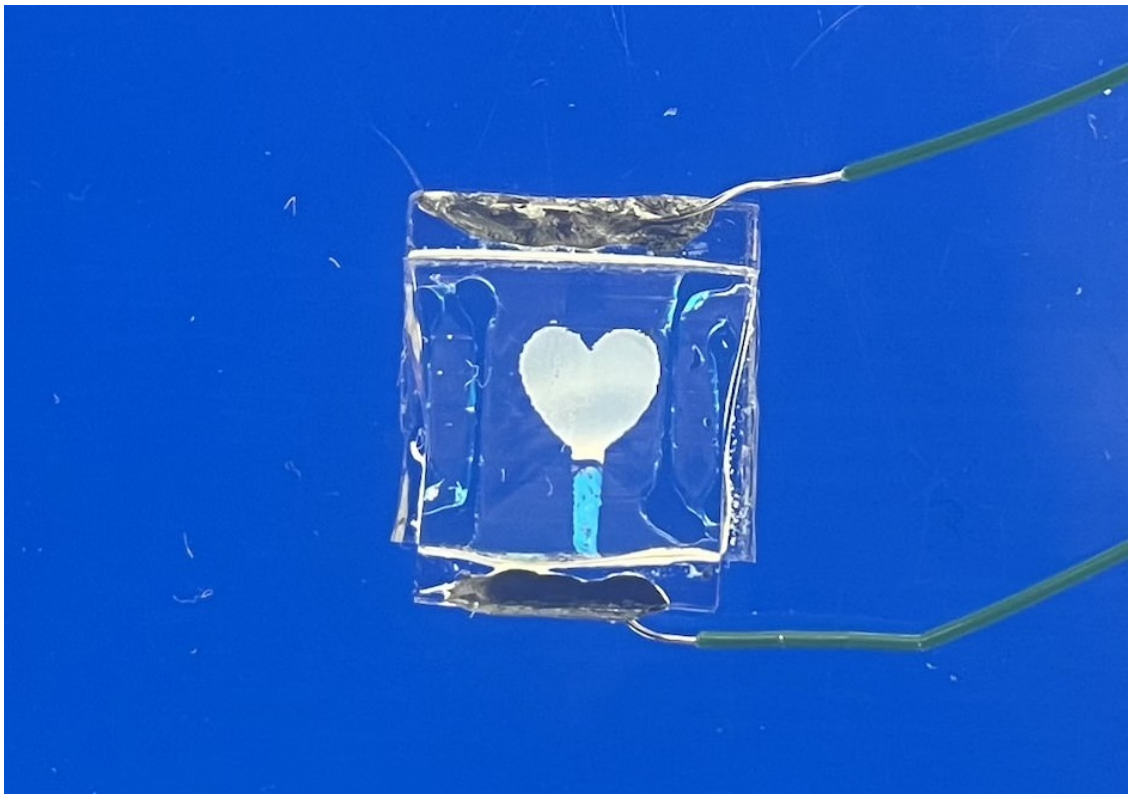
CHALMERS
UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



Design och utveckling av tid-temperatursensorer baserade på vätskekristallsystem

Kandidatarbete MCCX11 / FYP415-VT26-12A

Nina Eklund

Linh Ho

Kendra Peralta Gullberg

Herman Sterner

INSTITUTIONEN FÖR MIKROTEKNOLOGI OCH NANOVETENSKAP

CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA

Göteborg, Sverige 2026

www.chalmers.se

Kandidatarbete 2026

Design och utveckling av tid-temperatursensorer baserade på vätskekristallsystem

Design and development of time-temperature indicators based on liquid crystal systems

Nina Eklund
Linh Ho
Kendra Peralta Gullberg
Herman Sterner



CHALMERS
UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Institutionen för mikroteknologi och nanovetenskap
Chalmers Tekniska Högskola
Göteborg, Sverige 2026

Design och utveckling av
tid-temperatursensorer baserade
på vätskekristallsystem

Nina Eklund

Linh Ho

Kendra Peralta Gullberg

Herman Sterner

©
Nina Eklund

Linh Ho

Kendra Peralta Gullberg

Herman Sterner, 2026.

Handledare: Ebba Grönfors, Per Rudqvist
Examinator: Per Lundgren

Kandidatarbete 2026
Institutionen för mikroteknologi och nanovetenskap
Chalmers Tekniska Högskola
SE-412 96 Göteborg
Sverige
Telefon +46 31 772 1000

Omslag: Bilden visar en framtagen tid-temperatursensor observerad på ett ljusbord mellan korsade polarisatorer. Den ljusa regionen är det aktiva området som försvinner då temperaturen ökar.

Typsatt i LaTeX
Göteborg, Sverige 2026

Sammanfattning

Behovet av tillförlitlig övervakning av temperaturkänsliga varor, såsom läkemedel och livsmedel, skapar efterfrågan på kostnadseffektiva och energisnåla sensorer. Detta arbete undersöker möjligheten att utveckla vätskekristallbaserade prototyper av sensorer för tid-temperaturövervakning som ger en irreversibel visuell indikation när en kritisk temperatur överskrids, utan krav på kontinuerlig energitillförsel. Tre koncept utvärderades: ett baserades på diffusion (diffusionsceller), ett annat baserades på att stabilisera helixstrukturer (Grandjean-celler), och ett tredje baserades på att styra molekylers orientering med ett elektriskt fält (SmA-celler).

Prototyperna framställdes genom att glasceller fylldes med olika vätskekristallmaterial och dopämnen, varpå dessa utvärderades genom optiska observationer. Koncepten utvärderades enligt kriterier gällande visuell tydlighet, reproducerbarhet och framtida produktionspotential. Det koncept som uppfyllde flest kriterier genomgick även stresstester, där kapacitansmätningar användes för att undersöka förändringar i det aktiverade tillståndet. Stresstesterna omfattade exponering för solljus, falltester och upprepade aktiveringscykler. Sensorns långtidsstabilitet utvärderades med en beräkningsmodell, utan vidare framgång.

Diffusionsceller med uppvisade stabilitetstider kortare än 24 timmar. Dessutom var diffusionsceller med vertikal geometri svåra att producera. Grandjean-cellerna var stabila i aktiverat tillstånd men gav inte entydiga eller tydliga utslag. Båda dessa koncept var begränsade till engångsbruk. SmA-cellerna uppvisade bäst prestanda med en säkerställd stabilitet på minst 7 veckor, god reproducerbarhet och möjlighet till upprepad återaktivering. I ett fall observerades utslag vid två olika temperaturer, vilket kan möjliggöra en sensor med tvåstegsfunktion. I stresstesterna bibehöll SmA-cellerna sin avsedda funktion efter fall från upp till 1,5 meter samt under 3 timmars solexponering. Kapacitansmätningar visade dock begränsat informationsvärde som funktionsmått i jämförelse med visuell observation.

Slutsatsen är att SmA-baserade sensorer utgör den mest lovande designen för vidareutveckling av vätskekristallbaserade tid-temperatursensorer. Konceptet har stor potential för framtida applikationer, särskilt genom implementering på flexibla plastsubstrat eller vidare optimering av flerstegssystem för mer detaljerad temperaturhistorik.

Nyckelord: Vätskekristall, tid-temperatur, temperatursensor, minne, smektisk A, nematisk, kolesterisk, direktorfält, 4-oktyl-4'-cyanobifenyl, kolesterylpelargonat

Abstract

The need for reliable monitoring of temperature-sensitive goods, such as pharmaceuticals and food, is increasing the demand for cost-effective and energy-efficient sensors. This project investigates the possibility of developing liquid crystal-based sensor prototypes for time-temperature monitoring that provide an irreversible visual indication when some critical temperature is exceeded, without the requirement for a continuous power supply. Three concepts were evaluated: one based on diffusion (diffusion cells), another based on stabilisation of helical structures (Grandjean cells), and a third based on controlling molecular orientation with an electric field (SmA cells).

The sensor prototypes were constructed by filling glass cells with various liquid crystal materials and dopants, after which they were evaluated through optical observation. The concepts were assessed based on criteria regarding visual clarity, repeatability, and potential for production. The design that best fit the criteria also underwent stress tests, where capacitance measurements were used to investigate changes in the activated state. The stress tests included exposure to sunlight, drop tests and repeated activation cycles. The sensors' long-term stability was evaluated with a predictive model, with limited success.

Diffusion cells exhibited stability times below 24 hours. They were also difficult to produce. The Grandjean cells were stable in the activated state but did not produce clear optical responses. Both of these concepts were limited to single-use. The SmA-cells showed the best performance with a verified stability of at least 7 weeks, good reproducibility, and the possibility of repeated reactivation. In one case, responses at two different temperatures were observed, enabling a two-step function. The sensors retained functionality during drops from up to 1.5 meter as well as during 3 hours of sun exposure. However, capacitance measurements showed limited reliability as a measure of functionality compared to visual observation.

The conclusion is that SmA-based sensors represent the most promising design for continuous development of liquid crystal-based time-temperature sensors. The concept has great potential for future applications, particularly through implementation on flexible plastic substrates or further optimization of multi-stage systems for more detailed temperature history.

Keywords: Liquid crystal, time-temperature, temperature sensor, memory, smectic A, nematic, cholesteric, director field, 4-octyl-4'-cyanobiphenyl, cholesteryl pelargonate

Förord

Vi vill tacka våra handledare Ebba Grönfors och Per Rudqvist för ert engagemang och er vägledning under arbetets gång. Då vätskekristaller var ett helt nytt område för oss var ert stöd och expertis avgörande för att driva arbetet framåt.

Nina Eklund, Linh Ho, Kendra Peralta Gullberg och Herman Sterner
Göteborg, maj 2026

Innehåll

1 Inledning **1**
- 1.1 Syfte och mål . . . 1
- 1.2 Problemformulering . . . 2

2 Teori **3**
- 2.1 Vätskekristallers mesofaser . . . 3
- 2.2 Optiska egenskaper . . . 4
- 2.3 Testcellen . . . 5
- 2.4 Koncept för realisering av minnesfunktionen . . . 6
  - 2.4.1 Diffusion av kiralt dopämne . . . 6
  - 2.4.2 Stabilisering av Grandjean-struktur . . . 7
  - 2.4.3 Styrt direktorfält genom elektrisk potential . . . 8
  - 2.4.4 Modellering av livslängd . . . 9

3 Metod **10**
- 3.1 Vätskekristallmaterial . . . 10
- 3.2 Tillverkning av prototyper . . . 10
  - 3.2.1 Dopning . . . 10
  - 3.2.2 Tillverkning av horisontell diffusionscell . . . 11
  - 3.2.3 Tillverkning av vertikal diffusionscell . . . 11
  - 3.2.4 Framkallning av Grandjean-struktur . . . 11
  - 3.2.5 Tillverkning och fältinducerad aktivering av SmA-cell . . . 12
- 3.3 Vidareutveckling av SmA-cell . . . 12
  - 3.3.1 Modellering av livstid . . . 13
  - 3.3.2 Falltest . . . 13
  - 3.3.3 Exponering för solljus . . . 13
  - 3.3.4 Upprepad aktivering och upphettning . . . 13

4 Resultat **14**
- 4.1 Horisontell och vertikal diffusionscell . . . 14
- 4.2 Grandjean-cell . . . 14
- 4.3 SmA-cell . . . 15
- 4.4 Analys av SmA-cell . . . 17
  - 4.4.1 Livstidsanalys . . . 18
  - 4.4.2 Exponering för solljus . . . 18
  - 4.4.3 Undersökning av stöttålighet . . . 19
  - 4.4.4 Upprepad aktivering och upphettning . . . 19

5 Diskussion **20**
- 5.1 Horisontell diffusionscell . . . 20

5.2 Vertikal diffusionscell 20
5.3 Stabilisering av Grandjean-struktur 20
5.4 SmA-cell 21
5.5 Stresstest av SmA-cell 22
5.6 Utvecklingspotential för SmA-cell 23

6 Slutsatser **24**
6.1 Diffusionsceller 24
6.2 Stabilisering av Grandjean-struktur 24
6.3 SmA-cell 24
6.4 Stresstestning och utvärdering av hållbarhet för SmA-cell 25
6.5 Avslutande tankar 25

Litteraturförteckning **27**

A Appendix **I**
A.1 Vätskekristallmaterial I
A.2 Metod för fotolitografi och montering av celler I
A.3 Livstidsanalys på SmA-celler III
A.4 Kapacitansmätningar IV
A.5 Bilder V

1
Inledning

Dagligen använder människor temperaturkänsliga produkter utan att reflektera över hur de har förvarats innan de har nått konsumenten, trots att det under en produkts livslängd finns flera tillfällen då risken för felaktig förvaringstemperatur är hög, exempelvis på grund av strömavbrott eller värmeläckage. Det kan samtidigt vara svårt att säkerställa att information om produktens temperaturhistorik är korrekt, då temperaturövervakningen kan vara diskontinuerlig och kommunikationen mellan olika aktörer i tillverknings- och distributionskedjan kan vara bristfällig.

Osäker temperaturhistorik utgör en potentiell risk för konsumenten, då felaktig förvaring av temperaturkänsliga produkter kan medföra betydande säkerhetsrisker. Hälsofarliga toxiner och bakterier kan utvecklas i färskvaror, livsviktiga läkemedel kan få sämre effekt, och vaccin kan förstöras om de utsätts för hög temperatur även under en begränsad tid. Detta belyser behovet av tillförlitliga, lättillgängliga och användarvänliga metoder för kontinuerlig så kallad tid-temperaturövervakning, där någon form av sensor kan avslöja om en kritisk temperatur för produkten har överskridits.

En potentiell lösning är vätskekristallbaserade tid-temperatursensorer. Vissa typer av vätskekristaller har starkt temperaturberoende optiska egenskaper [1, 2]. Denna typ används bland annat i akvarietermometrar som ändrar färg med akvarievattnets temperatur. Därmed kan användaren få visuell information om den aktuella temperaturen i akvariet [3]. I projektets fokus står utvecklingen av mekanismer som möjliggör färgförändringar som hålls permanenta, genom irreversibla processer, för att ge användaren information om produktens temperaturhistorik.

För närvarande finns det en nischad marknad för tid-temperatursensorer för engångsbruk; ett exempel är Timestrip PLUS av Sigma-Aldrich. De säljs i paket med 500 st sensorer och kostar 20 kr/sensor [4]. För lågprisvaror såsom mejeriprodukter blir detta en ohållbar kostnad. Utvecklingen av billigare, funktionella tid-temperatursensorer kan därmed möjliggöra ökad livsmedelssäkerhet även för basvaror och individuellt förpackade produkter.

1.1 Syfte och mål

Syftet med projektet är att designa, framställa och utvärdera olika prototyper av tid-temperatursensorer baserade på vätskekristallsystem som inte kräver kontinuerlig energitillförsel. Dessa prototyper ska fungera som underlag för att utvärdera möjligheterna att utveckla och massproducera vätskekristallbaserade temperaturindikatorer för kontroll och kvalitetssäkring av temperaturkänsliga produkter, såsom läkemedel och livsmedel. Sensorerna måste med hög tillförlitlighet irreversibelt ge

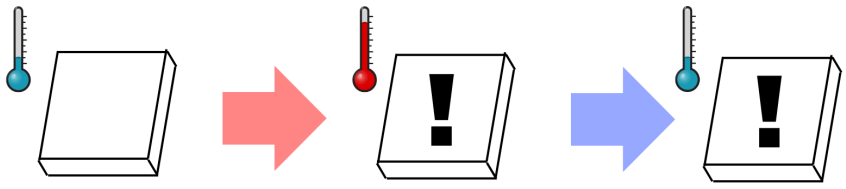
synligt omslag vid de temperaturer som ändamålet kräver. Målet är att öka säkerheten vid användning av temperaturkänsliga produkter genom att ge konsumenten information om produktens temperaturhistorik. Vi diskuterar även möjligheterna för framtida utveckling och produktion av de framtagna prototyperna av vätskekristallbaserade temperatursensorer.

1.2 Problemformulering

För att en sensor ska kunna fungera utan kontinuerlig strömtillförsel måste vätskekristallen i sensorn genomgå en temperaturirreversibel process i samband med att en kritisk temperatur nås, se Figur 1.1 — detta kallas i rapporten för triggning. Denna process måste även ändra sensorns utseende på ett betydande sätt som är lätt för användaren att observera. Tre olika koncept av sensorer baserade på olika irreversibla processer som förändrar de optiska egenskaperna undersöktes. Det första bygger på att en ökad temperatur möjliggör diffusion, det andra bygger på att stabilisera helixstrukturen som uppstår i vissa vätskekristaller, och det tredje nyttjar det faktum att vätskekristaller i vissa faser är mottagliga för styrning av molekylernas orientering med elektriska fält.

Prototyper utvärderades enligt följande kriterier: entydigt resultat, reproducerbara resultat, relevanta temperaturintervall, tydliga utslag, återanvändbarhet och möjlighet till massproduktion. Med relevanta temperaturintervall avses temperaturer omkring exempelvis 0 °C då vatten fryser, och 37 °C då många mikrober är som mest aktiva [5].

Efter utvärdering valdes ett av koncepten ut för att vidareutvecklas. Detta gjordes genom stresstestning och livstidsanalys på prototyper från det utvalda konceptet. Begränsningar i tid, materialtillgångar och resurser gjorde att utvecklingen av specifika egenskaper, såsom anpassning till specifika temperaturer där sensorerna utlöses eller möjlighet till massproduktion, endast undersöktes i liten skala.



Figur 1.1: *En schematisk bild av en temperatursensor med minnesfunktion. När temperaturen överstiger en kritisk nivå ger sensorn ett synligt utslag som bibehålls när temperaturen återgår till en säker nivå. Utropstecken i figuren symboliserar ett synligt utslag. Skapad av författarna i Canva [6].*

2
Teori

Klassiskt brukar man tala om tre olika aggregationstillstånd, så kallade faser, som materia kan befinna sig i: fast, flytande och gasfas. Vatten används vanligtvis för att demonstrera dessa faser, då samtliga förekommer i vardagen som is, vatten och vattenånga. Det finns dock ämnen för vilka det finns flera andra mellanliggande faser; vätskekristallmaterial har flera olika faser mellan den fasta och den flytande fasen. Dessa kallas mesofaser och deras fysikaliska egenskaper utgör kärnan för detta arbete.

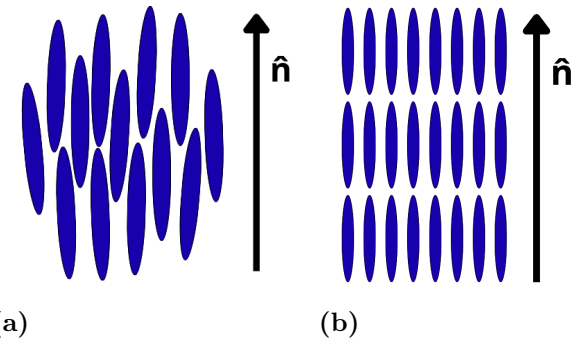
Mesofasernas optiska egenskaper kan förändras på makroskopisk nivå till följd av temperaturvariationer som leder till fasövergångar eller andra strukturella förändringar i materialet. Om de fysikaliska förändringarna kan hållas irreversibla utanför deras naturliga temperaturintervall, kan detta fenomen användas som en tid-temperatursensor. En sådan process hade alltså kunnat ge information om sensorn vid något tidigare tillfälle har utsatts för temperaturer som orsakat fasövergång eller strukturell förändring i materialet. Att ett material kan ge information om vilken temperatur det har haft tidigare kan användas som en minnesfunktion. I arbetet undersöks olika koncept för att hålla den temperaturinducerade förändringen i vätskekristallsystemet irreversibel utan att kräva någon energitillförsel. Det vill säga att ge sensorn ett permanent optiskt utslag till följd av en temperaturdriven, irreversibel, process som kvarstår när temperaturen återgår.

2.1 Vätskekristallers mesofaser

Vätskekristallmolekyler är ofta avlånga eller skivformade och uppvisar olika grad av fjärrordning (eng. long-range order) vad gäller orientering och position [1, 2]. Detta uppkommer av de intermolekylära krafternas samverkan vid särskilda temperaturer och tryck. Molekylernas ordning ger upphov till mesofaser med både vätske- och kristalliknande egenskaper.

De mesofaser som är av störst intresse för arbetet är den nematiska fasen (N), se Figur 2.1a, och den smektiska A-fasen (SmA), se Figur 2.1b. En vätskekristall i N-fas har endast lokal orienteringsordning, det vill säga att närliggande molekyler ligger åt ungefär samma håll. I smektiska faser (Sm) är molekylerna även ordnade i smektiska skikt och har därmed också positionsordning. Det som skiljer dessa faser åt är molekylernas orientering i förhållande till positionsordningen. Molekylerna i SmA-fas är orienterade längs normalen.
Molekylernas orientering beskrivs av direktorn, $\hat{\mathbf{n}}$, som beskriver molekylernas genomsnittliga lokala orienteringsordning [1, 2, 7], se Figur 2.1. Direktorn saknar riktning, $\hat{\mathbf{n}} = -\hat{\mathbf{n}}$, till skillnad från vanliga vektorer. Direktorfältet kan styras, exempelvis genom att använda randvillkor i form av borstade kontaktytor eller

med ett E-fält över vätskekristallen då direktorn vill orientera sig i fältets riktning [8].



Figur 2.1: *Illustration av (a) N-fas och (b) SmA-fas, tillsammans med direktorn,* $\hat{\boldsymbol{n}}$*, för de båda faserna. Skapad av författarna i Canva [6].*

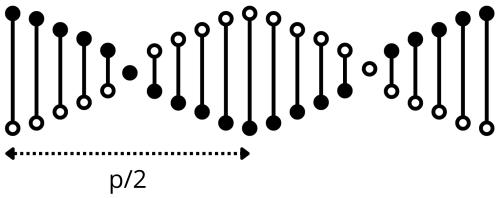
Vätskekristaller i (Sm)-fas strävar efter att avstånden mellan skikten och molekylerna är regelbundna [9]. Jämfört med N-fas krävs mer energi för att påverka strukturen i Sm-fas [10]. Vätskekristaller i Sm-fas vars direktor utsätts för motstridiga impulser kan bilda så kallade konfokala (eng. focal conic) områden med cirkulär eller elliptisk symmetri. Dessa domäner minimerar energin för skiktstrukturerna i närvaro av störningar och är metastabila [9].

2.2 Optiska egenskaper

Molekylernas form, tillsammans med den temperaturberoende orienteringsordningen, gör vätskekristallerna anisotropa. Alltså varierar deras fysikaliska egenskaper inte bara med temperaturen utan även med riktningen de mäts över [11]. De optiska egenskaperna har en stark koppling till mätriktningen; vätskekristaller är dubbelbrytande, vilket innebär att ljus upplever olika brytningsindex beroende på det infallande ljusets polarisationsriktning relativt direktorn. Ljus vars polarisationsriktning är parallell med direktorn upplever ett brytningsindex, medan ljus vars polarisationsriktning är vinkelrät mot direktorn upplever ett annat brytningsindex. En vätskekristalls brytningsindex beror bland annat på molekylernas struktur, form och storlek, samt den temperaturberoende vätskekristallfasen. Om ljuset färdas längs en vätskekristalls optiska axel, alltså parallellt med direktorn, dubbelbryts det dock inte.

Dubbelbrytning modulerar ljus och ändrar alltså ljusvågornas egenskaper. Detta gör bland annat att vätskekristaller kan ändra polarisationstillståndet på polariserat ljus som färdas genom materialet. De kan därmed möjliggöra transmission av ljus genom korsade polarisatorer, och de våglängder som dominerar ljuset ur polarisatorerna beror på vätskekristallskiktets brytningsindex, orientering och tjocklek [8, 7].
Kiralitet har stor inverkan på vätskekristallers optiska egenskaper. När N-vätskekristaller byggs upp av eller introduceras till kirala molekyler som ett dopämne, vrids direktorn [1, 2]. I N-fas bildas makroskopisk helixstruktur, se Figur 2.2, då

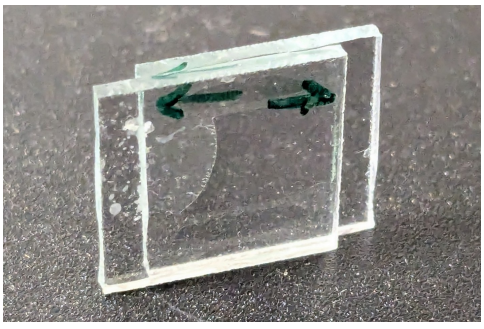
det är det mest energieffektiva sättet för molekylerna att orientera sig. Denna fas kallas kolesterisk eller kiral nematisk (N*) och har en hänthet som bland annat beror på dopämnets och materialets molekylstrukturer. Det avstånd längs helixens axel som motsvarar ett helt varvs vridning av direktorn kallas *pitch*, se Figur 2.2, och är omvänt proportionell mot koncentrationen av kiralt dopämne [1, 2]. Kolesteriska helixstrukturer uppvisar mycket hög optisk aktivitet, flera storleksordningar högre än för kirala material som inte också är vätskekristaller. De vrider ljusets polarisationsplan olika mycket beroende på våglängden och reflekterar ljus av de våglängder som matchar pitchen, vilket kallas selektiv reflektion [8, 11].



Figur 2.2: *Illustration av den kolesteriska helixstrukturen och halva dess pitch, p/2, där fyllda och ofyllda cirklar representerar olika sidor av molekylkedjan som utgör helixen. Skapad av författarna i Canva [6].*

2.3 Testcellen

Studier av vätskekristaller genomförs vanligtvis med hjälp av en så kallad testcell, se Figur 2.3, vilket är en anordning med två glasplattor som omger ett smalt cellgap, ofta i storleksordningen $\sim$ µm. Cellgapet kan fyllas med ett flytande material med hjälp av kapillärkrafter, och på så vis kan ett tunt skikt av vätskekristall studeras – det är alltså cellgapet som avgör vätskekristallskiktets tjocklek i en testcell. Glasplattorna är sammanfogade längs cellens långsidor med ett lim som innehåller distanshållare (eng. spacers), medan kortsidorna lämnas fria för att cellen ska kunna fyllas med material. Kortsidorna fungerar även som fästpunkter för lödtenn.



Figur 2.3: *En tom cell bestående av två glasplattor. Glasplattorna är* $12,5 \times 12,5$ *mm och omger ett 4* µm *brett cellgap som kan fyllas med vätskekristallmaterial. Cellen har ytrandvillkor i form av borstade ytor, vars riktning är markerad med gröna pilar.*

Testcellen har ytrandvillkor, vilket innebär att molekylerna nära ytorna får en föredragen riktning. För att ge randvillkor till ytorna beläggs de först med ett tunt

lager polyimid som sedan borstas i en föredragen riktning med en silkesduk [12]. När en vätskekristall kommer i kontakt med den borstade ytan så kommer molekylerna nära ytan att lägga sig parallellt med borstriktningen [1]. Borstriktningen kan anpassas för att förändra beteendet hos vätskekristallen i en testcell, vilket också påverkar provets optiska egenskaper. Inverkan av ytrandvillkor är även starkare i tunna celler eftersom att kontaktytorna ligger mycket nära varandra, vilket gör att molekylernas orientering i hela cellen kan styras. Vätskekristaller i N-fas följer generellt randvillkor i högre grad än Sm-faserna. Isotrop och kristallin fas påverkas i regel inte av ytrandvillkor [13].

Ytorna kan även förses med elektroder, oftast baserade på indiumtennoxid (ITO), genom fotolitografi för att möjliggöra applicering av ett elektriskt fält (E-fält) över vätskekristallen via cellens fästpunkter. Testcellen utgör därav en plattkondensator, med vätskekristallen som dielektrikum [1]. Kapacitansen för en ideal plattkondensator beror på plattarean, A, plattavståndet, d, och materialets effektiva permittivitet, ϵ_{eff}, och permittiviteten för vakuum, ϵ_0, enligt

$$C = \epsilon_0 \epsilon_{eff} \frac{A}{d}. \tag{2.1}$$

Den effektiva dielektricitetskonstanten i vätskekristallen kan definieras

$$\epsilon_{eff} = \epsilon_\perp + (\epsilon_\parallel - \epsilon_\perp) \cos^2 \theta \tag{2.2}$$

där $\epsilon_\perp$ är permittiviteten vinkelrät mot direktorn, $\epsilon_\parallel$ är permittiviteten längs direktorn och θ är vinkeln mellan direktorn och E-fältets riktning [1]. Alltså är kapacitansen som högst när direktorn pekar i fältets riktning, och genom att mäta kapacitansen är det möjligt att bestämma direktorns lutning.

2.4 Koncept för realisering av minnesfunktionen

Nedan presenteras teorin bakom tre processer som kan användas för framtagning av minnesfunktionen: en där diffusion av ett kiralt dopämne ger upphov till optiska förändringar, en där helixstrukturerna i N*-fas kan hållas upprätta genom att applicera skjuvkrafter på testcellen, samt en där direktorn styrs med ett E-fält och behåller sin orientering i frånvaro av E-fältet.

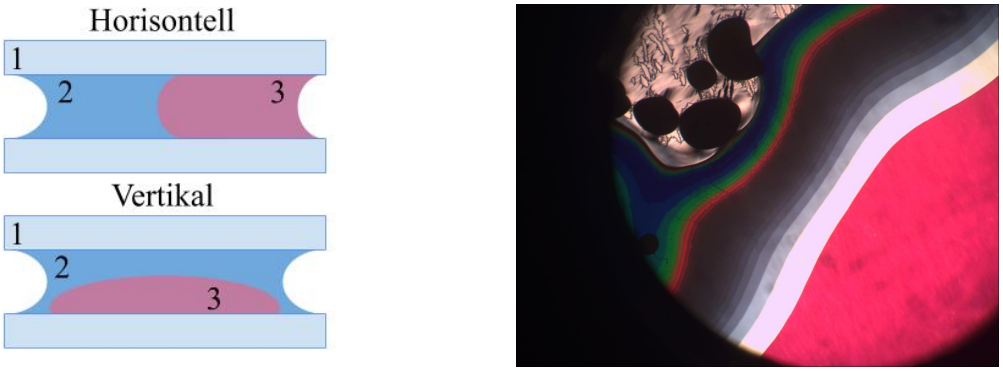
2.4.1 Diffusion av kiralt dopämne

När ett kiralt dopämne kommer i kontakt med en vätskekristall och temperaturen ökar, ökar även diffusionshastigheten [14]. Därmed stiger koncentrationen av kiralt dopämne i vätskekristallen. Om vätskekristallen befinner sig i N-fas ger detta upphov till kolesteriska helixstrukturer. Ju längre diffusionen pågår, desto högre blir koncentrationen av det kirala dopämnet i diffusionszonen. Detta gör att pitchen blir kortare, då den vid låga koncentrationer är omvänt proportionell mot koncentrationen av det kirala dopämnet. Därmed reflekteras ljus av kortare våglängder ju

mer det kirala dopämnet diffunderar. Eftersom diffusion av entropiska skäl är en irreversibel process kan denna mekanism potentiellt utnyttjas som en minnesfunktion.

Sensorprototyper som nyttjar diffusionseffekter benämns diffusionceller och kan skapas i två geometrier – en horisontell och en vertikal, se Figur 2.4a. När diffusionen sker horisontellt mellan ämnena uppstår diskreta färgband, se Figur 2.4b. Detta beror på att koncentrationen av dopämne varierar i diffusionszonen, vilket ger upphov till en gradvis variation av optimal pitch. I närvaro av ytrandvillkor begränsas vridningen av antalet halvtaliga varv som ligger närmast den föredragna pitchen. Områden med samma pitch modulerar ljuset på samma sätt, vilket framträder som enfärgade band i figuren.

När diffusionen istället sker vertikalt mellan ämnena uppstår en jämnt fördelad diffusionszon i hela cellplanet och därav reflekterar cellen endast en färg. Eftersom vissa ämnen med olika starka intermolekylära krafter inte är blandbara, kan försök till diffusion mellan dem leda till att en heterogen blandning (eng. de-mixing) bildas. Detta gör att provet i vissa fall kan uppvisa oregelbundna områden med olika färg eller är genomskinliga.



(a) *Horisontell och vertikal cell, avbildad från sidan. Skapad av författarna i Canva [6].*

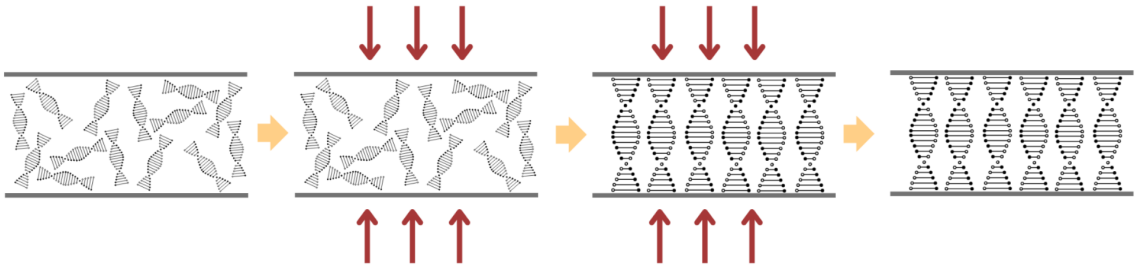
(b) *En 4* µm *testcell observerad i mikroskop mellan korsade polarisatorer.*

Figur 2.4: *I (a) illustreras de två geometrierna för celler med N-medium och kiralt dopämne. Områden markerade med 1 cellens väggar, 2 N-medium och 3 olika kirala dopämnen. En horisontell cell visas i (b); till vänster syns kolesterylpelargonat i fast fas och till höger syns E7 i N-fas. I diffusionszonen mellan ämnena kan tydligt färgade band urskiljas. Dessa motsvarar områden där variation av pitchen ger upphov till selektiv transmission av vissa våglängder mellan korsade polarisatorer.*

2.4.2 Stabilisering av Grandjean-struktur

Genom att applicera tryck- och/eller skjuvkrafter på en kolesterisk vätskekristall mellan två parallella substrat skapas ett mikroflöde i mediet. Detta kan framkalla en struktur där helixaxeln ställer sig ortogonalt mot substratens ytor och behåller denna uppställning när krafterna avlägsnas (eng. shear alignment), se Figur 2.5 [2]. Denna struktur kallas Grandjean-struktur, och tack vare N*-fasens inneboende

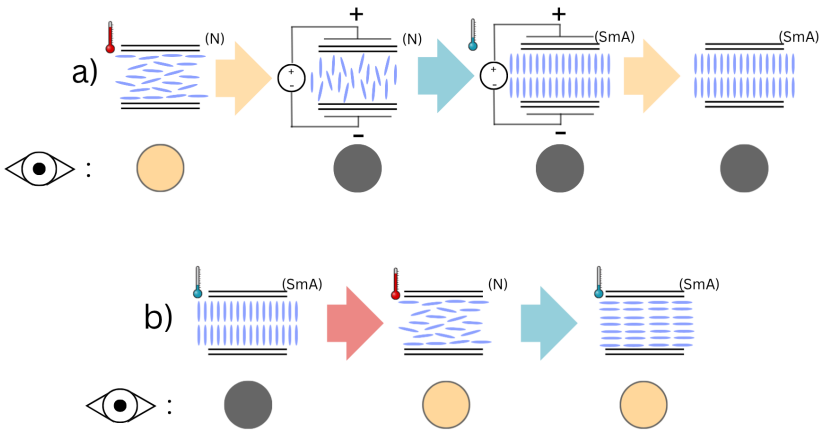
optiska aktivitet uppvisar den betydligt intensivare färger i reflektion än ostrukturerade prover i N*-fas. Vid en övergång till isotrop fas försvinner helixstrukturen, och därmed även materialets förmåga att ge upphov till dessa intensiva färger. När materialet återgår till N*-fas utan inverkan av tryck- och skjuvkrafter förblir det ostrukturerat tills Grandjean-strukturen framkallas på nytt.



Figur 2.5: *Schematisk illustration över hur den kolesteriska helixstrukturen i ett N*-medium bildar en Grandjean-struktur mellan två substrat vid applicering av tryckkrafter, strukturen uppstår på liknande vis när skjuvkrafter appliceras. Skapad av författarna i Canva [6].*

2.4.3 Styrt direktorfält genom elektrisk potential

Det är möjligt att styra direktorn genom att applicera ett E-fält över vätskekristallen. På så vis tvingas direktorn i bulkvolymen att omorientera sig i fältets riktning, det vill säga ortogonalt mot borstriktningen. När E-fältet tas bort relaxerar en vätskekristall i N-fas snabbt enligt cellens randvillkor. En vätskekristall som övergått från N-fas till SmA-fas, under inverkan av ett E-fält, behåller den inducerade direktororienteringen. Detta beror på SmA-fasens skiktstruktur, som hindrar omorientering av direktorn, se Figur 2.6 [12]. Eftersom aggregationstillstånd är temperaturberoende kan relaxering induceras genom att hetta upp vätskekristallen till N-fas efter att E-fältet har tagits bort. Ett sådant omslag i en borstad testcell kan synas tydligt mellan korsade polarisatorer eftersom provet ser svart ut när direktorn är parallell med ljusets transmissionsriktning, och relaxeringen gör att materialet blir dubbelbrytande i observationsriktningen igen. Hela förloppet illustreras i Figur 2.6.



Figur 2.6: *Modell över beteendet hos vätskekristallfaser i en testcell med parallellt borstade ytor och mellan korsade polarisatorer. I (a) syns effekten av ett E-fält i samband med en fasövergång från N-fas till SmA-fas. I (b) syns övergång mellan SmA och N-fas i frånvaro av ett E-fält, direktorn styrs då av randvärden. Varje tillstånd ser antingen ljust eller mörkt ut beroende på cellens dubbelbrytning. Röda och blå pilar representerar uppvärmning respektive nedkylning, och gula pilar representerar ett pålagt eller avslaget E-fält vid konstant temperatur. Skapad av författarna i Canva [6].*

2.4.4 Modellering av livslängd

För en färdig produkt är det önskvärt att veta hur länge sensorn förväntas vara brukbar. För att få en uppfattning om sensorns livslängd kan man använda en beräkningsmodell som extrapolerar mätdata från en kortare tid för att approximera dess totala livslängd (eng. Time-To-Failure (TTF)) [15]. Beräkningsmodellen anpassar olika matematiska funktioner till mätpunkterna, och ju fler mätpunkter som finns i datasetet som analyseras desto trovärdigare blir förutsägelserna. Om datasetet är för litet kan Bootstrap-resampling användas för att utöka det [16]. Bootstrap-resampling innebär att antalet dataset ökas genom att slumpmässigt välja från mätdata med tillbakaläggning.

3
Metod

Arbetet inleddes med en litteraturstudie för att skapa en djupare förståelse för vätskekristaller och hur syftet med arbetet kan uppnås. Därefter tillverkades, observerades och utvärderades prototyper, som vi kallar celler, av de tre sensorvarianterna. Experiment och utvärdering skedde parallellt för att kunna använda resultat från observationer och utvärdering för vidareutveckling. Celler och prover som benämns aktiverade har förberetts för användning genom att försätta vätskekristallen i ett metastabilt tillstånd som utlöses av temperatur. Resultaten låg till grund för valet av sensorkoncept att studera i mer detalj i den senare delen av projektet. AI-verktyg användes för att underlätta programmering.

3.1 Vätskekristallmaterial

Vätskekristallmaterialen som användes var: kolesterisk blandning (KB), C15, ZLI-811, kolesterylundecylkarbonat (CUC), kolesterylpelargonat (KP), E7, 4-oktyl-4'-cyanobifenyl (8CB), ZLI-1409, Nematic phase 5 (-5/75) från Merck (N phase 5), MLC-6263-000 (MLC-6263) och MLC6096+0,1 % ZLI-811 (MLC-6096). För en komplett lista av ämnenas fasövergångstemperaturer och kiralitet, se Tabell A.1 i Appendix.

3.2 Tillverkning av prototyper

Vid framställningen av horisontella diffusionsceller och SmA-celler användes $12,5 \times 12,5$ mm stora testceller. För utvecklandet av vertikala diffusionsceller användes glasplattor med täckglas. Vid utvecklingen av prototyper med Grandjean-struktur användes både testceller och glasplattor med täckglas. För konceptet med SmA-celler behövde testceller förses med elektrodmönster, vilket genomfördes i Chalmers renrumslaboratorium. Ingående metod för fotolitografi och montering av dessa beskrivs i Appendix A.2.

3.2.1 Dopning

Först placerades en glasskiva i en skål på en våg med 0,1 mg noggrannhet. Vågen nollställdes, en liten mängd vätskekristallmedium placerades på glasskivan och massan antecknades. Vågen nollställdes återigen och sedan placerades små mängder dopämne på glasplattan tills den önskade masskoncentrationen nåddes. Glasplattan med medium och dopämne flyttades sedan till en värmeplatta där de två ämnena värmdes upp till flytande fas och blandades.

3.2.2 Tillverkning av horisontell diffusionscell

En mycket liten mängd dopmaterial i fast fas placerades vid kanten av testcellens ena öppning med hjälp av en spatel. Cellen placerades på en värmeplatta och värmdes tills KP övergick till flytande fas och började fylla cellen. När cirka en tredjedel av cellen var fylld, avlägsnades den från värmeplattan och fick svalna tills KP återgick till fast fas. Därefter fylldes den resterande delen av cellen med ett vätskekristallmaterial från motstående sida.

Fyra kombinationer av vätskekristallmaterial och dopämnet KP undersöktes: KP i kombination med E7, MLC-6263, MLC-6096 och N phase 5. För sensorprovning utsattes vissa celler för snabb upphettning till hög temperatur. Två identiska celler av varje kombination av vätskekristallmaterial tillverkades; den ena användes som kontroll och den andra värmdes upp för utvärdering av provets omslag vid ökad temperatur. Kontrollcellen förvarades mörkt och svalt och observerades regelbundet. Observation av de horisontella cellerna gjordes på ett ljusbord mellan korsade polarisatorer.

3.2.3 Tillverkning av vertikal diffusionscell

Innan de vertikala cellerna tillverkades undersöktes lösligheten av dopämnena C15, KP, CUC och ZLI-811 i KB genom att observera provets reflekterade färg mot svart bakgrund vid rumstemperatur. En liten mängd KP i fast fas placerades på ett mikroskopglas och värmdes på en värmeplatta tills det övergick till flytande fas och fördelade sig jämnt över ytan. När KP svalnat och återgått till fast fas ströks ett tunt lager av antingen dopat eller odopat KB ovanpå det första lagret med hjälp av en spatel. Den täckta arean hölls mindre än ett täckglas, varefter ett täckglas eller ett ytterligare mikroskopglas placerades ovanpå strukturen. Olika inkapslingsmetoder testades, där glasen antingen limmades ihop längs alla sidor, med eller utan lufthål, eller lämnades olimmade. Sensorprovning och stabilitetsundersökningar genomfördes på samma sätt som för horisontell diffusionscell.

3.2.4 Framkallning av Grandjean-struktur

En glasplatta täcktes med N*-material genom uppvärmning till isotrop fas på en värmeplatta, varefter ett täckglas placerades ovanpå materialet. För att inducera Grandjean-struktur applicerades lätt manuellt tryck med ett finger eller en pincett på täckglaset när det återgått till N*-fas. Konceptet undersöktes även i oborstade testceller som fylldes med N*-material. Dessa utsattes för tryck genom att manuellt pressa på glassubstraten samt genom att gnugga med en spatel på ena sidan av cellen mot en plan yta. Olika dopämnens påverkan på provernas färg och stabilitet undersöktes. KB dopades med C15, KP, CUC och ZLI-811. Lösligheten av dopämnena undersöktes enligt 3.2.3. Reflektion av ljus observerades i Grandjean-cellerna mot en svart bakgrund. Sensorprovning och stabilitetsundersökningar genomfördes på samma sätt som för diffusionscellerna.

3.2.5 Tillverkning och fältinducerad aktivering av SmA-cell

Vid tillverkning av SmA-celler användes testceller som var försedda med elektrodmönster. Två kopplingstrådar löddes fast vid fästpunkterna på sidorna av cellen så att de var i kontakt med elektroderna på respektive glasplatta. På detta sätt skapades celler som kunde exponera ett vätskekristallmaterial för ett E-fält, genom att applicera AC-spänning över elektroderna. Cellerna placerades på en värmeplatta och fylldes med vätskekristall från ena sidan. Först gjordes experiment där spänning lades över celler fyllda med E7.

Fyllda SmA-celler aktiverades genom att lägga en spänning över cellerna efter att de värmts upp till N-fas. För att aktivera en SmA-cell placerades den på en digitalstyrd värmeplatta under ett mikroskop med korsade polarisatorer (eng. Polarized Light Microscopy (POM)). En funktionsgenerator och en förstärkare seriekopplades till fastlödda kopplingstrådar på cellen. Ett oscilloskop parallellkopplades med cellen till förstärkaren. Cellen värmdes upp med värmeplattan, och övergången till N-fas observerades i POM. Ett varierande E-fält applicerades över cellen genom funktionsgeneratorn. Olika typer av funktioner, frekvenser och amplituder för spänningen testades och slutligen valdes fyrkantsvåg på 1,4 kHz med amplitud mellan 20 och 25 V. Cellen kyldes sedan ner under inverkan av E-fältet, var därmed aktiverad, och kunde användas som en temperatursensor.

Celler fyllda med 8CB och olika dopningar av 8CB aktiverades för att undersöka dopämnenas effekt på cellernas stabilitet och övergångstemperatur. Dopämnen som användes var E7, ZLI-811, ZLI-1409, C15, KB och KP. Efter att de dopade cellerna hade aktiverats gjordes försök där celler värmdes upp på nytt utan E-fält och därefter observerades. Denna process av att aktivera celler, observera dem, värma dem och observera på nytt upprepades flera gånger för varje cell. Resultaten observerades i POM och över ljusbord med korsade polarisatorer. Resultaten från de olika observationerna jämfördes mellan olika dopämnen och dopämneskoncentrationer. Även inverkan av tid och värme undersöktes. Efter aktivering lämnades cellerna i 7 veckor och under tiden undersöktes förändringar i deras utseende.

3.3 Vidareutveckling av SmA-cell

Efter granskning av de olika celltyperna, baserat på utvärderingskriterierna som beskrivs i problemformuleringen i avsnitt 1.2, beslutades det att endast gå vidare med SmA-konceptet. Stabiliteten över tid och deras totala livslängd uppskattades genom en datormodell. För att undersöka SmA-cellers stabilitet vid belastning genomfördes flera stresstester; falltest, exponering för solljus samt upprepad upphettning och reaktivering. Samtliga stresstester genomfördes på ett antal SmA-celler som aktiverats genom ett pålagt E-fält. Cellerna var antingen fyllda med endast 8CB eller dopade med 5,6 % respektive 7,9 % KP, för att jämföra stabiliteten mellan odopade och dopade celler. Under stresstesten mättes cellernas kapacitans för att utföra en analys av hur cellernas aktiverade tillstånd störs av stresstesten.

3.3.1 Modellering av livstid

Efter aktivering mättes kapacitansen för cellerna vid olika tidsintervall. I samband med detta observerades cellerna för att upptäcka synliga förändringar. Mätdatan användes sedan som input till en prediktiv modell för att uppskatta cellernas livstid. Tidsintervallen som undersöktes var 5, 10, 15, 30, 60 och 120 minuter från aktivering. Kapacitansen mättes även efter 1, 7 och 14 dygn.

Den prediktiva modellen för livstid utformades för att ta in tidsannoterad mätdata och anpassa matematiska modeller efter denna. Modellerna som användes var potens- (at^b), logaritmiska ($a + b \ln t$) och logaritmiska andragradspolynomsanpassningar ($a(\ln t)^2 + b \ln t + c$). Mätdata extrapolerades sedan med hjälp av modellerna för att uppskatta när en testcell kan förväntas vara obrukbar. Utifrån mätningar på celler innan och efter aktivering valdes 65 % av ursprunglig kapacitans som gräns för obrukbarhet. Bootstrap-resampling med 2000 omsamplingar tillämpades för att skapa konfidensintervall (eng. confidence interval (CI)) på 95% för modellernas TTF. AI-assistenten Claude [17] användes för att utveckla programkod till modellen, som granskades och anpassades av författarna.

3.3.2 Falltest

Fyra testceller fyllda med 8CB undersöktes, varav två var dopade med 7,9 vikt-% KP och två var odopade. Cellerna släpptes upprepade gånger mot ett golv täckt med plastmatta från två höjder, 100 cm respektive 150 cm. Efter varje fall mättes kapacitansen och eventuella förändringar i cellernas struktur registrerades genom visuell inspektion. Uppställningen utgjordes av ett stativ utrustat med en pappersklämma som släppmekanism för att standardisera fallen.

3.3.3 Exponering för solljus

Två celler fyllda med 8CB och två celler fyllda med 8CB dopad med 7,9 vikt-% KP exponerades för direkt solljus, och kapacitansmätningar togs efter 5, 10, 20, 60 och 180 minuter. Sensorerna låg på en aluminiumklädd plastbricka för att minimera värmeabsorption från underlaget och därmed kunna urskilja eventuell påverkan som strikt kom från ljuset.

3.3.4 Upprepad aktivering och upphettning

Fyra celler fyllda med 8CB undersöktes, varav två var odopade och två var dopade med 5,6 respektive 7,9 vikt-% KP. Stabiliteten vid upprepad aktivering undersöktes genom att cellerna växelvis aktiverades och värmdes upp till en temperatur där den visuella indikationen försvann, följt av nedkylning och återaktivering. Denna procedur upprepades flera gånger för varje cell. Under försöken registrerades eventuella variationer i den visuella responsen mellan de upprepade försöken.

4
Resultat

I detta avsnitt presenteras resultaten från utvecklingen av de olika sensorkoncepten och vidareutveckling av SmA-cellen.

4.1 Horisontell och vertikal diffusionscell

Alla undersökta kombinationer av vätskekristallmaterial och dopämnet KP i diffusionsceller uppvisade bristande stabilitet. Diffusion vid gränsytan mellan materialen skedde inom mindre än 24 timmar vid rumstemperatur för de horisontella cellerna. Motsvarande stabilitetstid för de vertikala cellerna var några minuter. Sensorerna gav alltså utslag med tiden utan att den utsatts för temperaturer över den kritiska temperaturen.

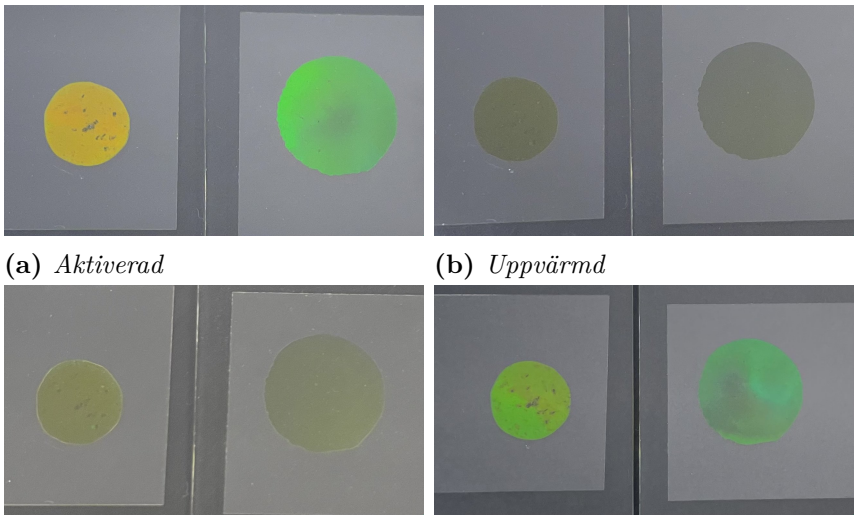
Det visade sig även vara svårt att producera de vertikala cellerna, då KB flöt ut och delvis blandade sig med limmet när den övre glasplattan placerades på den undre, vilket hindrade limmet från att härdas. Vid upphettning läckte vätskekristallmaterial ut där limmet inte slöt tätt. Efter utvärdering av detta koncept togs beslutet att inte vidareutveckla diffusionskonceptet.

4.2 Grandjean-cell

I rumstemperatur reflekterade KB som aktiverats mellan en glasplatta och ett täckglas orange färg, se Figur 4.1a, medan reflektionen blev grön vid aktivering runt 35 °C. KB dopades med KP, C15, ZLI-811 och CUC. Pitchen blev kortare av dopning med C15, se Figur 4.1a, ZLI-811 och CUC, och blandningen fick grön, turkos respektive blå reflektion i rumstemperatur. C15 löstes väl i KB och för att reflektionen skulle bli grön krävdes cirka 8 vikt-% C15. Den exakta vikt-% ZLI-811 och CUC som krävdes för att uppnå den reflekterade färgen undersöktes inte då ämnena var svårlösta i KB. Dopning med KP resulterade i längre pitch och därmed röd reflektion men var svårlöslig, vilket framträdde som genomskinliga områden efter uppvärmning.

Samtliga försök till aktivering som genomfördes med uppställningen där KB lades på glasplattor och täcktes med täckglas lyckades. Efter uppvärmning höll sig ett fåtal prover genomskinliga tills de aktiverades manuellt, se Figur 4.1. Dessa resultat kunde dock inte reproduceras efter återaktivering, och majoriteten av proverna återgick till att reflektera samma färg som vid aktiverat tillstånd utan triggning.

Vid försök att fylla testceller med KB krävdes temperaturer på över 100 °C för att KB skulle fylla cellen. I isotrop fas reflekterades ingen färg, och vid nedkylning



(a) *Aktiverad* **(b)** *Uppvärmd*

(c) *Nedkyld* **(d)** *Aktiverad*

Figur 4.1: *Förloppet av aktivering (a), triggning (b), nedkylning (c) och manuell återaktivering (d) i prover med KB (vänster) och KB dopad med C15 (höger).*

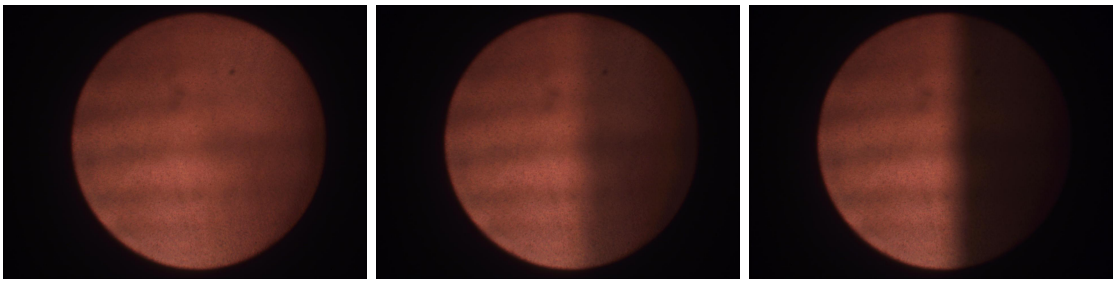
övergick färgen först till grön och sedan till orange vid rumstemperatur. Färgändringen skedde utan påverkan av stötar eller tryck.

Efter triggning av båda typerna av aktiverade celler, genom att öka temperaturen, återgick alltså majoriteten av cellerna till att reflektera samma färg som i aktiverat tillstånd. Det syntes alltså ingen skillnad på aktiverade celler innan och efter uppvärmning. Efter utvärdering av detta koncept togs beslutet att inte vidareutveckla det.

4.3 SmA-cell

Initiala tester av konceptet för SmA-celler med E7 gav lovande resultat, då direktorn lyckades styras med ett externt E-fält i rumstemperatur. En borstad cell fylld med E7 i N-fas observerades med hjälp av POM med korsade polarisatorer. I Figur 4.2 visas bilder från POM då ett E-fält med varierande spänning lagts över elektroderna i cellen. Vid lägre spänning släppte hela cellen igenom ljus, se Figur 4.2a. Men när spänningen ökades släppte det aktiva området igenom mindre ljus, se Figur 4.2b och 4.2c.

Vid aktivering av celler fylld med 8CB, värmdes de först till N-fas runt 34 °C, varefter ett E-fält med en spänning på cirka 25 V lades över dem. Liknande celler fyllda med E7 såg det aktiva området mörkt ut i POM vid pålagd spänning. Till skillnad från celler fyllda med E7, där den styrda direktorn relaxerade direkt då fältet togs bort, behöll celler med 8CB sin aktivering då vätskekristallen kyldes till SmA-fas under inverkan av E-fältet. Området mellan elektroderna förblev alltså mörkt då E-fältet togs bort för celler fyllda 8CB vid observation med POM. Vid observation av över ljusbordet, syntes en tydlig region där direktorn



(a) $1,6\ V$ **(b)** $3,8\ V$ **(c)** $7,0\ V$

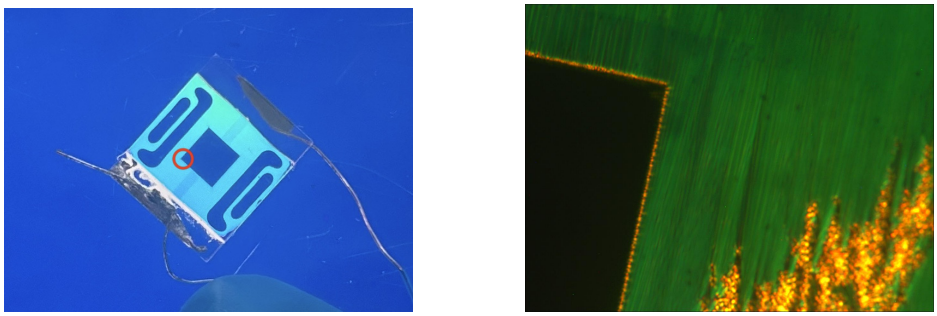
Figur 4.2: *Bilderna visar en cell fylld med E7 i rumstemperatur och är tagna med POM och korsade polarisatorer. En AC spänning i form av en fyrkantsvåg med frekvensen 1,4 kHz låg över cellen. Amplituden på spänningen varierade i de olika bilderna och indikeras ovan för att illustrera övergången från ljust till mörkt aktivt område. Bilderna är tagna så att gränsen mellan elektrodytan och resten av cellen är en vertikal linje i mitten av cirklarna, där det mörka området i (b) och (c) är ytan av cellen där elektroden var placerad.*

hade en annan orientering jämfört med resten av cellen. Denna region såg vit ut mellan korsade polarisatorer på ljusbordet och motsvarade området i cellen mellan elektrodmönstret. När cellen sedan värmdes på nytt försvann det vita området.

Dopning av 8CB med E7, ZLI-811, ZLI-1409, C15 resulterade i instabila celler som inte lyckades aktiveras. Antingen kunde direktorn inte styras med ett externt E-fält eller så behöll den inte riktningen efter att E-fältet tagits bort. Däremot resulterade 8CB dopat med 5,6 % KP i celler som inte bara var stabila i rumstemperatur utan även uppvisade ett unikt tvåstegsbeteende. För dessa celler syntes en mörk ruta i mitten av cellerna, där elektrodmönstret var placerat, då cellerna observerades på ljusbord efter aktivering, se Figur 4.3. När cellerna lämnades på ljusbordet i cirka 10 minuter, övergick den aktiva ytan från svart till vit se, Figur 4.4.

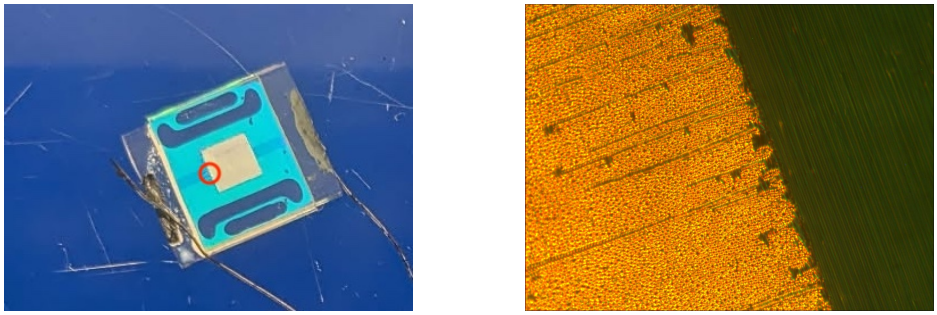
Båda tillstånden, svart och vitt, var stabila i rumstemperatur då aktiverade celler såg identiska ut efter att de lämnats i rumstemperatur under 7 veckor. Övergången från mörk ruta till vit ruta skedde alltså endast då cellen värmts till temperaturer lite över rumstemperatur genom att ha varit placerade på ljusbordet under några minuter. Om cellerna däremot placerats på värmesteget och värmts till 34 °C försvann den svarta respektive vita rutan då vätskekristallen nådde N-fas. Efter att rutorna hade försvunnit var det möjligt att återigen aktivera cellerna till det svarta tillståndet. Denna process kunde upprepas fem gånger utan att utseendet på cellerna i deras oaktiverad och aktiverade tillstånd ändrades.

Det var även möjligt att observera det mörka och vita områdena, som framträdde när cellerna aktiverades, mellan korsade polarisatorer över en reflexiv yta. Vid observation av de aktiverade cellerna med mörka områden i POM, syns en liten orange rand i kanten av det svarta aktiverade området, se Figur 4.3b. Denna rand har ett utseende som är snarlikt hela det vita aktiverade området när det observeras i POM, se figur 4.4b. Vidare syns det gröna linjer i Figur 4.4b som går från kanten in mot mitten av det aktiverade området.



(a) (b)

Figur 4.3: *Bilderna visar en cell fylld med 8CB som dopats med 5,6 % kolesterylpelargonat. I dessa bilder är cellen nyaktiverad och har inte utsatts för temperaturer högre än rumstemperatur efter aktiveringen. I (a) är cellen placerad på ett ljusbord mellan korsade polarisatorer, och i (b) visas det rödmarkerade området av samma cell i POM.*

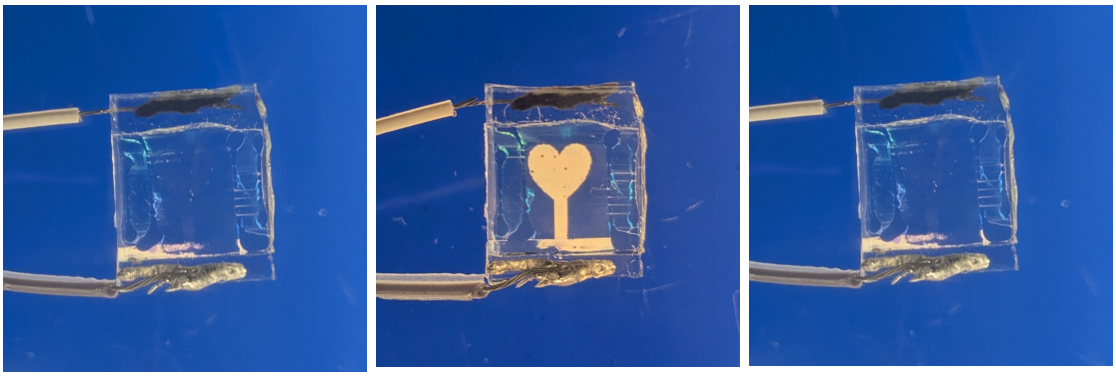


(a) (b)

Figur 4.4: *Bilderna visar en cell fylld med 8CB som dopats med 5,6 % kolesterylpelargonat. I dessa bilder har cellen aktiverats och sedan vistats på ljusbordet under några minuter, vilket har värmt den till en temperatur som överstiger normal rumstemperatur. I (a) är cellen placerad på ett ljusbord mellan korsade polarisatorer, och i (b) visas det rödmarkerade området av samma cell i POM.*

4.4 Analys av SmA-cell

I figur 4.5 visas bilder på SmA-celler fyllda med 8CB dopat med 7,9 vikt-% KP, vilket är den slutliga prototypen för vår tid-temperatursensor. För den slutliga designen av prototypen togs beslutet att göra elektrodmönstret hjärtformat. Vid tillverkningen av celler med denna design visade det sig svårt att montera ihop glasplattorna så att elektrodernas överlapp hamnade i mitten av cellerna. Även bortetsningen av ITO-beläggning utanför elektrodmönstret visade sig vara bristfällig. Detta gjorde att många av cellerna med hjärtformade elektroder var oanvändbara då de inte betedde sig som tidigare celler vid aktivering. Majoriteten av cellerna kunde antingen inte aktiveras alls eller så ändrades de optiska egenskaperna i hela cellen vid aktivering, och höll sig alltså inte till den aktiva arean. De hjärtformade cellerna som kunde aktiveras, där den aktiva arean blev vit, användes för livslängdsanalys och stresstester. Dock kunde dessa celler inte aktiveras till det mörka tillståndet som syns i Figur 4.3 för SmA-celler dopade med 5,6 vikt-% KP. Det tvåstegsbeteende som tidigare observerats för SmA-celler kunde alltså inte återskapas.



(a) (b) (c)

Figur 4.5: *SmA-cell fylld med 8CB + 7,9 % KP mellan korsade polarisatorer. Cellen är först oaktiverad (a), den aktiveras sedan och ett hjärta framträder (b). I (c) har cellen hettats upp till N-fas, och hjärtat har försvunnit.*

4.4.1 Livstidsanalys

Genom att mäta kapacitansen för aktiverade och oaktiverade celler var det möjligt att fastslå att oaktiverade celler hade en lägre kapacitans än aktiverade. Den prediktiva modellen för livstid kördes på mätdata från kapacitansmätningar av två celler, en fylld med bara 8CB och en dopad med 7,9 vikt-% KP, se Appendix A.4 för mätserien. För den odopade cellen beräknades livstiden till mellan 2 och 3 dygn baserat på vilken modell som användes. CI som togs fram för den odopade cellen visar att 95 % av alla modeller som anpassats till omsamplad data har en livstid längre än en halvtimme och en timme beroende på vilken modell som användes. För den dopade cellen gav ingen av modellerna ingen minsta livslängd och ett CI kunde inte tas fram för modeller som använde en potens eller logaritmisk anpassning. Dock var det möjligt att ta fram ett CI för modellen som anpassade mätserien till ett logaritmisk andragradspolynom, vilket för den dopade cellen resulterade i att 95 % av alla modeller som anpassats till omsamplad data hade en livslängd längre än 2 timmar. Värt att notera är att determinationskoefficienten för samtliga modeller som gjordes var under 0,6. Beräknade TTF, determinationskoefficient (R^2) och CI för varje modell för de två cellerna finns i Appenix A.2.

4.4.2 Exponering för solljus

Fyra celler testades. Två av dessa hade ett etsat elektrodmönster medan de andra två hade en aktiv yta genom hela cellen. Samtliga celler innehöll huvudsakligen 8CB, och en av cellerna med etsat elektrodmönster respektive ITO över hela cellen var dopad med 7,9 vikt-% KP. Alla fyra celler aktiverades, och kapacitansen mättes sedan efter olika exponeringstid i solen; se Tabell A.4 i Appendix A.4 för hela mätserien. Cellerna med aktiv area i hela cellen hade betydligt högre kapacitans än de med etsade elektrodmönster. För mätningarna efter 5 min exponering byttes sladdar ut i mätuppställningen, de gick sedan sönder och byttes tillbaka för mätningarna 60, 180 min. Vid visuell inspektion syntes inga tecken på att cellerna hade förändrats.

4.4.3 Undersökning av stöttålighet

Samtliga fyra celler som utsattes för falltester behöll sin kapacitans inom ett intervall på högst 193 pF vid fall från 1 meters höjd, se Tabell A.5 i Appendix A.4. Värt att notera är att två celler uppvisade en lägre varians av kapacitansvärden än de andra, som båda hade högre kapacitans vid testernas start.

Efter det första försöket av fall från 1,5 meters höjd gick Cell 4 sönder då lödtennen släppte från ena glasplattan. Därav finns endast en mätpunkt för Cell 4 vid fall från 1,5 meter. Även Cell 14 gick sönder då glaset krossades vid det tionde försöket; därav finns endast mätdata för de nio första försöken från 1,5 meters höjd för Cell 14.

4.4.4 Upprepad aktivering och upphettning

Efter den första aktiveringen uppvisade samtliga celler en tydlig kontrast mellan aktiv och inaktiv area vid visuell observation. Vid varje efterföljande aktivering mättes kapacitansen, se Tabell A.6 i Appendix A.4. Det bör noteras att tabellen enbart visar kapacitansvärden, medan observationer av den aktiva arean baseras på kvalitativ visuell bedömning. För vissa aktiveringar kunde inte kapacitansen mätas på grund av problem med mätutrustningen. I dessa fall noterades inget mätvärde, utan en ny aktivering genomfördes istället.

Ett tydligt samband observerades mellan den aktiverade arean och den uppmätta kapacitansen. När hela cellens yta aktiverades istället för bara hjärtmönstret ökade kapacitansen markant, vilket kan ses i Tabell A.6 på cell 10. Från början hade cellen ett tydligt hjärtmönster, därefter blev den aktiverad på hela cellen i aktivering 2, och till sist i aktivering 3 blev bara halva hjärtytan aktiverad vilket resulterade i ett betydligt lägre kapacitansvärde. Partiell aktivering av ytan kunde även observeras i cell 17 där kapacitansen sjönk vid den 5e aktiveringen för att sedan öka igen vid den 8e aktiveringen när en större del av ytan aktiverades.

När celler skadades, exempelvis genom kortslutning eller applicering av för hög spänning, minskade kapacitansen kraftigt och kunde i vissa fall närma sig noll. Detta indikerade att cellens funktion då i stor utsträckning gått förlorad. Cell 1 utgör ett exempel där kortslutning ledde till mycket låg kapacitans, samtidigt som endast en otydlig visuell aktivering kunde observeras. Cell 10 uppvisade liknande respons när spänningen ökades till cirka 36 V. Mätserien avslutades när cellerna skadades, för cell 1 skedde detta vid det tredje aktiveringsförsöket och för cell 10 var det vid det fjärde.

Cellerna 17 och 32 kunde omaktiveras minst tio gånger utan tydliga problem enligt visuell bedömning av den aktiva arean. Trots detta noterades en successiv minskning i kapacitans jämfört med första aktiveringen, vilket tyder på en gradvis degradering över upprepade aktiveringscykler.

5
Diskussion

I detta avsnitt diskuteras arbetets resultat utifrån de framtagna utvärderingskriterierna och deras relevans för samtiden.

5.1 Horisontell diffusionscell

De horisontella diffusionscellerna uppvisade en stabilitetstid på mindre än ett dygn, vilket bröt mot kriteriet om entydiga resultat, och inkluderades därför inte i den fortsatta analysen i projektet. Den låga stabilitetstiden beror troligtvis på att diffusion primärt drivs av koncentrationsgradienter och att systemets energi vid rumstemperatur är högre än aktiveringsenergin för diffusion. Denna arkitektur har dock potential om problemet med stabiliteten kan lösas. Ett mervärde som går förlorat är att det kan vara möjligt att uppskatta hur lång tid cellen har varit över den kritiska temperaturen, eftersom ämnen diffunderar lättare ju längre tid de har befunnit sig över den kritiska temperaturen. Genom att mäta gränsskiktets utbredning och observera dess optiska egenskaper hade detta kunnat nyttjas för att skapa en tidtagningsfunktion. Det hade även varit möjligt att nyttja flera olika kirala ämnen med olika smältpunkter i samma sensor för att på så vis skapa en flerstegs-temperatursensor.

5.2 Vertikal diffusionscell

Diffusionsceller med vertikal geometri uppvisade mycket bristande stabilitet, och de var även svåra att producera. Konstruktionen var i praktiken endast användbar en gång, vilket i sig är förväntat av denna typ av struktur, men begränsar dess praktiska användbarhet och gör att den inte heller lever upp till kriteriet om återanvändbarhet. Anledningen till att stabilitetstiden för denna geometri var betydligt lägre än för den horisontella geometrin beror troligtvis på den större kontaktytan som uppställningen medför.

5.3 Stabilisering av Grandjean-struktur

Sensorer baserade på kolesteriska vätskekristaller som ordnas genom applicering av ett fingertryck har stor potential. En önskvärd färg i sensorns aktiverade tillstånd, som försvann vid upphettning, kunde uppnås, och vissa celler gav tydliga och entydiga utslag fram till dess att de återaktiverades. Detta resultat kunde dock inte reproduceras, då proverna hade en förmåga att oavsiktligt återaktivera sig själva. Troligtvis beror detta på att trycket från täckglaset, i samband med vätskekristallens fasövergång, orsakar ett mikroflöde som ger upphov till Grandjean-strukturen vid nedkylning. Potentiella lösningar till detta hade varit att införa distanshållare

i vätskekristallmaterialet eller att använda ett substrat som tillåter expansion och kontraktion av materialet mellan substraten utan att det byggs upp ett tryck.

5.4 SmA-cell

SmA-cellerna som togs fram gav förutsägbara och tydliga utslag när de nådde en kritisk temperatur och är därför ett mycket lovande koncept för utvecklingen av tid-temperatursensorer. Sensorerna som gett utslag kunde även nollställas genom att återaktiveras med pålagd spänning. Utslaget syntes i transmission såväl som reflektion mellan korsade polarisatorer, vilket möjliggör en sensordesign där utslag kan avläsas i ambient ljus. En design som ej behöver annan hårdvara breddar tillämpningsområdena för sensorerna avsevärt.

Dopning av 8CB med 5,6 % KP visade mest lovande resultat sett till stabilitet och tydlighet, och celler fyllda med detta material påvisade ett tvåstegsbeteende. Celler som aktiveras som den i Figur 4.3a, mörkt område, har homeotropt orienterade skikt i nästintill hela domänen som ej modulerar ljuset. Om dessa sedan utsätts för en lätt uppvärmning övergår domänen till konfokal, vitt område, vilket syns i figur 4.4a. Anledningen till att den konfokala domänen ser ljus ut mellan korsade polarisatorer är att områdenas cirkulär eller elliptisk symmetri gör att ljuset moduleras kaotiskt. Tvåstegsbeteendet är av stort intresse för utvecklingen av en sensor som ska kunna tillämpas på mycket känsliga varor. En sensor kan tänkas ge vitt utslag vid en liten temperaturökning under fasövergångstemperaturen och området kan försvinna helt vid en större temperaturökning.

Temperaturen varvid SmA-cellen gav utslag varierade något beroende på dopämne och koncentration. Det finns stor potential att undersöka detta vidare för att möjliggöra tillverkning av celler som ger utslag vid specifika temperaturer. Detta arbete fokuserade på 8CB med en mindre dopning av KP då det gav utslag runt 34 °C, eftersom det är nära den temperatur då bakterier förökar sig som bäst. Stabiliteten hos aktiverade SmA-celler verkar vara mycket god, och livslängden för en sensor i bruk uppskattas vara upp till minst två veckor. Det är tänkbart att stabiliteten blir ännu bättre hos celler med ett tjockare lager vätskekristall, eftersom inverkan av ytrandvillkor då inte blir lika stark.

Anledningen till att hjärtformen valdes i elektrodmönstret var dels eftersom hjärtat har en tydlig och positiv visuell association och dels för att skapa ett stort område där direktorns riktning ändrades för att öka cellens stabilitet. Ett hjärta kan intuitivt tolkas som en indikation på ett normalt eller önskvärt tillstånd oavsett från vilket håll man tittar på sensorn, vilket minskar risken för feltolkning vid avläsning och ökar användarvänligheten. I Figur 4.3b och 4.4b syntes tydliga avvikelser i cellens optiska respons längs elektrodkanterna. Detta gjorde att symboler med smalare linjer, såsom smileys eller stjärnor, bedömdes vara mindre lämpliga eftersom omkretsen ville minimeras för att öka stabiliteten. Valet av form baserades därför på behovet av en geometri som minimerar instabilitet vid kanterna och ger tydlig avgränsad och entydig optisk respons. Eftersom ITO-lagret måste vara sammanhängande för

att möjliggöra aktivering, krävs dessutom kontinuerliga elektrodstrukturer, vilket ytterligare begränsar möjligheten att använda mer fragmenterade eller detaljerade former.

5.5 Stresstest av SmA-cell

Tester av stabiliteten hos en sensor i bruk gav mycket lovande resultat. För de aktiverade celler som lämnats längst tid, 7 veckor, visas inget visuellt tecken på åldring eller spontan relaxering. Detta tyder på att cellerna har en möjlig livslängd på över 7 veckor och en färdig produkt kan därför tänkas användas i längre logistikkedjor. Kapacitansmätningarna som genomfördes påvisade en stor variation i kapacitans mellan celler som skapats på samma sätt. Under stresstesten uppmättes en mindre variation i kapacitans för enskilda cellen men denna hade inte en tydlig koppling till stresstesterna. Då stresstesterna inte heller gav visuella utslag, beror den mindre variationen i kapacitans mellan mätningarna rimligtvis inte på att cellerna relaxeras.

Datorbaserad livstidsanalys av aktiverade celler gav varierande resultat beroende på vilken matematisk modell som extrapolerade datan. CI från bootstrap-resamplingen blev olyckligtvis väldigt stora. Från mätserien som togs på en cell fylld med odopad 8CB, återgav modellen en livslängd på ca 3 dagar. Denna livslängd, som beräknades via kapacitansmätningar, är alltså betydligt kortare än den livslängd som uppmätts genom att undersöka cellens utseende och funktion över tid. Anledningen till att modellen ej gav någon tydlig insikt kring sensorernas livslängd kan vara att mätpunkter togs i ett för litet tidsintervall, samt att fler faktorer kan påverka kapacitansen i en cell utöver vätskekristallgeometrin. Ännu en anledning kan vara att SmA-vätskekristallerna som mätningarna gjordes på hade en konfokal geometri, vilket innebär att de befann sig i ett metastabilt tillstånd. Dessutom ingår det en handfull godtyckliga parametrar i modellen, exempelvis när en sensor betraktas som obrukbar och även vilka typer av modeller som anpassas efter datan. Tester under större tidsintervall, förslagsvis flera månader, kan tänkas ge mer tillförlitliga resultat för sensorns livslängd.

Stabiliteten hos en aktiverad sensor visade sig vara god efter belastning i form av stötar, solljus och omaktivering. Visuellt visade korrekt aktiverade celler inga tecken på försämring efter upprepad aktivering eller solexponering i totalt fem timmar. Cellerna fortsatte att vara aktiverade när de utsattes för falltester, men själva testcellen gick sönder efter upprepade fall från 1,5 m. Detta talar mycket gott om förmågan hos en färdig sensor att användas upprepade gånger i verkliga produktions- och logistikkedjor där direkt solljus och lättare stötar kan förekomma. Dock kan en tåligare testcell behöva utvecklas för att säkerställa att cellerna inte går sönder vid mekanisk belastning.

5.6 Utvecklingspotential för SmA-cell

Resultatet från denna studie visar att det mest lovande konceptet av de som undersökts är de sensorer som benämns som SmA-cell och som aktiveras med hjälp av ett elektriskt fält. Till skillnad från de tid-temperatursensorer som just nu finns tillgängliga på marknaden, skulle SmA-sensorer vara återanvändbara, vilket är fördelaktigt ur såväl ett ekonomiskt som hållbarhetsperspektiv. För att realisera en bra slutprodukt baserad på detta koncept krävs vidare arbete, och vi ser stor potential i utvecklingsarbetet för att göra detta möjligt. Här beskrivs några av de saker som kan arbetas vidare med för att nå målet att skapa en fungerande sensor.

Om en sensor kan anpassas utifrån specifika temperaturintervall blir tillämpningsområdena många fler. Därför finns det en betydande utvecklingspotential i att hitta vätskekristallmaterial som genomgår fasförändringar vid önskvärda temperaturer. Att testa olika kombinationer av vätskekristall och dopämne, samt olika koncentrationer av dopämne, hyser av samma anledning goda möjligheter för framtida utveckling. Dessutom är det möjligt att vidare undersöka exakt hur mycket spänning som krävs för att aktivera celler beroende på deras innehåll, tjocklek och temperatur. Metoden för att styra direktorn kan också utvecklas, exempelvis genom att använda magnetiska snarare än elektriska fält.

Möjligheter till produktionen av denna typ av sensor kan också undersökas vidare. Att byta ut glassubstratet mot böjbar plast eller att styra direktorn med magnetfält istället för E-fäkt är två exempel på vad som kan utforskas för att skapa bättre och mer hållbara celler. Om fortsatt utveckling av detta koncept ska ske är det viktigt att ha hållbarhetsaspekter i åtanke. Vissa vätskekristallmaterial som används vid tillverkningen kan potentiellt vara farliga för miljön och kan vara svåra att återvinna eller omhänderta på ett säkert sätt efter att sensorn har använts. Vidare är de flesta plaster miljöovänliga, och fördelarna med att skapa hållbarare och billigare celler måste vägas mot nackdelarna av att det kan vara skadligt mot miljön.

6
Slutsatser

Vid utvärdering av sensorkoncepten enligt projektets syfte och mål, samt uppsatta kriterier kunde vi dra följande slutsatser.

6.1 Diffusionsceller

Diffusionsceller uppfyllde inte utvärderingskriterierna. De visade sig vara svåra att realisera, då ingen typ av diffusionscell kunde skapas som uppvisade god stabilitet eller som endast gav utslag vid uppvärmning, vilket bryter mot kriteriet om entydiga resultat.

6.2 Stabilisering av Grandjean-struktur

En temperatursensor med minnesfunktion baserat på att framkalla en stabil Grandjean-struktur kunde framställas, men var svåra att återskapa med entydiga utslag. Utveckling av arkitekturen, med exempelvis andra substrat och distanshållare, hade kunnat öka tillförlitligheten och göra resultaten reproducerbara genom att förhindra att sensorena återaktiverar sig själva efter att de triggats av ökad temperatur.

6.3 SmA-cell

SmA-cellen är det sensorkoncept som visat sig mest lovande för utvecklandet av en tid-temperatursensor. Resultaten var entydiga, kunde reproduceras, gav tydligt utslag och dessutom kunde samma cell användas flera gånger, vilket gör att SmA-cellen möter majoriteten av kriterierna som beskrivits i problemformuleringen i avsnitt 1.2. Då tillverkningsprocessen för SmA-celler var enkel att genomföra och det idag produceras många produkter som innehåller vätskekristallmaterial, drar vi slutsatsen att massproduktion av SmA-celler är möjligt.

Tvåstegsbeteendet som en handfull celler uppvisade kan tänkas möjliggöra en sensor som kan ge olika utslag vid två olika temperaturer. Vidare var dessa celler stabila i två olika aktiverade tillstånd, vilket lägger grunden för en sensor som uppfyller alla kriterier och dessutom har två kritiska temperaturer.

Flertalet saker behöver utvecklas för en SmA-baserad sensor innan en färdig produkt kan realiseras. Vidareutveckling bör fokusera på att undersöka en stor mängd vätskekristallmaterial och dopämnen för att ta fram sensorer som ger tydliga utslag i rätt temperaturintervall och som är stabila under lång tid. Själva tillverkningsprocessen kan även utvecklas; etsning, limning, borstning, knäckning av glas och

lödning av elektroder är steg där felaktigheter kan uppstå som gör cellerna obrukbara. Dessutom kan aktiveringen utvecklas genom att undersöka andra metoder för att tvinga direktorn i en önskad riktning, exempelvis genom magnetiska snarare än elektriska fält.

6.4 Stresstestning och utvärdering av hållbarhet för SmA-cell

Slutsatsen för stabiliteten hos SmA-sensorerna är att de är tåliga mot stötar och solljus, och kan återaktiveras en handfull gånger. Dock kan inga slutsatser dras från livstidsanalysen för SmA-sensorer som gjordes med hjälp av en statistiska beräkningsmodell på mätdata från kapacitansmätningar. Detta eftersom den beräknade livslängden var betydligt kortare än de 7 veckor som SmA-sensorn experimentellt visade sig brukbar. Kapacitansmätningar under kort tid visade sig alltså vara ett opålitligt mått för att avgöra brukbarhet. Framtida tester för att empiriskt avgöra brukbarheten hos sensorer bör göras med noggrannare mätinstrument, och under längre tidsintervall. Den statistiska beräkningsmodellen som användes kan även anpassas bättre efter sensorernas egenskaper, och fler mätpunkter kan tas för att minska konfidensintervallet.

6.5 Avslutande tankar

Realiseringen av SmA-baserade tid-temperatursensorer löser ett nischat problem med en teknik som i dagsläget inte utnyttjas till detta ändamål. Detta arbete har tagit fram en konkret metod för att tillföra en minnesfunktion till SmA-vätskekristaller, och även skapat prototyper som irreversibelt och tydligt gett utslag vid en förhöjd temperatur. Sensorkonceptet som tagits fram uppfyller kraven på entydiga och reproducerbara resultat, och kan återanvändas en handfull gånger. Möjligheten till massproduktion bör utforskas vidare, då en metod för produktion realiserades och i princip hade kunnat genomföras i större skala. Kravet på en sensor anpassad till relevanta temperaturintervall lämnas som mål för vidare utveckling, och är avgörande för tillämpbarheten hos en färdig produkt. Vi anser att möjligheterna för att utveckla en vätskekristallbaserad tid-temperatursensor baserat på de framtagna prototyperna är mycket goda. En sensor skulle i framtiden kunna användas för att fastställa temperaturhistoriken av temperaturkänsliga produkter, men mer arbete krävs.

Litteratur

[1] John W. Goodby Peter J. Collings. *Introduction to liquid crystals – Chemistry and physics*. 2:a. Taylor & Francis Group, 2020.

[2] M. M. Labes Glenn H. Brown. "The Third International Liquid Crystal Conference - Part 1". I: *Liqiud Crystals 3*. 1970.

[3] LCR Hallcrest. *Digi-Temp: Reversible Thermochromic Liquid Crystal Thermometers*. URL: https://www.thermographics.com/Portals/0/Documents/Consumer/Aquarium%20Thermometers/PDS%20002%20Rev%2003%20Digitemp%20PI.pdf (hämtad 2026-02-12).

[4] Sigma aldrich. *Timestrip PLUS 8C 48 hours*. URL: https://www.sigmaaldrich.com/SE/en/product/sial/80826?utm_source=google&utm_medium=cpc&utm_campaign=21719596070&utm_content=166347456374&gad_source=1&gad_campaignid=21719596070&gbraid=0AAAAAD8kLQQSTXSTYwlkxR5p2S3-CxcVN&gclid=CjwKCAjwtvvPBhBuEiwAPMijr2xuwG-50LOxNxJWdZEZK1PGwopwts-X_HwBruLW3SESH9meFChI5xoCunUQAvD_BwE (hämtad 2026-05-09).

[5] Wikipedia. *Mesophile*. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Mesophile (hämtad 2026-04-08).

[6] Canva. *Canva – Visual Suite*. https://www.canva.com. Hämtad: 2026-04-27.

[7] Ebba Grönfors. "Alignment of a Ferroelectric Nematic Liquid Crystal on Surfaces Treated with Obliquely Evaporated SiO_2". Examensarb. Chalmers University of technology, 2023.

[8] David S. Hermann Sven T. Lagerwall Per G. Rudquist. "Liquid Crystals—Optical Properties and Basic Devices". I: *Encyclopedia of Optical Engineering*. Utg. av Ronald G. Driggers. New York: Marcel Dekker, Inc., 2003, s. 1159–1176. DOI: 10.1081/E-EOE.

[9] Tao Xu Zhong-Can Ou-yang. "The Beauty of Mathematics in Helfrich's Biomembrane Theory". I: *arxiv.org* (2026).

[10] Christian Bahr Wei Guo. "Influence of phase secuence on focal conic domains in smectic films". I: *Phys. Rev. E* (2009). DOI: 10.1080/00401706.1991.10484846.

[11] Stephen Lower. *Liquid Crystals*. URL: https://chem.libretexts.org/Bookshelves/Physical_and_Theoretical_Chemistry_Textbook_Maps/Supplemental_Modules_(Physical_and_Theoretical_Chemistry)/Physical_Properties_of_Matter/States_of_Matter/Liquid_Crystals (hämtad 2026-02-12).

[12] Hui-Yu Chen m. fl. "A bistable liquid-crystal display mode based on electrically driven smectic A layer reorientation". I: *Applied Physics Letters* (2007). DOI: 10.1063/1.2799742.

[13] Lavrentovich OD Kim YK Senyuk B. "Molecular reorientation of a nematic liquid crystal by thermal expansion". I: *Nat Commun* (2012).

[14] G.L. Rorrer och D.G. Foster J. R. Welty. *Fundamentals of Momentum, Heat and Mass Transfer*. 7:e. Wiley, 2019.

[15] Floyd W. Spencer. ”Statistical Methods in Accelerated Life Testing”. I: *Technometrics* (1991).

[16] Wikipedia. *Bootstrapping (statistics)*. URL: `https://en.wikipedia.org/wiki/Bootstrapping_(statistics)` (hämtad 2026-05-11).

[17] Anthropic. *Claude (claude-sonnet-4-6)*. `https://www.anthropic.com`. Hämtad: 2026-05-07. 2025.

A
Appendix

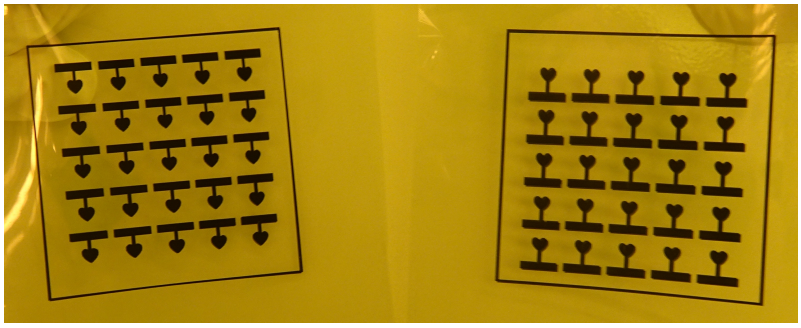
A.1 Vätskekristallmaterial

Tabell A.1: *Listade fasövergångssekvenser och kiralitet för de studerade vätskekristallmaterialen. Fasövergångstemperaturerna är framtagna experimentellt eller tillhandahållna av projektets handledare.*

Material	Fasövergångstemperatur [°C]	Kiral
E7	SmA – <-30 °C – N – 58 °C – I	Nej
8CB	SmA – 34 °C – N – ∼45 °C – I	Nej
ZLI-811	K - 48 °C – I	Ja
KB	N* – 45 °C	Ja
KP	K – 78,5 °C – N* – I	Ja
CUC	K – ∼45 °C – ?	Ja
C15	K – 53,3 °C – I (N* – 9+/-3 °C – I)	Ja
ZLI-1409	K – 34 °C – SmB – 146 °C – N – 164 °C – I	Ja
N phase 5	-5 °C - N - 75 °C	Nej
MLC-6263	N - ∼110 °C - I	Nej
MLC-6096	Saknas	Ja

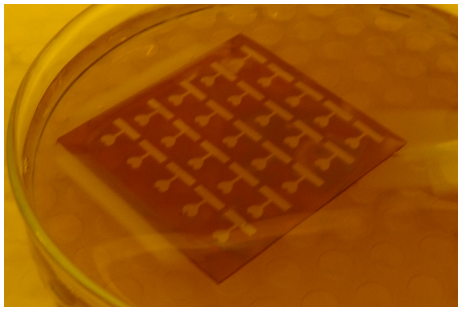
A.2 Metod för fotolitografi och montering av celler

En UV-resistent mask, se Figur A.1 designades i Microsoft PowerPoint. 10 st tunna glasplattor med en beläggning av induimtennoxid (ITO), som tvättats enligt Standard Clean 1 med väteperoxid och ammoniak, blåstes fria från eventuella kvarvarande partiklar med hjälp av en kvävgaspistol för att förbereda dem för fotolitografi. I möjligaste mån användes vakuumpincett för att hantera glasplattorna mellan olika steg i fabrikationsprocessen.



Figur A.1: *Bild som visar masktyp 1 (vänster) och masktyp 2 (höger).*

Ett tunt lager med positiv fotoresist (AZ-1512) applicerades över ITO-beläggningen på glasplattorna genom spinnbeläggning (eng. spin coating) med varvtal 3000 min^{-1} i 30 sekunder. Plattorna placerades sedan på en värmeplatta som höll 100 °C i 1 minut. Därefter täcktes plattorna med UV-blockerande masker med elektrodmönster, och belystes därefter med UV-ljus i 30 sekunder för att bryta ner fotoresisten runt elektrodmönstret. Hälften av plattorna täcktes med masktyp 1 och den andra täcktes med masktyp 2.



Figur A.2: *Bild som visar en glasplatta doppad i framkallningsvätska.*

För att avlägsna fotoresisten utanför elektrodmönstret lades plattorna i framkallningsvätska (MF322) i 20 sekunder, se Figur A.2, och sedan doppades de i en syrablandning bestående av vatten, saltsyra och salpetersyra (50:50:1) i 8 minuter för att etsa bort ITO-skiktet utanför elektrodmönstret.

Plattorna doppades sedan i remover för att ta bort kvarvarande resist över elektrodmönstret. Först en gång i ett rumstempererat bad i 30 s och sedan en gång i ett större bad, uppvärmt till 60 °C, som vibrerade med ultraljud i 15 min. Därefter sköljdes plattorna i vattenbad för att avlägsna all remover.

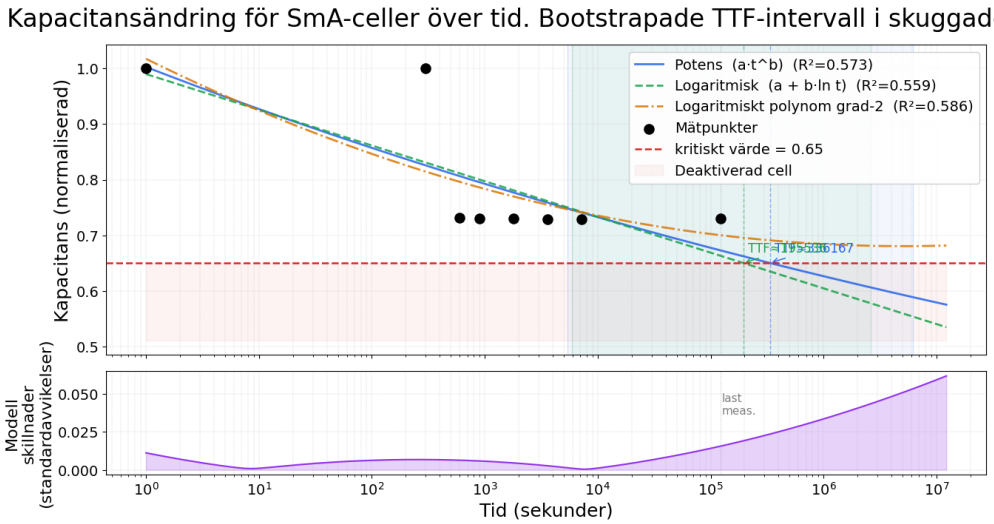
Efter sköljningen blåstes plattorna delvis torra med kvävgas och placerades sedan i ugn (100 °C) i 30 minuter för att torkas helt. När plattorna torkats spanns polyimid på plattorna på sidan med elektrodmönster genom spinnbeläggning i 30 sekunder. Sedan placerades plattorna på värmeplatta 100 °C för att fästa polyimiden och avdunsta lösningsmedlet. Därefter härdades polyimiden i ugn (300 °C) i 3 timmar.

När polyimiden härdats parallellborstades ytorna med hjälp av en borstmaskin och hälften av plattorna limmades i en maskin med ett limmönster som motsvarade 5x5 celler på en platta. Limmet innehöll 4 μm spacers för att säkerställa ett konstant plattavstånd i testcellerna.

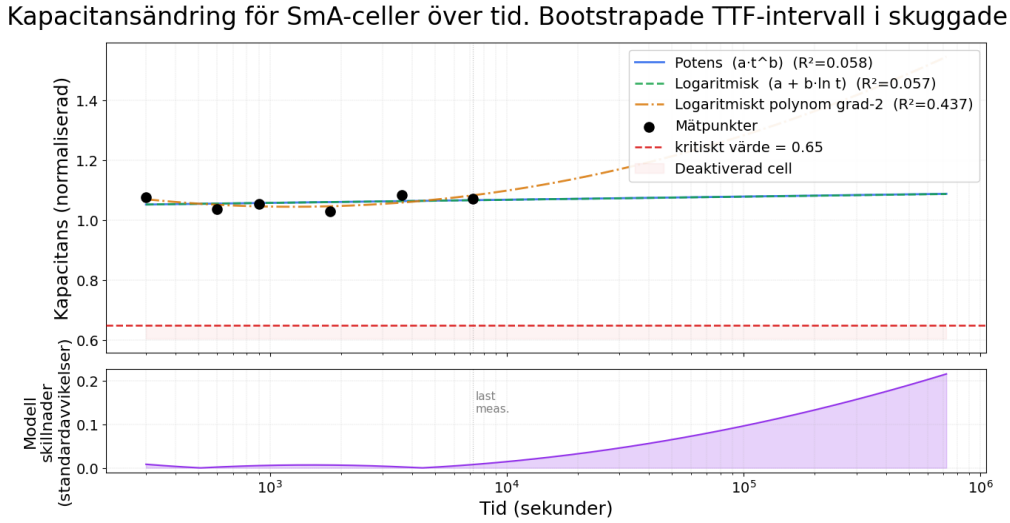
Den limmade plattan placerades på en ihopsättningsapparat som positionerade den korrekt innan den fixerades med vakuum. Den andra plattan i paret monterades på motsvarande sätt på maskinens andra sida. Därefter stängdes maskinen och plattorna sammanfogades, varefter en initial härdning på 4 s utfördes med UV ljus. Därefter vakuumförpackades plattorna och belystes sedan med UV-ljus i ytterligare 10 min för att härda limmet.

Utanför renrummet skars 25 st testceller ut från de ihoplimmade glasplattorna med hjälp av en glasskärare.

A.3 Livstidsanalys på SmA-celler



(a)



(b)

Figur A.3: *Bilderna visar förväntat livstid för cell 25 och 31 enligt livstidsanalysen. Modellerna resamplas för att skapa CI för vardera modell, vilket syns som skuggade områden i olika färger. Beroende på matematisk modell varierar förväntat livstid kraftigt.*

Tabell A.2: *I tabellerna nedan presenteras resultaten från modellen för livstidsanalys som kördes på kapacitansmätningar för två SmaA-celler. Cellernas beräknade TTF och CI presenteras i enheten sekunder tillsammans med determinationskoefficienten (R^2). I flera fall var det inte möjligt att beräkna TTF och CI, vilket visas som (-) i tabellerna.*

8CB			
Modell	R^2	TTF	95 % CI
Potens	0,57	336167	5421-6186989
Logaritmisk	0,56	195535	5935-2600807
Log 2:a grad poly	0,59	-	1981-4776915

8CB + 7,9 vikt-% KP			
Modell	R^2	TTF	95 % CI
Potens	0,06	-	-
Logaritmisk	0,06	-	-
Log 2:a grad poly	0,44	-	10670-547677

A.4 Kapacitansmätningar

Tabell A.3: *Kapacitansmätningar [pF] celler fyllda med 8CB, en var odopad och en var dopad med 7,9 vikt-% KP.*

Tid från aktivering [min]	8CB	8CB + 7,9 vikt-% KP
0	2472	263
5	3362	254
10	2460	245
15	2455	249
30	2455	243
60	2450	256
120	2452	253
24 [h]	2454	-

Tabell A.4: *Kapacitans [pF] för celler fyllda med 8CB efter exponering för solljus. Cell 8 och 23 var odopade medan 12 och 34 var dopade med 7,9 vikt-% KP. Cell 23 och 24 hade ITO-beläggning på hela cellytorna medan 8 och 12 hade hjärtformade mönster.*

Exponeringstid [min]	Cell 23	Cell 24	Cell 8	Cell 12
0	2487	2147	540	514
5	2497	2120	540	505
10	2583	2200	549	509
20	2600	2200	549	509
60	2509	1576	550	510
180	2676	2234	558	515

Tabell A.5: *Kapacitansmätningar [pF] på celler som utsatts för 1 respektive 1,5 meters fall, mätt vid 100 kHz växelspänningsfrekvens. Cellerna 4 och 5 innehåller 8CB, och cellerna 14 och 19 innehåller 8CB + 7,9 vikt-%KP.*

Kapacitans [pF] efter fall från 1 meter				
Försök #	Cell 4	Cell 5	Cell 14	Cell 19
1	436	1970	566	1795
2	436	1965	571	1876
3	434	1966	572	1872
4	414	1966	578	1870
5	413	1975	578	1966
6	412	1983	576	1988
7	413	1984	577	1950
8	412	2077	575	1938
9	412	1990	575	1914
10	412	1983	575	1930

Kapacitans [pF] efter fall från 1,5 meter				
Försök #	Cell 4	Cell 5	Cell 14	Cell 19
1	408	1950	474	1823
2	-	1931	514	1922
3	-	1938	525	1927
4	-	1940	533	1927
5	-	1946	530	1227
6	-	1946	531	1240
7	-	1945	532	1230
8	-	1914	508	1238
9	-	1938	502	1980
10	-	1938	-	1829

Tabell A.6: *Kapacitansmätningar [pF] på celler fyllda med 8CB efter aktivering. Cell 10 och 32 var odopade. Cell 1 och 17 var dopade med 5,6 respektive 7,9 vikt-% KP. Symbolen (-) indikerar att mätning inte kunde genomföras till följd av problem med mätutrustningen eller att inga fler mätningar gjordes.*

Aktivering #	Cell 1	Cell 10	Cell 17	Cell 32
1	697	1136	970	582
2	-	1602	935	594
3	64,2	617	722	568
4	-	0	776	526
5	-	-	550	-
6	-	-	-	463
7	-	-	-	453
8	-	-	760	478
9	-	-	720	-
10	-	-	-	438
11	-	-	762	-

A.5 Bilder



Figur A.4: *Bild på författarna i Chalmers renrumslaboratorium.*

DEPARTMENT OF MICROTECHNOLOGY AND NANOSCIENCE
CHALMERS UNIVERSITY OF TECHNOLOGY
Gothenburg, Sweden
www.chalmers.se



CHALMERS
UNIVERSITY OF TECHNOLOGY