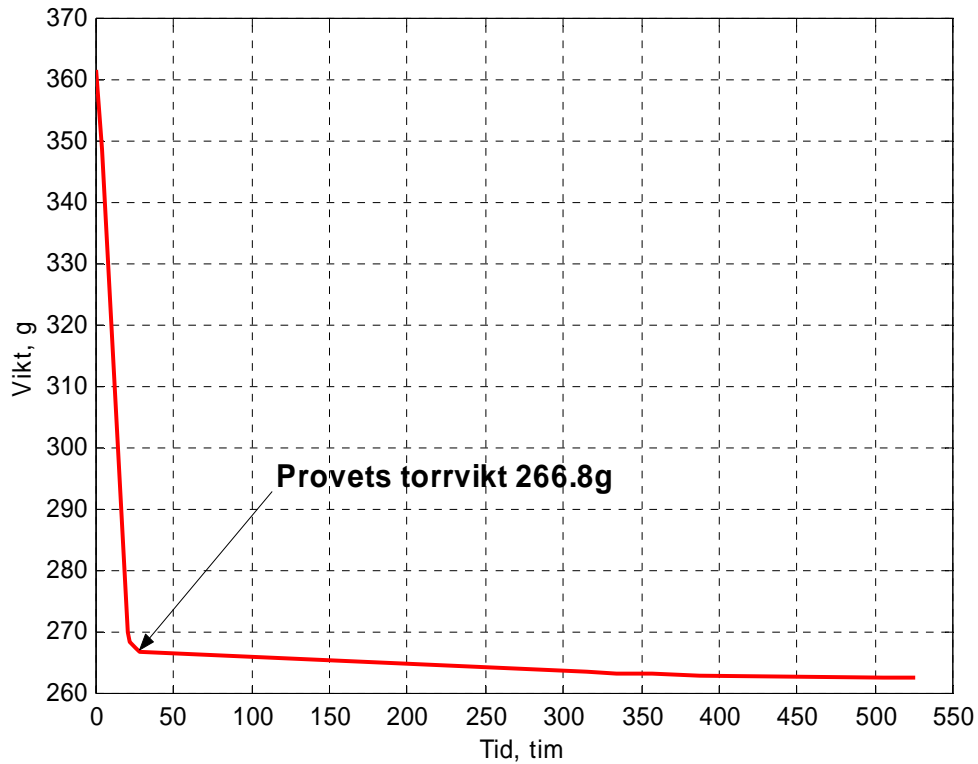
För att få en uppfattning om hur mycket transmissionsegenskaperna påverkas av olika fuktighetsgrad hos materialet, genomfördes en mätserie där man mätte transmissionen genom läder med olika fuktighetsgrad. Läder valdes eftersom det är ett vanligt material för tillverkning av väskor, skor och kläder, samt att man i litteraturen hittar något varierande resultat gällande transmissionsegenskaper hos läder, något som möjligen beror på att det lätt absorberar vatten.

Fuktighetsgraden vid mätningarna definierades enligt följande samband:

$$fuktighet = \left(1 - \frac{torrvikt}{vikt}\right) \cdot 100\%$$

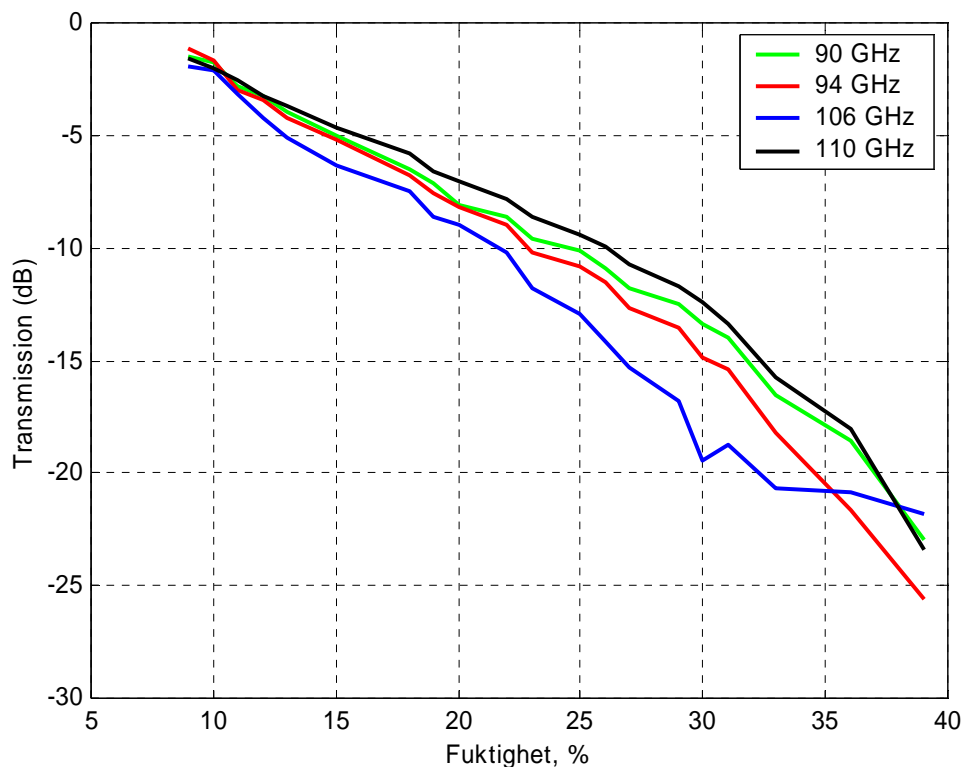
Där *vikt* är vikten hos det fuktiga läderprovet direkt vid mättillfälle och *torrvikt* är vikten hos samma läderprov i torrt tillstånd.

För att få fram materialets torrsvikt genomfördes torkning av läderprovet i ugn under några dagar vid temperaturen ca 100°C. Resultat av torkningsprocessen presenteras i figur 22, på nästa sida. Det finns en brytpunkt i torkningsprocessen där det förmodligen sker en övergång från den ena processen, där viktminskning sker på grund av vattenavdunstning, till den andra processen, där viktminskning sker på grund av kemiska förändringar i materialet. Vikten vid denna brytpunkt definierades som provets torrsvikt.



Figur 22. Torkning av läderprovet i ugnen för att definiera provets torrsvikt.

Transmissionsmätningar genom läder med olika fuktighetsgrad genomfördes med hjälp av samma mätuppställning som presenteras i figur 7. Mätningarna genomfördes med jämna tidsintervaller medan lädret torkade i rumstemperatur genom naturlig avdunstning av vattnet. Transmissionen mättes upp i frekvensområdet mellan 90 - 110 GHz. Sammanställning av mätresultaten för frekvenserna 90, 94, 106 och 110 GHz presenteras i figur 23.



Figur 23. Transmission genom läder med olika fuktighetsgrad.

I enlighet med våra förväntningar minskar transmissionen med ökande fuktighetsgrad. Mätosäkerheten i mätningarna ligger på 5-10 % men blir högre ju närmare gränshäufigvensen, 110 GHz, man kommer samt ju högre fuktighetsgraden är. Utgående från det kan man dra följande slutsatser:

Transmissionen minskar med ökande fuktighetsgrad. Processen är något mindre uttalad vid lägre grad av fuktighet och blir mer uttalad vid högre fuktighetsgrad.

Transmissionsminskningen med ökande fuktighetsgrad blir mer uttalad ju högre upp i frekvens man kommer. Något avvikande från detta är mätresultatet vid 110 GHz vilket förmodligen beror på att detta är en mera osäker mätning jämfört med andra eftersom 110 GHz är en gränshäufigvens för mätningen.

5 Slutsatser och rekommendationer

Genomförda mätningar och beräkningar visar att lägre frekvenser krävs för att uppnå tillräckligt hög penetration genom byggmaterial. Riktigt låga frekvenser krävs för tillräckligt bra penetration genom ytterväggar och något högre frekvenser för god penetration genom innerväggar. Det beror delvis på att olika materialsammansättningar används för att bygga ytter- och innerväggar samt på att ytterväggar i allmänhet är tjockare än innerväggar.

Transmission hos anisotropa material, till exempel träpanel eller plywood, beror på polarisationen hos den infallande strålningen. Transmissionen är högre om den elektriska fältvektorn är parallell med anisotropiriktningen, och lägre då den elektriska fältvektorn är vinkelrätt mot anisotropiriktningen.

Penetration genom emballagematerial och textilier är hög även vid höga frekvenser.

Transmission genom material beror också på materialets fuktighetsgrad. Ju högre vatteninnehåll desto lägre blir transmissionen. Minskning av transmissionen med ökande fuktighetsgrad är påtaglig redan vid låga fukthalter. Därför är det viktigt att alltid ta hänsyn till fuktigheten i materialet vid transmissionsmätningar. Även beträffande fuktiga material är det så att lägre frekvenser ger bättre penetration genom materialet.

Resultaten från undersökningen visar att millimetervågor är att föredra, när man behöver ”se igenom” väggar. I fallet med att ”se igenom” emballage och kläder kan det vara en fördel att använda högre frekvenser, till exempel i terahertzområdet, där man har högre rymdupplösning och möjlighet att få spektrala signaturer. Men även här behöver man kompromissa mellan bildkvalité, praktiskt användbarhet samt systemkostnader. Detta leder kanske tillbaka till millimetervågsbaserade system. Ett exempel kan vara avbildning av sprängämnen gömda under kläder. Kontrasten i bilden ges av kontrasten mellan sprängämne och hud. Om man går högre upp i frekvens blir sprängämnen mer och mer absorberande medan huden kommer att reflektera mer och mer. När man plottar kontrasten som funktion av frekvensen kommer det att finnas en frekvens där kontrasten blir optimal. Denna frekvens tycks ligga i millimetervågsområdet.

För att få bättre förståelse för bildkontrasten borde man fortsätta med denna typ av experimentell verksamhet som presenteras i den här rapporten. Man skulle dock behöva titta på, inte olika material var för sig, utan i relation till varandra, för att kunna uppskatta kontrasten. Denna typ av förståelse finns redan inom andra frekvensområden. Liknande verksamhet borde etableras inom högre frekvensområden, vilket skulle omfatta både beräkningar och experimentella mätningar med ständig återkoppling till varandra.

6 Referenser

1. R. Appleby, "Passive millimeter-wave imaging and how it differs from terahertz imaging", *Phil. Trans. R. Soc. Lond. A* 362, 379-394, 2004.
2. J. F. Federici, B. Schulkin, F. Huang, D. Gary, R. Barat, F. Oliveira & D. Zimdars, "THz imaging and sensing for security applications – explosives, weapons and drugs", *Second. Sci. Technol.* 20, S266-S280, 2005.
3. C. R. Ditchfield & T. S. England, "Passive detection at Q band", RRE memorandum, no. 1124, 1955.
4. B. B. Hu & M. C. Nuss, "Imaging with terahertz waves", *Opt. Lett.* 20, 1716-1718, 1995.
5. W. B. Weir, "Automatic Measurement of Complex Dielectric Constant and Permeability at Microwave Frequencies", *IEEE*, 62, 33, 1974.
6. N. J. Damaskos et al., "The Inverse Problem for Biaxial Materials", *IEEE MTT*, 32, 400, 1984.
7. A. R. von Hippel, *Dielectric Materials and Applications*, The MIT Press, Cambridge, 1954.
8. K. J. Vinoy & R. M. Jha, *Radar Absorbing Materials*, Kluwer Academic Publishers, 1996.
9. K. Sato, T. Manabe, J. Polivka, T. Ihara, Y. Kasashima & K. Yamaki, "Measurement of the Complex Refractive Index of Concrete at 57.5 GHz", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol. 44, No. 1, 1996.
10. P. M. Alexander, "Reflectivity of some materials at 94 GHz", *International Journal of Infrared and Millimeter Waves*, Vol. 2, No. 6, 1981.
11. L. L. Frasch, S. J. McLean & R. G. Olsen, "Electromagnetic Properties Of Dry and Water Saturated Basalt Rock, 1-110 GHz", *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 36, No. 3, 1998.