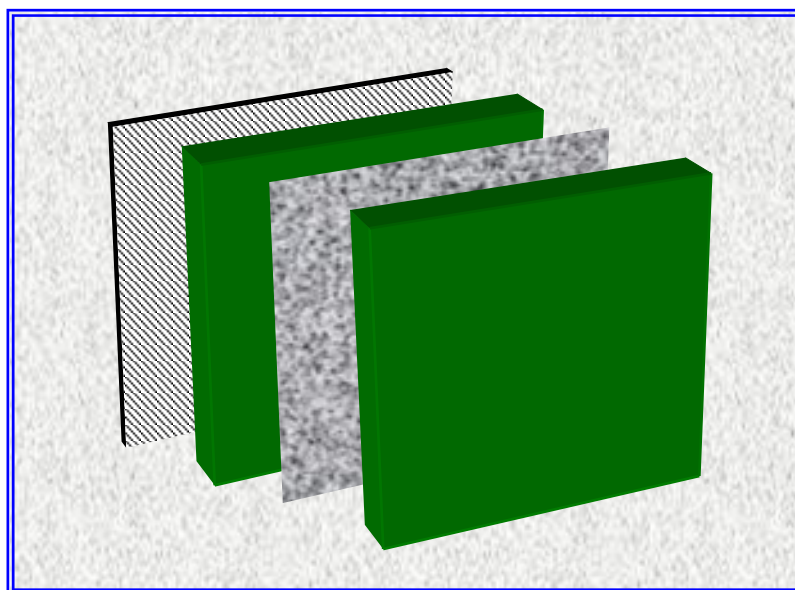


Jan-Olof Ousbäck Fritz Larsson

ENFOLIESKIKT FÖR mm-VÅGSBANDEN



TOTALFÖRSVARETS FORSKNING SINSTITUT

Sensorteknik

Box 1165

581 11 Linköping

FOI-R--0812--SE

Januari 2003

ISSN 1650-1942

Teknisk rapport

Jan-Olof Ousbäck Fritz Larsson

ENFOLIESKIKT FÖR mm-VÅGSBANDEN

Utgivare Totalförsvarets Forskningsinstitut - FOI Sensorteknik Box 1165 581 11 Linköping	Rapportnummer, ISRN FOI-R--0812--SE	Klassificering Teknisk rapport
	Forskningsområde 6. Telekrig	
	Månad, år Januari 2003	Projektnummer E3001
	Verksamhetsgren 5. Uppdragsfinansierad verksamhet	
	Delområde 62 Signaturanpassning	
Författare/redaktör Jan-Olof Ousbäck Fritz Larsson	Projektledare Jan-Olof Ousbäck	
	Godkänd av	
	Uppdragsgivare/kundbeteckning FM	
	Tekniskt och/eller vetenskapligt ansvarig	
Rapportens titel ENFOLIESKIKT FÖR mm-VÅGSBANDEN		
Sammanfattning Rapporten redovisar ett arbete att realisera en tidigare presenterad radarabsorbent nämligen ett lastbärande enfolieskikt optimerat för Ka- och W-banden. Absorbenten består av ett tunt förlustskikt omgivet av två dielektriska skivor. Som förlustskikt har väv belagd med en elektriskt ledande polymer använts och som dielektriska skivor glasfiberarmerad plast. Störningsberäkningar under antagandet att förlustskiktet är utan tjocklek har utförts för att få fram toleranser i designparametrarna. Två absorberande paneler tillverkade under strikt kontroll fungerade i Ka- men inte i W-bandet troligen beroende på att förlustskiktet i det här fallet inte kan betraktas som varande utan tjocklek. Fördjupade störningsberäkningar innefattande både tjocklek och dielektricitetskonstant hos förlustskiktet har utförts för att få kunskap om deras inverkan. Det enfolieskikt som därefter tillverkades, med ett hälften så tjockt förlustskikt, fungerade även detta endast i Ka-bandet. Detta tyder på att den dielektriska beskrivningen av förlustskiktet inte är riktig. Under tiden arbetet vid FOI bedrivits har emellertid ett lyckat resultat med "tjockt" förlustskikt rapporterats. Resultatet kan ifrågasättas utifrån den ingående analys som utförts vid FOI. Den elektriskt ledande polymeren på förlustskiktet åldras till följd av oxidering. Effekten av åldringen beskrivs som funktion av ett par miljöparametrar.		
Nyckelord Radarabsorbenter, Enfolieskikt, RAM, RAS, Smygteknik, Signaturanpassning		
Övriga bibliografiska uppgifter	Språk Svenska	
ISSN 1650-1942	Antal sidor: 36 s.	
Distribution enligt missiv	Pris: Enligt prislista	

Issuing organization FOI – Swedish Defence Research Agency Sensor Technology P.O. Box 1165 SE-581 11 Linköping	Report number, ISRN FOI-R--0812--SE	Report type Technical report
	Research area code 6. Electronic Warfare	
	Month year January 2003	Project no. E3001
	Customers code 5. Commissioned Research	
	Sub area code 62 Stealth Technology	
Author/s (editor/s) Jan-Olof Ousbäck Fritz Larsson	Project manager Jan-Olof Ousbäck	
	Approved by	
	Sponsoring agency	
	Scientifically and technically responsible	
Report title Hybrid Jauman Absorber for the mm-Wavebands		
Abstract The report presents a work to realise a formerly presented radar absorber namely a load carrying hybrid Jauman absorber optimised for the Ka- and W-bands. The absorber consists of a thin resistive sheet enclosed by two dielectric layers. As resistive sheet a conductive polymer treated fabric has been used and as dielectric layers glass fibre reinforced plastics. Perturbation analysis has been performed under the assumption that the resistive sheet has negligible thickness in order to get tolerances of design parameters. Two absorbing panels manufactured under strict control worked in the Ka- but did not work in the W-band, probably depending on the fact that the resistive sheet in this case cannot be considered as having negligible thickness. Deeper perturbation analysis including both thickness and dielectric constant of the resistive sheet has been performed in order to get knowledge about the influence of them. The hybrid Jauman absorber that was manufactured after that the analysis was done had a resistive sheet with a thickness half that of the two previous panels. Even this absorber worked only in the Ka-band. It seems that the dielectric characterisation of the resistive sheet is not correct. However during the time FOI has worked with this matter a successful result has been reported on a panel with the same resistive sheet we first used. This result may be questionable from the thorough analysis performed at FOI. The conductivity of the resistive sheet decreases with time due to ageing. The effect of ageing is described as a function of selected environmental parameters.		
Keywords Radar Absorbing Materials, Jauman Absorber, RAM, RAS, Signature control, Stealth technology		
Further bibliographic information	Language Swedish	
ISSN 1650-1942	Pages 36 p.	
	Price acc. to pricelist	

<u>INNEHÅLLSFÖRTECKNING</u>	<u>SIDA</u>
TACK TILL MEDVERKANDE	5
1. INLEDNING	6
2. DEFINITIONER	6
2.1 Polarisation och infallsvinkel	6
3. UPPBYGGNAD OCH REFLEKTIONSPRESTANDA	7
4. ARBETE GRUNDAT PÅ STANDARDANALYS	9
4.1 Känslighetsanalys	9
4.2 Material	9
4.3 Armerad dielektrisk skiva	10
4.4 Inplastade förlustskikt	10
4.5 Enfolieskikt	10
4.6 Diskussion	11
5. ARBETE GRUNDAT PÅ FÖRDJUPAD ANALYS	14
5.1 Känslighetsanalys	14
5.2 Enfolieskikt	18
5.3 Diskussion	20
6. ÅLDRING AV FÖRLUSTSKIKT	21
7. SLUTSATSER OCH REKOMENDATIONER	23
8. REFERENSER	24
APPENDIX A. STÖRNINGSBERÄKNINGAR	25
APPENDIX B. UTVÄRDERING AV DIELEKTRICITETSKONSTANT HOS ARMERAD DIELEKTRISK SKIVA	30
APPENDIX C. DIELEKTRICITETSKONSTANT SOM FUNKTION AV FIBERFYLLNADSGRAD	36

TACK TILL MEDVERKANDE

Ett stort tack riktas till nedan uppräknade för deras medverkan i arbetet.

Nils Gustafsson	Mikrovågsmätningar
Martin Nilsson	Tillverkning av mätpaneler genom injicering
Jenny Petersson	Bestämning av vågighet hos förlustskikt
Leif Pettersson	Känslighetsanalys beträffande tjocklek samt dielektricitetskonstant hos förlustskiktet
Juhani Wassfjord	Tillverkning av mätpaneler genom injicering och inplastning av förlustskikt
SciArt	Diskussionspartner
Tekniskt stöd, Ursvik	Tillverkning av injiceringsverktyg
Johan Westlund	Konstruktion av injiceringsverktyg

1. INLEDNING

I en tidigare FOA rapport [1] har en teoretisk studie av ett enfolieskikt presenterats som täcker mm-vågsbanden Ka (30 - 36 GHz) och W (90 - 96 GHz).

Målet för arbetet som presenteras i den här FOI-rapporten är i huvudsak att realisera enfolieskiktet samt att undersöka dess känslighet för variation hos designparametrarna. Avslutningsvis diskuteras även åldring hos ingående förlustskikt.

Rapporten riktar sig främst till berörda handläggare inom FM, FMV och försvarsindustrin, men även till personer med viss kunskap och/eller intresse för radarabsorberande material.

2. DEFINITIONER

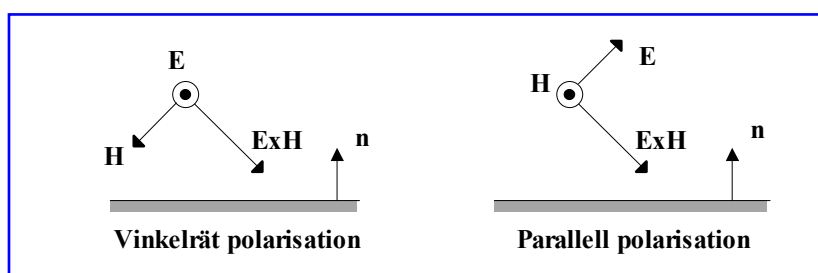
De definitioner som används i denna rapport följer huvudsakligen den mall för beteckningar som utarbetades i ett samarbete mellan FOA, FFI (Forsvarets forskningsinstitut i Norge) och nuvarande Saab Barracuda [2] 1995.

I avsnitt 2.1 redovisas två definitioner (polarisation och infallsvinkel) som förekommer i denna rapport.

2.1 Polarisation och infallsvinkel

Den i rapporten genomgående använda definitionen på vinkelrät respektive parallell polarisation visas i figur 2.1. Med vinkelrät polarisation menas fallet då den elektriska fältvektorn $\mathbf{E}$ är vinkelrät mot det plan som definieras av radarabsorbentens normalvektor $\mathbf{n}$ och den infallande vågens utbredningsvektor $\mathbf{ExH}$.

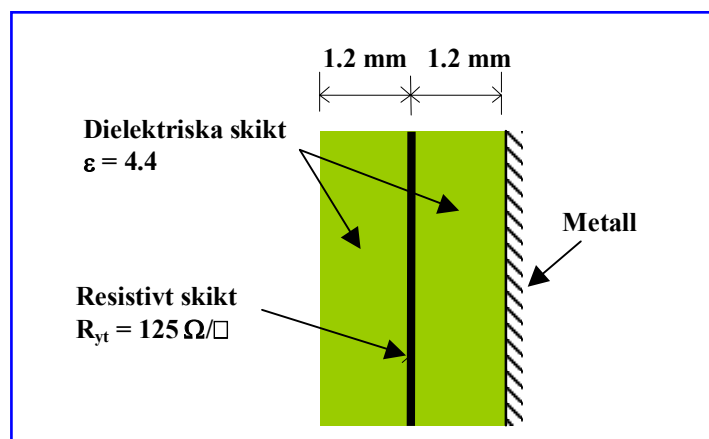
Med parallell polarisation menas fallet då den elektriska fältvektorn är parallell med motsvarande plan. Infallsvinkeln definieras som vinkeln mellan normalvektorn och det infallande fältets utbredningsvektor $\mathbf{ExH}$.



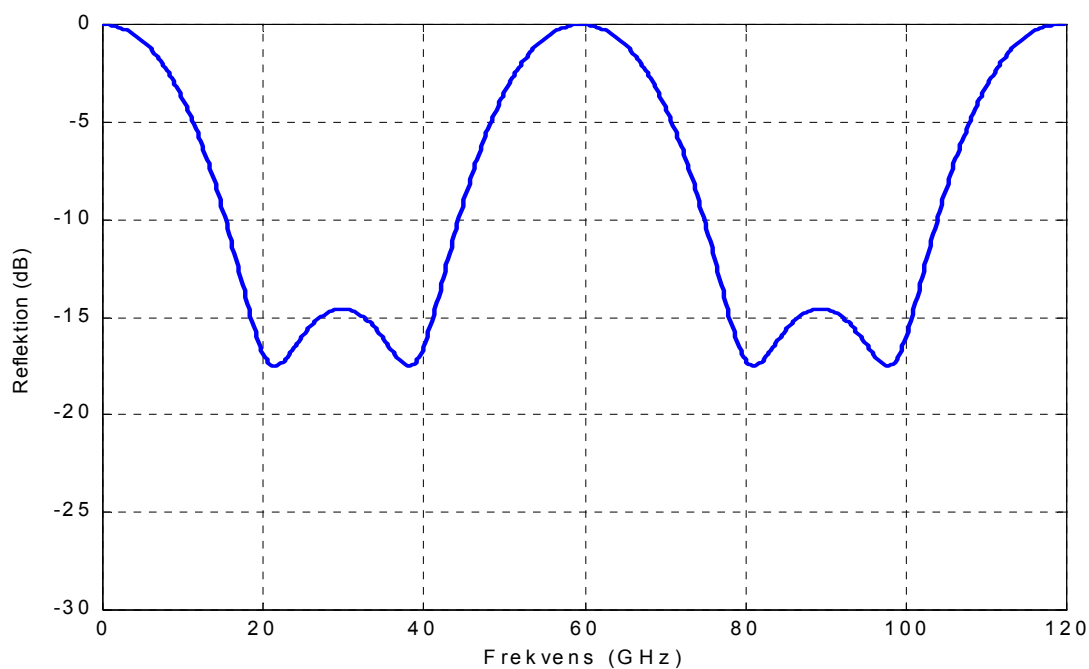
Figur 2.1 Definition av vinkelrät och parallell polarisation, där $\mathbf{E}$ och $\mathbf{H}$ betecknar elektrisk respektive magnetisk fältvektor och $\mathbf{ExH}$ infallsriktningen.

3. UPPBYGGGNAD OCH REFLEKTIONSPRESTANDA

Enfolieskiktet består av två dielektriska skivor med ett tunt resistivt skikt däremellan, se figur 3.1. Det resistiva skiktet karaktäriseras av en ytresistan R_{yt} (resistans/ytenhet), med storheten $\Omega/\square$. Enfolieskiktet kräver ett elektriskt ledande uppbackningsskikt för att fungera. Beräknad reflektion från enfolieskiktet vid vinkelrätt infall visas i figur 3.2.

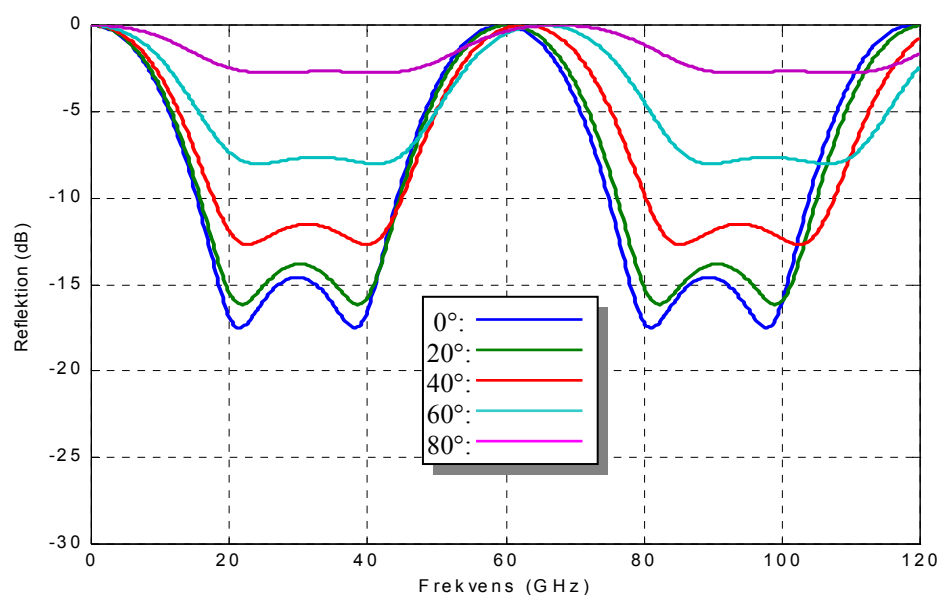


Figur 3.1 Enfolieskikt optimerat för Ka- och W-banden.

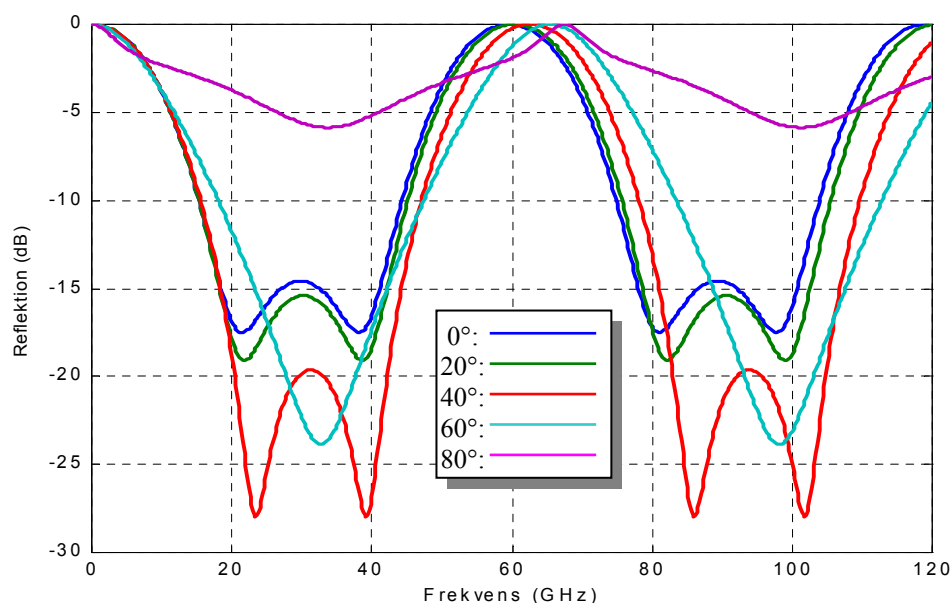


Figur 3.2 Beräknad reflektion från enfolieskiktet som funktion av frekvensen, för vinkelrätt infall.

Inverkan av infallsvinkel visas i figur 3.3 och 3.4 för vinkelrät respektive parallell polarisation. Infallsvinkeln räknas från enfolieskiktets normal.



Figur 3.3 Beräknad reflektion som funktion av frekvensen för vinkelrät polarisation. Fem olika infallsvinklar.



Figur 3.4 Beräknad reflektion som funktion av frekvensen för parallell polarisation. Fem olika infallsvinklar.

Enfolieskiktet täcker infallsvinklar upp till ca 30° om en reflektionsdämpning på 13 dB krävs. Gränsen sätts vid vinkelrät polarisation. För parallell polarisation däremot minskar reflektionen upp till ungefär 40° infallsvinkel. Prestandareduktionen inträffar för denna polarisation först vid större infallsvinklar.

4. ARBETE GRUNDAT PÅ STANDARDANALYS

Förlustskikt behandlas normalt som tunna ytor, med en tjocklek ≈ 0 . Så har gjorts i detta fall.

4.1 Känslighetsanalys

Ett enfolieskikt är resonant till sin natur och därför känsligt för avvikelser från nominella värden hos designparametrarna dielektricitetskonstant och tjocklekar hos de båda skivorna, samt ytresistans hos det resistiva skiktet. Ett antal störningsberäkningar har gjorts (se figur A.1 - A.8 i Appendix A), som visar att om reflektionen från enfolieskiktet vid vinkelrätt infall skall understiga -13 dB i de båda angivna frekvensområdena får avvikelserna hos dielektricitetskonstanten inte vara större än 0.4, hos ytresistansen inte större än $10 \Omega/\square$ och hos tjockleken (för det fall att skivorna är lika tjocka) inte större än 0.08 mm för varje skiva. Om skivornas totaltjocklek hålles konstant till 2.40 mm men det resistiva skiktet läggs in osymmetriskt får osymmetrin inte vara större än 0.03 mm. Vidare visar det sig att metallbackningen måste sitta alldeles intill enfolieskiktet (se figur A.9 - A.10 i Appendix A). En luftspalt tjockare än 0.1 mm kan inte accepteras.

4.2 Material

De båda dielektriska skivorna framställdes av fiberarmerad plast. Armeringen utgjordes som tidigare [1] med väv av E-glasfiber medan plasten bestod av polyester Civic K 530 TE eller Palatal S-334 V-01. Plasten har vid kontrollmätning av dielektricitetskonstanten givit värdet $2.79-j0.039$ respektive $2.87-j0.055$. Den tidigare använda polyestern K 530 TQE hade värdet $2.78-j0.028$. Realdelarna hos dielektricitetskonstanterna är så nära varandra att diagram 5.1 i [1] (diagrammet visas även i Appendix C) fortfarande kan användas för att få fram fiberfyllnadsgraden för ett givet värde på dielektricitetskonstantens realdel, i det här fallet 4.4. Fiberfyllnadsgraden blir ungefär 52 % vol. Utgående från tjockleken 1.2 mm hos de dielektriska skivorna kan en armeringsvikt per skiva av 1590 g/m^2 beräknas.

Vid mätningar på den tidigare använda typen av förlustskikt bestående av huggen kolfiber i en mycket tunn matta av dielektrisk fiber visade det sig att ytresistansen ökar med frekvensen, troligen beroende på att avståndet mellan kolfibrerna är för stort, så att när våglängden minskar en allt större del av vågenergin passerar genom förlustskiktet. Därför söktes ett förlustskikt med frekvensoberoende ytresistans och frekvensgången hos en typ av förlustskikt som tidigare används [3] undersöktes, nämligen en väv belagd med elektriskt ledande polypyrrol, som går att erbjuda under namnet Contex från Milliken Research Corporation USA. Denna typ av väv befanns ha frekvensoberoende ytresistans inom det aktuella frekvensområdet. I undersökningen har en Contex-väv med beteckningen C343, som har den sökta ytresistansen $125 \Omega/\square$, samt en väv C204 med ytresistansen $80 \Omega/\square$ använts. Bärarväven har i båda fallen fibrer av S-2 glas, väger 309 g/m^2 och har symmetrisk uppbyggnad. Polypyrrolbeläggningens vikt utgör inte mer än 2-3 % av bärarvävens vikt. Vävens tjocklek är 0.24 mm. En väsentlig skillnad gentemot den tidigare använda typen av förlustskikt är den mer än dubbelt så stora tjockleken. En nackdel är att skiktet åldras med stigande ytresistans som följd. Mera härom längre fram i rapporten.

4.3 Armerad dielektrisk skiva

För kontroll av att rätt dielektricitetskonstant erhålles har ett laminat 30 x 30 cm med nominella tjockleken 2.4 mm och utan förlustskikt tillverkats. Skivan har framställts genom injicering under vakuum för att så långt möjligt undvika blåsor i den. Två olika glasfibervävar användes för att erhålla rätt armeringsmängd, dels en väv (1) med ytvikten 281 g/m², dels en väv (2) med ytvikten 165 g/m². Laminatet hade uppläggningsen (1,2,1,2,1,1)_s, där index S betyder symmetriskt. Vävarna avfuktades i ugn under en natt vid 80° C före injiceringen. Som matris användes K 530 TE + 1.5 % härdare M. Ett dygns härdning vid rumstemperatur följdes av efterhärdning vid 50° C under 5 timmar. Tjockleken hos laminatet 25 mm in från kanten blev i genomsnitt 2.49 mm och inom en centralt belägen kvadrat med 17 cm sida 2.56 mm. Standardavvikelsen hos enskild observation var 0.04 respektive 0.03 mm. Utvärdering av mikrovågsmätningar gav dielektricitetskonstanten 4.23 i det lägre frekvensområdet (Appendix B) och 4.39 i det högre.

4.4 Inplastade förlustskikt

För att få veta vilken inverkan matrisplasterna har på ytresistansen hos de båda Contextvävarna mättes några vävprover dels torra, dels inplastade. Inplastningen gjordes både med K 530 TE + 1.5 % härdare M och med S-334 V-01 + 1.0 % härdare Butanox M 50 + 0.06 % inhibitor NLC 10. Härdningen skedde under tryck ≈ 30 kPa under 1 dygn i press. K 530 TE härdade i rumstemperatur. För att få S-334 V-01 att härda fick presstemperaturen höjas till 30-35 °C under cirka 3 h. Skikten efterhärdades inlagda i en evakuerad säck av aluminiumfolie i ugn under 5 h vid temperaturen 50° C. Resultatet framgår av tabell 4.1.

Förlustskikt		C343-3		C343-4		C204-1		C204-3	
Frekvens		30-36 GHz	90-96 GHz	30-36 GHz	90-96 GHz	30-36 GHz	90-96 GHz	30-36 GHz	90-96 GHz
R_{yt} Torr	Snitt 0°	120	130	130	135	80	80	75	70
	Snitt 90°	125	120	130	135	90-100	90	75	75
R_{yt} Inplastad	Snitt 0°	135	135	135-150	145	100	100	80	80
	Snitt 90°	150	135	165-170	155	110	100	90	80
Plast		Palatal S-334 V-01		K 530 TE		K 530 TE		Palatal S-334 V-01	
Ökning av R_{yt}	Snitt 0°	15	5	5-20	10	20	20	5	10
	Snitt 90°	25	15	35-40	30	10-20	10	15	5

Tabell 4.1 Inplastningens inverkan på ytresistansen R_{yt} (Ω/□)

En ökning av ytresistansen genom inplastningen kan konstateras. Hur mycket den ökat är svårt att säga beroende på att mätosäkerheten är av storleksordningen 10 Ω/□. I något fall är ökningen så stor att den kan störa enfolieskiktets funktion.

4.5 Enfolieskikt

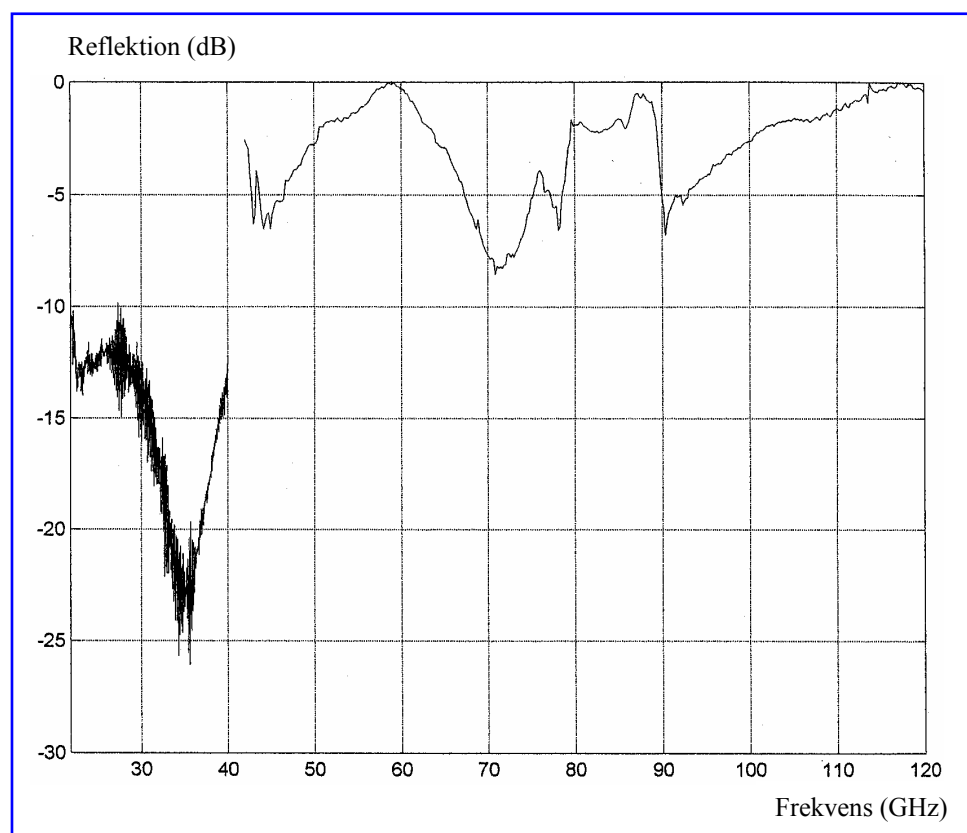
Två enfolieskikt har tillverkats. Uppläggningsen hos armeringen har i båda fallen varit densamma som hos den ovan beskrivna armerade dielektriska skivan. I symmetriplanet har Context-väven lagts in. Ena panelen hade en C343-väv som förlustskikt, vars ytresistans bestämts till 110 - 115 Ω/□, samt S-334 V-01 (+M 50 1 % + NLC 10 0.06 %) som matris.

För den andra var motsvarande uppgifter C204 ($90\text{-}100\ \Omega/\square$) och K 530 TE (+M 1,5 %). En 0.05 mm tjock aluminiumfolie har lagts in i verktyget för att få en tätt sittande metallbackning. Tjockleken vid kanten blev 2.50 (0.020) mm och centralt 2.54 (0.021) mm för panelen med C 343-väven. För den andra panelen blev tjockleken 2.55 (0.023) mm respektive 2.59 (0.014) mm. Resultatet av mikrovågsmätningar i FOIs NRL-båge visas i figur 4.1- 4.4. Båda panelerna fungerar i Ka-bandet men inte i W-bandet.

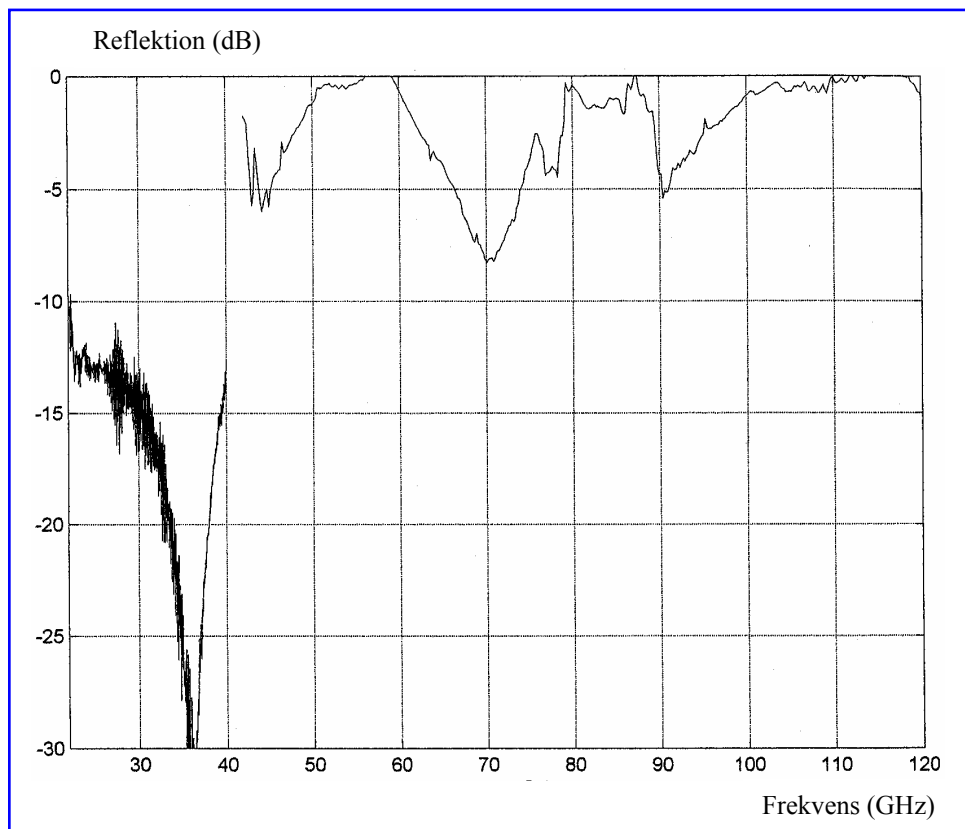
4.6 Diskussion

Enfolieskikten är tillverkade under så strikt kontroll att det är osannolikt att den bristande funktionen skulle kunna förklaras av en störning i designparametrarna enligt standardanalysen. Reflektionskurvorna är varandra dessutom så lika att det ligger nära till hands att tro att den bristande funktionen snarare beror på att analysen inte gäller för det behandlade fallet. Vävarmeringens struktur ger upphov till en vågighet hos förlustskiktet som lokalt kan uppfattas som en asymmetri. Figur 4.5 och 4.6, som visar snitt från enfolieskikten, illustrerar effekten. Amplituden hos vågigheten har uppskattats till 0.12 mm. Vilken inverkan denna har på enfolieskiktets funktion är svårt att säga.

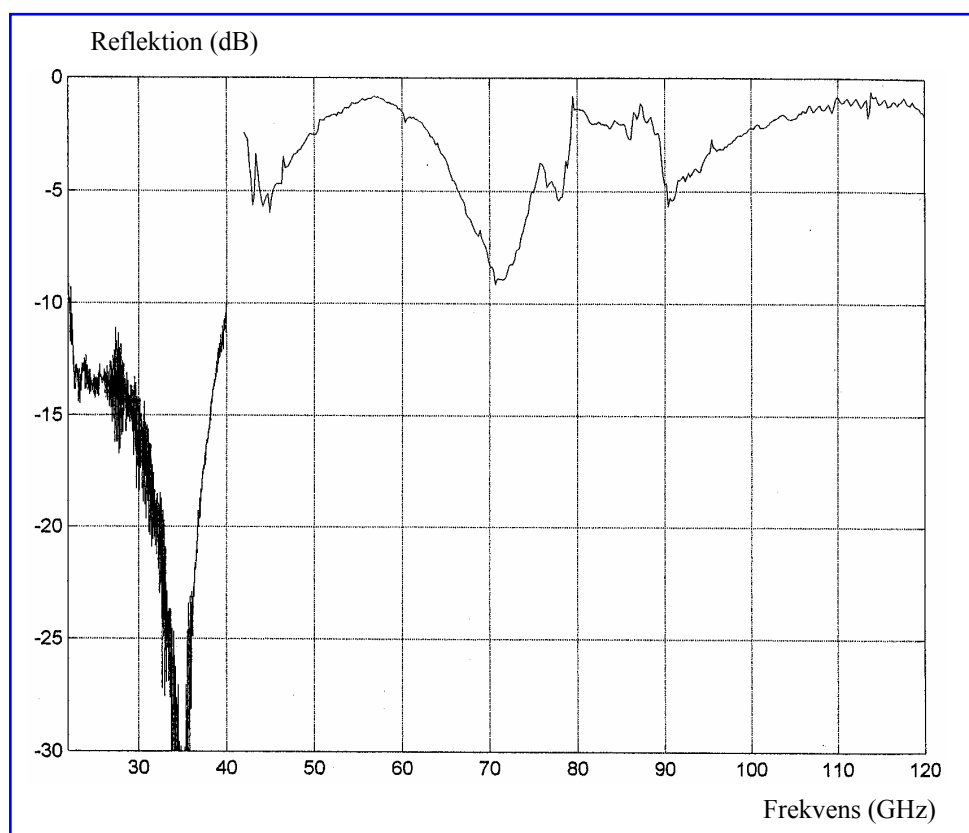
En anledning till att det misslyckade arbetet enligt standardanalys redovisas är att ett lyckat resultat rapporterats [4], som grundar sig på samma utgångspunkter som det misslyckade arbetet och som dessutom förmodligen erhållits under mindre strikt kontroll än detta. Det lyckade resultatet har emellertid erhållits med en annan metod för mikrovågsmätningarna. Det är viktigt att få klarhet om orsaken till de skilda resultaten.



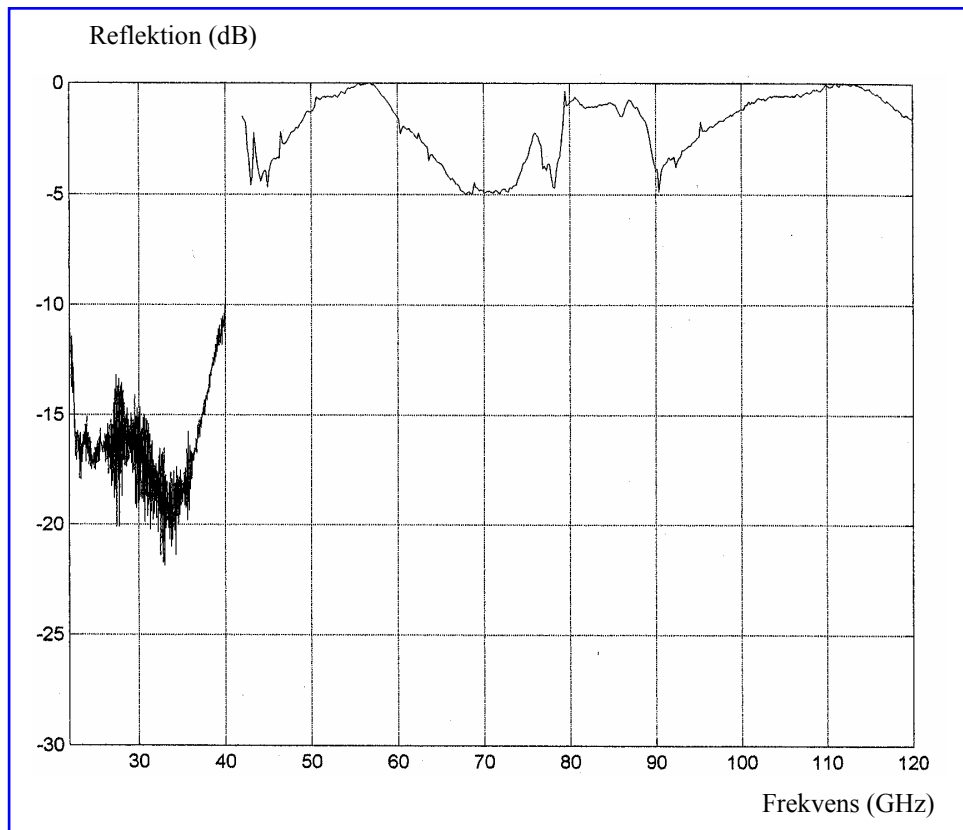
Figur 4.1 Reflektion från enfolieskikt med förlustskikt Context C343.
Parallell polarisation.



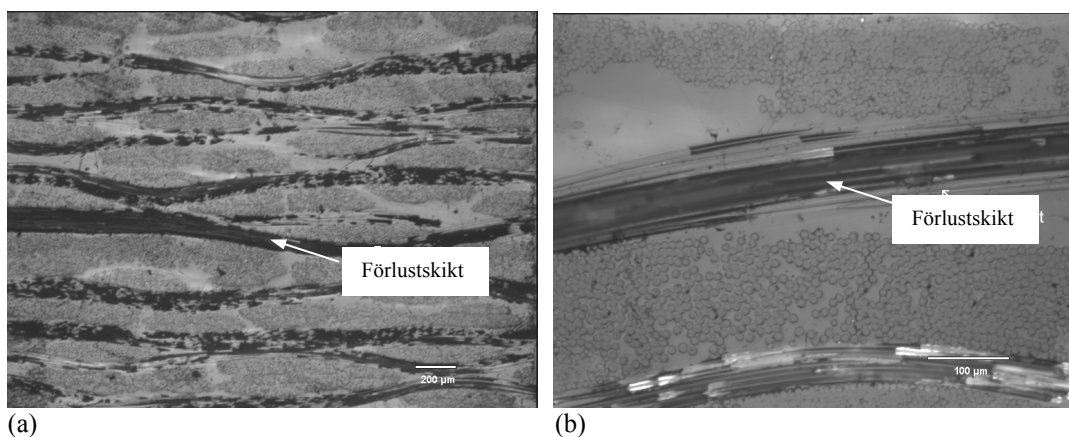
Figur 4.2. Reflektion från enfolieskikt med förlustskikt Context C343.
Vinkelrät polarisation.



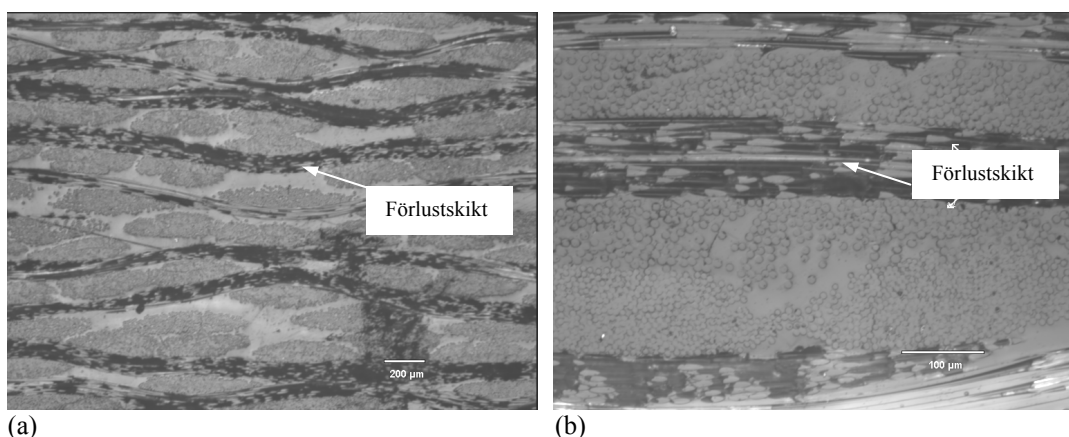
Figur 4.3. Reflektion från enfolieskikt med förlustskikt Context C204.
Parallell polarisation.



Figur 4.4. Reflektion från enfolieskikt med förlustskikt Context C204.
Vinkelrät polarisation.



Figur 4.5. Förlustskikt 1 i (a) 50x respektive (b) 200x förstoring.



Figur 4.6. Förlustskikt 2 i (a) 50x respektive (b) 200x förstoring.

5. ARBETE GRUNDAT PÅ FÖRDJUPAD ANALYS

Enfolieskikten fungerade inte i det högre frekvensområdet. Det som ligger närmast till hands att misstänka som orsak till detta är att standardanalysen karakteriserar förlustskiktet som en yta med en ytresistans och inte som en dielektrisk skiva med tjocklek och dielektricitetskonstant. Denna brist blir påtagligare ju högre frekvensen är och därmed relativa tjockleken hos förlustskiktet.

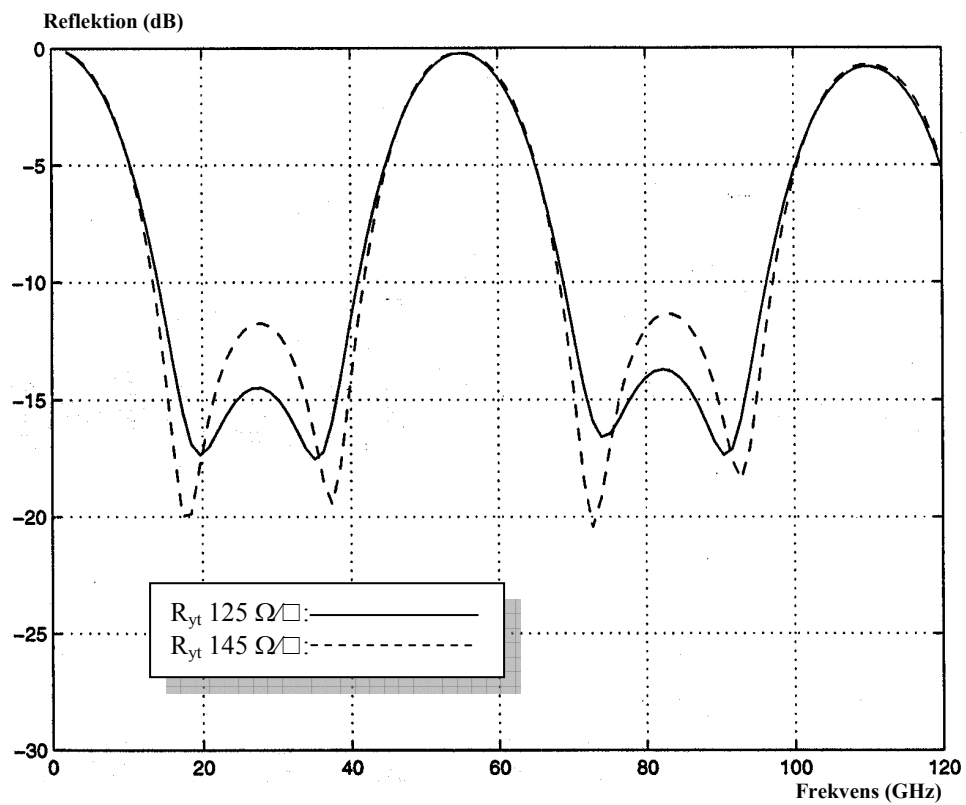
5.1 Känslighetsanalys

Beräkningar har utförts som baseras på en tjocklek d hos förlustskiktet och en ledningsförmåga $\sigma = 1/R_{yt}d$. En första serie behandlar inverkan av dielektricitetskonstanten hos förlustskiktet vid konstant tjocklek 0.20 mm. De dielektriska skivorna har antagits ha dielektricitetskonstanten $4.4-j0.075$ och tjockleken 1.20 mm. Beräkningarna har utförts både för ytresistanserna $125 \Omega/\square$ och $145 \Omega/\square$.

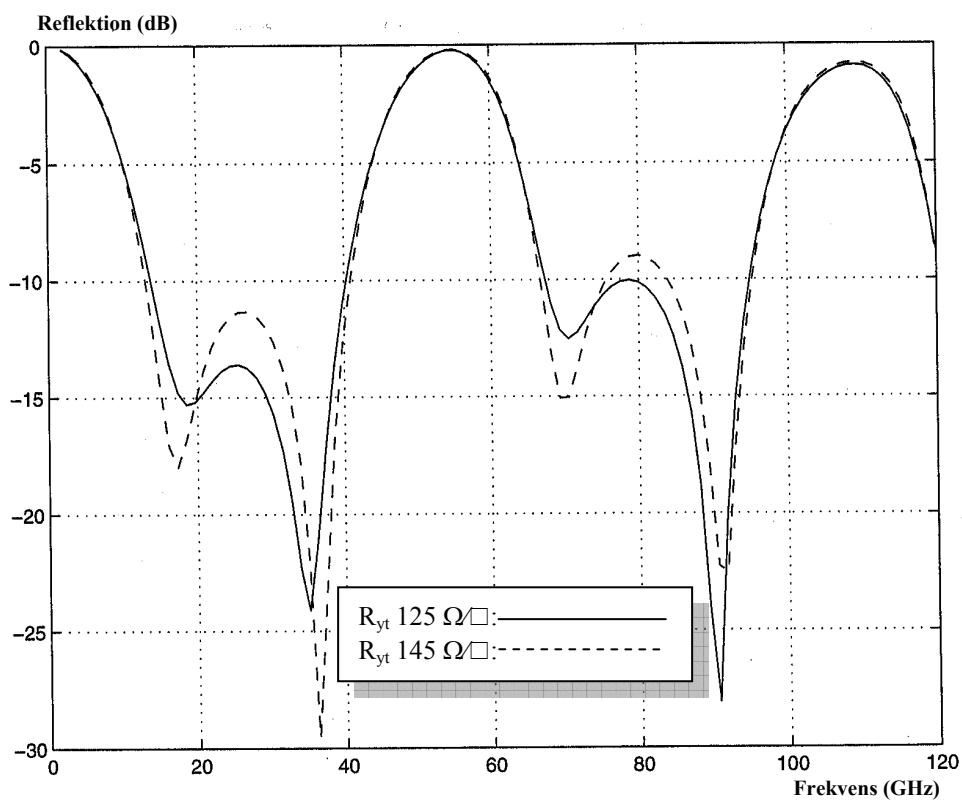
Som framgår av figurerna 5.1, 5.2 och 5.3 ger stigande dielektricitetskonstant hos förlustskiktet upphov till minskande effektivitet i W-bandet medan inverkan i Ka-bandet är ringa. Vilket värde som dielektricitetskonstanten för förlustskiktet har i det aktuella fallet är osäkert men det finns indikationer i litteraturen [5] på att dielektricitetskonstanten för den använda C343-väven kan vara så hög som 12. För att få ett säkert värde krävs mätningar på ett laminat armerat med förlustväv till aktuell fiberfyllnadsgrad och minst 3 mm tjockt. Något sådant laminat har inte kunnat tillverkas på grund av otillräcklig tillgång på förlustväv.

Beräkningar har också gjorts angående inverkan av tjockleken hos förlustskiktet, figur 5.4. Dielektricitetskonstant och tjocklek hos de dielektriska skivorna är desamma som i föregående avsnitt. För förlustskiktet har antagits att ytresistansen är $125 \Omega/\square$ och att dielektricitetskonstanten är 12. En ökande tjocklek hos förlustskiktet leder till ökad reflektion speciellt i W-bandet. Reflektionskurvan för tjockleken 0.20 mm hos förlustskiktet har vidare samma karaktär som kurvorna som mätts upp för de båda enfolieskikten enligt standardanalys, figurerna 4.1 och 4.4.

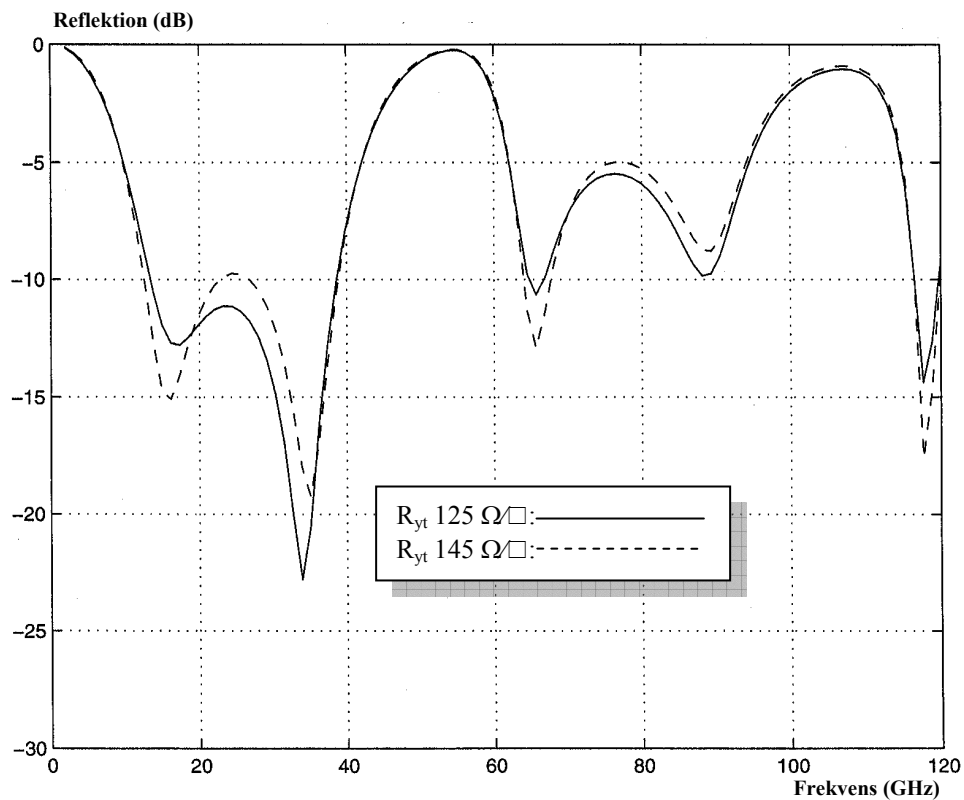
Man skulle kunna tro att det i viss utsträckning skulle gå att kompensera för förlustskiktets tjocklek genom att göra de båda dielektriska skivorna tunnare. Detta leder emellertid endast till att reflektionskurvan flyttas mot högre frekvenser inte mot lägre nivå, figur 5.5.



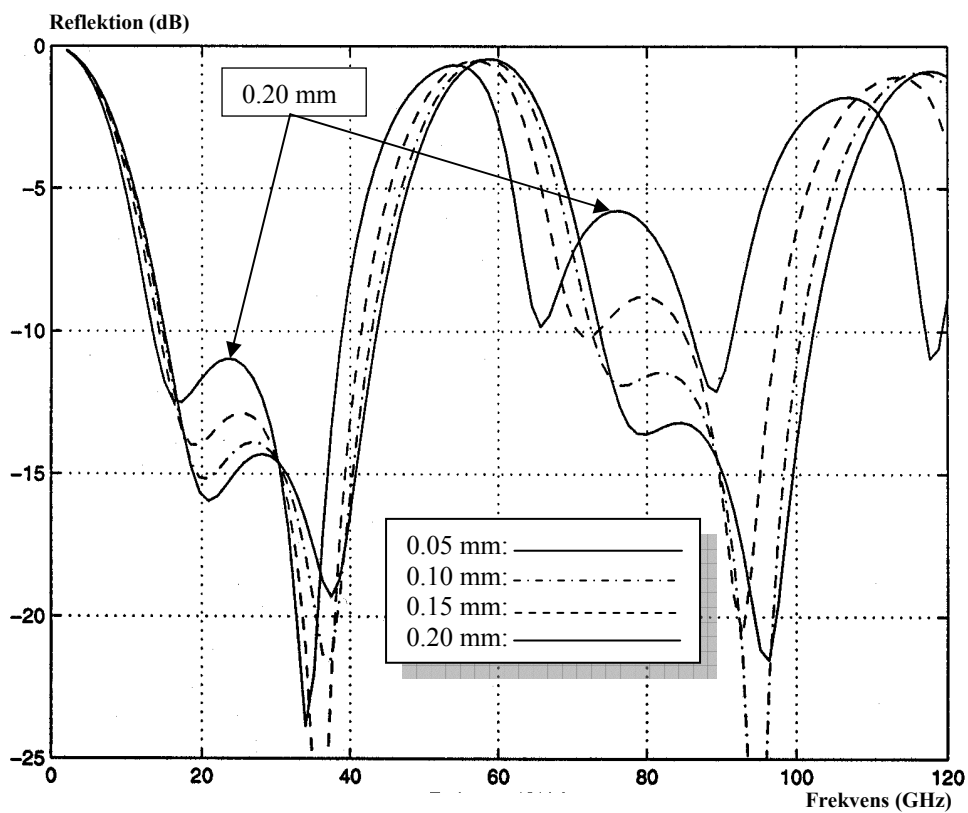
Figur 5.1. Beräknad reflektion från enfolieskikt. Förlustskikt: tjocklek 0.20 mm, $\epsilon_r = 3$.
 Dielektriska skivor: tjocklek 1.20 mm, $\epsilon_r = 4.4 - j0.075$.



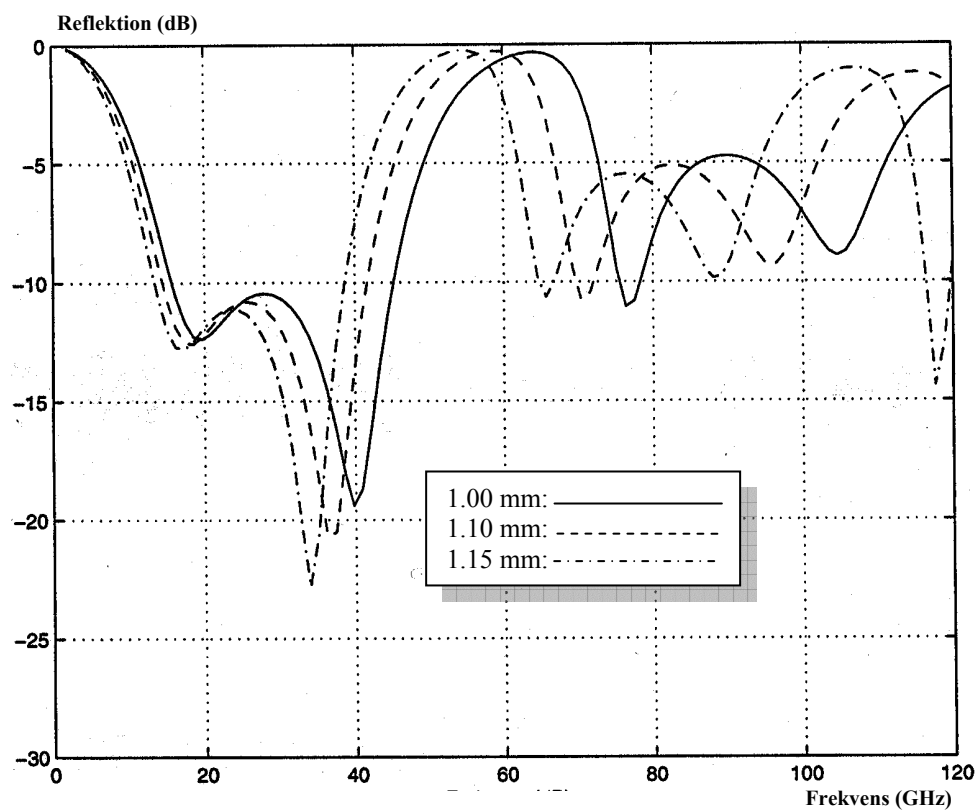
Figur 5.2. Beräknad reflektion från enfolieskikt. Förlustskikt: tjocklek 0,20 mm, $\epsilon_r = 6$.
 Dielektriska skivor: tjocklek 1.20 mm, $\epsilon_r = 4.4 - j0.075$.



Figur 5.3. Beräknad reflektion från enfolieskikt för 2 olika förlustskikt med en tjocklek på 0.20 mm och $\epsilon'_r=12$.
Dielektriska skivor: tjocklek 1.20 mm, $\epsilon_r=4.4 - j0.075$.



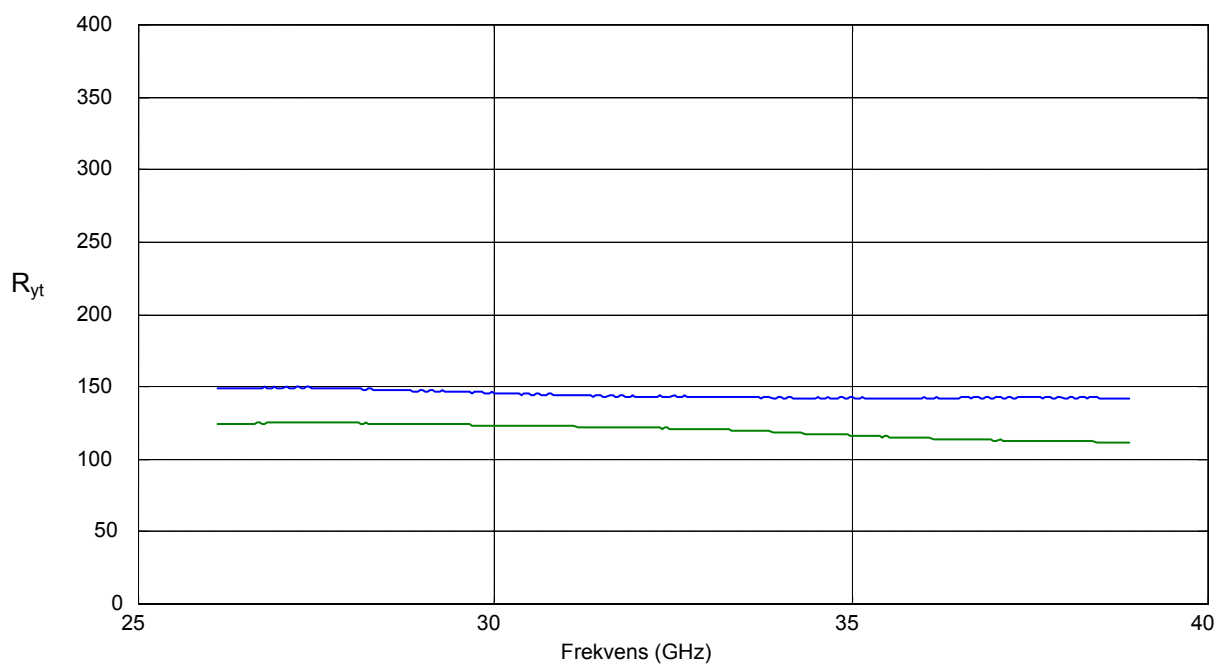
Figur 5.4. Beräknad reflektion från enfolieskikt för 4 olika tjocklekar hos förlustskiktet: 0.025, 0.05, 0.10 och 0.20 mm, $\epsilon'_r=12$, ytresistans $125 \Omega/\square$.
Dielektriska skivor: tjocklek 1.20 mm, $\epsilon_r=4.4 - j0.075$.



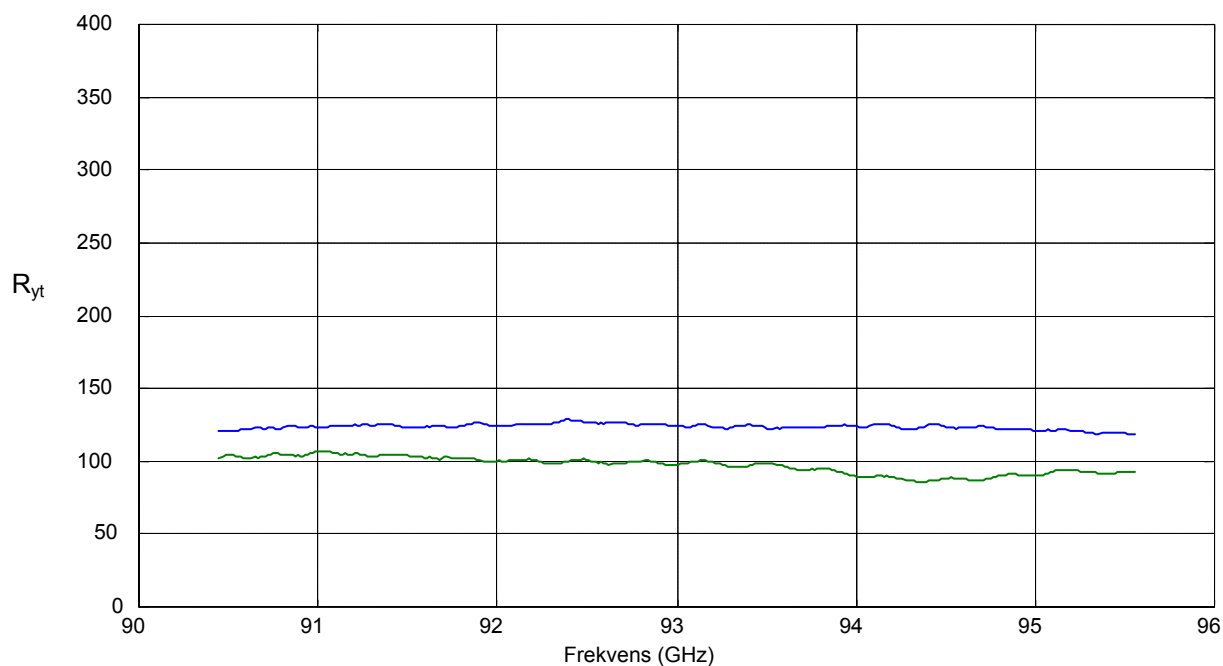
Figur 5.5. Beräknad reflektion från enfolieskikt för 3 olika tjocklekar på de dielektriska skivorna. Förlustskikt: tjocklek 0.20 mm, $\epsilon_r = 12$, ytresistans $125 \Omega/\square$. Dielektriska skivor: tjocklek 1.00, 1.10 och 1.15 mm, $\epsilon_r = 4.4 - j0.075$.

5.2 Enfolieskikt

Baserat på de vunna erfarenheterna har ett enfolieskikt tillverkats med ett förlustskikt som inte är mer än ungefär 0.10 mm tjockt. Förlustskiktet består av en ”tightly woven balanced nylon impression fabric” som Milliken Research Corporation belagt till ytresistansen 85–150 $\Omega/\square$ beroende på frekvensområde och orientering, figur 5.6 och 5.7. Snitt 90° respektive 0° uppfyller specifikationen ungefär 125 $\Omega/\square$ i Ka- respektive W-bandet.



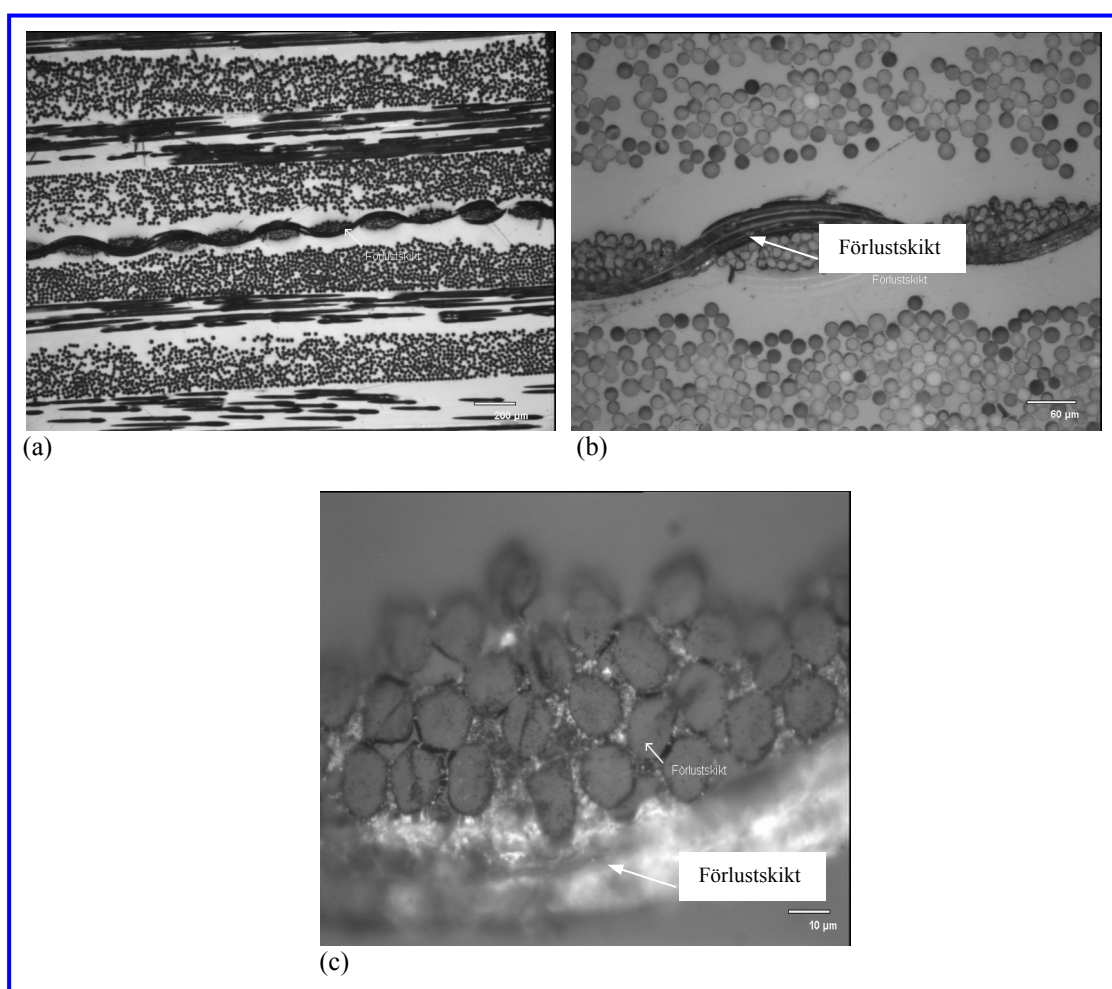
Figur 5.6 Ytresistans hos tunt rtt förlustskikt. Snitt 0°: — , snitt 90°: — . Frekvens 25 – 40 GHz.



Figur 5.7 Ytresistans hos ett tunt förlustskikt. Snitt 0°: — , snitt 90°: — . Frekvens 90 – 96 GHz.

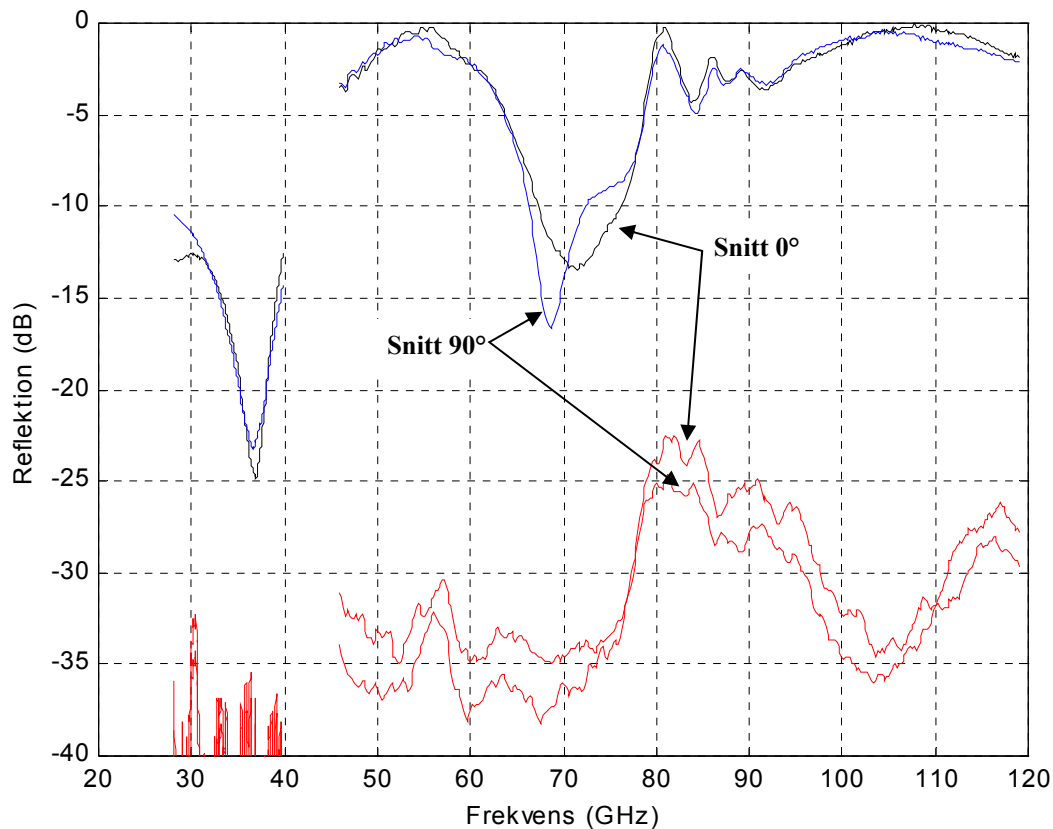
Armeringen i de båda dielektriska skivorna har vidare bytts ut mot en krimpfri sådan för att om möjligt minska krusigheten hos förlustskiktet. Den använda armeringen (Unifibre 300 g/m²) består av enkelriktade E-glasfibrer som hålls samman av tunna trådar av polyester som är limmade med epoxi till fibrerna på båda sidorna hos armeringsskikten. Avståndet mellan trådarna är 2 á 3 cm. Uppläggningsen har varit (0, 90, 0, 90, 0)_s med förlustskiktet i symmetriplanet. På samma sätt som tidigare har en 0.05 mm tjock aluminiumfolie lagts in som metallbackning. Polyester K 530 TE (+M 1.5 %) har använts som matris. Laminatet härdades endast vid rumstemperatur.

Laminatets tjocklek centralt blev 2.63 mm med standardavvikelsen 0.03 mm och ute vid kanterna 2.59 mm med standardavvikelsen 0.04 mm. Förlustskiktets tjocklek har bestämts på snitt ur enfolieskiktet till 0.10 mm, amplituden hos förlustskiktets vågighet till 0.03 mm och asymmetrin hos förlustskiktets läge i enfolieskiktet till 0.01 mm. Snitt genom enfolieskiktet visas i figur 5.8.



Figur 5.8 Förlustskiktet i (a) 50x, (b) 200x respektive (c) 1000x förstoring.

Resultatet av mikrovågsmätningar i FOIs NRL-båge visas i figur 5.9. Som tidigare fungerar enfolieskiktet väl i Ka-bandet medan det inte alls fungerar i W-bandet. Reflektionsminimat som observerats vid 70 GHz för de tidigare mätta enfolieskikten har fördjupats för enfolieskiktet enligt den fördjupade analysen och skulle kunna användas som dämpskikt runt denna frekvens.



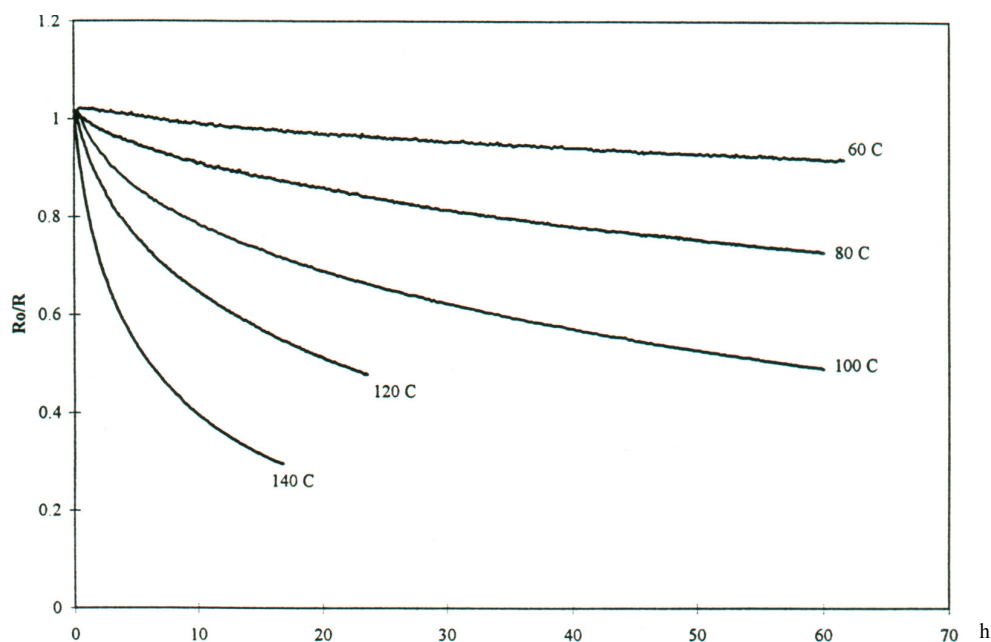
Figur 5.9 Reflektion från enfolieskikt enligt fördjupad analys, svart och blå kurva. Provföremålet har vridits 90 ° mellan mätningarna. Röda kurvor anger bakgrundsreflektionen.

5.3 Diskussion

En genomgång av toleranserna enligt standardanalysen visar att enfolieskiktet som redovisas under fördjupad analys uppfyller dessa beträffande dielektricitetskonstant, ytresistans, tjocklek och symmetri. Vidare finns ingen luftspalt mellan enfolieskiktet och metallbackningen. Den bristande överensstämmelsen i W-bandet mellan mätresultatet och beräknad reflektion enligt fördjupad analys tyder på att den dielektriska beskrivningen av förlustskiktet inte är riktig. För att råda bot mot detta bör laminat med aktuella förlustskikt tillverkas och mätas i mikrovågsområdet.

6. ÅLDNING AV FÖRLUSTSKIKTET

En översiktsartikel över egenskaperna hos textilier som gjorts elektriskt ledande med hjälp av ledande polymerer har publicerats [6]. En av författarna Dr. Hans H. Kuhn har arbetat vid Milliken Research Corporation, som levererat material till de förlustdukar, som använts i de här redovisade försöken. I artikeln behandlas bl. a. åldring av de elektriska egenskaperna som leder till att ytresistansen ökar med tiden till följd av oxidation, figur 6.1. Processen kan inledningsvis beskrivas genom uttrycket $R_0/R = 1 - A \cdot t^{0,5}$ där R är ytresistansen vid tiden t och R_0 vid tiden noll samt A en konstant. Uttrycket gäller för $R_0/R < 0,5$. Processen accelereras av stigande temperatur.

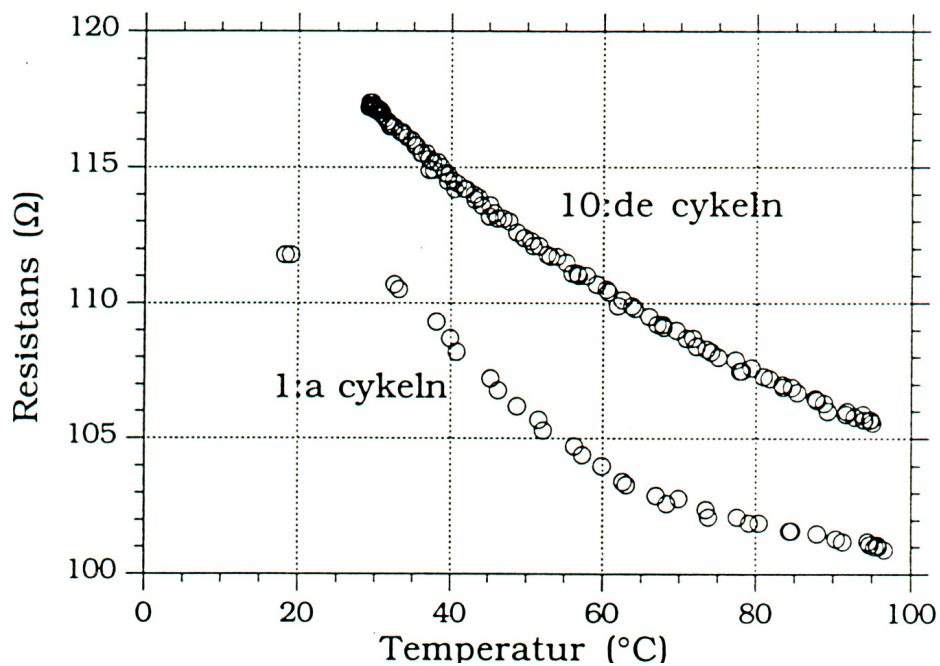


Figur 6.1 Normaliserad ledningsförmåga som funktion av tiden för polypyrrolbelagd polyesterväv vid olika temperaturer i ugn med forcerad luftomröring [6].

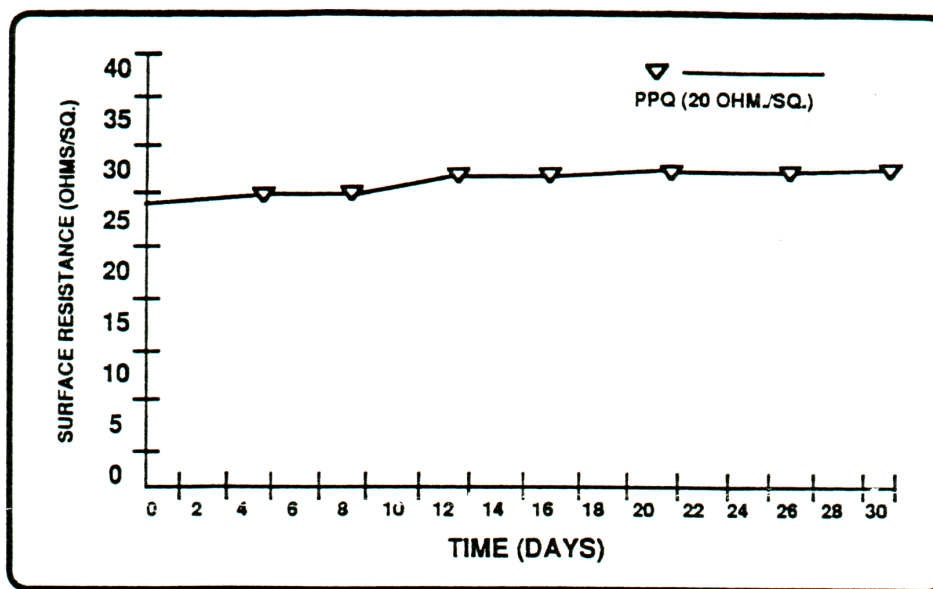
För längre tider (lägre temperaturer) gäller sambandet $\ln(R_0/R) = -kt$ där k anger åldringshastigheten.

Åldring till följd av cykling mellan två temperaturer finns rapporterad för polypyrrolbelagd väv [3]. Resistansändringen efter tio 40 minuter långa cykler mellan 40° C och 100° C visas i figur 6.2. Efter tio cykler har ytresistansen ökat ungefär $5 \Omega/\square$. Av figuren framgår också att väven har negativ temperaturkoefficient, ytresistansen sjunker med ungefär $0,2 - 0,3 \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$.

Om den belagda väven läggs in i ett laminat kommer åldringen att gå långsammare eftersom luftens syre får svårare att nå väven. Det finns emellertid mycket få studier redovisade över detta fall. Figur 6.3 visar åldring vid 71° C och 95 % relativ fuktighet av en Contex-väv i ett ospecificerat epoxilaminat [7]. Efter 30 dagar har vävens ytresistans ökat med ungefär 10 %. Enligt U S Air Force motsvarar testet ungefär tio års användning i fält.



Figur 6.2 Inverkan av temperaturcykling på ytresistansen hos polypyrrolbelagd väv [3].



Figur 6.3 Åldring vid 71° C och 95 % relativ fuktighet hos Contex-väv i ett ospecificerat Epoxilaminat [7].

Vi har inte gjort några systematiska åldringsstudier. Vi har emellertid mätvärden från en och samma batch tagna vid olika tillfällen vilka kan ge en uppfattning om långtidsstabiliteten. Prover ur batchen C343 som tillverkades i januari 1995 mättes efter leverans i november 1997 och senare i maj 1999 utan att någon åldring kunde påvisas. Proverna hade i mellantiden förvarats i rumstemperatur utan att några speciella åtgärder vidtagits för att förhindra åldring.

På samma sätt har vi mätt på ett prov ur batchen ”tightly woven balanced nylon impression fabric”, som tillverkades i januari 2000, dels den 17 februari dels den 24 mars samma år utan att finna någon åldring. Detta prov förvarades mellan mätningarna i kylskåp i en evakuerad aluminiumsäck.

Här kan tilläggas att Milliken förvarar rullarna med Contex-väv i säckar av syrgästät krympfilm (Cryovac, BDF-2001). I säckarna lägger man in små påsar av ett syrgas-absorberande ämne: Ageless från Mitsubishi Gas Chemical Company, Inc. (Svensk agent: Mitsubishi Corporation, Stockholm. Kontaktman: Hans Andersson.) Förvarad på detta sätt är vävens ytresistans stabil över två års tid enligt Milliken.

7. SLUTSATSER OCH REKOMENDATIONER

Arbetet att realisera ett tidigare konstruerat enfolieskikt för Ka- och W-bandet [1] och därvid använda förlustskikt av väv på vilken polypyrrol polymeriserats har misslyckats. Trots att beräknade toleranser för dielektricitetskonstant och tjocklek hos de dielektriska skivorna samt ytresistansen hos förlustskiktet innehållits fungerar det endast inom Ka-bandet. Detta kan endast tolkas som att den dielektriska beskrivningen som använt av förlustskiktet inte är riktig i det högre mm-vågsområdet (W-bandet).

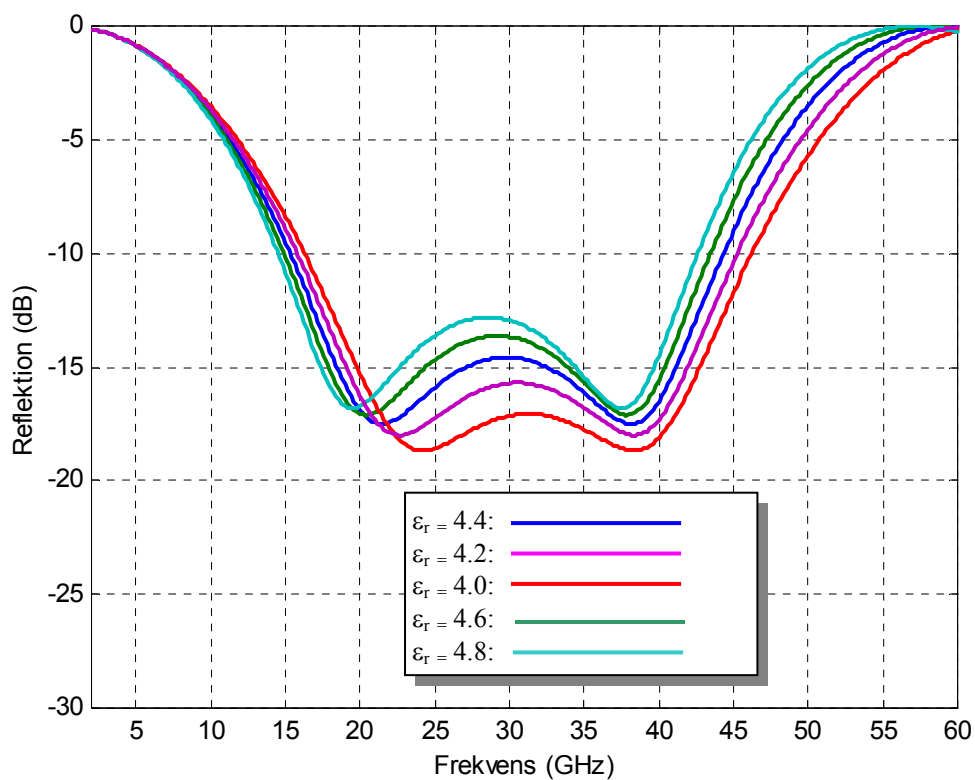
Det redovisade arbetet är så vitt bekant det mest ingående beträffande enfolieskikt för mm-vågstillämpning som utförts i Sverige. Det är då uppseendeväckande att ett enfolieskikt, som tidigare tillverkats i landet under en lägre grad av kontroll, fungerar enligt utförda mätningar [4], som emellertid inte är gjorda med samma metod som använts för mätning i det här redovisade arbetet. De frågor som detta konstaterande reser bör redas ut. Parallellt med detta bör ett arbete sättas igång att använda annan materialteknik för att få fram ett enfolieskikt som fungerar i båda frekvensområdena.

Ytresistansen hos förlustskikt innehållande polypyrrol ökar med tiden speciellt vid förhöjd temperatur till följd av oxidation. Det verkar inte finnas några studier som går att tillämpa på den här diskuterade tillämpningen.

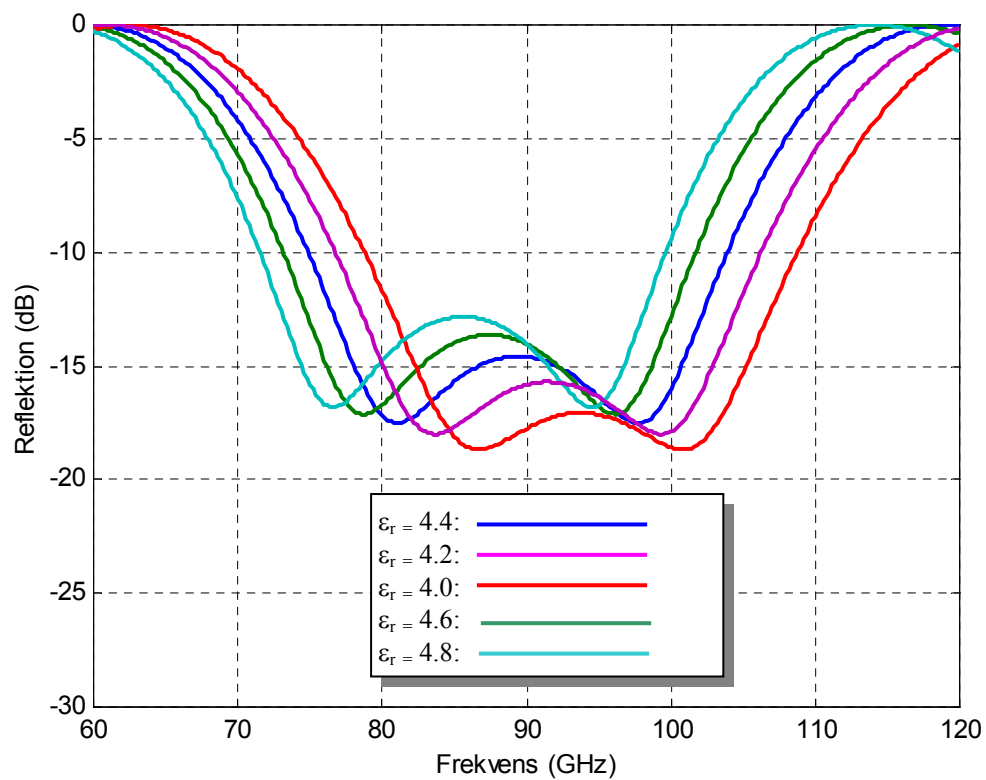
8. REFERENSER

- [1] F. Larsson, K. Lindersson, J.-O. Ousbäck, L.-D. Wernlund, Radarabsorberande enfolieskikt, FOA-R--96-00334-3.2--SE, december 1996, ISSN 1104-9154.
- [2] J-O Ousbäck, L-D Wernlund et al, "Interlaboratory harmonization of measuring techniques for multispectral signature materials", FOA-R-95-00120-2.4(3.1)--SE, May 1995, ISSN 1104-9154.
- [3] O. Dickman, F. Larsson, K. Lindersson, J.-O. Ousbäck, L.-D. Wernlund, Styrbara material: Ledande polymerer i radarabsorberande kompositer, FOA-R--96-00231-2.4-SE, februari 1996, ISSN 1104-9154.
- [4] N. Gustafsson, Reflexionsmaterialmätning 5:2 och 6:1, FOA-RH--98-00358-615, november 1998.
- [5] L C. Sengupta, W. A. Spurgeon, Dielectric Properties of Polymer Composites Prepared from Conductive Polymer Treated Fabrics, 6th International SAMPE Electronics Conference, June 22-25, 1992, pp 146-160.
- [6] H. H. Kuhn, A. D. Child, Electrically Conducting Textiles, Handbook of Conducting Polymers, Edited by T. A. Skotheim, R. L. Elsenbaumer, J. R. Reynolds, Second Edition, Marcel Dekker, Inc, 1998, pp 993 – 1013.
- [7] H. H. Kuhn, W. C. Kimbrell, G. Worrell, C. S. Chen, Properties of Polypyrrole Treated Textiles for Advanced Applications, ANTEC '91, pp 760 – 764.

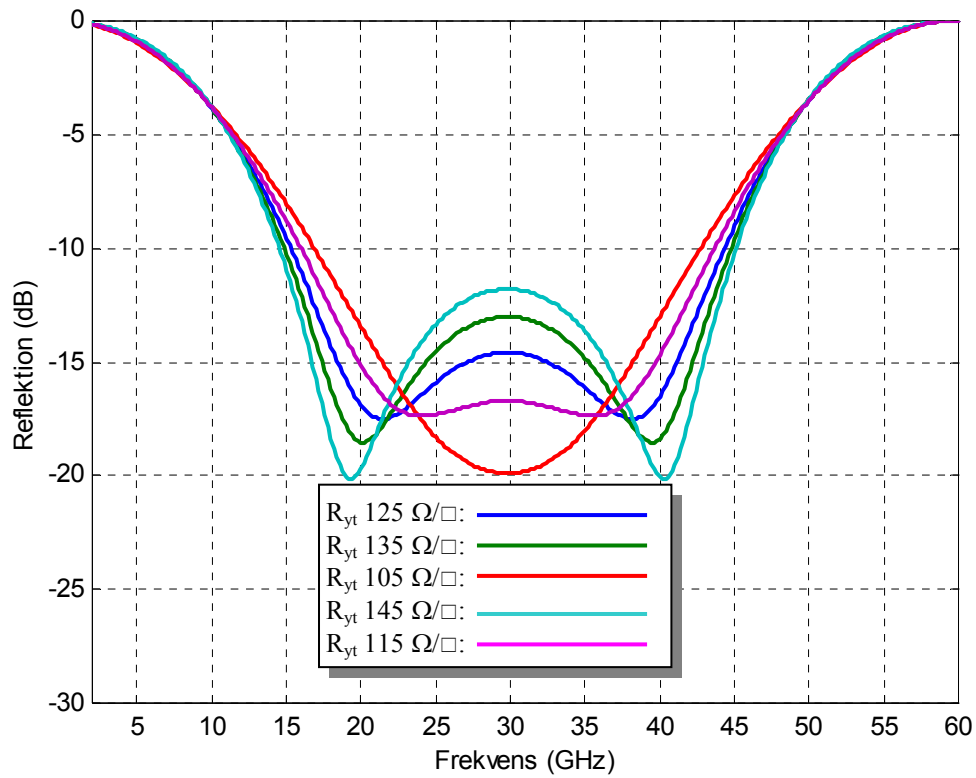
APPENDIX A. STÖRNINGSBERÄKNINGAR



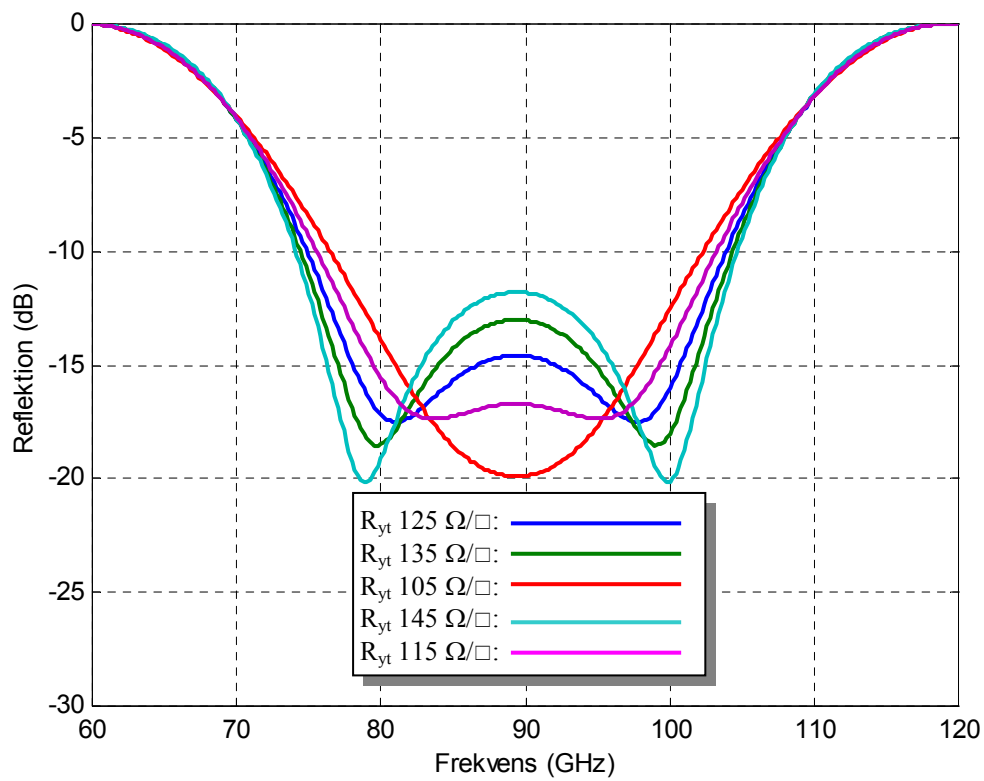
Figur A.1. Störningsberäkning beträffande dielektricitetskonstanten hos dielektriska skivorna i enfolieskiktet. Frekvensområde 2 – 60 GHz.



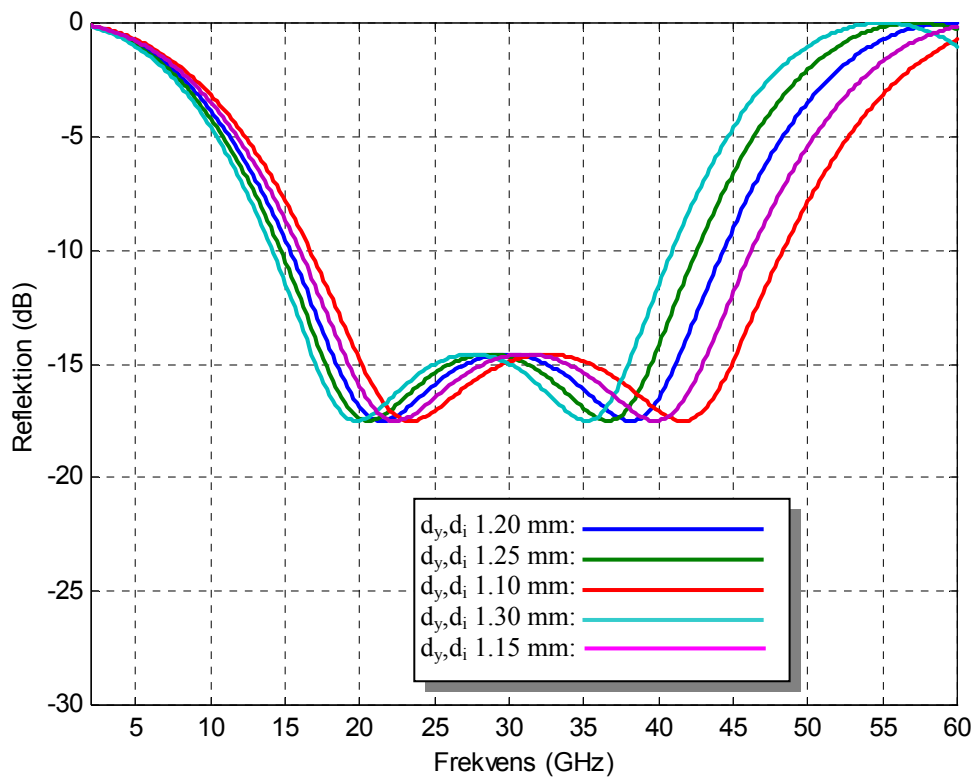
Figur A.2. Störningsberäkning beträffande dielektricitetskonstanten hos dielektriska skivorna i enfolieskiktet. Frekvensområde 60 – 120 GHz.



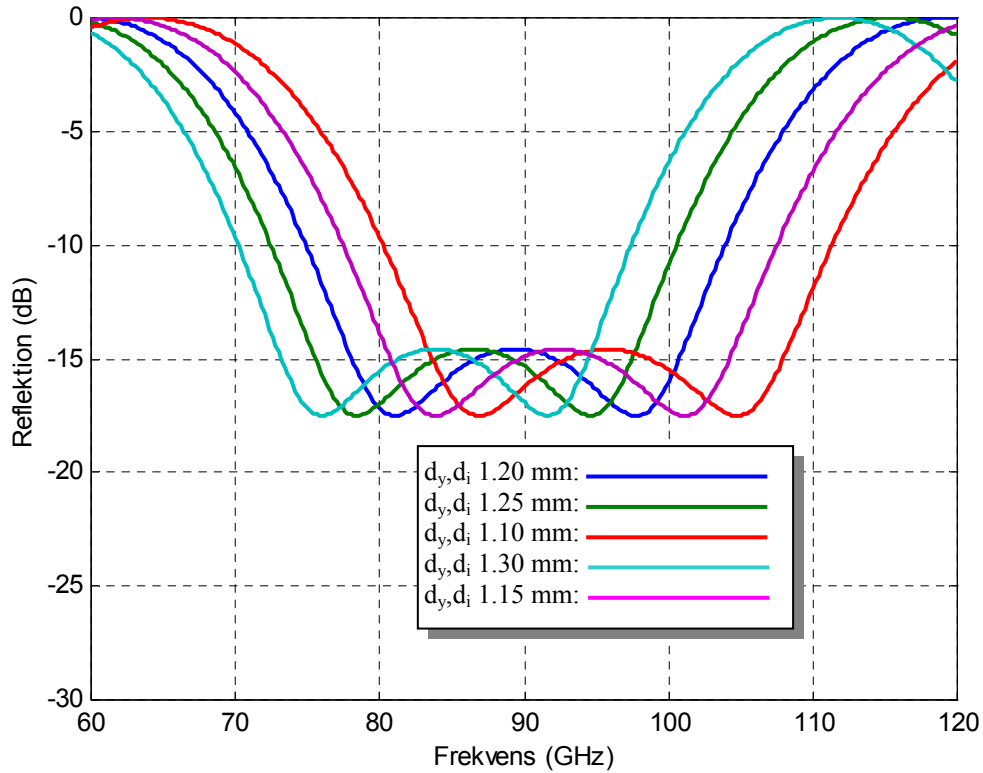
Figur A.3. Störningsberäkning beträffande ytresistansen hos förlustskiktet i enfolieskiktet. Frekvensområde 2 – 60 GHz.



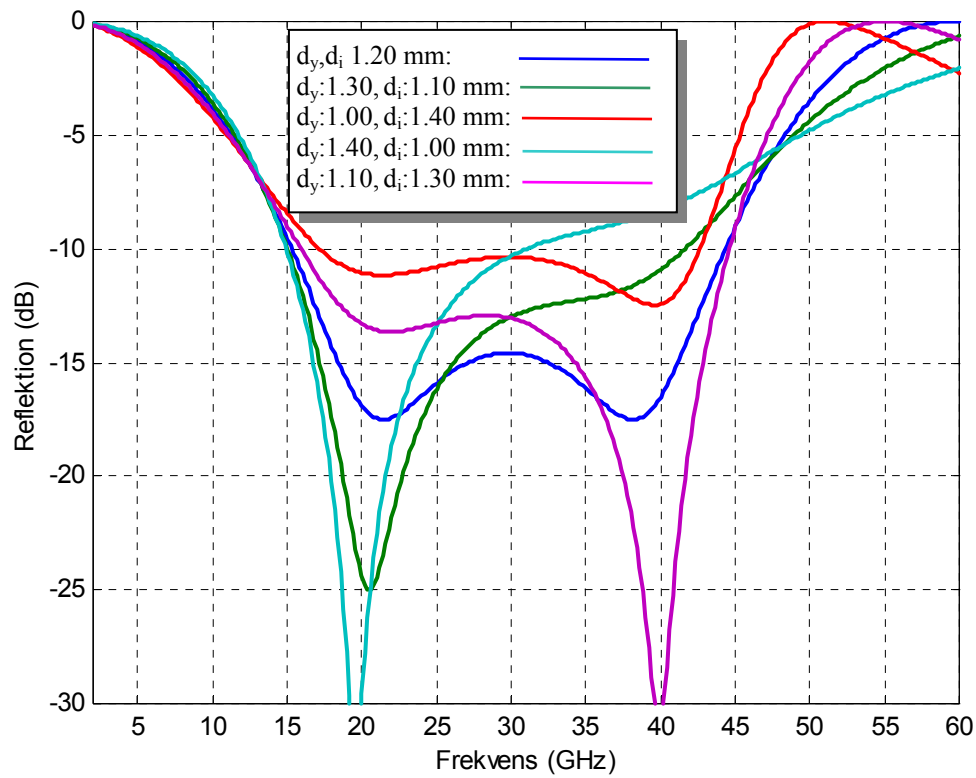
Figur A.4. Störningsberäkning beträffande ytresistansen hos förlustskiktet i enfolieskiktet. Frekvensområde 60 – 120 GHz.



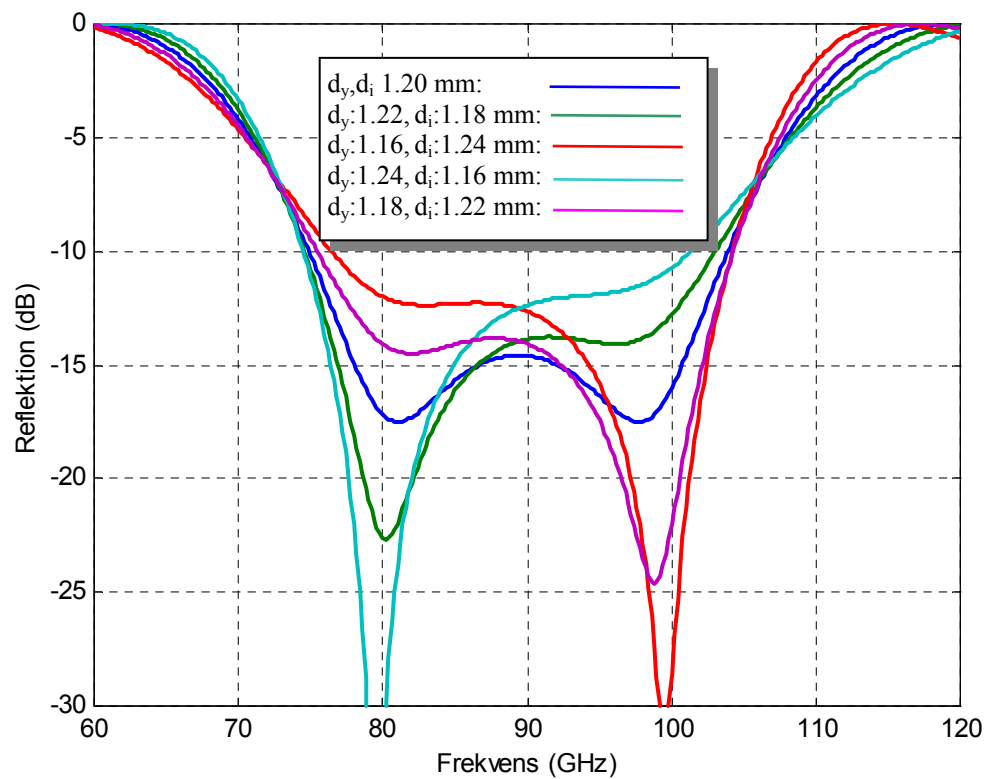
Figur A.5. Störningsberäkning beträffande tjockleken hos dielektriska skivorna i enfolieskiktet. Frekvensområde 2 – 60 GHz. d_y och d_i är tjockleken på det yttre respektive inre skiktet



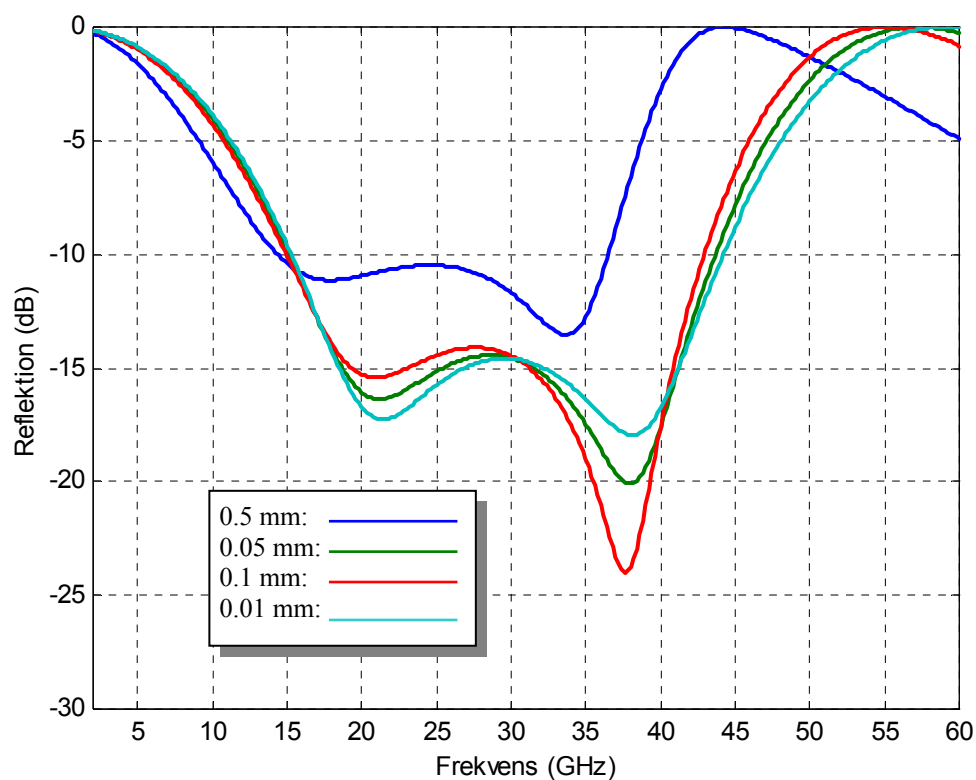
Figur A.6. Störningsberäkning beträffande tjockleken hos dielektriska skivorna i enfolieskiktet. Frekvensområde 60 – 120 GHz. d_y och d_i är tjockleken på det yttre respektive inre skiktet



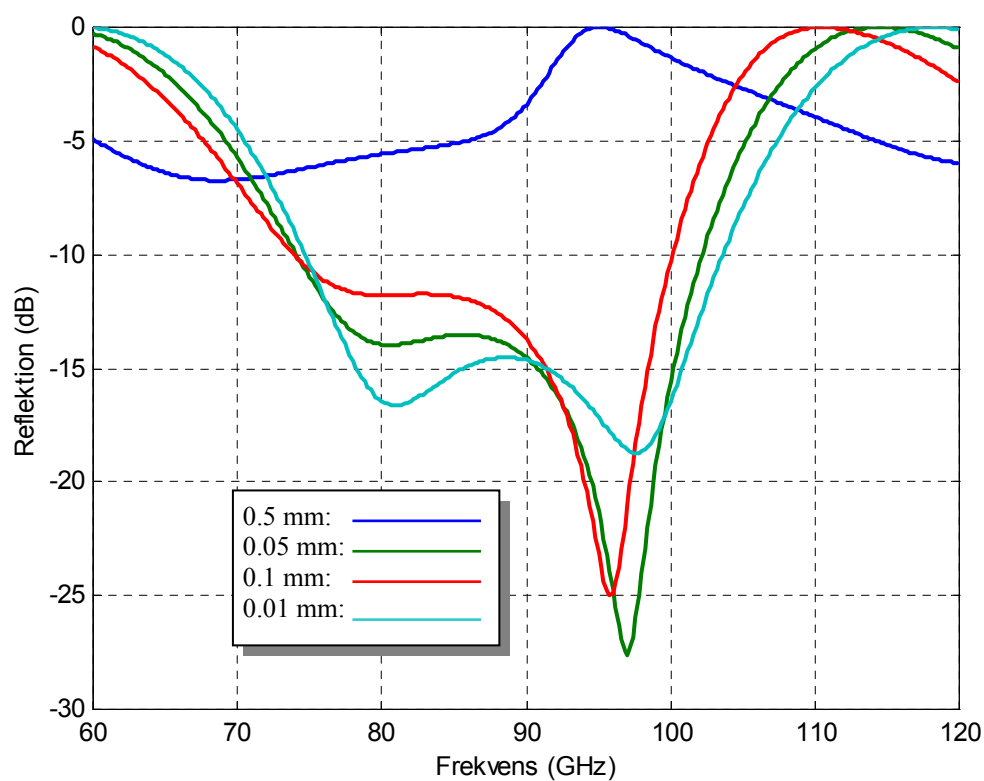
Figur A.7. Störningsberäkning beträffande asymmetrin hos enfolieskiktet.
 Frekvensområde 2 – 60 GHz. d_y och d_i är tjockleken
 på det yttre respektive inre skiktet



Figur A.8. Störningsberäkning beträffande asymmetrin hos enfolieskiktet.
 Frekvensområde 60 – 120 GHz. d_y och d_i är tjockleken
 på det yttre respektive inre skiktet



Figur A.9. Störningsberäkning beträffande tjockleken hos luftspalten mellan enfolieskiktet och reflekterande planet. Frekvensområde 2 – 60 GHz.



Figur A.10. Störningsberäkning beträffande tjockleken hos luftspalten mellan enfolieskiktet och reflekterande planet. Frekvensområde 60 – 120 GHz.

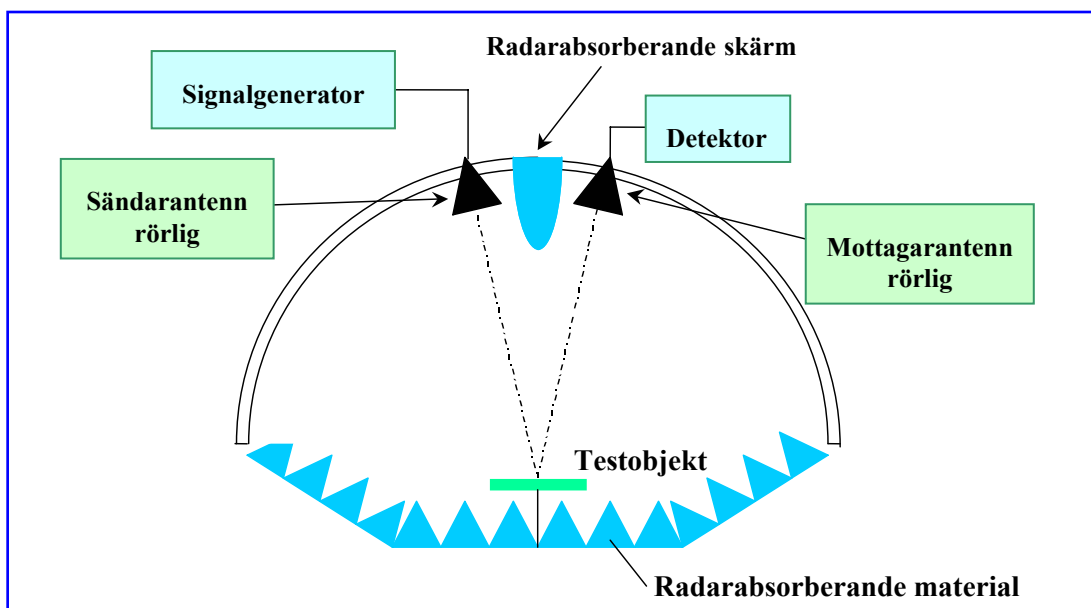
APPENDIX B UTVÄRDERING AV DIELEKTRICITETSKONSTANT HOS ARMERAD DIELEKTRISK SKIVA

B.1 Mätobjekt

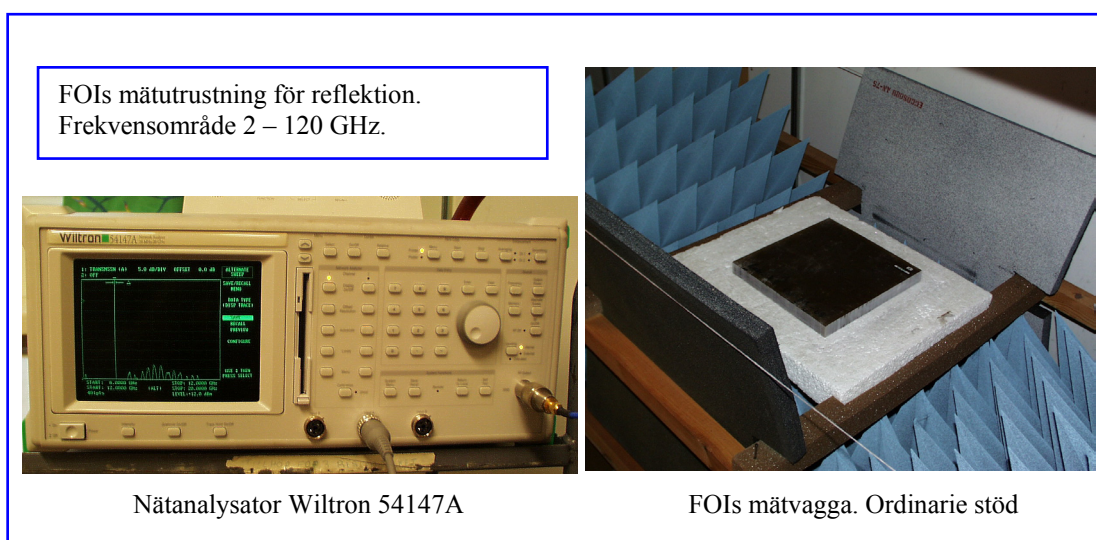
Mätobjektet bestod av ett glasfiberarmerat polyesterlaminat (GAP) utan förlustskikt, med en nominell tjocklek på 2.4 mm och vars uppbyggnad beskrivits i avsnitt 4.3.

B.2 Mätutrustning

Mätutrustningen bestod av FOIs mätvagg, en NRL-båge (Navy Research Lab) med 10° infalls-/reflektionsvinkel samt en skalär nätanalysator (Wiltron 54147A) utrustad med frekvensdubblare. I figur B.1 visas en skiss på mätutrustningen och i figur B.2 foton på nätanalysatorn och mätvaggan.



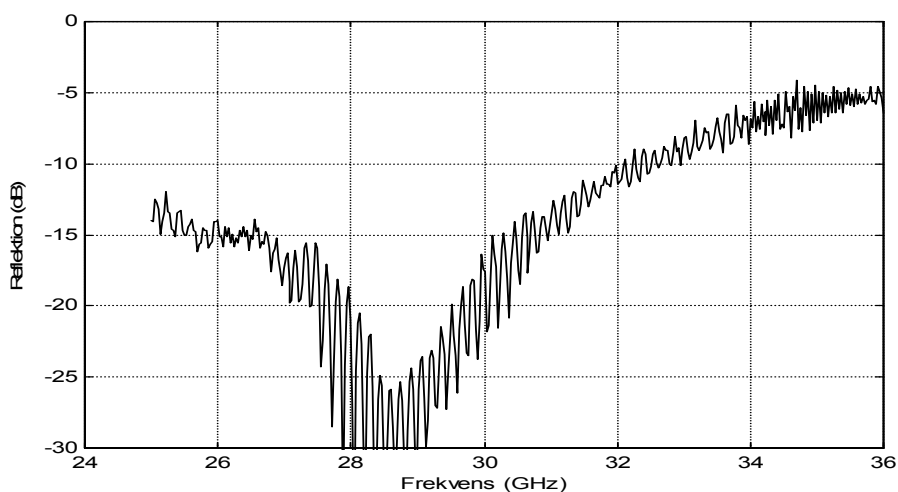
Figur B.1 Skiss över FOIs NRL-båge.



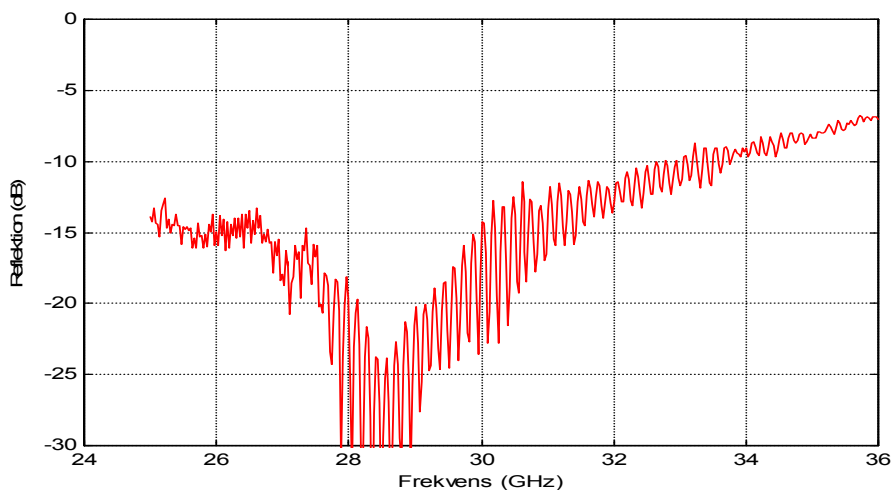
Figur B.2 Foto på FOIs mätutrustning för reflektionsmätningar inom mikrovågsområdet.

B.3 Mätresultat

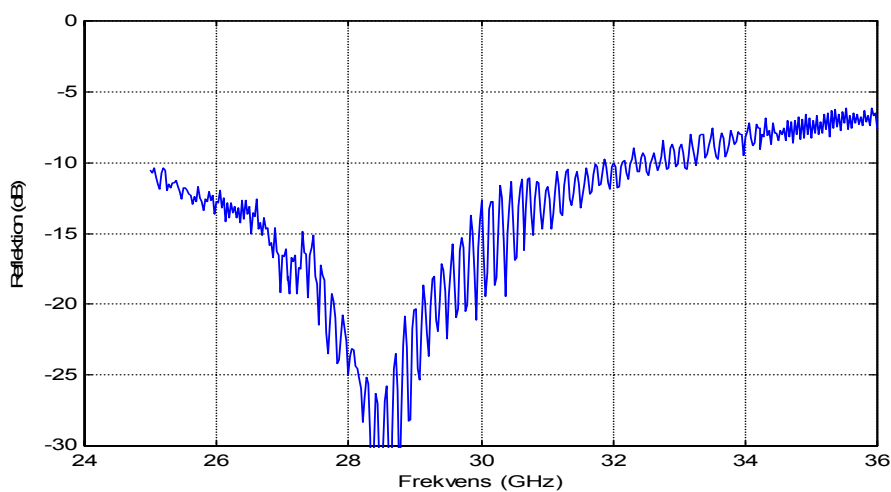
Resultatet av mätningarna (rådata) redovisas i figur B.3 – B.5.



Figur B.3 Mätning 1. Uppmätt reflektion som funktion av frekvens för laminatet. Parallell polarisation. Riktning 0°. Ordinarie stöd.



Figur B.4 Mätning 2. Uppmätt reflektion som funktion av frekvens för laminatet. Parallell polarisation. Riktning 0°. Alternativt stöd.



Figur B.5 Mätning 3. Uppmätt reflektion som funktion av frekvens för laminatet. Parallell polarisation. Riktning 90°. Alternativt stöd.

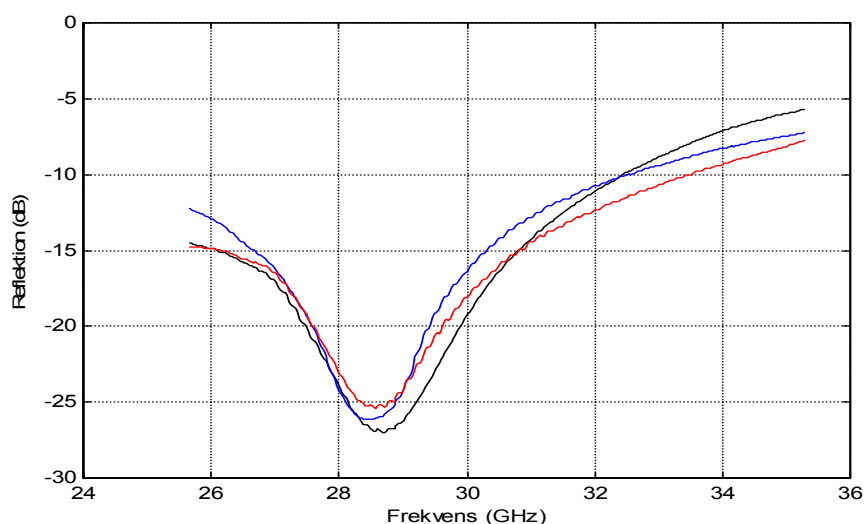
Mätningarna gjordes med två olika stöd. Det ordinarie stödet visas i figur B.2 och det alternativa stödet bestod av en tunnare frigolitplatta (ca 1 cm tjock). Detta gjordes för att se stödets inverkan på låga reflektionsnivåer (typiskt < -20 dB). Ur diagrammen i figur B.3 och B.4 kan man dra slutsatsen att de två olika stöden är likvärdiga eftersom mätresultaten väl överensstämmer.

B.4 Databearbetning

På grund av de interferenser som fås mellan den önskade mätsignalen och bakgrundssignaler uppvisar mätresultaten en snabbt varierande fluktuation. För att lättare kunna bestämma reflektionsminima kan en medelvärdesbildning av mätdata göras.

B.4.1 Medelvärdesbildning

På grund av att mätutrustningens noggrannhet har en undre gräns vid en reflektion på ca -25 - -30 dB relativt en perfekt reflekterande yta har medelvärdesbildning av rådata gjorts. Medelvärdesbildning har gjorts med glidande fönster över ett frekvensintervall på ca 2.5 GHz. Resultatet visas i figur B.6. Som framgår reduceras fluktuationerna väsentligt och reflektionsminima kan lättare bestämmas.



Figur B.6 Medelvärdesbildning av uppmätt reflektion som funktion av frekvens för laminatet. (—: mätning 1, —: mätning 2, —: mätning 3)

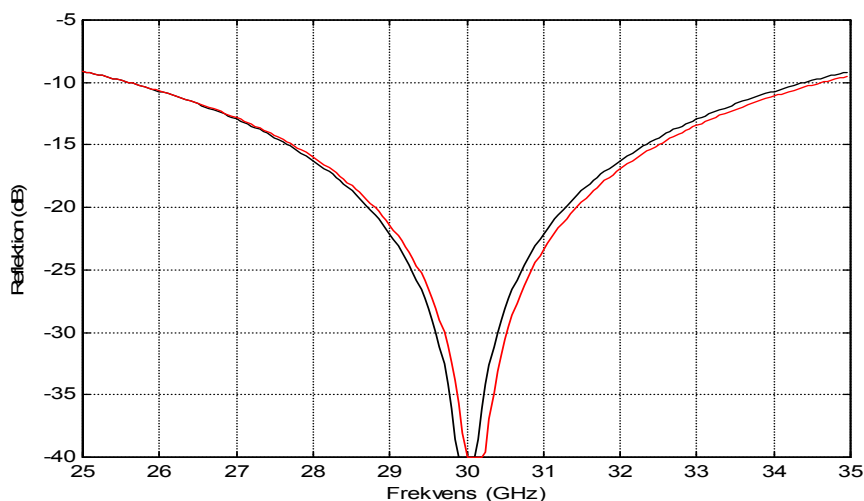
Reflektionsminima för de tre kurvorna är:

- Mätning 1, 28.70 GHz
- Mätning 2, 28.56 GHz
- Mätning 3, 28.51 GHz

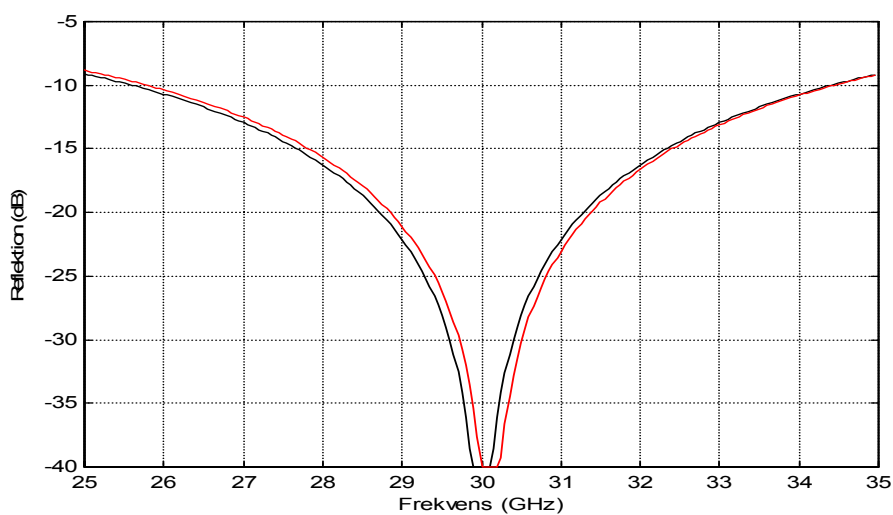
Medelvärdet av de tre kurvorna är 28.59 GHz, vilken frekvens har använts vid de följande beräkningarna av laminatets dielektricitetskonstant.

B.4.2 Kompensering för infalls-/reflektionsvinkel

På grund av att mätningen gjordes med en infalls- och reflektionsvinkel på ca 10° kommer reflektionsminima att förflyttas i frekvensled jämfört med vinkelrätt infall. I figur B.7 och B.8 visas beräkningar på reflektionen som funktion av frekvensen för ett GAP-laminat med en tjocklek på 2.4 mm och ett ϵ_r på 4.



Figur B.7. Reflektion som funktion av frekvens för ett 2.4 mm tjockt GAP-laminat med ett ϵ_r på 4. Parallell polarisation. (— : 0° , — : 10°).



Figur B.8. Reflektion som funktion av frekvens för ett 2.4 mm tjockt GAP-laminat med ett ϵ_r på 4. Vinkelrät polarisation. (— : 0° , — : 10°).

Som framgår ur diagrammen ökar frekvensen för minimal reflektion med ca 0.1 GHz. Den uppmätta frekvensen för minimal reflektion skall alltså minskas med 0.1 GHz för att gälla för vinkelrätt infall.

B.4.3 Beräkning av dielektricitetskonstant

Ur den uppmätta reflektionen kan den relativa permittiviteten beräknas, om laminatet antas sakna magnetiska egenskaper. Beräkningsmetoden visas nedan. Man får minima i reflektion då materialets tjocklek är en halv våglängd eller multiplar därav, dvs:

$$d = n \cdot \frac{\lambda}{2} \quad (\text{ekv. B.1})$$

där λ är våglängden (i materialet) och $n = 1, 2, 3, \dots$

Våglängden i materialet beror på materialets dielektricitetskonstant (realdelen) enligt:

$$\lambda = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (\text{ekv. B.2})$$

där λ_0 är våglängden i vakuum och ϵ_r är den relativa dielektricitetskonstanten.

Eftersom

$$\lambda_0 = \frac{c}{f} \quad (\text{ekv. B.3})$$

där c är ljushastigheten och f frekvensen, fås följande uttryck för ϵ_r :

$$\epsilon_r = \left(\frac{nc}{2df} \right)^2 \quad (\text{ekv. B.4})$$

Man ser att ϵ_r inte är entydigt bestämd om man inte kan bestämma n . Detta kan göras genom bredbandiga mätningar eller om man har kunskap om ungefärligt värde på ϵ_r . Antag att ϵ_r för ett material är 4. Då kommer ϵ_r enligt ekv B.4 att anta värden enligt tabell 1 för $n = 1-4$.

n	1	2	3	4
ϵ_r	4	16	36	64

Tabell B.1

Ur tabellen framgår att man inte behöver ha särskild god förkunskap om ϵ_r för att kunna bestämma n .

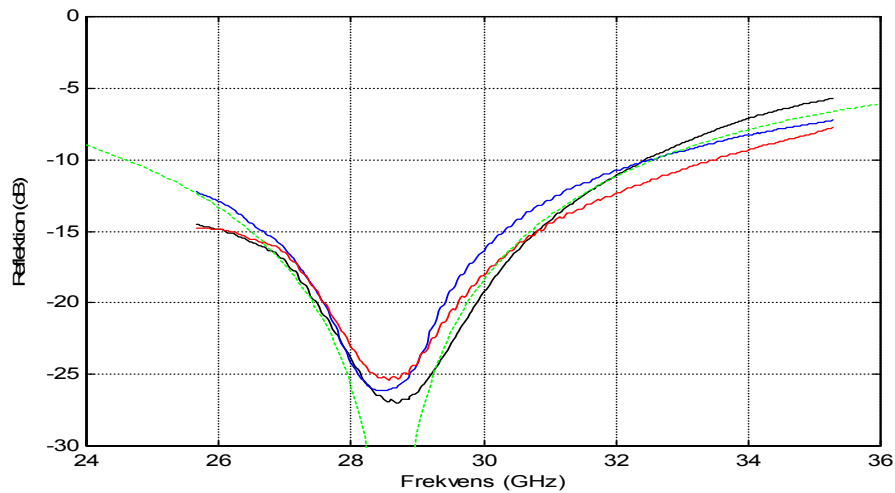
Enligt avsnitt B.4.1 bestämdes frekvensen för reflektionsminima till 28.59 GHz. Enligt avsnitt B.4.2 bör denna frekvens minskas med 0.1 GHz till 28.49 GHz, med hänsyn till infalls- och reflektionsvinkeln på ca 10° vid mätningen.

Med hjälp av ekv. B.4 kan nu dielektricitetskonstanten ϵ_r fås enligt:

$$\epsilon_r = \left(\frac{nc}{2df} \right)^2 = \left(\frac{1 \cdot 0.3}{2 \cdot 0.00256 \cdot 28.49} \right)^2 = 4.23 \quad (\text{ekv. B.5})$$

B.5 Jämförelse mellan uppmätta och beräknade data

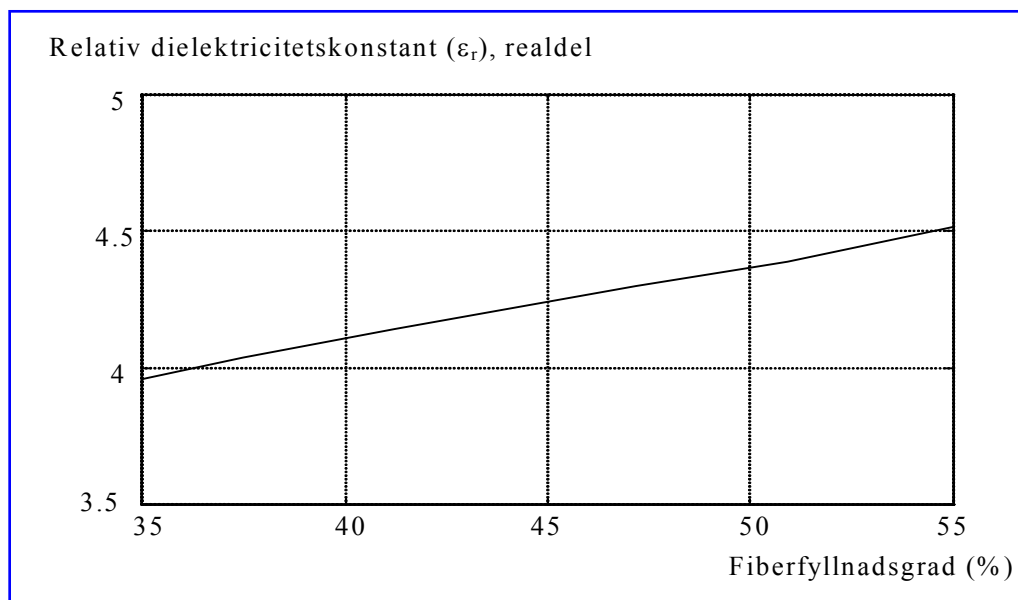
En beräkning har gjorts för att jämföra de medelvärdesbildade uppmätta reflektionsdata för laminatet med en beräknad reflektion utnyttjande den beräknade dielektricitetskonstanten ($\epsilon_r = 4.23$). Resultatet, vilket visas i figur B.9, uppvisar en mycket god överensstämmelse.



Figur B.9. Medelvärdesbildning av uppmätt reflektion som funktion av frekvens för laminatet. (— : mätn. 1, — : mätn. 2, — : mätn. 3, - - : beräkn.)

APPENDIX C. DIELEKTRICITETSKONSTANT SOM FUNKTION AV FIBERFYLLNADSGRAD

I figur C.1 visas den relativa dielektricitetskonstanten (realdel) som funktion av fiberfyllnadsgraden (E-glas) för använt fiberarmerat skikt. Ursprungligen redovisad i [1].



Figur C.1. Relativ dielektricitetskonstant (realdel) som funktion av fiberfyllnadsgrad för E-glasfiber i Neste polyester K530TQE.