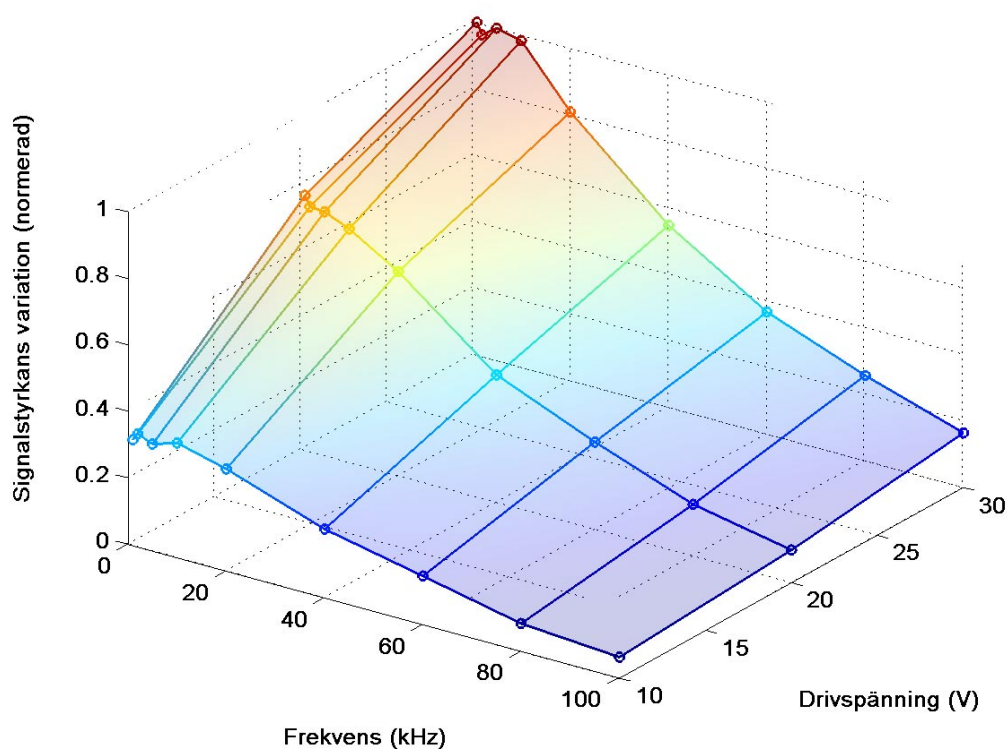


Johan Öhgren, Claes Vahlberg

Utveckling av nya vätskekristallmodulatorer – bestämning av optiska och elektriska egenskaper



TOTALFÖRSVARETS FORSKNING SINSTITUT

Sensorteknik

Box 1165, 581 11 Linköping

Systemteknik

172 90 Stockholm

FOI-R--1486--SE

December 2004

ISSN 1650-1942

Teknisk rapport

Johan Öhgren, Claes Vahlberg

Utveckling av nya vätskekristallmodulatorer – bestämning av optiska och elektriska egenskaper

Utgivare Totalförsvarets Forskningsinstitut - FOI Systemteknik 172 90 Stockholm	Rapportnummer, ISRN FOI-R--1486--SE	Klassificering Teknisk rapport
	Forskningsområde 4. Ledning, informationsteknik och sensorer	
	Månad, år December 2004	Projektnummer E 6059
	Delområde 43 Undervattenssensorer	
	Delområde 2	
Författare/redaktör Johan Öhgren Claes Vahlberg	Projektledare Erland Sangfelt	
	Godkänd av Monica Dahlén	
	Uppdragsgivare/kundbeteckning Försvarsmakten	
	Tekniskt och/eller vetenskapligt ansvarig Lars Sjöqvist	
Rapportens titel Utveckling av nya vätskekristallmodulatorer – bestämning av optiska och elektriska egenskaper		
Sammanfattning (högst 200 ord) Vätskekristallmodulatorer är ett slags optiska komponenter som kan användas för överföring av data genom luften (fri optisk kommunikation). FOI har arbetat med tekniken i ett par års tid och har tagit fram en ny generation modulatorer tillsammans med Chalmers tekniska högskola. För att kunna nyttja modulatorerna till fullo är det viktigt att känna deras optiska och elektriska egenskaper. Modulatorema består av ett tunt skikt ferroelektrisk vätskekristall mellan två ITO-belagda ytor och modulerar strålningens polarisation med hjälp av sin dubbelbrytande förmåga. Vätskekristallens unika axel kan styras genom en elektriska spänning som läggs mellan ITO-ytorna. Utstymningsvinkeln för den unika axeln beror på flera faktorer så som temperatur, spänning och frekvens. Spänningen påverkas i sin tur av de resistanser och kapacitanser som finns inbyggda i modulaton. En mätuppställning har satts upp på FOI för mätning av de optiska och elektriska egenskaperna. Modeller har utvecklats i matematikprogrammet Matlab för att utvärdera mätdata och för att simulera modulatorema. Den unika axelns vinkel har kunnat bestämmas för olika temperaturer och i viss mån frekvenser. Signalstyrkans variation har mätts upp som funktion av temperatur, spänning och frekvens, och bandbredden har undersökts. Bandbredden var avsevärt större för den nya generationen modulatorer.		
Nyckelord vätskekristall, flytande kristall, modulator, polarisation, modell, kommunikation		
Övriga bibliografiska uppgifter	Språk Svenska	
ISSN 1650-1942	Antal sidor: 44 s.	
Distribution enligt missiv	Pris: Enligt prislista	

Issuing organization FOI – Swedish Defence Research Agency System Technology SE-172 90 Stockholm	Report number, ISRN FOI-R--1486--SE	Report type Technical report
	Programme Areas 4. C4ISTAR	
	Month year December 2004	Project no. E 6059
	Subcategories 43 Underwater Sensors	
	Subcategories 2	
Author/s (editor/s) Johan Öhgren Claes Vahlberg	Project manager Erland Sangfelt	
	Approved by Monica Dahlén	
	Sponsoring agency Swedish Armed Forces	
	Scientifically and technically responsible Lars Sjöqvist	
Report title (In translation) Development of new liquid crystal modulators — determination of optical and electrical properties		
Abstract (not more than 200 words) Liquid crystal modulators are optical components that can be used in free-space optical communication. FOI has been studying this technique for some years and has developed a new generation of modulators in co-operation with Chalmers University of Technology. To make the most of them it is important to know their optical and electrical properties. The modulators consist of a thin ferroelectric liquid crystal layer between two ITO surfaces and modulate the polarisation of the radiation by means of their birefringence. The unique axis of the liquid crystal can be steered by an electric voltage over the ITO surfaces. The angle of the axis depends on several factors like temperature, voltage and frequency. The voltage is in turn influenced by the resistances and capacitances of the modulator. An experimental set-up at FOI has been used for measuring the optic and electric properties. Models have been developed in the mathematics program Matlab for analyse of measurement data and simulation of the modulators. The angle of the unique axis has been determined at various temperatures and to some degree frequencies. The variation of signal strength has been measured as a function of temperature, voltage and frequency, and the bandwidth has been studied. The bandwidth was notably larger in the new generation of modulators.		
Keywords liquid crystal, modulator, polarisation, polarization, model, communication		
Further bibliographic information	Language Swedish	
ISSN 1650-1942	Pages 44 p.	
Price acc. to pricelist		

Innehållsförteckning

<i>Inledning</i>	5
<i>1 Modell för modulatorernas optiska egenskaper</i>	6
1.1 Optiska axlar	6
1.2 Drivning med hjälp av elektriskt fält	7
1.3 Modulatorns brytningsriktning och egenskaper hos den unika axeln	8
<i>2 Mätning och bestämning av modulatorernas optiska egenskaper</i>	9
2.1 Metod för bestämning av optiska egenskaper	9
2.2 Storheter som påverkar de optiska axlarna	9
2.3 Datainsamling	10
2.4 Beräkning av optiska egenskaper	10
2.5 Mätning av variationen i signalstyrka och bandbredd	11
<i>3 Resultat för modulatorerna F9 och CH1</i>	12
3.1 Vinklar för optiska axlarna, brytningsindexskillnad och vätskekristallskiktets tjocklek	12
3.2 Variation i signalstyrka och bandbredd	17
<i>4 Modell för modulatorernas elektriska egenskaper</i>	20
<i>5 Mätning, bestämning och resultat för modulatorernas elektriska egenskaper</i>	21
5.1 Metod för bestämning av elektriska egenskaper	21
5.2 Resultat för modulator F9	21
<i>6 Diskussion kring modulatorernas optiska och elektriska egenskaper</i>	22
<i>7 Referenser</i>	24
<i>Appendix A – Tillverkning av modulatorer</i>	25
A.1 Tillverkning av modulator F9 på FOI	25
A.2 Tillverkning av modulator CH1 på Chalmers	25
<i>Appendix B – Mätuppställning för optiska egenskaper</i>	26
B.1 Mätuppställning och utrustning	26
B.2 Exempel på mätdata	27
<i>Appendix C – MATLAB-modell av mätuppställningens och modulatorns optiska egenskaper</i>	31
C.1 Modeller av de optiska komponenterna	31
C.1.1 Modell av rotator (motsvarande första polarisatorn)	31
C.1.2 Modell av fasplatta (motsvarande vätskekristallmodulatorn)	32
C.1.3 Modell av polarisator (motsvarande andra polarisatorn)	33
C.2 Beräkning av kvadratavvikelser mellan mätdata och modelldata	34
C.3 Bestämning av parametrar som ger bäst överensstämmelse med mätdata	36
C.3.1 Bestämning av värden på unika (långsamma) axeln	36
C.3.2 Exempel på anpassning av modelldata till mätdata	40
<i>Appendix D – Mätuppställning för elektriska egenskaper</i>	41
Mätuppställning och utrustning	41
<i>Appendix E – Modulatorns elektriska egenskaper</i>	42
Elektriska egenskaper beräknade från mätdata	42

Inledning

Komponenter som kan modulera synligt ljus och annan optisk strålning har fått en allt större betydelse inom olika civila och militära teknikområden. Det kan röra sig om överföring av stora informationsmängder, att styra laserstrålar eller att man vill skydda känsliga optiska system – för att ge några exempel. Allt tyder på att användningen för sådana optiska komponenter fortsätter att öka starkt.

Totalförsvarets forskningsinstitut (FOI) studerar i ett par olika projekt hur optiska modulatorer kan användas för snabb och säker informationsöverföring. En typ av modulator som studerats, och som avhandlas i den här rapporten, är vätskekristallmodulatorer där det aktiva materialet är en ystabiliserad ferroelektrisk vätskekristall (flytande kristall). Dessa modulatorer har förmågan att ändra polarisationstillståndet hos optisk strålning på ett enkelt och kontrollerat sätt. Denna förmåga kan direkt användas för informationsöverföring genom att en sändare kodar sin information i polarisationstillståndet hos en laserstråle, vilken tas emot av en mottagare som avkodar informationen.

FOI har med stöd av Chalmers Tekniska Högskola tagit fram ett antal vätskekristallmodulatorer under ett par års tid, och deras förmåga att överföra information har sedan undersökts av FOI i Linköping genom experiment i laboratorium [1, 2] och fullskaleförsök ute i fält [3].

Vätskekristallmodulatorerna har en del fördelar som att de är billiga, lätta att tillverka, tåliga och relativt enkla att driva. Men det finns fortfarande en del frågetecken kvar: Går det att öka modulationstakten över 10 kbit/s? Går det att utveckla en modell som bättre beskriver polarisationsegenskapen? Hur mycket spelar omgivningstemperaturen in?

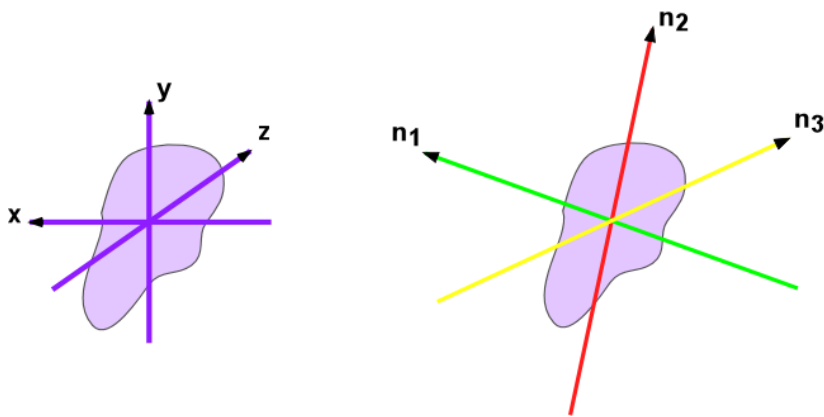
För att ytterligare öka förståelsen för modulatorernas egenskaper, både de optiska och elektriska, har Chalmers tillverkat en uppsättning nya modulatorer, vilka sedan utvärderats hos FOI. Arbetet har också innefattat modellbyggen av modulatern. Modellerna har använts för att utvärdera mätdata, och de kan också användas i större modeller av kommunikationslänkar eller andra system. Dessa nya resultat presenteras också i den här rapporten.

Författarna vill rikta ett särskilt tack till Per Rudquist på Chalmers Tekniska Högskola som stått för tillverkningen av de nya modulatorerna och delat med sig av sin stora sakkunskap om vätskekristaller.

1 Modell för modulatorernas optiska egenskaper

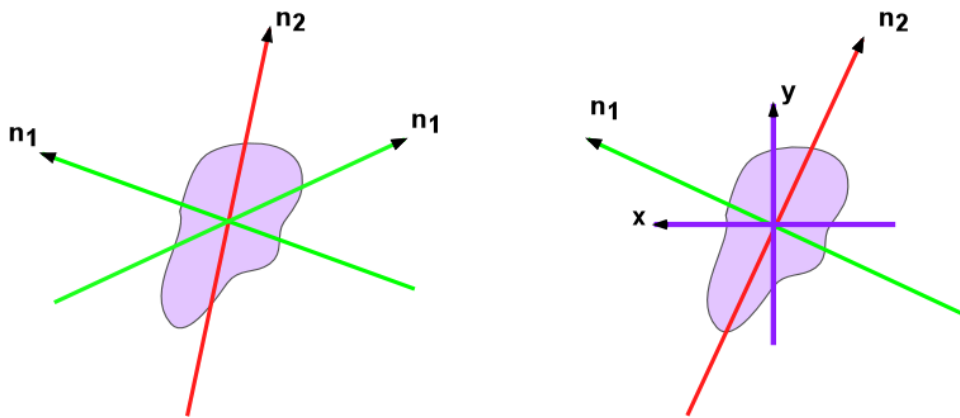
1.1 Optiska axlar

En vätskekristall kan ha olika optiska egenskaper i olika riktningar. Det går dock att finna tre ortogonala axlar som relativt enkelt beskriver de optiska egenskaperna. Dessa axlar är knutna till vätskekristallens molekyler och följer med när molekylerna vrider sig. För att kunna styra molekylerna och de optiska axlarna är hela vätskekristallen innesluten i en modulator. Modulatorn tilldelas lämpligen ett eget koordinatsystem. Med hjälp av detta kan man samtidigt beskriva hur strålning faller in mot modulatorn och orienteringen för de optiska axlarna. Figur 1 symboliserar en vätskekristallmolekyl och de två olika koordinatsystemen. I ena fallet ser vi molekylen i modulatorens koordinatsystem. I andra fallet ser vi de optiska axlarna och deras förhållande till molekylen. Notera att molekylen och de optiska axlarna är fria att röra sig gentemot modulatorn och dess koordinatsystem.



Figur 1 En symbolisk vätskekristallmolekyl och de två koordinatsystemen. Molekylen är placerad i en modulator med axlarna x , y och z (figuren till vänster). Strålning kan falla in i xy -planet, vilket utgör modulatorens ingångsyta. Den kortaste vägen genom modulatorn går i z -riktningen. De optiska axlarna (figuren till höger) är knutna till molekylen och följer med när molekylen vrider sig.

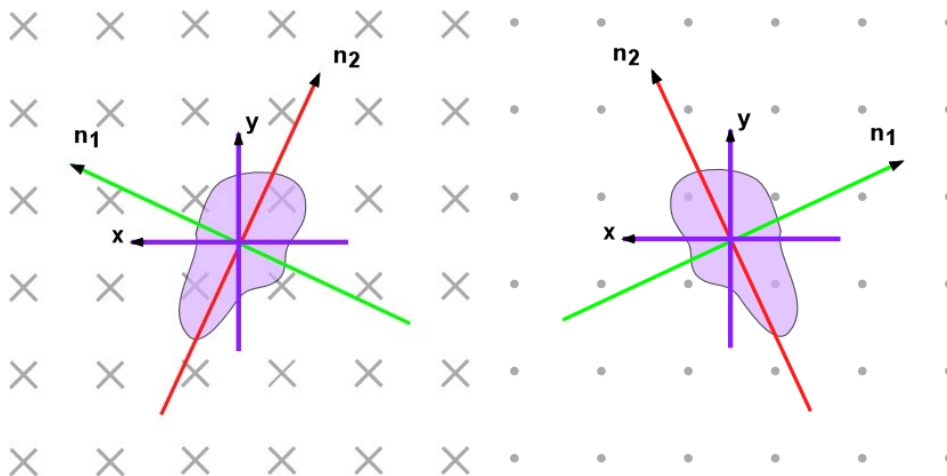
Strålning som går genom vätskekristallen och som är linjärpolariserad längs med någon av de optiska axlarna kommer att känna av ett brytningsindex som är specifikt för just den axeln. I de modulatorer som vi studerar är vätskekristallen uniaxiell, vilket innebär att en av de optiska axlarna har ett unikt brytningsindex, medan de två övriga axlarna har samma brytningsindex (figur 2 till vänster). Dessutom ligger den unika axeln i xy -planet, modulatorens ingångsplan (figur 2 till höger).



Figur 2 I en uniaxiell vätskekristall har två av de optiska axlarna samma brytningsindex medan en axel har ett unikt brytningsindex (figuren till vänster). Orienteringen hos molekylerna och de optiska axlarna är styrd i vår modulator så att den unika axeln ligger i modulatorens xy-plan (figuren till höger).

1.2 Drivning med hjälp av elektriskt fält

Genom att lägga ett elektriskt fält över vätskekristallen kan man få molekylerna och de optiska axlarna att vrida sig (byta orientering). Fältet riktas antingen i $+z$ -riktningen, eller i $-z$ -riktningen (alltså med eller motriktat strålningens färdriktning genom modulatorens). Molekylerna vrider sig kring en viss axel. För att förenkla saken kan vi för stunden anta att denna vridningsaxel är parallell med modulatorens y -axel. Figur 3 visar (till vänster) hur molekylerna och de optiska axlarna först är orienterade för ett fält i $+z$ -riktningen. När fältet sedan byter riktning till $-z$ -riktningen ser vi i figuren (till höger) hur molekylerna har roterat ett halvt varv kring y -axeln.



Figur 3 När det elektriska fältet byter riktning från $+z$ -riktningen (in i modulatorens, figuren till vänster) till $-z$ -riktningen (ut ur modulatorens, figuren till höger) så vrider sig molekylerna ett halvt varv kring y -axeln. De optiska axlarna följer med i vridningen.

De optiska axlarna rör sig i rummets tre dimensioner vid en sådan övergång mellan två orienteringar. Men bortser man från *hela* rörelsen och nöjer sig med att betrakta det inledande och det slutliga tillståndet, skulle man i stället kunna se det som att den unika axeln alltid ligger i xy-planet och enbart rör sig i det planet. I figur 3 får man skenbart intrycket att axlarna roterat moturs ungefär 60° . En förutsättning för det här betraktelsesättet är att de optiska axlarna är vinkelräta mot varandra och att brytningsindex ser likadant ut längs den optiska axelns "positiva" och "negativa" riktning. Vi har utgått från att detta gäller.

1.3 Modulatorns borstningsriktning och egenskaper hos den unika axeln

Vätskekristallen är innesluten i modulatorens i ett tunt skikt (typiskt ett par μm) mellan två plana ytor som båda är parallella med xy-planet. För att stabilisera orienteringen hos vätskekristallmolekylerna borstar man de båda kontaktytorna i en viss riktning. Borstningsriktningen ligger vanligen längs modulatorens x- eller y-axel och kan utgöra ett alternativ när riktningen för den unika axeln anges.

Under modulationens två tillstånd, det vill säga när elektriska fältet går i den ena respektive den andra riktningen, kommer den unika axeln att vara den av axlarna som ligger närmast borstningsriktningen. Det räcker därför att ange vinkeln mellan den unika axeln och borstningsriktningen för att beskriva orienteringen hos de optiska axlarna, eftersom de andra axlarna alltid är vinkelräta mot den unika axeln.

I vår vätskekristall har den unika axeln ett högre brytningsindex än de andra axlarna. Den kallas därför ibland för den långsamma axeln, eftersom strålning som är polariserad parallell med den får en jämförelsevis lägre fashastighet och kortare periodlängd.

2 Mätning och bestämning av modulatorernas optiska egenskaper

2.1 Metod för bestämning av optiska egenskaper

Orienteringen hos den unika axeln ska bestämmas för de två modulationstillstånden, dels när det elektriska fältet som driver modulaton går i +z-riktningen, dels när det går i -z-riktningen. Orienteringen kan beskrivas av den unika axelns vinkel i xy-planet eller alternativt gentemot borstningsriktningen. För att bestämma axelns vinkel användes ett antal optiska komponenter (se mätuppställningen i Appendix B) och ett bestämt schema:

1. Ställ in polarisator 1 (*före* modulaton) i någon vinkel.
 - Detta bestämmer polarisationstillståndet för strålningen som fortsätter mot modulaton.
2. Läs av detektor 2 (som finns *mellan* polarisator 1 och modulaton).
 - Detta ger kontroll på flödet (effekten) av strålningen som faller in mot modulaton. Det är viktigt eftersom flödet kan variera under mätningen, något som påverkar vad som mäts upp efter modulaton.
3. Ställ in polarisator 2 (*efter* modulaton) i någon vinkel.
4. Läs av detektor 1 (*efter* polarisator 2).
 - Polarisationstillstånd och flöde för strålningen som passerat genom polarisatorerna och modulaton är nu kända.
5. Ställ in många olika värden för polarisatorerna 1 och 2 och läs av detektorerna.
 - Ju fler mätdata och ju bättre de är fördelade, desto bättre bild kan erhållas av modulatonns funktion.
6. Använd en programmerad modell och undersök vilka vinklar för unika axeln som ger bäst överensstämmelse med mätdata.

I praktiken är det enklast att börja med någon vinkel för polarisator 1 och därefter låta polarisator 2 svepa över en mängd vinklar (över ett halvt varv). Sedan flyttas polarisator 1 till en annan vinkel, och proceduren upprepas.

Modulatonns optiska egenskaper beror inte bara på vinkeln för den unika axeln utan även på faktorer som (1) skillnaden i brytningsindex mellan axlarna och (2) vätskekristallskiktets tjocklek. Det visar sig att sådana faktorer kan bestämmas från ovanstående beräkningsprocedur. Det är dock en fördel om flera av faktorerna är kända redan från början, eftersom osäkerheten för de övriga då blir mindre.

2.2 Storheter som påverkar de optiska axlarna

Det är tre storheter som kan varieras under mätningarna och som också har stor betydelse för de optiska axlarnas orientering, nämligen temperatur, drivspänning och frekvens.

Temperaturen inverkar i huvudsak på två sätt. Först och främst så inträffar fasövergångar i vätskekristallen vid vissa specifika temperaturer [4]. Vätskekristallens molekyler ordnar sig då på nya sätt, vilket kan ha stor betydelse för de optiska egenskaperna. För det andra innebär högre temperatur också lägre viskositet, med följd att högre modulationsfrekvenser kan uppnås.

Drivspänningen över modulaton skapar det elektriska fältet genom vätskekristallen och driver molekyler till sina ändlägen. För de nivåer på drivspänningen som är

aktuella för oss innebär en högre drivspänning att molekylerna slår om snabbare. Dessutom kan drivspänningens storlek ha betydelse för var molekylernas ändlägen hamnar, och därmed de optiska axlarnas orientering.

Frekvensen för drivspänningen har ingen inverkan på de optiska axlarnas ändlägen så länge den är måttlig, men när frekvensen blir tillräckligt hög hinner inte molekylerna gå hela vägen mellan ändlägena. I stället växlar molekylerna mellan två nya ändlägen som ligger närmre varandra. Därmed försämras modulationen. Vi skulle kunna mäta upp axlarnas nya vinklar ändå, men en komplikation är att axlarna i detta fall inte längre ligger i modulatorens infallsyta, utan till viss del pekar längs z-axeln.

2.3 Datainsamling

Styrningen av mätutrustningen och insamlingen av data skedde automatiskt med hjälp av ett LabView-program. (Mätutrustningen beskrivs i appendix B.1.) Temperaturen i klimatkammaren fick först ställas in för hand, liksom amplituden och frekvensen för drivspänningen till modulatorens. Sedan styrdes polarisatorerna automatiskt till olika vinklar, och detektorspänningarna lästes av.

Referensdetektorn (detektor 2) gav en spänning som är proportionell mot strålningsflödet (effekten) in i mätuppställningen. Detektorn för den modulerade strålningen (detektor 1) var inkopplad i ett oscilloskop som visade den modulerade signalen. Därifrån hämtades spänningsvärden för signalstyrkan motsvarande modulationens två tillstånd.

Polarisatorvinklar och detektorspänningar sparades i fil på ett sådant sätt att det gick att koppla vilka vinklar som hörde till vilka spänningar.

2.4 Beräkning av optiska egenskaper

2.4.1 Kompensering av modulerad spänning med hjälp av referensspänning

När laserstrålen går genom mätuppställningen påverkas strålningsflödet (strålnings-effekten) av modulatorens och de övriga optiska komponenterna. Flödet mäts med detektorer som ger ut en proportionerlig spänning.

Efter första polarisatorn länkas en del av strålningen av till en referensdetektor. Flödet in i mätuppställningen varierar nämligen av två orsaker: Den första är att strålningen som faller mot polarisatorn har ett elliptiskt polarisationstillstånd, varför flödet varierar när polarisatorn vrids. Den andra orsaken är att flödet från laserkällan kan variera med tiden.

Strålningen passerar sedan genom vätskekristallmodulatorens och den andra polarisatorn innan den träffar modulationsdetektorn. Då modulatorens ändrar strålningens polarisationstillstånd så ändras också den modulerade spänningen från modulationsdetektorn.

Det är möjligt att kompensera för det ojämna flödet in i mätuppställningen genom att dividera den modulerade spänningen med referensspänningen. Kvoten ger uttryck för modulatorens och polarisatorernas inverkan men påverkas inte av variationen i det ursprungliga flödet. Inbakat i kvoten finns också en faktor som beror på dämpningen i de optiska komponenterna. Denna faktor är okänd men kan antas vara konstant och inverkar inte på de fortsatta beräkningarna.

2.4.2 Beräkning av modulerad spänning i MATLAB

Alla komponenter som ingår i mätuppställningen har vi gjort modeller av i matematikprogrammet MATLAB. Det rör sig framförallt om polarisatorer och själva vätskekristallmodulatorens. Modellerna arbetar med hjälp av Jonesmatriser. Det innebär att strålningen delas upp i två komponenter, som är vinkelräta mot varandra. Vardera

komposanten beskrivs med ett komplext tal, som innehåller både amplitud och fas för denna komposant. Ett urval av de viktigaste modellerna, kodade i MATLAB, återfinns i appendix C.

Med hjälp av modellerna är det nu möjligt att simulera mätuppställningen: Strålningen tilldelas ett känt polarisationstillstånd till att börja med, sedan får den passera genom första polarisatorn, därefter modulatorens och till sist andra polarisatorn. Som resultat erhålls den utkommande strålningens polarisationstillstånd och flöde. (Detta flöde motsvaras i mätuppställningen av det som modulationsdetektorn mäter upp). I modellen kan man enkelt välja nya värden på till exempel polarisatorernas eller den unika axelns vinkel, och direkt får man värdet på flödet ut från uppställningen.

2.4.3 Bestämning av unika axelns vinkel

I modellen är det enkelt att variera den unika axelns vinkel och se hur det påverkar modulationen i systemet. Det sökta värdet för vinkeln kan bestämmas genom att vi provar ett stort antal vinklar och ser i vilket fall som modelldata stämmer bäst överens med mätdata. Det är den metoden som vi har valt att gå efter.

På samma sätt som i mätuppställningen går det i modellen att bilda kvoten mellan utgående och inkommande flöde. Modellkvoterna kan emellertid inte jämföras med mätkvoterna direkt, eftersom de måste multipliceras med en viss okänd skalfaktor. Det beror på att mätuppställningen innehåller en dämpfaktor som inte finns i modellens idealiserade värld, och att modulationsdetektorn och referensdetektorn inte nödvändigtvis arbetar med samma spänningsförstärkning.

Det är alltså nödvändigt att prova med ett stort antal vinklar för den unika axeln och olika skalfaktorer i modellen för att till slut finna den kombination som ger bäst överensstämmelse med mätdata.

Nu återstår bara att definiera vad som menas med bästa överensstämmelse. Vi har valt en enkel men funktionell metod: Den punkt i modelldata som har ett visst värde på polarisatorvinklar och vinkel för den unika axeln jämförs med motsvarande punkt i mätdata. Skillnaden i flödet beräknas. Dessa flödesskillnader kvadreras och summeras för alla punkter. En mindre summa motsvarar ett mindre avstånd mellan modelldata och mätdata, och den bästa överensstämmelsen inträffar i det fall där summan är som minst.

Figurerna B-2, 3, 5 och 6 i appendix B.2 visar uppmätta flödeskvoter för olika vinklar på första och andra polarisatorn. Figur C-1 i appendix C.3.2 visar ett exempel på en lyckad anpassning av modelldata till mätdata.

2.5 Mätning av variationen i signalstyrka och bandbredd

Det modulerade strålningsflödet växlar mellan två värden när drivfältet växlar mellan $-z$ -riktningen och $+z$ -riktningen. Det leder till en variation i signalstyrkan (det vill säga spänningen) från modulationsdetektorn. En stor variation är önskvärd för att man enklare ska kunna skilja på 1 och 0.

För att mäta variationen ställdes först en viss temperatur in för modulatorens. Sedan valdes en fyrkantvåg med olika spänningsnivåer för modulationen, och för varje fall valdes några olika frekvenser. Signalstyrkan från modulationsdetektorn mättes upp med ett oscilloskop och värdena för modulationens två tillstånd sparades. Polarisorerna ställdes in så att modulationen tydligt framträdde.

Om frekvensen ökar så minskar variationen i signalstyrka. Begreppet bandbredd talar om hur mycket frekvensen kan öka innan variationen sjunkit till en viss nivå. Vi bestämde att bandbredden är den frekvens då variationen minskat till hälften av sitt ursprungliga värde.

3 Resultat för modulatorerna F9 och CH1

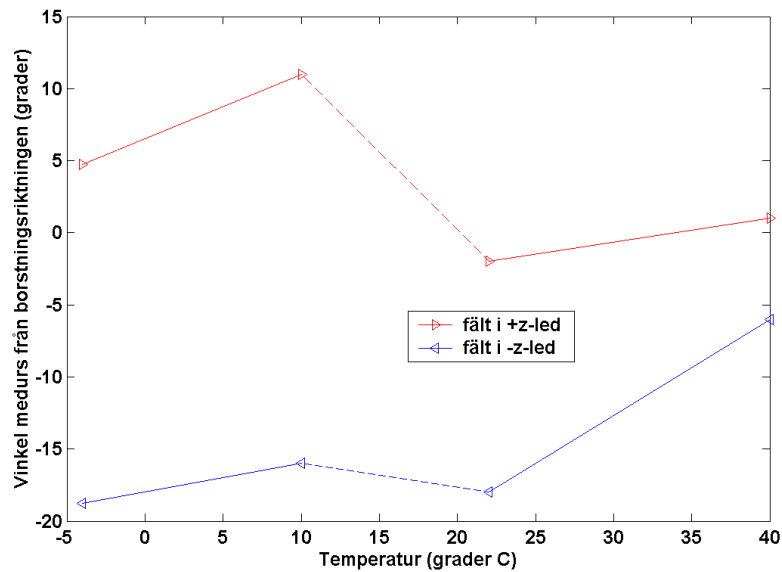
Modulatorerna som studerades kom från två olika serier. Den första har beteckningen F9 och kommer från en serie som tillverkats på FOI och använts flitigt de senaste åren, bland annat på fältförsök. Den andra modulatorn har beteckningen CH1 och tillhör en ny serie som tillverkats på Chalmers i år. Dessa modulatorer har inte använts tidigare, och en del av syftet med mätningarna var att jämföra de båda modulatorerna och se om den nya serien har bättre egenskaper än den gamla. Fler uppgifter om modulatorerna finns i appendix A.

3.1 Vinklar för optiska axlarna, brytningsindexskillnad och vätskekristallskiktets tjocklek

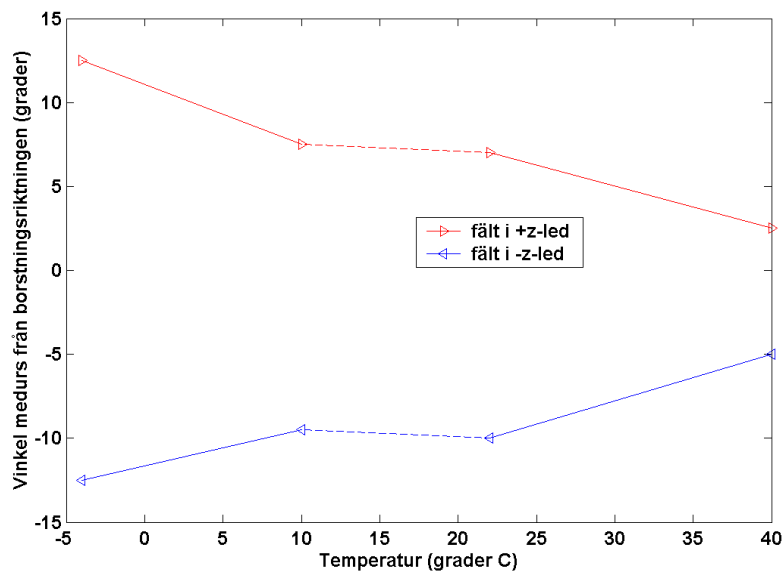
Ett av det viktigaste syftena med studien var att ta reda på unika axelns vinkel vid olika temperaturer. Fyra temperaturer valdes: -4 , 10 , 22 och 40 °C. Temperaturen -4 °C var intressant eftersom vätskekristallen då befinner sig i en av sina vätskekristallina faser, smektisk C*, och har möjlighet att modulera. Vanligt vatten har emellertid frusit vid denna temperatur, det vill säga befinner sig i den rent kristallina fasen. Vid 10 °C befinner sig vätskekristallen fortfarande i smektisk C* men det är möjligt att den högre temperaturen har en gynnsam inverkan på modulationen. Ett skäl att välja 22 °C är att det är en vanlig temperatur inomhus och en vanlig temperatur utomhus sommartid. Men framförallt så har vätskekristallen gått över i en ny fas, smektisk A*, vilket har betydelse för modulationen. Vid den avslutande temperaturen 40 °C har vätskekristallen fortfarande smektisk A*-fas, men på grund av ändrad viskositet kan det tänkas att modulationshastigheten påverkas.

Simuleringar gjordes i MATLAB för att beräkna vinkeln för den unika axeln. Appendix C beskriver hur detta gick till och i appendix C.3.2 finns ett exempel som visar överensstämmelsen mellan modelldata och mätdata.

Figur 4a visar unika axelns vinklar för modulator F9 (gamla serien) vid olika temperaturer och med drivfält i +z-riktningen och -z-riktningen. Figur 4b visar motsvarande för modulator CH1 (nya serien). Modulator F9 utsattes vid detta tillfälle för en drivspänning på 30 V (0-topp) och modulator CH1 för 20 V (0-topp). Det innebar ett elektriskt fält på 10 V / μm för båda modulatorerna, vilket är ett normalt värde. Frekvensen var 2 kHz, ett ganska lågt värde som säkerställer att molekylerna hinner ställa om sig helt och hållet.

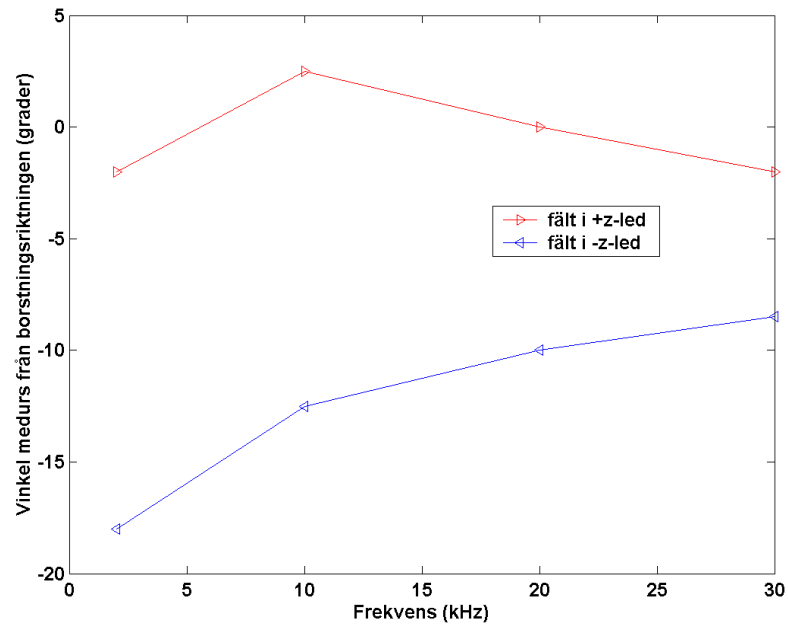


Figur 4a Vinkeln för unika axeln relativt borstningsriktningen i modulator F9 (gamla serien). Vinkeln varierar mellan två lägen (övre och undre kurvan) när drivfältet byter riktning. Området mellan 10 och 22 °C är något osäkert på grund av en fasövergång i vätskekristallen vid 17 °C.



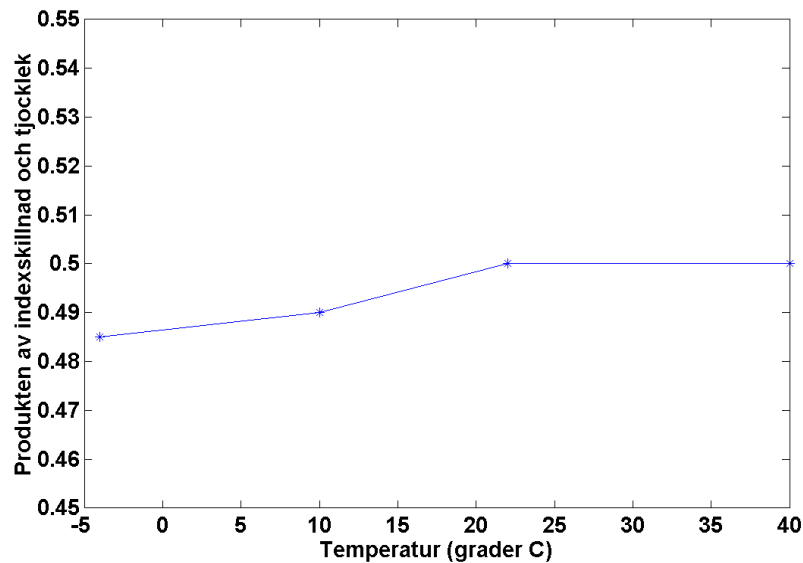
Figur 4b Vinkeln för unika axeln relativt borstningsriktningen i modulator CH1 (nya serien). Vinkeln varierar mellan två lägen (övre och undre kurvan) när drivfältet byter riktning. Området mellan 10 och 22 °C är något osäkert på grund av en fasövergång i vätskekristallen vid 17 °C.

Figur 5 visar vad som händer med unika axelns vinkel i modulator F9 när frekvensen ökas. Som väntat flyttas axelns ändlägen närmre varandra för ökande frekvenser. Denna typ av mätning återstår att göra för CH1.

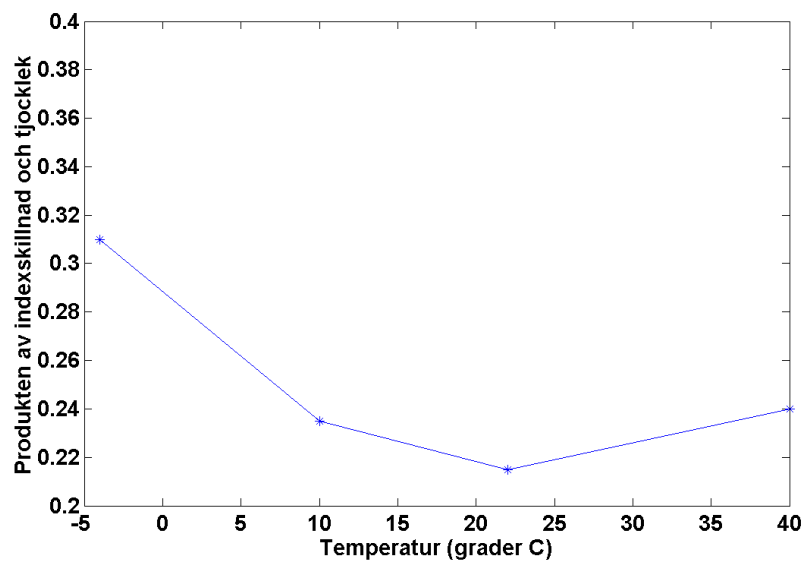


Figur 5 Vinkeln för unika (långsamma) axeln i modulator F9 för några olika frekvenser.

Under simuleringarna får man också ut ett värde på produkten av brytningsindexskillnad och vätskekristallskiktets tjocklek (angiven i μm). Figur 6a och 6b visar att produkten varierar något med temperaturen.



Figur 6a Temperaturberoende (enligt modellen) hos produkten av brytningsindexskillnad och vätskekristallens skiktjocklek, som är 3 μm för modulator F9.



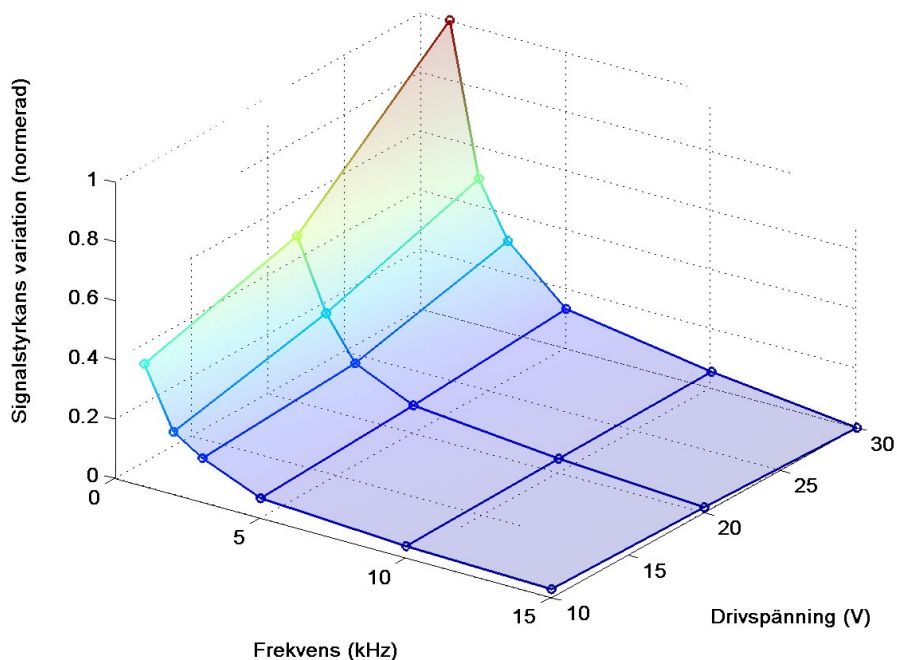
Figur 6b Temperaturberoende (enligt modellen) hos produkten av brytningsindexskillnad och vätskekristallens skiktjocklek, som är 2 μm för modulator CH1.

Den använda vätskekristallen har egenskapen att brytningsindex minskar med ökande temperatur. Det märks inte i figur 6a (där brytningsindex är tämligen konstant) men kan anas i figur 6b.

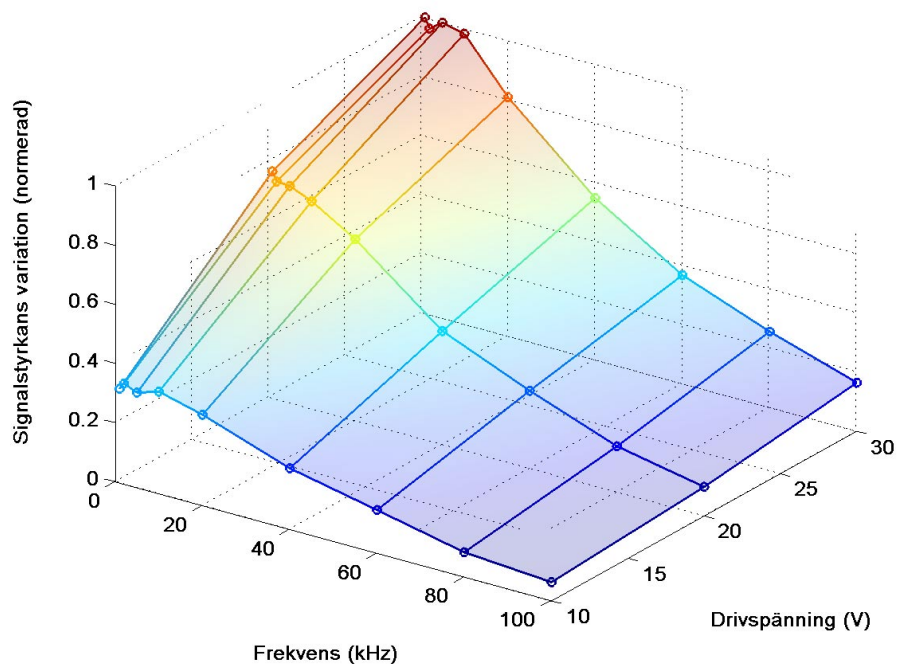
Låt oss för ett ögonblick anta att brytningsindexskillnaden inte hade varierat utan vore konstant för alla temperaturer. Det är då möjligt att beräkna det mest sannolika värdet för brytningsindexskillnaden. Det är känt att vätskekristallskiktet är $2,0\ \mu\text{m}$ tjockt i modulator CH1, medan tjockleken är angiven till $3,0\ \mu\text{m}$ med en onoggrannhet på $\pm 0,5\ \mu\text{m}$ för modulator F9. Låter man nu indexskillnaden och F9:s tjocklek variera och ser när resultatet ansluter bäst till mätdata (enligt minsta kvadratmetoden), så får man resultatet 0,125 för indexskillnaden och $3,95\ \mu\text{m}$ för F9:s tjocklek. Detta är inte helt orimliga värden, men de ska tas med en stor nypa salt på grund av de grova antagandena. Andra antaganden skulle ge andra värden.

3.2 Variation i signalstyrka och bandbredd

Signalstyrkans variation under modulationen avtar som tidigare nämnts med ökande frekvens. Men på vilket vis det sker beror såväl på temperatur som på drivspänning. Figurerna 7 och 8 visar resultat för modulator F9 vid två olika temperaturer.



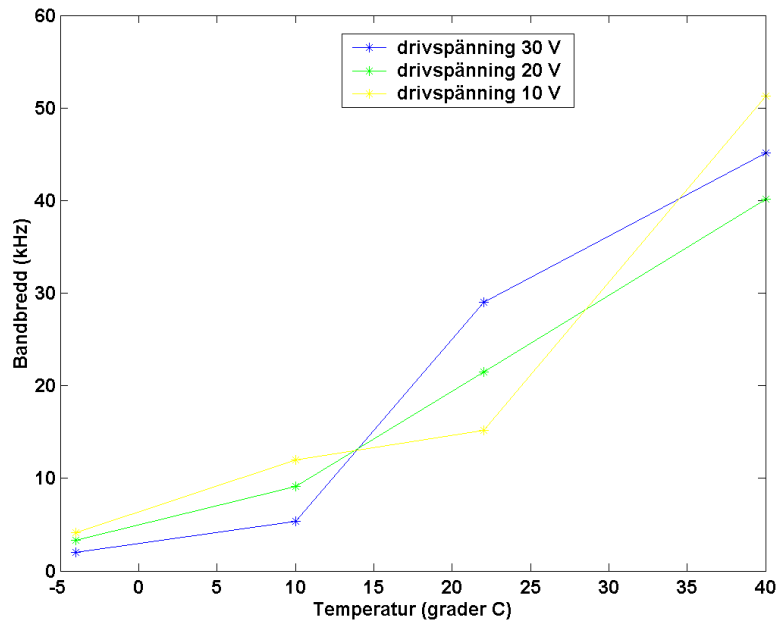
Figur 7 Signalstyrkans variation för modulator F9 vid -4 °C.



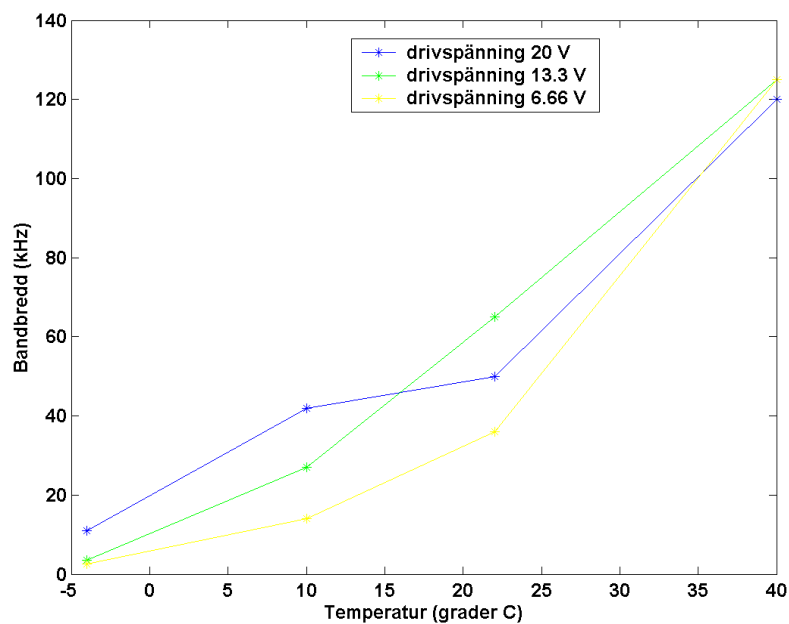
Figur 8 Signalstyrkans variation för modulator F9 vid 40 °C.

Det framgår klart från figurerna att variationen i signalstyrkan avtar mycket långsammare med frekvensen vid en hög temperatur än vid en låg. Det framgår också att en högre drivspänning ger en större signalvariation. Modulator CH1 betedde sig på liknande vis som modulator F9 fast med bättre prestanda.

Bandbredden, det vill säga den frekvens där variationen i signalstyrka minskat till hälften, berodde alltså mycket på temperaturen. Figurerna 9a och 9b visar detta för de båda modulatorerna.



Figur 9a Modulator F9:s bandbredd som funktion av temperatur och drivspänning.



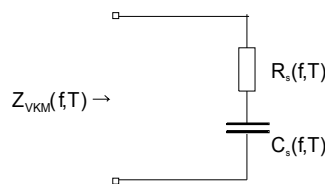
Figur 9b Modulator CH1:s bandbredd som funktion av temperatur och drivspänning.

Det framgår av mätningarna att bandbredden är starkt beroende av temperaturen. Däremot är det svårt att se att den skulle vara beroende av drivspänningen, åtminstone inom det spänningsområde som här har studerats. (Drivspänningens storlek spelar däremot en viktig roll för hur stor variationen i signalstyrka blir för varje enskild frekvens, vilket visades i figur 7 och 8.) Bandbredden var överlag högre för modulator CH1 ur den nya serien modulatorer.

4 Modell för modulatorernas elektriska egenskaper

Intresset för att ta fram en elektrisk modell för de befintliga, nu uppmätta modulatorerna är dels att skapa underlag för att till exempel beräkna effektbudget eller konstruera drivelektronik för ett praktiskt användbart system. Ett andra syfte med kanske viktigare betydelse är att våra modeller, framtagna ur mätdata, skall kunna jämföras med teoretiska modeller, framtagna med parametrar från datablad samt mekanisk utformning. Är överensstämmelsen god mellan modellerna kan i större utsträckning de teoretiska användas som stöd för snabbare och enklare framtagning av komponenter och system.

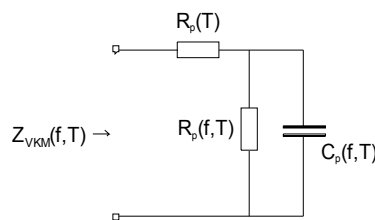
En första ansats till en modell för *mätning* av elektriska egenskaperna hos modulorn visas i figur 10.



Figur 10 Elektrisk modell för mätning av elektriska egenskaper hos modulorn.

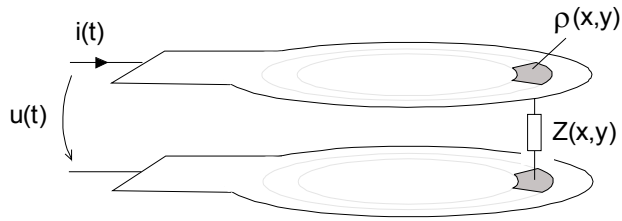
Då R_s och C_s är frekvensberoende är modellen giltig för varje given konstant frekvens. Ur mätdata kan därefter beräknas effektförluster i modulorn liksom dimensionerande parametrar för konstruktion av drivförstärkare.

En andra ansats till en modell som omfattar de uppenbara och väsentliga elektriska egenskaperna hos modulorn visas i figur 11.



Figur 11 Elektrisk modell för modulatorerna. $R_p(T)$ betecknar här resistansen i ITO-skiktet och den egentliga vätskekristallen modelleras av $R_p(f,T)$ och $C_p(f,T)$.

Det är före mätningen oklart om tilledarna, som utgörs av ett ITO-skikt, kan försummas eller om de har en väsentlig inverkan. I det fall de har en väsentlig inverkan bör de diskreta komponenterna ersättas med distribuerade. Således $R_s(T)$ ersätts med resistivitet och på motsvarande sätt ersätts $R_p(f,T)$, $C_p(f,T)$ med en impedans distribuerad över en area $Z(f,T)/[\text{Area}]$. En modell för detta framgår i figur 12.



Figur 12 Elektrisk modell för modulatorerna med distribuerad resistivitet för ITO-skikt och distribuerad impedans för vätskekristallen.

5 Mätning, bestämning, och resultat för modulatorernas elektriska egenskaper

5.1 Metod för bestämning av elektriska egenskaper

Magnitud och fas för registrerade spänningar och strömmar i diskreta frekvenspunkter beräknas i MATLAB ur mätdata som samplats in med oscilloskop. Därefter beräknas impedansen som funktion av frekvens enligt den enkla modell som beskrivits tidigare i figur 10. Då uppgifter om ITO-skiktets resistivitet saknas och ingen möjlighet har funnits att mäta upp denna har det inte varit möjligt att vidare identifiera de föreslagna modellerna enligt figurerna 11 och 12.

5.2 Resultat för modulator F9

De elektriska egenskaper som beräknats ur mätdata finns samlade i appendix E. De omfattar modulator F9 vid tre temperaturer men inte modulator CH1 som ännu inte är uppmätt.

6 Diskussion kring modulatorernas optiska och elektriska egenskaper

Den unika axelns vinkel under modulationsförloppet gick att bestämma för olika temperaturer för både modulator F9 och CH1 (figur 4a och 4b). Resultaten liknar varandra i stort, men de skillnader som finns har stor inverkan på signalstyrkan i slutänden. Med hjälp av de funna vinkelvärdena och MATLAB-modellerna som konstruerats kan vi härnäst simulera hur modulatorerna fungerar i en optisk länk. Det hade varit önskvärt att studera fler temperaturer och att göra fler mätningar för att minska mätosäkerheten. Det var emellertid inte möjligt på grund av att tidsåtgången var så stor vid varje mätning, trots den automatiserade uppställningen.

Den elektriska impedansen för modulator F9 kunde också bestämmas för olika temperaturer och frekvenser (figur E-1 och E-2). Dessa mätdata ger oss möjlighet att på bästa sätt konstruera drivelektronik för modulatorerna.

När frekvensen ökar utför den unika axeln i modulator F9 en mindre vinkelrörelse (figur 5), vilket var väntat. Det här fenomenet leder till sämre modulationsförmåga, det vill säga minskad variation i signalstyrkan, för höga frekvenser.

Modulatorns impedans var också frekvensberoende. Impedansen bestäms av vätskekristallen, ITO-skiktet och tilledarna tillsammans. Därför kan vi i det här skedet inte bestämma frekvensberoendet för enbart vätskekristallen, och inte direkt koppla vätskekristallens optiska frekvensberoende till dess elektriska. Chanserna att finna en sådan koppling kan ökas exempelvis genom samtidig mätning av optiska och elektriska egenskaper, och också genom att mäta upp tilledarnas och ITO-skiktens resistans separat varvid en mer detaljerad elektrisk modell kan användas.

Vinkeln för den unika axeln påverkas förutom av temperatur och frekvens också av drivspänningen (figur 7 och 8). En förklaring kan vara att de faktiska ändlägena för axeln beror på drivspänningen. En annan förklaring, som särskilt gäller för högre frekvenser, är att molekyler bara hinner slå om fullständigt om drivspänningen är tillräckligt hög. Däremot påverkades impedansen inte särskilt mycket av en ändring i drivspänningens styrka. Enbart vid lägsta temperaturen kunde en mindre variation (under 10 %) märkas av.

Vi valde att använda drivspänningar under mätningarna som är typiska inom vätskekristalltekniken, stora spänningar innebär nämligen en risk för genomslag i vätskekristallen och att den förstörs. Vår intention är emellertid att utsätta någon av modulatorerna för kritiska spänningar för att se när gränsen är nådd och vad som händer med modulationen.

Drivspänningens storlek bestämmer alltså variationen hos signalstyrkan; en större drivspänning ger en större variation. Däremot hittade vi inget samband mellan drivspänningen och bandbredden.

Störst betydelse för bandbredden hade temperaturen. Bandbredden ökade mer eller mindre linjärt med ökande temperatur i intervallet -4 till 40 °C (se figur 9a och 9b). Modulationen fungerade både för låga temperaturer då vätskekristallen var i smektisk C*-fas och för högre temperaturer (över 17 °C) då den var i smektisk A*-fas.

Temperaturen inverkar också på impedansen för frekvenser mindre än 30 kHz (figur E-3 och E-4). Övergången mellan vätskekristallens faser kunde inte spåras.

Bandbredden var större för modulator CH1 ur den nya serien, vilket betyder att dessa modulatorer kan komma att förbättra kommunikationstakten i våra optiska länkar. Erfarenheten från tidigare försök säger att vi kan överföra ungefär 1 bit per Hz bandbredd, vilket skulle innebära att de nya modulatorerna kan överföra 120 kbit/s

om de värms till 40 °C. En del svårigheter finns dock, till exempel en lägre variation i signalstyrkan vilket ger ett sämre signal-till-brusförhållande.

Med hjälp av de elektriska mätningarna har effektutvecklingen i modulatorerna kunnat beräknas för första gången (figur E-5). Den är måttlig och förmodas inte inverka menligt på modulatorerna. Kunskapen om effektutvecklingen kan nyttjas när en aktiv temperaturstyrning ska utvecklas.

7 Referenser

- [1] Johan Öhgren, Fredrik Kullander och Lars Sjöqvist: *Retrocommunication with Ferroelectric Liquid Crystal Modulators - Preliminary Results*, FOI, Linköping, december 2001. FOI-R--0325--SE (teknisk rapport).
- [2] Johan Öhgren, Andreas Olsson och Stan Zyra: *Utvärdering av vätskekristallmodulatorer och retroreflektorer för laserkommunikation*, FOI, Linköping, 2003. FOI-R-0794--SE (underlagsrapport).
- [3] Stig Gruffman, Fredrik Kullander, Andreas Olsson, Stan Zyra och Johan Öhgren utförde fältförsök på och vid sjön Roxen med retrokommunikation från boj, 24 september 2003. Milstolpe inom projektet undervattenskommunikation.
- [4] *FELIX Ferroelectric Liquid Crystals 2001*. Sammanställd av kemiföretaget Clariant, Wiesbaden, Tyskland.
- [5] *Testing Cell for LC*, utgivet av E.H.C. Co., Ltd., 1164 Hino, Hino-shi, Tokyo, Japan.
- [6] Johan Öhgren: *Preparering av celler F8–F13 inför fyllning*. Laborationsanteckningar, 2003.
- [7] Johan Öhgren: *Fyllning av cellerna F8–F13 med FELIX -020*. Laborationsanteckningar, 2003.

Appendix A – Tillverkning av modulatorer

A.1 Tillverkning av modulator F9 på FOI

Modulator F9 hör till den serie modulatorer med kvadratisk aktiv (modulerande) area som tillverkades på FOI. Själva glascellen, KSRO-03/A111P1NSS, köptes in från E.H.C., Japan. Avståndet mellan glasplattorna var 3 μm , men onoggrannheten var så stor som 0,5 μm . På vardera glasplattan fanns ett indium-tenn-oxidskikt (ITO-skikt) i form av en kvadrat, 10 mm i sida. Resistiviteten är ungefär 100 Ω/ruta . Tilledarna bestod av ITO-kanaler, ett par mm breda. Tilledarna för båda ITO-skikt gick över på den ena glasplattan som var bredare, och båda anslutningskanterna fanns på denna platta. Borstningsriktningen var tvärs emot anslutningskanternas riktning. [5]

Den ännu ofyllda cellen fixerades mot en skena med tejp. Ledarna lades mot anslutningskanterna och tejpades fast ett par centimeter från cellen. Brun ledare gick till det stora glaset och blå till det lilla. Det ledande epoxylimmet CW2400 från Chemtronix användes för att fästa ledarna. Limmet började stelna efter en liten stund. Limningarna värmdes med varmluft i cirka 15 minuter och fick sedan svalna. [6]

Fyllning av F9 gjordes på följande vis [7]:

1. Cellen värmdes på öppet temperaturbord till 120 °C.
2. En fyrkantspänning lades över cellerna. $\pm 3 \text{ V}\mu\text{m}^{-1}$ ($\pm 9 \text{ V}$), 100 Hz.
3. Vätskekristall FELIX-020 lades på.
4. Temperaturen sänktes med 2 °Cmin⁻¹.
5. Vid 40 °C stängdes temperaturbordet och spänningen av.

A.2 Tillverkning av modulator CH1 på Chalmers

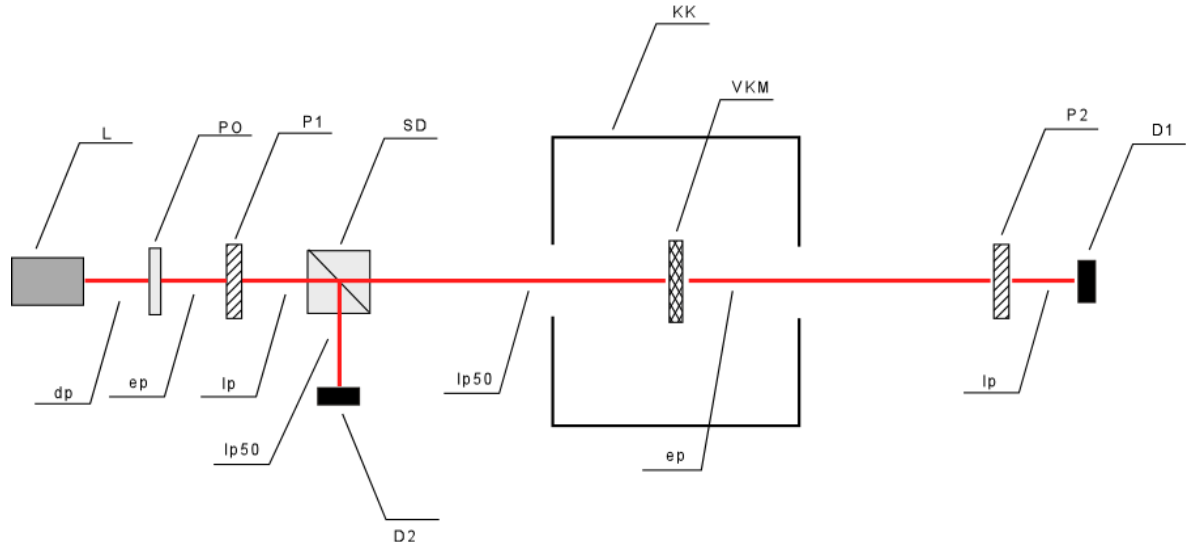
Modulator CH1 hör till den serie modulatorer med cirkulär aktiv (modulerande) area som tillverkades på Chalmers. ITO-skiktet lades på med hjälp av sputtring i en cirkelskiva med diametern 17 mm. Resistiviteten är cirka 20 Ω/ruta . ITO-skiktet borstades och sedan lades två glasskivor ihop med ITO-skikten inåt. Borstningsriktningen blev då parallell med anslutningskanterna. Avståndet mellan glasplattorna var 2 μm , med en noggrannhet på ungefär 0,1 μm .

Glascellerna fylldes med vätskekristallen FELIX-020 [4]. Det uppstod ett litet problem med linjeringen mitt i cellerna av någon okänd anledning, men det innebär inget problem för de optiska egenskaperna.

Appendix B – Mätuppställning för optiska egenskaper

B.1 Mätuppställning och utrustning

Figur B-1 visar principen för mätuppställningen.



Figur B-1 Mätuppställning för modulatorernas optiska egenskaper. Optiska komponenter är betecknade med stora bokstäver, medan egenskaper hos strålen är betecknad med små bokstäver. Beteckningarna förklaras i texten.

Följande komponenter användes:

- L – laser* En halvledarlaser med inkoppling i optisk fiber användes som strålkälla. (Radians Innova, KAP-10.) Spektret hade sin topp vid 1544 nm och halvvaldsbredden var 2 nm.
- PO – polarisationsomformare* Tre spolar med fiber fungerade som respektive kvart-, halv- och kvartvågspatta. Dessa justerades så att strålningen blev så cirkulärpolariserad som möjligt. Strålningen skickades därefter ut från fibern genom en port (inte med i figuren) vilken också innehöll en kollimerande lins.
- P1 – polarisator 1* En polarisator (Melles Griot 03 FPI 016) var placerad i en rotationsstegmotor (Newport) vilket gjorde det möjligt att vrida polarisatorn varvet runt i det transversella planet (xy-planet).
- SD – stråldelare* Stråldelaren var icke-polariserande (Newport 10 BC 17 MB.3) och delade upp strålen i två delar med samma strålningseffekt. Den ena delen fick fortsätta mot modulatorens, medan den andra leddes mot en detektor för att tjäna som referens.
- KK – klimatkammare* Klimatkammaren (Heraeus VÖTSCH VMT 07/64) användes för att ge hela modulatorens en jämn temperatur. Olika temperaturer mellan -4 och 40 °C nyttjades. Hål i kammarens väggar gjorde att strålningen kunde passera obehindrat.
- VKM – vätskekristallmodulator* De olika modulatorerna placerades en i taget i klimatkammaren. Strålningen passerade genom modulatorens samtidigt som polarisationen modulerades.

- P2 – polarisator 2* En andra polarisator (av samma slag som den första) satt också i en rotationsstegmotor (Newport) för att kunna vridas varvet runt i det transversella planet. På det sättet kan man analysera strålningseffekten hos elliptiskt polariserad strålning för en riktning i taget.
- D1 – modulationsdetektor* En kiseldetektor (Thorlabs PDA 55) användes för att mäta strålningseffekten hos den modulerade strålen.
- D2 – referensdetektor* En germaniumdetektor (New Focus 2033) mätte strålningseffekten hos referensstrålen. På så vis kunde man ta hänsyn till variationer i effekten för olika lägen hos polarisator P1. Detektorn var relativt långsam, men det hade ingen betydelse eftersom effekten var konstant för varje enskilt läge hos polarisator P1.

Strålens egenskaper i olika delar av uppställningen:

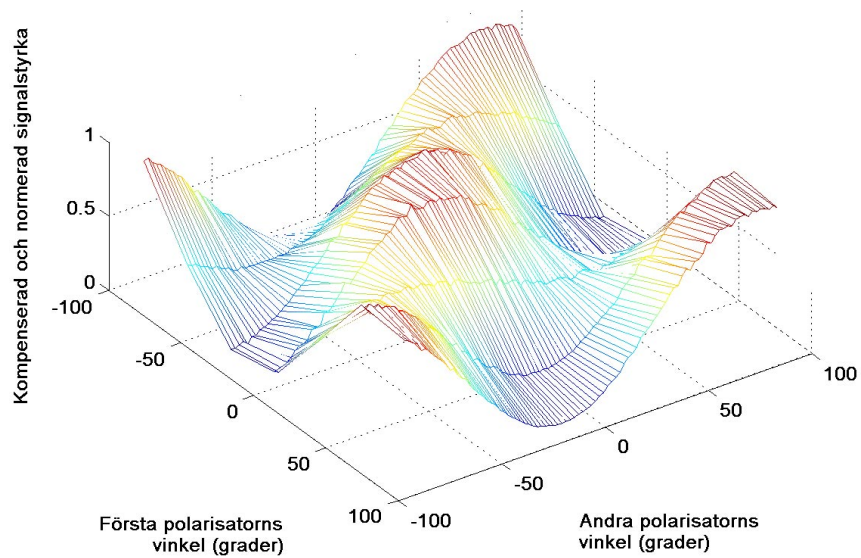
- dp – delvis polariserad* Laserstrålningen från själva lasern var i huvudsak linjärpolariserad i horisontalplanet.
- ep – elliptiskt polariserad* Efter polarisationsomformaren var strålningen mer eller mindre cirkulärpolariserad. På så vis blev strålningseffekten ungefär densamma i det transversella planets alla riktningar.
- lp – linjärpolariserad* Strålningen linjärpolariserades, och riktningen kunde varieras över hela det transversella planet. Tack vare att strålningen hade varit någorlunda cirkulärpolariserad i steget innan blev strålningseffekten ganska jämn i alla riktningar.
- lp50 – linjärpolariserad med 50 % strålningseffekt* Stråldelaren påverkade inte polarisationsriktningen hos de två resulterande strålarna, men strålningseffekten hos varje blev hälften av den ursprungliga.
- ep – elliptiskt polariserad* Modulatorn ändrade faser mellan strålningens två komponenter så att strålningen övergick från att vara linjärpolariserad till att bli elliptiskt polariserad av något slag.
- lp – linjärpolariserad* Genom linjärpolariseringen släpptes bara en komponent åt gången igenom av den elliptiskt polariserade strålningen för vidare analys.

B.2 Exempel på mätdata

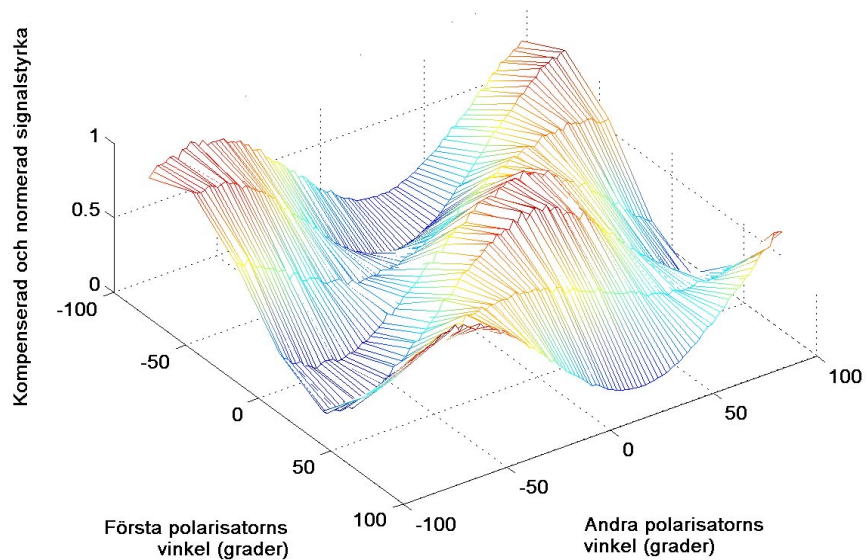
Mätningarna som gjordes för att bestämma unika axelns läge innebar att första polarisatorn vreds till en viss vinkel, att andra polarisatorn också vreds till någon vinkel och att signalstyrkan (strålningsflödet) på modulationsdetektorn lästes av.

Figur B-2 visar data från en sådan mätning. Mätningen gjordes på modulator F9 vid 10 °C och visar signalstyrkan under det modulationstillstånd när drivfältet är riktat i positiv z-riktning (längs med strålen). Data från modulationens andra tillstånd, med drivfältet i –z-riktningen, syns i figur B-3. Skillnaden mellan signalstyrkorna ses i figur B-4. En stor variation i signalstyrkan är oftast önskvärd och i figuren ser man vilka kombinationer av vinklar för polarisatorerna som åstadkommer detta.

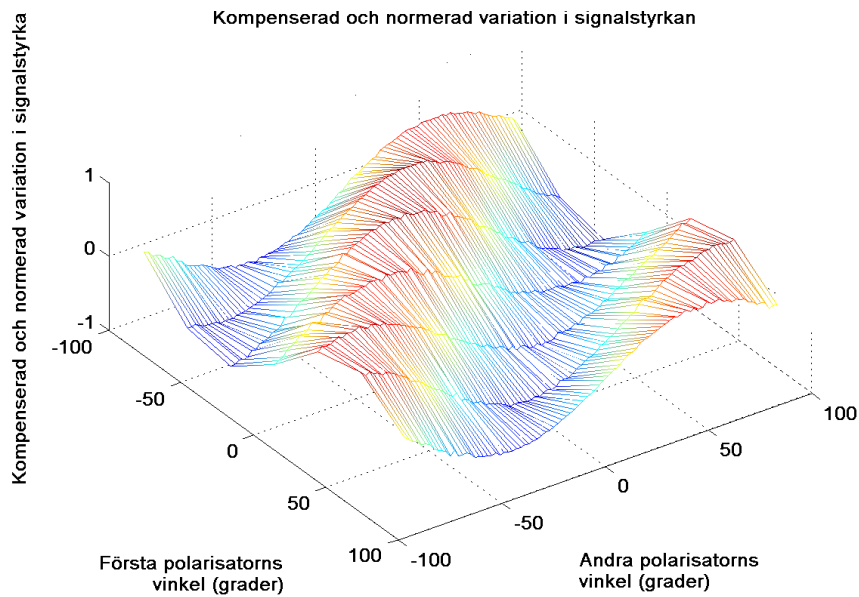
Motsvarande mätningar gjordes också för modulator CH1 och mätdata presenteras i figurerna B-5 till B-7. Även om det blir samma typ av mönster för signalstyrkan ser man att variationen inte är likadan som för F9. Det är naturligt med tanke på att vinklarna för den unika axeln och vätskekristallskiktets tjocklek skiljer sig åt mellan modulatorerna.



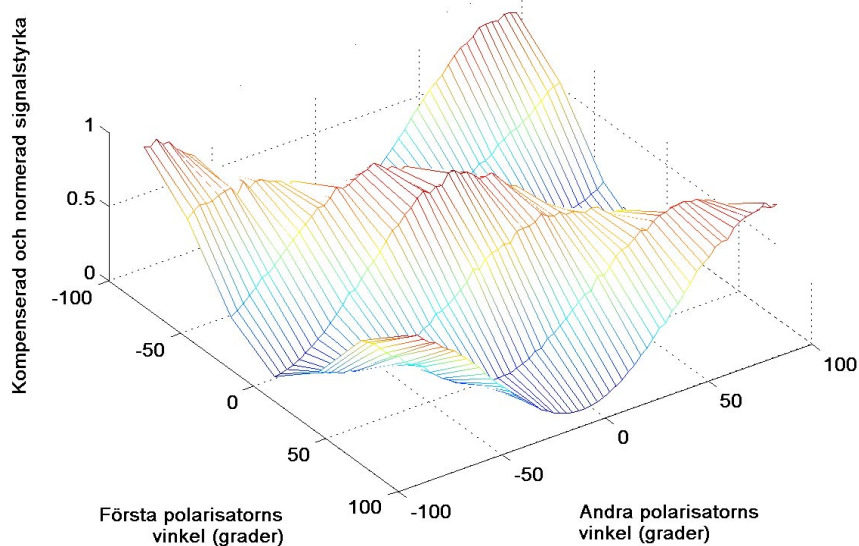
Figur B-2 Signalstyrka hos modulator F9 vid drivfält i +z-riktningen och olika vinklar på första och andra polarisatorn. Temperatur 10 °C.



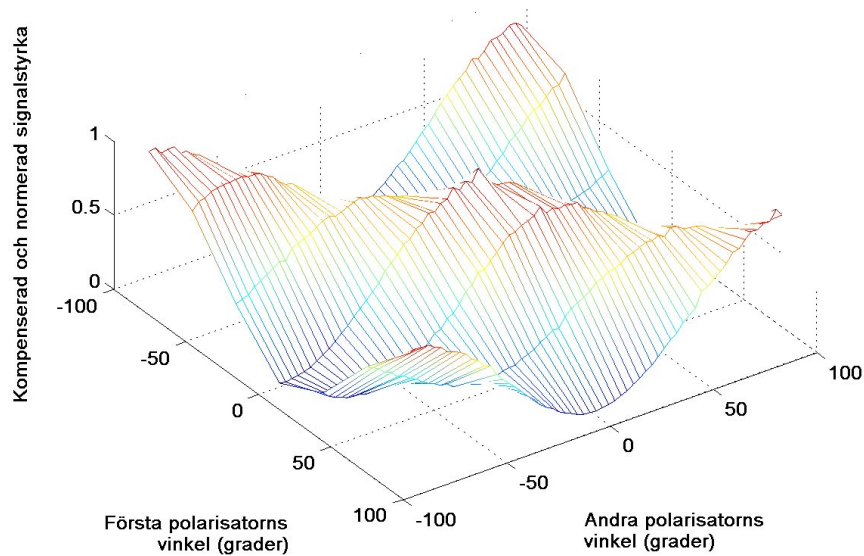
Figur B-3 Signalstyrka hos modulator F9 vid drivfält i -z-riktningen och olika vinklar på första och andra polarisatorn. Temperatur 10 °C.



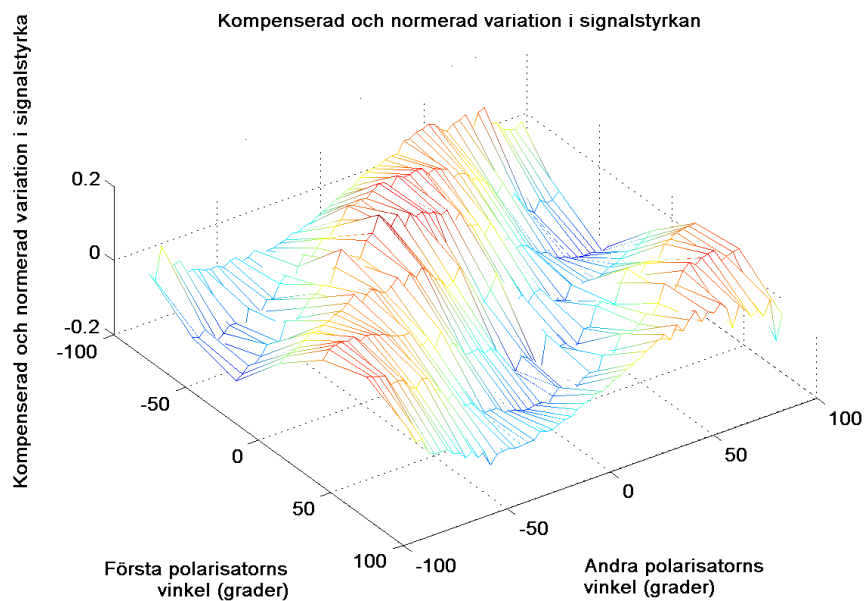
Figur B-4 Variation i signalstyrkan hos modulator F9. Variationen är störst i topparna och dalarna, vilket ofta är liktydigt med bra modulation. Temperatur 10 °C.



Figur B-5 Signalstyrka hos modulator CH1 vid drivfält i +z-riktningen och olika vinklar på första och andra polarisatorn. Temperatur 10 °C.



Figur B-6 Signalstyrka hos modulator CH1 vid drivfält i $-z$ -riktningen och olika vinklar på första och andra polarisatorn. Temperatur 10 °C.



Figur B-7 Variation i signalstyrkan hos modulator CH1. Variationen är störst i topparna och dalarna, vilket ofta är liktydigt med bra modulation. Notera att signalstyrkan rör sig inom ett mindre intervall än i figur B-4. Temperatur 10 °C.

Appendix C – MATLAB-modell av mätuppställningens och modulaterns optiska egenskaper

C.1 Modeller av de optiska komponenterna

De optiska komponenter som ingick i mätuppställningen var en polarisator, en vätskekristallmodulator och en polarisator till. Den första polarisatorn modellerades i själva verket som en rotator. I modellen har vi nämligen kontroll över hur strålningens polarisationstillstånd ser ut i första taget. Vätskekristallmodulatorn i sin tur modellerades som en vanlig fasplatta, med valbar vinkel för unika (långsamma) axeln. Den sista polarisatorn modellerades just som en polarisator. I modellerna användes jonesformalism för att beskriva hur två ortogonala komponenter hos den polariserade strålningen förändrades vid passage genom komponenterna. Här följer de tre modellerna i form av MATLAB-kod:

C.1.1 Modell av rotator (motsvarande första polarisatorn)

```
% Modell av hur en rotator påverkar elektromagnetisk strålning
% (två komponenter för den elektriska fältstyrkan).
%
% Låter de två komponenterna passera genom rotatorn och beräknar
% hur komponenterna ser ut efter.
%
% In: Ex (komplext tal)      Elektriska fältets komponent i x-led;
%                           det komplexa talet anger såväl amplitud
%                           som fas.
%      Ey (komplext tal)     Elektriska fältets komponent i y-led;
%                           det komplexa talet anger såväl amplitud
%                           som fas.
%      vinkel (reelt tal)    Vinkel (i grader) för hur stor rotationen
%                           ska vara. Riktningen från x-axeln till
%                           y-axeln är positiv.
%
% Ut: Ex (komplext tal)      Som ovan, fast modifierad av rotatorn.
%      Ey (komplext tal)     "
%
% Nivå: 2
%
% Underfunktion: dgr2rad (nivå 1)

function [Ex, Ey]=rotator(Ex, Ey, vinkel)

% Sätt samman komponenterna i en Jonesvektor.
Exy=[Ex; Ey];

% Omvandla vinkeln till radianer.
v_rad=dgr2rad(vinkel);

% Matris som roterar komponenterna.
R=[cos(v_rad) -sin(v_rad); sin(v_rad) cos(v_rad)];

% Utför hela rotationsproceduren.
Exy=R*Exy;

% Beräkna komponenterna efter rotationen.
Ex=Exy(1); Ey=Exy(2);
```


C.1.2 Modell av fasplatta (motsvarande vätskekristallmodulatore)

```
% Modell av hur en fasplatta (kvartsvågs-, halvågs- med
% flera) påverkar elektromagnetisk strålning (två komponenter
% för den elektriska fältstyrkan).
%
% Programmet simulerar en fasplatta som ger ett fastillskott
% för en viss riktning (vinkel). Polariserad strålning faller
% mot plattan och polarisationstillståndet efter plattan beräknas.
%
% Systemets koordinataxlar är ordnade så att ljuset färdas
% i z-riktningen, och sett i den riktningen så går
% x-axeln åt vänster och y-axeln uppåt. Rotationsvinkel
% i xy-planet anges från x-axeln och positivt åt y-axeln
% till. (Y-axeln har alltså vinkeln  $\pi/2$  radianer.)
%
% Fasplattan har en axel som ger ett fastillskott. Vinkeln för
% denna axel anges från x-axeln.
%
% Programmet använder Jones-formalism för strålningen och
% fasplattan.
%
% In:
% Ex_in    komplext tal    Elektriska fältets komponent i x-led;
%                               det komplexa talet anger såväl amplitud
%                               som fas.
% Ey_in    komplext tal    Elektriska fältets komponent i y-led;
%                               det komplexa talet anger såväl amplitud
%                               som fas.
% vinkel    reellt tal     Vinkel (i grader) för den axel som ger
%                               ett fastillskott. Anges från x-axeln åt
%                               y-axeln till.
% fas       reellt tal     Fastillskott (i radianer).
%
% Ut:
% Ex_ut    komplext tal    Som ovan, fast modifierad av fasplattan.
% Ey_ut    komplext tal    "
%
% Nivå: 2
%
% Underfunktion: dgr2rad (nivå 1)

function [Ex_ut, Ey_ut]=fasplatta(Ex_in, Ey_in, vinkel, fas)

% Sätt samman komponenterna i en Jonesvektor
Exy=[Ex_in; Ey_in];

% Omvandla vinkeln till radianer
v_rad=dgr2rad(vinkel);

% Matris som roterar komponenterna till det koordinatsystem
% vars x-axeln har samma riktning som fasplattans axel.
R_1=[cos(v_rad) sin(v_rad); -sin(v_rad) cos(v_rad)];

% Lägg på fastillskottet på den komponent som ligger längs
% fasplattans axel.
F=[exp(i*fas) 0; 0 1];

% Roterar tillbaka komponenten till ursprungliga koordinatsystemet.
R_2=[cos(v_rad) -sin(v_rad); sin(v_rad) cos(v_rad)];
```

```
% Utför hela fastilläggsproceduren.
Exy=R_2*F*R_1*Exy;

% Beräkna komposanternas efter fasändringen.
Ex_ut=Exy(1);
Ey_ut=Exy(2);
```

C.1.3 Modell av polarisator (motsvarande andra polarisatorn)

```
% Modell av hur en polarisator påverkar elektromagnetisk strålning
% (två komponenter för den elektriska fältstyrkan).
%
% Låter de två komponenterna passera genom polarisatorn och beräknar
% hur komponenterna ser ut efter.
%
% In: Ex (komplext tal)      Elektriska fältets komponent i x-led;
%                           det komplexa talet anger såväl amplitud
%                           som fas.
%      Ey (komplext tal)    Elektriska fältets komponent i y-led;
%                           det komplexa talet anger såväl amplitud
%                           som fas.
%      vinkel (reelt tal)   Vinkel (i grader) för den axel som
%                           släpper igenom strålningen. Anges från
%                           x-axeln åt y-axeln till.
%
% Ut: Ex (komplext tal)     Som ovan, fast modifierad av
%                           polarisatorn.
%      Ey (komplext tal)    "
%
% Nivå: 2
%
% Underfunktion: dgr2rad (nivå 1)

function [Ex, Ey]=polarisator(Ex, Ey, vinkel)

% Sätt samman komponenterna i en Jonesvektor.
Exy=[Ex; Ey];

% Omvandla vinkeln till radianer.
v_rad=dgr2rad(vinkel);

% Matris som roterar komponenterna till det koordinatsystem
% vars x-axeln har samma riktning som polarisatorns axel.
R_1=[cos(v_rad) sin(v_rad); -sin(v_rad) cos(v_rad)];

% Släpp igenom den komponent som ligger längs polarisatorns axel.
P=[1 0; 0 0];

% Roterar tillbaka komponenten till ursprungliga koordinatsystemet.
R_2=[cos(v_rad) -sin(v_rad); sin(v_rad) cos(v_rad)];

% Utför hela polarisationsproceduren.
Exy=R_2*P*R_1*Exy;

% Beräkna komponenterna efter polarisationen.
Ex=Exy(1);
Ey=Exy(2);
```

C.2 Beräkning av kvadratavvikelser mellan mätdata och modell-data

Med hjälp av modellerna för polarisatorerna och vätskekristallmodulatore kan vi beräkna flödet hos den strålning som passerar genom dem. Dessa modelldata jämfördes punkt för punkt med mätdata från mätuppställningen. Jämförelsen gjordes i själva verket mot mätdata som hade kompenserats för flödesvariationer (med hjälp av referensdetektorns värden) och sedan normerats (för att komma i samma storleksordning som modelldata). Avvikelsen i flödet mellan modelldata och mätdata kvadrerades och utgjorde ett mått på hur bra överensstämmelsen var. Programmet beräknade både den totala kvadratavvikelsen för alla mätpunkter, och också ett medelvärde per punkt, eftersom antalet mätpunkter kan variera i olika mätningar.

```
% Jämför en uppsättning mätdata med motsvarande uppsättning
% modelldata och beräknar avvikelserna i kvadrat. Räknar dels
% ut summan av alla avvikelser, dels avvikelsens medelvärde.
%
% In:
%   matdata_kn    Fil med kompenserad och normerad mätdata.
%                 Varje rad innehåller
%                 - vinkel för första polarisatorn
%                 - vinkel för andra polarisatorn
%                 - kompenserad och normerad detektorspänning
%                   (irradiations) för ett drivfält i +z-led
%                 - kompenserad och normerad detektorspänning
%                   (irradiations) för ett drivfält i -z-led
%
%   skalfaktor    Tal som den modellbaserade irradiationsen ska
%                 skalas upp med innan jämförelsen mot de
%                 uppmätta (och kompenserade och normerade)
%                 irradiationserna.
%
%   vk_vinkel_pz  Tal för vinkeln för den axel i vätskekristallen
%                 som har störst brytningsindex, antas gälla när
%                 drivfältet går i +z-led.
%
%   vk_vinkel_mz  Samma som föregående, med skillnaden att drivfältet
%                 går i -z-led.
%
%   n_diff_d      Produkten av indexskillnad och skiktjocklek för
%                 vätskekristallen (i µm).
%
%   vaglangd      Strålningens våglängd (i µm).
%
% Ut:
%   kvav_tot      Sammanlagda kvadratavvikelserna mellan modellerade
%                 irradiationser och uppmätta irradiationser. Irradiationser
%                 för +z-led och -z-led jämförs separat och alla
%                 kvadratavvikelser läggs samman.
%
%   kvav_medel    Sammanlagda kvadratavvikelserna delade med antal
%                 mätpunkter. (Åtskillnad görs mellan mätpunkter
%                 för drivfält i +z-led och -z-led.)
%
% Subfunktioner:
%   komb_ro_va_po (nivå 4)
%   irradiations (nivå 1)
%
% Nivå: 5
```

```

function [kvav_tot,kvav_medel]=avvikelse_mat_o_modelldata(matdata_kn,
    ... skalfaktor,vk_vinkel_pz,vk_vinkel_mz,n_diff_d,vaglangd)

% Använd modellen för att beräkna irradiansen efter modulatore.
% Använd samma vinklar för polarisator 1 och 2 som anges i
% mätdatafilen.

for c_p1_p2_vinklar=1:size(matdata_kn,1)

    % Vinkeln för polarisator 1 och 2.
    p1_vinkel=matdata_kn(c_p1_p2_vinklar,1);
    p2_vinkel=matdata_kn(c_p1_p2_vinklar,2);

    % Fallet med drivfält i +z-led.
    % Fältkomposanterna efter modulatore enligt modellen.
    [Ex_pz Ey_pz]=komb_ro_va_po(1, 0, p1_vinkel, ...
                                vk_vinkel_pz, n_diff_d, 1, ...
                                vaglangd, p2_vinkel, [0 0 0]);

    % Irradiansen efter modulatore.
    irradians_pz=irradians(Ex_pz,Ey_pz);
    % Skala upp irradiansen med skalfaktorn.
    irradians_pz_sk(c_p1_p2_vinklar,1)=irradians_pz*skalfaktor;

    % Fallet med drivfält i -z-led.
    % Fältkomposanterna efter modulatore enligt modellen.
    [Ex_mz Ey_mz]=komb_ro_va_po(1, 0, p1_vinkel, ...
                                vk_vinkel_mz, n_diff_d, 1, ...
                                vaglangd, p2_vinkel, [0 0 0]);

    % Irradiansen efter modulatore.
    irradians_mz=irradians(Ex_mz,Ey_mz);
    % Skala upp irradiansen med skalfaktorn.
    irradians_mz_sk(c_p1_p2_vinklar,1)=irradians_mz*skalfaktor;

end

% Jämför med mätkurvan då drivfältet går i +z-led och
% beräkna sammanlagda kvadratavvikelsen för denna kurva.
kvav_pz=sum(kvadratavvikelser(irradians_pz_sk,matdata_kn(:,3)));

% Jämför med mätkurvan då drivfältet går i -z-led och
% beräkna sammanlagda kvadratavvikelsen för denna kurva.
kvav_mz=sum(kvadratavvikelser(irradians_mz_sk,matdata_kn(:,4)));

% Totala kvadratavvikelsen.
kvav_tot=kvav_pz+kvav_mz;

% Kvadratavvikelsen i medeltal.
kvav_medel=kvav_tot/(size(matdata_kn,1)*2);

```

C.3 Bestämning av parametrar som ger bäst överensstämmelse med mätdata

Den parameter som vi allra helst vill bestämma är vinkeln för unika (långsamma) axeln i vätskekristallmodulatore. Dels för drivfält i +z-riktningen, dels för -z-riktningen. Men vi är också osäkra på vätskekristallskiktets tjocklek och skillnaden i brytningsindex mellan långsamma och snabba axeln. Därför varierar vi alla dessa parametrar i modellen, och resultatet jämförs med mätdata. När överensstämmelsen är som bäst (minsta kvadratavvikelse) anser vi att vi funnit de riktiga värdena på de efterfrågade parametrarna.

C.3.1 Bestämning av värden på unika (långsamma) axeln

```
% Varierar parametrar för vätskekristallmodulatore för att
% se vilka värden som ger bäst överensstämmelse med mätdata.
% Med bästa överensstämmelse menas att kvadratavvikelsena
% mellan modelldata och mätdata är så små som möjligt.
% Meddelar vilka värden på parametrarna som ger bäst
% överensstämmelse. Parametrarna är skalfaktor, vinkel i
% vätskekristallen vid positivt respektive negativt drivfält
% och produkten av brytningsindexskillnad och vätskekristallens
% tjocklek.
% Ritar diagram som visar hur överensstämmelsen påverkas när
% parametrarna varieras och ritar till sist in den bästa lösningen
% i samma diagram som mätdata.
%
% Mätdata som används kommer från
% 040629_vkm_f9_axlar_22c_30v_2khz_mod.txt
% där felaktiga data från fjärde mätningen är borttagna.
%
% In:
% skalfaktorer      Vektor med tal som den modellbaserade irradiansen
%                   ska skalas upp med innan jämförelsen mot de
%                   uppmätta (och kompenserade och normerade)
%                   irradianserna.
% vk_vinklar_pz      Vektor med tal för olika orienteringar för den
%                   axel i vätskekristallen som har störst
%                   brytningsindex, antas gälla när drivfältet går i
%                   positiv z-riktning.
% vk_vinklar_mz      Samma som föregående, med skillnaden att
%                   drivfältet går i negativ z-riktning.
% n_diff_d           Vektor med tal för produkten av indexskillnad och
%                   skiktthjocklek för vätskekristallen (i um).
% vaglangd           Tal för strålningens våglängd (i um).
%
% Underfunktioner:
% kn_matdata (nivå 1)
% avvikelse_mat_o_modelldata (nivå 5)
% finn_i_fyrdim (nivå 1)
% rita_mat_o_modelldata (nivå 5)
%
% Nivå: 6
```

```

function
anpassa_mot_040629_3(skalfaktorer,vk_vinklar_pz,vk_vinklar_mz, ...
                    n_diff_d,vaglangd)

% Ta fram mätdata.
start=pwd;
cd('c:/filer_c/matdata/2004');
matdata=load('040629_vkm_f9_axlar_22c_30v_2khz_mod.txt');
cd(start)

% Kompensera och normera mätdata.
matdata_kn=kn_matdata(matdata,0.8E-3,4.9E-3);
modsp_pz_kn=matdata_kn(:,3);
modsp_mz_kn=matdata_kn(:,4);

% Initiera flerdimensionell matris med resultat från användning av
% modellen.
%
% De olika dimensionerna ska vara
% -skalfaktor
% -vinkel för vätskekristallen för drivfält i +z-led
% -vinkel för vätskekristallen för drivfält i -z-led
% -produkten av indexskillnad och tjocklek för vätskekristallen.
%
% Elementet som lagras i en viss position ska vara summan av
% kvadratavvikelserna mellan modelldata och mätdata för
% drivfältet i ena och andra riktnigen.

resultat=zeros(length(skalfaktorer),length(vk_vinklar_pz), ...
               length(vk_vinklar_mz),length(n_diff_d));

% Irradiansvärdet måste skalas upp med någon faktor för att
% komma i nivå med de uppmätta (och kompenserade och
% normerade) värdena. Prova med olika värden för att hitta
% det bästa.

for c_skalfaktorer=1:length(skalfaktorer)

    % Prova med olika vinklar för axeln med största
    % brytningsindex då drivfältet går i +z-led.

    for c_vk_vinklar_pz=1:length(vk_vinklar_pz)

        % Prova med olika vinklar för axeln med största
        % brytningsindex då drivfältet går i -z-led.

        for c_vk_vinklar_mz=1:length(vk_vinklar_mz)

            % Prova med olika värden för produkten av
            % brytningsindex och tjocklek.

            for c_n_diff_d=1:length(n_diff_d)

                % Beräkna avvikelserna mellan modelldata och
                % mätdata. Lagra kvadraten på avvikelserna mellan
                % respektive irradianser.

                [kvav_tot kvav_medel]=avvikelse_mat_o_modelldata(...
                    matdata_kn, skalfaktorer(c_skalfaktorer),...
                    vk_vinklar_pz(c_vk_vinklar_pz),...
                    vk_vinklar_mz(c_vk_vinklar_mz),...

```

```

        n_diff_d(c_n_diff_d), vaglangd);

% Lagra resultaten

resultat(c_skalfaktorer,c_vk_vinklar_pz,...
        c_vk_vinklar_mz,c_n_diff_d)=kvav_tot;

    end
end
end
end

% Leta reda på det fall - eller de fall - som gav bästa
% överensstämmelse och presentera presentera värdet för
% de olika parametrarna.

% Ta fram minsta summan av kvadrataavvikelserna (bästa
% överensstämmelse).
kvav_pz_mz_min=min(min(min(min(resultat))));

% Hitta index för detta tals position i resultatmatrisen.
index_basta=finn_i_fyrdim(kvav_pz_mz_min,resultat);

% Presentera värdet på parametrarna för det eller de
% fall som gav bäst överensstämmelse.
% Rita diagram för kvadrataavvikelsen som funktion av
% olika parametrar.
% Rita in modelldata i samma diagram som mätdata.

for c_basta=1:size(index_basta,1)

    % Presentera värden på parametrarna som gav bästa
    % överensstämmelse.

    disp(['Bästa överensstämmelse ' num2str(c_basta) ' (av ' ...
        num2str(size(index_basta,1)) ') .']])
    disp('Kvadrataavvikelse totalt och medelvärde:')
    disp(['kvadrataavv_pz_mz_min = ' num2str(kvav_pz_mz_min)])
    disp(['medelvärde ' num2str(kvav_pz_mz_min/size(matdata_kn,1))])
    disp('Parametrar:')
    disp(['skalfaktor = ' ...
        num2str(skalfaktorer(index_basta(c_basta,1))) ...
        ', vk_vinkel_pz = ' ...
        num2str(vk_vinklar_pz(index_basta(c_basta,2))) ...
        ', vk_vinkel_mz = ' ...
        num2str(vk_vinklar_mz(index_basta(c_basta,3))) ...
        ', n_diff_d = ' ...
        num2str(n_diff_d(index_basta(c_basta,4)))])
    disp(' ')

    % Rita diagram med kvadrataavvikelsen som funktion av
    % skalfaktor
    % med övriga parametrar i sitt bästa värde.

    figure
    plot(skalfaktorer,resultat(:,index_basta(c_basta,2),...
        index_basta(c_basta,3),index_basta(c_basta,4)),'+-')
    xlabel('skalfaktorer'), ylabel('kvadrataavvikelse')

    % Rita diagram med kvadrataavvikelsen som funktion av
    % vätskekristallvinkel vid positivt drivfält

```

```

% med övriga parametrar i sitt bästa värde.

figure
plot(vk_vinklar_pz,resultat(index_basta(c_basta,1),...
    :,index_basta(c_basta,3),index_basta(c_basta,4)),'+-')
xlabel('vk\_vinklar\_pz'), ylabel('kvadrataavvikelse')

% Rita diagram med kvadrataavvikelsen som funktion av
% vätskekristallvinkel vid negativt drivfält
% med övriga parametrar i sitt bästa värde.

% Flytta över modelldata från tredje till första dimensionen
% för att kunna rita.

figure
plot(vk_vinklar_mz,squeeze(resultat(index_basta(c_basta,1),...
    index_basta(c_basta,2),:,index_basta(c_basta,4))),'+-')
xlabel('vk\_vinklar\_mz'), ylabel('kvadrataavvikelse')

% Rita diagram med kvadrataavvikelsen som funktion av
% produkten av brytningsindexskillnad och tjocklek i
% vätskekristallen
% med övriga parametrar i sitt bästa värde.

% Flytta över modelldata från fjärde till första dimensionen
% för att kunna rita.

figure
plot(n_diff_d,squeeze(resultat(index_basta(c_basta,1),...
    index_basta(c_basta,2),index_basta(c_basta,3),:)),'+-')
xlabel('n\_diff\_d'), ylabel('kvadrataavvikelse')

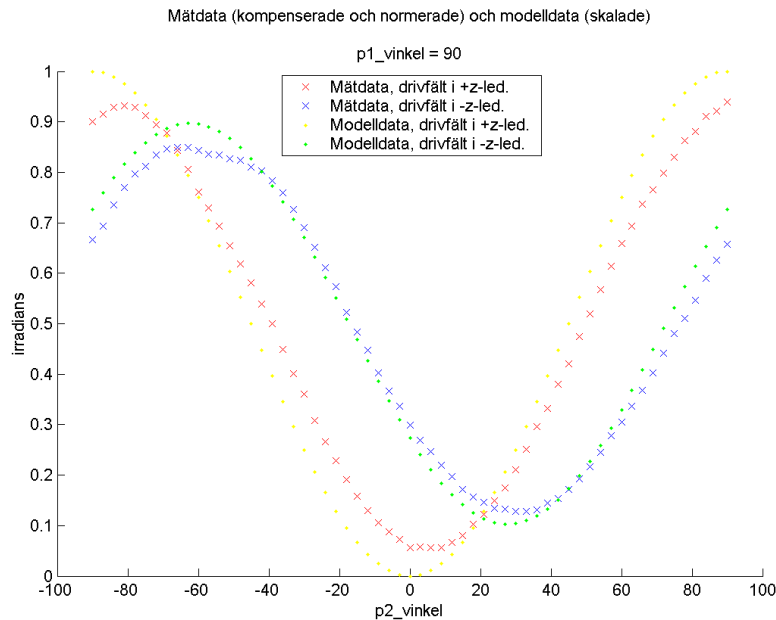
% Rita modelldata (vid bästa överensstämmelse) och
% mätdata i samma diagram.

rita_mat_o_modelldata(matdata_kn,[61 61 61 61],...
    skalfaktorer(index_basta(c_basta,1)),...
    vk_vinklar_pz(index_basta(c_basta,2)),...
    vk_vinklar_mz(index_basta(c_basta,3)),...
    n_diff_d(index_basta(c_basta,4)),...
    1,vaglangd)
end

```


C.3.2 Exempel på anpassning av modelldata till mätdata

I figur C-1 ser vi ett exempel på mätdata tillsammans med modelldata för optimala värden på unika (långsamma) axelns vinkel. Första polarisatorn har hela tiden vinkeln 90° (motsvarande 0° relativt borstningsriktningen) medan andra polarisatorn rör sig till olika vinklar mellan -90° och 90° (motsvarande 0° till 180° relativt borstningsriktningen). De röda kryssen visar uppmätt flöde när drivfältet går i $+z$ -riktningen, och de blå kryssen gäller när drivfältet går i $-z$ -riktningen. MATLAB-modellen har räknat ut motsvarande kurvor genom att använda sig av optimala värden på (1) unika axeln för de två drivfältsriktningarna, (2) vätskekristallskiktets tjocklek och (3) skillnaden i brytningsindex mellan långsamma och snabba axeln. De gula punkterna är framräknat flöde för drivfält i $+z$ -riktningen, och de gröna punkterna motsvarande för $-z$ -riktningen. Modelldata ansluter sig till mätdata på bästa möjliga sätt, vilket också kan ses i figuren.

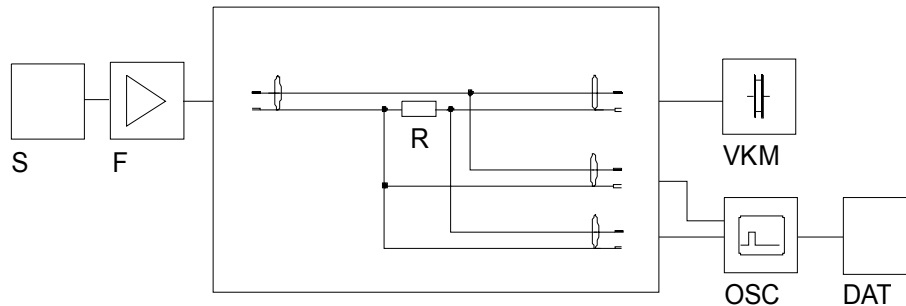


Figur C-1 Mätdata från modulator F9 från båda modulationsfaserna och där första polarisatorn har vinkeln 90° och andra polarisatorn sveper över ett intervall på 180° . I figuren syns också data som modellen producerar för ett optimalt val av vinkel för unika axeln, skillnad i brytningsindex och vätskekristallskiktets tjocklek.

Appendix D – Mätuppställning för elektriska egenskaper

Mätuppställning och utrustning

Figur D-1 visar principen för mätuppställningen.



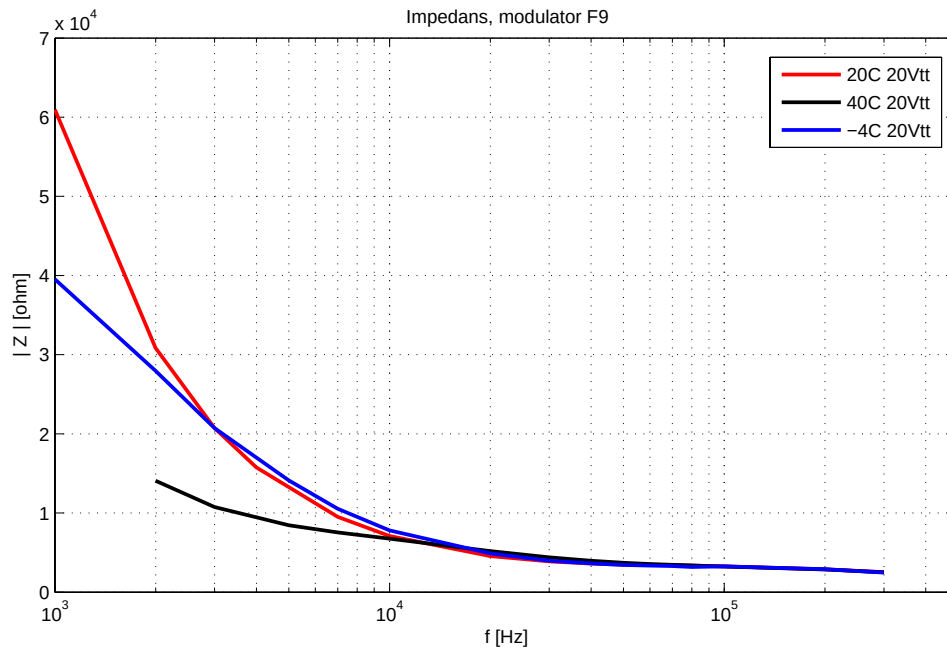
Figur D-1 Mätuppställning för modulatorernas elektriska egenskaper.

Följande komponenter användes:

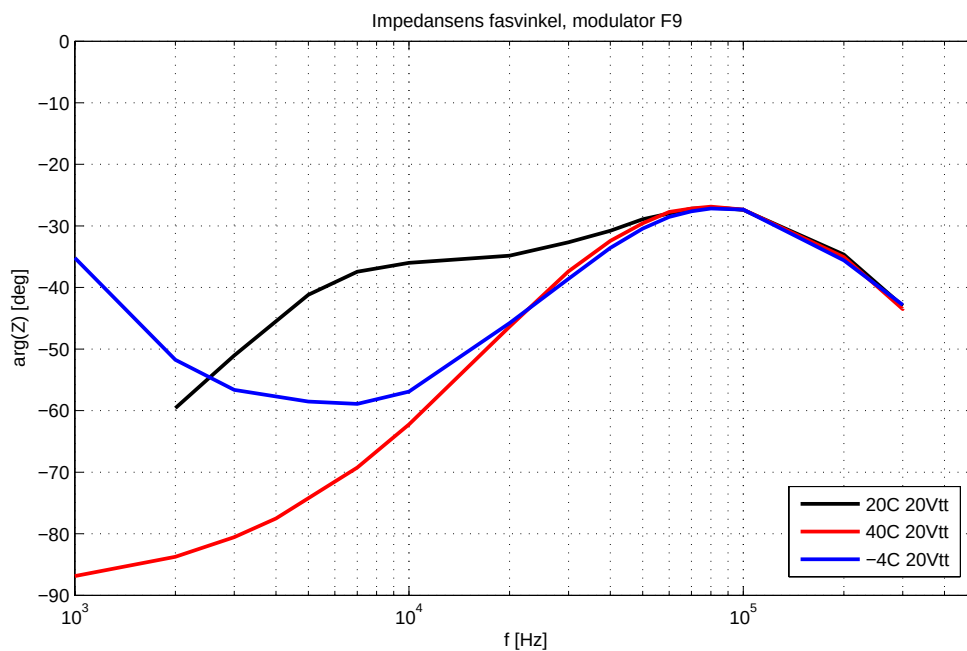
- S* – *signalgenerator* För generering av önskade kurvformer användes en funktionsgenerator (THURLBY THANDAR INSTRUMENTS TG1010).
- F* – *förstärkare* En förstärkare (FLC Electronics F20A) som är speciellt konstruerad för att driva vätskekristallmodulatorer med hög kapacitans.
- R* – *mätmotstånd* Strömmen till vätskekristallmodulatorn mättes med ett motstånd (nominellt 10Ω, uppmätt 10,152 Ω).
- VKM* – *vätskekristallmodulator* Se föregående appendix A.
- OSC* – *oscilloskop* Oscilloskopet (Tektronix TDS210) användes för att registrera ström, spänning och detektorsignal. Styrningen av datainsamlingen gjordes med en LabView-applikation.
- DAT* – *dator* med datainsamlingsapplikation skriven i LabView användes för styrning av mätningarna och för datainsamlingen.

Appendix E – Modulatorns elektriska egenskaper

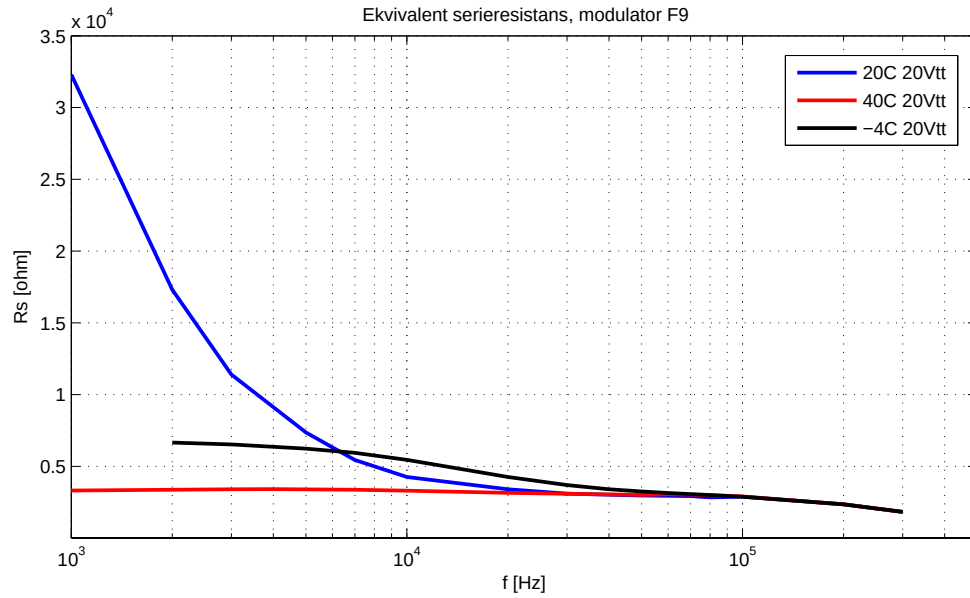
Elektriska egenskaper beräknade från mätdata



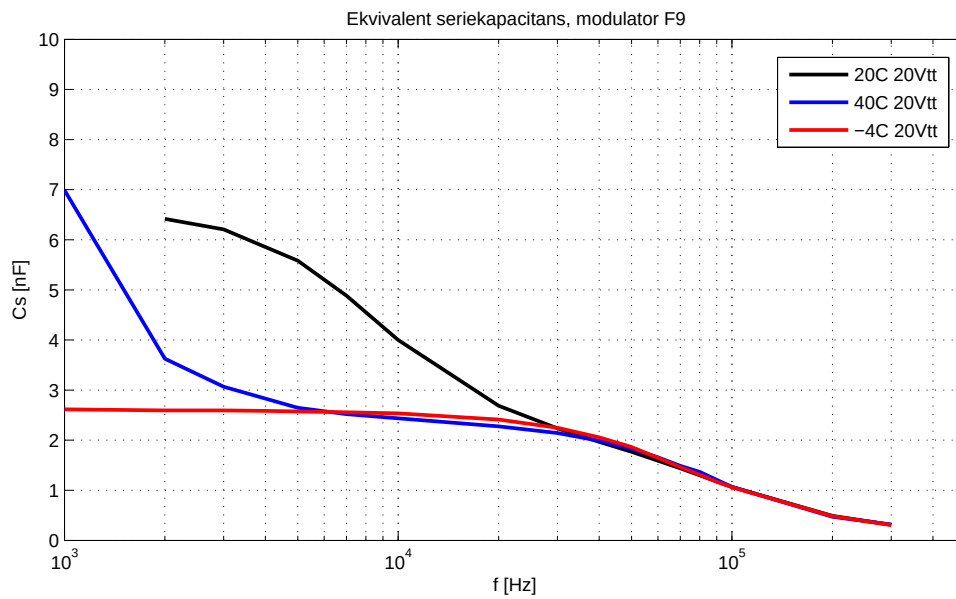
Figur E-1 Impedansens absolutbelopp beräknad vid tre temperaturer för modulator F9.



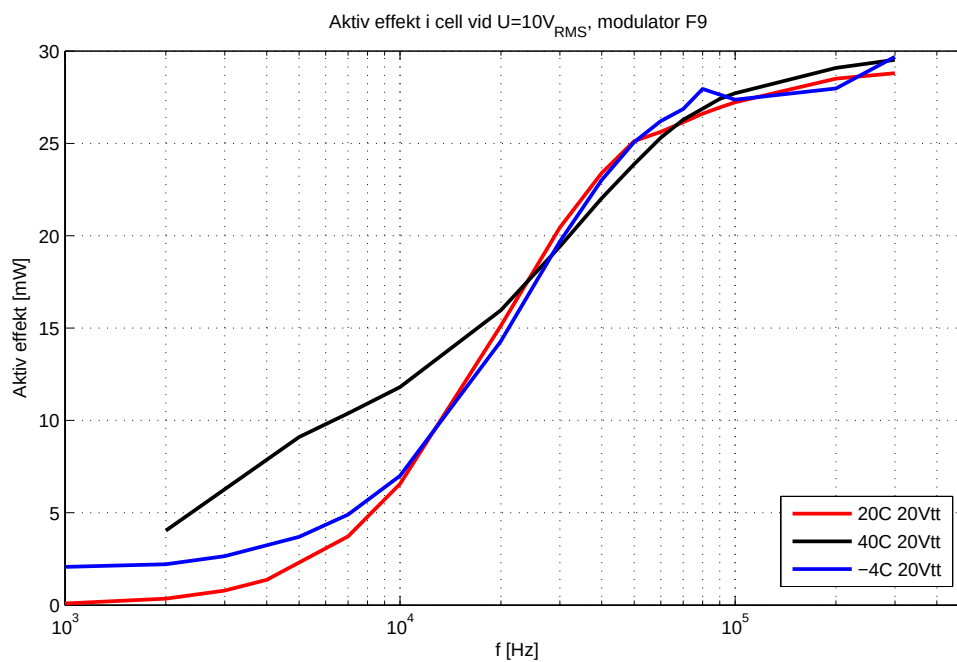
Figur E-2 Impedansens fasvinkel beräknad vid tre temperaturer för modulator F9.



Figur E-3 Ekvivalent serieresistans beräknad vid tre temperaturer för modulator F9.



Figur E-4 Ekvivalent seriekapacitans beräknad vid tre temperaturer för modulator F9.



Figur E-5 Beräknad aktiv effekt utvecklad i modulator F9 vid en pålagd spänning om $10 V_{RMS}$.