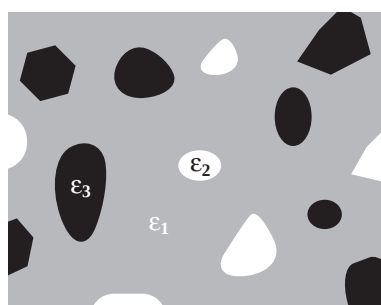


Jan Fagerström, Patrik Hermansson och Göran Forssell

Modellering av signaturegenskaper hos kompositmaterial med hjälp av blandningsformler



Jan Fagerström, Patrik Hermansson och Göran Forssell

Modellering av signaturegenskaper hos kompositmaterial med hjälp av blandningsformler

Utgivare Totalförsvarets Forskningsinstitut – FOI Sensorteknik 581 11 Linköping	Rapportnummer, ISRN FOI-R--0632--SE	Klassificering Metodrapport
	Månad år Oktober 2002	Projektnummer E3052
	Verksamhetsgren 5. Uppdragsfinansierad verksamhet	
	Forskningsområde 6. Telekrig	
	Delområde 62. Signaturanpassning	
Författare Jan Fagerström, Patrik Hermansson och Göran Forssell	Projektledare Jan Fagerström	
	Godkänd av Sören Svensson IC/Signaturmaterial	
	Tekniskt och/eller vetenskapligt ansvarig Jan Fagerström —	
Rapporttitel Modellering av signaturegenskaper hos kompositmaterial med hjälp av blandningsformler		
Sammanfattning Denna rapport ger en introduktion till användningen av blandningsformler för modellering av signaturmaterial. Rapporten fokuserar på beräkning av effektiva dielektriska egenskaper hos materialblandningar. Metoderna exemplifieras med hur dessa beräkningsmodeller kan användas vid analys och utformning av radarabsorberande material och radarabsorbenter. Slutligen identifieras ett antal frågeställningar för vidare forskning inom modellering av signaturmaterial. Rapporten är en sammanfattning av metoder som finns beskrivna i litteraturen, samt erfarenheterna från ett forskningsbesök vid Helsingfors Tekniska Universitet 2002-03-14–15.		
Nyckelord Signaturmaterial, modellering, blandningsformler, radar		
Övriga bibliografiska uppgifter		
ISSN ISSN 1650-1942	Antal sidor 26	Språk Svenska
Distribution enligt missiv Distribution	Pris Enligt prislista	
	Sekretess Ej hemlig	

Issuing organisation FOI – Swedish Defence Research Agency Sensor Technology SE-581 11 Linköping	Report number, ISRN FOI-R--0632--SE	Report type Methodology Report
	Month year October 2002	Project number E3052
	Customers code 5. Commissioned Research	
	Research area code 6. Electronic Warfare	
	Sub area code 62. Low Observables	
Author(s) Jan Fagerström, Patrik Hermansson and Göran Forssell	Project manager Jan Fagerström	
	Approved by Sören Svensson Head of dept./Functional Materials	
	Scientifically and technically responsible Jan Fagerström —	
Report title Mathematical modelling of signature properties of composites using mixing-formulas		
Abstract The present report gives an introduction to mathematical modelling of signature materials by the application of mixing-formulas. The report is focused on methods to compute the effective dielectric properties of materials mixtures. Examples are given how these computational models can be used for the analysis and design of radar absorbing materials and structures. Some problems to be addressed by further research in mathematical modelling of signature materials are also identified. The report is a compilation of methods described in literature, as well as experience gained at a research visit to the Electromagnetics Laboratory, Helsinki University of Technology March 14–15, 2002.		
Keywords Signature materials, mathematical modelling, mixing-formulas, radar		
Further bibliographic information		
ISSN ISSN 1650-1942	Pages 26	Language Swedish
	Price Acc. to price list	
	Security classification Not classified	

Innehåll

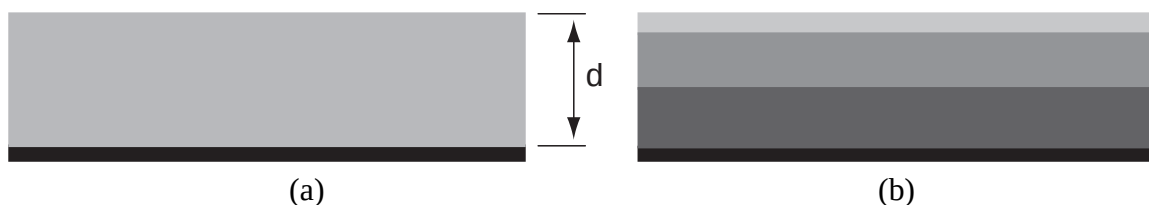
Dokumentinformation	3
Document information	4
1 Introduktion	7
2 Signaturmodellering med blandningsformler	9
2.1 Teoretisk bakgrund	10
2.2 Exempel	12
2.2.1 Exempel 1: Absorbent med sfäriska partiklar av förlustmaterial.	12
2.2.2 Exempel 2: Dällenbachabsorbent med sfäris- ka förlustpartiklar	13
2.2.3 Exempel 3: Skiktade eller homogena förlust- partiklar?	14
2.2.4 Exempel 4: Vatteninträngning i absorbentma- terial	16
2.2.5 Exempel 5: Utformning av permittiviteten ge- nom partiklarnas geometri	19
2.3 Begränsningar och vidare forskning	20
3 Sammanfattning och slutsats	23
Referenser	25

1 Introduktion

Många moderna material har egenskaper som utformats för specifika tillämpningar. Ofta har dessa egenskaper uppnåtts genom kombination av flera olika material i form av blandningar eller kompositer. Några exempel på detta är fiberarmerad plast (material med hög hållfasthet och låg vikt), eller optiskt aktiva partiklar i glas- eller plastmatriser (material för optiska komponenter). Ett intressant problem i detta sammanhang är hur kompositens eller blandningens egenskaper kan förutsägas utifrån komponenternas egenskaper. Ibland växelverkar komponenterna i kompositmaterial på ett komplicerat sätt, så att "helheten är mer än summan av delarna". Det vill säga, det räcker inte att till exempel ta ett enkelt aritmetiskt medelvärde av komponenternas egenskaper för att förutsäga kompositens egenskaper.

Kompositer används ofta i militära tillämpningar. Ett sådant tillämpningsområde är signaturanpassningsteknik (SAT). Signaturmaterial består ofta av kompositmaterial eller materialblandningar. Det är till exempel vanligt att SAT-material är uppbyggda av "aktiva" partiklar i ett "inaktivt" matrismaterial. Den här rapporten är skriven med tanke på sådana SAT-material i radarområdet, även om metoderna som beskrivs är användbara och utvecklade för andra material och tillämpningar också. Problemställningen gäller beräkning av de makroskopiska, homogena egenskaperna hos olika radarabsorberande kompositmaterial, utgående från egenskaperna och strukturen hos dess komponenter.

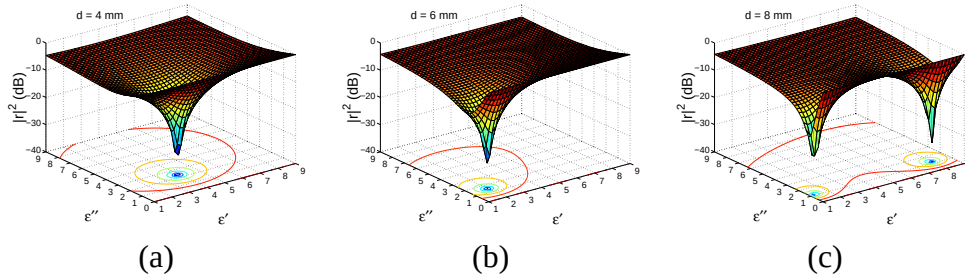
Några exempel på SAT-materialstrukturer som är uppbyggda av inhomogena blandningar ges i Figur 1.[12, 7] Signaturegenskaperna hos SAT-



Figur 1: Schematisk geometri för (a) Dällenbach radarabsorbent och (b) radarabsorbent med multilagerstruktur. Strukturerna består av ett eller flera lager av inhomogena, radarabsorberande materialblandningar (grå skikt i figuren), på en metallyta (svart skikt i figuren).

materialstrukturerna påverkas av de ingående komponenternas elektromagnetiska egenskaper och hur dessa är anpassade till varandra, men också av strukturernas geometriska utformning.¹ I Figur 2 illustreras hur reflektionen från en Dällenbach-absorbent (se Figur 1a) beror av absorbentmaterialets dielektriska egenskaper och dess tjocklek. Med dielektriska egenskaper avses här den komplexa permittiviteten $\epsilon(\nu) = \epsilon'(\nu) + i\epsilon''(\nu)$, där $\epsilon'(\nu) = \text{Re}[\epsilon(\nu)]$, $\epsilon''(\nu) = \text{Im}[\epsilon(\nu)]$ och ν är frekvensen. Materialet antas

¹En bra introduktion till elektromagnetiska egenskaper hos SAT-materialstrukturer ges i Referens [7].



Figur 2: Reflektion från en Dällenbach-absorbent som funktion av real- och imaginärdelen av permittiviteten hos absorbentmaterialet. Beräkningarna gäller vinkelrätt infall vid frekvensen 10 GHz, och är utförda för tre olika tjocklekar d hos absorbentmaterialet: (a) $d = 4$ mm, (b) $d = 6$ mm, (c) $d = 8$ mm.

sakna magnetiska förluster. Beräkningarna i Figur 2 gäller vinkelrätt infall mot absorbenten vid frekvensen 10 GHz. Figuren visar att absorbenten har dalar där kraftigt reducerad reflektion uppnåts. Dalarna uppträder dock vid olika värden på permittiviteten beroende på absorbentmaterialets tjocklek. Det är alltså viktigt att anpassa absorbentmaterialets dielektriska egenskaper till Dällenbach-strukturens geometri för ett uppnå så goda absorberande egenskaper som möjligt. Notera att tunnare strukturer (lägre värden på d) kräver högre förluster (högre värden på ϵ''), medan tjockare strukturer medger lägre förluster, och till och med minimal reflektion för flera olika värden på permittiviteten. Ett viktigt syfte med rapporten är att beskriva metoder för beräkning av den effektiva, "homogen" permittiviteten hos materialblandningar för att kunna analysera och optimera blandningarnas funktion som SAT-material.

Med *homogent* material menas att materialets egenskaper inte varierar från punkt till punkt. Detta är alltid en idealisering. Alla material är inhomogena på tillräckligt liten storleksnivå. Om inte annat så är alla material inhomogena på atomär nivå. Möjligheten att beskriva ett material som homogent beror alltså på vilken egenskap och storleksordning som är aktuell. För SAT-material är det materialens elektromagnetiska egenskaper som är intressanta. För att materialet ska vara homogent i elektromagnetisk bemärkelse krävs att våglängden hos strålningen är mycket större än inhomogeniteterna i materialet. Mer exakt vad detta innebär beskrivs i Avsnitt 2.1.

Rapporten är upplagd på följande sätt. I Avsnitt 2 ges först en kort teoretisk bakgrund av blandningsformler. Därefter diskuteras några exempel på homogenisering av signaturmaterial, begränsningar och behov av fortsatt forskning. Avsnitt 3 innehåller en sammanfattning av rapporten och slutsatser.



Figur 3: Generiskt inhomogent dielektriskt material. Materialet består av ett matrismaterial med permittivitet ϵ_1 (grått) med iblandade inhomogeniteter av två materialtyper med permittiviteter ϵ_2 och ϵ_3 (vitt respektive svart).

2 Signaturmodellering med blandningsformler

Figur 3 visar schematiskt strukturen hos ett generiskt inhomogent dielektriskt material. De dielektriska egenskaperna hos de ingående materialkomponenterna antas vara kända. Problemet lyder nu: kan materialblandningen behandlas som om det vore homogent ur dielektrisk synpunkt, och hur beräknas i så fall den *effektiva* elektriska permittiviteten hos materialet som helhet?

Det finns flera olika sätt att beräkna den effektiva permittiviteten hos en materialblandning:

1. Blandningsformler
2. Numeriska “experiment”
3. Homogenisering

Vi kommer i det följande att begränsa oss till *blandningsformler*. Hur dessa kan härledas och användas beskrivs mer ingående i Avsnitten 2.1–2.2. *Numeriska experiment* innebär att permittiviteter för ett stort antal slumpmässigt genererade “materialprov” beräknas. Varje materialprov har identiska proportioner av matrismaterial och inhomogeniteter, men slumpmässigt genererade geometrier. Den effektiva permittiviteten ϵ_{eff} beräknas som medelvärde av permittiviteten hos alla materialprover. *Homogenisering*, slutligen, är en matematisk metod att approximativt lösa differentialekvationer (som i det här fallet är Maxwells ekvationer) på ett inhomogent område.

2.1 Teoretisk bakgrund

Den effektiva relativa permittiviteten ϵ_{eff} för en materialblandning definieras på följande sätt:

$$\langle \mathbf{D} \rangle = \epsilon_0 \epsilon_{eff} \langle \mathbf{E} \rangle \quad (1)$$

där $\langle \mathbf{D} \rangle$ och $\langle \mathbf{E} \rangle$ betecknar volymsmedelvärden av den elektriska flödestätheten respektive den elektriska fältstyrkan, och ϵ_0 är permittiviteten för vacuum. Det finns många olika metoder och approximationer som används i litteraturen för att härleda uttryck för ϵ_{eff} utgående från ekvation 1. Några av de vanligaste blandningsformlerna presenteras i Tabell 1. Alla formler i Tabell 1 finns beskrivna och härledda i Referens [10]. Härledningarna upprepas inte här. Ett grundläggande antagande för samtliga är att materialet är linjärt och kan betraktas som homogent ur elektromagnetisk synpunkt. Problemet är då "kvasistatiskt" och kan behandlas med statiska elektromagnetiska modeller, och de erhållna uttrycken antas gälla för låga frekvenser, det vill säga då våglängden är mycket större än inhomogeniteterna. En tumregel är att inhomogeniteterna ska vara mindre än våglängden och inträngningsdjupet δ för strålningen. Inträngningsdjupet definieras

$$\delta = \frac{1}{\omega \sqrt{\mu_0 \mu_r \epsilon_0 \epsilon_r}}, \quad (2)$$

där ω är vinkelfrekvensen, μ_0 är magnetiska permeabiliteten för vacuum, μ_r är materialets relativa magnetiska permeabilitet, ϵ_0 är elektriska permittiviteten för vacuum, och ϵ_r är materialets relativa elektriska permittivitet.

Mycket bra översikter över ett stort antal blandningsformler återfinns i Referenserna [3, 10]. Ett urval av dessa återfinns i Tabell 1 och är avsedda för olika situationer och materialtyper som är schematiskt illustrerade i tabellen:

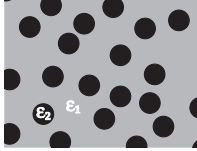
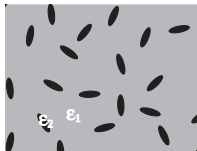
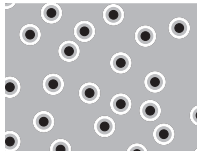
Maxwell Garnett (MG) Matrismaterial med permittivitet ϵ_1 med f^{vol} volymsandel sfäriska partiklar ("inhomogeniteter") med permittivitet ϵ_2 .

MG multifas Samma som för Maxwell Garnett, men med $K - 1$ olika partiklar, med volymsandelar och permittiviteter f_k^{vol} respektive ϵ_k , $k = 2, \dots, K$.

MG upplinjerade ellipsoider Samma som för Maxwell Garnett men med upplinjerade ellipsoida partiklar. Permittiviteten blir riktningsberoende (anisotrop), med olika värden i x , y och z -led. N_x är depolarisationsfaktorn [10] i x -riktningen, och ersätts med N_y eller N_z för $\epsilon_{eff,y}$ respektive $\epsilon_{eff,z}$.

MG ej upplinjerade ellipsoider Samma som för "MG upplinjerade ellipsoider", men med slumpmässigt orienterade ellipsoider. Permittiviteten blir riktningsoberoende (isotrop).

Tabell 1: Blandningsformler som diskuteras i texten, samt schematisk beskrivning av motsvarande blandningsstrukturer. Variabelnamn förklaras i texten.

Namn	Formel	Materialtyp
Maxwell Garnett (MG)	$\epsilon_{eff} = \epsilon_1 + 3f^{vol}\epsilon_1 \frac{\epsilon_2 - \epsilon_1}{\epsilon_2 + 2\epsilon_1 - f^{vol}(\epsilon_2 - \epsilon_1)}$	
MG multi-fas	$\epsilon_{eff} = \epsilon_1 + 3\epsilon_1 \frac{\sum_{k=2}^K f_k^{vol} \frac{\epsilon_k - \epsilon_1}{\epsilon_k + 2\epsilon_1}}{1 - \sum_{k=2}^K f_k^{vol} \frac{\epsilon_k - \epsilon_1}{\epsilon_k + 2\epsilon_1}}$	
MG upp-linjerade ellipsoider	$\epsilon_{eff,x} = \epsilon_1 + f^{vol}\epsilon_1 \frac{\epsilon_2 - \epsilon_1}{\epsilon_1 + (1 - f^{vol})N_x(\epsilon_2 - \epsilon_1)}$	
MG ej upp-linjerade ellipsoider	$\epsilon_{eff} = \epsilon_1 + \epsilon_1 \frac{\frac{f^{vol}}{3} \sum_{j=x,y,z} \frac{\epsilon_j - \epsilon_1}{\epsilon_1 + N_j(\epsilon_j - \epsilon_1)}}{1 - \frac{f^{vol}}{3} \sum_{j=x,y,z} \frac{N_j(\epsilon_j - \epsilon_1)}{\epsilon_1 + N_j(\epsilon_j - \epsilon_1)}}$	
Bruggeman	$\sum_{j=1}^N f_j^{vol} \frac{\epsilon_j - \epsilon_{eff}}{\epsilon_j + 2\epsilon_{eff}} = 0$	
Bruggeman ej upp-linjerade ellipsoider	$\epsilon_{eff} = \epsilon_1 + \frac{f^{vol}}{3}(\epsilon_2 - \epsilon_1) \sum_{j=x,y,z} \frac{\epsilon_{eff}}{\epsilon_{eff} + N_j(\epsilon_j - \epsilon_{eff})}$	
Skiktade sfärer	$\frac{D_{N+1}}{C_{N+1}} = 0$ $\frac{D_{n-1}}{C_{n-1}} = \frac{(\epsilon_n - \epsilon_{n-1})r_n^3 + (2\epsilon_n - \epsilon_{n-1})\frac{D_n}{C_n}}{(\epsilon_n + 2\epsilon_{n-1}) + 2(\epsilon_n - \epsilon_{n-1})r_n^3\frac{D_n}{C_n}}$ $\epsilon_{eff} = \epsilon_0 \frac{1 + 2\frac{D_1}{C_1}}{1 - \frac{D_1}{C_1}}$	

Bruggeman Material med N komponenter med respektive volymsandel f_j^{vol} , $j = 1, \dots, N$. Materialmodellen bygger på att alla komponenter består av sfäriska partiklar i en matris med den effektiva per-

mittiviteten, ϵ_{eff} . Till skillnad från Maxwell Garnett behandlas alla komponenter "symmetriskt".

Bruggeman ej upplinjerade ellipsoider Samma som Bruggeman, men för slumpmässigt orienterade ellipsoida partiklar med permittivitet ϵ_2 i ett matrismaterial med permittivitet ϵ_1 .

Skiktade sfärer Matrismaterial med permittivitet ϵ_1 med sfäriska partiklar som består av en kärna med permittivitet ϵ_{N+1} och $N - 1$ stycken skikt med permittiviteter ϵ_n , $n = 2, \dots, N$, numrerade utifrån och in. Uttrycket i Tabell 1 är given på rekursiv form, och beteckningarna är hämtade från Referens [9].

Exempel på hur dessa formler kan användas för studier av signaturmaterial är ämnet för Avsnitt 2.2.

2.2 Exempel

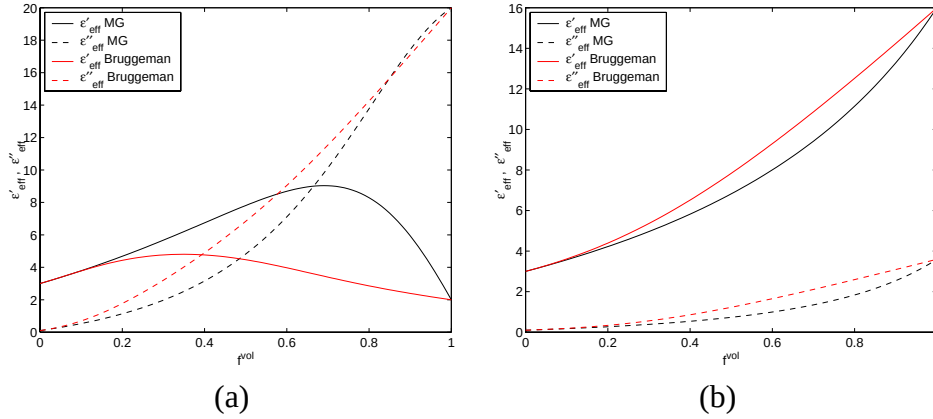
I det här avsnittet ges exempel på några av egenskaperna hos blandningsformlerna i Tabell 1. Exempelen visar hur blandningsformler kan användas för att utforma, optimera och analysera absorbentmaterial. Vårt huvudsakliga tillämpningsområde är radarsignaturmaterial. Vi begränsar oss därför till frekvensområdet $\nu = 1\text{--}20$ GHz ($\lambda = 1.5\text{--}30$ cm), och alltså partikelstorlekar som är mindre än några få millimeter i diameter.

Det finns naturligtvis problem och begränsningar med användningen av blandningsformler för modellering av signaturmaterial. I de följande exemplen fokuserar vi framför allt på de möjligheter som ges av blandningsformler. En diskussion av begränsningar, problem och behov av ytterligare forskning ges därefter i Avsnitt 2.3.

Det bör noteras att absorbentmaterial inte är det enda användningsområdet för blandningsformler. Andra tillämpningar med militärt intresse där blandningsformler kan användas är till exempel material för antenneradomer och dielektriska material utan förluster.

2.2.1 Exempel 1: Absorbent med sfäriska partiklar av förlustmaterial.

Antag att vi har ett matrismaterial med relativa permittiviteten $\epsilon_1 = 3.0 + i0.1$ (typiskt för till exempel epoxy) med förlustmaterial i form av sfäriska inklusioner med relativa permittiviteten $\epsilon_2 = 2 + i20$ (som är rimliga värden för vissa typer av kol vid frekvensen 10 GHz[2]). Enligt Maxwell Garnett respektive Bruggeman varierar då ϵ_{eff} med f^{vol} enligt Figur 4a. Notera att både Maxwell Garnett och Bruggeman visar att realdelen $\epsilon'_{eff} = \text{Re}(\epsilon_{eff})$ överstiger både ϵ'_1 och ϵ'_2 för vissa värden på f^{vol} . Enligt både Maxwell Garnett och Bruggeman ska det alltså vara möjligt att utforma ett effektivt material med högre ϵ' än någon av komponenterna. Detta gäller dock



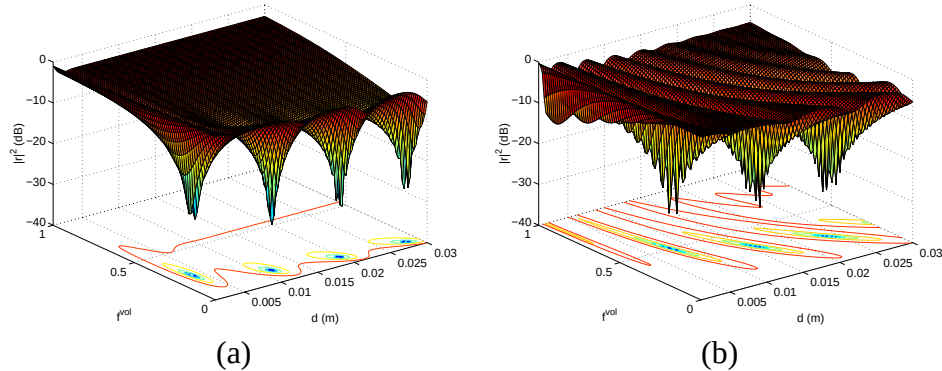
Figur 4: Effektiva permittiviteten för ett material med sfäriska partiklar med volymsandelen f^{vol} . Beräkningarna är utförda enligt Maxwell Garnett (svarta kurvor) respektive Bruggeman (röda kurvor). Matrismaterial har $\epsilon_1 = 3.0 + i0.1$ och partiklarna har $\epsilon_2 = 2.0 + i20.0$ i (a) och $\epsilon_2 = 16 + i3.6$ i (b).

endast då blandningen innehåller partiklar med stora förluster (med stora värden på ϵ_2''). För till exempel partiklar av halvledarmaterial erhålls mer “normala” kurvor, se Figur 4b där permittiviteten $\epsilon_2 = 16 + i3.6$ använts, vilket är rimligt för till exempel germanium (Ge).

Maxwell Garnett respektive Bruggeman överensstämmer relativt väl upp till $f^{vol} \lesssim 0.2$, men avviker från varandra för övrigt. När gäller Maxwell Garnett och när gäller Bruggeman? Ofta är andelen förlustmaterial < 0.2 , där Maxwell Garnett och Bruggeman stämmer överens. För högre värden på f^{vol} är det en öppen fråga vilka egenskaper hos materialblandningen som avgör om den bäst beskrivs med Maxwell Garnett eller Bruggeman. Numeriska beräkningar i två dimensioner[8] har visat bäst överensstämmelse med Bruggeman då både matrismaterial och partiklar är förlustfria. Det behövs dock ytterligare undersökningar (i tre dimensioner) och jämförelse med mätningar av ϵ_{eff} för att avgöra detta i mer allmänna fall. Vårt att notera är att då väl den “korrekta” modellen för en viss materialtyp är känd kan beräkningarna användas som stöd vid utformning av permittiviteten hos en materialblandning.

2.2.2 Exempel 2: Dällenbachabsorbent med sfäriska förlustpartiklar

Hur skulle materialblandningarna i Figur 4 fungera som absorberande material i en Dällenbach-absorbent? För att undersöka detta är det intressant att optimera absorptionen hos Dällenbachabsorbenten med hjälp av parametrarna f^{vol} (volymsandelen partiklar) och d (tjockleken på materialblandningen som används som absorberande material i Dällenbachabsorbenten). Figur 5 visar reflektionen hos en Dällenbachabsorbent där det



Figur 5: Reflektionen från en Dällenbachabsorbent där materialblandningarna i Figur 4 använts som absorberande material. Beräkningarna är utförda för vinkelrätt infall vid frekvensen 10 GHz.

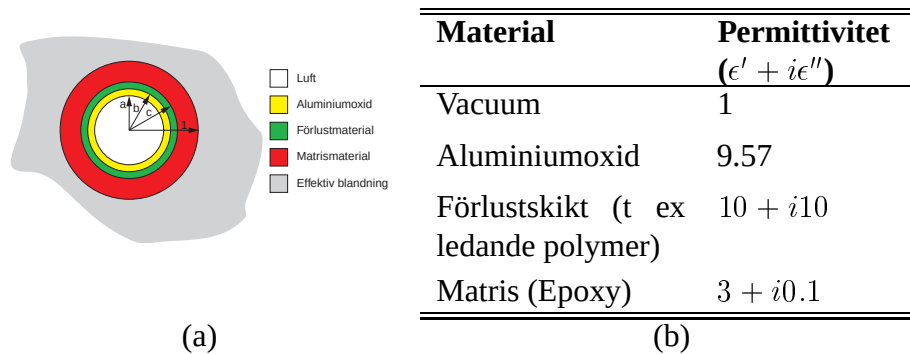
absorberande materialet består av materialblandningarna i Figur 4. Den effektiva permittiviteten har beräknats med Bruggemans blandningsformel. Observera hur båda materialen ger tydliga minima i reflektionen för vissa bestämda värden på f^{vol} och d . Notera att det *inte* är möjligt att uppnå minimal reflektion för alla värden på volymsandelen f^{vol} . Det räcker inte att välja godtyckligt värde på f^{vol} och sedan anpassa tjockleken d till denna. Volymsandelen f^{vol} måste väljas på så sätt att det över huvud taget är möjligt att uppnå minimal reflektion. För utförligare diskussion om detta se Referens [12]. Beräkningsmodellen i detta exempel ger en viktig insikt om hur materialblandningar bäst utnyttjas vid utformning av radarabsorbenter.

2.2.3 Exempel 3: Skiktade eller homogena förlustpartiklar?

Många “aktiva” material i materialblandningar består av skiktade sfäriska partiklar. Exempel på detta är så kallade cenosfärer i matrismaterial,[6] hagel med vattenskikt i atmosfären och kompositer med kondenserad eller absorberad fukt.

Cenosfärer är ihåliga, keramiska sfärer av till exempel aluminiumoxid (Al_2O_3) cirka 10–100 μm i diameter. I Figur 6 illustreras en modell av en komposit av cenosfärer med ett skikt av förlustmaterial, i ett matrismaterial. För att beräkna de effektiva dielektriska egenskaperna hos kompositen av cenosfärer kan modellen för skiktade sfärer i Tabell 1 användas.[9, 11] Volymsandelerna av de olika materialen i kompositen specificeras med hjälp av radierna på skikten hos sfärerena, så att volymsandelen av till exempel skiktet av aluminiumoxid i Figur 6 är $f_{\text{Al}_2\text{O}_3}^{vol} = b^3 - a^3$. Radierna i modellen är normaliserade i förhållande till radien för matrismaterialet, som definieras till 1 (se Figur 6a).

För att få en uppfattning om hur egenskaperna hos en materialblandning med skiktade sfärer (enligt Figur 6) skiljer sig från ett material med



Figur 6: Modell av cenosfär i matrismaterial, för beräkning av effektiva dielektriska egenskaper. Materialblandningen består av ett matrismaterial, de ihåliga cenosfärerna samt ett skikt av förlustmaterial på varje cenosfär.

homogena sfärer jämförs två fall (se Figur 7):

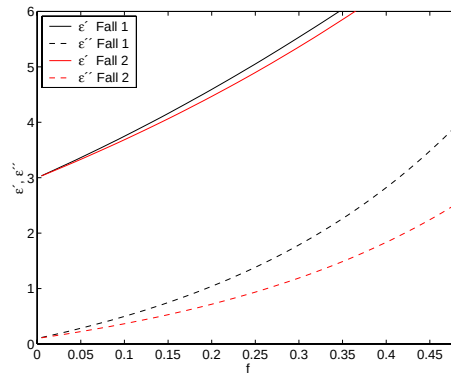
Fall 1 Den första blandningen (svarta kurvor i Figur 7) visar den effektiva permittiviteten för ett material som består av cenosfärer med förlustskikt, i ett matrismaterial. Den effektiva permittiviteten är beräknad med metoden för skiktade sfärer i Tabell 1.²

Fall 2 Den andra materialblandningen (röda kurvor i Figur 7), visar den effektiva permittiviteten för ett material som består av separata sfärer av luft, aluminiumoxid och förlustmaterial, i ett matrismaterial. Den effektiva permittiviteten är beräknad med Maxwell Garnetts metod i Tabell 1.

Volymproportionerna av de olika materialen är lika i båda fallen. Jämförelsen av de två fallen presenteras i Figur 7 som visar hur den effektiva permittiviteten hos blandningarna varierar med volymsandelen förlustmaterial.

Ett intressant fenomen som illustreras av Figur 7 är att *förhållandet* mellan realdel och imaginärdel av ϵ_{eff} varierar på olika sätt för de två olika blandningarna. Detta är tydligt i Figur 7 eftersom realdelarna $\epsilon'_{eff} = \text{Re}(\epsilon_{eff})$ (heldragna kurvor i Figur 7) ändras på ungefär samma sätt då f^{vol} varierar, i motsats till imaginärdelarna $\epsilon''_{eff} = \text{Im}(\epsilon_{eff})$ (streckade kurvor i Figur 7) som ändras på mycket olika sätt. Då materialblandningen innehåller skiktade sfärer (svarta kurvor) ökar ϵ''_{eff} betydligt brantare än då materialblandningen innehåller separata sfärer (röda kurvor). Relationen mellan ϵ'_{eff} och ϵ''_{eff} är avgörande för de absorberande egenskaperna hos

²För beräkningen har vi antagit att radierna för de olika skikten i cenosfär-kompositen är (räknat inifrån och ut): $r_a = 15\mu\text{m}$, $r_b = 20\mu\text{m}$, $r_c = 25\mu\text{m}$. Mängden förlustmaterial har varierats genom att ändra volymsandelen cenosfärer med förlustmaterial f^{vol}_{ceno} i blandningen. Radierna a , b och c som används i modellen i Figur 6 erhålls då genom sambanden $c^3 = f^{vol}_{ceno}$, $\frac{a}{c} = \frac{r_a}{r_c}$ och $\frac{b}{c} = \frac{r_b}{r_c}$. Volymsandelen förlustmaterial ges av $f^{vol}_{förlust} = c^3 - b^3$.



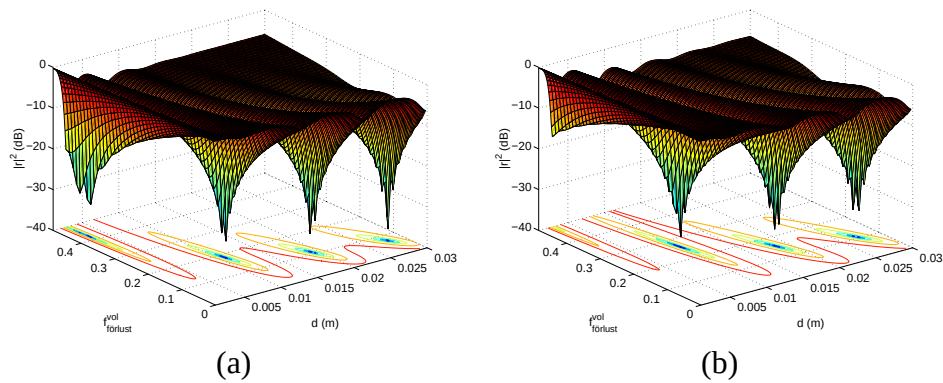
Figur 7: Effektiv permittivitet [$\epsilon'_{eff} = \text{Re}(\epsilon_{eff})$ och $\epsilon''_{eff} = \text{Im}(\epsilon_{eff})$] hos två materialblandningar som funktion av volymsandelen förlustmaterial ($f_{förlust}^{vol}$). Fall 1 (svarta kurvor) gäller för cenosfärer med förlustskikt i matrismaterial. Fall 2 (röda kurvor) gäller för samma material och i samma proportioner som i fall 1, men då de olika materialen (vacuum, aluminiumoxid och förlustmaterial) utgör *separata* sfäriska partiklar i matrismaterialet. Materialegenskaperna framgår av tabellen i Figur 6b.

materialblandningen. Det är därför intressant att detta förhållande kan varieras, inte bara med proportionerna av de olika materialkomponenterna i blandningen, utan också genom valet av geometrisk struktur hos de partiklar som blandas i matrisen.

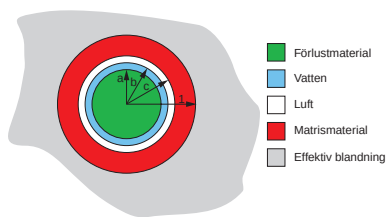
Figurerna 8a och b visar reflektionen från Dällenbachabsorbenter baserade på de två materialblandningarna i Figur 7. Reflektionen från Dällenbachabsorbenterna i figurerna 8a och b har minima på ~ -35 dB vid $f^{vol} = 0.19$, $d = 1.1$ cm (med skiktade sfärer) respektive $f^{vol} = 0.26$, $d = 1$ cm (för separata sfärer). Man kan konstatera att det krävs mindre förlustmaterial i materialblandningen om skiktade sfärer används, jämfört med separata, homogena sfäriska partiklar. Den minimala reflektion som kan uppnås är ungefär lika för de båda materialblandningarna. Genom att använda ihåliga sfärer som beläggs med förlustmaterial finns möjligheten att sänka den totala vikten av absorptionsmaterialet, samtidigt som mängden förlustmaterial minskas och absorptionsmaterialets effektivitet bibehålls.

2.2.4 Exempel 4: Vatteninträngning i absorbentmaterial

Vi övergår nu till att studera effekten av vatteninträngning i en absorberande materialblandning. Problemet är intressant till exempel för absorbenter som används i marin miljö. Modellen som används illustreras i Figur 9a. Materialblandningen består av ett matrismaterial, med sfäriska partiklar av ett förlustmaterial. Materialegenskaperna framgår av tabellen i Figur 9b. Kring varje partikel finns ett tunt skikt av luft där vatten kan tränga in.



Figur 8: Reflektionen vid 10 GHz och vinkelrätt infall från en Dällenbachabsorbent där materialblandningarna i Figur 7 använts som absorberande material. Figurerna (a) och (b) motsvarar Fall 1 respektive Fall 2.

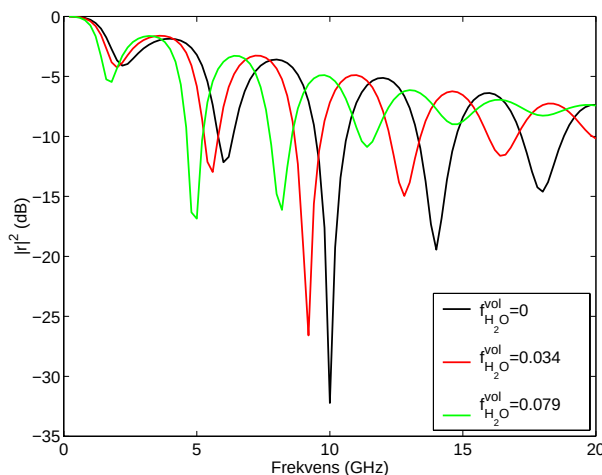


(a)

Material	Permittivitet ($\epsilon' + i\epsilon''$)
Förlustmaterial (t ex ledande polymer)	$10 + i10$
Vatten	Enl. Debye (se text)
Luft	1
Matris (Epoxy)	$3 + i0.1$

(b)

Figur 9: Modell av absorbentmaterial med sfäriska partiklar av förlustmaterial, med skikt av vatten, i matrismaterial. Modellen används för att studera effekten av vatteninträngning i materialblandningen.



Figur 10: Reflektionen från en Dällenbachabsorbent där materialblandningen i Figur 9 använts som absorberande material. Reflektionen visas för tre olika värden på vatteninnehåll i materialet: (a) 0 % ($b = a = 0.62$), (b) 3.4 % ($b = 0.65$) och (c) 7.9 % ($b = 0.68$).

Vattnets dielektriska egenskaper modelleras med hjälp av Debyemodellen (se t ex Referens [1]):

$$\epsilon = \epsilon_{\infty} + \frac{\epsilon_s - \epsilon_{\infty}}{1 - i\omega\tau} + i\frac{\sigma}{\omega\epsilon_0} \quad (3)$$

där $\epsilon_{\infty} = 72$, $\epsilon_s = 5.27$, $\omega = 2\pi\nu \text{ s}^{-1}$, $\tau = 10^{-11} \text{ s}$, $\sigma = 4 \Omega^{-1}\text{s}^{-1}$, och ϵ_0 är permittiviteten för vacuum. ν är frekvensen hos strålningen. Parametrarna som använts är rimliga för saltvatten. Observera att permittiviteten för vatten är kraftigt frekvensberoende i mikrovågsområdet.

Vi vill studera hur egenskaperna hos en Dällenbachabsorbent, baserad på materialet i Figur 9, förändras då mängden vatten i blandningen ökar. Då materialblandningen är fri från vatten kan följande parametrar användas för att utforma en Dällenbachabsorbent med goda reflektionsegenskaper kring 10 GHz: Absorbentmaterialets tjocklek på Dällenbachabsorbenten $d = 0.0193 \text{ m}$, radierna hos partiklarna i modellen $a = 0.62$, $b = a$ (det vill säga inget vatten i blandningen), och $c = 0.68$. (Dessa värden innebär att volymsandelen av förlustmaterial i blandningen är $f_{förlust}^{vol} = 0.24$.) Reflektionen från Dällenbachabsorbenten i intervallet 0–20 GHz illustreras av den svarta kurvan i Figur 10. Utan vatteninträngning i absorbentmaterialet har alltså Dällenbachabsorbenten en kraftig reflektionsdal kring 10 GHz, och dessutom flera mindre reflektionsdalar över och under 10 GHz. Särskilt mellan 10–20 GHz finns ett par relativt djupa reflektionsdalar. Dällenbachabsorbenter är ofta smalbandiga, och det gäller också i detta fall. Ofta används därför flera skikt av absorbentmaterial i en multilagerstruktur (se Figur 1b) för att uppnå högre bandbredd. Här nöjer vi oss med att demonstrera effekten av vatteninträngning för egenskaperna hos Dällenbachabsorbenten (med endast ett lager).

Den röda och den gröna kurvan i Figur 10 visar hur reflektionsegenskaperna förändras då vatteninnehållet ökar till $f_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{vol}} = 0.034$ respektive $f_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{vol}} = 0.079$. Vatteninträngningen orsakar två effekter. För det första förskjuts dalarnas centra mot lägre frekvenser. För det andra ändras dalarnas djup: de blir grundare, utom vid de lägsta frekvenserna, där dalen fördjupas något. Båda fenomenen leder till att Dällenbachabsorbentens egenskaper försämras. Dels flyttas absorptionsmaximum från de önskade 10 GHz; dels försämras absorptionsegenskaperna. Försämringen är kraftig, även för små vattenmängder. En mer bredbandig multilagerstruktur där detta material är en del skulle också försämras av vatteninträngningen. Multilagerstrukturer bygger på att reflektionsdalarna i de olika materialen i multilagerstrukturen är anpassade till varandra. Om ett material försämras, så försämras också egenskaperna hos hela materialstrukturen.

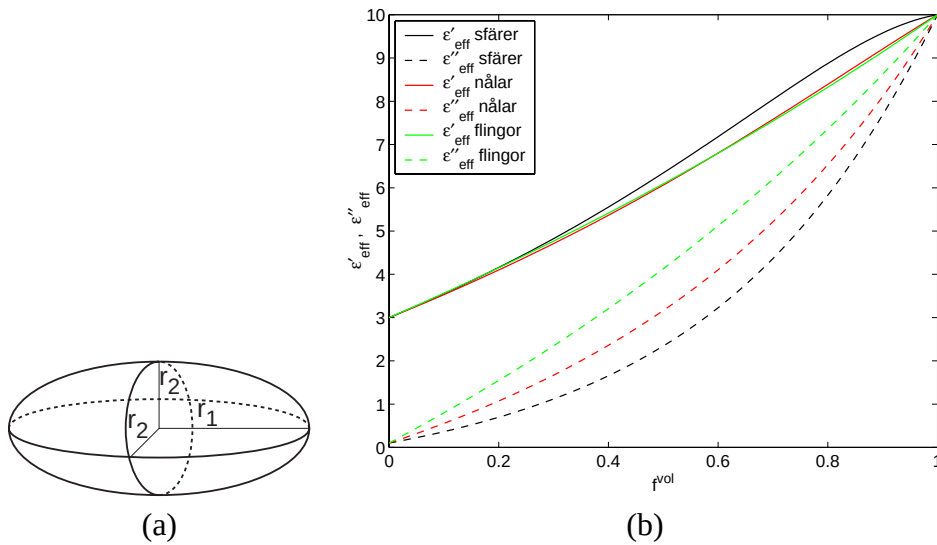
2.2.5 Exempel 5: Utformning av permittiviteten genom partiklarnas geometri

I Avsnitt 2.2.3 visades att den effektiva permittiviteten kan påverkas av strukturen hos partiklarna, och inte bara av partikelkoncentrationen i materialblandningen. Detta faktum kan också exemplifieras genom jämförelse av blandningar med samma volymsandel partiklar, men med olika partikelgeometri. I Avsnitt 2.2.3 jämfördes skiktade partiklar med homogena sfäriska partiklar; i detta exempel jämförs hur den effektiva permittiviteten förändras då partiklarna har formen av nålar, sfärer respektive flingor.

Nålar respektive flingor kan modelleras som extremfall av ellipsoider, se Figur 11a. Nålar modelleras genom att definitionen $r_1 \gg r_2$, och flingor genom $r_1 \ll r_2$. Sfärer erhålls med $r_1 = r_2$. Med dessa antagande kan till exempel Maxwell Garnetts blandningsformel för ej upplinjerade ellipsoider (se Tabell 1) användas för att beräkna den effektiva permittiviteten för en blandning som består av matrismaterial med partiklar i form av sfärer, nålar respektive flingor. Om matrismaterialet består av epoxy med $\epsilon = 3 + i0.1$ och partiklarna har $\epsilon = 10 + i10$ erhålls resultatet i Figur 11b. Kurvorna visar hur den effektiva permittiviteten varierar som funktion av volymsandelen partiklar.

Notera i Figur 11b hur realdelen av den effektiva permittiviteten [$\epsilon'_{eff} = \text{Re}(\epsilon_{eff})$] är relativt oberoende av formen på partiklarna, särskilt vid låga partikelkoncentrationer ($f^{\text{vol}} \lesssim 0.4$). Imaginärdelen ϵ''_{eff} däremot varierar kraftigt med partiklarnas form: sfärer ger lägst värden på ϵ''_{eff} och flingor högst. Eftersom relationen mellan ϵ'_{eff} och ϵ''_{eff} är avgörande för materialets funktion som absorbentmaterial är detta ett mycket användbart fenomen vid optimering av signaturmaterial. Partiklarnas geometri är ytterligare en parameter (vid sidan av permittiviteter och volymsandelar) som kan utnyttjas till exempel vid utformning av nya materialblandningar.

Att permittiviteten påverkas av partiklarnas form kan förklaras intuitivt på följande sätt. Då partiklarna är små i förhållande till våglängden fungerar de som små dipoler som polariseras av det elektromagnetiska fäl-



Figur 11: Materialblandning av slumpmässigt orienterade sfärer, nålar respektive flingor med $\epsilon_2 = 10 + i10$ i epoxymatris med $\epsilon_1 = 3 + i0.1$. (a) Partiklarnas geometri (sfärer, nålar och flingor) modelleras som ellipsoider (se text). (b) Den effektiva permittiviteten hos materialblandningen som funktion av volymsandelen partiklar.

tet i materialet, och på så sätt påverkar den effektiva permittiviteten. En enskild partikels dipolmoment är större dels (a) ju större dess längd längs det elektriska fältets riktning är, och dels (b) ju mer laddning som kan polariseras i partikeln i den riktningen. Partiklarna är slumpmässigt orienterade i materialet. Den totala polarisationen i materialet – vilket i sin tur bestämmer permittiviteten – bestäms därför av en sammanvägning av partiklarnas genomsnittliga längd och polariserad laddning i det elektriska fältets riktning. Sammantaget leder det till att sfäriska partiklar ger lägst permittivitet, flingor ger högst permittivitet medan nålformade partiklar hamnar däremellan.

2.3 Begränsningar och vidare forskning

Det är alltså möjligt att modellera många intressanta egenskaper hos signaturmaterial för radar med hjälp av blandningsformler. Blandningsformler är dock ingen “färdigutvecklad universalmetod” för modellering av signaturmaterial. Vi vill med följande punkter peka på några områden där ytterligare forskning och utveckling relaterade till blandningsformler för modellering av signaturmaterial är nödvändig.

Experimentella jämförelser. Syftet med de exempel som använts har varit att visa på ett kvalitativt sätt hur blandningsformler kan användas vid modellering av signaturmaterial i mikrovågsområdet. Kvantitativt är resultaten dock osäkra, eftersom vi inte gjort några jämförelser

med experimentella resultat. Det är sant att alla metoder som använts i denna studie är kända från litteraturen och tidigare jämförts med olika mätningar.[10] Användning av blandningsformler för beräkning av effektiva egenskaper hos material med förluster, och särskilt absorberande material och absorbenter är dock relativt odokumenterad. Blandningsformler används till största delen för dielektriska blandningar utan förluster. Det är därför viktigt att forskningen kring blandningsformler för absorbentmaterial fortsätter med jämförelser av teoretiska och experimentella resultat.

Tillförlitliga materialegenskaper. Ett problem med blandningsformler gäller tillförlitliga materialdata för de material som ingår i blandningarna. För att beräkna den effektiva permittiviteten hos en materialblandning med de metoder som presenterats här krävs att permittiviteterna för de olika komponenterna i blandningen är kända. Det är dock inte alltid självklart vad permittiviteten hos en partikel är. Så kallat "carbon black" till exempel, som består av kolpartiklar, är ett vanligt förlustmaterial i radarabsorbenter. Men vad är permittiviteten för partiklar av "carbon black"? Partiklarna är porösa, och består troligtvis av en blandning av små segment av kol i olika former (till exempel grafit, fullerener av olika typ och storlek, och amorft kol i andra former). Det behövs mer forskning för att etablera kunskap om hur bulkegenskaper hos material kan erhållas ur materialmätningar på partiklar, och hur blandningsformlerna ska tillämpas på verkliga material med förluster. Problemet är inte okänt och har till viss del studerats tidigare.[5, 4, 2] Ett ytterligare problem i detta sammanhang är permittiviteten för en materialkomponent i ren form ibland kan förändras i omgivningen av materialblandningen. Ett exempel på detta gäller vatten, vars polära molekyler kan attraheras till ytan av andra material i omgivningen. Detta ger upphov till bundet vatten med andra dielektriska egenskaper än vanligt, obundet vatten.

Metoder för högre frekvenser. Härledningen av blandningsformler förutsätter att våglängden är mycket större än inhomogeniteterna i materialet. I material med hög permittivitet och vid höga frekvenser är inte detta alltid uppfyllt. I sådana fall kommer elektromagnetisk spridning att påverka egenskaperna hos materialblandningen. Då materialen innehåller inhomogeniteter av samma storleksordning som våglängden hos strålningen måste därför beräkningsmodellerna inkludera spridning. Sådana modeller kan tillämpas på fler materialtyper, och även tillämpas inom IR-området.

Materialkomponenter med höga förluster. Det är också viktigt att studera modeller för beräkning av effektiva egenskaper där (några av) komponenterna är mycket goda elektriska ledare. Metalliska komponenter till exempel, är vanliga i radarabsorbenter, men modelleras normalt ganska dåligt med de blandningsformler som presenterats

här, eftersom strålningen inte förmår tränga in i metallpartiklarna på grund av skinn-effekten.

Magnetiska egenskaper. Magnetiska material, det vill säga material med magnetisk permeabilitet $\mu \neq 1$ kan modelleras med blandningsformler på samma sätt som den elektriska permittiviteten. Det är vanligt att magnetiska material används som förlustmaterial i radarabsorbenter.

Jämförelser med andra modeller. För att verifiera och etablera blandningsformler som metod för att modellera signaturmaterial behövs jämförelser med andra modeller. En viktig typ av jämförelse är med numeriska metoder, till exempel FDTD, med vilka specifika materialblandningar kan modelleras. Numeriska metoder kräver ofta långa beräkningstider i datorer, men ger ofta mycket bra resultat som kan användas som "bench-mark" för blandningsformler och andra enkla metoder. Med numeriska metoder är det också möjligt att studera inhomogeniteter med godtycklig fördelning och geometri.

Modellering av materialstrukturer. För att kunna studera hur signaturmaterial fungerar i realistiska absorbenter krävs metoder för modellering av materialstrukturer. Det gäller till exempel multilagerstrukturer, strukturer med gradient hos elektriska permittiviteten och magnetiska permeabiliteten, och strukturer med komplicerad geometri, till exempel bikakestruktur, eller så kallade frekvensselektiva skikt.[12, 7]

3 Sammanfattning och slutsats

Den här rapporten har beskrivit hur blandningsformler kan användas för modellering av signaturegenskaper hos radarabsorbenter. Med hjälp av blandningsformler kan de effektiva dielektriska egenskaperna hos en inhomogen materialblandning beräknas. De effektiva dielektriska egenskaperna kan i sin tur användas för beräkning av signaturegenskaper hos faktiska radarabsorbenter. Framförallt Dällenbachabsorbenten (se Figur 1) användes som exempel på hur reflektionsegenskaperna hos en radarabsorbent förändras då blandningen i absorbentmaterialet varierar. Vi har visat hur blandningsformler kan användas bland annat för att:

- Beräkna effektiva dielektriska egenskaper hos materialblandningar med olika typer av inhomogeniteter som till exempel sfärer, skiktade sfärer, nålar och flingor;
- Studera hur de effektiva egenskaperna hos en blandning påverkas av de dielektriska egenskaperna hos komponenterna;
- Studera hur absorptionsegenskaperna hos ett absorbentmaterial påverkas av proportionerna i blandningen;
- Studera hur absorptionsegenskaperna hos ett absorbentmaterial påverkas av strukturen hos inhomogeniteterna i blandningen;
- Optimera blandningsproportioner i en materialblandning för att er-hålla bästa egenskaper som absorbentmaterial;
- Studera hur funktionen hos en radarabsorbent (det vill säga en materialstruktur där materialblandningen ingår) påverkas av variationer i blandningens proportioner;
- Studera hur de effektiva egenskaperna hos en materialblandning påverkas av inhomogeniteternas (partiklarnas) geometri.

Vi har också pekat på begränsningar och behov av ytterligare forskning när det gäller användningen av blandningsformler för studier av signaturmaterial. Det gäller bland annat:

- Experimentella jämförelser.
- Tillförlitliga materialegenskaper.
- Metoder för högre frekvenser.
- Materialkomponenter med höga förluster.
- Magnetiska egenskaper.
- Jämförelser med andra modeller.
- Modellering av materialstrukturer.

Var och en av dessa punkter diskuterades mer utförligt i Avsnitt 2.3.

Tack

Tack till professor Ari Sihvola, Helsingfors Tekniska Universitet, för stor gästfrihet vid mitt (JF) besök 2002-03-14–15.

Referenser

- [1] Gerhard Kristensson. *Elektromagnetisk vågutbredning*. Studentlitteratur, Lund, 1999.
- [2] J. C. Martín, J. M. Forniés-Marquina, and A. M. Bottreau. Application of permittivity mixture laws to carbon black dielectric characterization by time domain reflectometry. In Gilles Silly and Jean-Yves Buzaré, editors, *Proceedings of the 16th International Meeting on Hertzian Optics and Dielectrics, OHD 2001*, pages 97–100, Université du Maine, Le Mans, September 3–5 2001. Groupement AMPERE, Université du Maine. <http://lpec.univ-lemans.fr/ohd2001/>.
- [3] Perambur S. Neelakanta. *Handbook of Electromagnetic Materials. Monolithic and Composite Versions and Their Applications*. CRC Press, Boca Raton, 1995.
- [4] S. O. Nelson. Estimation of permittivities of solids from measurements on pulverized or granular materials. In A. Priou, editor, *Dielectric Properties of Heterogeneous Materials*, volume PIER 6 of *Progress in Electromagnetics Research*, chapter 6, pages 231–271. Elsevier, New York, 1992.
- [5] S. O. Nelson and T.-S. You. Relationship between microwave permittivities of solid and pulverised plastics. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 23(3):346–353, March 1990.
- [6] Bruce D. Nordwall. Tiny ceramic spheres used to absorb energy. *Aviation Week & Space Technology*, 151(10):44, September 6 1999.
- [7] Jan-Olof Ousbäck and Fritz Larsson. Radarabsorberande material en översikt. R FOA-R-00-01543-615-SE, FOA, Linköping, December 2000.
- [8] O. Pekonen, K. Kärkkäinen, A. Sihvola, and K. Nikoskinen. Numerical testing of dielectric mixing rules by fdtd method. *J. Electromagnetic Waves and Applications*, 13(1):67–87, 1999.
- [9] A. Sihvola and I. V. Lindell. Polarizability and effective permittivity of layered and continuously inhomogeneous dielectric spheres. *J. Electromagnetic Waves and Applications*, 3(1):37–60, 1989.
- [10] Ari Sihvola. *Electromagnetic Mixing Formulas and Applications*. IEE Electromagnetic Waves Series 47. The Institution of Electrical Engineers, London, 1999.
- [11] P. A. M. Steeman and F. H. J. Maurer. An interlayer model for the complex dielectric constant of composites. *Colloid Polym. Sci.*, 268(4):315, 1990.

- [12] K. J. Vinoy and R. M. Jha. *Radar Absorbing Materials. From Theory to Design and Characterization*. Kluwer Academic Publishers, Boston/Dordrecht/London, 1996.