

HANS JONSSON



FOI är en huvudsakligen uppdragsfinansierad myndighet under Försvarsdepartementet. Kärnverksamheten är forskning, metod- och teknikutveckling till nytta för försvar och säkerhet. Organisationen har cirka 1250 anställda varav ungefär 900 är forskare. Detta gör organisationen till Sveriges största forskningsinstitut. FOI ger kunderna tillgång till ledande expertis inom ett stort antal tillämpningsområden såsom säkerhetspolitiska studier och analyser inom försvar och säkerhet, bedömning av olika typer av hot, system för ledning och hantering av kriser, skydd mot och hantering av farliga ämnen, IT-säkerhet och nya sensorers möjligheter.

Hans Jonsson

Fiberoptisk kabelsensor för perimeterövervakning

Utgivare FOI - Totalförsvarets forskningsinstitut Sensorteknik Box 1165 581 11 Linköping	Rapportnummer, ISRN FOI-R--2151--SE	Klassificering Teknisk rapport
	Forskningsområde 4. Ledning, informationsteknik och sensorer	
	Månad, år December 2006	Projektnummer E 3274
	Delområde 42 Spaningssensorer	
	Delområde 2	
Författare/redaktör Hans Jonsson	Projektledare Fredrik Kullander	
	Godkänd av Lena Klasén	
	Uppdragsgivare/kundbeteckning FMV	
	Tekniskt och/eller vetenskapligt ansvarig Fredrik Kullander	
Rapportens titel Fiberoptisk kabelsensor för perimeterövervakning		
Sammanfattning <p>Både militärt och civilt finns det behov av att kostnadseffektivt kunna övervaka stora områden utan patrullerande vaktpersonal. Den sensor som beskrivs i detta examensarbete är tänkt att utgöra ett robust alternativ till traditionella övervakningssystem eftersom tekniken är billig och kan täcka in stora avstånd.</p> <p>Sensorn bygger på polarisation och det faktum att den i en monomodfiber påverkas som funktion av yttre mekanisk last och geometriska förändringar. Med hjälp av flera test signaler som sänds ut i fibern med olika polarisation kan tillräckligt mycket information insamlas för att fullständigt beskriva fiberns påverkan på polarisationen. Genom att jämföra flera på varandra efterföljande beskrivningar kan den yttre störningen kvantifieras. En polarimetrisk signalbehandling som utvinnet denna information har formulerats i rapporten.</p> <p>En laborationsuppställning av sensorn har tagits fram och provats. En karaktärisering av de i sensorn ingående komponenterna har gjorts och presenteras i rapporten. Sensorns funktion testades med dels kontrollerade mekaniska påfrestningar och dels genom ett fältförsök.</p> <p>Det står klart att det är möjligt att följa förändringen av de tre testsignalernas polarisationsläge och därmed beskriva fiberns påverkan på polarisationen med hjälp av en Muellermatris.</p>		
Nyckelord marksensor, kabelsensor, sensormät, polarisation, Poincaréfär, Muellermatris, fasmodulator, fiberoptisk sensor		
Övriga bibliografiska uppgifter	Språk Svenska	
ISSN 1650-1942	Antal sidor: 63 s.	
Distribution enligt missiv	Pris: Enligt prislista	

Issuing organization FOI – Swedish Defence Research Agency Sensor Technology P.O. Box 1165 SE-581 11 Linköping	Report number, ISRN FOI-R--2151--SE	Report type Technical report
	Programme Areas 4. C4ISTAR	
	Month year December 2006	Project no. E 3274
	Subcategories 42 Above water Surveillance, Target acquisition and Reconnaissance	
	Subcategories 2	
Author/s (editor/s) Hans Jonsson	Project manager Fredrik Kullander	
	Approved by Lena Klasén	
	Sponsoring agency Defence Material Administration	
	Scientifically and technically responsible Fredrik Kullander	
Report title (In translation) Fibre optic cable sensor for perimeter surveillance		
Abstract <p>In both civil and military applications it is important to minimize the cost of surveillance and to cover large areas without patrolling. The sensor described in this thesis is designed to be a robust alternative to traditional surveillance systems by both being inexpensive and able to cover considerable distances.</p> <p>The sensor is using the change of polarization as a measure of the external mechanical and geometrical perturbation on a standard optical fiber. Multiple test signals with different polarization are used to collect enough information to fully describe the fibers effect on the state of polarization. By comparing several of these descriptions the external perturbation can be quantified. The polarimetric signal processing to extract this information is formulated in this thesis.</p> <p>A laboratory set up of the sensor has been evaluated. A characterization of the components used in the sensor has been made and the results are presented in the report. The sensor was tested tested both with a controlled mechanical strain and in a field trial.</p> <p>After evaluating the results it is evident that the evolution of the test signals polarization state can be monitored and that the Mueller matrix describing the fibers effect on the state of polarization can be formulated.</p>		
Keywords ground sensor, cable sensor, sensor network, polarisation, Poincaré sphere, Mueller matrix, phase modulator, fibre optic sensor		
Further bibliographic information	Language Swedish	
ISSN 1650-1942	Pages 63 p.	
	Price acc. to pricelist	

Förord

Den här rapporten är resultatet av ett examensarbete som har utförts vid Totalförsvarets Forskningsinstitut (FOI) på avdelningen för Sensorteknik i Linköping under hösten 2005. Claes Laurent och Fredrik Kullander vid Sensorteknik har handlett examensarbetet och Igor Zozoulenko vid Linköpings Universitet campus Norrköping har varit examinator. Examensarbetet finns även utgivet på universitet, dock ej i tryck, med dokumentreferensnummer LITH-ITN-ED-EX--06/006—SE.

Ett tidigare examensarbete har syftat till att utreda användbarheten av en fiberoptisk kabelsensor för att bevaka områden enligt militära intressen. Detta arbete har även mynnat ut i en teoretisk lösning som ännu inte testats kvalitativt. Detta vill FOI nu ha hjälp med.

Claes Vahlberg och Stig Gruffman har under examensarbetets gång bistått med ovärderlig hjälp med praktiska detaljer.

Ett stort tack riktas till Lars Stålberg vid Försvarets Materielverk (FMV) för det ekonomiska stöd som getts projektet.

Innehållsförteckning

Förord	4
Innehållsförteckning	5
Figurförteckning.....	7
Inledning.....	8
Inledning.....	8
1.1 <i>Bakgrund.....</i>	8
1.2 <i>Problemformulering och syfte.....</i>	9
1.3 <i>Totalförsvarets Forskningsinstitut (FOI)</i>	9
1.4 <i>Rapportens disposition.....</i>	10
2 Teori	11
2.1 <i>Polarisation</i>	11
2.1.1 <i>Malus lag.....</i>	12
2.2 <i>Dubbelbrytning.....</i>	13
2.3 <i>Elektrooptisk effekt</i>	14
2.4 <i>Stokes vektor</i>	14
2.5 <i>Poincarésfären.....</i>	16
2.5.1 <i>Transformationer av polarisationen</i>	16
2.5.2 <i>Muellermatriser.....</i>	18
2.6 <i>Experimentell bestämning av Stokes vektor</i>	18
2.7 <i>Fiberoptisk kabel</i>	20
2.7.1 <i>Dubbelbrytande effekter hos monomodfiber.....</i>	20
2.7.2 <i>Polarisationsbevarande fiber</i>	21
2.7.3 <i>Polariserande fiber.....</i>	22
2.8 <i>Teori bakom kabelsensorn</i>	22
2.8.1 <i>Tidigare arbete</i>	23
2.8.2 <i>Flera testsignaler</i>	23
2.8.3 <i>Tidsmultiplexering.....</i>	24
2.8.4 <i>Förändringen hos fiberns påverkan.....</i>	24
2.9 <i>Examensarbetets innehåll</i>	24
3 Kabelsensorns uppbyggnad	25
3.1 <i>Laser.....</i>	26
3.2 <i>Modulator</i>	27
3.2.1 <i>Polarisationsmodulator</i>	28
3.2.2 <i>Tre polarisationslägen.....</i>	29
3.3 <i>Sensorfiber.....</i>	31
3.4 <i>Spegel.....</i>	31
3.5 <i>Detektor.....</i>	31
3.5.1 <i>Polarisationsfilter</i>	32
4 Polarimetrisk signalbehandling.....	33
4.1 <i>Bestämning av de inkommande polarisationstillstånden.....</i>	33
4.2 <i>Fiberns påverkan på polarisationsläget.....</i>	35
4.3 <i>En metod för att kvantifiera förändringen.....</i>	36

4.3.1	Diskontinuiteter	37
4.4	Verifiering av signalbehandlingen.....	37
4.4.1	Detektion av en mekanisk störning.....	37
5	Mätinsamlingssystem	39
5.1	Signalanpassning.....	39
5.2	Datorstödd mätinsamling.....	40
5.2.1	Styrning av mätningen.....	40
6	Mätningar	43
6.1	Karaktärisering av modulatern	43
6.1.1	Anslutningar till modulatern	43
6.1.2	Problem med modulaterns kontakter	43
6.1.3	Experimentell bestämning av utgående polarisationslägen	44
6.1.4	Slutsatser av modulaterns karaktäristik	45
6.2	Mätning av optisk dämpning i kabelsensorn.....	47
6.2.1	Fiberanslutning	47
6.2.2	Fiberoptisk kopplare	48
6.2.3	Modulator.....	48
6.2.4	Spegel	49
6.2.5	Detektor.....	49
6.2.6	Slutlig dämpning i hela kabelsensorn	50
6.2.7	Slutsatser av optisk dämpning.....	51
6.3	Mätningar med hela kabelsensorn.....	52
6.3.1	Referens för polarisationsläget.....	52
6.3.2	Periodisk störning på fibern	52
6.3.3	Mätresultat med periodisk störning.....	53
6.3.4	Polariserande effekter i modulatern.....	54
6.3.5	Slutsatser av mätningar med kabelsensor	54
6.4	Slutsatser av genomförda mätningar.....	55
7	Ortogonal detektion	56
7.1	Polarisationsdelare	56
7.2	Mätningar med ortogonal detektion	57
7.2.1	Test av den matematiska modellen	57
7.2.2	Mätning med en mindre mekanisk störning	58
7.2.3	Frekvensinnehåll.....	59
7.3	Fältprov.....	60
8	Slutsatser.....	62
8.1	Framtida arbete	62
9	Referenser.....	63

Figurförteckning

Figur 1.1 Gränsbevakning är ett användningsområde för en fiberoptisk sensor.....	8
Figur 2.1 Linjärpolariserat ljus.....	11
Figur 2.2 Cirkulärpolariserat ljus	12
Figur 2.3 En dubbelbrytande kristall skapar två olika bilder	13
Figur 2.4 Poincarésfären	16
Figur 2.5 Polarisator och dubbelbrytning kan tolkas som projicering respektive rotation	17
Figur 2.6 Transformation av ett polarisationstillstånd genom fasförskjutning	17
Figur 2.7 Bestämning av S_1 -komponent.....	19
Figur 2.8 Bestämning av S_2 -komponent.....	19
Figur 2.9 Bestämning av S_3 -komponent	19
Figur 2.10 Tvärsnitt av en fiberoptisk kabel.....	20
Figur 2.11 Modell av en kort respektive en lång fiber	21
Figur 2.12 Panda och Bow-tie.....	22
Figur 2.13 Tre ortogonala testsignaler skapas genom rotation runt en axel	23
Figur 3.1 Schematisk beskrivning av kabelsensorn	25
Figur 3.2 Modulation under en period.....	26
Figur 3.3 Halvledarlasern är ansluten via vanlig monomodfiber	27
Figur 3.4 Litiumniobat ($LiNbO_3$) har en anisotrop förändring av brytningsindex	28
Figur 3.5 Modulatorens inverkan kan modelleras som en rotation kring S_1	30
Figur 4.1 Fiberns inverkan på polarisationsläget.....	35
Figur 4.2 En dubbelbrytning med varierande orientering har olika påverkan på testsignalerna.....	37
Figur 5.1 En period av insignalen till detektorn	40
Figur 5.2 Mätinsamlingssystemets uppkoppling	41
Figur 5.3 Datasamlingen synkroniseras med hjälp av en extern klocksignal	42
Figur 6.1 Modulatorens anslutning skall vara linjerade med den långsamma axeln	44
Figur 6.2 Exempel på tre olika polarisationslägen skapade av modulatorens.....	45
Figur 6.3 Schematisk bild över fasförskjutningsdelen i modulatorens	45
Figur 6.4 Laborationsuppkoppling med 1 km sensorfiber	47
Figur 6.5 FC-kontakt	47
Figur 6.6 Lika delande polarisationsbevarande kopplare.....	48
Figur 6.7 Montage av modulatorens.....	49
Figur 6.8 Optisk bänk med inpassat polarisationsfilter.....	50
Figur 6.9 Schematisk bild av laborationsuppkopplingen	50
Figur 6.10 En elmotor tillsammans med en sinusgenerator skapar en periodisk böjning på fibern...52	52
Figur 6.11 De nio projektionerna under en sekund.....	53
Figur 7.1 Kontakterad polarisationsdelare.....	56
Figur 7.2 De tre testsignalernas polarisationsläge under 20 sekunder	57
Figur 7.3 En vibrator böjer fibern med en högre frekvens och en mindre amplitud	58
Figur 7.4 Vibratorens mekaniska störningar påverkar två av de tre testsignalerna	58
Figur 7.5 Effekttäthetsspektrum för en av projektionerna.....	59
Figur 7.6 Sensorfibern begrävdes under tjärpapp	60
Figur 7.7 Stora mekaniska påfrestningar ger upphov till att flera optiska egenskaper ändras.....	61
Figur 7.8 Projektionen och ljusets totala intensitet när bilen passerar över fibern.....	61

Inledning

1.1 Bakgrund

Tanken att använda en fiberoptisk kabel som sensor har funnits länge och realiserades under 1980- och 1990-talen. Allt eftersom priserna sjönk på optiska och elektrooptiska komponenter blev fiberoptiska sensorer allt vanligare. Populariteten beror främst på att tekniken har unika egenskaper som är svåra att uppnå med annan teknik; långa sensorsträckor och låg energiförbrukning. Okänsligheten mot elektromagnetisk strålning är särskilt viktig för sensorer inom industrin.

Den fiberoptiska sensor som behandlas i denna rapport är tänkt att utgöra ett militärt bevakningssystem som kan täcka mycket stora ytor. Vibrationer i marken avslöjar mekaniserade truppflyttningar och kan mätas som en mekanisk påfrestning på fibern. Längre gränsdragningar såsom den i figur 1.1 är möjliga att bevaka kostnadseffektivt med hjälp av en fiberoptisk sensor.



Figur 1.1 Gränsbevakning är ett användningsområde för en fiberoptisk sensor

Behov av en billig övervakningsteknik som kan täcka stora ytor är inte enbart förknippat med militära användningsområden utan kan även användas för civil bevakning.

I en tidigare studie [1] på FOI i Linköping utvärderades en enklare fiberoptisk kabelsensor, studien påvisar en stor potential men introducerar också en del problem. Beroende på signalens beskaffenhet fick sensorn en oberäknelig känslighet och därmed en dålig repeterbarhet.

Den fiberoptiska kabelsensor som behandlas i denna rapport använder en testsignal som är periodiskt varierande, detta för att säkerställa känsligheten hos sensorn. Testsignalens utseende är även tänkt att förbättra repeterbarheten. En signalbehandling är dock nödvändig för att tolka sensorns information, denna signalbehandling har inte realiserats tidigare.

1.2 Problemformulering och syfte

En laborationsuppkoppling av den fiberoptiska kabelsensorn finns på plats på avdelningen för Sensorteknik vid FOI i Linköping.

En teoretisk modell för hur den polarimetriska signalbehandlingen kan lösas skall formuleras för att visa att en praktisk lösning finns. Vidare skall ett datorbaserat mätinsamlingssystem färdigställas för att möjliggöra signalbehandling av signalen från den laborationsuppkoppling som redan finns.

Examensarbetet syftar även till att undersöka sensorns prestanda inom de avsedda användningsområdena samt föreslå eventuella förbättringar.

1.3 Totalförsvarets Forskningsinstitut (FOI)

FOI är en myndighet direkt underordnad Förvarsdepartementet, myndigheten har till uppgift att bedriva forskning och teknikutveckling som kan komma till nytta inom alla samhällssektorer. Huvudkunderna är svenska Förvarsmakten, Förvarets materielverk (FMV) och Förvarsdepartementet. Vidare har FOI en rad internationella samarbetspartners inom ramen för olika forskningsprogram inom EU. FOI är uppdelat i sju huvudsakliga forskningsavdelningar varav två finns i Linköping: Sensorteknik och Ledningssystem.

1.4 Rapportens disposition

Rapportens disposition speglar den arbetsgång som använts under examensarbetet. Uppdelningen i sju kapitel ser ut som följer:

Kapitel 2 Teori

Det inledande kapitlet ska ge läsaren en teoretisk grund för att förstå de begrepp och ekvationer som används i rapportens senare del. Polarisation och olika optiska komponenters inverkan på polarisationen förklaras. Metoder för att beskriva och visualisera polarisation introduceras också.

Kapitel 3 Kabelsensorns uppbyggnad

Sensorn som den som formulerats i tidigare arbete [1] beskrivs i detta kapitel. Här beskrivs även grundidén och de olika komponenterna ingående, detta för att tydliggöra problemformuleringen.

Kapitel 4 Polarimetrisk signalbehandling

Genom en signalbehandling utvinns sensorinformation från den signal som hämtas från kabelsensorn, arbetet med att formulera denna signalbehandling beskrivs i detta kapitel.

Kapitel 5 Mätinsamlingssystem

Det femte kapitlet redogör för hur det datorbaserade mätinsamlingssystemet är uppbyggt.

Kapitel 6 Mätningar

Karaktärisering av ingående komponenter och mätningar med hela kabelsensorn presenteras utifrån metod och resultat.

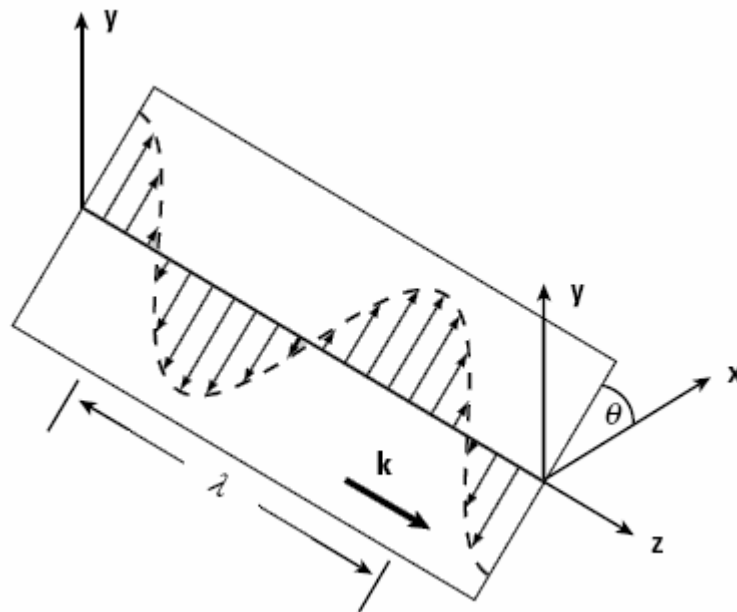
Kapitel 7 Ortogonal detektion

Här presenteras en förbättring av kabelsensorn och några inledande tester.

2 Teori

2.1 Polarisation

Enligt den elektromagnetiska teorin¹ skall det elektriska och magnetiska fältet vid fri vågutbredning vara vinkelräta mot utbredningsriktningen, de skall dessutom vara ortogonala. Den elektriska fältvektorns riktning är den riktning som definierar polarisationsriktningen. När svängningen hos det elektriska fältet är begränsad till ett enda plan kallas ljuset för *linjärpolariserat* eller *planpolariserat*.



Figur 2.1 Linjärpolariserat ljus

Den elektriska fältvektorn delas i två ortogonala komponenter, dessa kommer i denna rapport att kallas E_x och E_y . E_x definieras som horisontell medan E_y är vertikal.

Hela den elektriska fältvektorn kan skrivas som en kombination av dessa komponenter. För linjärpolariserat ljus gäller:

$$E = E_x \cos(\omega t - kz) + E_y \cos(\omega t - kz) \quad (2.1)$$

Där $\omega = 2\pi c/\lambda$ är vågens vinkelfrekvens och k är vågens utbredningskonstant.

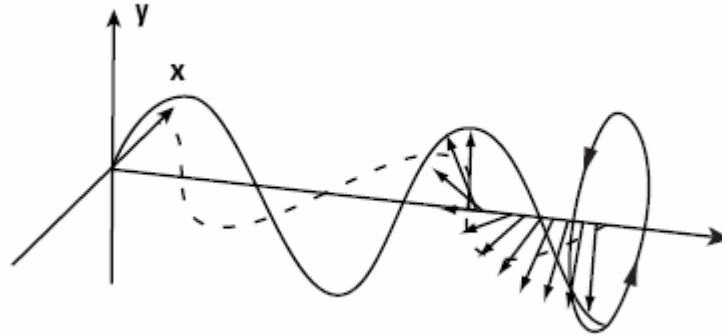
Komponenternas storlek i Figur 2.1 kan bestämmas utifrån hela den elektriska fältvektorns storlek enligt

¹Den elektromagnetiska teorin sammanfattas genom fyra ekvationer formulerade av Maxwell, James Clerk (1831-1879), brittisk fysiker.

$$|E_x| = |E| \cos \theta \quad (2.2)$$

$$|E_y| = |E| \sin \theta \quad (2.3)$$

Där θ är vinkeln mellan polarisationsplanet och referensaxeln.



Figur 2.2 Cirkulärpolariserat ljus

Om komponenterna i linjärpolariserat ljus fördröjs något i relation till varandra kommer det att se ut som om den elektriska fältvektorn roterar runt utbredningsriktningen. När fasförskjutningen är exakt 90° och de två komponenterna är lika stora kallas ljusets polarisationstillstånd för *cirkulärpolariserat*, fältvektorn bildar då en perfekt cirkel runt utbredningsriktningen. Rotationsriktningen beror på vilken komponent som fördröjs, i Figur 2.2 är fältvektorn för cirkulärpolariserat ljus skissad. Rotationen sker åt vänster och detta polarisationstillstånd kallas därför *vänster cirkulärpolariserat*.

När fasförskjutningen inte är 90° eller om komponenterna inte är lika stora blir inte resultatet en perfekt cirkel, ljuset kallas då *elliptiskt polariserat*. Detta tillstånd beskrivs allmänt genom

$$E = E_x \cos(\omega t - kz) + E_y \cos(\omega t - kz + \Gamma) \quad (2.4)$$

Där Γ är fasförskjutningen i radianer. Väljs denna förskjutning till en multipel av π fås åter linjärpolariserat ljus.

2.1.1 Malus lag

Ett filter som bara släpper igenom en polarisationsriktning kallas för *polarisator*. När fullständigt polariserat ljus infaller mot en polarisator blir ljusets intensitet efter polarisatorn beroende av vinkeln mellan polarisatorns genomsläppsriktning och det inkommande ljusets elektriska fältvektor. Detta samband formuleras av Malus² lag enligt

$$I_t = I_0 \cos^2 \theta \quad (2.5)$$

² Malus, Étienne Louis (1775-1812) fransk fysiker som upptäckte polarisation 1801

Där I_t är det transmitterade ljusets intensitet, I_0 är det infallande ljusets intensitet och θ är vinkeln mellan den elektriska fältvektorn och polarisatorns genomsläppsriktning.

2.2 Dubbelbrytning

Material kallas dubbelbrytande om det finns skillnader i brytningsindex för materialets olika axlar. Detta innebär att den elektriska fältvektorns komponenter går olika vägar genom materialet, på så vis skapas en förskjutning mellan komponenterna. Skillnaden i brytningsindex gör också att komponenterna i fältvektorn inte kommer att sammanfalla efter att de gått igenom materialet. De två olika bilderna som ses genom kristallen i Figur 2.3 beror på kristallens dubbelbrytning.



Figur 2.3 En dubbelbrytande kristall skapar två olika bilder

Vanligtvis skiljer sig brytningsindex i en av materialets axlar från de övriga två, denna axel kallas för *extraordinär* varvid de övriga axlarna kallas *ordinära*. Den axel som har högst brytningsindex brukar kallas för den *långsamma axeln*.

Materialets tjocklek påverkar direkt hur stor förskjutningen blir men för att kunna använda förskjutningen till att förändra polarisationen behöver den vara relaterad till ljusets våglängd. Därför anges förskjutningen i relation till våglängden, vanligt är kvarts- eller halv våglängd:

$$\Gamma = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta n L \quad (2.6)$$

Där Γ är förskjutningen i radianer, λ är våglängden hos det infallande ljuset, Δn är skillnaden i brytningsindex mellan de olika axlarna och L är den optiska vägen genom materialet.

En halv vågsplatta har Γ lika med π radianer och en kvart vågsplatta har Γ lika med $\frac{\pi}{2}$ radianer.

Om linjärpolariserat ljus infaller med 45° vinkel mot en kvart vågsplatta kommer fältvektorns ena komponent att förskjutas en kvarts våglängd relativt den andra komponenten. Förförskjutningen mellan komponenterna blir 90° . Detta är den exakta definitionen på cirkulärpolariserat ljus. Linjärpolariserat ljus har transformerats till cirkulärpolariserat.

2.3 Elektrooptisk effekt

Vissa typer av dubbelbrytande material ändrar sina egenskaper under inverkan av ett elektriskt fält, denna effekt kallas för den elektrooptiska effekten. Brytningsindex i ett material påverkas av den inre strukturen i materialet, denna struktur ändras av det externa elektriska fältet. Ofta ändras materialets brytningsindex olika längs olika riktningar, detta kallas för *anisotropi*.

Förändringen i brytningsindex kan vara linjärt eller kvadratisk beroende av det elektriska fältet. Den linjära effekten upptäcktes år 1893 av Friedrich Pockels³ och kallas *Pockels effekt*. Något tidigare, år 1875, upptäckte John Kerr⁴ det kvadratiske beroendet av det elektriska fältet. Denna effekt kallas *Kerreffekten*.

Förändringarna av brytningsindex är mycket små och typiska värden är i storleksordningen 10^{-6} till 10^{-4} .

Fasförskjutningen för en ljusstråle som passerar en Pockelcell med längden L som utsätts för ett elektriskt fält E är

$$\varphi = \frac{2\pi n(E)L}{\lambda_0} \quad (2.7)$$

Där λ_0 är ljusstrålens våglängd i vakuum.

Beroendet av det elektriska fältet definieras med hjälp av Pockels koefficient eller den linjära elektrooptiska koefficienten r_i , där i beskriver fältvektorns riktning i materialet. Brytningsindex $n(E)$ kan då skrivas

$$n(E) = n - \frac{1}{2} r_i n^3 E \quad (2.8)$$

Där n är det initiala brytningsindex hos materialet utan påverkan av ett elektriskt fält. Den linjära elektrooptiska koefficienten anges i m/V och typiska värden är i storleksordningen 10^{-12} till 10^{-10} .

2.4 Stokes vektor

För att beskriva ljusets polarisation används ofta Stokesvektorer⁵ som har fyra komponenter. De fyra komponenterna definieras utifrån den elektriska fältvektorns komponenter som

$$S_0 = E_x^2 + E_y^2 \quad (2.9)$$

$$S_1 = E_x^2 - E_y^2 \quad (2.10)$$

³ Pockels, Friedrich (1865-1913) tysk fysiker som studerade den elektrooptiska effekten

⁴ Kerr, John (1824-1907) skotsk fysiker som studerade den elektrooptiska och magnetoptiska effekten

⁵ Stokes, Sir George Gabriel (1819-1903) brittisk fysiker och matematiker

$$S_2 = 2E_x E_y \cos \Gamma \quad (2.11)$$

$$S_3 = 2E_x E_y \sin \Gamma \quad (2.12)$$

Om ljuset är fullständigt polariserat kan den första Stokeskomponenten uttryckas med hjälp av de övriga tre.

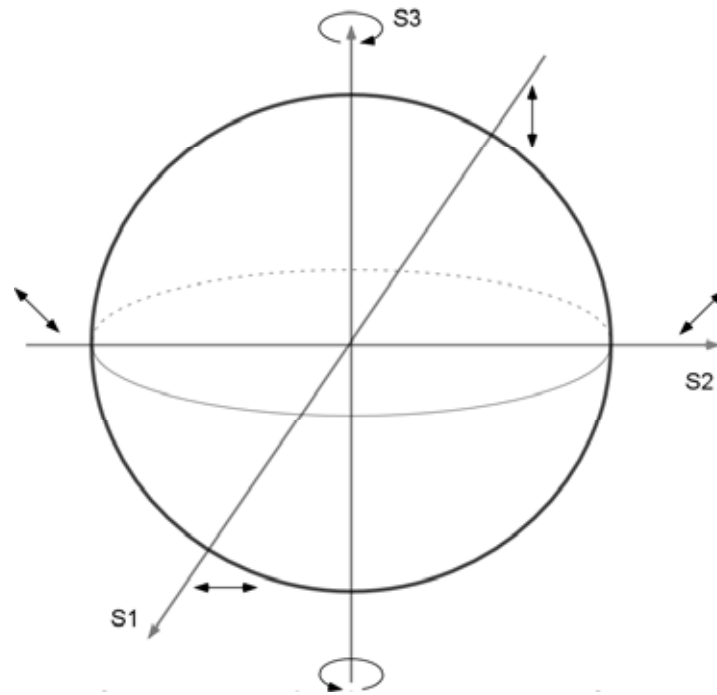
$$S_0^2 = S_1^2 + S_2^2 + S_3^2 \quad (2.13)$$

Med hjälp av definitionerna av komponenterna i Stokes vektor kan (2.13) enkelt härledas.

De tre oberoende komponenterna representerar var för sig en distinkt polarisation. Komponenten S_1 beskriver den linjära vertikala och horisontella polarisationen, S_2 den linjära 45-gradiga polarisationen och S_3 vänster respektive höger cirkulär polarisation.

2.5 Poincarésfären

Om fullständigt polariserat ljus behandlas kan man kan normera alla parametrar med S_0 och på så sätt förflytta alla möjliga tillstånd till ytan på en sfär. Denna sfär kallas för Poincarésfären⁶ och möjliggör en enkel visualisering av alla fullständigt polariserade tillstånd.



Figur 2.4 Poincarésfären

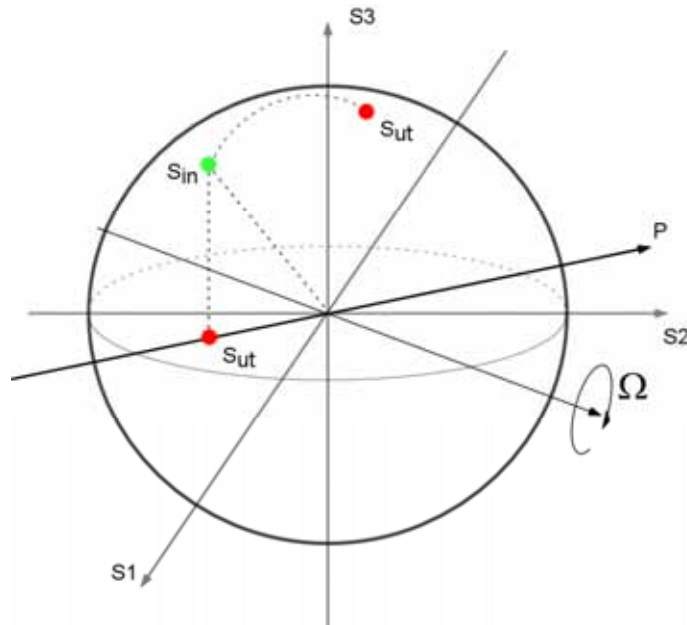
De tre axlarna i sfären känns igen från Stokesvektorns tre oberoende komponenter. Vertikal och horisontell polarisation hittas i sfären på negativa respektive positiva S_1 . På samma sätt återfinns ± 45 grader på positiva respektive negativa S_2 . Total cirkulär polarisation återfinns vid skärningen mellan S_3 och sfären. Vänster cirkulär polarisation hittas på positiva S_3 och höger cirkulär polarisation på negativa S_3 . Det ortogonala polarisationstillståndet till en punkt på sfären återfinns på sfärens motsatta sida.

2.5.1 Transformationer av polarisationen

En optisk komponent eller fiber påverkar ofta polarisationstillståndet hos signalen, det är därför önskvärt att kunna beskriva påverkan av en optisk komponent matematiskt.

När polarisationen visualiseras i Poincarésfären kan förändringar på polarisationen beskrivas genom linjära avbildningar.

⁶ Poincaré, Henri (1854-1912) fransk matematiker, teoretisk fysiker och vetenskapsteoretiker.



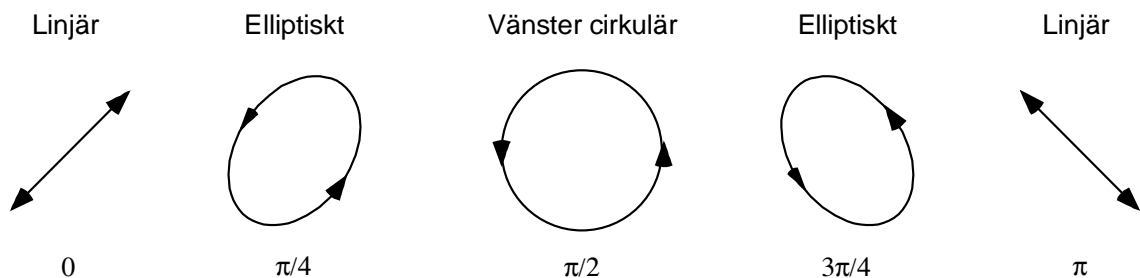
Figur 2.5 Polarisator och dubbelbrytning kan tolkas som projicering respektive rotation

En transformation som bara påverkar polarisationen kallas *unitär*, det innebär att längden på vektorn lämnas oförändrad. Exempelvis är rotationen runt axeln omega i Figur 2.5 en unitär transformation medan projektionen inte är det. Om en matris är unitär innebär det att dess invers alltid finns, något som gör att polarisationstillståndet innan transformationen kan bestämmas utifrån tillståndet efter. Rotationen i Figur 2.5 har bara en möjlig startpunkt medan punkten på P-axeln kan projiceras från flera olika polarisationstillstånd.

Axlarna omega och P i Figur 2.5 har förlängts utanför sfären för att göra figuren tydligare, ofta definieras de dock genom en vektor från centrum till en punkt som tillhör sfären. Detta är den definition som kommer att användas i denna rapport.

Rotationsvinkeln för en dubbelbrytning är lika med den färförskjutningen som dubbelbrytningen skapar mellan den elektriska fältvektorns komponenter.

Om komponenterna i 45° planpolariserat ljus färförskjuts relativt varandra fås en unitär transformation av polarisationstillståndet enligt Figur 2.6.



Figur 2.6 Transformation av ett polarisationstillstånd genom färförskjutning

Rotationsaxeln i exemplet i Figur 2.6 är lika med S_1 , positiva S_2 roteras genom fasförskjutning med π till negativa S_2 .

2.5.2 Muellermatriser

Transformationer av polarisationsläget kan beskrivas av en multiplikation med en 4x4 matris som kallas för Muellermatris⁷. Matrisen verkar på Stokesvektorn. Om transformationen är unitär kommer Muellermatrisen ha ett speciellt utseende eftersom S_0 måste bevaras.

$$M = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & A & B & C \\ 0 & D & E & F \\ 0 & G & H & I \end{pmatrix} \quad (2.14)$$

För unitära transformationer kan därför Muellermatrisen istället beskrivas av en 3x3 matris [2], denna matris är en delmängd av hela Muellermatrisen. Denna matris verkar därför också på en delmängd av Stokesvektorn, S_1 , S_2 och S_3 .

$$M = \begin{pmatrix} A & B & C \\ D & E & F \\ G & H & I \end{pmatrix} \quad (2.15)$$

Ett polarisationsfilter kan inte betraktas som en unitär transformation eftersom intensiteten efter polarisatorn beror på Stokesvektorns läge relativt polarisatorn, en sådan transformering av polarisationen kan alltså inte beskrivas med den förenklade Muellermatrisen.

En dubbelbrytning är däremot en unitär transformering och kan därför modelleras genom den förenklade Muellermatrisen. Rotationsaxeln omega i Figur 2.5 är Muellermatrisens reella egenvektor.

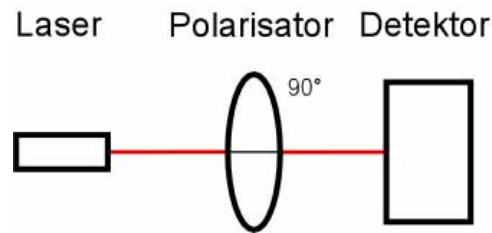
2.6 Experimentell bestämning av Stokes vektor

För att mäta polarisation måste ett polarisationsfilter användas, på så sätt kan intensiteten i en viss riktning bestämmas, därefter kan polarisationsläget beräknas med hjälp av Malus lag (2.5).

Ett vanligt polarisationsfilter låter oss bestämma hur stor del av ljuset som är linjärt polariserat. Med hjälp av dubbelbrytande filter kan dessutom intensiteten hos cirkulärpolariserat ljus mätas genom att först transformera till linjärpolariserat och sedan låta ljuset passera genom ett polarisationsfilter.

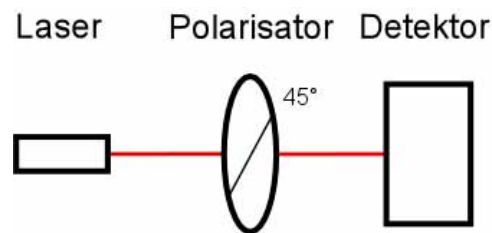
För att bestämma hela Stokes vektor för fullständigt polariserat ljus behöver en serie av mätningar göras, en mätning för varje komponent.

⁷ Formalism skapad av Hans Mueller 1948



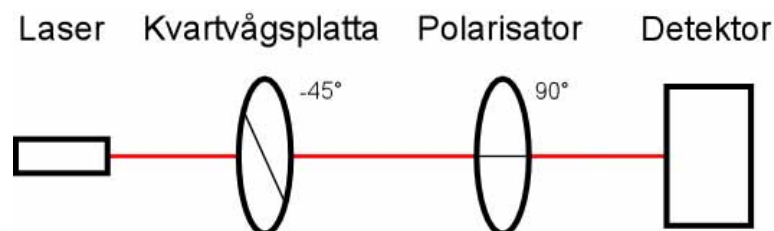
Figur 2.7 Bestämning av S_1 -komponent

För de linjärt polariserade delarna av Stokes vektor kan ett enkelt polarisationsfilter användas, detta ställs i horisontellt läge för bestämning av S_1 och i diagonalt läge enligt Figur 2.8 för att bestämma S_2 .



Figur 2.8 Bestämning av S_2 -komponent

När den sista komponenten i Stokes vektor skall bestämmas måste en kvartvågsplatta som användas för att transformera S_3 komponenten till S_1 -axeln och därefter mäts intensiteten efter ett polarisationsfilter ställt i horisontellt läge.



Figur 2.9 Bestämning av S_3 -komponent

Detektorn kommer i alla mätningar att mäta den intensitet som visar hur mycket ljus som finns med den eftersökta polarisationen. För att räkna fram komponenten i vektorn måste dessa intensiteter viktas mot den totala intensiteten för att på så sätt bilda ett tal mellan ett och noll. Ett betyder att allt ljus är polariserat i just den riktning som mäts och noll betyder att allt ljus är polariserat i ortogonal riktning. Eftersom axlarna i Poincarésfären har ortogonala tillstånd på varsin sida om sfären måste värdet mellan ett och noll skalas om för att representera tillståndet i Stokes vektor.

Genom att bestämma vinkeln mellan polarisatorns genomsläppsriktning och ljusets elektriska fältvektor kan respektive komponent i Stokes vektor bestämmas. I Poincarésfären

är det 180° mellan ortogonala polarisationstillstånd, vinkeln som beräknas genom Malus lag (2.5) måste alltså dubblas.

$$S_n = \cos\left(2 \arccos\left(\sqrt{\frac{I_n}{I_0}}\right)\right) = 2 \cos^2\left(\arccos\left(\sqrt{\frac{I_n}{I_0}}\right)\right) - 1 = 2 \frac{I_n}{I_0} - 1 = \frac{I_n - 0,5}{0,5} \quad (2.16)$$

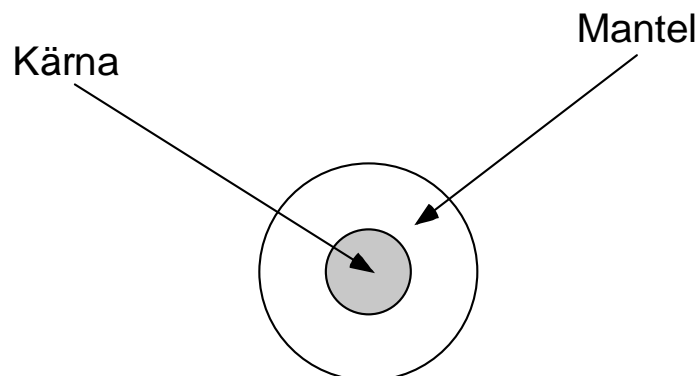
Den totala intensiteten I_0 kan exempelvis bestämmas genom att låta ljuset gå direkt in i detektorn utan att passera något filter.

En laborativ bestämning enligt denna metod kan inte sägas vara särskilt noggrann, detta beror till stor del på svårigheter att ställa in alla filter korrekt. Beroende på de optiska komponenterna kan resultatet variera kraftigt.

2.7 Fiberoptisk kabel

En fiberoptisk kabel kan ses som en vägledare för ljus och består av en tunn kärna av glas och en mantel av glas med något lägre brytningsindex. Skillnaden i brytningsindex mellan mantel och kärna resulterar i en totalreflektion som gör att allt ljus stannar inne i kärnan.

Det finns två huvudsakliga grupper av fiberoptisk kabel, *multimodfiber* och *monomodfiber*⁸. Skillnaden mellan dessa grupper är att en multimodfiber har större dimensioner och detta gör att fibern tillåter flera moder att existera samtidigt. En monomodfiber är designad för att bara tillåta en enda mod. En mod är en lösning till Maxwells⁹ ekvationer.



Figur 2.10 Tvärsnitt av en fiberoptisk kabel

Kärnan på en monomodfiber brukar vara mellan 5 och 10 mikrometer i diameter.

2.7.1 Dubbelbrytande effekter hos monomodfiber

Snabba telekommunikationsnätverk består i huvudsak av fiberoptiska överföringar och den stora efterfrågan gör att kabeltekniken hela tiden utvecklas. Även om produktionen av fiberoptiska kablar har förfinats förekommer det vid tillverkningen att fibern får små

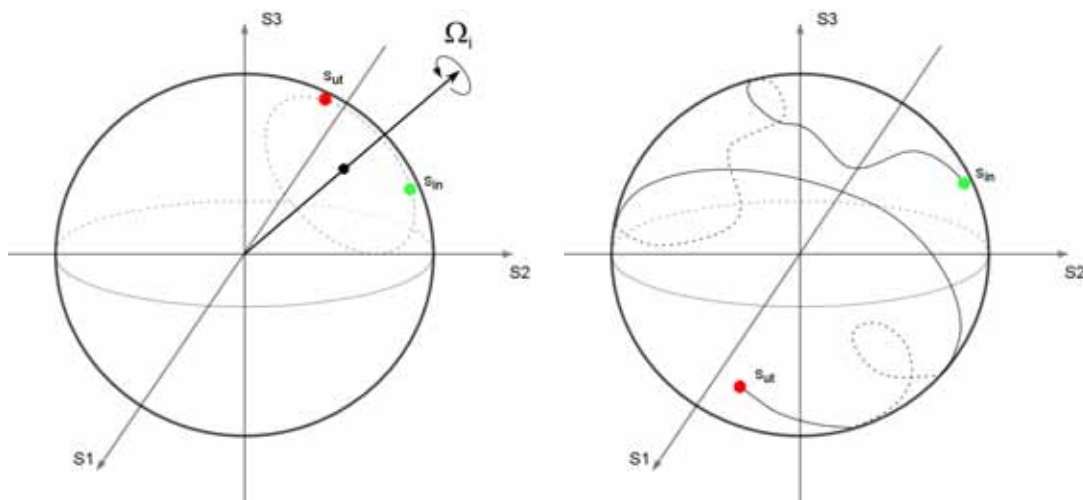
⁸ Även benämningen singelmodfiber från engelskans *singlemode fiber* förekommer

⁹ Maxwell, James Clerk (1831-1879) brittisk fysiker känd för sina fyra ekvationer för att beskriva elektromagnetism

variationer i tvärsnittsgeometri. Dessa geometriska variationer ger upphov till en svag dubbelbrytande effekt. En puls som skickas iväg i fibern breddas genom att den elektriska fältvektorns komponenter förskjuts relativt varandra, detta kallas *PMD (Polarization Mode Dispersion)* [4].

Den inverkan som fibern har på polarisationsläget är svårmodellerad och kan anses slumpmässig. Fibern kan modelleras som en serie vågplattor, alla med slumpmässig orientering och fördröjning. Genom att låta dessa påverka ljuset i tur och ordning fås en modell för hela fibern.

En vågplatta med en viss orientering och en viss fördröjning kan enligt kapitel 2.5.1 illustreras som en rotation runt en vektor Ω i Poincarésfären. Inkommande tillstånd S_{in} transformeras till S_{ut} .



Figur 2.11 Modell av en kort respektive en lång fiber

Varje kortare avsnitt av fibern påverkar ljusets polarisation genom en rotation kring en axel Ω i Poincarésfären. Ett längre avsnitt av fibern innebär många rotationer kring olika axlar, resultatet kan exempelvis se ut som i Figur 2.11.

Muellermatrisen för en lång fiber kan bestämmas genom en multiplikation av flera Muellermatriser enligt ekvation (2.17).

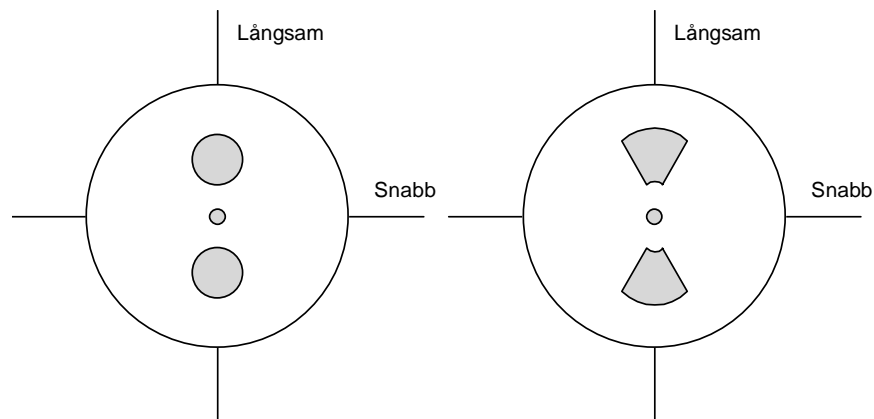
$$M_{tot} = \prod_i M_i \quad (2.17)$$

I en verklig fiber varierar fiberns effekt på polarisationsläget långsamt beroende av temperatur och tryck. Fysiska påfrestningar på fibern som böjning, tryck eller töjning ger snabbare förändringar av denna effekt. Det är dessa förändringar som kabelsensorn skall detektera.

2.7.2 Polarisationsbevarande fiber

Mono- eller multimodfibers oönskade effekter på polarisationsläget i fibern är oönskade vid applikationer där polarisationsstillståndet måste vara väl definierat. För dessa tillämpningar finns *polarisationsbevarande fiber* som har två ortogonala axlar i vilka ljuset delas upp. I dessa axlar färdas ljuset oberoende av ljuset i den andra axeln, detta gör att fibern kan bevara ett linjärpolariserat tillstånd.

Axlarna skapas eftersom kärnan i fibern görs asymmetrisk genom en kraftig dubbelbrytning. Dessa axlar kallas *snabb* respektive *långsam* axel då ljuset upplever olika brytningsindex och därmed olika hastighet i de olika axlarna. De två vanligaste sätten att skapa asymmetri i kärnan kallas *Panda* och *Bow-tie*, namnen kommer från kärnans utformning. Vanligtvis används en av axlarna för allt ljus för att på så sätt hålla ljuset helt linjärpolariserat.



Figur 2.12 Panda och Bow-tie

En viss mängd ljus kan läcka mellan de olika axlarna i fibern och detta anges som en parameter för fibern, ER (*Extinction Ratio*), i dB.

$$ER(\text{dB}) = -10 \log \left(\frac{P_{\perp}}{P} \right) \quad (2.18)$$

Där P är effekten i den önskade axeln och P_{\perp} är effekten i den ortogonala axeln. Typiska värden på ER för polarisationsbevarande fiber är 30dB.

2.7.3 Polariserande fiber

Lösningen till Maxwells ekvationer blir något mer komplicerad för en fiber med asymmetrisk kärna. Under vissa förutsättningar kommer en polarisationsbevarande fiber att dämpa ljuset i den snabba axeln och bevara ljuset i den långsamma. Denna effekt är självklart önskad i den polarisationsbevarande fibern. I en *polariserande fiber* är det just denna effekt som eftersöks och man har därför maximerat dämpningen i den snabba axeln. Fibern kommer alltså att fungera som en polarisator om den är tillräckligt lång.

2.8 Teori bakom kabelsensorn

Tanken med kabelsensorn är att kontinuerligt bestämma den påverkan som den fiberoptiska kabeln står för och därigenom kunna detektera snabba förändringar av denna påverkan.

Genom att låta laserljus med känd polarisation passera fram och tillbaka genom en fiberoptisk kabel kan den fiberoptiska kabelsensorns påverkan på polarisationsläget bestämmas.

2.8.1 Tidigare arbete

Tidigare studier av en enklare sensor kallad *FOI system I* [1] visar på brister i känslighet och repeterbarhet.

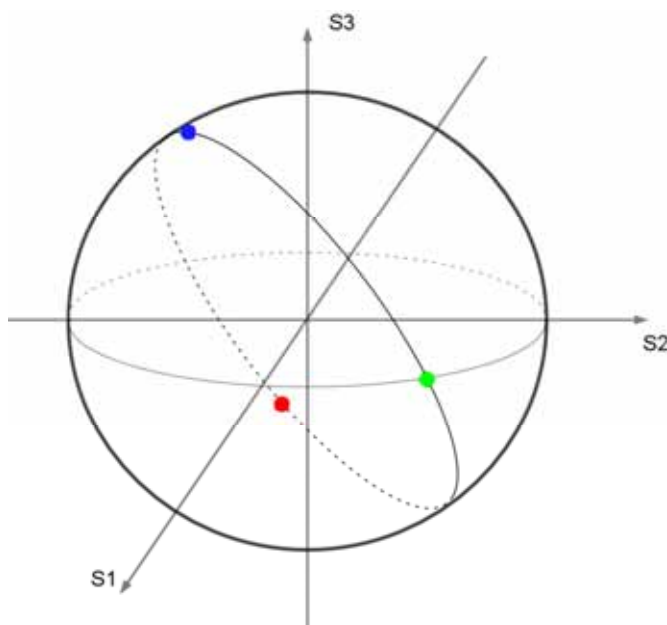
Problemet med den enklare sensorn var framförallt att bara en testsignal användes, detta gjorde att vissa transformationer av polarisationen inte påverkade just denna testsignal. Med enbart en testsignal kan heller inte Muellermatrisen för transformationen bestämmas.

För att lösa problemen med känslighet och repeterbarhet konstruerades en ny kabelsensor, denna sensor testades dock aldrig kvalitativt något som är tänkt att göras i detta examensarbete.

2.8.2 Flera testsignaler

Den påverkan som sensorfibern har på ljusets polarisationsläge är beroende av ljusets initiala polarisation. För att kunna säkerställa att denna påverkan kan detekteras räcker det alltså inte med att bara använda en enda polarisation eftersom risken finns att den påverkan som sensorfibern står för inte påverkar just den polarisationen.

I kabelsensorn är tanken att använda tre testsignaler som är ortogonala i Poincarésfären, vinsten med detta är att om en av testsignalerna inte påverkas av fibersensorn kommer de övriga två garanterat att göra det. Ligger rotationsaxeln ω för fiberns påverkan i någon av de tre testsignalernas polarisationsläge kommer de övriga två att förflytta sig maximalt.



Figur 2.13 Tre ortogonala testsignaler skapas genom rotation runt en axel

Genom att låta de tre testsignalerna gå fram och tillbaka genom sensorfibern kan Muellermatrisen för sensorfibern bestämmas.

2.8.3 Tidsmultiplexering

De tre testsignalerna separeras över tiden genom att de skickas ut successivt genom fibern. Detta förutsätter att fiberns påverkan är konstant under det tidsintervall som de olika testsignalerna skickas ut. Kabelsensorns användningsområde är att detektera vibrationer från stängsel eller i marken, dessa förändringar är relativt långsamma och kan antas konstanta under den tid som de olika testsignalerna skickas ut.

Detektionen av de inkommande testvektorerna sker också successivt för att på sätt kunna använda en enda detektor. Detta kan jämföras med kapitel 2.6 där det krävs flera mätningar för att bestämma Stokesvektorn. Dessa mätningar kan göras med olika dubbelbrytning istället för att ändra polarisationsfiltret. Genom en efterföljande signalbehandling kan då testvektorernas läge i Poincarésfären bestämmas.

2.8.4 Förändringen hos fiberns påverkan

Eftersom tre testvektorer används finns tillräcklig information för att beskriva fiberns påverkan genom en Muellermatris. Detta kan jämföras med den modell som beskrivs i kapitel 2.7.1. Om något av bidragen till den totala Muellermatrisen enligt ekvation (2.17) ändras kommer det även att påverka hela fiberns Muellermatris.

Genom att jämföra flera beräkningar av fiberns påverkan kan den mekaniska störningen på fibern kvantifieras. Den mekaniska störningens amplitud förväntas vara så liten att den inte varaktigt ändrar fiberns påverkan på polarisationsläget. Detta gör att fiberns påverkan på polarisationsläget kommer att återgå till det som var innan störningens inverkan. En periodisk störning bör alltså kunna återfinnas som en periodisk förändring av fiberns omegaoperator i Poincarésfären.

2.9 Examensarbetets innehåll

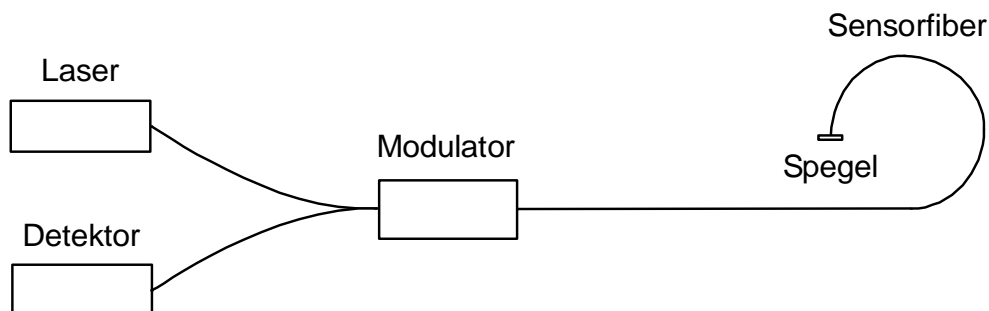
En polarimetrisk signalbehandling för att tolka signalen från sensorn kommer att formuleras och testas med en matematisk modell. Målet med signalbehandlingen är att kunna följa testsignalernas polarisationsläge och beskriva sensorfiberns påverkan på polarisationen.

För att utvinna sensorinformationen behövs en speciell mätinsamling som tar hänsyn till sensorns tidsmultiplexering av signalen, denna mätinsamling kommer att beskrivas i detalj i senare kapitel.

Genom mätningar kommer modulatorns påverkan på polarisationsläget att bestämmas och formuleras med hjälp av förenklade Muellermatriser. Den framtagna signalbehandlingen kan därigenom testas på data från sensorn.

3 Kabelsensorns uppbyggnad

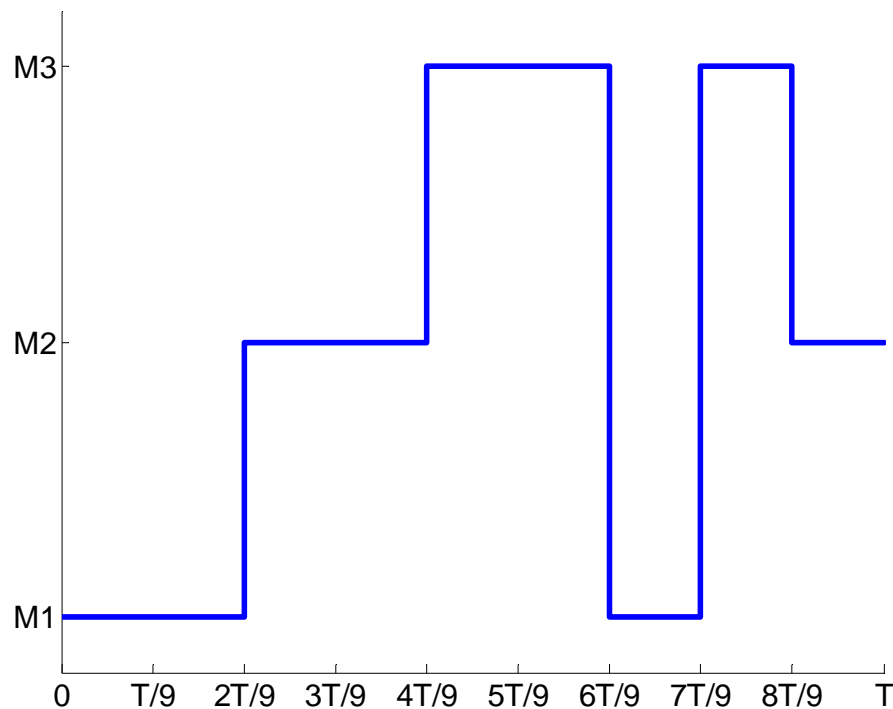
Den fiberoptiska kabelsensorns uppbyggnad kan förenklat beskrivas enligt Figur 3.1. Laserljuset alstras av en halvledarlaser och detta ljus kopplas via en polarisationsbevarande kopplare in till modulatore. I modulatore moduleras ljuset i tre olika polarisationslägen som sedan skickas vidare ut i en lång monomodfiber. I slutet på denna fiber är änden belagd med ett reflekterande material för att allt ljus skall reflekteras tillbaka. Ljuset går återigen genom modulatore för att sedan infalla mot en detektor i slutet på systemet.



Figur 3.1 Schematisk beskrivning av kabelsensorn

För att få tillräcklig information om de tre olika polarisationslägena när de kommer tillbaka från fibern behövs flera olika mätningar. Dessa mätningar fås genom att låta ljuset moduleras på olika sätt innan det når detektorn. De modulationer som används på vägen ut till fibern kommer även att påverka det ljus som kommer tillbaka, då fås tre olika mätvärden för varje av de tre inkommande polarisationslägena.

Figur 3.2 beskriver den modulationssignal som används för att åstadkomma samtliga kombinationer av modulationen på vägen ut och tillbaka från fibern. Hela perioden av signalen ger den information som behövs för att bestämma polarisationslägena efter fiberns inverkan.



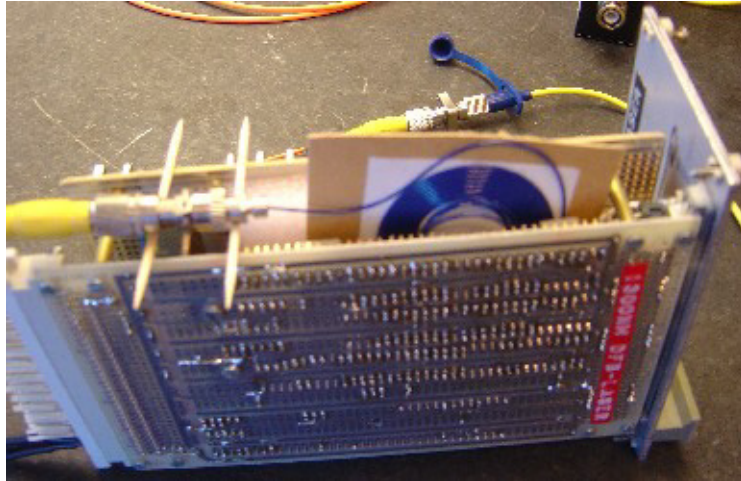
Figur 3.2 Modulation under en period

Laserljus som skickas ut i första tidsluckan kommer att moduleras med M_1 , detta ljus färdas fram och tillbaka genom fibern. När ljuset kommer tillbaka, i andra tidsluckan, kommer det att moduleras av M_1 på vägen tillbaka.

Tiden för en tidslucka, $T/9$, motsvarar den tid det tar för ljuset att färdas fram och tillbaka genom sensorfibern. En period av signalen, T , kommer att ge ett mätvärde för hur sensorfibern påverkar polarisationsläget. Detta gör att fiberns längd påverkar hur snabba förändringar som kan detekteras.

3.1 Laser

Som ljuskälla används en äldre 1300nm halvledarlaser som tyvärr har en vanlig monomodfiber ansluten. Denna monomodfiber påverkar polarisationsläget på ett okontrollerat sätt vilket medför att polarisationsläget in till kopplaren inte nödvändigtvis är linjärpolariserat. För att begränsa påverkan på polarisationen har fibern lindats i en spiral för att bevara det polarisationstillstånd som lasern genererar.



Figur 3.3 Halvledarlasern är ansluten via vanlig monomodfiber

Efter den lindade monomodfibern ansluts en polarisationsbevarande kopplare av Pandafiber. Fiberns långsamma axel sammanfaller precis med polarisationsaxeln för att bevara det linjärpolariserade tillståndet genom kopplaren.

Eftersom laserljuset är linjärpolariserat används denna polarisation som referens till tolkningen av polarisationen i Poincarésfären.

3.2 Modulator

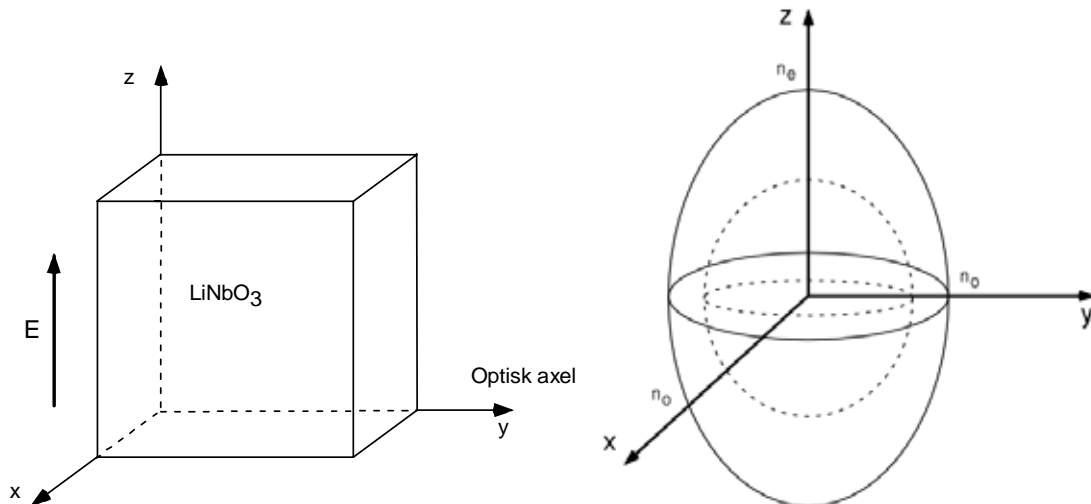
Modulatorens är en kombinerad fas och amplitudmodulator som använder det elektrooptiska kristallina¹⁰ materialet *litiumniobat* ($LiNbO_3$). Kristallen är dopats¹¹ med titanatomer för att skapa en vågledare för ljuset. Elektroder av guld skapar ett elektromagnetiskt fält över vågledaren och detta fält skapar en förskjutning mellan den elektriska fältvektorns komponenter enligt ekvation (2.7).

Modulatorens är byggd för höga frekvenser eftersom den är konstruerad för att användas inom telekommunikation. Ingångarna till modulatorens är därför filtrerade med en kondensator som tar bort de lägre frekvenserna. Det finns ytterligare en ingång på modulatorens, denna ingång är avsedd för förspänning och är inte filtrerad. Det är denna anslutning som används i kabelsensorn.

Förändringen i brytningsindex är anisotrop vilket innebär att brytningsindex ändrar sig olika mycket i modulatorens två axlar. I modulatorens är kristallen enligt tillverkaren [5] skuren i x-axeln med y-axeln som ljusets utbredningsaxel för att utnyttja den stora elektrooptiska koefficienten hos z-axeln.

¹⁰ I ett kristallint material är atomerna ordnade med periodisk upprepning

¹¹ Dopning innebär att små mängder av ett främmande material införs i ett ämne



Figur 3.4 Litiumniobat ($LiNbO_3$) har en anisotrop förändring av brytningsindex

Den extraordinära axeln z och den ordinära axeln x kommer att vara de axlar som den elektriska fältvektorns komponenter befinner sig i, beroende på polarisation. Dessa axlar har olika brytningsindex och förändrar även sitt brytningsindex olika med det elektriska fältet E . Denna anisotropi gör det möjligt att styra dubbelbrytningen i modulaton elektriskt.

Om ljuset in till modulatonns kristall är planpolariserat längs z -axeln kommer modulaton enbart ändra fasan på en komponent och det är det den är avsedd för. Om fältvektorn inte är parallell med z -axeln kommer fältvektorns båda komponenter att påverkas olika och därmed kommer polarisationsläget att ändras.

3.2.1 Polarisationsmodulator

Fältvektorn ut från kristallen kan tecknas genom

$$E = E_x \cos(\omega t - kz + \Gamma_x) + E_z \cos(\omega t - kz + \Gamma_x) \quad (3.1)$$

Eftersom modulaton skall användas för att ändra polarisationen är det skillnaden i fäsförskjutning mellan komponenterna som är intressant. Denna kan beräknas eftersom materialets egenskaper är kända.

För litiumniobat finns följande data

$$r_x = 10 \text{ pm/V} \quad r_z = 32 \text{ pm/V}$$

$$n_o = 2,220 \quad n_e = 2,146$$

Brytningsindex beroende av det elektriska fältet kan alltså skrivas enligt ekvation (2.8).

$$n_x(E) = n_o - \frac{1}{2} r_x n_o^3 E \quad (3.2)$$

$$n_z(E) = n_e - \frac{1}{2} r_z n_e^3 E \quad (3.3)$$

Och detta insatt i ekvation (2.7) ger

$$\Gamma_x = \frac{2\pi n_x(E)L}{\lambda_0} = \frac{2\pi n_o L}{\lambda_0} - \frac{\pi r_x n_o^3 EL}{\lambda_0} = \frac{\pi n_o L(2 - r_x n_o^2 E)}{\lambda_0} \quad (3.4)$$

$$\Gamma_z = \frac{2\pi n_z(E)L}{\lambda_0} = \frac{2\pi n_e L}{\lambda_0} - \frac{\pi r_z n_e^3 EL}{\lambda_0} = \frac{\pi n_e L(2 - r_z n_e^2 E)}{\lambda_0} \quad (3.5)$$

Längden L är inte känd för just den del av modulatern som används. Däremot kan en jämförelse mellan Γ_x och Γ_z göras, Γ_z bör ändras mer med det elektriska fältet eftersom z-axeln har en större elektrooptisk koefficient.

Skillnaden mellan förskjutningen i de båda axlarna kommer att bete sig något olika vid negativt elektriskt fält respektive positivt elektriskt fält beroende på de olika initiala brytningsindexen för axlarna. Approximativt kan skillnaden i fasförskjutning mellan x-axeln och z-axeln beräknas enligt

$$\Gamma = \Gamma_z - \Gamma_x = \Gamma_z \left(1 - \frac{\Gamma_x}{\Gamma_z} \right) \quad (3.6)$$

$$\frac{\Gamma_x}{\Gamma_z} \approx \frac{r_x n_o^2}{r_z n_e^2} = 33,44 \% \quad (3.7)$$

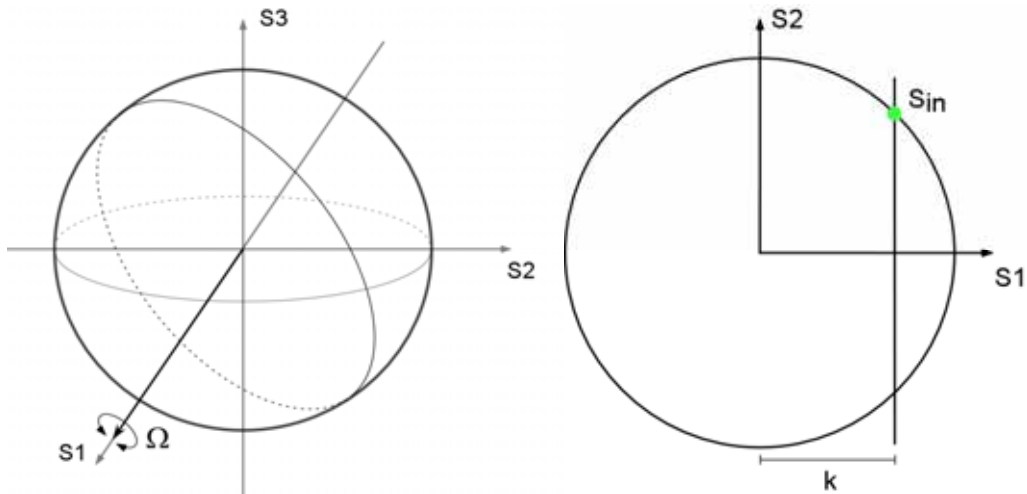
Det teoretiska resultatet i (3.7) kan jämföras med ett tidigare examensarbete [3] där det redovisas en kvot på 25 %. Ingen experimentell utredning av denna kvot har gjorts.

3.2.2 Tre polarisationslägen

Tanken med kabelsensorn är att använda tre ortogonala vektorer som testsignaler. Det finns två sätt att styra hur moduleringen skall ske; polarisationsläget in i modulatern och modulationsspänningen.

Om Poincarésfären definieras utifrån modulatern kan referensaxel väljas så att modulaterns omegaaxel blir linjerad med S_1 enligt Figur 3.5. Alla inkommande polarisationstillstånd kommer då att roteras runt S_1 , rotationsvinkeln bestäms av modulationsspänningen.

För att skapa tre ortogonala tillstånd måste både det inkommande polarisationsläget och fasförskjutningen bestämmas



Figur 3.5 Modulatorns inverkan kan modelleras som en rotation kring S_1

En förenklad modell i två dimensioner visar det inkommande polarisationsläget som ligger i S_1 - S_2 -planet. Skärningen i planet är den cirkel som en rotation runt S_1 skapar. Alla polarisationstillstånd måste ligga på sfärens yta vilket ger

$$S_1^2 + S_2^2 + S_3^2 = 1 \quad (3.8)$$

Eftersom S_1 -komponenten vid rotation runt S_1 -axeln är samma i alla tre polarisationstillstånd kan en parameter k införas enligt Figur 3.5. Alla tillstånd kommer då att uppfylla

$$S_2^2 + S_3^2 = 1 - k^2 \quad (3.9)$$

Det inkommande polarisationstillståndet är linjärpolariserat, följaktligen är $S_3 = 0$ och S_2 kan beskrivas genom k

$$S_{in} = \begin{pmatrix} k & \sqrt{1-k^2} & 0 \end{pmatrix} \quad (3.10)$$

Genom att använda fasförskjutningen som ytterligare en parameter kan alla möjliga tillstånd beskrivas

$$S_{ut} = \begin{pmatrix} k & \cos(\Gamma)\sqrt{1-k^2} & \sin(\Gamma)\sqrt{1-k^2} \end{pmatrix} \quad (3.11)$$

För att kunna bestämma tre ortogonala vektorer bör en av dem fixeras, i annat fall finns en oändlig mängd lösningar. Att låta det linjärpolariserade inkommande polarisationstillståndet utgöra en av de tre ortogonala vektorerna är en god idé eftersom det minimerar fasförskjutningen som krävs för att erhålla de övriga två.

Genom att utnyttja skalärprodukten och ekvation (3.11) kan tre ortogonala vektorer bestämmas. Dessa tre vektorer ges då i parameterform enligt

$$k = \frac{1}{\sqrt{3}} \Gamma = 0, \pm \frac{2\pi}{3} \quad (3.12)$$

3.3 Sensorfiber

I laborationsuppkopplingen av kabelsensorn används en 1 km lång monomodfiber som sensorfiber. Längden påverkar hur korta pulser som kan skickas och därmed också upplösningen i frekvensplanet enligt Nyquistfrekvensen¹². Pulslängden kan bestämmas enligt ekvation (3.13)

$$t_{puls} = \frac{2nL}{c} = \frac{2 * 1,5 * 1000}{2,99 * 10^8} \approx 10\mu s \quad (3.13)$$

Där n är fiberkärnans brytningsindex som vanligtvis är lika med 1,5, L fiberens längd och c ljusets hastighet i vakuum. Tiden för hela perioden och därmed Nyquistfrekvensen kan beräknas enligt

$$T = 9t_{puls} = 90\mu s \quad (3.14)$$

$$f_{nyquist} = \frac{(90\mu s)^{-1}}{2} \approx 5555\text{Hz} \quad (3.15)$$

Nyquistfrekvensen är vid den här längden på fiber tämligen hög jämfört med de frekvenser som kabelsensorn är avsedd att mäta.

3.4 Spegel

I slutet av den kilometerlånga sensorfibern finns en terminering som har till uppgift att skicka tillbaka allt ljus genom fibern igen. På vägen tillbaka genom fibern kommer polarisationen att ytterligare påverkas av störningen på fibern. Detta skulle kunna innebära ett problem eftersom störningen själv kan minska den påverkan som gjordes på väg ut i fibern. I laborationsuppkopplingen används en reflektor som terminering i fibern, reflektorn är skapad genom att ett tunt lager av guld har lagts på ett tvärsnitt av fibern.

Genom att använda speglar i form av Braggitter¹³ istället för vanliga speglar, skulle våglängdsmultiplexering av signalen kunna användas och göra det möjligt att kombinera flera sensorer. Detta har dock inte studerats i denna rapport.

3.5 Detektor

Omvandlingen från ljus till elektricitet görs genom en halvledarfotodiod av *Indium-Galliumarsenid*. Denna diod gör om ljus till en elektrisk ström proportionell mot ljusets intensitet. Strömmen omvandlas sedan genom en transimpedansförstärkare till en utgående spänning från detektorn.

Verkningsgraden hos detektorn är god inom våglängdsområdet från 900nm till 1700nm. Vid 1300nm som är den våglängd som används i systemet är den ungefär 90 %.

¹² Nyquistteoremet säger att sampling måste ske med minst dubbla frekvensen i relation till den högsta frekvensen i signalen för att kunna återge signalen korrekt.

¹³ Ett Braggitter är en våglängdsberoende spegel

Transimpedansen och förstärkningen kan ställas om i två steg vardera och den maximala förstärkningen är 100kV/W^{14} .

Det finns möjlighet att koppla detektorn i AC-läge vilket undertrycker en konstant optisk effekt [6].

3.5.1 Polarisationsfilter

För att kunna koppla den uppmätta intensiteten till polarisationen används ett polarisationsfilter. Intensiteten efter polarisationsfiltret är beroende av den elektriska fältvektorns riktning enligt Malus lag (2.5).

Monteras polarisationsfiltret så att genomsläppningsriktningen är linjerad med den långsamma axeln i kopplaren följs referensen till Poincarésfären som tidigare antagits. Detta gör att den intensitet som mäts efter filtret är direkt kopplad till en punkt på S_1 -axeln i Poincarésfären.

Eftersom S_1 -axeln i Poincarésfären beskriver både horisontal- och vertikalpolariserat ljus måste en översättning av mätvärdena göras. Skalningen görs med hjälp av ekvation (2.16).

Om den okända störningen på fibern medför att amplituden hos signalen minskar innebär det att signalen före polarisationsfiltret får en lägre intensitet. Intensiteten I_0 i (2.16) behöver alltså inte ha samma värde hela tiden.

¹⁴ Enheten kV/W beskriver en koppling mellan spänning och optisk effekt

4 Polarimetrisk signalbehandling

Signalen som kommer in från sensorn måste behandlas för man ska kunna bestämma hur polarisationen har ändrats. Signalbehandlingen är ett av huvudmålen för examensarbetet och metoden som beskrivs i det här kapitlet bestämmer den förenklade Muellermatrisen för den fiberoptiska sensorns påverkan av polarisationsläget.

Genom att behandla alla polarisationstillstånd som vektorer med en längd som är lika med radien på Poincarésfären har ett abstrakt förhållningssätt införts. Detta gör att signalbehandlingen löses genom vektoralgebra.

4.1 Bestämning av de inkommande polarisationstillstånden

Intensiteten in till detektorn kan karakteriseras av följande matrismultiplikation

$$I_{i,j} = PM_j X(t) M_i S_{in} \quad i, j = 1, 2, 3 \quad (4.1)$$

Där P är polarisationsfiltret före detektorn, M_j den inkommande modulationen, $X(t)$ är den okända störningen, M_i moduleringen när signalen skickas in i fibern och S_{in} är Stokesvektorn för ljuset från lasern. Alla matriser utom P är operatorer på Poincarésfären.

Eftersom M_j och M_i följer det mönster som är beskrivet i Figur 3.2 har varje Stokesvektor roterats på ett känt sätt i Poincarésfären. Ett optiskt fält som skickats ut med modulation M_1 kommer att moduleras av M_1 , M_2 och M_3 på vägen in till detektorn. Detsamma gäller fält som skickats ut med M_2 och M_3 . Detta ger nio Stokesvektorer som alla projiceras på S_1 -axeln i Poincarésfären genom filtreringen beskriven av P .

De nio vektorerna ordnas i grupper om tre, samtliga hörande till den modulering de följt först. I en sådan grupp finns information som kan skapa nio ekvationer med sex obekanta. Detta eftersom S_1 komponenten i varje vektor är känd på förhand och enbart S_2 och S_3 saknas. För att ställa upp ekvationssystemet utnyttjas att transformationsmatriserna M_1 , M_2 och M_3 är inverterbara vilket gör att ett samband mellan de tre vektorerna i en grupp finns. Om de okända vektorerna i en grupp kallas a, b och c kan sambandet tecknas

$$\begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{pmatrix} = M_1 M_2^{-1} \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \end{pmatrix} \quad (4.2)$$

$$\begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \end{pmatrix} = M_2 M_3^{-1} \begin{pmatrix} c_1 \\ c_2 \\ c_3 \end{pmatrix} \quad (4.3)$$

$$\begin{pmatrix} c_1 \\ c_2 \\ c_3 \end{pmatrix} = M_3 M_1^{-1} \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{pmatrix} \quad (4.4)$$

Om de kända vektorkomponenterna flyttas till vänster och de okända till höger fås

$$\begin{pmatrix} a_1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} - M_1 M_2^{-1} \begin{pmatrix} b_1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} = M_1 M_2^{-1} \begin{pmatrix} 0 \\ b_2 \\ b_3 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 0 \\ a_2 \\ a_3 \end{pmatrix} \quad (4.5)$$

$$\begin{pmatrix} b_1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} - M_2 M_3^{-1} \begin{pmatrix} c_1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} = M_2 M_3^{-1} \begin{pmatrix} 0 \\ c_2 \\ c_3 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 0 \\ b_2 \\ b_3 \end{pmatrix} \quad (4.6)$$

$$\begin{pmatrix} c_1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} - M_3 M_1^{-1} \begin{pmatrix} a_1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} = M_3 M_1^{-1} \begin{pmatrix} 0 \\ a_2 \\ a_3 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 0 \\ c_2 \\ c_3 \end{pmatrix} \quad (4.7)$$

Alla tre ekvationssystem krävs för en entydig lösning, detta ger ett ekvationssystem enligt (4.14)

$$\begin{pmatrix} \begin{pmatrix} a_1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} - M_1 M_2^{-1} \begin{pmatrix} b_1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \\ \begin{pmatrix} b_1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} - M_2 M_3^{-1} \begin{pmatrix} c_1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \\ \begin{pmatrix} c_1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} - M_3 M_1^{-1} \begin{pmatrix} a_1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{pmatrix} & M_1 M_2^{-1} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{pmatrix} & M_2 M_3^{-1} \\ M_3 M_1^{-1} & \mathbf{0} & \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{pmatrix} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ a_2 \\ a_3 \\ 0 \\ b_2 \\ b_3 \\ 0 \\ c_2 \\ c_3 \end{pmatrix} \quad (4.8)$$

Nollelement i ekvationssystem (4.14) har lämnats tomma.

Ur detta ekvationssystem kan de två okända komponenterna i varje vektor lösas ut, därmed är gruppen av vektorer bestämd. För att bestämma de två återstående gruppernas vektorer görs proceduren om på samma sätt.

Från varje grupp erhålls respektive testsignals polarisationsläge genom att samtliga modulationsmatriser är inverterbara.. De tre testsignalernas polarisationslägen efter att ha passerat genom sensorfibern kan då tecknas enligt

$$P_1 = X(t)M_1S_{in} = M_j^{-1}M_jX(t)M_1S_{in} \quad (4.9)$$

$$P_2 = X(t)M_2S_{in} = M_j^{-1}M_jX(t)M_1S_{in} \quad (4.10)$$

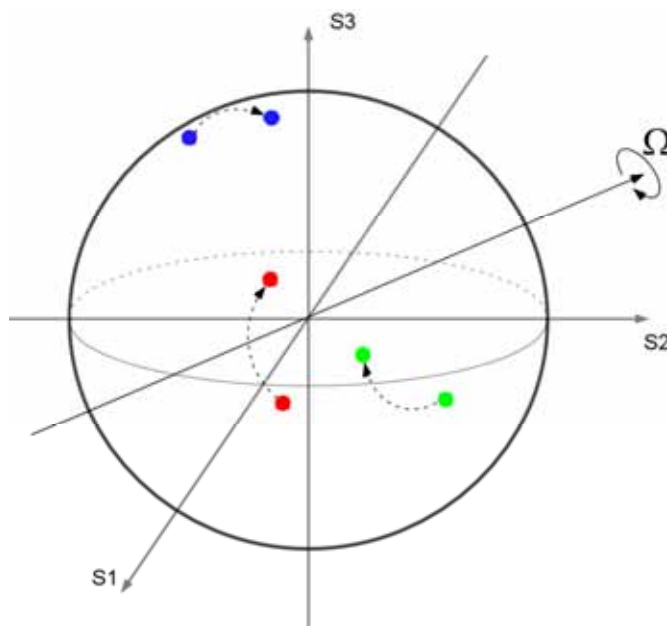
$$P_3 = X(t)M_3S_{in} = M_j^{-1}M_jX(t)M_1S_{in} \quad (4.11)$$

4.2 Fiberns påverkan på polarisationsläget

Alla transformationer av polarisationen kan beskrivas genom en transformationsmatris. Om transformationen är sådan att den påverkar de tre testvektorena på samma sätt finns tillräcklig information för att fullständigt bestämma dess Muellermatris.

Den serie av slumpmässiga rotationer som sensorfibern kan modelleras med påverkar polarisationsläget enligt ekvation (2.17). Produkten är en rotation runt en axel Ω i Poincarésfären. Så länge denna påverkan är konstant kommer de tre testsignalernas lägen i Poincarésfären att vara stationära.

Genom att jämföra de tre testsignalernas läge med deras tidigare läge kan en eventuell förändring av fiberns påverkan detekteras.



Figur 4.1 Fiberns inverkan på polarisationsläget

Enligt tidigare beskrivna ekvationssystem kan testsignalernas lägen i Poincarésfären bestämmas. Dessa lägen kan jämföras med de utskickade testsignalernas polarisationslägen och därmed kan Muellermatrisen för fiberns påverkan, $X(t)$, beräknas.

För att enklast bestämma $X(t)$ görs ett basbyte till den bas som de utskickade testsignalernas polarisationslägen bildar och sedan formuleras $X(t)_M$ med hjälp av de beräknade vektorerna. För att göra ett basbyte till denna bas behövs transformationsmatrisen

$$T_M = \begin{pmatrix} M_1 S_{in} & M_2 S_{in} & M_3 S_{in} \end{pmatrix} \quad (4.12)$$

En övergång från S till den nya basen görs genom en multiplikation med T_M^{-1} .

Fibers Muellermatris kan nu formuleras i den nya basen genom att polarisationsläget för de tre inkommande testvektorerna bestäms i basen S . Genom att multiplicera dessa vektorer med T_M^{-1} kan transformationsmatrisen $X(t)_M$ tecknas.

$$X(t)_M = \begin{pmatrix} T_M^{-1}P_1 & T_M^{-1}P_2 & T_M^{-1}P_3 \end{pmatrix} \quad (4.13)$$

För att sedan gå över till basen S används ett basbyte enligt

$$X(t) = T_M X(t)_M T_M^{-1} \quad (4.14)$$

4.3 En metod för att kvantifiera förändringen

Skillnaden mellan två på varandra beräknade Muellermatriser kommer att spegla hur mycket fiberns påverkan ändras. Transformationen mellan två på varandra inkommande set av testsignaler kan användas som ett mått på denna skillnad och kan tecknas genom att bestämma en rotationsmatris.

$$\Delta X(t) = X(t-1)X(t)^{-1} \quad (4.15)$$

En rotationsmatris för en rotation runt en vektor ω , beskriven av koordinater Ω_1 , Ω_2 och Ω_3 , med en vinkel θ kan bestämmas genom matris (4.16).

$$M(\Omega, \theta) = \begin{pmatrix} \cos \theta + (1 - \cos \theta)\Omega_1^2 & (1 - \cos \theta)\Omega_1\Omega_2 - (\sin \theta)\Omega_3 & (1 - \cos \theta)\Omega_1\Omega_3 + (\sin \theta)\Omega_2 \\ (1 - \cos \theta)\Omega_1\Omega_2 + (\sin \theta)\Omega_3 & \cos \theta + (1 - \cos \theta)\Omega_2^2 & (1 - \cos \theta)\Omega_2\Omega_3 - (\sin \theta)\Omega_1 \\ (1 - \cos \theta)\Omega_1\Omega_3 - (\sin \theta)\Omega_2 & (1 - \cos \theta)\Omega_2\Omega_3 + (\sin \theta)\Omega_1 & \cos \theta + (1 - \cos \theta)\Omega_3^2 \end{pmatrix} \quad (4.16)$$

Eftersom förändringens rotationsmatris har bestämts kan rotationsvinkeln θ tas fram utifrån denna matris. Genom att summera diagonalen¹⁵ i matris (4.16) kan θ lösas ut

$$tr(\Delta X(t)) = tr(M(\Omega, \theta)) = 3 \cos \theta + (\Omega_1^2 + \Omega_2^2 + \Omega_3^2)(1 - \cos \theta) \quad (4.17)$$

Eftersom omegaaxelns längd är lika med Poincaréfärens radie kan rotationsvinkeln beräknas enligt ekvation (4.18).

$$\theta = \arccos\left(\frac{1}{2}(tr(\Delta X(t)) - 1)\right) \quad (4.18)$$

¹⁵ Summan av diagonalelementen i en matris kallas för matrisens *spår* från engelskans *trace*

4.3.1 Diskontinuiteter

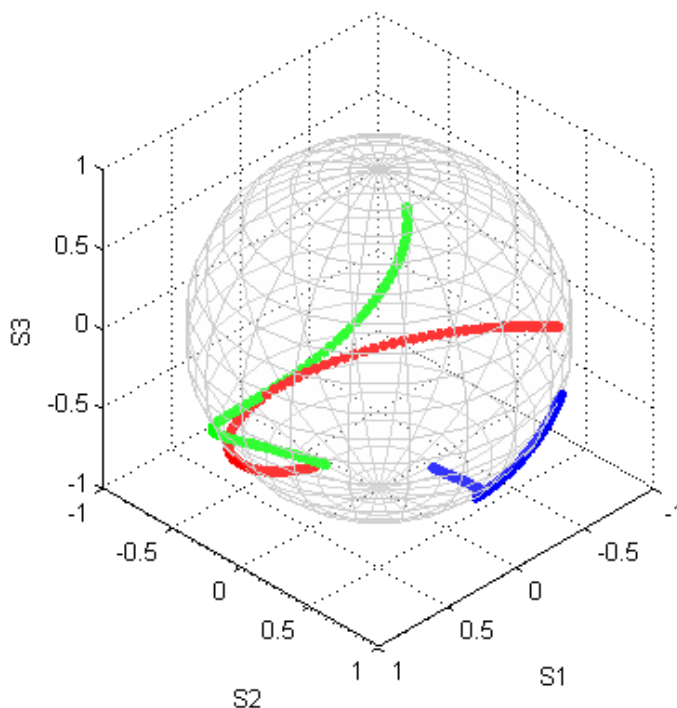
Definitionen av rotationsvinkeln enligt ekvation (4.18) innebär att vinkeln som beräknas ligger i intervallet $[0, \pi]$. En rotation med mer än π kommer därför att ge ett diskontinuerligt utseende på rotationsvinkeln. Rotationen definieras bara i positiv riktning. För en signal som svänger harmoniskt fram och tillbaka uppstår ett skift i omegaaxelns riktning. Hur denna diskontinuitet skall hanteras är inte löst.

4.4 Verifiering av signalbehandlingen

Det linjära ekvationssystemet (4.8) verifierades genom att skapa de nio projektionerna och sedan bestämma de tre testvektorerna utifrån dessa data. Eftersom testvektorerna innan projektionen är kända kunde verifieringen göras genom att jämföra de erhållna testvektorerna med de kända.

4.4.1 Detektion av en mekanisk störning

Genom att implementera och lösa ekvationssystemet enligt (4.8) i MatLab kan algoritmen för att ta fram testsignalernas läge i Poincarésfären utprovas innan data från kabelsensorn finns tillgänglig. Problemet med denna test är att producera en verklighetstrogen signal till den matematiska modellen. En mekanisk störning som påverkar fiberns geometri är svår att modellera men en god approximation är att skapa en dubbelbrytning med varierande orientering. Det är denna insignal som främst använts för att kontrollera den formulerade signalbehandlingen.



Figur 4.2 En dubbelbrytning med varierande orientering har olika påverkan på testsignalerna

Att den dubbelbrytning som använts är periodiskt varierande innebär att de tre testsignalernas polarisationsläge återvänder till sin startpunkt. I en verklig applikation

kommer normalt drift att leda till att de tre testsignalernas polarisationsläge inte återvänder till startpunkten.

När signalbehandlingen har testats med vitt brus har en känslighet för brus påträffats. Bruset ger upphov till att en del av de beräknade polarisationslägena hamnar utanför Poincarésfären, något som är fysiskt omöjligt och i sin tur leder till en orealiserbar Muellermatris [5]. En implementation med minsta kvadratmetoden har också testats med liknande brus känslighet, brusets inverkan kan eventuellt minskas genom successiv medelvärdesbildning.

5 Mätinsamlingssystem

Ett av målen med det här examensarbetet är att färdigställa ett datorbaserat insamlingssystem som kan mäta och signalbehandla den signal som genereras. Den signalbehandling som tidigare formulerats lämpar sig mycket väl att implementera i MatLab eftersom det till stor del handlar om vektoralgebra.

Tidsmultiplexeringen som används i kabelsensorn innebär att intensiteten för de olika projektionerna bara går att mäta inom en begränsad tidslucka. Mätinsamlingssystemet måste vara synkroniserat för att enbart mäta i dessa tidsluckor.

5.1 Signalanpassning

Signalen vid detektorn är periodisk med periodtiden T . Den skall dessutom vara konstant inom varje tidslucka för att hastigt ändras mellan två tidsluckor. Detta innebär ett ganska stort frekvensinnehåll även om själva signalen har en lägre frekvens.

Det höga frekvensinnehållet ställer krav på att detektorn har en tillräcklig bandbredd. En stor bandbredd innebär dock en ökad risk för högfrekvent brus. Ett mått på bruset i detektorn är NEP (*Noise Equivalent Power*)¹⁶ som definieras som minsta detekterbara optiska effekt per roten ur bandbredden. I de flesta fall är brussignalen angiven i ampere per kvadratroten ur bandbredden.

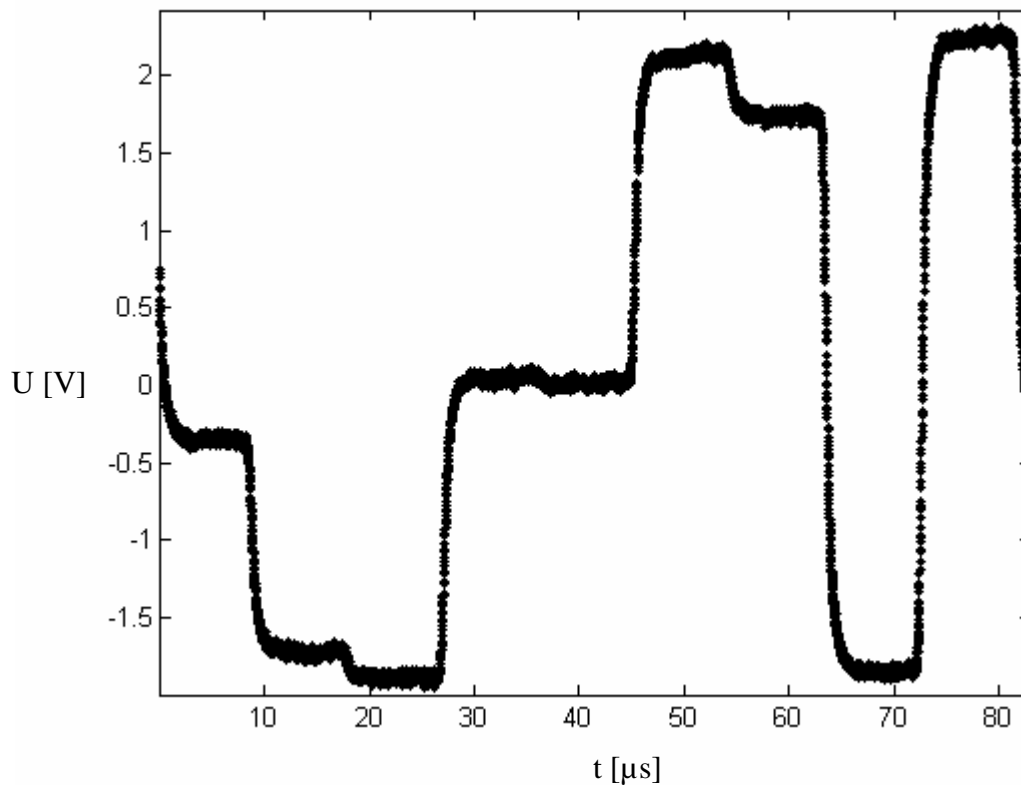
$$NEP = 3 \text{ pA/Hz}^{1/2} \quad (5.1)$$

$$U_{\text{Brus}} = NEP * Z * A * \sqrt{B} = 3 \text{ pA/Hz}^{1/2} * 14 \text{ K}\Omega * 10 * \sqrt{35 \text{ MHz}} = 2,48 \text{ mV} \quad (5.2)$$

Där Z är transimpedansen, A förstärkningen och B bandbredden.

Ett lämpligt lågpassfilter kan reducera det högfrekventa bruset, detta leder dock till ökad stigtid för signalen. Då den intressanta informationen i signalen är spänningsnivån i varje tidslucka, behövs bara ett mätvärde per nivå om signalen är väl filtrerad. Genom att göra mätningen en bit in på varje tidslucka kan en viss försämring av stigtiden tillåtas eftersom man säkerställt att rätt nivå uppnåtts.

¹⁶ NEP anger produkten av den brusekvivalenta optiska effekten och detektorn responsivitet G_r .



Figur 5.1 En period av insignalen till detektorn

Signalen i Figur 5.1 är förstärkt med en mätförstärkare med inbyggt filter (Stanford Research Systems SR560) och samplad med ett digitalt oscilloskop (Tektronix TDS 7104). Filtret är inställt på 300kHz lågpasfiltrering med 6dB/oktav. Stigtiden är klart påverkad av filtreringen men varje nivå ligger ändå konstant i större delen av tidsluckan.

Skillnaden mellan olika nivåer kan variera kraftigt, ibland är skillnaden inte mycket större än bruset och ibland är den mycket stor. En del av bruset genereras av själva mätinsamlingen eftersom mätinsamlingskortet har begränsad upplösning, detta brus kallas för kvantiseringsbrus.

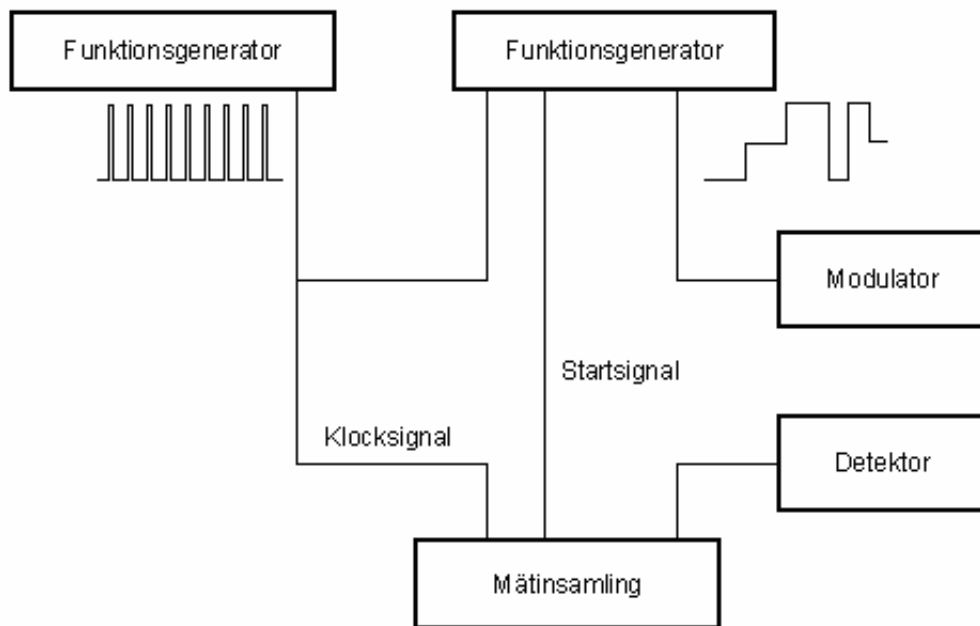
5.2 Datorstödd mätinsamling

För mätinsamling med dator används ett PCMCIA kort från National Instruments på avdelningen för Sensorteknik. Kortet anropas direkt från MatLab med hjälp av Data Acquisition Toolbox.

5.2.1 Styrning av mätningen

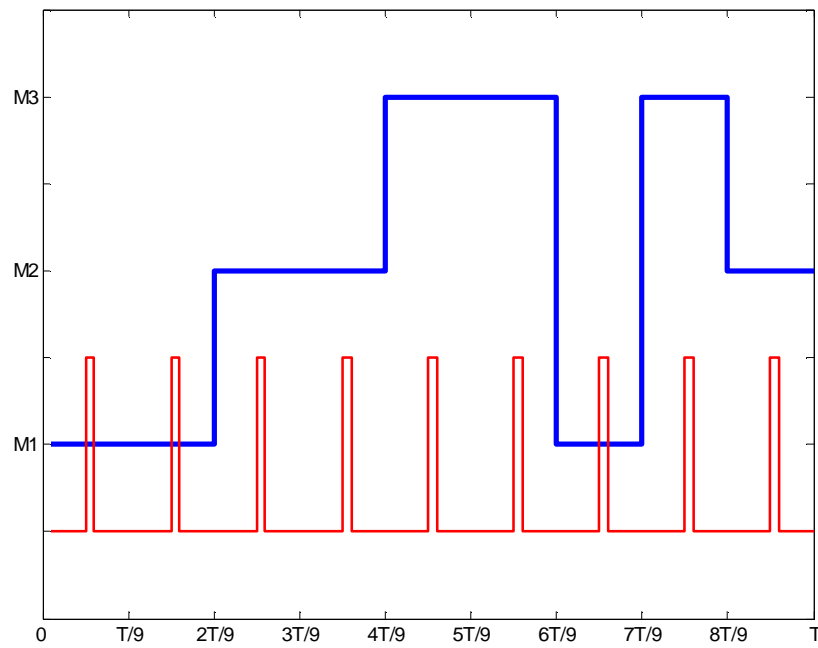
Mätinsamlingssystemet är konstruerat för minsta möjliga samplingstakt och därmed mäts varje nivå enbart en gång.

För att göra mätningen på exakt samma ställen under varje period krävs timing mellan utsignalen till modulorn och mätinsamlingssystemet. Mätinsamlingskortet erbjuder ett flertal möjligheter att styra insamlingen med signaler utifrån. Dessa signaler kan användas för att göra mätinsamlingen på rätt ställe i förhållande till insignalen.



Figur 5.2 Mätinsamlingssystemets uppkoppling

En uppkoppling med två funktionsgeneratorer och mätinsamlingssystemet gjordes. En av funktionsgeneratorerna fick den övergripande rollen att generera klocksignaler, både till mätinsamlingssystemet och till den funktionsgenerator som skapar utsignalen till modulatore. Detta gör att mätningen hamnar på exakt samma ställen i utsignalen varje gång. En startsignal genereras för att mätinsamlingssystemet skall startas i början av perioden.



Figur 5.3 Datainsamlingen synkroniseras med hjälp av en extern klocksignal

Eftersom klocksignalen kan flyttas relativt utsignalen in till modulatorens nollpunkt kan exakt mätställe väljas, detta gör att signalens försämrade stigtid kan kompenseras för genom att mätningen sker tillräckligt sent på varje nivå.

6 Mätningar

6.1 Karaktärisering av modulaton

De olika polarisationslägena som används skapas genom modulaton, vars funktion är viktig för sensorns funktion.

I manualen som medföljer modulaton [7] är förspänningsingången mycket knapphändig beskriven eftersom den har en underordnad betydelse för modulatonns funktion i dess tilltänkta applikation. För att denna ingång på modulaton skall kunna användas som polarisationsmodulator behöver dock dess karaktäristik vara känd.

Kopplingen mellan fasförskjutning och spänning för en modulator brukar anges genom V_π , detta är den spänning där fasförskjutningen är lika med 180° . I manualen finns denna spänning enbart angiven för högfrequensdelen och inte för förspänningsdelen.

En teoretisk utredning av hur effektiv modulaton är på att modulera polarisationsläget finns presenterad i kapitel 3.2.1. Denna effektivitet kan uppmätas men det är enklare att mäta den faktiska förskjutningen mellan den elektriska fältvektorns komponenter. Detta kan göras genom att bestämma Stokes vektor efter modulaton. Denna fasförskjutning är av intresse när modulatonns transformationsmatriser skall tas fram.

6.1.1 Anslutningar till modulaton

Modulaton levereras med kontakterad fiber in till och ut från modulaton. Denna fiber är starkt dubbelbrytande för att bibehålla den polarisationsriktning som läggs in i fibern. Den långsamma axeln i fibern är dessutom linjerad med modulatonns z-axel. Problemet med denna inkoppling är att om polarisationen in i fibern inte sammanfaller exakt med någon av fiberns axlar kommer polarisationsläget att ändras innan ljuset infaller kristallen. Eftersom fiberns långsamma axel är linjerad med kristallens z-axel kommer dubbelbrytningen i fibern och den elektriskt kontrollerade dubbelbrytningen i modulaton innebära en rotation kring samma axel i Poincarésfären.

Resultatet av fiberns påverkan blir en okontrollerad rotation följd av en kontrollerad rotation i modulaton och sedan ytterligare en okontrollerad rotation ut från modulaton, alla rotationer sker approximativt med samma omegaoperator. Detta kan matematiskt beskrivas som

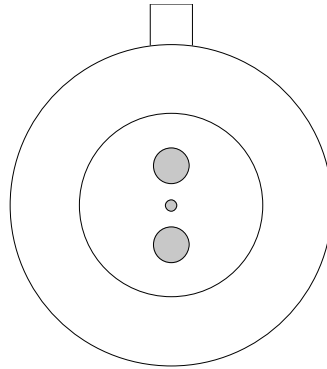
$$S_{ut} = M_{f2} M_i M_{f1} S_{in} \quad (6.1)$$

Där M_{f1} och M_{f2} är Muellermatrisen för fibern in till, respektive ut från, modulaton. M_i är Muellermatrisen för modulaton vid de tre olika modulationsspänningarna.

Även om M_{f1} och M_{f2} är okända kan deras inverkan på polarisationstillståndet i sensorfibern anses vara lika för alla tre testsignalerna. Detta gör att de förblir ortogonala.

6.1.2 Problem med modulatonns kontakter

I manualen finns angivet hur modulatonns anslutningsfiber är ansluten relativt kristallens axlar, den långsamma axeln i fibern skall vara linjerad med kontaktens klack enligt



Figur 6.1 Modulatorns anslutning skall vara linjerade med den långsamma axeln

Vid kontroll i mikroskop visade det sig att fiberns orientering var 90° fel på fibern in till modulatore. Detta gör att det är svårt att veta hur fibern egentligen förhåller sig till kristallen, något som ytterligare motiverar en experimentell kontroll av funktionen hos modulatore.

6.1.3 Experimentell bestämning av utgående polarisationslägen

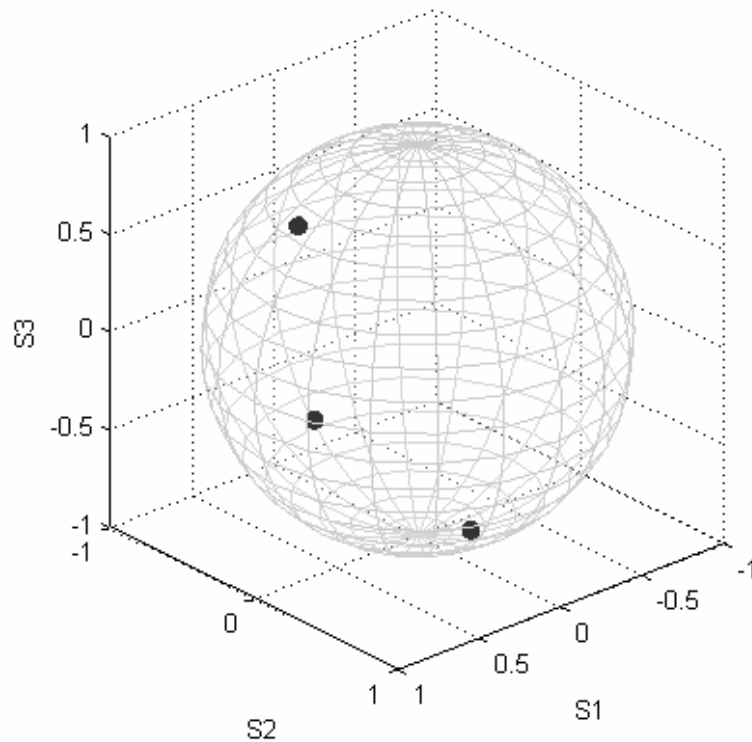
Enligt ekvation (3.11) är det två olika variabler som bestämmer vilket polarisationsläge som genereras av modulatore. Den inkommande polarisationen är kopplad till det k som bestämts i kapitel 3.2.2. Polarisationen ställs in genom att rotera kontaktarna mellan den polarisationsbevarande kopplaren och modulatore.

Vid experimentet används det förfarande som behandlas i kapitel 2.6 för att bestämma Stokes vektor. Poincarésfären definieras under experimentet utifrån modulatore så att positiva S_1 sammanfaller med z-axeln i modulatore.

Mätningar gjordes både med olika inkommande polarisationslägen och olika spänningar in till modulatore, dels för att verifiera de teoretiska resonemang som diskuteras i kapitel 3.2.2 och dels för att bestämma fasförskjutningen som utretts i kapitel 3.2.1.

Eftersom experimentet tar en stund att genomföra kommer inte de omgivande faktorerna att vara konstanta under hela experimentet. Kabelsensorn är uppkopplad på ett optikbord för att minimera oönskade vibrationer som kan påverka mätresultatet. Även om de uppmätta polarisationslägena inte är exakta kan de ge en fingervisning om hur modulatore beter sig.

För att bestämma fasförskjutningen bestämdes först det linjärpolariserade läge in till modulatore där S_1 komponenten var lika med noll för alla modulationer. Detta läge motsvarar en fältvektor som infaller med 45° vinkel mot z-axeln i modulatorens kristall. Fasförskjutningen kan därefter bestämmas som vinkeln mellan polarisationslägenas Stokes vektorer eftersom rotationen sker kring S_1 .

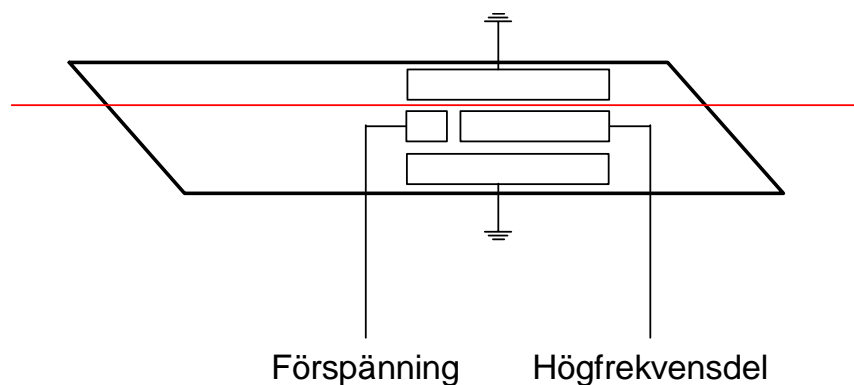


Figur 6.2 Exempel på tre olika polarisationslägen skapade av modulatern

Vid de mätningar som genomfördes uppgick den maximala fasförskjutningen till ungefär $\Gamma = \frac{4\pi}{9}$, vid +50V in till modulatern. Detta är mindre än de teoretiska $\Gamma = \frac{2\pi}{3}$ som behövs för att skapa tre ortogonala tillstånd i Poincarésfären. Dessutom uppmättes något olika fasförskjutning för negativa respektive positiva spänningar in till modulatern. Vilket finns stöd för i den teoretiska beräkningen i kapitel 3.2.1.

6.1.4 Slutsatser av modulaterns karaktäristik

Längden på elektroderna i förspänningsingången på modulatern påverkar fasförskjutningen i respektive axel enligt ekvation (3.4) och (3.5). Denna längd är troligen förklaringen till den begränsade fasförskjutning som erhålls. Figur 6.3 visar en schematisk bild över fasförskjutningsdelen i modulatern från datablad [5].



Figur 6.3 Schematisk bild över fasförskjutningsdelen i modulatern

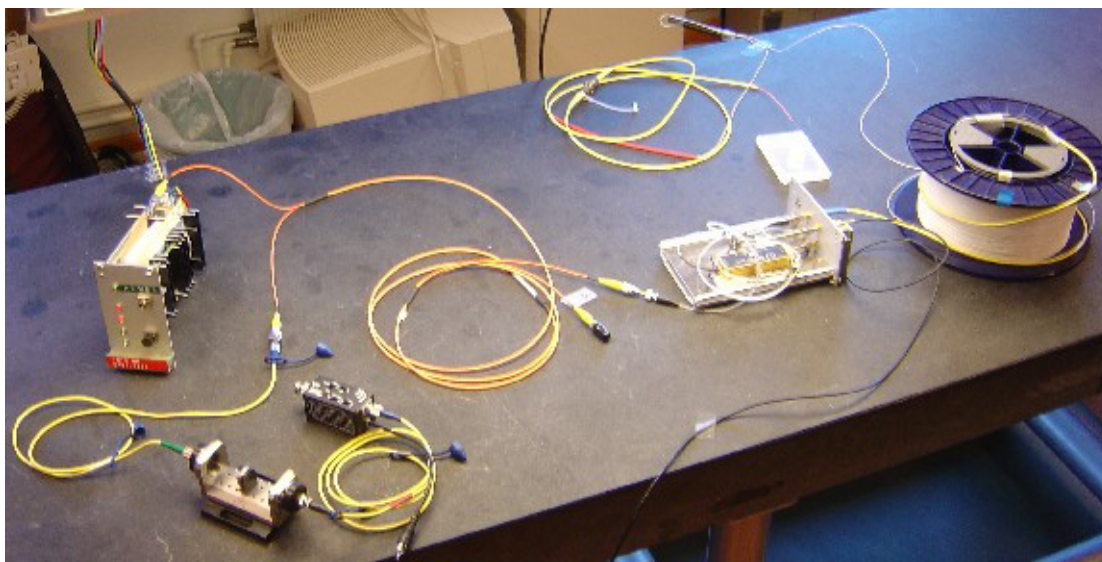
Den begränsade fasförskjutningen gör att de tre testsignalerna inte kommer att vara ortogonala och därmed inte uppfylla de teoretiska kraven.

Med hjälp av matris (4.16) och den uppmätta fasförskjutningen kan de egentliga transformationsmatriserna, M_1 , M_2 och M_3 bestämmas. Osäkerheten i de mätningar som genomförts får dock stor inverkan på transformationsmatriserna och det kan krävas en grundligare mätning för att bestämma dessa.

6.2 Mätning av optisk dämpning i kabelsensorn

Laborationsuppkopplingen av kabelsensorn består av en hel del optiska komponenter vilka var och en påverkar laserljusets intensitet. Det är nödvändigt att utreda hur mycket optisk effekt som finns kvar att detektera efter att laserljuset passerat hela systemet för att kunna jämföra denna effekt med det brus som detektorn genererar.

Varje komponent har en dämpning som i de flesta fall finns angiven i specifikationer, i detta kapitel kommer enkla mätningar att presenteras som testar dessa värden.



Figur 6.4 Laborationsuppkoppling med 1 km sensorfiber

6.2.1 Fiberanslutning

I den fiberoptiska kabelsensorn används en typ av fiberoptiska kontakter som kallas för FC¹⁷ (Fiber-optic Connector), detta är en kontaktstandard som kan användas för alla typer av fiber.



Figur 6.5 FC-kontakt

Kontakten består av en gängad hylsa och en plastinsats. Inuti plastinsatsen fästs fibern och sedan poleras hela änden så att fiberkärnan friläggs. I Figur 6.5 syns även den klack som nämns i kapitel 6.1.1.

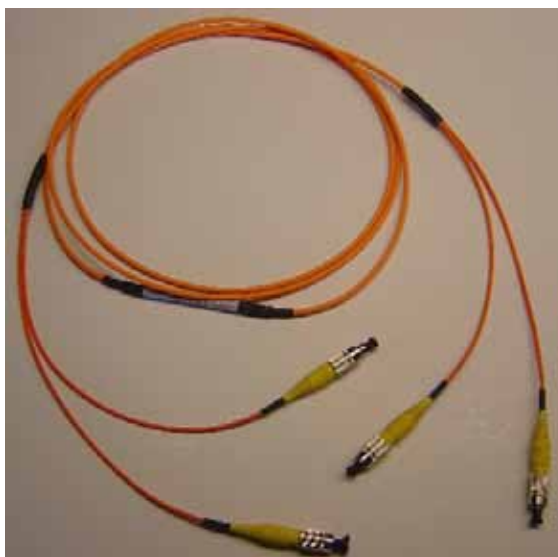
¹⁷ Kontaktstandard utvecklad av Nippon Electric Co (NEC)

Alla övergångar mellan fiber innebär en förlust. För FC-kontakter med monomodfiber hamnar dämpningen strax under 0,3 dB. Dämpningen beror på snäva toleranser eftersom monomodfiberns kärna har mycket små dimensioner.

Om kontakten utsätts för smuts ökar dämpningen radikalt, en rengöring med speciellt optikpapper och etanol är då nödvändig.

6.2.2 Fiberoptisk kopplare

En kopplare används för att dela upp en optisk signal till flera olika vägar, det finns kopplare med olika delning. Den kopplare som används i kabelsensorn har dels till uppgift att koppla in laserljuset till modularen och dels att ta den signal som kommer från modularen till detektorn. Hälften av den signal som kommer från modularen kommer därför att ledas in till lasern istället för till detektorn detta är inte önskvärt och kan avhjälpas med hjälp av en polarisationsbevarande cirkulator¹⁸. Detta är dessvärre en mycket dyr komponent jämfört med en kopplare.



Figur 6.6 Lika delande polarisationsbevarande kopplare

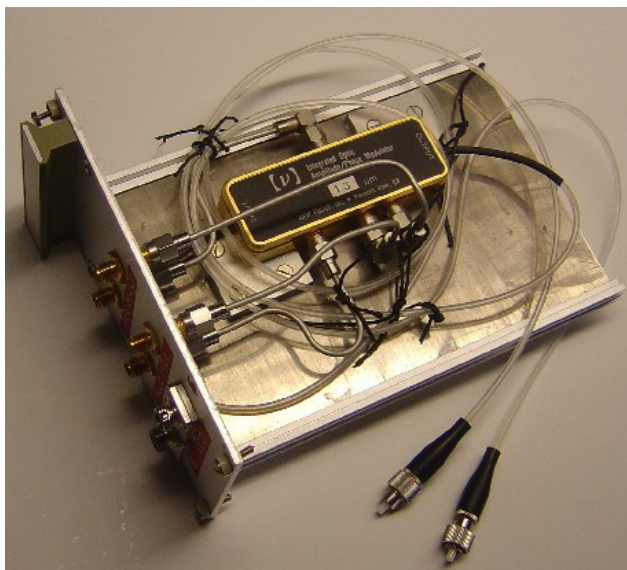
Kopplaren är gjord av polarisationsbevarande pandafiber och den inkommande effekten delas lika i de två grenarna. Detta innebär en ytterligare dämpning på 3 dB i varje riktning.

6.2.3 Modulator

Modularen är den komponent som påverkar laserljusets intensitet mest. Tillverkaren anger en inlänkingsdämpning¹⁹ för modularen, denna dämpning uppgår enligt datablad [6] till 6 dB. Vid kontrollmätning var dämpningen strax över 6dB. Eftersom modularen används i bägge riktningar ger denna komponent upphov till en dämpning på minst 12dB.

¹⁸ En cirkulator låter ljuset cirkulera från en ingång till en annan utan dämpning

¹⁹ Inlänkingsdämpningen definieras som kvoten mellan den optiska effekten på utgången och ingången



Figur 6.7 Montage av modulaton

Modulatorns två optiska anslutningar syns längst ner i Figur 6.7, de elektriska anslutningsmöjligheterna är monterade i en rack och kan ses längst till vänster i samma figur.

6.2.4 Spegel

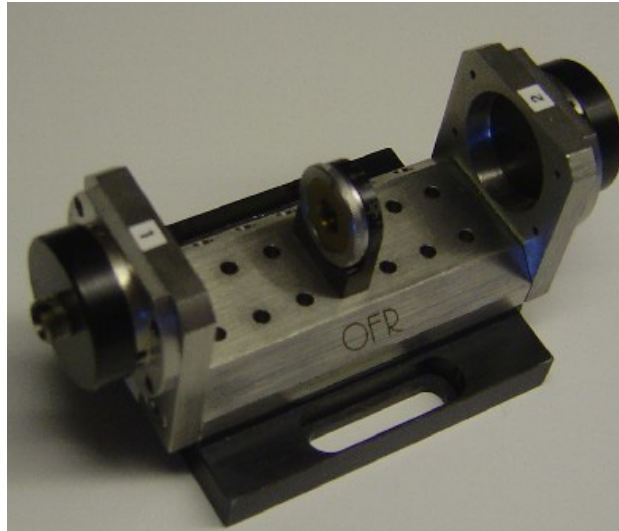
Den spegel som sitter i slutet på detektorfibern är inte helt ideal eftersom endast ett tunt lager guld använts. En mindre del av ljuset kommer därför att försvinna ut ur fibern istället för att reflekteras tillbaka. Vid kontrollmätning med en kopplare kunde denna dämpning uppmätas till strax över 1 dB.

Kommersiellt tillgängliga fiberoptiska reflektorer har enligt datablad [11] en typisk dämpning på 0,6 dB.

6.2.5 Detektor

Polarisationsfiltret som används i detektorn är placerat i en så kallad optisk bänk, som kollimerar²⁰ laserljuset genom en lins för att infalla på det filter som är inpassat i bänken. För att fokusera ljuset in i fibern igen används ytterligare en lins.

²⁰ Kollimera innebär att laserstrålen breddas och att ett knippe parallella strålar bildas

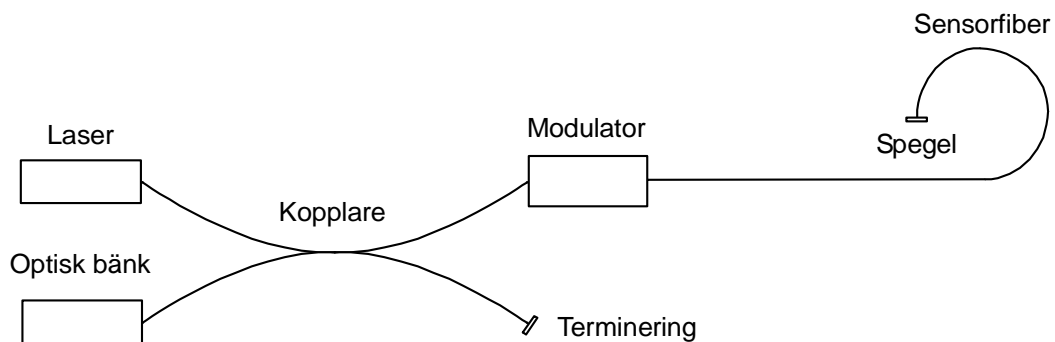


Figur 6.8 Optisk bänk med inpassat polarisationsfilter

Fokuseringen av laserljuset är särskilt kritisk för linjeringsfel eftersom en betydande del av effekten går förlorad om inte laserljuset fokuseras rätt in i fiberkärnan. Denna dämpning är beroende av hur väl bänken är inställd. Vid kontrollmätning dämpade den optiska bänken ca 1,6 dB.

6.2.6 Slutlig dämpning i hela kabelsensorn

Genom att summera de ingående optiska komponenternas teoretiska dämpningar kan en uppskattning av den optiska effekten strax innan detektorn göras.



Figur 6.9 Schematisk bild av laborationsuppkopplingen

Kopplaren och modulatorens står tillsammans för en dämpning på 18 dB från laser till detektor, därtill kommer spegeln och den optiska bänken. Utan hänsyn tagen till kontaktförluster blir dämpningen strax över 20 dB.

Lasern som används i laborationsuppkopplingen lämnar en effekt som kan regleras mellan ungefär 1 mW och 10 mW, denna effekt beror på drivelektroniken. Vid kontrollmätning mättes effekten upp till +3 dBm vilket kan översättas till optisk effekt genom

$$10^{\frac{+3dBm}{10}} * 1mW = 2mW \quad (6.2)$$

En dämpning av signalen med 20 dB ger

$$-20dB = 10 \log \left(\frac{P_{ut}}{2 \text{ mW}} \right) \quad \rightarrow \quad P_{ut} = 10^{\frac{-20dB}{10}} * 2 \text{ mW} = 20 \mu\text{W} \quad (6.3)$$

Den intensitet som återstår efter att ljuset har passerat hela kabelsensorn är 1 %.

Vid kontrollmätning av laserljusets intensitet strax innan detektorn uppmättes en effekt på -19,6 dBm vilket ger

$$10^{\frac{-19,6dBm}{10}} * 1 \text{ mW} = 11 \mu\text{W} \quad (6.4)$$

Detta är något sämre jämfört med det beräknade i ekvation (6.3) och detta beror troligen på de 10 kontaktskarvar som laserljuset passerar på sin väg genom kabelsensorn.

6.2.7 Slutsatser av optisk dämpning

Hur mycket optisk effekt som finns kvar efter hela kabelsensorn har betydelse för detektionen och om man jämför detektorns brusnivå med nyttosignalens storlek kan ett signalbrusförhållande bestämmas. Problemet med detta förhållandet är att ett polarisationsfilter finns inpassat innan detektorn och detta gör att nyttosignalens storlek varierar med polarisationen.

I kapitel 3.5 utreds den optiska detektor som används i kabelsensorn, maximala känsligheten är 100kV/W och verkningsgraden i det aktuella våglängdsområdet uppgår till 90%. Den kvarvarande intensiteten hos laserljuset ger upphov till en spänning efter detektorn som kan beräknas enligt

$$U_s = 100 \text{ kV/W} * 90\% * 11 \mu\text{W} = 0,99 \text{ V} \quad (6.5)$$

Jämförs denna spänning med det brus som detektorn själv genererar, beräknat i ekvation (5.2), 2,48 mV fås ett stort signalbrusförhållande vilket är mycket bra. Har ljuset ortogonal polarisation i relation till polarisationsfiltret fås dock ett mycket lågt signalbrusförhållande eftersom ingen intensitet infaller detektorn.

6.3 Mätningar med hela kabelsensorn

Inledande experiment med kabelsensorn som helhet har syftat till att testa det mätinsamlingssystem som konstruerats och för att kvalitativt kunna bedöma hur signalen beter sig vid olika störningar på fibern.

6.3.1 Referens för polarisationsläget

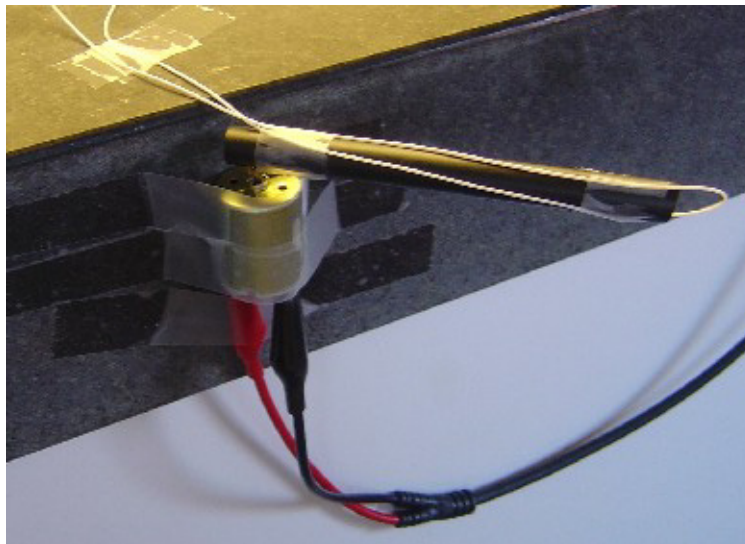
När hela kabelsensorsystemet används behövs en generell referens till hur Poincarésfären skall tolkas. Eftersom laserljuset är helt linjärpolariserat faller det sig naturligt att använda laserns polarisationsläge som referens. Den riktning som laserljuset är polariserat i får representera den positiva S_1 -axeln i Poincarésfären.

Den rotation som kan göras mellan den polarisationsbevarande kopplaren och modulaton flyttar modulatonns omegaaxel relativt referensaxeln. Rotationsvinkeln är dock densamma.

Det polarisationsfilter som används i detektorn skall vara linjerat med S_1 för att ekvationssystem (4.8) skall kunna lösas. Om filtret till exempel är linjerat med modulatonns omegaaxel blir projektionen i filtret lika för de tre modulationerna av varje signal eftersom rotationen sker runt denna axel.

6.3.2 Periodisk störning på fibern

Det finns ett flertal fysiska påfrestningar som påverkar polarisationstillståndet i fibern. För multimodfiber är några av dessa utredda både teoretiskt och experimentellt i en tidigare rapport [8]. Även om rapporten handlar om multimodfiber kan en del av resonemanget användas även för monomodfiber.



Figur 6.10 En elmotor tillsammans med en sinusgenerator skapar en periodisk böjning på fibern

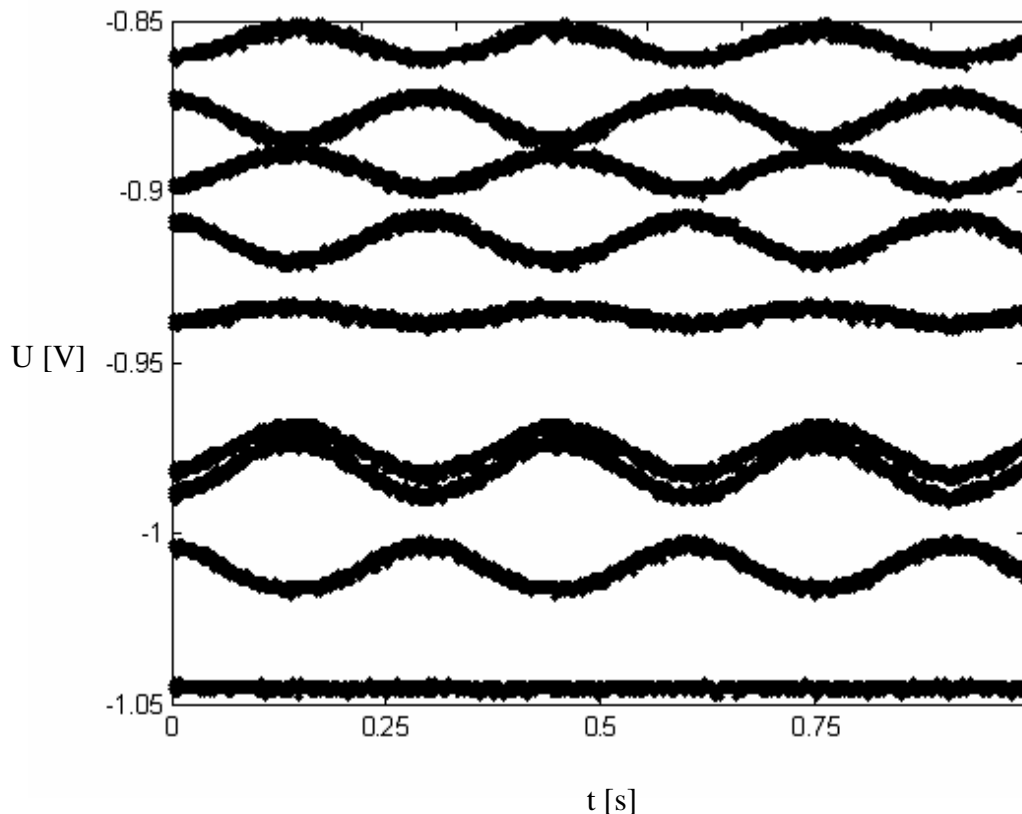
För att skapa en reproducerbar störning på fibern användes en elmotor för att generera en böjning. Signalen till elmotorn skapades av en sinusgenerator vilket ledde till att elmotorn svängde fram och tillbaka, svängningen fungerade bra vid låga frekvenser.

Störningen är troligen inte helt realistisk med tanke på kabelsensorns tänkta applikation, de störningar som då uppkommer är mycket mindre. Den laborativa störningen är tänkt att förenkla analysarbetet.

6.3.3 Mätresultat med periodisk störning

För att verifiera att det är den låga frekvensen hos störningen som mäts krävs att mätinsamlingen görs under längre tid. Vid mätningen användes max förstärkning på detektorn men ingen förstärkning på mätförstärkaren (Stanford Research Systems SR560). I övrigt användes den signalanpassning som behandlas i kapitel 5.1. I Figur 6.11 har 10000 perioder av signalen mätts, vilket motsvarar strax under en sekund.

De nio projektionerna i varje period av utsignalen kommer att påverkas olika av störningen och det är först efter en vidare signalbehandling som störningens påverkan på polarisationsläget kan bestämmas.



Figur 6.11 De nio projektionerna under en sekund

Störningens sinusformade utseende känns igen i de nio projektionerna. Vid kontrollräkning i Figur 6.11 ses att ungefär 3 perioder av störsignalen finns representerade.

$$f_{\text{störning}} = \left(\frac{10000 * 90 \mu\text{s}}{3} \right)^{-1} \approx 3 \text{ Hz} \quad (6.6)$$

Resultatet från (6.6) stämmer bra överens med den på sinusgeneratoren inställda frekvensen.

Bruset från detektorn som har beräknats enligt ekvation (5.2) stämmer med signalvariansen som syns i Figur 6.11.

6.3.4 Polariseringseffekter i modulatorens

Den totala intensiteten hos ljuset innan polarisationsfiltret förutsätts vara densamma vid alla nio mätpunkter i en period av utsignalen. I modellen av hela kabelsensorn är det bara störningen på sensorfibern som tillåts påverka intensiteten, övriga komponenter påverkar enbart polarisationsläget. Detta är dock en idealisering.

Vid kontroll utan polarisationsfilter i detektorn fanns små skillnader i dämpning mellan olika modulationslägen, vilket tyder på att modulatorens har svagt polariserande effekter. Det kan också finnas små polariserande effekter i den polarisationsbevarande fiber som används, dels i kopplaren och dels i modulatorens kontakter.

En studerad artikel [10] presenterar mätningar av denna dämpning på en liknande modulator. Dämpningen på grund av polarisationsriktning uppgavs vara maximalt 0,063 dB. Den modulator som används i kabelsensorn har en längre vågledare och vid en enklare kontrollmätning visade sig skillnaden mellan högsta och minsta effekt vara 1,5 dB.

Skalningen från uppmätt intensitet till Stokes komponent (2.16) är känslig för ändringar av den totala intensiteten. Den dämpning som modulatorens introducerar kan påverka denna skalning eftersom inte alla mätvärden kan skalas med samma totala intensitet.

6.3.5 Slutsatser av mätningar med kabelsensor

Den störning på fibern som kapitel 6.3.2 introducerar kan med lätthet detekteras. I en verklig applikation kommer kabelsensorn att utsättas för mycket mindre mekaniska signaler.

Den varierande totala intensiteten gör att den i kapitel 4 formulerade signalbehandlingen inte har kunnat användas eftersom skalningen enligt (2.16) inte kunde göras.

6.4 Slutsatser av genomförda mätningar

På grund av problemen med att kvalitativt bestämma den totala intensiteten har inte den polarimetriska signalbehandlingen kunnat användas på data från kabelsensorn. Det faktum att de tre utskickade testvektorerna inte är ortogonala har försvårat en eventuell bestämning av den totala intensiteten. Även om det inte går att åstadkomma tre ortogonala Stokesvektorer fungerar däremot signalbehandlingen för att ta fram alla nio vektorer utifrån projektionen på en axel eftersom den är generell och bara kräver att transformationerna är unitära.

Responser från störningen är stor, i Figur 6.10 kan ses att fibern böjs över en sträcka på ungefär 5 cm och utslaget på elmotorn är mycket litet. Slutsatser av sensorns kapacitet i en mer verklig applikation är dock svåra att dra på grundval av så pass enkla tester.

Den polarisationsberoende dämpningen försvårar den efterföljande signalbehandlingen eftersom den totala intensiteten behövs för att göra skala de värden som mäts till Poincarésfären.

Även den polarisationsbevarande kopplaren efter modulatorens påverkar polarisationen hos laserljuset på ett sätt som är beroende av polarisationsriktningen in till kopplaren. Detta har testats i den matematiska modellen och bör kunna tas med i signalbehandlingen eftersom denna effekt är väl definierad.

Detektionen av ljuset behöver förändras för att den signalbehandling som formulerats skall kunna användas.

7 Ortogonal detektion

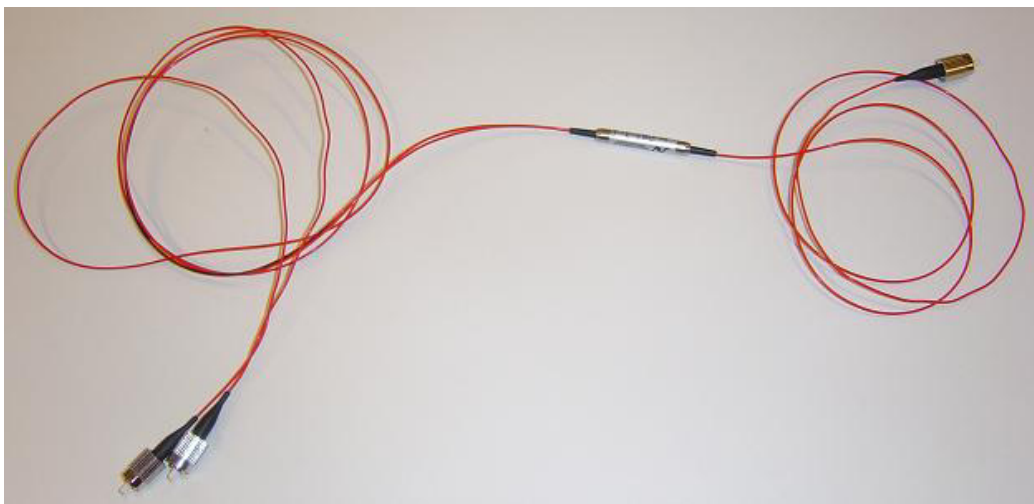
Den detektor som används i kabelsensorn mäter intensiteten efter ett polarisationsfilter, denna intensitet måste tolkas med hjälp av den totala intensiteten. Problemet med denna detektion är att upplösningen blir olika för olika polarisationstillstånd eftersom det brus som genereras blir proportionellt större vid en lägre intensitet. Detta gör att detektionen i vissa områden av Poincarésfären får mycket god upplösning medan området på motsatt sida av densamma får en mycket dålig upplösning. Det har dessutom visat sig vara svårt att bestämma den totala intensiteten med hjälp av en detektor.

Dessa problem kan lösas genom att använda ortogonal detektion med två detektorer, genom denna detektion mäts ortogonala polarisationstillstånd samtidigt. Detta innebär att om intensiteten är låg i den ena detektorn så måste intensiteten vara hög i den andra. Upplösningen blir på så sätt god för samtliga polarisationstillstånd och den totala intensiteten blir enkel att bestämma.

Mätinsamlingssystemet byggdes ut för att synkront kunna mäta effekten från två detektorer, i övrigt fungerade kontrollsignalerna enligt kapitel 5.2.1.

7.1 Polarisationsdelare

Den dubbelbrytande effekten hos vissa kristaller vittnar Figur 2.3 om, denna skillnad i brytningsindex mellan två axlar kan användas för att dela upp den elektriska fältvektorn i dess komponenter. Med en *PBS (Polarization Beam Splitter)* delas ljuset upp i två ortogonala polarisationer.



Figur 7.1 Kontakterad polarisationsdelare

Eftersom ortogonala polarisationstillstånd detekteras samtidigt kan den totala intensiteten beräknas vid varje mätning. Skalningen till Poincarésfären kan tecknas genom uppmätta effekter från polarisationsdelaren enligt

$$S_1 = \frac{E_x^2 - E_y^2}{E_x^2 + E_y^2} \quad (7.1)$$

Detta gäller under förutsättning att detektionen är sådan att den sammanfaller med den för kabelsensorn uppsatta referensaxeln.

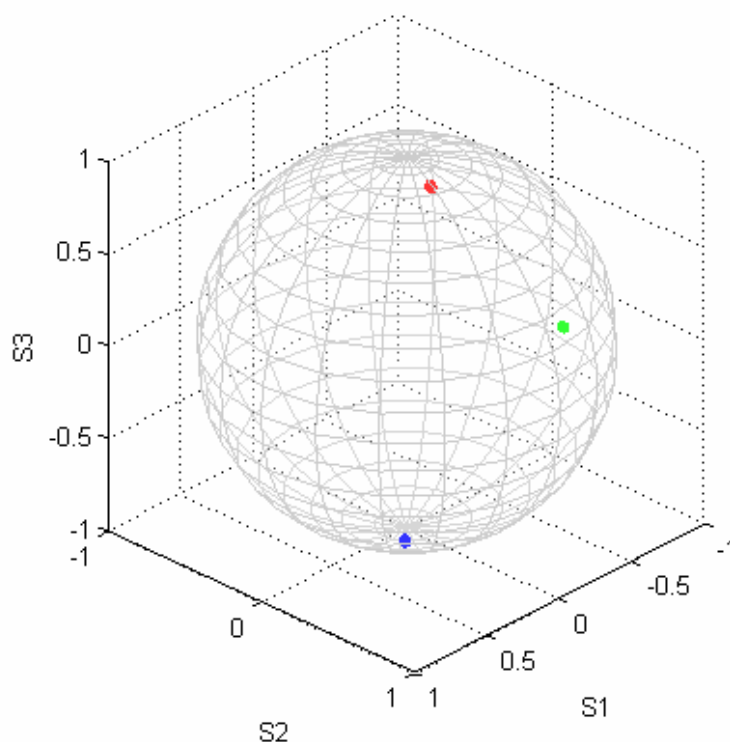
7.2 Mätningar med ortogonal detektion

När skalningen till Poincarésfären fungerar tillfredsställande kan den signalbehandling som tas fram i kapitel 4 användas för att beräkna testsignalernas polarisationslägen. Dessa lägen påverkas av osäkerheten i transformationsmatriserna, M_1 , M_2 och M_3 , och av det brus som förekommer.

De mätningar som gjorts syftar till att testa den signalbehandling som formulerats och om det är möjligt, bilda en uppfattning om vilka polarisationsförändringar som en mekanisk störning ger.

7.2.1 Test av den matematiska modellen

Ett första försök gjordes utan mekanisk påverkan för att verifiera att de uppmätta fasförskjutningarna ger transformationsmatriser som ger en lösning till ekvationssystem (4.8) som tillhör Poincarésfären. Datainsamlingen pågick under 20 sekunder och sensorfibern påverkades inte av någon kontrollerad mekanisk störning.



Figur 7.2 De tre testsignalernas polarisationsläge under 20 sekunder

Polarisationslägena i Figur 7.2 kan betraktas stationära då fibern inte påverkas av någon mekanisk störning. Med temperatur och lufttryck kommer dock en långsam förflyttning av respektive testsignals polarisationsläge att ske.

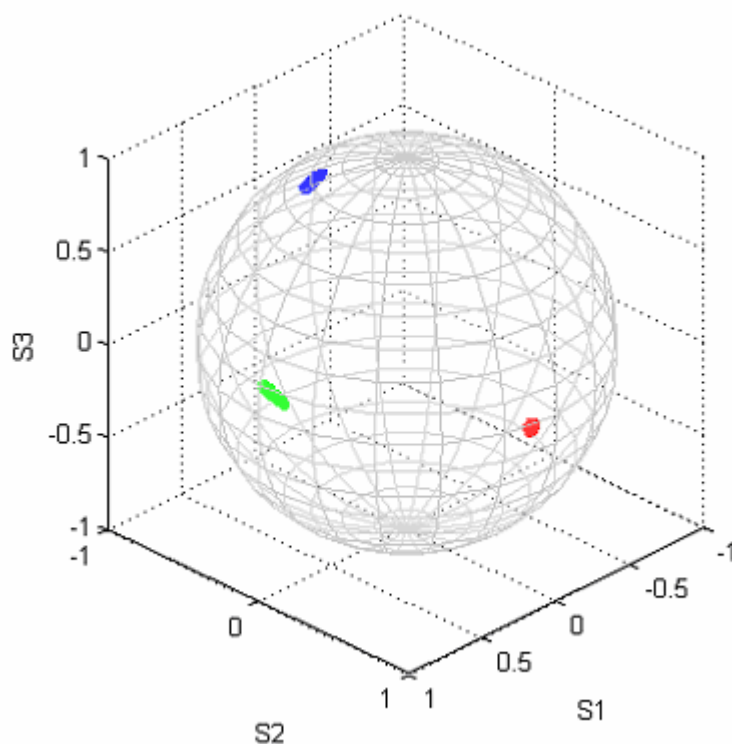
7.2.2 Mätning med en mindre mekanisk störning

En mindre mekanisk störning än den som presenterats i Figur 6.10 konstruerades för att kunna skapa en periodisk mekanisk påverkan med en högre frekvens och en mindre amplitud. Den i kapitel 6.3.2 beskrivna störningen visade sig vara alldeles för kraftig och orealistisk i en verklig applikation. En elektromagnetisk vibrator användes för att skapa en periodisk mindre böjning av sensorfibern.



Figur 7.3 En vibrator böjer fibern med en högre frekvens och en mindre amplitud

Med hjälp vibratorn och uppställningen enligt Figur 7.3 skapades en böjning av fibern med en frekvens på 140 Hz. Vibratorns utslag är minimalt och därmed är också den böjning som fibern utsätts för mycket liten. Datainsamlingen pågick under 20 sekunder.

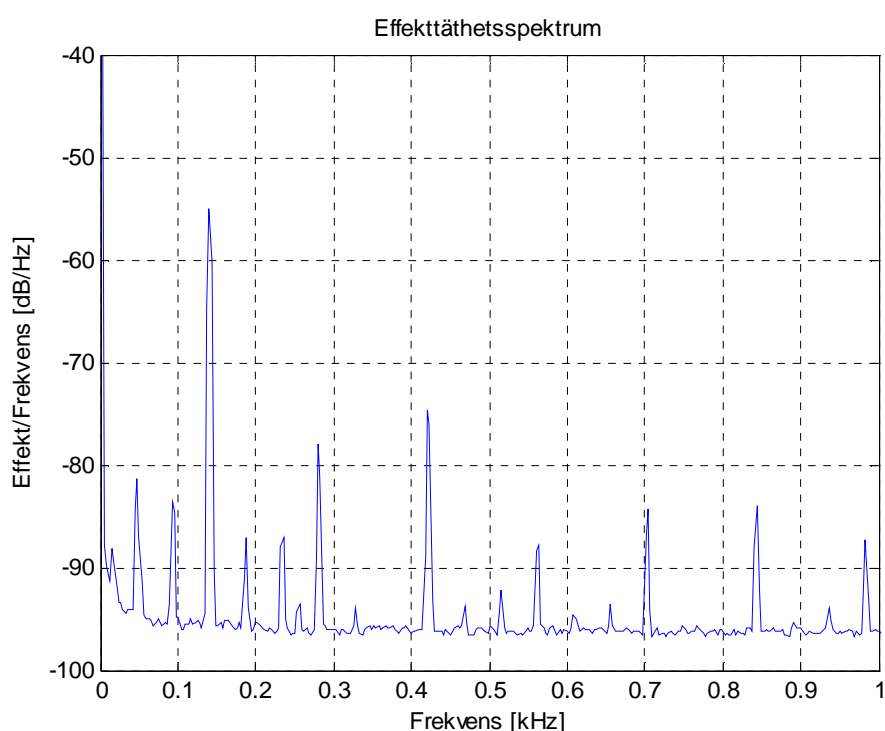


Figur 7.4 Vibratorns mekaniska störningar påverkar två av de tre testsignalerna

När fibern böjs av vibratorn kommer de tre testsignalernas polarisationsläge att ändras olika, något som syns tydligt i Figur 7.4. Läget för en av testsignalerna (med röd markerad) påverkas inte nämnvärt av den böjningen medan de övriga testsignalerna ändrar sitt polarisationsläge. Detta innebär att den teori som ligger till grund för kabelsensorn visar sig fungera i praktiken även om modulatoren inte kan skapa tre ortogonala polarisationslägen.

7.2.3 Frekvensinnehåll

För att verifiera att den mekaniska störningen faktiskt finns representerad i det som sensorn mäter kan frekvensinnehållet i en av projektionerna studeras. I Figur 7.4 finns frekvensinnehållet för den blå testsignalen i Figur 7.4. Denna testsignal rör sig mest i relation till S_1 -axeln i Poincarésfären och kommer därmed också ha störst energi i effekttäthetsspektret.



Figur 7.5 Effekttäthetsspektrum för en av projektionerna

Effekten är skattad mot bandbredden i Figur 7.5. Frekvensen hos den mekaniska påverkan syns tydligt som en spik vid 140Hz, även ett antal övertoner till denna frekvens finns med i spektrat.

Det är stor skillnad i effekt mellan signalen och de första övertonerna och det är ett tecken på god linjäritet.

7.3 Fältprov

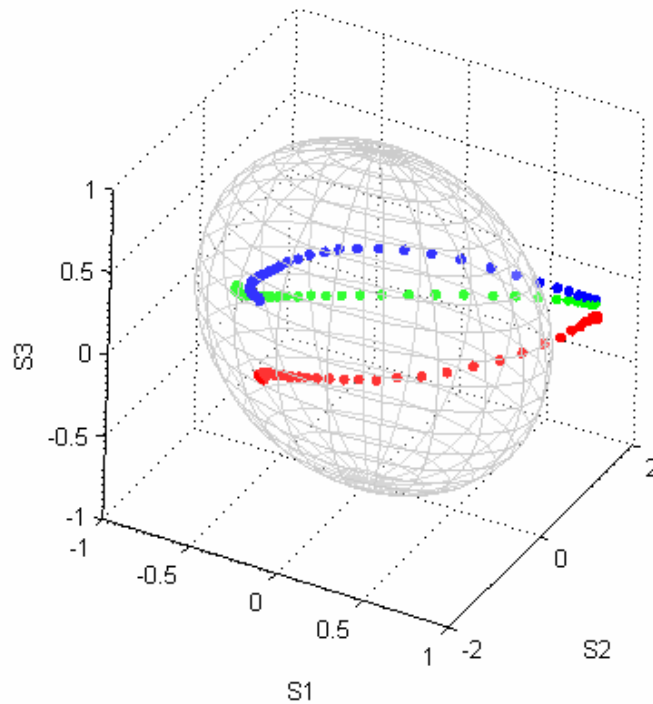
Ett enklare fältprov i form av bevakning av en vägpassage gjordes. Sensorfibern lades ut och skyddades av en tjärpapp. Eventuellt tryck uppifrån på tjärpappen var tänkt att fortplanta sig ned till fibern och skapa en mekanisk påverkan. Det var också av intresse att ta reda på om fibern kunde ta upp seismiska vibrationer från asfalten när ett fordon närmade sig passagen.



Figur 7.6 Sensorfibern begravdes under tjärpapp

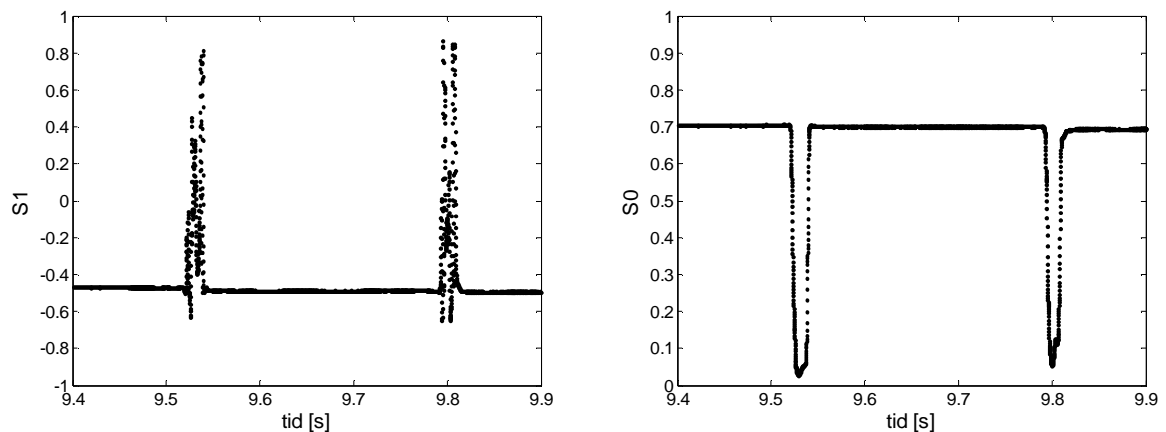
Det visade sig ganska snabbt att den signal som genererades av det direkta trycket från personbilens däck gav en mycket kraftig signal från sensorn. Man kan misstänka att flera optiska egenskaper hos sensorfibern ändras vid så pass högt tryck. Det föreföll dock som om fibern inte påverkades varaktigt av det höga trycket eftersom testsignalernas polarisationslägen återvände till samma läge efter det att bilen hade passerat.

Sensorfiberns kontakt med underlaget var begränsad och detta kan förklara att ingen seismisk information kunde utvinnas strax innan bilen kommer fram till sensorfibern eller efter den passerat. En alternativ förläggning skulle kunna innebära att sensorfibern grävs ned en bit under vägbanan och på så vis blir mer utsatt för seismiska rörelser.



Figur 7.7 Stora mekaniska påfrestningar ger upphov till att flera optiska egenskaper ändras

Den förändring av polarisationsläget som erhålls precis när personbilens däck når sensorfibern syns i Figur 7.7. Det är tydligt att flera punkter ligger utanför Poincarésfären vilket inte är teoretiskt möjligt. Mätresultatet är alltså inte tillförlitligt. Genom att titta på summan av mätvärdena från de två detektorerna kan intensiteten för en av projektionerna studeras. Bilens tyngd påverkar fibern så att den optiska dämpningen ökar och därmed fås en radikal sänkning av den totala intensiteten enligt Figur 7.8. Detta kan vara en förklaring till att punkter utanför Poincarésfären genereras.



Figur 7.8 Projektionen och ljusets totala intensitet när bilen passerar över fibern

8 Slutsatser

Efter de inledande testerna av kabelsensorn insågs problemet med att beräkna den totala intensiteten som behövs för att kunna bestämma projektionen i Poincarésfären. Detta problem löstes med hjälp av ortogonal detektion genom inköpanget av en polarisationsdelare. Den ortogonala detektionen förbättrade även sensors känslighet eftersom brusets inverkan minimerades.

Den intensitet som finns kvar efter att laserljuset har genomlöpt hela kabelsensorn visar sig vara ganska låg men med hjälp av andra optiska komponenter kan denna intensitet höjas betydligt. Förbättringen med en polarisationsdelare istället för polarisationsfilter gör att intensiteten som infaller detektorerna blir större.

Signalbehandlingen som formulerats och testats i en matematisk modell av kabelsensorn förefaller fungera tillfredsställande även i tester med verkliga data. Den bruskänslighet som diskuterats i kapitel 4.4 har liten inverkan när sensorfibern är orörd och vid små mekaniska påfrestningar på fibern. Däremot verkar det som om större påfrestningar ger upphov till att intensiteten hos laserljuset minskar och brusets inverkan blir större. De transformationsmatriser som används för att beskriva modulatorens kan också göra att punkter utanför Poincarésfären erhålls.

Genom de inledande tester som utförts med ortogonal detektion står det klart att det är möjligt att följa de tre testsignalernas polarisationsläge och även beskriva eventuella förändringar av deras lägen med hjälp av en Muellermatris. Detta är möjligt även om modulatorens inte kan skapa de tre ortogonala polarisationerna. Det är dock inte klart hur en tecknet på signalerna skall bestämmas vilket blir ett uppenbart problem för harmoniska signaler.

Vid de praktiska testerna med kabelsensorn har det visat sig vara mycket viktigt att förlägga sensorfibern på rätt sätt för att koppla den mekaniska störningen till sensorfibern. En förläggning av fibern på det sätt som gjordes under fältprovet gör att laserljuset dämpas onödigt mycket, känsligheten är så pass god att man kan tänka sig att exempelvis gräva ned fibern.

8.1 Framtida arbete

Transformationsmatriserna för modulatorens behöver fastställas och verifieras, eventuellt kan detta göras utifrån uppmätta data genom minsta kvadratmetoden. Detta har inte testats i examensarbetet.

Den föreslagna metoden för att skapa en tidsvarierande utsignal har inte testats kvalitativt eftersom den använda diskontinuitetsdetekteringen är mycket bruskänslig. Eventuellt behöver denna metod ersättas med ett mer robust sätt att skapa utsignalen.

Mätinsamlingen bör kunna göras med ett synkront datainsamlingskort för att säkerställa att signalen från de två detektorerna verkligen sker synkront. Ytterligare mätinsamlingar med olika typer av mekaniska störningar bör göras.

9 Referenser

- [1] David Better, *Evaluation and enhancement of a fibre optic sensor*, Master thesis, KTH0280-316X, Royal Institute of Technology, Juni 2004.
- [2] S. T. Tang and H. S. Kwok, *3 X 3 Matrix for unitary systems*, Optical Society of America Vol. 18, No. 9/September 2001.
- [3] Fredrik Olsson, *Fiberoptisk polarisationsmodulator*, FOA-R--98-00818-409--SE, april 1998.
- [4] J. P. Gordon and H. Kogelnik, *PMD fundamentals: Polarization mode dispersion in optical fibers*, Crawford Hill Laboratory, Bell Laboratories, Lucent Technologies, februari 2000.
- [5] Konstantin E. Yushtin and Sergey N. Savenkov, *Analysis of Mueller matrix elements measurement error influence on its physical realizability*, Radiophysics dept, Kiev Taras Shevchenko Univ, MMET Conference 1998 .
- [6] New Focus, *Model 4503 User's Manual - The Integrated-Optic Intensity/Phase Modulators*.
- [7] TTI, *TIA-500 High speed fiberoptic O/E Converter*, Datablad från tillverkaren.
- [8] Åke Öberg, Stig Gruffman, Stan Zyra, *Om utnyttjande av polarization och modkoppling för sensorändamål i multimodfibrer*, FOA Rapport C30646-3.1, december 1991.
- [9] Takumi Fujiwara, Akio Watanabe and Hiroshi Mori, *Polarization Dependent Loss in a Ti:LiNbO₃ Polarization Scrambler/Controller*, IEEE Photonics Technology Letters, vol. 8 No. 4, april 1996.
- [10] David Sandel and Reinhold Noe, *Truly endless polarization control with in-phase quadrature mode converters in X-cut, Y-propagation Lithium Niobate*, IASTED International Conference Wireless and optical communications, july 14-16 2003 Banff, Alberta, Canada.
- [11] OZ Optics, *Reflectors - Fiber optic (fixed or variable)*, Datablad från tillverkare, februari 2005.