2016•2017
FACULTEIT INDUSTRIËLE INGENIEURSWETENSCHAPPEN
master in de industriële wetenschappen: elektromechanica

Masterproef

Ontwikkeling van een lensmatrixfolie op basis van inkjetprinten ter optimalisatie van de efficiëntie en het stralingspatroon van gepixelde OLED's

Promotor :
Prof. dr. ir. Wim DEFERME

Copromotor :
dr. ir. Jeroen DRIJKONINGEN

Martijn Cramer

Scriptie ingediend tot het behalen van de graad van master in de industriële wetenschappen: elektromechanica

Gezamenlijke opleiding Universiteit Hasselt en KU Leuven

2016•2017
Faculteit Industriële ingenieurswetenschappen
master in de industriële wetenschappen: elektromechanica

Masterproef

Ontwikkeling van een lensmatrixfolie op basis van inkjetprinten ter optimalisatie van de efficiëntie en het stralingspatroon van gepixelde OLED's

Promotor :
Prof. dr. ir. Wim DEFERME

Copromotor :
dr. ir. Jeroen DRIJKONINGEN

Martijn Cramer
Scriptie ingediend tot het behalen van de graad van master in de industriële wetenschappen: elektromechanica

universiteit hasselt | KU LEUVEN

Woord vooraf

Deze masterproef ontwikkelt een kostenefficiënte lensmatrixfolie op basis van inkjetprinten ter optimalisatie van de efficiëntie en het stralingspatroon van gepixelde OLED's. Dit onderzoek gebeurde in samenwerking met het onderzoekscentrum IMO-IMOMEC te Diepenbeek en vormt het sluitstuk van mijn opleiding Industriële Ingenieurswetenschappen Elektromechanica, een gezamenlijk initiatief van de Universiteit Hasselt en de Katholieke Universiteit Leuven.

De volgende personen zou ik graag van harte willen bedanken voor het mogelijk maken van deze masterproef. Mede door hen ben ik tot dit mooie eindresultaat gekomen. Allereerst dank ik mijn interne promotor Prof. dr. ir. Wim Deferme voor de geboden kansen en de participatie in het onderzoek van zijn onderzoeksgroep: Functional Materials Engineering. Vervolgens dank ik mijn externe promotor dr. ir. Jeroen Drijkoningen voor de vruchtbare samenwerking in het laboratorium en zijn opbouwende feedback. Ook richt ik een speciaal woord van dank naar de personeelsleden van IMO-IMOMEC en de doctoraat- en masterstudenten die mij het gebruik van bepaalde labotoestellen bijbrachten en zorgden voor een aangename werksfeer in het labo. Dit alles was uiteraard enkel mogelijk door de jarenlange steun en motivatie van mijn familie.

Rijzen er bij het lezen van deze scriptie vragen? Aarzel dan zeker niet om mij te contacteren via: martijn.cramer@hotmail.com. Ik sta u graag met raad en daad bij.

Tot slot wens ik u veel leesplezier toe en moge deze masterproef een inspiratiebron vormen voor toekomstig academisch onderzoek.

Inhoudsopgave

Woord vooraf 1

Lijst van tabellen 5

Lijst van figuren 7

Abstract 11

Abstract in English 13

1 Inleiding 15

1.1 Situering 15

1.2 Probleemstelling 16

1.3 Doelstellingen 17

1.4 Methodiek 18

2 Literatuuronderzoek 19

2.1 Organische lichtgevende diode 19

2.1.1 Opbouw en werkingsprincipe 19

2.1.2 Efficiëntie 24

2.1.3 Stralingspatroon 28

2.2 Stand van de technologie 29

2.2.1 Efficiëntieverhogende technieken 29

2.2.2 Optische lenzen 36

2.2.3 Productietechnieken 40

2.3 Depositietechnieken 47

2.3.1 Ultrasoon spraycoaten 47

2.3.2 Spincoaten 50

2.3.3 Inkjetprinten 52

3 Ontwerp 55

3.1 Inleiding 55

3.2 Variabele-lensmodule op basis van elektrobevochtiging 56

3.3 Lensmatrixfolie 69

4 Onderzoeksresultaten **71**

4.1 Aanbrengen van een basisfilm 71

4.1.1 Reinigingsprocedure voor substraten 71

4.1.2 Ultrasoon spraycoaten 72

4.1.3 Spincoaten 76

4.1.4 Combinatie van ultrasoon spraycoaten en spincoaten 79

4.1.5 Overige technieken 81

4.2 Construeren van lensreservoirs 83

4.2.1 Inkjetetsen van cirkelvormige patronen 85

4.2.2 Inkjetetsen van ringvormige patronen 91

4.2.3 Dubbelsolventsysteem 110

4.2.4 Overige technieken 113

4.3 Inkjetprinten van sferische lenzen 114

4.3.1 Depositie van lenzen 114

4.3.2 Bepalen van de reservoirsdimensies 116

4.3.3 Lichtkarakterisatie van de lensmatrixfolie 118

5 Conclusie en vooruitblik **123**

Bibliografie **127**

Bijlagelijst **139**

Bijlagen **145**

Lijst van tabellen

2.1 Algemeen overzicht van efficiëntieverhogende technieken. 34
2.2 Algemeen overzicht van efficiëntieverhogende technieken (vervolg). 35

3.1 De contacthoek en brekingindex voor frequent aangewende hydrofobe coatings. 65

4.1 De laagdikte en ruwheid bij diverse ultrasonespraycoatparameters. 74
4.2 De instellingen van de Dektak XT. 75
4.3 De laagdikte en ruwheid bij diverse spincoatparameters. 77
4.4 De laagdikte en ruwheid na het spincoaten op gespraycoatte substraten bij diverse parameters. 80
4.5 Printtijd in functie van het aantal spuitmonden. 94
4.6 Printtijd in functie van de druppelafstand. 102
4.7 Lichtkarakterisatie van de ontwikkelde lensmatrixfolie, met en zonder optische adhesief, met en zonder lensmatrixfolie. 120

Lijst van figuren

1.1 Evolutie van het lichtrendement van de OLED. 16

2.1 Fundamentele opbouw van een OLED. 19
2.2 Vijflagenstructuur van een OLED. 20
2.3 Illustratieve weergave van de vijf voornaamste OLED-configuraties. 22
2.4 De voornaamste verliesmechanismen in een OLED-module met het opgenomen lichtaandeel. 24
2.5 Totale interne reflectie: $\theta_1 < \theta_c$ (links), $\theta_1 = \theta_c$ (midden), $\theta_1 > \theta_c$ (rechts). . . 25
2.6 Grafische voorstelling van de extractiekegel. 26
2.7 Lambertiaans stralingspatroon van een OLED. 28
2.8 Rasterelektronenmicroscopie van een draadvormige structuur in een PDMS substraat. 30
2.9 Twee OLED-structuren met toevoeging van silicium partikels als lichtverstrooiend medium. 32
2.10 Enkelvoudige OLED (links) en tandem OLED (rechts) met sterke trilholten . . 32
2.11 Luminantiestijging en specifieke lichtstroom in functie van het aantal OLED's in serie met en zonder trilholte. 33
2.12 Het principe van lichtrecuperatie door toepassing van een reflectieve kathode. Gepatroneerde kathode (links), volledige kathode (rechts). 36
2.13 Lichtmetingen voor een OLED met en zonder de implementatie van macrolenzen. 37
2.14 Uitkoppelingsrendement in functie van de diameterverhouding van microlens tot OLED, verkregen via de klassieke stralenoptica. 38
2.15 Uitkoppelingsrendement in functie van de brekingsindex van de microlenzen (zwart) en de contacthoek van deze lenzen (wit). 38
2.16 EQE (zwart) en specifieke lichtstroom (wit) voor OLED's met (vierkant) en zonder (cirkel) lenzen. 39
2.17 Illustratieve weergave van reliëfdruklithografie met een elektronenmicroscoopbeeld van het eindresultaat (matrijs). 41
2.18 Elektronenmicroscoopbeeld van een microlensmatrix, verkregen via reliëfdruklithografie. 41
2.19 Illustratieve weergave van de LIGA-methode. 42
2.20 Elektronenmicroscoopbeelden van diverse microlensmatrices, verkregen via de LIGA-methode. 43
2.21 Illustratieve weergave van de productie van microlensmatrices op basis van inkjetprinten. 44
2.22 Bovenaanzicht en profilometriebeeld van de microstructuren in het substraat ten gevolge van inkjetetsen. 45
2.23 Het ExactaCoat Ultrasonic Coating System van de fabrikant Sono-Tek. 48
2.24 Het ontstaan van capillaire golven op het vernevelingsoppervlak. 48
2.25 Illustratieve weergave van het ultrasoonvernevelingsproces. 49
2.26 De inwendige mechanische opbouw van een ultrasoonvernevelingsmondstuk. . 49
2.27 Illustratieve weergave van het spincoatproces. 51

2.28 De WS-400BX-6NPP/LITE-spincoater. 51
2.29 Illustratieve weergave van het *continuous* inkjetsysteem. 52
2.30 Illustratieve weergave van het *drop-on-demand* inkjetsysteem. 53

3.1 3D-waargaven en doorsneden van het lensontwerp: spanningsloos (links), bekrachtigd (rechts). 56
3.2 Illustratieve weergave van het substraat, voorzien van een OLED-pixel. 57
3.3 De voornaamste centreermechanismen bij elektrobevochtiging. 58
3.4 Illustratieve weergave van de aangebrachte concentrische elektroden. 58
3.5 Illustratieve weergave na aanbrengst van het diëlektricum. 59
3.7 Het etsen van de macrokrater: 3D-weergave (links), doorsnede (rechts). 62
3.8 Het etsen van de microkraters: 3D-weergave (links), doorsnede (rechts). 63
3.9 Vierkanten (links) en hexagonale (rechts) randschikking van OLED-pixels en macrolenzen. 64
3.10 Illustratieve weergave na het aanbrengen van de hydrofobe laag. 65
3.11 Het plaatsen van de microlenzen: 3D-weergave (links), detailzicht (rechts). . . . 66
3.12 3D-waargaven en doorsneden van het lensontwerp: spanningsloos (links), bekrachtigd (rechts). 67
3.13 Wenzel- en Cassie-Baxterstadia. 67
3.14 Illustratieve weergave na het aanbrengen van de flexibele en rekbare afdichting. 68
3.15 Illustratieve weergave van de eerste productiefase. 69
3.16 Illustratieve weergave van het printpatroon. 69
3.17 Illustratieve weergave van de tweede productiefase. 70
3.18 Illustratieve weergave van de laatste productiefase. 70

4.1 Het ExactaCoat Ultrasonic Coating System (links) en het impact edge-mondstuk (rechts). 72
4.2 De WS-400BX-6NPP/LITE-spincoater. 76
4.3 De oppervlakteruwheid van de PMMA-laag in functie van de rotatiesnelheid. . 78
4.4 De laagdikte van de PMMA-laag in functie van de rotatiesnelheid. 78
4.5 De Dimatix Fujifilm DMP-2850 inkjetprinter (links) en het DMC-11610 inktpatroon (rechts). 83
4.6 De optimaliseerde golfvorm voor het gebruik van anisol. 84
4.7 De druppelvorming voor zes spuitmonden van het DMC-11610 inktpatroon. . . 84
4.8 Hexagonale randschikking van cirkelvormige printpatronen (boven) met de resulterende kratervorm (onder). 85
4.9 Rechthoekige en zeshoekige kraterpatronen geëtst in polystyreen, door middel van acetofenon en isopropylacetaat. 86
4.10 Cirkelvormige kraters geëtst in polystyreen, door middel van acetofenon en ethylacetaat. 87
4.11 Richtingsdefinities bij de profilometriemetingen. 88
4.12 Profilometriebeelden met de verticale positie [nm] in functie van de horizontale positie [mm] voor cirkelvormige kraters in PMMA-folie ten gevolge van inkjetetsen. 89

4.13 Profilometriebeelden met de verticale positie [nm] in functie van de horizontale positie [mm] voor cirkelvormige kraters in PMMA-folie ten gevolge van inkjetetsen. 90
4.14 Profilometriebeeld met de verticale positie [nm] in functie van de horizontale positie [mm] voor een cirkelvormige krater in PMMA-folie ten gevolge van inkjetetsen: # lagen: 3; basisplaattemp.: 55°C. 90
4.15 Hexagonale randschikking van ringvormige printpatronen (boven) met de resulterende kratervorm (onder). 91
4.16 Lichtmicroscopie: versterking 5 x (boven). Profilometriebeeld met de verticale positie [nm] in functie van de horizontale positie [mm] voor een cirkelvormige krater in PMMA-folie (onder). 93
4.17 Lichtmicroscopie: versterking 5 x. 93
4.18 Lichtmicroscopie: versterking 5 x (boven). Profilometriebeeld met de verticale positie [nm] in functie van de horizontale positie [mm] voor een cirkelvormige krater in PMMA-folie (onder). 95
4.19 Lichtmicroscopie: versterking 5 x, printhoogte: 250 µm. 95
4.20 De druppelvorming ter hoogte van de printkop met de weergave van inktspetters. 96
4.21 Lichtmicroscopie: versterking 5 x (boven). Profilometriebeeld met de verticale positie [nm] in functie van de horizontale positie [mm] voor een cirkelvormige krater in PMMA-folie (onder). 97
4.22 Lichtmicroscopie: versterking 5 x (boven). Profilometriebeeld met de verticale positie [nm] in functie van de horizontale positie [mm] voor een cirkelvormige krater in PMMA-folie (onder). 98
4.23 Lichtmicroscopie: versterking 5 x (boven). Profilometriebeeld met de verticale positie [nm] in functie van de horizontale positie [mm] voor een cirkelvormige krater in PMMA-folie (onder). 100
4.24 Lichtmicroscopie: versterking 5 x, T: 30 °C. 100
4.25 Lichtmicroscopie: versterking 5 x (boven). Profilometriebeeld met de verticale positie [nm] in functie van de horizontale positie [mm] voor een cirkelvormige krater in PMMA-folie (onder). 102
4.26 Lichtmicroscopie: versterking 5 x (boven). Profilometriebeeld met de verticale positie [nm] in functie van de horizontale positie [mm] voor een cirkelvormige krater in PMMA-folie (onder). 104
4.27 Lichtmicroscopie van de elektroden (links) en spuitmonden (rechts) ter hoogte van de printkop. 106
4.28 Illustratieve weergave van het inktpatroon met aanduiding van de belangrijkste elementen. 107
4.29 Lichtmicroscopie (versterking: 5x) van een ringvormige krater in PMMA-folie door het inkjetetsen met de geöptimaliseerde printerinstellingen. 108
4.30 Geprinte lensreservoirs in PMMA-folie: wijzerzin ⌀ 5, 4, 2, 7 mm. 109
4.31 Elektronenmicroscoop- en profilometriebeeld voor het inkjetetsen van een dubbelsolventsysteem. 110
4.32 Profilometriebeelden voor het inkjetetsen van diverse volumeverhoudingen van het TOL:NMP-dubbelsolventsysteem. 111
4.33 Profilometriebeelden voor het inkjetetsen van diverse volumeverhoudingen van het EA/AF-dubbelsolventsysteem. 111

4.34 Kratervorm ten gevolge van het inkjetetsen in een ringvormig patroon met een dubbelsolventsysteem. 112
4.35 Profilometriebeelden met de verticale positie [nm] in functie van de horizontale positie [mm] voor het inkjetetsen van het IPA/anisol-dubbelsolventsysteem (4/1). 112
4.36 Dynamische viscositeit in functie van temperatuur voor NOA 74. 114
4.37 Vloeibare NOA 74-druppels op de PMMA-folie. 116
4.38 Contacthoekverloop in functie van de tijd voor NOA 74 op PMMA-folie. 116
4.39 Lensreservoirfolie ⌀4 (links), lensmatrixfolie (rechts). 117
4.40 Lichtmicroscopie van lensreservoirs gevuld met vloeibare lenzen: versterking 5 x. 117
4.41 Contacthoekverloop in functie van de tijd voor NOA 74 op PMMA-folie met PVDF-coating. 118
4.42 Weergave van de OLED, voor (links) en na (rechts) de isolatie van één pixel door middel van zwarte tape. 118
4.43 OLED met bevestiging van de ontwikkelde lensmatrixfolie. 119

Abstract

Ontwikkeling van een lensmatrixfolie op basis van inkjetprinten ter optimalisatie van de efficiëntie en het stralingspatroon van gepixelde OLED's.

Verlichting beslaat ruim 15 % van het Europese energieverbruik. Energie-efficiënte verlichting, zoals de spaarlamp en led, reduceert de jaarlijkse energieconsumptie met 40 TWh, equivalent aan het verbruik van 11 miljoen gezinnen. De OLED met een theoretisch rendement van 100 % vormt mogelijk een geschikt alternatief, maar voorlopig staan de lage praktische lichtopbrengst en het Lambertiaans stralingspatroon een brede implementatie in de weg. Mogelijk vormen microlenzen een adequate oplossing voor beide problemen, maar de productietechnieken van microlenzen zijn dan weer complex, duur en ongeschikt voor massaproductie. In samenwerking met het IMO-IMOMEC te Diepenbeek ontwikkelt deze masterproef daarom een kosteneffiënte lensmatrixfolie aan de hand van inkjetprinten. De validatie geschiedt nadien met behulp van gepixelde OLED's.

Op een PMMA-folie worden eerst cirkelvormige patronen van anisol geprint volgens een regelmatige zeshoek. Door het koffieringeffect ontstaan vervolgens reservoirs in deze folie die voorkomen dat de vloeibare microlenzen samenvloeien. Via een micropipet worden in deze lensreservoirs nadien microlenzen uit NOA 74 gedruppeld. Deze bolvormige druppels harden ten slotte uit onder invloed van UV-licht.

De ontwikkelde lensmatrixfolie verhoogt de specifieke lichtstroom met 21,68 % bij een lenscontacthoek van 18°. Na optimalisatie tot 90° wordt verwacht om 50 % te bereiken. Bovendien zijn deze microlenzen en -reservoirs eveneens geschikt voor diverse andere toepassingen binnen de opto-elektronica en microchemie.

Abstract in English

Development of a lens array film by inkjet printing to optimize the efficiency and the radiation pattern of pixelated OLEDs.

Lighting covers a quarter of the European energy consumption. Energy efficient lighting, like CFLs and LEDs, reduces the yearly energy consumption with 40 TWh, equivalent to the consumption of 11 million households. The OLED with a theoretical efficiency of 100 % is a suitable alternative, but for the time being the low practical light outcoupling efficiency and the Lambertian radiation pattern interfere a broader implementation. Microlenses may be an adequate solution to both problems, but microlens production techniques are complex, expensive and unsuitable for mass production. In collaboration with IMO-IMOMEC at Diepenbeek, this master's thesis develops therefore a cost-effective lens array film by inkjet printing. The validation is subsequently carried out by pixelated OLEDs.

Circular patterns of anisole are firstly printed in a regular hexagon on a PMMA-foil. Due to the coffee ring effect, reservoirs are formed in this foil which prevent the liquid micro lenses from merging. Afterwards micro lenses of NOA 74 are dripped into these lens reservoirs by a micropipette. These spherical droplets are finally cured by ultraviolet light.

The developed lens array film increases the light outcoupling efficiency of the OLED by 21,68 % at a lens contact angle of 18°. After optimization to 90° is expected to reach 50 %. Furthermore, these micro lenses and reservoirs are also suitable for various other applications in the optoelectronics and microchemistry.

Hoofdstuk 1

Inleiding

1.1 Situering

Deze masterproef wordt uitgevoerd binnen de *Functional Materials Engineering* (FME) onderzoeksgroep van het Instituut voor Materiaalonderzoek (IMO-IMOMEC). Dit onderzoeksinstituut behoort tot de UHasselt en is gesitueerd op het Wetenschapspark te Diepenbeek. Het IMO-IMOMEC stelt 130 personen te werk, waaronder: onderzoekers, technisch en administratief personeel en 80 doctorandi [8].

De FME-onderzoeksgroep, onder leiding van Prof. dr. ir. Wim Deferme, onderzoekt het printen en coaten van functionele materialen op diverse substraten. Bijkomend gaat FME de toepassingen na van deze functionele materialen binnen twee grote sectoren. Zo worden functionele coatings ontwikkeld voor de *additive manufacturing* industrie in samenwerking met *Flanders Make*. Daarnaast wordt samen met andere onderzoeksgroepen binnen het IMO-IMOMEC getracht organische elektronica, zoals zonnecellen, organische licht emitterende dioden (OLED) etc. te schalen naar industriële toepassingen [9].

Een kwart van de totale energieconsumptie in Europa wordt toegeschreven aan verlichting. Voor de Europese huishoudens loopt dit percentage zelfs op tot 50 %. De oorzaak hiervan is dat vaak nog de minder efficiëntere lichtbronnen, zoals gloei-, halogeen-, en TL-lampen worden aangewend [10].

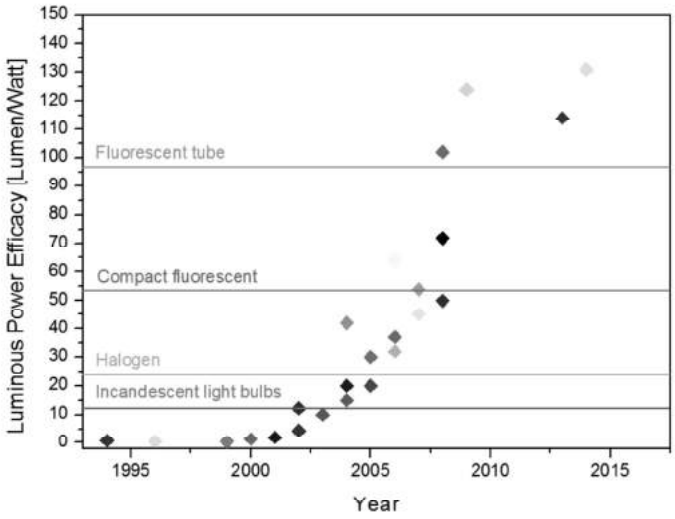
De Europese Commissie bepaalde dat het overschakelen naar energie-efficiënte verlichting, zoals leds en OLED's, de Europese energieconsumptie met 30 % terugdringt. Voor de huishoudens betekent dit een daling van het energieverbruik met 10 - 15 %. Europa verwacht een jaarlijkse reductie van 40 TWh te realiseren. Dit komt overeen met het energieverbruik van 11 miljoen gezinnen. Deze reductie laat toe om 10 energiecentrales met een vermogen van 500 MW te sluiten, dat de CO_2-emissie met 15 miljoen ton per jaar verminderd. Hierdoor komt in de toekomst 5 - 10 miljard euro vrij ten gunste van de Europese economie [10].

Om dit te verwezenlijken startte Europa het OLED100.eu-project dat eindigde in 2011. Dit project had tot doel om de technologische ontwikkeling van OLED's te stimuleren en om de OLED als alternatieve lichtbron nader te onderzoeken [11]. In 2012 werd bijkomend de productie van de klassieke gloeilamp beïndigd en vanaf 2016 wordt het gebruik van halogeenverlichting ontmoedigd door het verhogen van de accijnzen [12]. Ook de Vlaamse overheid engageert zich. Via het actieplan voor energie-efficiëntie tracht ze haar jaarlijkse energieverbruik met 2,09 % te reduceren [13]. Een mogelijke oplossing die ook hier wordt genoemd, is het vernieuwen van de verlichting door efficiëntere lichtbronnen.

1.2 Probleemstelling

De OLED of *organic light emitting diode* is een halfgeleiderlichtbron bestaande uit een dunnelagenstructuur van organische en metallische lagen. Iedere laag vervult hierbij zijn specifieke functie. Aan deze lichtbron worden kenmerken toegeschreven, zoals: flexibiliteit, een uniform stralingspatroon, een potentieel hoog rendement en een geringe dikte. Dit maakt de OLED het toekomstige alternatief in de licht- en displaytechnologie. Vandaag de dag worden OLED's reeds succesvol geïmplementeerd in televisies en smartphones [14–16].

Eén van de belangrijkste toepassingen voor de OLED vormt plafondverlichting. OLED's kunnen namelijk voor dergelijke grote oppervlakken tegen een lage kostprijs vervaardigd worden [17]. De levensvatbaarheid van de OLED wordt echter bepaald door zijn specifieke lichtsterkte of lichtrendement. Dit rendement wordt gedefinieerd als de verhouding van de lichtstroom tot het opgenomen vermogen door de lichtbron, rekening houdend met de gevoeligheid van het menselijk oog [15]. Onderzoekers zijn erin geslaagd om onder laboratoriumomstandigheden een OLED met een lichtrendement van ca. 130 lm/W te construeren. Figuur 1.1 toont dat hiermee de efficiënties van de conventionele lichtbronnen moeiteloos wordt overschreden [15]. Toch leert verder onderzoek dat het realiseren van deze waarde binnen massaproductie nog steeds een uitdaging is.



Figuur 1.1: Evolutie van het lichtrendement van de OLED.

In relatie tot de specifieke lichtsterkte staat het uitkoppelingsrendement van de OLED. Dit rendement wordt gedefinieerd als de fractie van de opgewekte fotonen die de OLED verlaten. Een verhoging van deze fractie leidt tot een stijging van het lichtrendement. Hierdoor daalt de energieconsumptie en stijgt de levensduur van de OLED [18]. Het potentiële hoge rendement van ca. 100% maakt de OLED interessant ten overstaande van zijn concurrentie. Echter ten gevolge van interne verliezen in de dunnelagenstructuur is het uitkoppelingsrendement vaak gelimiteerd tot slechts 20%. Eén van de grootste oorzaken is totale interne reflectie (TIR). TIR treedt op tussen lagen met een groot verschil in brekingsindices. Indien een lichtstraal onder een hoek groter dan of gelijk aan de kritische hoek invalt op een laag met een lagere brekingsindex, dan wordt deze lichtstraal volledig gereflecteerd. Hierdoor wordt een significant gedeelte van het gegenereerde licht gevangen en geabsorbeerd in de dunnelagenstructuur van de OLED.

In het verleden werden reeds diverse methoden ontwikkeld ter verhoging van het uitkoppelingsrendement. Men onderscheidt hierin twee categorieën. Enerzijds beschouwt men technieken die de interne lichtextractie binnenin de OLED-structuur beïnvloeden. Anderzijds worden technieken bestudeerd om de externe lichtextractie tussen de OLED en zijn omgeving te verbeteren. Bij deze methoden kan men hoofdzakelijk twee manieren vaststellen om de TIR te beperken. Enerzijds wordt getracht om de lichtstralen te verstrooien zodanig dat ze onder een hoek, kleiner dan de kritische hoek invallen op de volgende laag. Dit verwezenlijkt men door het wijzigen van de geometrische structuur van de lagen of door het toevoegen van vreemde deeltjes. Anderzijds wordt het verschil in brekingsindices tussen twee lagen verkleind zodanig dat de waarde van de kritische hoek toeneemt. Hierdoor zal een grotere bereik van lichtstralen onder een hoek, kleiner dan de kritische hoek de volgende laag bereiken. Deze stralen transmitteren naar de volgende laag met een minimale reflectie.

De voorgaande optimalisaties omvatten echter dure, complexe processen, die tijdrovend, arbeidsintensief en niet geschikt voor massaproductie zijn. Overigens leiden deze technieken tot een richtingsafhankelijk emissiespectrum en lichtintensiteit [18]. Bovendien vereist het merendeel een wijziging van de opbouw van de OLED en dus van het productieproces. Er is bijgevolg nood aan een flexibele, kostenefficiënte techniek, die het rendement van de OLED in voldoende mate verhoogt en overigens voor massaproductie geschikt is.

Naast het geringe uitkoppelingsrendement vormt voor bepaalde toepassingen het stralingspatroon van de OLED een probleem. Een OLED wordt namelijk gekenmerkt door een lambertiaans stralingspatroon. Dit wil zeggen dat de lichtsterkte in een bepaalde richting evenredig is met de cosinus van de hoek met de normaal. Echter voor toepassingen, zoals plafondverlichting, bureaulampen etc. is het bundelen of collimeren van het uitgestraalde licht noodzakelijk. Deze toepassingen beogen een lokaal gebied sterk te verlichten, waarbij het verblinden van de gebruiker vermeden dient te worden. Vandaag de dag zijn reeds collimatietechnieken beschikbaar op de markt, maar het succes van deze technieken met samenhangend het succes van de OLED wordt fors gereduceerd door de hoge kostprijzen per oppervlakte-eenheid. Er is bijgevolg behoefte aan een techniek die toelaat om het uniforme stralingspatroon van een intrinsieke OLED binnen een beperkt gebied te focusseren tegen een economisch verantwoorde prijs.

1.3 Doelstellingen

Het eerste hoofddoel van dit onderzoek bestaat uit de ontwikkeling van een kostenefficiënte, eenvoudige en flexibele methode ter verhoging van het uitkoppelingsrendement van de OLED. Meer bepaald dient de oplossing slechts met *solution processing*-technieken zoals injetprinten, spincoaten en ultrasoon spraycoaten vervaardigd te worden. Het vervullen van deze doelstelling is noodzakelijk om de geboden oplossing in de toekomst naar massaproductie te schalen.

Daarnaast dient, na implementatie van de onderzochte oplossing, het rendement met minimaal 50 % toe te nemen. Deze waarde is noodzakelijk om concurrentieel te zijn met de hedendaagse technieken.

Tot slot dient het licht de geoptimaliseerde OLED binnen een stralingshoek van 60° te verlaten. Wenselijk is dat deze hoek vrij gekozen kan worden. Dit betekent een groot voordeel voor de implementatie van OLED's in plafond- en bureauverlichting.

1.4 Methodiek

In hoofdstuk 2 wordt literatuur met betrekking tot efficiëntieverhogende technieken voor OLED's en hun productietechnieken bestudeerd. Vanuit deze studie komen twee ontwerpen voort, die verder uitgediept worden onder hoofdstuk 3. Het tweede ontwerp wordt in deze masterproef experimenteel gevalideerd. De resultaten kunnen teruggevonden worden in hoofdstuk 4. Dit werk wordt ten slotte afgesloten met een samenvattende conclusie en aanbevelingen voor toekomstig academisch onderzoek onder hoofdstuk 5.

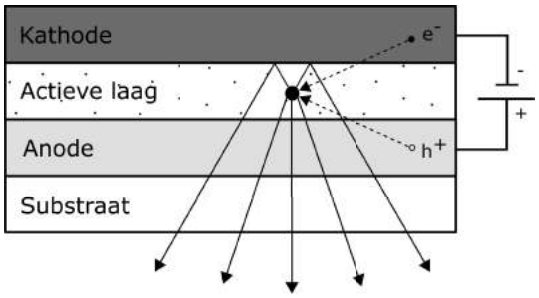
Hoofdstuk 2

Literatuuronderzoek

2.1 Organische lichtgevende diode

2.1.1 Opbouw en werkingsprincipe

De dunnelagenstructuur van een OLED wordt fundamenteel voorgesteld met drie verschillende lagen: de anode, de actieve laag en de kathode. Figuur 2.1 geeft de opbouw weer.



Figuur 2.1: Fundamentele opbouw van een OLED.

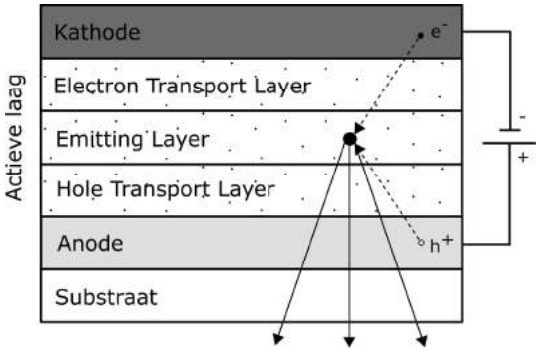
Tussen de anode en de kathode bevindt zich de actieve laag. Indien respectievelijk het positieve en negatieve potentiaal van een gelijkspanningsbron worden aangesloten op de anode en kathode van de OLED, verplaatsen enerzijds de elektronen (negatieve ladingsdragers) in de kathode en anderzijds de gaten (positieve ladingsdragers) in de anode onder invloed van het geïntroduceerde elektrische veld. Ter hoogte van de actieve laag recombineren deze elektronen en gaten, waarbij excitonen worden gevormd. Dit is een gebonden toestand van elektronen en gaten op een hoger energieniveau. Wanneer deze excitonen terugvallen naar hun oorspronkelijke, lagere energieniveau, wordt de overtollige energie onder de vorm van fotonen vrijgegeven. De hoeveelheid energie die wordt uitgezonden wordt bepaald door het verschil in energieniveaus en is afhankelijk van de materiaaleigenschappen van de actieve laag. Deze hoeveelheid energie E beïnvloedt de golflengte λ en de kleur van het uitgezonden licht. De relatie werd vastgelegd door Max Planck en Albert Einstein:

$$E = h\,\frac{c}{\lambda} \tag{2.1}$$

Met:

- E $[J]$: de energie van het foton,
- $h = 6,626 * 10^{-34}$ $[Js]$: de constante van Planck,
- $c = 299.792.458$ $[m/s]$: de lichtsnelheid,
- $\lambda[m]$: de golflengte van het uitgezonden licht.

De actieve laag van een OLED bestaat op zijn beurt uit minstens drie lagen.



Figuur 2.2: Vijflagenstructuur van een OLED.

De basisstructuur waarop de OLED wordt opgebouwd, wordt het substraat genoemd. De functie van het substraat is tweevoudig. Ten eerste vormt het substraat een ondersteuning voor de OLED. Ten tweede zorgt het substraat, in combinatie met een afdichtende laag aan de bovenzijde van de OLED, voor een lucht- en vochtdichte afscherming. Glas, folie, papier of textiel worden als substraat aangewend [19]. Enkel transparante substraten, zoals glas en folie, kunnen bij een bottom-emitting OLED gebruikt worden.

De eerste laag vormt de onderste elektrode of de anode. Hierop wordt het positieve potentiaal van de spanningsbron aangesloten. Deze laag bezit eveneens twee functies. Ten eerste vergemakkelijkt deze geleidende laag de injectie van positieve ladingsdragers (gaten) in de bovenliggende organische lagenstructuur. Bijkomend zorgt deze dunne, transparante anode ervoor dat het opgewekte licht de OLED via de onderzijde kan verlaten [19].

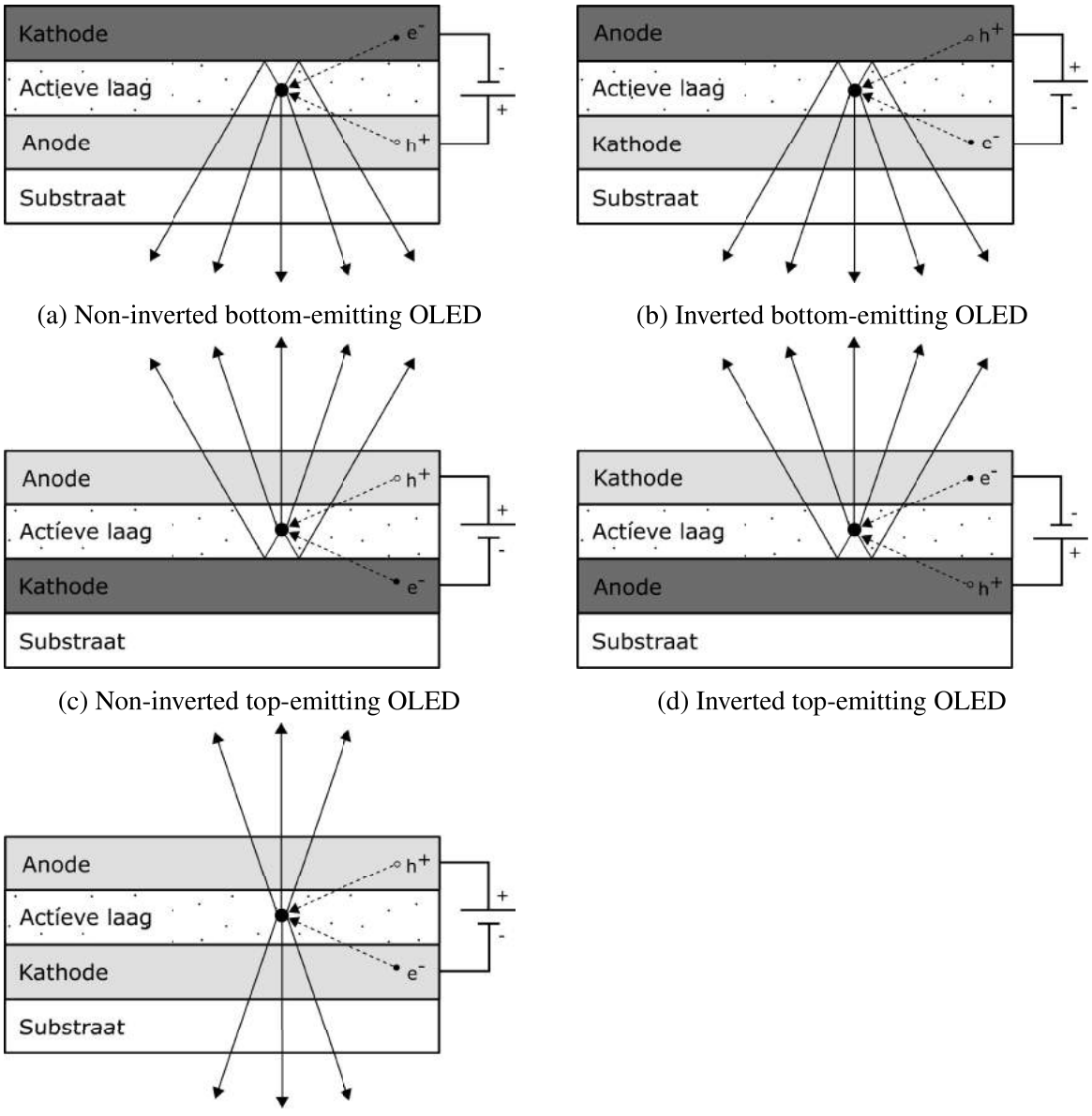
De tweede laag wordt de hole transport layer (HTL) genoemd. De HTL vergemakkelijkt enerzijds de beweging van positieve ladingsdragers van de anode naar de emitting layer. Anderzijds zorgt deze laag voor een gladder oppervlak. Dit polymeer vult namelijk het ruwheidsprofiel en de imperfecties van de onderliggende laag op [19]. Hierdoor neemt de hechting van de volgende laag toe. Je werkt zeer goed met kernzinnen en signaalwoorden.

De derde laag vormt de kern van de OLED, namelijk de emitting layer (EML). In de EML komen positieve (gaten) en negatieve ladingsdragers (elektronen) samen. Vervolgens recombineert het elektrongatpaar en wordt de overtollige energie onder de vorm van een foton uitgestraald. Dit foton bezit een bepaalde frequentie afhankelijk van het materiaal waaruit de emitting layer is opgebouwd. Het materiaal bepaalt de frequentie en bijgevolg de kleur van het uitgezonden licht [19].

De vierde laag noemt men de electron transport layer (ETL). Zijn functie is vergelijkbaar met deze van de HTL. Het verschil is dat deze laag de elektronenbeweging van de kathode naar de EML vergemakkelijkt [19].

De vijfde en laatste laag vormt de bovenste elektrode of kathode. Hierop wordt het negatieve potentiaal van de spanningsbron aangesloten. De functie van deze laag is tevens tweevoudig. Allereerst vergemakkelijkt deze geleidende laag de injectie van negatieve ladingsdragers (elektronen) in de onderliggende lagenstructuur. Daarnaast zorgt deze reflectieve laag ervoor dat het uitgestraalde licht dat de OLED wil verlaten via de bovenzijde, terugkaatst naar de onderzijde. Het merendeel van het opgewekte licht verlaat daardoor de OLED via de onderzijde met een verhoging van de efficiëntie tot gevolg [19].

Het wijzigen van de laagvolgorde en de lichtdoorlaatbaarheid van de elektroden, laat toe om vijf verschillende OLED-configuraties te creëren. Figuur 2.3 toont de principiële opbouw van deze configuraties. De transparantie van de lagen wordt weergegeven door een variatie in grijswaarden. Des te lager de grijswaarde, des te transparanter is de overeenkomstige OLED-laag in werkelijkheid.



(a) Non-inverted bottom-emitting OLED

(b) Inverted bottom-emitting OLED

(c) Non-inverted top-emitting OLED

(d) Inverted top-emitting OLED

(e) Dual-emitting OLED

Figuur 2.3: Illustratieve weergave van de vijf voornaamste OLED-configuraties.

1. *Non-inverted bottom-emitting OLED*, Figuur 2.3a: het opgewekte licht verlaat de OLED via de onderzijde, namelijk het substraat. De lichtstralen, die de OLED langs boven trachten te verlaten worden gereflecteerd en alsnog via de onderzijde uitgezonden. De term *non-inverted* impliceert dat de anode semitransparant en de kathode reflectief is [20].

2. *Inverted bottom-emitting OLED*, Figuur 2.3b: het opgewekte licht verlaat de OLED wederom via het substraat. De lichtstralen, die de OLED langs boven trachten te verlaten worden ook bij deze configuratie gereflecteerd en via de onderzijde uitgezonden. Ditmaal wordt de richting van de lichtstralen omgekeerd door een reflectieve anode. De term *inverted* impliceert bijgevolg dat de anode reflectief en de kathode semitransparant is [20].

3. *Non-inverted top-emitting OLED*, Figuur 2.3c: het opgewekte licht verlaat de OLED via de bovenzijde. De lichtstralen, die de OLED langs onder trachten te verlaten worden gereflecteerd en alsnog via de bovenzijde uitgezonden. De top-emitting OLED-configuraties bezitten een hoger rendement. Immers, het gegenereerde licht dient niet het substraat te doorkruisen en verliest hierdoor minder energie. Een hoger rendement leidt tot een lagere voedingsspanning voor eenzelfde lichtopbrengst en bijgevolg een verlengde levensduur. De term *non-inverted* impliceert dat de anode semitransparant en de kathode reflectief is [20].

4. *Inverted top-emitting OLED*, Figuur 2.3d: het opgewekte licht verlaat de OLED wederom via de bovenzijde. De lichtstralen, die de OLED langs onder trachten te verlaten worden ook bij deze configuratie gereflecteerd en via de bovenzijde uitgezonden. Ditmaal wordt de richting van de lichtstralen omgekeerd door een reflectieve anode. De term *inverted* impliceert bijgevolg dat de anode reflectief en de kathode semitransparant is [20].

5. *Dual-emitting OLED:* zowel de onderste als bovenste elektrode zijn semitransparant waardoor het opgewekte licht de OLED langs beide zijden verlaat [20].

2.1.2 Efficiëntie

De OLED bezit een potentieel hoog rendement met een *Internal Quantum Efficiency* (IQE) van ca. 100 %. De IQE wordt gedefinieerd als de verhouding van het aantal gegenereerde fotonen in de emitting layer van de OLED tot het aantal geïnjecteerde ladingsdragers. De *External Quantum Efficiency* (EQE) wordt daarentegen uitgedrukt als de verhouding van het aantal fotonen die de OLED verlaten tot het aantal geïnjecteerde ladingsdragers. De waarde van de EQE ligt echter vele malen lager dan de IQE. De procentuele verhouding van het uitgestraalde licht (EQE) ten opzichte van het gegenereerde licht (IQE) wordt de *Outcoupling Efficiency* (OCE) genoemd. Deze waarde is gewoonlijk kleiner dan 20 %. Het succes van de OLED is sterk afhankelijk van deze efficiëntie. [16–18, 21–24]

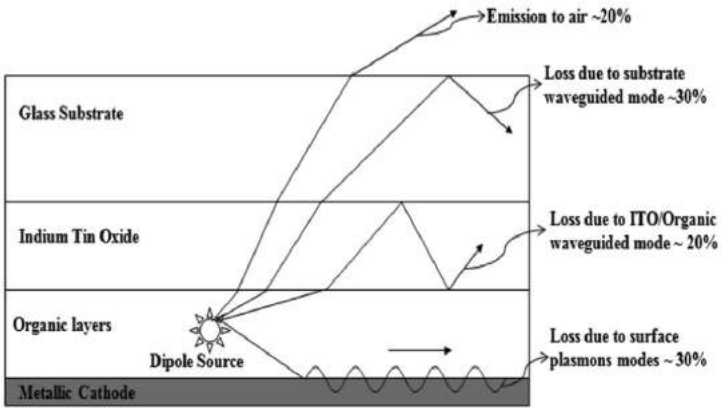
Uit de klassieke optica volgt dat de OCE en de brekingsindex van het substraat aan elkaar gerelateerd zijn door de volgende uitdrukking [24, 25]:

$$\eta_{OCE} \sim 0,5/n_{sub}^2 \tag{2.2}$$

Deze vergelijking werd bekomen op basis van de veronderstelling dat:

- de OLED een isotrope lichtbron is, waarbij de lichtsterkte in alle stralingsrichtingen gelijk is [24],
- één zijde van de OLED, voornamelijk de metalen kathode, als een perfecte reflector optreedt [24],
- de brekingsindex van het substraat voldoende groot is [24],
- de invloed van de geometrie en de dimensies van de OLED buiten beschouwing worden gelaten [25].

Voor glazen substraten (n = 1,52) stelt uitdrukking (2.2) dat de OCE van de OLED bij benadering gelijk is aan 20 % [25]. Bijgevolg wordt ca. 80 % van het gegenereerde licht gevangen en geabsorbeerd binnen de OLED en het substraat. Verschillende mechanismen zijn hiervan de oorzaak, figuur 2.4 [16].



Figuur 2.4: De voornaamste verliesmechanismen in een OLED-module met het opgenomen lichtaandeel.

- Ongeveer 30% gaat verloren ten gevolge van oppervlakteplasmonpolaritonen [16, 17].
- Het verlies van de overige 50% wordt toegeschreven aan totale interne reflectie (TIR), waarbij dit percentage verder wordt onderverdeeld in 20% verlies ten gevolge van golfpijpmodes en 30% verlies door substraatmodes [16, 17].

Tot slot vormt de conventionele OLED een zwakke optische trilholte. Zonder optimalisaties heeft dit effect een nefaste invloed op zowel de efficiëntie als het stralingspatroon van de OLED.

Oppervlakteplasmonpolaritonen

Indien een foton, vanuit de emitting layer, invalt op de metalen kathode of anode van de OLED ontstaat een elektromagnetische golf, een oppervlakteplasmonpolariton genaamd. Deze golf plant zich voort via de raakvlakken tussen de metalen elektroden en de organische lagen van de OLED. De energie van het foton wordt geabsorbeerd door de metalen lagen, waarbij het uitstralen van licht verhinderd wordt [26]. Circa 30% van het totale gegenereerde licht in de actieve laag van de OLED gaat hierdoor verloren [16].

Totale interne reflectie, golfpijp- en substraatmodes

Gegeven zijn twee aangrenzende media met verschillende brekingsindices n_1 en n_2. De brekingsindex van een medium wordt gedefinieerd als de verhouding van de lichtsnelheid in het beschouwde medium ten opzichte van de lichtsnelheid in vacuüm. Vaak wordt ook de term optische dichtheid aangewend. Indien een lichtstraal zich voortplant doorheen beide media treedt er lichtbreking op ter hoogte van de overgang tussen beide materialen. Het raakvlak wordt het diopter genoemd [27]. De relatie tussen de invalshoek θ_1 en de uittreehoek θ_2 van het licht werd vastgelegd in de wet van Snellius:

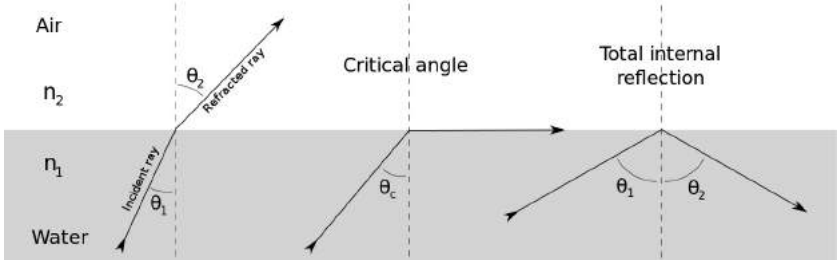
$$n_1 \; sin(\theta_1) = n_2 \; sin(\theta_2) \tag{2.3}$$

Voor $n_1 > n_2$ spreekt men van de overgang van het licht van een optisch dicht naar een optisch ijl medium. $n_1 < n_2$ stelt de overgang van een optisch ijl naar een optisch dicht medium voor.

Wanneer de gebroken lichtstraal samenvalt met het diopter ontstaat TIR. De invalshoek θ_1 is hierbij gelijk aan de kritische hoek θ_c en de uittreehoek θ_2 bedraagt 90°.

$$\theta_c = Bgsin\left(\frac{n_2}{n_1}\right) \tag{2.4}$$

Figuur 2.5 toont het principe van totale interne reflectie op illustratieve wijze [28].

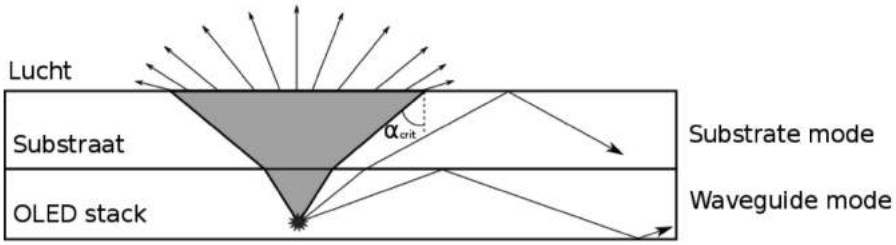


Figuur 2.5: Totale interne reflectie: $\theta_1 < \theta_c$ (links), $\theta_1 = \theta_c$ (midden), $\theta_1 > \theta_c$ (rechts).

Hieruit volgt dat TIR slechts mogelijk is bij de overgang van het licht van een optisch dicht naar een optisch ijl medium. Licht dat invalt onder een hoek groter dan of gelijk aan de kritische hoek reflecteert volledig zonder te transmitteren naar het volgende medium. Tevens leidt een groter verschil in brekingsindices tot een kleinere waarde voor de kritische hoek en bijgevolg tot een groter aandeel van een gegeven lichtbundel dat totaal intern reflecteert.

TIR heeft een nadelige invloed op zowel de interne als de externe lichtextractie van de OLED. De interne lichtextractie heeft betrekking op de hoeveelheid licht die de dunnelagenstructuur van de OLED verlaat. Die wordt verminderd door TIR ter hoogte van enerzijds de raakvlakken tussen de diverse lagen van de OLED en anderzijds het raakvlak tussen de OLED en het substraat. Het licht dat in de OLED-structuur gevangen blijft, worden de golfpijpmodes genoemd. Een aandeel van ongeveer 20% van het totale gegenereerde licht wordt hieraan toegeschreven. De externe lichtextractie daarentegen houdt verband met de hoeveelheid licht dat het substraat verlaat bij de bottom-emitting OLED. Hierbij wordt het uitgestraalde licht verhinderd door TIR aan het raakvlak tussen het substraat en de omgeving. Het licht dat hierdoor gevangen blijft, worden de substraatmodes genoemd. Nagenoeg 30% van het opgewekte licht in de emitting layer van de OLED behoort tot deze categorie [16, 29, 30].

Deze modes worden grafisch als volgt voorgesteld. Veronderstel een kegelvormig volume volgens de richting van het uitgestraalde licht vertrekkende vanuit het recombinatiepunt van een elektrongatpaar binnen de actieve laag. Dit volume wordt de extractiekegel genoemd. Figuur 2.6 geeft dit gegeven schematisch weer [1].



Figuur 2.6: Grafische voorstelling van de extractiekegel.

De halve tophoek van deze kegel vormt de maximale hoek waaronder een lichtstraal zich vanuit de actieve laag mag voortplanten om de OLED en het substraat te kunnen verlaten. Indien een lichtstraal zich net buiten de extractiekegel bevindt, transmiteert ze weliswaar van de OLED naar het substraat maar ter hoogte van het raakvlak tussen het substraat en de omgeving is TIR onvermijdbaar. Deze lichtstraal behoort tot de substraatmodes. Bevindt deze lichtstraal zich nog verder buiten de extractiekegel, dan treedt eveneens TIR op aan het raakvlak tussen de OLED en het substraat. Deze lichtstraal behoort tot de golfpijpmodes.

Zwakke optische trilholte

Een optische trilholte ontstaat wanneer twee reflecterende oppervlakken tegenover elkaar worden opgesteld en door een optisch medium worden gescheiden. De grootteorde van de afstand tussen deze oppervlakken bevindt zich in het nanometer- tot micrometerbereik [31]. Deze afstand wordt de lengte van de optische trilholte genoemd. Een bekende toepassing van een trilholte vormt een laserdiode. In deze diode wordt het gegenereerde licht heen er weer gereflecteerd tussen twee spiegelende uiteinden. Afhankelijk van de lengte van de trilholte ontstaan voor slechts één welbepaalde golflengte staande golven in deze holte. Enkel deze golflengte kan uit de laserdiode ontsnappen, terwijl de overige golflengte uit het lichtspectrum gevangen blijven. Dit is de oorzaak van het monochromatische karakter van een laser.

Ook een OLED kan beschouwd worden als een eendimensionale optische trilholte, aangezien de totale dikte van de organischelagenstructuur zich in de grootteorde van de golflengte van licht bevindt. Een zwakke trilholte wordt gevormd bij de conventionele OLED, waarbij de ene reflector uit de metalen kathode bestaat en de andere uit de indiumtinoxiden anode [25, 32]. ITO wordt gekenmerkt door een hoge brekingsindex (n = 1,8 - 2,0) [33]. Dit vormt dan ook de voornaamste oorzaak voor het optreden van TIR en het ontstaan van de golfpijpmodes. Hierdoor wordt deze laag als een reflector beschouwd voor het licht komende vanuit de actieve laag. Een gedetailleerde studie van deze zwakke trilholte in een OLED werd uitgevoerd door Bulovic et al. [34]. Er werd geconstateerd dat de radiatieve bestaanstijd van een geëxiteerd molecule sterk beïnvloed wordt door het voorkomen van dergelijke zwakke trilholten. De radiatieve bestaanstijd is de gemiddelde tijd alvorens een positieve (gat) en negatieve (elektron) ladingsdrager recombineren met de vrijgave van een foton. In contrast hiermee staat de niet-radiatieve bestaanstijd. Enkel de recombinatie van een elektrongatpaar op radiatieve wijze leidt tot het ontstaan van een foton. Bij niet-radiatieve recombinatie komt geen foton, maar een fonon vrij. Dit is bijgevolg een ongewenst proces dat de lichtopbrengst en de OCE van de OLED reduceert en de warmteverliezen verhoogt. De radiatieve bestaanstijd is tenslotte een belangrijke parameter binnen de opto-elektronica. Indien de radiatieve bestaanstijd kleiner is dan de niet-radiatieve bestaanstijd, is de waarschijnlijkheid op een radiatieve recombinatie het grootst [35–37].

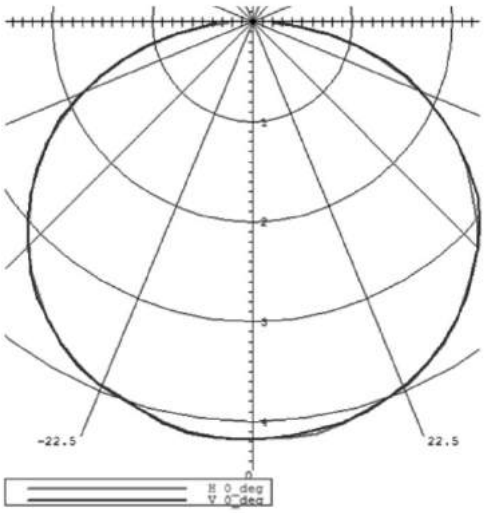
Uitdrukking (2.2) stelt dat het uitkoppelingsrendement van een OLED slechts afhankelijk is van de brekingsindex van het substraat. Nauwkeurigere kwantummechanische modellen hebben echter aangetoond dat de OLED-geometrie en de dikte van de ITO-laag tevens een invloed hebben op de lichtextractie [25, 33]. Lee et al. [25] bestudeerde de invloed van de geometrie door een conventionele OLED te construeren waaraan een bufferlaag werd toegevoegd. Deze bufferlaag bestaat uit Alq_3, waarvan de dikte werd gevarieerd van 20 nm tot 103 nm. Hierdoor wijzigde de lengte van de optische trilholte. Binnen dit diktebereik daalde de substraatextractie-efficiëntie van 55 % tot 22 %. Deze substraatextractie-efficiëntie wordt gedefinieerd als de procentuele verhouding van de extern gemeten lichtintensiteit van de OLED tot de intensiteit van de substraatmodes.

$$\eta_{sub} = \frac{I_{ext}}{I_{ext} + I_{sub}} \tag{2.5}$$

Bij de berekening van de OCE van een OLED dienen bijgevolg ook parameters met betrekking tot de geometrie opgenomen te worden. Bijkomend toonden de simulaties aan dat indien de lengte van de trilholte langer is dan de helft van de golflengte, meer licht gevangen wordt in de substraatmodes dan in de golfpijpmodes. Tenslotte gaat het Lambertiaanse stralingspatroon van de OLED verloren als de optische afstand tussen de kathode en de actieve laag groter is dan een kwart van de golflengte [25].

2.1.3 Stralingspatroon

Een intrinsieke OLED wordt gekenmerkt door een Lambertiaans stralingspatroon. Hierbij is de hoeveelheid uitgestraald licht in alle richtingen evenredig met de cosinus van de hoek, gevormd tussen deze richtingen en de normaal op het oppervlak [1]. Figuur 2.7 toont dit stralingspatroon [1].



Figuur 2.7: Lambertiaans stralingspatroon van een OLED.

2.2 Stand van de technologie

2.2.1 Efficiëntieverhogende technieken

Een verhoging van de EQE leidt tot een reductie van de benodigde stroomdichtheid om eenzelfde lichtsterkte per oppervlakte-eenheid te bekomen. Hierdoor daalt de energieconsumptie en stijgt de levensduur van de OLED [18]. Dit maakt de OLED een interessant alternatief voor de conventionele lichtbronnen, zoals gloeilampen, TL-verlichting, halogeenverlichting etc.

De volgende paragrafen geven duiding bij diverse methoden voor het verhogen van dit uitkoppelingsrendement van de OLED. De drie voornaamste technieken zijn: het modificeren van het substraat, het toevoegen van een lichtverstrooiend medium aan de dunnelagenstructuur van de OLED en het construeren van sterke optische trilholten in de OLED. Daarnaast bestaan nog verscheidene andere technieken zoals: tweedimensionale fotonische nanokristalstructuren, oppervlakteplasmonpolaritonversterkte OLED's en aperiodische diëlektrische spiegels [17]. Deze technieken zijn veeleer complex en komen daardoor minder vaak voor. Deze vallen dan ook buiten het bestek van deze masterproef. Tot slot kan een globaal overzicht teruggevonden worden.

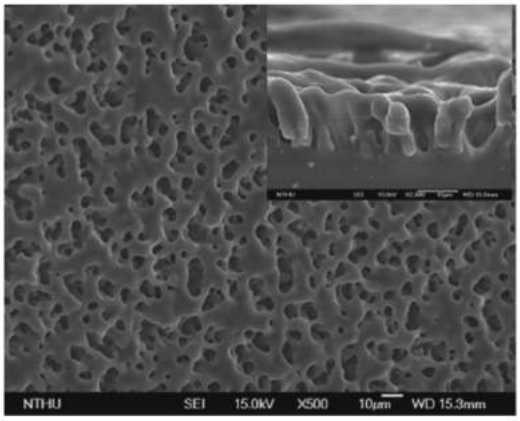
Modificeren van het substraat

De eerste groep van efficiëntieverhogende technieken zijn gebaseerd op het wijzigen van de eigenschappen van het substraat. Hierdoor reduceren zowel de substraat- als de golfpijpmodes, waardoor respectievelijk de externe en interne lichtextracties van de OLED toenemen.

Ten eerste wordt de geometrische vorm van het substraatoppervlak aangepast. Hierdoor wijzigen de invalshoeken van de lichtstralen op het raakvlak tussen het substraat en de omgeving ten opzichte van die bij een vlak substraat. Normaal zouden deze lichtstralen totaal intern reflecteren, maar door de nieuwe kleinere invalshoeken wordt dit vermeden. De nieuwe geometrische vorm van het substraatoppervlak kan uit een regelmatige of onregelmatige textuur bestaan.

Eén van de eenvoudigste en goedkoopste technieken is het zandstralen van de randen en de achterzijde van het substraat, waardoor het oppervlak een ruwe onregelmatige structuur krijgt. Vervolgens wordt de OLED aangebracht op de onaangetaste zijde van dit substraat. Op deze manier brachten Chen et al. [38] en Zhou [39] et al. een rendementsverhoging van respectievelijk 20 % en 29 % tot stand. De oppervlakteruwheid bevindt zich na het zandstralen in het bereik van 1 µm tot 3 µm. In dit gebied is de EQE omgekeerd evenredig met de ruwheidswaarde.

Figuur 2.8 toont daarentegen een substraatoppervlak dat van een wanordelijke draadvormige textuur werd voorzien [40].



Figuur 2.8: Rasterelektronenmicroscopie van een draadvormige structuur in een PDMS substraat.

Deze structuur wordt bekomen door gebruik te maken van anodisch aluminiumoxide (AAO) met nanoporiën. Deze poriën doen dienst als matrijsholten om nadien opgevuld te worden met polydimethylsiloxaan (PDMS). PDMS wordt gekenmerkt door een hoge mate van transparantie met een brekingsindex (n = 1,45) dichtbij die van glas (n = 1,50) om zo TIR tot een minimum te beperken. Door de capillaire werking dringt het vloeibare polymeer in het poreuze AAO. Nadien hardt het PDMS uit onder invloed van een thermische nabehandeling. Tenslotte wordt de onregelmatige structuur bovenop het substraat bekomen door het AAO chemisch te verwijderen met een sterk basisch solvent [17]. Aan de hand hiervan verwezenlijkte Cheng et al. [40] een OLED met een uitkoppelingsrendement van 46 %.

Tot slot kan een rendementsverhoging tot stand worden gebracht door het aanbrengen van regelmatige driedimensionale vormen op het substraatoppervlak. Gu et al. [41] realiseerde een efficiëntiestijging met een factor van (1,9 $\pm$ 0,2) door het plaatsen van afgeknotte piramides op het substraat. Deze glazen piramides werden gepolijst en op de afgeknotte top van een OLED-pixel voorzien. D'Andrade et al. [42] maakte tevens gebruik van afgeknotte piramides, bekomen via een gietproces. Ditmaal werden de piramides vervaardigd uit acrylaat en werden de OLED-pixels aangebracht op de onderzijde van de piramides. Dit resulteerde in een rendementsstijging met een factor tussen 1,8 en 2,1. De driedimensionale textuur kan eveneens uit bolvormige lichamen bestaan. Dit worden lenzen genoemd. Omwille van het onderzoek naar lenzen binnen deze masterproef wordt een afzonderlijke paragraaf aan deze techniek gewijd.

Ten tweede kan ook het aandeel van de golfpijpmodes beperkt worden. Dit wordt verwezenlijkt door een substraat met een hoge brekingsindex aan te wenden. De brekingsindex dient groter te zijn dan die van de organische lagen waaruit de OLED is opgebouwd. Dit heeft tot gevolg dat geen TIR optreedt bij de overgang van de lichtstralen tussen de OLED-lagen en het substraat. Bijgevolg transmitteren nagenoeg alle lichtstralen uit de golfpijpmodes naar het substraat, waardoor ze nu tot de substraatmodes behoren. Nadien zorgt de gewijzigde geometrische vorm van dit substraat voor het uitkoppelen van de substraatmodes. Over het algemeen bevinden de brekingsindices van de organische lagen zich in het bereik van 1,6 tot 2,0 [24]. Substraatmaterialen met grotere brekingsindices zijn eerder zeldzaam of exotisch en daardoor minder geschikt in de industrie. Er moet bijgevolg getracht worden om de brekingsindices van de organische lagen zo

dicht mogelijk te benaderen om het verlies in de golfpijpmodes te beperken. Madigan et al. [43] wendde substraten van polycarbonaat (PC) (n = 1,59) en epoxy (n = 1,61) aan voor de productie van hun OLED's. Nakamura et al. [44] gebruikte hiervoor polyethyleentereftalaat (PET) (n = 1,65) en een specifiek ontwikkelde hars (n = 1,72). Tot slot vertaalt de invloed van een substraat met een hoge brekingsindex zich in een stijging van de EQE met 53 % [17].

Ten derde kunnen de golfpijpmodes in de OLED verminderd worden het wijzigen van de dikte van de organische lagen. Lu en Sturm [33] hebben via simulaties en experimenten aangetoond dat door de reductie van de indiumtinoxiden laag (ITO) van 200 nm tot 100 nm, het uitkoppelingsrendement met 52 % toeneemt. ITO is een veelgebruikt anodemateriaal in OLED's.

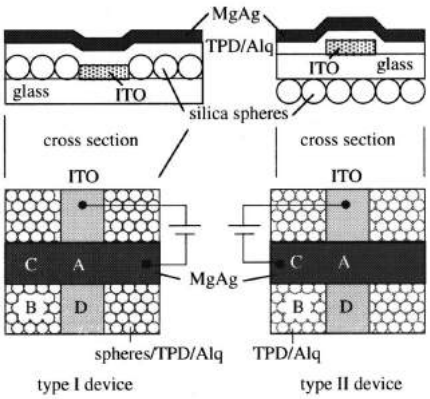
Tsutsui et al. [45] maakte eveneens gebruik van dunne organische lagen ter verhoging van de efficiëntie van een OLED. Zij combineerde echter deze dunne organische lagen met een bijkomende laag, tussen het substraat en de OLED. Deze tussenlaag bestaat uit silica aerogel en wordt gekenmerkt door een lage brekingsindex (n = 1,01 - 1,10). De dunne organische lagen zorgen, zoals reeds aangehaald, voor een reductie van de golfpijpmodes bij de overgang van het licht naar de tussenlaag. De lage brekingsindex van de tussenlaag zorgt op zijn beurt voor het voorkomen van TIR wanneer de lichtstralen het substraat bereiken. Deze techniek verbetert bijgevolg de interne lichtextractie, waarbij een verdubbeling van de lichtopbrengst verwezenlijkt werd.

Opgemerkt dient te worden dat de voorgaande methoden slechts hun toepassing vinden bij de bottom-emitting OLED.

Toevoegen van een lichtverstrooiend medium

Een tweede categorie van efficiëntieverhogende technieken bestaat uit het aanbrengen van vreemde deeltjes in één of meerdere lagen van de OLED. Indien een lichtstraal invalt op de volgende laag ($n_1 > n_2$) onder een grotere hoek dan de kritische hoek θ_c, dan treedt normalerwijs TIR op. Echter, wanneer deze lichtstraal bots op een vreemd deeltje, wordt ze verstrooid. Verstrooiing is het verschijnsel dat een lichtstraal van zijn initiële richting afwijkt bij het stuiten op onregelmatigheden, zoals vreemde deeltjes. Deze verstrooiende werking leidt ertoe dat de lichtstraal wordt gebroken en de volgende laag onder een nieuwe hoek bereikt. Indien deze hoek kleiner is dan de kritische hoek, is totale interne reflectie voorkomen. De waarde van deze factor is afhankelijk van enerzijds de grootte, de volumefractie en de brekingsindex van de deeltjes en anderzijds van de brekingsindex en de dikte van de OLED-laag waarin ze werden ondergebracht [30].

Yamasaki et al. [46] brachten een enkelvoudige laag van silicium bolletjes aan in de ITO-laag enerzijds en op de achterzijde van het glazen substraat anderzijds. De diameter van deze bolletjes bedroeg 550 nm. De opbouw wordt in figuur 2.9 getoond [46].



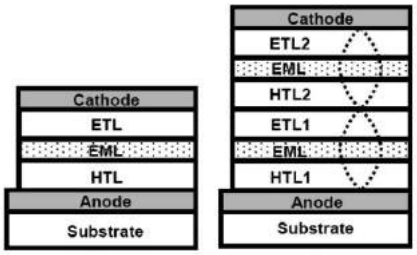
Figuur 2.9: Twee OLED-structuren met toevoeging van silicium partikels als lichtverstrooiend medium.

De lichtverstrooiende laag in de indiumtinoxiden anode verlaagt het aandeel van de golfpijpmodes en verhoogt bijgevolg de *interne* lichtextractie. De laag op de achterzijde van het substraat reduceert daarentegen de substraatmodes en doet de *externe* lichtextractie toenemen. Deze techniek werd reeds uitgebreid onderzocht, waarbij een rendementsstijging met een factor van 2,5 niet ongewoon is [30, 47]. Shiang et al. [48] bedekten het substraat met een laag van ZnO_2-deeltjes onder de vorm van een coating. Een verhoging van de OCE met 40 % werd vastgesteld.

Construeren van sterke optische trilholten

De derde categorie van efficiëntieverhogende technieken buigt het nadelige effect van zwakke optische trilholten in de OLED om in een voordeel. Door het gebruik van OLED's in displays en verlichting rijst steeds meer de vraag naar OLED's met een hogere helderheid zonder een toename in de voedingsstroom [49,50]. Zowel tandem OLED's als OLED's met sterke optische trilholten leiden tot een verhoogde stroomefficiëntie (cd/A) en luminantie (cd/m^2) [51–54].

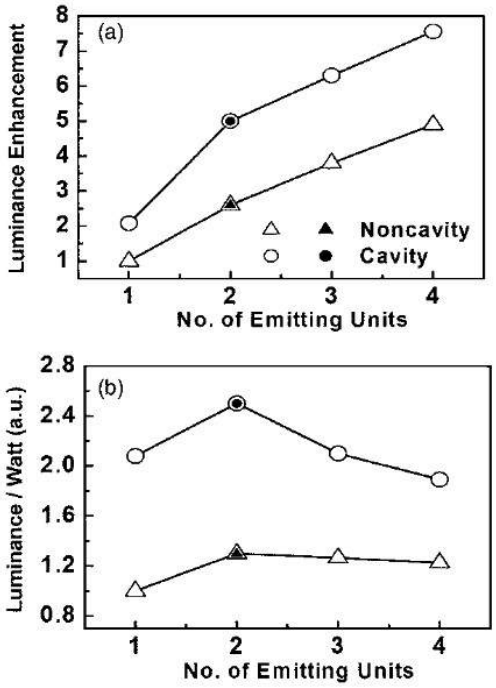
Cho et al. [55] combineerde de twee voorgaande technieken. Zij construeerden tandem OLED's met respectievelijk zwakke en sterke trilholten. Deze tandem OLED's bestaan uit een seriële opeenstapeling van meerdere OLED-structuren. De zwakke trilholten worden verwezenlijkt door een OLED met een reflectieve zilveren kathode en transparante indiumtinoxiden anode. Een OLED met een sterke trilholte wordt daarentegen vervaardigd door gebruik te maken van een reflectieve zilveren anode en een semi-transparante zilveren kathode. Figuur 2.10 toont de opbouw [55].



Figuur 2.10: Enkelvoudige OLED (links) en tandem OLED (rechts) met sterke trilholten

.

Vervolgens werd de luminantie per eenheid van elektrisch vermogen (lm/W) nagegaan voor diverse OLED-ontwerpen. Zowel OLED's zonder optische trilholten als OLED's met sterke trilholten werden in respectievelijk één, twee, drie en vier tandemconfiguraties geplaatst. Figuur 2.11 toont de resultaten [46].



Figuur 2.11: Luminantiestijging en specifieke lichtstroom in functie van het aantal OLED's in serie met en zonder trilholte.

Hieruit volgt dat de luminantie per eenheid van elektrisch vermogen van tandem OLED's zonder optische trilholten nagenoeg constant blijft. De luminantie per eenheid van elektrisch vermogen wordt hierbij met een factor van 1,2 à 1,3 verhoogt ten opzichte van die van een enkelvoudige conventionele OLED. Het toevoegen van een sterke trilholte aan de intrinsieke OLED verhoogt de luminantie per eenheid van elektrisch vermogen met een factor van 2,1. Indien een tweevoudige tandem OLED wordt geconstrueerd met sterke optische trilholten, stijgt de luminantie per eenheid van elektrisch vermogen zelfs met een factor van 2,5 [55].

Peng et al. [56] maakten eveneens gebruik van optische trilholten als efficiëntieverhogende techniek. Een top-emitting OLED met een sterke optische trilholte werd geconstrueerd door gebruik te maken van een reflectieve zilveren anode en een semi-transparante LiF/Al/Ag kathode. Daarnaast werd de injectie van positieve ladingsdragers binnen de OLED verhoogd door een oppervlaktebehandeling met CF_4-plasma op de anode toe te passen. Uiteindelijk stelde Peng et al. een OCE-stijging van 35 % vast.

Algemeen overzicht

De voorgaande paragrafen behandelen de drie voornaamste categorieën van efficiëntieverhogende technieken. In de literatuur kan een waaier aan technieken teruggevonden worden. Tabellen 2.1 en 2.2 geven een algemeen overzicht [17].

Tabel 2.1: Algemeen overzicht van efficiëntieverhogende technieken.

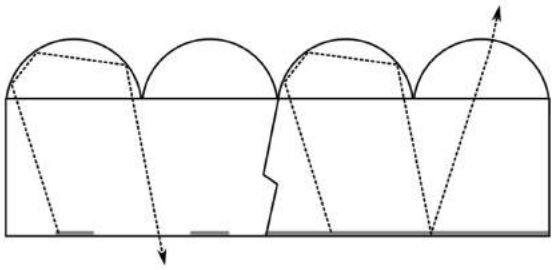
N°	Methode	η-stijging	Bemerkingen	Ref.
1	Conventionele OLED-structuur.	$\pm$ 20 %	Significante verliezen ten gevolge van substraat- en golfpijpmodes.	[24,41,57–59]
2	Optimaliseren van de dikte van de ITO en organische lagen.	$\pm$ 52 %	Effectief in het reduceren van de golfpijpmodes, maar de substraatmodus blijven ongewijzigd.	[24]
3	Verruwen van het substraatoppervlak.	$\pm$ 50 %	Simpel en effectief, maar de golfpijpmodus blijven onaangetast.	[24, 57]
4	Regelmatige 3D-structuur bestaande uit afgeknotte kegels.	2 x	Effectief, maar kostelijk op grote schaal.	[24, 41]
5	Regelmatige 3D-structuur bestaande uit sferische patronen.	9,6 x	Golfpijpmodes blijven ongewijzigd, kostelijk op grote schaal.	[33, 43]
6	Substraten met hoge brekingsindices.	53 %	Kostelijk op grote schaal.	[44, 60]
7	Regelmatige 3D-structuur bestaande uit afgeknotte piramides.	2 x	Golfpijpmodes blijven onaangetast, maar commercieel geschikt voor grote schaal.	[42]
8	Toevoeging van silica aerogel met een lage brekingsindex tussen het substraat en de ITO-laag.	2 x	Effectief en goedkoop voor het reduceren van de golfpijpmodes.	[45]
9	Toevoeging van een diffusielaag op de achterzijde van het substraat.	$\pm$ 50 %	Golfpijpmodes blijven ongewijzigd.	[61]
10	Regelmatige 3D-structuur bestaande uit microlenzen en piramides.	$\pm$ 80 %	Lambertiaans stralingspatroon blijft behouden.	[24, 62]
11	Meshtextuur en Braggrooster op het substraat.	46 %	Effectief en goedkoop, overigens blijft het kleurenspectrum van de OLED behouden.	[40, 63]

Tabel 2.2: Algemeen overzicht van efficiëntieverhogende technieken (vervolg).

N°	Methode	η-stijging	Bemerkingen	Ref.
12	Periodische diëlektrische structuur bestaande uit silica microbolletjes.	Significant	Spectrale wijzigingen ten gevolge van de lichtverstrooiiende deeltjes.	[46,48,64–66]
13	Coating van fosforpartikels op het substraat.	Sterk	Goedkoop.	[67, 68]
14	Regelmatige microlensmatrix op de achterzijde van het substraat.	50 %	Hoge productiekosten.	[69–71]
15	Microlensmatrix op een glazen substraat met een hoge brekingsindex.	65 %	Hoge productiekosten.	[70]
16	OLED met zwakke optische trilholten.	22 % - 55 %	Afhankelijk van de locatie van recombinatie. Vereist een zorgvuldig ontwerp. Goedkoop.	[25, 34]
17	OLED met sterke optische trilholten.	1,5 x - 2 x	Vereist een zorgvuldig ontwerp. Kan daarnaast leiden tot spectrale wijzigingen.	[52,56,72–74]
18	tandem OLED met optische trilholten.	5 x	-	[55]
19	Fotonische kristallen en optische trilholten.	50 % - 140 %	Hoge productiekosten.	[75]
20	OLED met gereduceerde oppervlakteplasmonpolaritonen.	40 %	-	[76]
21	Substraten met een nanofotonischekristalstructuur.	50 %	80 % werd theoretisch voorspeld, 50 % werd experimenteel bekomen.	[77, 78]
22	Nanovezels en - partikels.	46 %, 80 %	Hoge productiekosten en kan leiden tot spectrale wijzigingen.	[79]
23	Aperiodische diëlektrische spiegels.	80 %	Effectieve methode.	[80]
24	Ingebedde roosters met lage brekingsindices.	2,3 x	Effectief en commercieel geschikt.	[81]

2.2.2 Optische lenzen

Optische lenzen vormen een regelmatige structuur van sferische lichamen op het substraatoppervlak. Hierdoor behoort deze techniek tot de efficiëntieverhogende technieken die gebaseerd zijn op het wijzigen van de geometrie van het substraat [17]. Zoals reeds eerder behandeld in paragraaf 2.2.1 wijzigen hierdoor de invalshoeken van de lichtstralen op het raakvlak tussen het substraat en de omgeving ten opzichte van die bij een vlak substraat. Normaal zouden deze lichtstralen totaal intern reflecteren, maar door de nieuwe kleinere invalshoeken wordt dit vermeden. Indien een lichtstraal toch totaal intern reflecteert, is de kans groot dat na veelvuldig reflecteren op de anode of kathode van de OLED, hij het substraat alsnog kan verlaten. Figuur 2.12 toont dit principe [1]. Bijgevolg daalt het aandeel van de substraatmodes, waardoor de externe lichtextractie en de OCE van de OLED toenemen.



Figuur 2.12: Het principe van lichtrecuperatie door toepassing van een reflectieve kathode. Gepatroneerde kathode (links), volledige kathode (rechts).

Lenzen vormen één van de meest belovende en effectiefste methoden. Zij worden namelijk gekenmerkt door een hoge mate van flexibiliteit, aangezien lenzen op de achterzijde van het substraat aangebracht worden zonder een aanpassing van het productieproces van de OLED uit te voeren. Daarnaast zijn de productietechnieken van lenzen vaak eenvoudiger en goedkoper [17, 18, 82].

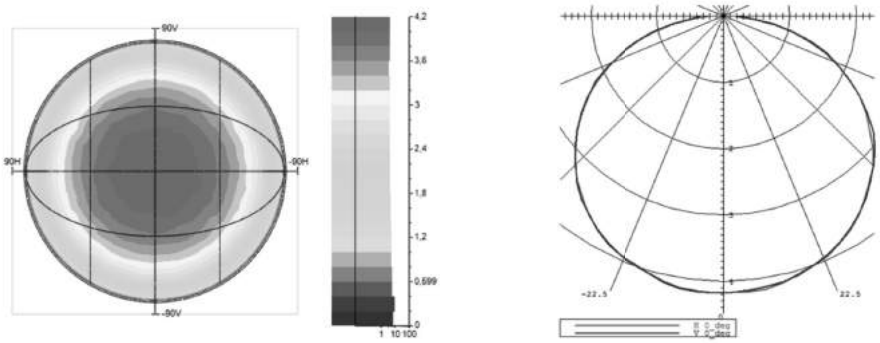
Micro- versus macrolenzen

De literatuur spreekt van microlenzen bij een lensdiameter kleiner dan 5 mm. In deze masterproef wordt binnen dit diameterbereik verder een onderscheid gemaakt. Zo worden lenzen met een diameter kleiner dan 1 mm microlenzen genoemd. Lenzen met een diameter groter dan of gelijk aan 1 mm worden met de term macrolenzen betiteld.

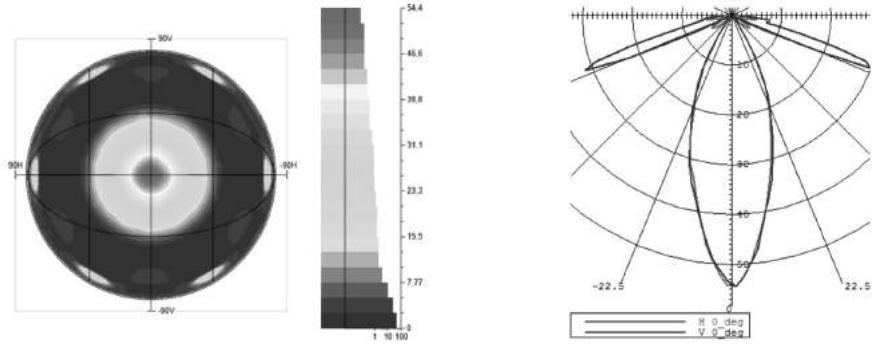
Microlenzen dienen niet gealigneerd te worden met hun lichtbron. Dit biedt voordelen op het gebied van montage. Daarnaast kunnen oppervlakte-OLED's probleemloos van een lensmatrix voorzien worden zonder in te boeten op efficiëntie. Voor de productie van dergelijke kleine lenzen worden vaak transparante polymeren en elastomeren aangewend. Een mogelijk nadeel dat hierbij rijst, is de gevoeligheid van deze kleine zachte lenzen voor krassen en deformaties tijdens het vervaardigen en gebruik. Bijkomend bestaat er een omgekeerd evenredig verband tussen de lensdiameter en de complexiteit van het productieproces. Tenslotte wordt het stralingspatroon van de OLED niet beïnvloed door microlenzen. Bijgevolg blijft het Lambertiaanse stralingspatroon behouden. Zoals reeds aangehaald is voor bepaalde toepassingen, zoals plafondverlichting, bureaulampen etc. het bundelen of collimeren van het uitgestraalde licht noodzakelijk. Deze toepassingen beogen een lokaal gebied sterk te verlichten, waarbij het

verblinden van de gebruiker vermeden dient te worden. Dit kan bijgevolg niet verwezenlijkt worden met microlenzen.

Macrolenzen daarentegen verhogen de OCE van de OLED en wijzigen bovendien het stralingspatroon. Figuur 2.13 geeft het stralingspatroon van een OLED met en zonder macrolenzen weer [1].



(a) Lichtsterkte (lm/sr) voor een lensloze OLED: Lambertiaans stralingspatroon



(b) Lichtsterkte (lm/sr) voor een OLED met macrolens: Lichtcollimatie binnen een hoek van 60°.

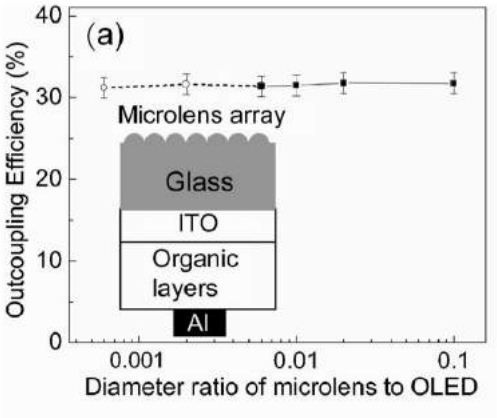
Figuur 2.13: Lichtmetingen voor een OLED met en zonder de implementatie van macrolenzen.

Hieruit volgt dat macrolenzen het uitgestraalde licht collimeren binnen een welbepaalde stralingshoek, ideaal voor verlichtingsdoeleinden. Voor een optimaal resultaat dient de lichtbron, ten opzichte van de lens, een puntbron te benaderen. De macrolens dient bijgevolg enkele malen groter te zijn dan de OLED. Daar de conventionele OLED een oppervlaktebron is, zou dit resulteren in zéér grote lenzen. Dit doet de voornaamste eigenschappen van een OLED zoals: dun en flexibel teniet. Daarom wordt de OLED gepixeld en hierover een lensmatrix voorzien. Het pixelen van de oppervlakte-OLED doet de lichtopbrengst per oppervlakte-eenheid dalen. Er moet bijgevolg een optimum gezocht worden tussen de lensdiameter en de lichtopbrengst [1].

Invloed van de lenseigenschappen op de efficiëntie

Sun et al. [18] analyseerden de invloed van de lenseigenschappen op de efficiëntie aan de hand van 3D Monte Carlo simulatiesoftware en de *wave optics finite difference time domain*-methode.

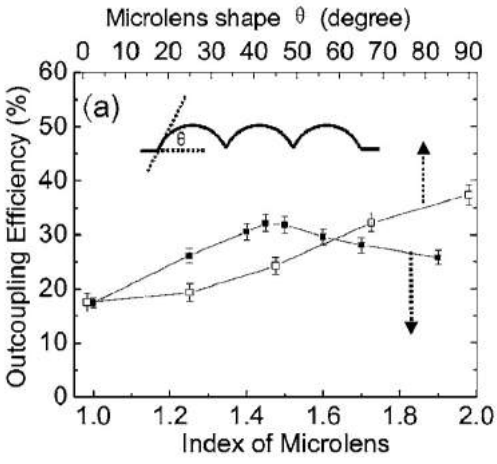
Zo stelden zij vast dat de EQE van de OLED onafhankelijk is van de lensdiameter indien de contacthoek en brekingsindex van de microlens constant zijn. De lensdiameter dient hiervoor vele malen kleiner te zijn dan de OLED, maar groter te zijn dan de golflengte van licht. Figuur 2.14 toont deze resultaten [18].



Figuur 2.14: Uitkoppelingsrendement in functie van de diameterverhouding van microlens tot OLED, verkregen via de klassieke stralenoptica.

De verkregen efficiëntiewaarden in het grootteordebereik van de golflengte van licht (0,001 - 0,007 of 100 nm - 700 nm) zijn mogelijk inaccuraat, daar de simulatie uitgevoerd werd op basis van de klassieke stralenoptica. In dit bereik worden de golfeigenschappen van licht belangrijk. Bijkomend tonen de simulaties aan dat voor lenzen met een diameter gelijk aan of groter dan de OLED, misalignering een nefaste invloed heeft op de EQE. In het ergste geval, wanneer de rand van de lens samenvalt met de centerlijn van de OLED, reduceert de EQE met (11 ± 2) % [18].

De invloed van de brekingsindex van de microlenzen wordt getoond in figuur 2.15 (zwarte vierkanten) [18].

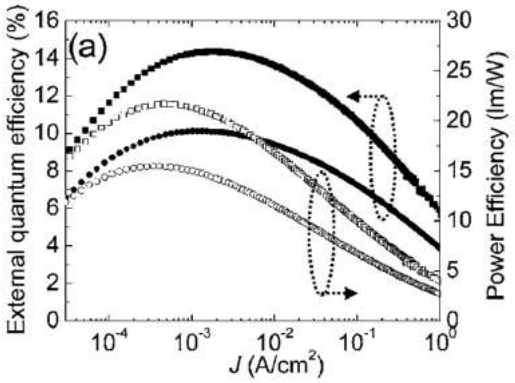


Figuur 2.15: Uitkoppelingsrendement in functie van de brekingsindex van de microlenzen (zwart) en de contacthoek van deze lenzen (wit).

Deze figuur is geldig voor lensdiameters > 5 µm. Is de brekingsindex van de microlenzen lager dan die van het substraat, dan nemen de golpijpverliezen toe bij de overgang van het licht tussen de OLED en het substraat. De substraatverliezen dalen echter. Is daarentegen de brekingsindex van de microlenzen groter dan die van het substraat, dan nemen de substraatverliezen toe bij de overgang van het licht tussen de microlenzen en de omgeving. Ditmaal dalen de golfpijpverliezen. De gulden middenweg bevindt zich tussen beiden. Zo wordt de maximale EQE verkregen bij een gelijke brekingsindices van het substraat en de microlenzen [18].

De curve in figuur 2.15, bestaande uit witte vierkanten, toont het verband aan tussen de contacthoek van de microlenzen en de EQE van de OLED. De efficiëntie stijgt bij toenemende contacthoek met een maximum bij 90° [18].

Tot slot duidt figuur 2.16 het belang van de implementatie van microlenzen in OLED's [18].



Figuur 2.16: EQE (zwart) en specifieke lichtstroom (wit) voor OLED's met (vierkant) en zonder (cirkel) lenzen.

De zwarte curven geven de relatie weer tussen de EQE en stroomdichtheid van de OLED met (vierkanten) en zonder (cirkels) microlenzen. Globaal wordt geconstateerd dat met microlenzen de EQE verhoogt voor alle stroomdichtheden. Belangrijker is de vaststelling dat voor eenzelfde EQE de stroomdichtheid van de OLED met microlenzen enkele grootteorden lager ligt. Bijgevolg kan de stroomdichtheid verlaagd worden, waardoor de levensduur van de OLED aanzienlijk stijgt [18].

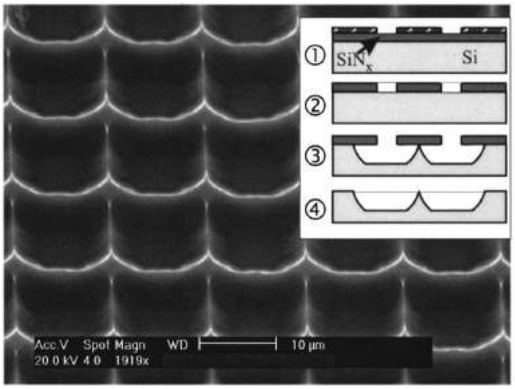
De curven met witte markeringen tonen de relatie tussen de vermogenefficiëntie (lm/W) en stroomdichtheid van de OLED met (vierkanten) en zonder (cirkels) microlenzen. Ook hier wordt voor alle stroomdichtheden een toename van de vermogenefficiëntie vastgesteld [18].

2.2.3 Productietechnieken

Het aantal productietechnieken van optische lezen is zeer groot. Enkele voorbeelden zijn *imprint lithography* [18, 69, 81, 83], LIGA [84, 85], vloeibare kristallenzen [86–97], *three-dimensional diffuser lithography* [98], *soft lithography* [14,99], *reflow process* [100–105], laserondersteunde productie [106–109], lithografie met een grijswaardenmasker [110], stempelproces [111, 112], constructie op basis van oppervlakte-eigenschappen [113–115], *proton beam writing* [116] en inkjetprinten [117, 118]. Het gedetailleerd behandelen van elke techniek is helaas onmogelijk. Daarom worden drie technieken nader beschouwd om nadien de onderlinge vergelijking te kunnen maken. Deze duiding geschiedt aan de hand van specifieke materialen en methoden uit onderzoeksartikels.

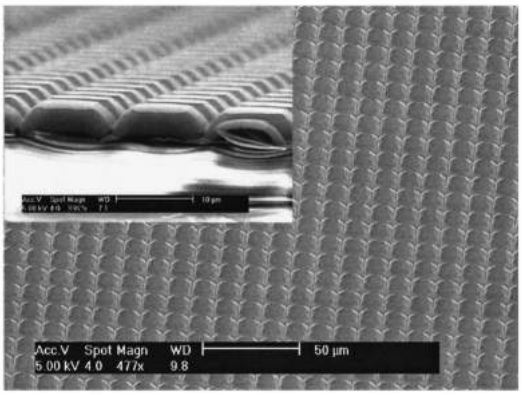
Reliëfdruklithografie

Möller et al. [69] vervaardigden een microlensmatrix op basis van *imprint lithography* of reliëfdruklithografie. Allereerst wordt een silicium wafer van een SiN_x-laag met een dikte van 1 µm voorzien. Dit gebeurt aan de hand van *plasma enhanced chemical vapor deposition*. In deze laag wordt vervolgens een vierkanten gatenpatroon geëtst op basis van fotolithografie. Op het de SiN_x-laag wordt een fotolak aangebracht via spin coating. Na het toepassen van een warmtebehandeling hardt deze lak uit. Nadien wordt een masker met vierkanten uitsparingen op de laklaag geplaatst. Het belichten van deze uitsparingen met UV-licht doet de fotolak op deze plaatsen ontbinden, waarna dit met ontwikkelvloeistof verwijderd kan worden. Er wordt uiteindelijk een silicium wafer met een uniforme SiN_x-laag en een gepatroneerde fotolaklaag verkregen. In de volgende stap dient de gepatroneerde fotolaklaag als masker voor het aanbrengen van hetzelfde patroon in de SiN_x-laag. Dit komt tot stand via droog of nat etsen. Het droog etsen geschiedt op basis van plasma. Het nat etsproces wordt verwezenlijkt met behulp van een vloeibaar oplosmiddel. Möller et al. hanteerde het droog etsproces, waarbij het vierkanten gatenpatroon in de SiN_x-laag wordt aanbracht. Na het verwijderen van de fotolaklaag bekomt men bijgevolg een silicium wafer met een gepatroneerde SiN_x-laag. De laatste fase bestaat uit het chemisch frezen van de gewenste lensvormen uit de silicium wafer. Hiertoe wordt over de wafer met het SiN_x-masker een etsmiddel, met name $HNO_3 : CH_3COOH : HF$, gegoten. Slechts de blootgestelde gebieden van de silicium wafer worden aangetast, de afgedekte gebieden blijven gevrijwaard. Tenslotte wordt het SiN_x-masker van de wafer verwijderd door middel van HF. Figuur 2.17 toont een elektronenmicroscoopbeeld van de geproduceerde lensmatrijs [69]. De ondersnijdingen zijn kenmerkend voor het chemisch freesproces [69, 119].



Figuur 2.17: Illustratieve weergave van reliëfdruklithografie met een elektronenmicroscoopbeeld van het eindresultaat (matrijs).

De lensmatrijs wordt vervolgens opgevuld met polydimethylsiloxaan (PDMS). Na een warmtebehandeling in de oven hardt dit polymeer uit en kan het van de matrijs verwijderd worden. Figuur 2.18 toont het resultaat [69].

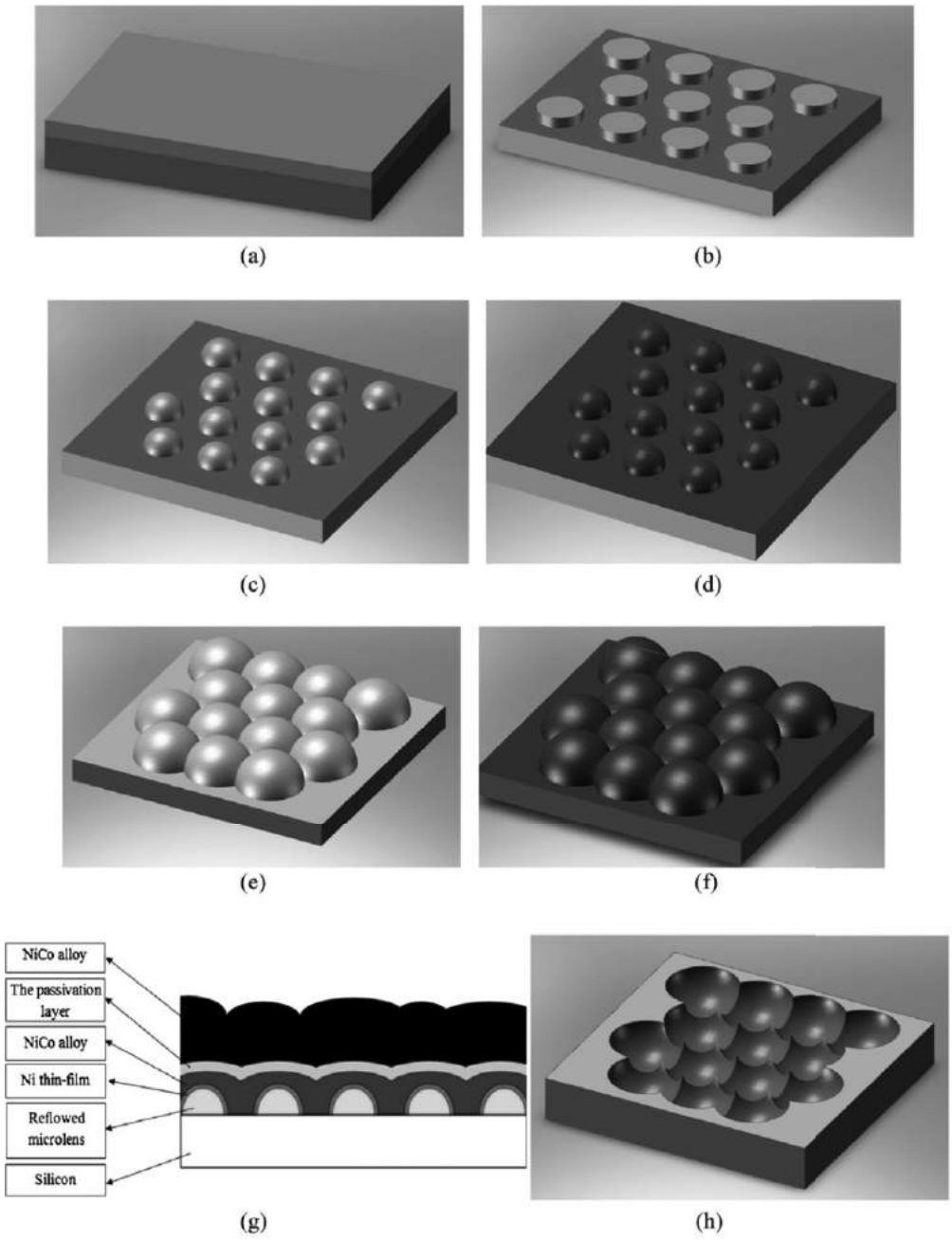


Figuur 2.18: Elektronenmicroscoopbeeld van een microlensmatrix, verkregen via reliëfdruklithografie.

De diameter van de microlenzen bedraagt 10 µm. Na implementatie van deze microlensmatrix verhoogt de EQE van de OLED met 53 %.

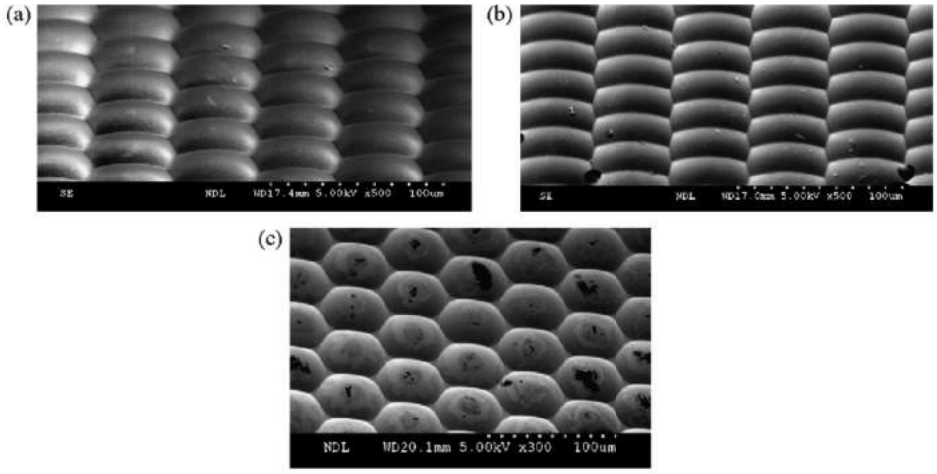
Galvanoformung Abformung of LIGA

Liu et al. [85] produceerden op basis van de diverse microlensmatrices met verschillende aspect ratio's. *Galvanoformung abformung* of LIGA werd in de jaren 80 ontwikkeld voor de productie van microlenzen voor het kernenergieonderzoek in Duitsland [84]. Tegenwoordig komt ook steeds meer een variant op het oorspronkelijke procédé voor, waarbij het gebruik van röntgenstraling vervangen wordt door UV-straling [85]. Figuur 2.19 geeft dit proces op schematische wijze weer [85].



Figuur 2.19: Illustratieve weergave van de LIGA-methode.

Een silicone substraat wordt, door middel van spincoating, bedekt met een dunne fotolaklaag (AZ4620). De dikte van deze laklaag bedraagt 5 µm. Deze laag hardt uit door middel van een warmtebehandeling. Vervolgens wordt een masker met cirkelvormige uitsparingen over het substraat voorzien. Nadien worden de niet-afgedekte gebieden aan UV-licht blootgesteld, waardoor de fotolak lokaal ontbindt. De restanten worden verwijderd met ontwikkelvloeistof. Uiteindelijk wordt een silicone substraat met cilindervormige patronen in de fotolaklaag bekomen. In de volgende stap wordt de overgebleven fotolak verhit tot boven zijn glastransitietemperatuur. Hierdoor smelten de cilindrische microstructuren en vormen deze halve bollen onder invloed van de oppervlaktespanning. Nadien wordt de bekomen structuur met een NiCo-legering bedekt door middel van galvaniseren. Dit gebeurt in twee stappen. Ten eerste wordt een dunne nikkelfilm gesputterd over het oppervlak. Deze laag en het gekromde lensoppervlak doen dienst als groeilaag. Vervolgens wordt hierover de NiCo-legering aangebracht via galvanisatie. Het galvanisatieproces wordt afgebroken wanneer de lensvormen elkaar raken. Op deze manier wordt voor de microlensmatrix een maximale fill-factor bekomen. De verkregen bolvormen op het substraat doen dienst als de eerste matrijshelft. De NiCo-laag wordt nadien met een passieve deklaag bedekt. Over deze passieve deklaag wordt wederom de NiCo-legering gegalvaniseerd. Dit vormt de tweede matrijshelft. Tenslotte wordt de bovenzijde vlak gepolijst. Dit resulteert in een rechthoekige metalen matrijs. Door de brosse passieve deklaag tussen de matrijshelften kunnen ze van elkaar losgebroken worden. De tweede matrijshelft wordt vervolgens aangewend voor de productie van de microlensmatrix. Hiervoor wordt deze matrijs opgevuld met een UV-gevoelig polymeer via spincoating. Na een UV-behandeling wordt de microlensmatrix verkregen. Indien de tweede matrijshelft beschadigd is, kan op basis van de eerste matrijshelft een nieuw exemplaar vervaardigd worden [85]. Figuur 2.20 geeft enkele elektronenmicroscoopbeelden van deze lensmatrices [85].

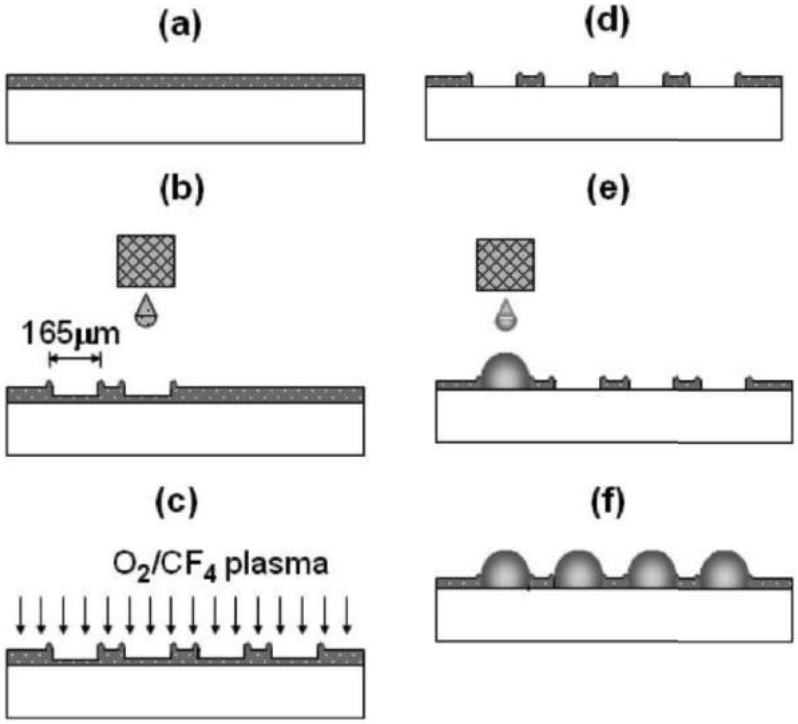


Figuur 2.20: Elektronenmicroscoopbeelden van diverse microlensmatrices, verkregen via de LIGA-methode.

Men stelt vast dat deze methode tot gatloze lensmatrices leidt. Zo wordt een fill-factor van nagenoeg 100 % bekomen. De theoretische limiet van de fill-factor voor een hexagonaalgeordende lensmatrix bedraagt 90,6 % en werd zo overschreden.

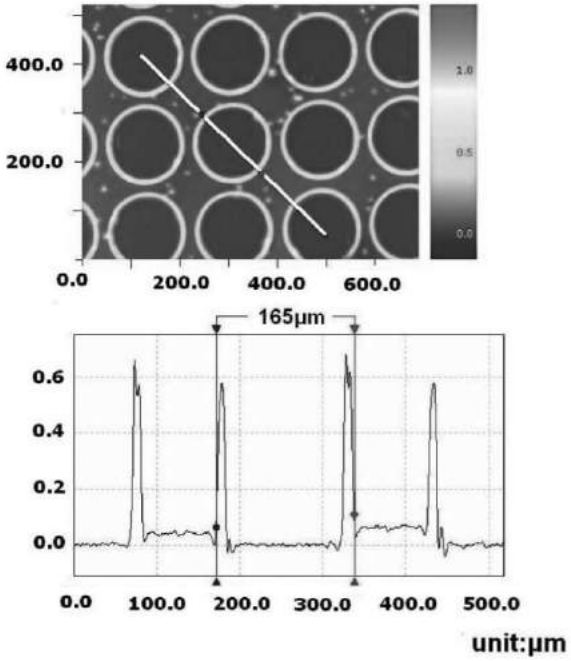
Inkjetprinten

Chen et al. [120] wendde het inkjetprinten aan voor het vervaardigen van een microlenzenmatrix. Figuur 2.21 geeft het productieproces op grafische wijze weer [120].



Figuur 2.21: Illustratieve weergave van de productie van microlensmatrices op basis van inkjetprinten.

De eerste stap bestaat uit het spincoaten van een PMMA-laag over een gereinigd glazen substraat met een dikte van 0.2 µm. Vervolgens worden anisol druppels, een solvent van PMMA, in een rechthoekig patroon afgezet op deze laag met behulp van een inkjetprinter. Deze inkjetprinter is uitgerust met thermische elementen, die de druppelvorming tot stand brengen. Het PMMA lost in deze solventdruppels op. Ten gevolge van het koffieringeffect ontstaat er een stroming in de vloeibare druppels, die het PMMA van het centrum naar de randen afvoert. Na het verdampen van het anisol worden de doorsnedeprofielen uit figuur 2.22 bekomen [120].



Figuur 2.22: Bovenaanzicht en profilometriebeeld van de microstructuren in het substraat ten gevolge van inkjetetsen.

De unifome PMMA-laag is bijgevolg omgevormd tot een microstructuur van cirkelvormige kraters, gerangschikt in een rechthoekig patroon. Deze kraters bezitten in het centrum een klein dal met aan weerszijden opstaande randen. Het PMMA in de dalen van de kraters wordt nadien verwijderd onder invloed van een O_2-plasmabehandeling. Het etsen wordt gestopt wanneer het glazen substraat bereikt is. Vervolgens wordt de resterende microstructuur hydrofoob gemaakt door het toepassen van een CF_4-plasmabehandeling. Omwille van de verschillende hechtingscoëfficiënten van het PMMA uit de randen en het glas in het centrum zal het PMMA zich hydrofoob gedragen terwijl het glas eerder een hydrofiel gedrag vertoont. In de voorbehandelde kraters wordt tot slot de lensvloeistof aangebracht, die bestaat uit een optisch adhesief (NOA 65) dat uithardt onder invloed van UV-licht. De kratervorm tezamen met het verschil in hydrofobiciteit vormt een reservoir of bassin dat het samenvloeien van de vloeibare druppels voorkomt ze op het substraat worden aangebracht. Daarnaast leidt de sterke hydrofobiciteit van de randen tot een verhoogde contacthoek en daaruitvolgend een grotere efficiëntieverhogende werking. Na het uitharden van de vloeibare lenzen wordt de microlensmatrix verkregen.

De tot stand gebrachte microlenzen bezitten een hoogte en basisdiameter van respectievelijk 25 µm en 135 µm.

Conclusie

In deze paragraaf werden tot slot drie verschillende productietechnieken behandeld, namelijk: reliëfdruklithografie, LIGA en inkjetprinten. De bespreking geschiedde op basis van specifieke methoden, die teruggevonden werden in onderzoeksartikels. Hieruit wordt vastgesteld dat reliëfdruklithografie en LIGA gekenmerkt worden door dure, complexe technieken met overigens het gebruik van 'exotische' materialen. Daarnaast is het aantal te stellen handelingen binnen het productieproces zeer groot in tegenstelling tot het inkjetprinten. Op basis van deze bevindingen en vanuit een uitgebreide literatuurstudie kan daarom gesteld worden dat inkjetprinten omwille van zijn eenvoud en kostenefficiëntie het meeste potentieel toont voor de massaproductie van lensmatrices. Daarnaast is bij deze techniek een hoge mate van flexibiliteit beschikbaar, daar het eenvoudig wijzigen van het printprogramma leidt tot een volledig nieuwe lensmatrixfolie met verschillende lensgrootten en -rangschikkingen.

2.3 Depositietechnieken

Een vervaardigingstechniek wordt gedefinieerd als een techniek die tot doel heeft een hoeveelheid materiaal of een lichaam te transformeren in een werkstuk met een geometrisch bepaalde vorm door de vorm of de materiaaleigenschappen te veranderen [121]. De Duitse industrienorm (DIN 8580) laat toe om vervaardigingstechnieken te classificeren. Het hoogste niveau van deze norm bestaat uit zes hoofdgroepen, die op hun beurt zijn ingedeeld in subgroepen, processen en procesvarianten. Daarnaast biedt deze indeling tevens de mogelijkheid om relatief recente depositietechnieken, zoals ultrasoon spraycoaten, inkjetprinten en spincoaten op te nemen.

2.3.1 Ultrasoon spraycoaten

Het doel van vernevelingstechnieken is het opsplitsen van een vloeistofstroming in kleine druppels. De ontstane druppels worden vervolgens naar het substraat gestuwd, waar zij samenvloeien tot een dunne laag. De industrie onderscheidt vijf vernevelingstechnieken op basis van de energiebron, die de druppelvorming tot stand brengt [121]:

- luchtloos vernevelen,
- pneumatisch vernevelen,
- centrifugaal vernevelen,
- elektrostatisch vernevelen,
- ultrasoon vernevelen.

Het pneumatisch vernevelen is de meest courante techniek in de industrie. Hierbij wordt vloeistof op hoge druk door een nauwe restrictie geleid waarna een nevel ontstaat. Bij het ultrasoon spraycoaten daarentegen wordt een mist van druppeltjes opgewekt onder invloed van ultrasone trillingen [122].

Het ultrasoon spraycoaten onderscheidt zich van de overige vernevelingstechnieken door: de eenvoud, de goede overdrachtsefficiëntie, de goede reproduceerbaarheid, de opwekking van kleine druppels in het micrometerbereik, het coaten van driedimensionale structuren en de lage snelheid van de vloeistofnevel. Bij pneumatische vernevelingstechnieken is de nevelsnelheid 100 maal groter ten opzichte van die bij ultrasoon spraycoaten. Dit grote verschil leidt voor het ultrasoon spraycoaten tot twee voordelen. Allereerst vindt een reductie van de *overspray* plaats. De druppels die het substraat bereiken blijven echter bij het eerste contact met het substraat liggen zonder weg te stuiteren. Dit vertaalt zich in materiaalbesparingen en een vermindering van ongewenste emissies in de omgeving. Ten tweede kan aan de hand van een lucht- of edelgasstroming de vorm van de nevel gecontroleerd en gewijzigd worden. Naargelang de toepassing kan voor een fijne gefocusseerde straal tot een wijde wolk geopteerd worden [123].

De ultrasonespraytechnologie werd door de Sono-Tek Corporation ontwikkeld. Sono-Tek levert zowel industriële als laboratoriumgerichte toestellen, waaronder ook het ExactaCoat Ultrasonic Coating System [124]. Dit systeem wordt aangewend in het Instituut voor Materiaalonderzoek en staat afgebeeld op figuur 2.23 [2].

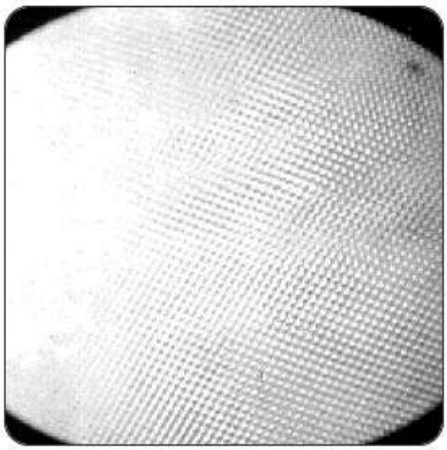


Figuur 2.23: Het ExactaCoat Ultrasonic Coating System van de fabrikant Sono-Tek.

Opbouw en werkingsprincipe

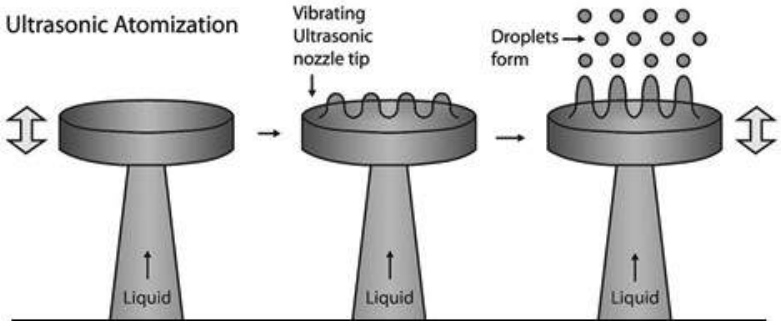
Bij het ExactaCoat-systeem wordt de sprayvloeistof in een glazen vloeistofspuit aan de machine toegevoegd. Via een lineaire actuator, de injectiepomp genaamd, wordt deze spuit automatisch ingedrukt en het volumedebiet naar het spuitmondstuk geregeld. De sprayvloeistof of inkt bestaat meestal uit een organische of waterige oplossing of een colloïdale suspensie van het functionele coatingmateriaal in een vluchtig solvent. Het systeem is uitgerust met twee types van spuitmondstukken: *Accumist* en *ImpactEdge*. Deze mondstukken zijn speciaal ontworpen voor het respectievelijk bedekken van kleine en grote oppervlakken. Het spuitmondstuk is gemonteerd op een XYZ-opstelling van lineaire actuatoren met stappenmotoren. Hierdoor is het mondstuk in staat om een willekeurige driedimensionale beweging in de ruimte te beschrijven. De substraattemperatuur kan tenslotte ingesteld worden via een verwarmde bodemplaat [125].

Het ultrasoonvernevelingsproces geschiedt als volgt. Een vlak gepolijst oppervlak, het vernevelingsoppervlak genaamd, trilt met een ultrasone frequentie (> 20 kHz). De trilrichting staat loodrecht op het oppervlak. Vervolgens wordt een dunne vloeistoffilm over dit oppervlak aangebracht. De vloeistof absorbeert de trillingsenergie, waardoor staande sinuoïdale longitudinale golven in de film ontstaan. Deze golven worden capillaire golven genoemd en vormen een rechthoekig roosterpatroon met afwisselend toppen en dalen. Figuur 2.24 toont dit patroon [124].



Figuur 2.24: Het ontstaan van capillaire golven op het vernevelingsoppervlak.

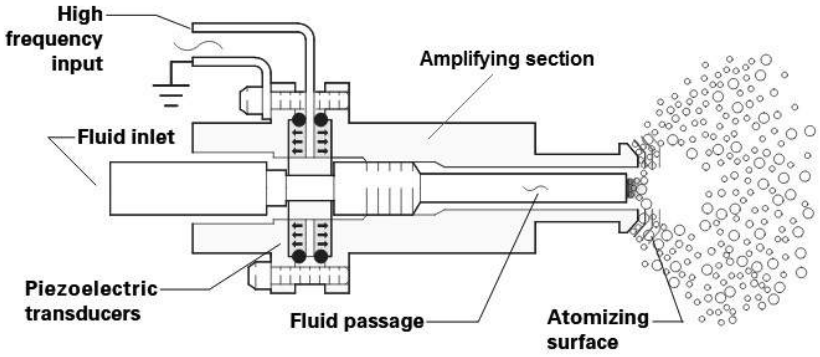
Wanneer de amplitude van de verplaatsing van het vernevelingsoppervlak toeneemt, nemen eveneens de amplituden van de staande golven toe. De toppen worden hoger, de dalen worden dieper. Bij een welbepaalde amplitude, de kritische amplitude, wordt de vloeistof instabiel. Hierbij stuiken de golven in elkaar en worden, ter hoogte van de toppen, kleine vloeistofdruppeltjes afgevuurd volgens de normale richting op het vernevelingsoppervlak. Figuur 2.25 geeft dit verschijnsel op schematische wijze weer [126].



Figuur 2.25: Illustratieve weergave van het ultrasoonvernevelingsproces.

Na het vernevelingsproces wordt de opgewekte mist naar het substraat gestuwd waar de druppeltjes samenvloeien tot een uniforme laag. Het verdampen van het solvent op het substraat resulteert in een vaste laag van het functionele materiaal.

Praktisch wordt vloeistof via een centrale leiding in het mondstuk van de ultrasonespraycoater aangevoerd onder invloed van een pomp. Figuur 2.26 toont de mechanische opbouw [127].



Figuur 2.26: De inwendige mechanische opbouw van een ultrasoonvernevelingsmondstuk.

Een frequentiegenerator, aan de ingang van het systeem, zet de wisselspanning van 50 Hz, afkomstig van het lichtnet, om in een hoogfrequent ultrasoon signaal. Schijfvormige piëzo-elektrische omvormers, vervaardigd uit keramisch materiaal, zorgen voor de omzetting van dit elektrische ingangssignaal naar een mechanische trilling. De amplitude van deze trilling dient zorgvuldig ingesteld te worden binnen een specifiek bereik. Is de amplitude te laag, dan blijft verneveling van de vloeistof uit. Is de amplitude te hoog, dan wordt de vloeistoffilm instabiel en ontstaan grote druppels in plaats van een fijne mist. Deze piëzo-elektrische omvormers zijn rondom de mantel van het mondstuk gemonteerd en veroorzaken de periodieke verplaatsing van het uiteinde van het spuitmondstuk. Dit uiteinde vormt het vernevelingsoppervlak voor dergelijk systeem. De vloeistof uit de kernleiding verlaat uiteindelijk het mondstuk en stroomt hierbij over het vernevelingsoppervlak waar het ultrasoonvernevelingsproces plaatsvindt. Een

stikstofstroming begeleidt tenslotte de mist naar het substraat en laat toe om de vorm van de nevelwolk te regelen. [123, 127]

Het ultrasoonvernevelingsproces wordt tot slot gestuurd door verscheidene materiaal- en procesparameters, waaronder:

- de concentratie van de sprayvloeistof,
- de viscositeit van de inkt,
- de vluchtigheid van het solvent,
- de oppervlakte-vrije energie van het substraat,
- het aantal sprayovergangen,
- het volumedebiet aan sprayvloeistof,
- de substraattemperatuur,
- de afstand tussen het spuitmondstuk en het substraat,
- de voortplantingssnelheid van het mondstuk,
- het vermogen van de piëzo-elektrische elementen,
- de druk van het focusseergas.

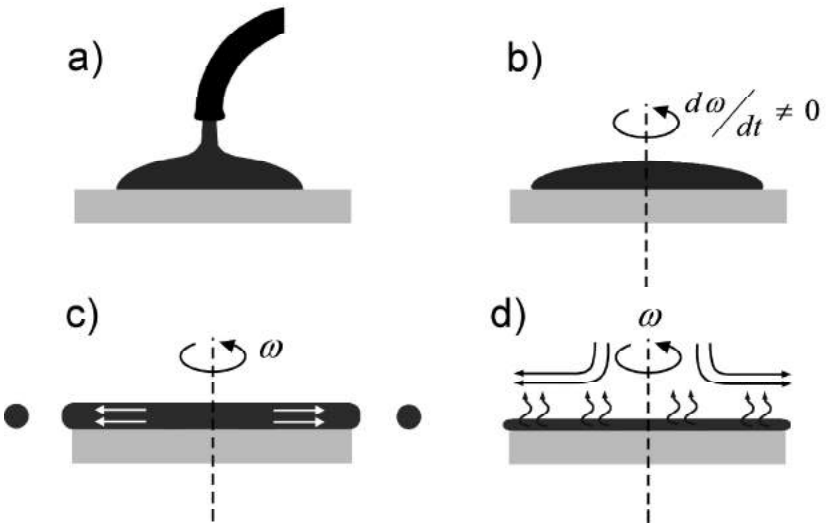
2.3.2 Spincoaten

Bij het spincoaten wordt allereerst het substraat in het toestel ingebracht. De basisplaat van de spincoater is rotatief opgesteld en voorzien van een vacuümaanzuiging om het substraat vast te klemmen tijdens het roteren. Met behulp van een depositiesysteem, zoals een micropipet, wordt vervolgens een geringe hoeveelheid inkt op het substraat aangebracht. Deze inkt kan bestaan uit een oplossingen van functioneel materiaal in een bepaald solvent, zoals PMMA in aceton. Nadien wordt de basisplaat aan het roteren gebracht op hoge snelheid (3000 tpm). Centrifugaal krachten zorgen voor het uitspreiden van de oplossing totdat een dunne uniforme vloeistoflaag overgehouden wordt. De dikte van deze film wordt gecontroleerd door zowel materiaal- als procesparameters, waaronder [128]:

- de concentratie van de spinoplossing,
- de viscositeit van de inkt,
- de vluchtigheid van het solvent,
- de oppervlakte-vrije energie van het substraat,
- de rotatiesnelheid van het substraat,
- de versnelling van het substraat,
- de rotatieduur.

Tot slot wordt na het verdampen van het solvent een dunne coating van functioneel materiaal bekomen.

Figuur 2.27 geeft het spincoatproces op illustratieve wijze weer.



Figuur 2.27: Illustratieve weergave van het spincoatproces.

Tijdens dit proces dient de rotatiesnelheid dynamisch gewijzigd te worden. De eerste stap bestaat uit het aanbrengen van de inkt op het substraat. Een snelheid van 500 tpm volstaat om het uitspreiden van de vloeistof over het volledige substraat te garanderen. Vervolgens vindt een acceleratie plaats om de dikke vloeistoflaag uit de vorige stap om te zetten in een dunne uniforme film. Het toerental kan hierbij oplopen tot 1500 tpm á 6000 tpm afhankelijk van de materiaaleigenschappen van de vloeistof. De rotatieduur bevindt zich in het bereik van 10 seconden tot enkele minuten. De combinatie van rotatiesnelheid en -duur bepalen de uiteindelijk dikte van de coating. Tot slot wordt het drogen van de inkt ingezet. Hierbij wordt een gematigd toerental ingesteld, dat 25 % van de snelheid van de voorgaande stap bedraagt, om zo het overmatig dunner worden van de film te voorkomen [128].

In het IMO-IMOMEC staat de WS-400BX-6NPP/LITE spincoater ter beschikking. Dit toestel wordt in figuur 2.28 afgebeeld [129].

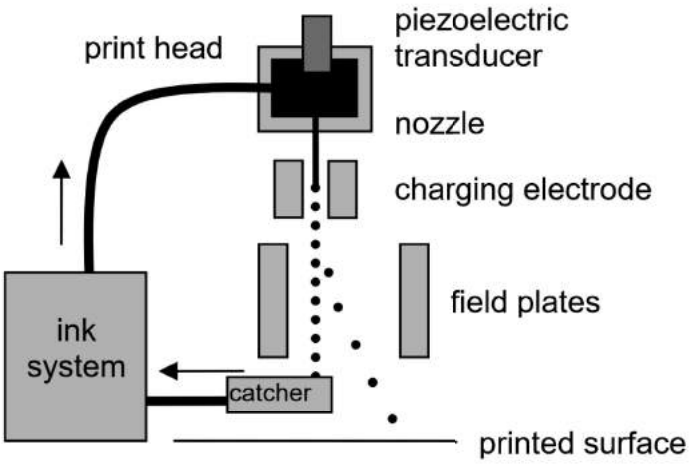


Figuur 2.28: De WS-400BX-6NPP/LITE-spincoater.

2.3.3 Inkjetprinten

Inkjetprinten is een depositietechniek waarmee het druppelsgewijs opbrengen van een vloeibare inkt beoogd wordt. Deze inkt bestaat uit oplossing of dispersie van een functioneel materiaal in een solvent [130]. Globaal wordt een onderscheid gemaakt tussen twee inkjetsystemen: *continuous* en *drop-on-demand*.

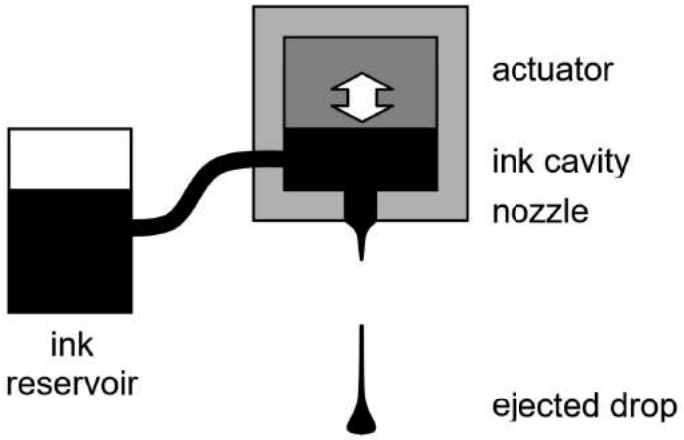
Figuur 2.29 toont een schematische weergave van het *continuous* inkjetsysteem [131].



Figuur 2.29: Illustratieve weergave van het *continuous* inkjetsysteem.

Vanuit het inktpatroon wordt inkt aangevoerd naar de printkop. Deze inkt dient elektrisch geleidend te zijn. In deze printkop bevinden zich piëzo-elektrische elementen die onder invloed van een wisselspanning, een periodiek wisselende druk uitoefenen op de vloeistof in het kanaal. Door deze wisselende druk breekt de continue vloeistofstroming op in kleine druppeltjes die vervolgens de spuitmond verlaten. Door middel van elektroden worden deze geleidende druppeltjes elektrostatisch opgeladen. Deze ladingen kunnen niet wegvloeien via de vloeistofstroom, aangezien deze stroom reeds in druppels werd opgesplitst. Bijgevolg blijven de ladingen in de druppels gevangen. Het elektrodepotentiaal wordt voor iedere druppel gewijzigd, zodanig dat elke druppel een verschillende lading bezit. Vervolgens wordt de druppelstroming blootgesteld aan een elektrisch veld, dat de stroming afbuigt op basis van de ladingen van de druppels. Op deze wijze worden druppels uit de druppelstroming geselecteerd voor het printproces. De sterkte van het elektrische veld bepaalt de afbuiging en daarmede de positie op het substraat waar de druppels terechtkomen. Ongeladen of zwak geladen druppels behouden hun rechtlijnige baan en worden opgevangen en teruggestuurd naar het inktpatroon [130, 131].

Het *drop-on-demand* inkjetsysteem bestaat uit een reeks van spuitmonden, waarbij de spuitmonden slechts inktdruppels afvuren indien nodig. Dit in tegenstelling tot het *continuous* inkjetsysteem waarbij een continue vloeistofstroming uit één spuitmond wordt opgesplitst in een druppelstroming, die nadien verder opgesplitst worden in afzonderlijke druppels voor depositie [130, 131]. Figuur 2.30 illustreert het *drop-on-demand* systeem [131].



Figuur 2.30: Illustratieve weergave van het *drop-on-demand* inkjetsysteem.

Het afvuren geschiedt op basis van een actuator. Iedere spuitmond van de printkop wordt van een dergelijk exemplaar voorzien. Deze actuatoren kunnen thermisch of piëzo-elektrisch aangedreven worden. Het goedkoopste systeem is de thermische uitvoering. Hierbij wordt in het vloeistofkanaal van de spuitmond een verwarmingselement aangebracht. Om een druppel af te vuren wordt vervolgens een stroompuls door dit element gestuurd. De oppervlakte warmt op en doet de inkt plots verdampen, waardoor een gasbel in het kanaal ontstaat. Hierdoor vindt een druktoename plaats, dat het uitstoten van een vloeistofdruppel veroorzaakt. Het afvuren van een druppel geschiedt bij de piëzo-elektrisch uitvoering tevens op basis van een druktoename. Hierbij wordt deze druk echter opgewekt door de vormverandering van een piëzo-elektrisch element in het vloeistofkanaal. Deze vormverandering wordt tot stand gebracht door middel van een wisselspanning [132].

In deze masterproef wordt de drop-on-demand inkjetprinter DMP-2850 van de fabrikant Fujifilm Dimatix aangewend, uitgerust met piëzo-elektrische elementen voor de druppelvorming. Dit toestel is voorzien van een printkop met ruimte voor één inktpatroon. Daarnaast werd op de printkop een camera gemonteerd. Deze camera doet dienst als hulpmiddel voor enerzijds het positioneren van het printpatroon op het substraat voor het printen en anderzijds voor het bestuderen van het aangebrachte patroon achteraf. De printkop werd geplaatst op een tweeassige XZ-constructie van lineaire geleidingen. De Y-beweging wordt uitgevoerd door de basisplaat. Tot slot bestaat de mogelijkheid om de druppelvorming uit de spuitmonden te analyseren. Hiervoor werd een tweede camera tezamen met een stroboscoop onder een welbepaalde hoek geplaatst. Dit laat de gebruiker toe om het gevormde camerabeeld te vertragen en zelfs te stoppen. Het instellen van de printparameters en het daaruit onderzoeken van hun invloed op de druppelvorming behoort eveneens tot de mogelijkheden van dit toestel [133].

Hoofdstuk 3

Ontwerp

3.1 Inleiding

De *outcoupling efficiency* van de OLED wordt op eenvoudige wijze verhoogd door het aanbrengen van een lensmatrix. Dat leidt tot een LEEF van 1,50 of meer. De LEEF of *Light Extraction Enhancement Factor* wordt gedefinieerd als de verhouding van de OCE van de OLED na verbetering tot de OCE van de intrinsieke OLED. De OCE neemt met andere woorden met 50 % toe. Zo behaalden Eom et al. [14] een LEEF van (1,68 $\pm$ 0,09) met behulp van *soft lithography*, Sun et al. [18] verkregen een waarde van (1,49 $\pm$ 0,03) aan de hand van *imprint lithography* en Yang et al. [134] boekten op basis van een *roll-to-roll mold transfer proces* LEEF's van (1,60 $\pm$ 0,01) en (1,53 $\pm$ 0,01) voor respectievelijk ellips- en cirkelvormige lenzen. Het voordeel van lenzen is dat deze twee hoofddoelstellingen vervullen. Naast het verhogen van de OCE zorgen zij tevens voor het bundelen van het uitgestraalde licht binnen een bepaalde stralingshoek. Daarnaast vinden lensmatrices hun toepassing in onder andere detectoren, glasvezeloptica, sensoren, *flat panel displays*, computers, fotokopieerapparaten, lithografie [118].

Zoals reeds eerder vermeld, bestaan er verschillende technieken om lensmatrices te vervaardigen. Enkele voorbeelden hiervan zijn *imprint lithography* [18, 69, 81, 83], LIGA [84, 85], vloeibare kristallenzen [86–97], *three-dimensional diffuser lithography* [98], *soft lithography* [14, 99], *reflow process* [100–105], laserondersteunde productie [106–109], lithografie met een grijswaardenmasker [110], stempelproces [111, 112], constructie op basis van oppervlakte-eigenschappen [113–115] en *proton beam writing* [116]. De voorgaande technieken bestaan echter uit arbeidsintensieve, complexe en kostelijke processen en voldoen daardoor niet aan de eerste hoofddoelstelling. De meeste productietechnieken zijn namelijk gebaseerd op het, in eerste instantie, vervaardigen van een matrijs. Hiermee kunnen de lenzen nadien tot stand gebracht worden. Vanwege de noodzaak aan een matrijs zijn deze productiemethoden minder flexibel. Zo dient per lensgeometrie en -verdeling een nieuwe mal voorzien te worden. Daarentegen kan een matrijs wel verschillende malen opnieuw gebruikt worden.

In deze masterproef wordt gebruikgemaakt van *drop-on-demand* (DOD) inkjetprinten en ultrasoon spraycoaten. Inkjet printen en ultrasoon spraycoaten voldoen volledig aan de eerste hoofddoelstelling. Het zijn eenvoudige, kostenefficiënte, flexibele printtechnieken en daarom geschikt voor massaproductie [135]. Zo kan door het wijzigen van het printprogramma bij inkjet printen op een eenvoudige en snelle wijze een nieuwe lensgeometrie en -indeling geprint worden. Het gecontroleerd en het druppelsgewijs aanbrengen van materiaal laat eveneens een efficiënt gebruik van grondstoffen toe.

Daarnaast vormt inkjet printen de ideale basis voor andere technieken. Door het overschakelen van een inkt naar een solvent kan men subtractief tewerkgaan, in plaats van additief. Deze techniek wordt *inkjet etching* genoemd en vormt één van de voornaamste technieken uit deze

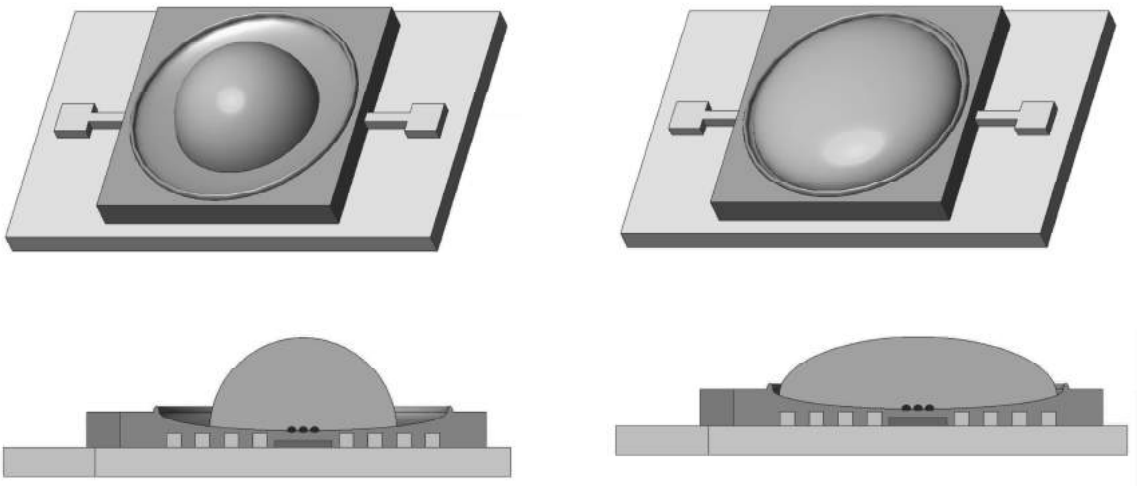
masterproef. Inkjet etching werd eerder al toegepast voor de productie van microstructuren en -kanalen [7, 136].

Vanuit het literatuuronderzoek kwamen twee ontwerpen voort die in de volgende paragrafen verder in detail worden behandeld. Het korte tijdsbestek van één masterjaar was ontoereikend om het eerste ontwerp, met name een variabele-lensmodule op basis van elektrobevochtiging, te onderzoeken en praktisch te realiseren. Dit omwille van enkele nieuwe en de combinatie van bestaande elementen in dit ontwerp die nader onderzocht dienen te worden. Door de relatief eenvoudige opbouw en het gebruik van kostenefficiëntie productietechnieken, waaronder inkjetprinten en ultrasoon spraycoaten, vormt dit ontwerp een mogelijke initiator voor verder onderzoek. Het tweede ontwerp bestaat uit een flexibele lensmatrixfolie vervaardigd met behulp van inkjetprinten. Dit ontwerp werd daarentegen wel nader onderzocht en praktisch gerealiseerd, waarvan de resultaten in hoofdstuk 4 teruggevonden kunnen worden. Zowel de productie van de lensmatrixfolie als de lensreservoirs tonen ook potentieel binnen andere onderzoeksdomeinen, zoals de opto-elektronica en de microchemie.

3.2 Variabele-lensmodule op basis van elektrobevochtiging

Werkingsprincipe

Figuur 3.1 toont 3D-waargaven en doorsneden van dit lensontwerp. Dit model werd opgesteld met behulp van het high-end CAD/CAM-pakket: CREO van de fabrikant PTC.



Figuur 3.1: 3D-waargaven en doorsneden van het lensontwerp: spanningsloos (links), bekrachtigd (rechts).

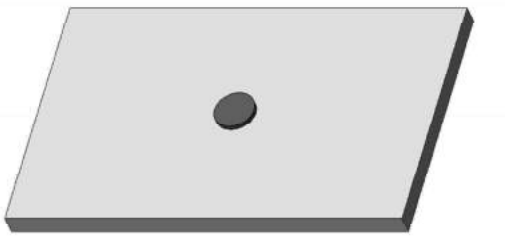
Wanneer een wisselspanningsbron wordt aangesloten over de twee elektroden (geel) wijzigt de lensvorm ten gevolge van het *electrowetting effect*. De lens (groen) bestaat uit een vloeibare elektrolytdruppel. Onder invloed van het opgewekte elektrische veld past de contacthoek van deze druppel zich aan. De contacthoek wordt gedefinieerd als de hoek die het gekromde oppervlak van de druppel maakt met zijn ondergrond. De contacthoek en vorm van deze lens kan op deze manier tussen twee uiterste standen traploos ingesteld worden.

Door de veranderende kromtestraal van de lens veranderen eveneens de optische eigenschappen. Hierdoor bestaat de mogelijkheid om het stralingspatroon van de OLED en de bijhorende stralingshoek te variëren tussen 60°en 120°.

Opbouw

Stap 1: het aanbrengen van de OLED-pixel

Allereerst wordt een OLED-pixel aangebracht op het substraat. Dit substraat bestaat uit glas of polyethyleentereftalaat (PET). Dit laat toe om zowel testen uit te voeren op starre als flexibele ondergronden. Figuur 3.2 toont een illustratieve weergave.



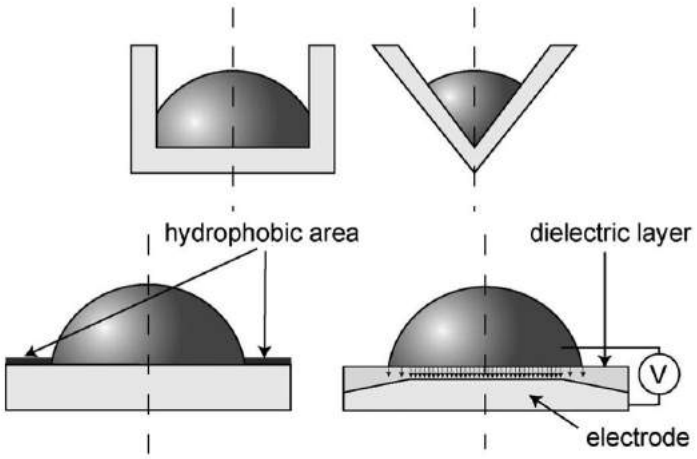
Figuur 3.2: Illustratieve weergave van het substraat, voorzien van een OLED-pixel.

Binnen het IMO-IMOMEC werd het pixelen van een OLED reeds onderzocht [137]. Allereerst worden glazen substraten (20 mm x 20 mm) aangekocht, die door de fabrikant voorzien zijn van een indiumtinoxiden (ITO) coating. Deze coating doet dienst als de anode. Bovenop het ITO wordt de gatentransportlaag of *hole transport layer* (HTL) aangebracht. Deze laag bestaat uit het geleidende polymeer PEDOT:PSS en wordt gepixeld. Het pixelen geschiedt door middel van een schaduwmasker uit PET. Dit masker wordt over het substraat geplaatst en vervolgens wordt een PEDOT:PSS-coating voorzien. Nadien wordt, over de PEDOT:PSS-pixels, de actieve laag uit Super Yellow (PDY-132) gespincoat. Tot slot worden de elektronentransportlaag of *electron transport layer* (ETL) en de kathode opgebracht via thermisch opdampen. Deze lagen bestaan respectievelijk uit calcium en aluminium. Nadien wordt over de OLED een dunne isolatielaag ultrasoon gespraycoat om kortsluiting met de concentrische elektroden uit stap 2 te voorkomen. Hiervoor kan eventueel polymethylmethacrylaat (PMMA) aangewend worden. In [138] worden de spraycoatparameters van een PMMA-acetonoplossing onderzocht en aangereikt.

Stap 2: het aanbrengen van de concentrische elektroden

De volgende stap bestaat uit het vervaardigen van de elektroden. Deze elektroden laten toe om de lenskromming en daarmede de optische eigenschappen te wijzigen op basis van elektrobevochtiging.

Elektrobevochtiging gaat echter gepaard met een ongewenst verschijnsel. De vloeibare macrolens vertoont namelijk de neiging om na veelvuldig aanpassen, zich steeds verder van de lichtbron en zijn optische as te verplaatsen. Ook mechanische schokken leiden tot decentrering van de lens. Bijgevolg is een centreermechanisme noodzakelijk, die een terugdrijvende kracht uitoefent op de lens [139, 140]. De literatuur onderscheidt twee groepen van centreermechanismen [141], die in figuur 3.3 getoond worden [141].

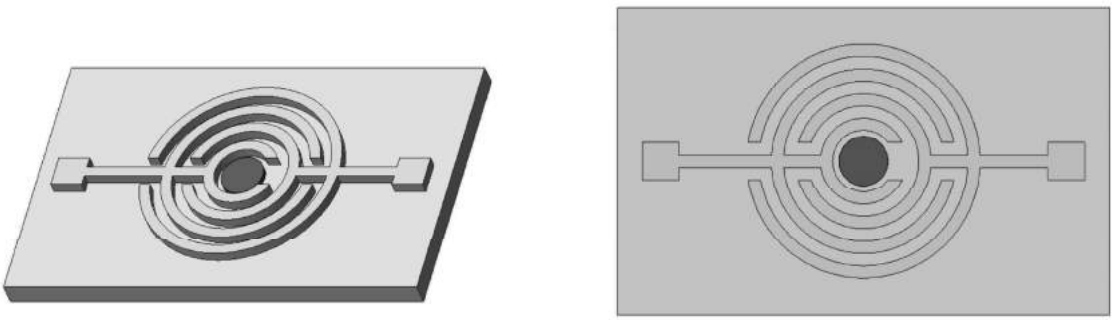


Figuur 3.3: De voornaamste centreermechanismen bij elektrobevochtiging.

De eerste groep bestaat uit mechanische centrering, gebaseerd op de geometrische vorm van het substraat. Deze vorm doet dienst dat als een schaal voor de vloeibare lens. Men onderscheidt cilindrische, conische en concave substraatvormen [141].

De tweede groep van centreermechanismen maakt gebruik van oppervlakte-effecten. Zo wordt bijvoorbeeld een hydrofiel substraat van een ringvormig hydrofoob patroon voorzien. De vloeibare lens wordt in het centrum van deze ring aangebracht. Het hydrofiele substraat in combinatie met het hydrofobe patroon zorgen voor het terugdringen van de lens naar het optisch centrum na decentrering. Dit wordt veroorzaakt door het streven van de vloeibare lens naar een minimale oppervlakte-energie. Daarnaast kan centrering bekomen worden door het variëren van de dikte van het diëlektricum. Hierdoor zal het elektrische veld het sterkste zijn in het centrum met een verzwakking volgens de radiale richting, waardoor de lens naar het optische centrum gedwongen wordt. Voor beide gevallen kan aangetoond worden dat de terugdringkracht kwadratisch toeneemt met de afwijking ten opzichte van de optische as [141, 142].

In dit lensontwerp worden drie verschillende centreermechanismen gecombineerd. De eerste methode bestaat uit het aanbrengen van concentrische elektroden rondom de eerder aangebrachte OLED-pixel. Figuur 3.4 geeft een vereenvoudigde weergave.



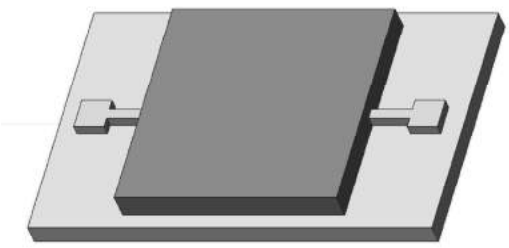
Figuur 3.4: Illustratieve weergave van de aangebrachte concentrische elektroden.

De concentrische ringelektroden bouwen het elektrische veld zodanig op, dat de lens tot het centrum wordt aangetrokken [86]. Deze elektroden worden aan de hand van inkjetprinten vervaardigd. Binnen het IMO-IMOMEC werd eerder al het inkjetprinten van koperen en zilveren inkten onderzocht. De resultaten en expertise hieromtrent kunnen aangewend worden voor het printen van de concentrische elektroden uit dit lensontwerp.

De geleidbaarheid en de capaciteitswaarde van de elektroden worden met behulp van een multimeter bepaald.

Stap 3: het aanbrengen van het diëlektricum

De volgende fase omvat het aanbrengen van het diëlektricum. Dit zorgt enerzijds voor een elektrische isolatie tussen de concentrische elektroden onderling en anderzijds voor een elektrische isolatie tussen de elektroden en de geleidende macrolens. Het diëlektricum zorgt bijgevolg voor het ontstaan van een elektrisch veld, dat elektrobevochtiging mogelijk maakt. Figuur 3.5 toont een illustratieve weergave.



Figuur 3.5: Illustratieve weergave na aanbrengst van het diëlektricum.

De voedingsspanning vormt een belangrijk selectiecriterium voor het diëlektricummateriaal. De benodigde elektrische spanning voor elektrobevochtiging bestaat uit een wissel- of gelijkspanning. Om elektrobevochtiging algemeen toepasbaar te maken is een lage voedingsspanning noodzakelijk. De voorkeur gaat uit naar gelijkspanningen lager dan 230 V (lichtnet). Deze spanningen kunnen in elk gebouw op eenvoudige wijze bekomen worden via een transformator en gelijkrichter, dat zijn voordeel betekent voor verlichtingstoepassingen. Figuur 3.6 toont de materiaaleigenschappen, de productiemethode en de voedingsspanning voor de voornaamste diëlectricummaterialen [143–146].

Dielectrics	Parylene -N and -C	Teflon® AF 1600	Teflon (PTFE)	Cytop™	PDMS	Polyimide
Dielectric strength (kV/mm)	276 (-N) 268 (-C)	21	60	110	21.2	22
Dielectric constant	2.65 (-N) 3.15 (-C)	1.93	2.1	2.1	2.3–2.8	3.4
Applied voltage (V)	±240 (DC) <1 k (AC 50–20 kHz)	–	<300 (DC) <600 (AC 1 kHz)	120 (DC) <800 (AC 2 kHz)	±500 (DC)	<400 (DC)
Typical thickness (μm)	3.5–30	0.01–0.1	25–50	0.1–1	38	6–35
Contact angle of water (°)	126	120	114	110	120	50–80
Fabrication method	Chemical vapor deposition	Spin or dip coating	Commercial	Spin coating	Spin coating	Spin coating

Dielectrics	SiO_2	Si_3N_4	BST
Dielectric strength (kV/mm)	400–600	500	18–54
Dielectric constant	3.9	7.5	225–265
Applied voltage (V)	$V_{dc} \geq 25$	>40	$V_{dc} \geq 15$
Typical thickness	100 nm–1 μm	150 nm	70 nm
Contact angle of water (°)	46.7	30	40.8
Fabrication method	Thermal oxidation or PECVD	Chemical vapor deposition	MOCVD

Figuur 3.6: Overzicht van kritische materiaalparameters bij elektrobevochtiging voor diverse diëlectricummaterialen.

Uit figuur 3.6 wordt geconstateerd dat de grootte van de voedingsspanning voornamelijk bepaald wordt door de diëlektrische constante van het diëlektricummateriaal en de laagdikten van het diëlektricum en de hydrofobe laag. De diëlektrische constante van 225 - 265 voor bariumstrontiumtitanaat (BST) leidt zelfs tot een voedingsspanning van nagenoeg 15 V. Diëlektricummaterialen zoals SiO_2, Si_3N_4 en BST worden echter opgebracht via complexe en dure vacuüm- en plasmatechnieken, dat deze materialen voorlopig minder interessant maakt. Lagen van Teflon, Cytop, PDMS en PI kunnen daarentegen via relatief eenvoudige *solution processing*-technieken vervaardigd worden zoals dip-, spin- en ultrasoon spraycoating. De voedingsspanning voor deze materialen kan verlaagd worden door de laagdikte te verkleinen [147]. De invloed van de diëlektrische constante en de laagdikte op het voedingsspanningsbereik blijkt uit de formule van Lippmann-Young [147].

$$cos(\theta) = cos(\theta_0) + \frac{\varepsilon_0\ \varepsilon_1\ \varepsilon_2}{2(\varepsilon_1\ d_2\ +\ \varepsilon_2\ d_1)\ \gamma}\ V^2 \tag{3.1}$$

Met:

- θ: contacthoek na bekrachtiging [rad],
- θ_0: contacthoek zonder bekrachtiging [rad],
- ε_0: absolute permittiviteit van vacuüm [F/m],
- ε_1: relatieve permittiviteit van het diëlektricum [-],
- ε_2: relatieve permittiviteit van de hydrofobe laag [-],
- d_1: laagdikte van het diëlektricum [m],
- d_2: laagdikte van de hydrofobe laag [m],
- γ oppervlaktespanning tussen de druppel en het aangrenzende fluïdum [mN/m],
- V: aangelegde voedingsspanning [V].

Deze formule stelt dat om eenzelfde contacthoekvariatie bij een kleine spanningsvariatie te bekomen, de diëlektrische constanten groot dienen te zijn terwijl de laagdikten van het diëlektricum en de hydrofobe laag klein dienen te zijn.

De laagdikte van het diëlektricum bezit echter een ondergrens. Deze grens is afhankelijk van de doorslagvastheid van het materiaal om zo elektrische doorslag tussen de elektroden en de vloeibare lenzen te voorkomen. De doorslagspanning vormt daardoor eveneens een belangrijke parameter in de selectie van een geschikt diëlektricummateriaal. De doorslagspanning dient groter te zijn dan een bepaalde veiligheidslimiet om kortsluiting tussen de concentrische elektroden te vermijden.

Uiteindelijk wordt geopteerd voor PMMA als diëlektricummateriaal. PMMA is geschikt vanwege de hoge mate van transparantie, de mogelijkheid tot ultrasoon spraycoaten en de hoge diëlektrische constante. Die bevindt zich voor PMMA tussen 2,8 en 4 bij een frequentie van 1 kHz [148]. Daarnaast bezit PMMA een doorslagspanning van 30 kV/mm, in vergelijking met 110 kV/mm voor zijn grootste concurrent: Cytop [149]. Cytop kan tevens opgebracht worden

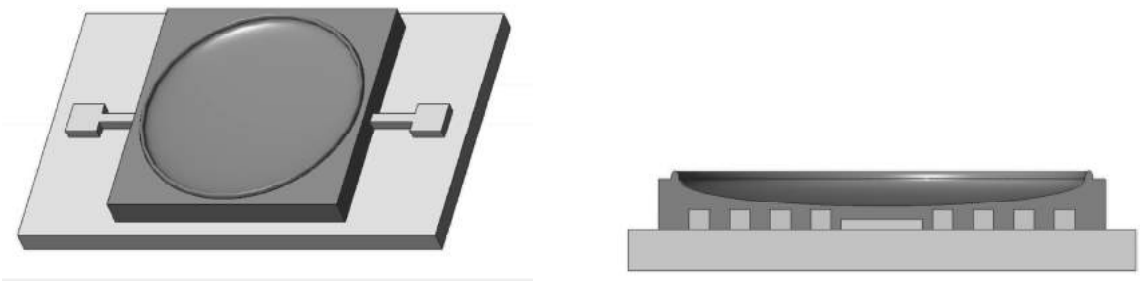
via ultrasoon spraycoaten, maar is in het nadeel gesteld doordat deze stof 'exotische' en sterke solventen vereist om te etsen. Het belang van een goede etsbaarheid wordt in paragraaf 3.2 behandeld.

De PMMA-laag wordt door middel van ultrasoon spraycoaten op het substraat afgezet. Hiervoor wordt een inkt bereid uit een oplossing van polymethylmethacrylaat (PMMA) in aceton. In [138] In [138] worden de spraycoatparameters van een PMMA-acetonoplossing onderzocht en aangereikt.

De morfologie, de laagdikte en de ruwheid van het diëlektricum worden gevalideerd aan de hand van licht- en/of atoomkrachtmicroscopie en profilometrie. Hiervoor worden respectievelijk de volgende toestellen aangewend: Zeiss Axiovert 40 MAT, AFM Bruker Multimode 8 en Dektak XT.

Stap 4: het etsen van de macrokrater in het diëlektricum

Vervolgens wordt een macrokrater aangebracht in de PMMA-laag. Figuur 3.7 beeldt een driedimensionale weergave en een doorsnede af.



Figuur 3.7: Het etsen van de macrokrater: 3D-weergave (links), doorsnede (rechts).

De kratervorm wordt tot stand gebracht via *inkjet etching*. Met behulp van de inkjetprinter worden solventdruppels op de diëlektricumlaag achtergelaten. In deze solventdruppels lost het diëlektricummateriaal op, waarna door het koffieringeffect het opgeloste materiaal ter hoogte van de randen wordt afgezet. Inkjet etching werd eerder al toegepast voor de productie van microstructuren en -kanalen [7,136]. De solventen: methoxybenzeen (anisol) en/of isopropanol worden hiervoor aangewend. Beide stoffen zijn veilig te gebruiken in het labo en reageren niet met het kunststof waaruit de cartridges zijn opgebouwd [133]. In deze macrokrater wordt in de volgende fasen de macrolens aangebracht.

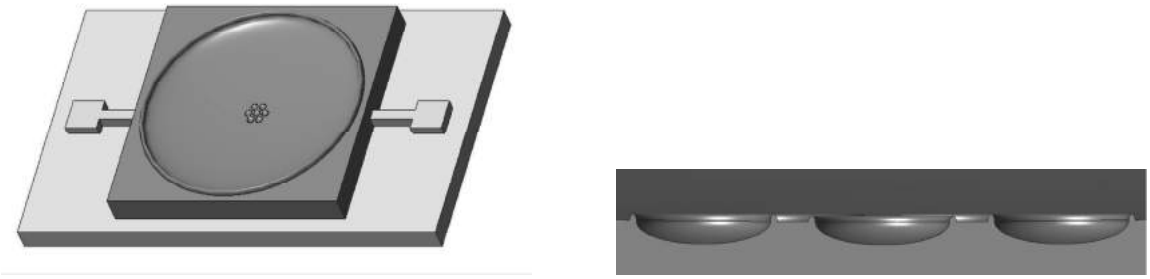
De schaalvorm en de opstaande rand zijn bijgevolg te wijten aan het koffieringeffect. Deze krater en rand verhinderen wederom dat de vloeibare lens wegdrift van de optische as, dat eigen is aan elektrobevochtiging. Deze methode behoort tot de eerder aangehaalde mechanische centreermechanismen [141]. Een tweede aspect dat decentrering van de lens verhinderd, is het variërend elektrische veld. Omwille van de kratervorm varieert de dikte van het diëlektricum alsook de afstand van de lens tot de elektroden. Daardoor is het elektrische veld in het centrum het sterkst met in de radiale richting van de concave kratervorm een verzwakking [140]. De vloeibare lens wordt zo tot het centrum van de krater aangetrokken. Deze techniek behoort tot de centreermechanismen op basis van oppervlakte-effecten [141].

Tot slot hebben macrolenzen, in tegenstelling tot microlenzen, de nadelige eigenschap dat deze nauwkeurig gealigneerd dienen te worden boven de lichtbron [18]. Dit maakt een nauwkeurige positionering van de macrokrater boven de OLED-pixel noodzakelijk. De beschikbare inkjet-printer: Dimatix Fujifilm DMP-2850 bezit een maximale printresolutie van 5 µm met een repeteerbaarheid van 25 µm. De lineaire geleidingen daarentegen worden gekenmerkt door een resolutie van 1 µm [133]. Bijkomend is de printkop uitgerust met een camera, dat een nauwkeurige positionering van de printopdracht toelaat.

De morfologie van de kraters in het diëlektricum worden gevalideerd aan de hand van licht- en/of atoomkrachtmicroscopie en profilometrie. Hiervoor worden respectievelijk de volgende toestellen aangewend: Zeiss Axiovert 40 MAT, AFM Bruker Multimode 8 en Dektak XT.

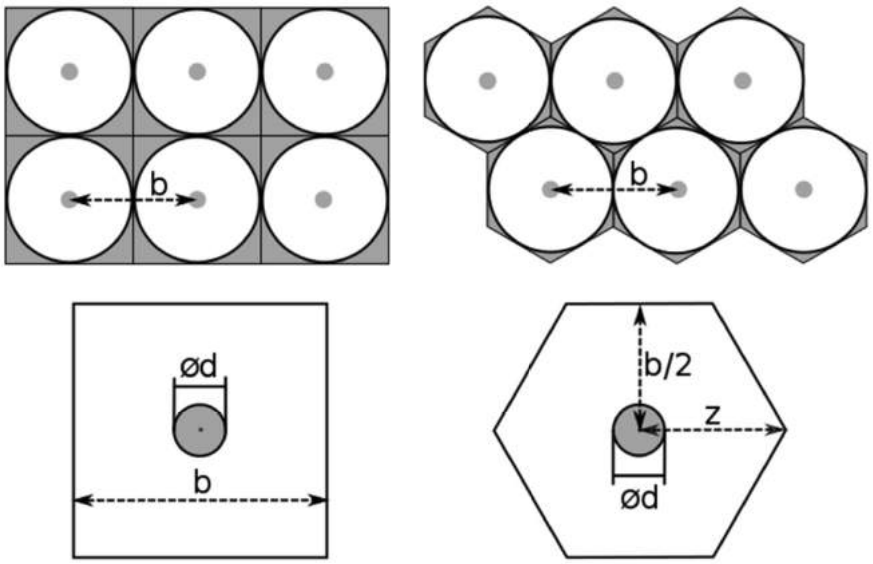
Stap 5: het etsen van de microkraters in het diëlektricum

Analoog aan de voorgaande fase gebeurt het etsen van de microkraters. Die worden in het centrum van de macrokrater voorzien. In stap 7 en 8 worden de micro- en macrokraters finaal opgevuld met respectievelijk de micro- en macrolenzen. Figuur 3.8 toont het CAD-model behorende bij productiestap 5.



Figuur 3.8: Het etsen van de microkraters: 3D-weergave (links), doorsnede (rechts).

Een belangrijke parameter in het lensontwerp is de *fill factor* (FF). Dit wordt gedefinieerd als de procentuele verhouding van de benutte oppervlakte door lenzen tot de totale ingenomen oppervlakte. Deze parameter dient zo dicht mogelijk bij 100 % gelegen te zijn voor de maximale lichtopbrengst [65]. Het patroon waarin de microkraters en -lenzen worden aangebracht, bepaalt de waarde van de fill factor. Figuur 3.9 geeft een vierkanten en hexagonale verdeling van lenzen weer [1].



Figuur 3.9: Vierkanten (links) en hexagonale (rechts) randschikking van OLED-pixels en macrolenzen.

De fill factoren voor deze patronen wordt als volgt bepaald [1]:

$$FF_{vierkant} = \frac{\pi\,(\frac{b}{2})^2}{b^2} \tag{3.2}$$

$$FF_{zeshoek} = \frac{\pi\,(\frac{b}{2})^2}{\frac{3}{2}\sqrt{3}\,z^2} \tag{3.3}$$

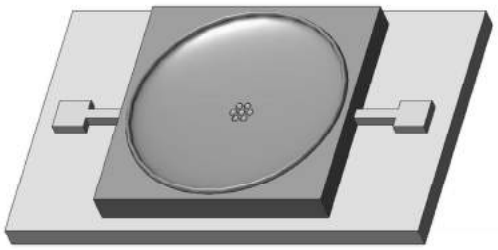
De maximaal haalbare fill factor voor cirkelvormige lenzen in een vierkanten verdeling bedraagt 78,5 %. Voor een hexagonaal patroon is deze waarde gelijk aan 90,6 % [109]. Om een fill factor van 100 % te verwezenlijken dienen niet-cirkelvormige lenzen aangewend te worden. Enkele voorbeelden van mogelijke lensvormen zijn: zeshoeken [150], driehoeken [151,152] en ellipsen [134]. In dit lensontwerp wordt geopteerd voor een hexagonale verdeling van cirkelvormige microlenzen.

Tot slot bepaalt de diameter van een krater die van de bijhorende lens. In de literatuur wordt een verhouding van microlensdiameter tot OLED-diameter van 0,1 of kleiner aangeraden [18].

De morfologie van de kraters in het diëlektricum en de fill factor van de lens array worden gevalideerd aan de hand van licht- en/of atoomkrachtmicroscopie en profilometrie. Hiervoor worden respectievelijk de volgende toestellen aangewend: Zeiss Axiovert 40 MAT, AFM Bruker Multimode 8 en Dektak XT.

Stap 6: het aanbrengen van de hydrofobe laag

Nadien wordt over het diëlektricum een hydrofobe laag aangebracht met behulp van ultrasoon spraycoaten. Figuur 3.10 toont een illustratieve weergave.



Figuur 3.10: Illustratieve weergave na het aanbrengen van de hydrofobe laag.

Deze laag vergroot de contacthoek van de lenzen met een stijging van de OCE tot gevolg. De optimale OCE wordt bekomen bij een contacthoek van 90° [18]. Tabel 3.1 geeft de contacthoek van water en de brekingsindex weer van enkele frequent aangewende coatings.

Tabel 3.1: De contacthoek en brekingindex voor frequent aangewende hydrofobe coatings.

Stofnaam	Contacthoek (Water)	Brekingsindex
Cytop	110°	1,34
PTFE	109,2°	1,35
FOTS	114°	1,35
PDMS	107,2°	1,41
PMMA	70,9°	1,49

Voor dit lensontwerp worden Cytop of PDMS aangewend. Beide bezitten nagenoeg dezelfde contacthoek en de brekingsindex is kleiner dan die van PMMA. Hierdoor wordt totale interne reflectie tussen het diëlektricum en de hydrofobe coating vermeden.

Choonee et al. [153] onderzochten het spraycoaten van PDMS en maakten hiervoor gebruik van een *air brush*-systeem met een roterende tafel om zo van een uniforme coating te verkrijgen. PDMS wordt geleverd met een *base* en *curing agent*. Omwille van de hoge viscositeit (3500 cP) dient PDMS bijkomend opgelost te worden in een solvent. Hiervoor worden speciaal ontwikkelde solventen (Dow Corning 200 Fluid 20 cSt) of n-hexaan aangewend. N-hexaan geniet de voorkeur, daar de coating op basis van dit solvent eveneens een goede dekking bij 3D-microstructuren vertoont. Dat beidt voordelen bij het ultrasoon spraycoaten van de micro- en macrokraters. Daarnaast blijven de langere molecuulketens bij het gebruik van n-hexaan behouden. Een goede ventilatie en persoonlijke beschermingsmiddelen zijn voor het spraycoaten van n-hexaan noodzakelijk. Na samenvoeging van de drie voorgenoemde stoffen en het aanbrengen van de PDMS-laag, wordt deze uitgehard onder invloed van een warmtebehandeling.

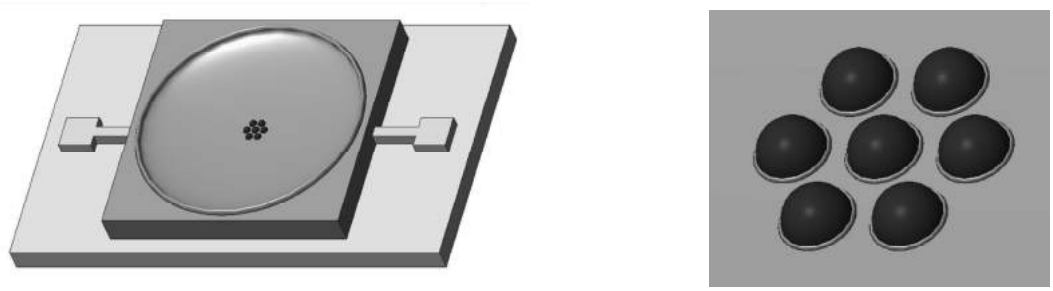
Een alternatief voor PDMS vormt Cytop. Ook Cytop kan ultrasoon gespraycoat worden en wordt geleverd met een *base* en *curing agent*. Cytop vereist verder geen verdunning ter verlaging van de viscositeit. Nadien leidt tevens een warmtebehandeling tot het uitharden van de

hydrofobe laag. Cytop bezit het voordeel van een hoge doorslagspanning, namelijk 110 kV/mm. Hierdoor kan de laagdikte van het diëlektricum en de hydrofobe laag gereduceerd worden, dat zich vertaalt in een verlaagde voedingsspanning.

De morfologie, de laagdikte en de ruwheid van de hydrofobe laag worden gevalideerd aan de hand van licht- en/of atoomkrachtmicroscopie en profilometrie. Hiervoor worden respectievelijk de volgende toestellen aangewend: Zeiss Axiovert 40 MAT, AFM Bruker Multimode 8 en Dektak XT. De hydrofobiciteit van de laag wordt gekarakteriseerd met behulp van de contacthoekmeter OCA van Dataphysics.

Stap 7: het plaatsen van de microlenzen

Vervolgens worden de microlenzen in de microkraters voorzien. Figuur 3.11 geeft een driedimensionale weergave.



Figuur 3.11: Het plaatsen van de microlenzen: 3D-weergave (links), detailzicht (rechts).

Microlenzen vertonen de positieve eigenschap dat deze het stralingspatroon van de onderliggende lichtbron niet wijzigen. Het Lambertiaanse stralingspatroon van de intrinsieke OLED blijft bijgevolg door de microlenzen behouden [18]. De functie van deze microlenzen worden in paragraaf 3.2 geduid.

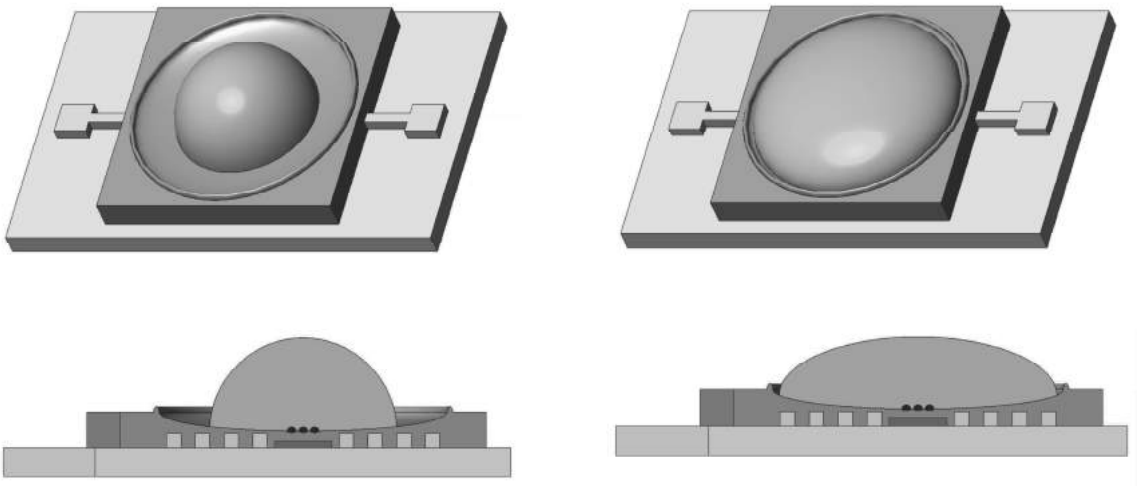
Het vullen van de microkraters gebeurt door middel van inkjetprinten. De sterk hydrofobe laag in combinatie met de kratervorm loodsen de afgevuurde druppeltjes naar de correcte positie. Een afwijkende druppel vloeit daardoor altijd naar het centrum van zijn microkrater. Daarnaast voorkomen de microkraters het clusteren van de vloeibare lenzen met naburige lenzen.

De fabrikant van de inkjetprinter raadt een inktviscositeit tussen 2 cP en 30 cP aan voor een optimaal printgedrag [133]. Daarnaast voor een maximale lichtopbrengst de brekingsindex van de microlenzen gelijk te zijn aan deze van het substraat. Een te hoge waarde doet de totale interne reflectie aan de lens-luchtinterface toenemen. Een te lage waarde verhoogt daarentegen de totale interne reflectie aan de substraat-lensinterface [18].

Bijgevolg wordt NOA als lensvloeistof geselecteerd. De producent Norland beschikt over meer dan 50 verschillende lensvloeistoffen, toegespitst op optische toepassingen. Deze verschillen van elkaar op het gebied van viscositeit, substraattype en brekingsindex. Afhankelijk van het type, hard de vloeistof uit onder invloed van UV-licht of zichtbaar licht. Meer bepaald gaat de keuze uit naar NOA 74. Dit materiaal bezit een brekingsindex van 1,52 en een viscositeit van 80 cP - 95 cP bij 25 °C [154]. De viscositeit van NOA 74 kan eventueel verlaagd worden door het op te lossen in anisol voor een beter printgedrag. Nadien harden de microlenzen uit onder invloed van UV-licht.

Stap 8: het plaatsen van de macrolens

Daarna wordt de macrolens, over de microlenzen, in de macrokrater aangebracht. Deze macrolens staat in voor het verhogen van de OCE van de OLED en voor het collimeren van het uitgestraalde licht binnen een bepaalde hoek. Figuur 3.12 toont de driedimensionale weergaven en doorsneden van het lensontwerp.

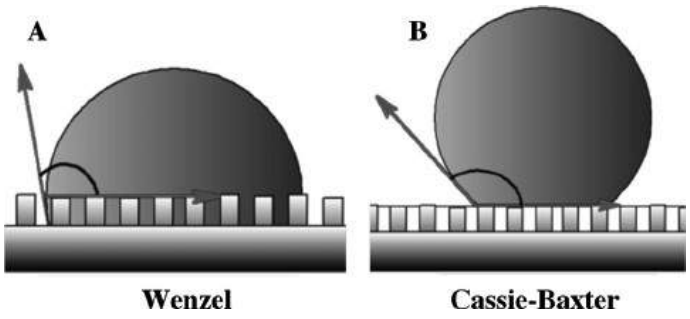


Figuur 3.12: 3D-waargaven en doorsneden van het lensontwerp: spanningsloos (links), bekrachtigd (rechts).

Wederom wordt inkjetprinten voor het vullen van de krater ingezet. De hydrofobiciteit van de onderliggende laag en de kratervorm zorgen ook hier voor de correcte positionering van de lensvloeistof.

De lensvloeistof dient te bestaan uit een elektrolyt. Theoretisch is zoutwater geschikt. Toch wordt geopteerd voor efficiëntere vloeistoffen die commercieel beschikbaar zijn. Deze stoffen zijn geoptimaliseerd voor optische toepassingen en elektrobevochtiging. Er wordt daarom een mengsel van water en glycerol aangewend [155].

Het vierde en laatste mechanisme dat het wegdriften van de macrolens voorkomt, heeft betrekking op de interactie tussen de macro- en microlenzen. Na het printen van een macrolens bovenop een microlensmatrix blijft er initieel lucht gevangen onder de macrolens. Deze luchtzakken in combinatie met de vorm van de microlenzen vergroten de contacthoek en bijgevolg de hydrofobiciteit. Dit stadium wordt het Cassie-Baxterstadium genoemd, dat in figuur 2.7 wordt afgebeeld.



Figuur 3.13: Wenzel- en Cassie-Baxterstadia.

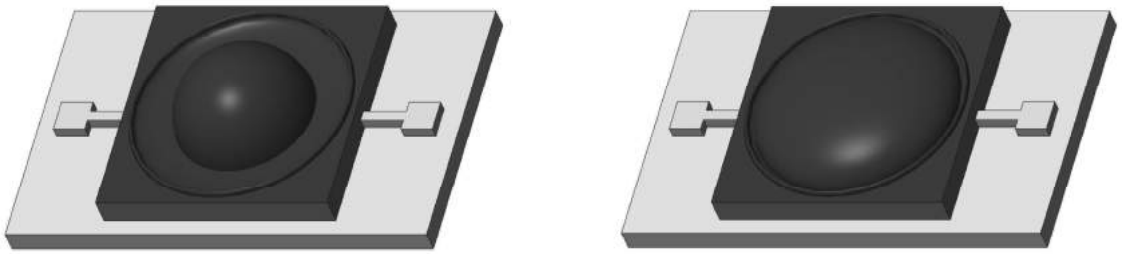
Im et al. [156, 157] stelde vast dat indien dit experiment wordt uitgevoerd in combinatie met elektrobevochtiging, een nieuw verschijnsel optreedt boven een kritische spanningswaarde (250 V). De luchtzakken verdwijnen namelijk, waardoor de druppel overgaat naar het Wenzelstadium. De contacthoek daalt in geringe mate, in tegenstelling tot de adhesie die aanzienlijk toeneemt. Daarnaast werd geconstateerd dat bij een microlensmatrix over de volledige druppeloppervlakte, de elektrobevochtiging verloren ging na de overgang naar het Wenzelstadium.

Experimenten moeten uitwijzen of een lokale microlensmatrix in het centrum van de druppel dezelfde uitwerking vertoont. Mogelijk blijft de elektrobevochtiging bij deze configuratie bestaan met een verhoogde adhesie en hydrofobiciteit in het centrum van de macrokrater tot gevolg.

De contacthoekmetingen van de macrolenzen geschieden met behulp van de contacthoekmeter: OCA van Dataphysics.

Stap 9: het afdichten van de macrolens

Tot slot wordt de vloeibare macrolens van zijn omgeving afgesloten door middel van een flexibel en rekbaar membraan. Figuur 3.14 toont een illustratieve weergave.



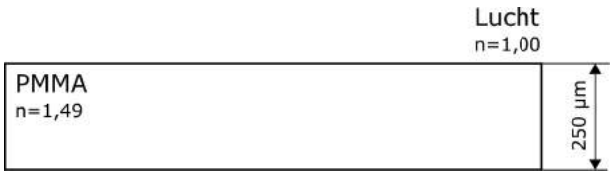
Figuur 3.14: Illustratieve weergave na het aanbrengen van de flexibele en rekbare afdichting.

Het flexibele en rekbare membraam laat toe dat de vloeibare lens zich samen met zijn afdichting aanpast aan een wijzigende grootte en vorm. De afscherming bestaat uit paryleen C en wordt door middel van *chemical vapor deposition* (CVD) aangebracht [158].

3.3 Lensmatrixfolie

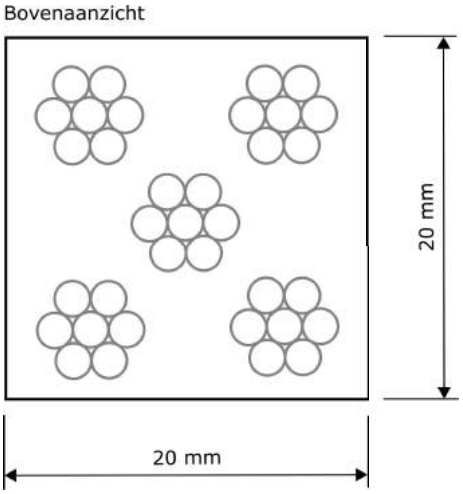
Het tweede ontwerp bestaat uit een flexibele folie waarop solide macrolenzen worden aangebracht. Deze folie wordt vervolgens op een gepixelde OLED bevestigd ter optimalisatie van de efficiëntie en het stralingspatroon. Een overzicht en bespreking van de resultaten kan onder hoofdstuk 4 teruggevonden worden.

Allereerst wordt een PMMA-folie op maat gesneden. In de onderzoeksfase volstaan substraten met de volgende afmetingen: 20 x 20 mm^2. Deze PMMA-folie bezit overigens een dikte van 250 µm, figuur 3.15.



Figuur 3.15: Illustratieve weergave van de eerste productiefase.

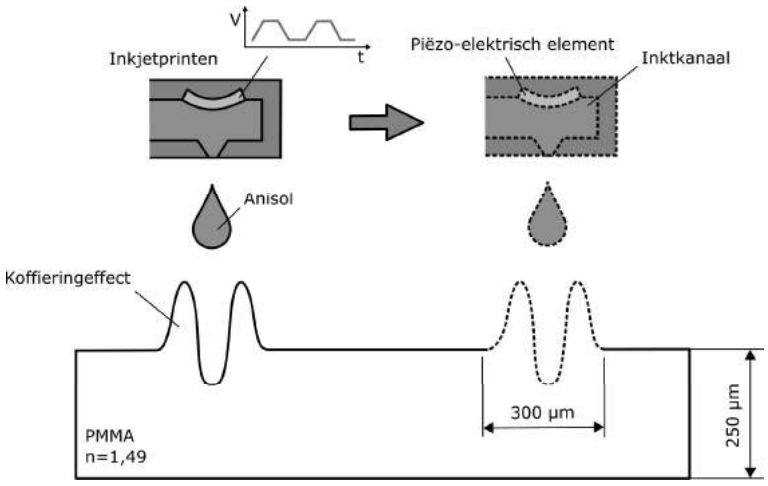
Vervolgens wordt op deze folie een hexagonale rangschikking van ringvormige patronen geprint. De gehanteerde inkjetprinter is de DMP-2850 van de fabrikant Fujifilm Dimatix met de DMC-11610 inktpatronen. Figuur 3.16 toont het printpatroon.



Figuur 3.16: Illustratieve weergave van het printpatroon.

Hiervoor wordt het inktpatroon met anisol gevuld. Anisol is een solvent van PMMA en geschikt voor het gebruik in de inktpatronen [133]. Omwille van de sterke indringende geur van deze stof wordt een goede ventilatie aangeraden.

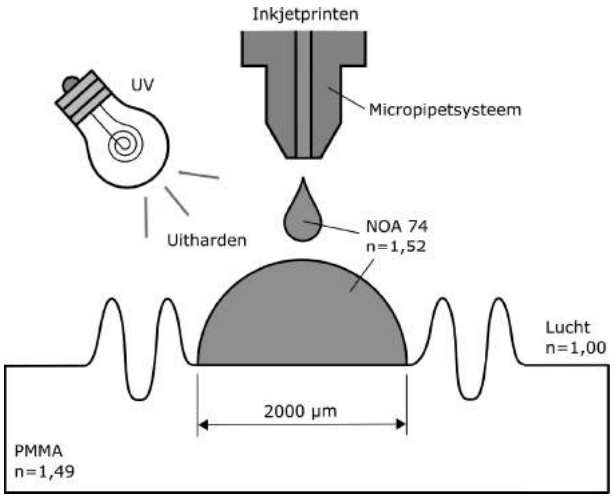
Het geprinte anisolpatroon lost vervolgens het PMMA uit de folie op. Dit is een subtractief proces en wordt inkjetetsen genoemd. Ten gevolge van het koffieringeffect ontstaat een stroming in het vloeibare anisol dat het PMMA van het centrum naar de randen afvoert. Hierdoor wordt een diep dal in het midden gevormd met aan weerszijden opstaande randen. Dit wordt weergegeven in figuur 3.17.



Figuur 3.17: Illustratieve weergave van de tweede productiefase.

Na het verdampen van het solvent wordt een solide omringende gracht in de PMMA-folie overgehouden. Deze microstructuur doet dienst als bassin of reservoir, dat het samenvloeien van de vloeibare lenzen bij het aanbrengen op het substraat voorkomt. Daarnaast kunnen de lenzen dichtbij elkaar gepositioneerd worden, dat leidt tot hoge fill factoren en een betere efficiëntieverhoging [85]. Op basis van de contacthoek van de lens en het druppelvolume kan de reservoirdiameter berekend worden. De contacthoek wordt bepaald met behulp van de contacthoekmeter OCA van Dataphysics.

Deze lensreservoirs worden vervolgens opgevuld met lensvloeistof. Hiervoor wordt tevens gebruik gemaakt van de inkjetprinter. Mogelijke alternatieven zijn het depositiesysteem van de contacthoekmeter of een micropipet. De lensvloeistof bestaat uit NOA 74, een optische adhesief dat uithardt onder invloed van UV-licht. Het uitharden geschiedt met een laagvermogen black-light, waarna de lensmatrixfolie bekomen wordt, figuur 3.18.



Figuur 3.18: Illustratieve weergave van de laatste productiefase.

Het valideren geschiedt nadien door deze lensmatrix aan te brengen op een gepixelde OLED. Hiertussen dient een optische adhesief aangebracht te worden om totale interne reflectie aan de overgang te vermijden. Wederom is NOA 74 voor deze taak geschikt. De uiteindelijke lichtkarakterisatie wordt bekomen door middel van een integrerende sfeer.

Hoofdstuk 4

Onderzoeksresultaten

4.1 Aanbrengen van een basisfilm

Paragraaf 3.3 bespreekt het praktisch gerealiseerde lensontwerp. Hierbij bestaat het substraat uit een PMMA-folie van Evonik met een dikte van 250 µm. Alvorens tot deze oplossing gekomen werd, werden verscheidene andere opties nader onderzocht. Deze worden in de volgende paragrafen behandeld.

De PMMA-film dient algemeen aan de volgende twee voorwaarden te voldoen. Ten eerste dient de laag voldoende dik te zijn om nadien inkjetetsen mogelijk te maken zonder een volledig doorlopen gat in de film te creëren. Op basis van de literatuur [7, 159] en rekening houdend met een veilige overmaat wordt de minimaal benodigde laagdikte op 20 µm geschat. Ten tweede dient de oppervlakteruwheid kleiner dan 5 nm te zijn voor optische toepassingen. Een te hoge ruwheid leidt tot verstrooiingseffecten van het uitgestraalde licht door de OLED.

4.1.1 Reinigingsprocedure voor substraten

Voor aanvang van elk experiment dienen de substraten van hun verontreinigingen ontdaan te worden via een uitgebreide reinigingsprocedure.

Ten eerste worden de substraten in een speciaal ontworpen houder geplaatst en vervolgens met deze houder in een glazen beker gezet. Deze beker wordt de eerste maal gevuld met een zeepoplossing. Nadien wordt deze beker in een ultrasoon reinigingsbad geplaatst die gevuld is met gedeïoniseerd water. Dit reinigingsbad, Brandson 2510 Ultrasonic Cleaner, wekt ultrasone geluidsgolven (20 kHz-400 kHz) op waardoor kleine vacuümbelletjes in de vloeistof ontstaan. Deze belletjes imploderen ter hoogte van het substraatoppervlak waardoor hoge krachten uitgeoefend worden op de verontreinigingen die zo van het substraat loskomen. Dit proces wordt cavitatie genoemd [160]. Na 15 minuten wordt de ultrasone reiniging gestopt en worden de substraten uit hun houder gehaald. De substraten worden finaal nagespoeld met dezelfde vloeistof uit de beker, dat ditmaal uit een zeepoplossing bestaat. Tot slot worden de substraten gedroogd door middel van stikstof onder hoge druk.

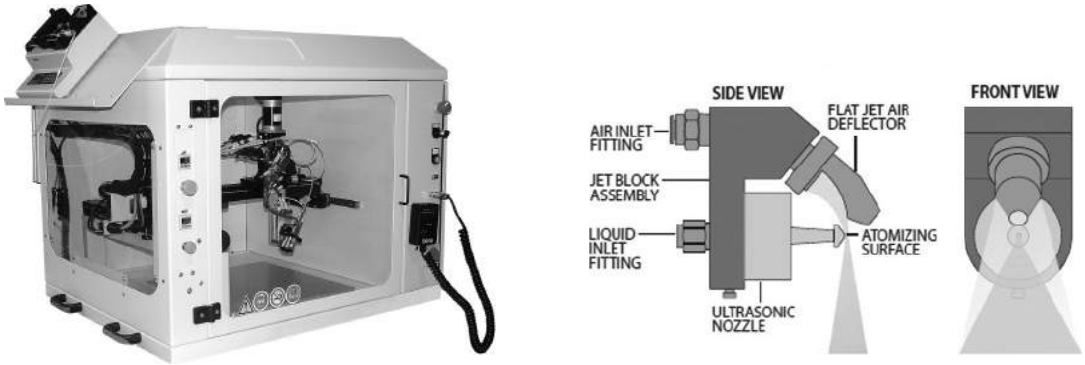
Bij de voorgaande reinigingsfase wordt een zeepoplossing voor het reinigen aangewend. Deze procedure wordt nadien verscheidene malen herhaald met andere reinigingsmiddelen. De totale procedure omvat:

- 15 minuten in een waterige zeepoplossing;
- 30 minuten in gedeïoniseerd water;
- 15 minuten in aceton;
- 15 minuten in isopropanol.

Afhankelijk van het substraatmateriaal en zijn chemische resistentie dienen enkele reinigingsfasen overgeslagen te worden, zo niet wordt het substraat mogelijk aangetast door het reinigingsmiddel.

4.1.2 Ultrasoon spraycoaten

Allereerst wordt nagegaan of ultrasoon spraycoaten geschikt is voor het aanbrengen van een PMMA-film op glazen substraten. De ultrasone spraycoater die hiervoor wordt aangewend is het ExactaCoat Ultrasonic Coating System [2] van Sono-Tek met het *impact edge*-mondstuk [3], figuur 4.1.



Figuur 4.1: Het ExactaCoat Ultrasonic Coating System (links) en het impact edge-mondstuk (rechts).

De gebruikte inkten bestaan uit een oplossing van PMMA in aceton. De onderzochte concentraties zijn: 0,5; 1,2; 2 (m%). Het PMMA wordt in poedervorm geleverd door Sigma-Aldrich en nauwkeurig afgewogen door middel van een analytische balans. Het aceton wordt daarentegen met een maatcilinder gemeten.

Op basis van de inktconcentraties worden op voorhand enkele vaststellingen gedaan. De dichtheid en viscositeit van de inkt vormen belangrijke vloeistofparameters in het ultrasone spraycoatproces. Het aandeel van de vaste stof in de oplossing bepaalt de verdampingssnelheid gedurende de verneveling. Een inkt met een hogere massapercentage bezit een hogere dichtheid en zal bijgevolg sneller verdampen daar minder solvent in een druppel aanwezig is. Deze inkten vereisen daardoor een kleinere afstand tussen het substraat en het spuitmondstuk om zo een laag tussen het droge en natte regime af te zetten. Daarnaast is een lage viscositeit gewenst voor een goede verneveling van de inkt. Een grote viscositeit heeft een verhoogde druppelgrootte en daardoor

nattere lagen tot gevolg. Ook dient hierdoor het signaalvermogen opgedreven te worden. De dynamische viscositeit van de inkt met een concentratie van 2 m% wordt berekend op 0,44 cP [138]. De viscositeit van water bedraagt 1 cP ter vergelijking. Bijgevolg kan gesproken worden van goed vernevelbare inkten.

De substraten bestaan tot slot uit glazen objectglazen voor microscopen, die op maat gesneden worden (20 x 20 mm^2). Om de oppervlaktespanning te verlagen en zo een beter vloeigedrag van de inkt te verkrijgen, kunnen de substraten aan een UV-ozon- of coronabehandeling onderworpen worden.

Tabel 4.1 toont de ingestelde spraycoatparameters en de verkregen resultaten voor een beknopt aantal metingen. Een uitgebreidere resultatentabel, tabellen 5.1 en 5.2, wordt in bijlage teruggevonden. Deze resultaten werden verkregen van [161].

Tabel 4.1: De laagdikte en ruwheid bij diverse ultrasonespraycoatparameters.

Sample	C	V	v	f	P	$p_{drijfgas}$	# lagen	T	H	L	R_a
-	m%	ml/min	mm/s	kHz	W	psi	-	°C	mm	nm	nm
5	0,5	1,0	10	120	2,0	2,0	20	30	65 (0)	684,35	183,78
6	0,5	1,0	10	120	1,5	2,0	20	30	65 (0)	803,22	220,95
7	0,5	1,0	10	120	1,2	2,0	20	30	65 (0)	741,86	255,09
8	0,5	1,0	10	120	1,0	2,0	20	30	65 (0)	650,97	190,18
9	0,5	1,0	10	120	0,8	2,0	20	30	65 (0)	535,51	198,24
10	0,5	1,0	10	120	0,8	2,5	20	30	65 (0)	976,04	300,75
11	2,0	2,0	10	120	1,3	2,5	20	30	70 (5)	8210,29	1295,33
12	2,0	1,5	10	120	1,3	2,0	20	30	70 (5)	4446,88	940,17
13	2,0	1,0	10	120	1,3	2,0	20	30	70 (5)	2395,10	488,92
14	2,0	1,5	10	120	1,0	2,0	20	30	70 (5)	4316,33	830,30
15	2,0	1,5	10	120	1,6	2,0	20	30	70 (5)	4522,66	870,19
16	2,0	1,0	10	120	1,0	2,0	20	30	70 (5)	1867,01	486,17
17	2,0	1,0	10	120	1,6	2,0	20	30	70 (5)	2160,39	607,47
18	2,0	1,5	10	120	1,3	2,5	20	30	70 (5)	2012,19	659,12
19	2,0	1,5	10	120	1,3	3,0	20	30	70 (5)	6108,94	911,39
20	2,0	2,0	10	120	1,3	3,0	20	30	70 (5)	9216,92	839,23

Tabel 4.1 bevat de volgende grootheden:

- Sample [-]: het nummer van het substraat,
- C [m%]: de concentratie van PMMA in aceton,
- V [ml/min]: het volumedebiet,
- v [mm/s]: de voortplantingssnelheid van het mondstuk,
- f [kHz]: de trilfrequentie van de piëzo-elektrische elementen,
- P [W]: het signaalvermogen,
- $p_{drijfgas}$: de druk van het drijfgas,
- # lagen [-]: het aantal spraylagen,
- T [°C]: de basisplaattemperatuur,
- H [mm]: de sprayhoogte,
- L [nm]: de laagdikte,
- R_a [nm]: de oppervlakteruwheid (R_a).

In tabellen 5.1 en 5.2 worden de inktconcentratie, het volumedebiet, de voortplantingssnelheid van het mondstuk, het signaalvermogen, de drijfgasdruk, het aantal lagen en de sprayhoogte gevarieerd en de bijhorende ruwheidswaarde en laagdikte bepaald. Beide grootheden worden bekomen via profilometrie. De aanwezige profilometer in het IMO-IMOMEC is de Dektak XT. Dit toestel kende de volgende instellingen, tabel 4.2:

Tabel 4.2: De instellingen van de Dektak XT.

Parameter	Waarde
Profile	Hills And Valleys
Scan Duration	20 s
Scan Lenght	2000 µm
Scan Resolution	0.333 µm
Scan Type	Standard Scan
Stylus Force	3 mg
Stylus Scan Range	65.5 µm
Stylus Type Radius	2 µm

Uit tabel 4.1 volgt dat de oppervlakteruwheid voor de ultrasoon gespraycoatte PMMA-laag in het grootteordebereik van enkele honderden nanometers ligt. Dit is onbruikbaar voor optische toepassingen. Deze ruwheden kunnen mogelijk verlaagd worden door het toepassen een nabehandeling.

Een eerste methode bestaat uit een warmtebehandeling, waarbij de gespraycoatte substraten in een voorverwarmde oven op 100 °C worden gebracht. Na 15 minuten worden de substraten uit de oven gehaald en aan de lucht afgekoeld. Bollen en Klingels [138] constateerden de grootste reductie van de oppervlakteruwheid voor PMMA-lagen die met hoge volumedebieten worden opgebracht. De oorzaak hiervoor ligt in het feit dat dergelijke lagen gekenmerkt wordt door een grote laagdikte en bijgevolg ook een groot opgebracht PMMA-volume. Dit laat toe om sterk uit te vloeien onder invloed van de thermische behandeling, waardoor de ruwheid significant daalt.

Een tweede mogelijke nabehandeling vormt het blootstellen van de PMMA-lagen aan solventdampen. Deze techniek heeft tot doel om de gedroogde PMMA-laag op het substraat lokaal opnieuw op te lossen en zo het uitvloeien van de ruwheidspieken te stimuleren. Hiervoor worden de substraten in een beker met aceton geplaatst, zodanig dat de substraten geen contact maken met de vloeistof. De beker wordt nadien afgesloten door middel van een paraffine afdichtingsfilm. Na 3 minuten wordt de nabehandeling gestopt. Bollen en Klingels [138] stelden geen significante reducties in de oppervlakteruwheid vast. Het effect lijkt verwaarloosbaar. Indien overigens de substraten langer dan 5 minuten worden blootgesteld aan de acetondampen, dreigt de volledige laag op te lossen en van het substraat te vloeien.

Tabel 4.1 toont daarentegen dat de laagdikten zich bevinden in het micrometerbereik met maximale waarden van 8.21 µm en 9.22 µm voor respectievelijk meting 11 en 20. Indien het aantal lagen verhoogd wordt naar 40, wordt verwacht om de vooropgestelde laagdikte van 20 µm te behalen. Een te hoog aantal lagen of sprayovergangen is tevens ongewenst. Dit verhoogt de productietijd, waardoor deze techniek op industrieel vlak minder interessant dreigt te worden.

4.1.3 Spincoaten

Een andere mogelijk om de oppervlakteruwheid van de PMMA-laag te verlagen bestaat uit het overstappen naar een andere depositietechniek. Er wordt geopteerd voor spincoaten. In het IMO-IMOMEC staat de volgende spincoater ter beschikking: WS-400BX-6NPP/LITE, figuur 4.2 [129].



Figuur 4.2: De WS-400BX-6NPP/LITE-spincoater.

Wederom bestaan de substraten uit glazen objectglazen voor microscopen, die op maat gesneden worden (20 x 20 mm^2). Ook hierbij kan de oppervlaktespanning verlaagd worden door middel van een UV-ozon- of coronabehandeling.

De concentratie van de onderzochte PMMA-acetonoplossing bedraagt 2 m%. Deze oplossing wordt bij stilstand van de spincoater op de substraten aangebracht met behulp van een glazen wegwerpbare pipet met een gummi peer. Bij dit pipettype is het opgezogen inktvolume afhankelijk van de drukkracht op de peer. Het nauwkeurig controleren van het inktvolume is bij deze pipet bijgevolg uitgesloten. Hierdoor is het vloeistofvolume mogelijk variabel voor ieder substraat. Het opgebrachte volume heeft bij het spincoaten echter een verwaarloosbare invloed, daar het merendeel gedurende de eerste fase van het spincoatproces van het substraat slingert.

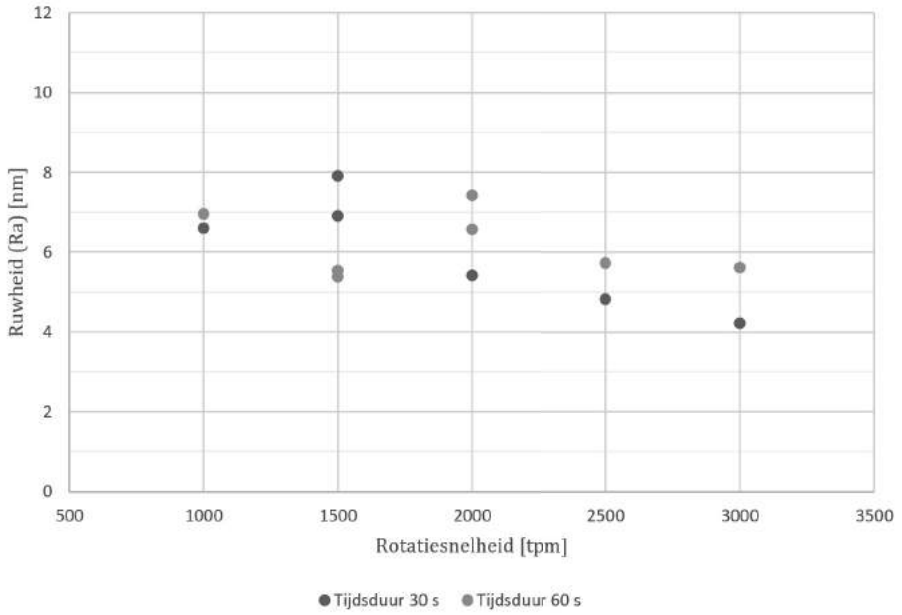
Tabel 4.3 toont de bekomen ruwheden en laagdikten voor diverse instellingen van de spincoater. De tijdsduur en de rotatiesnelheid worden hierbij variabel ingesteld.

Ditmaal worden de oppervlakteruwheden en de laagdikten wederom bekomen via profilometrie met de Dektak XT. Dit toestel kende dezelfde instellingen als getoond in tabel 4.2.

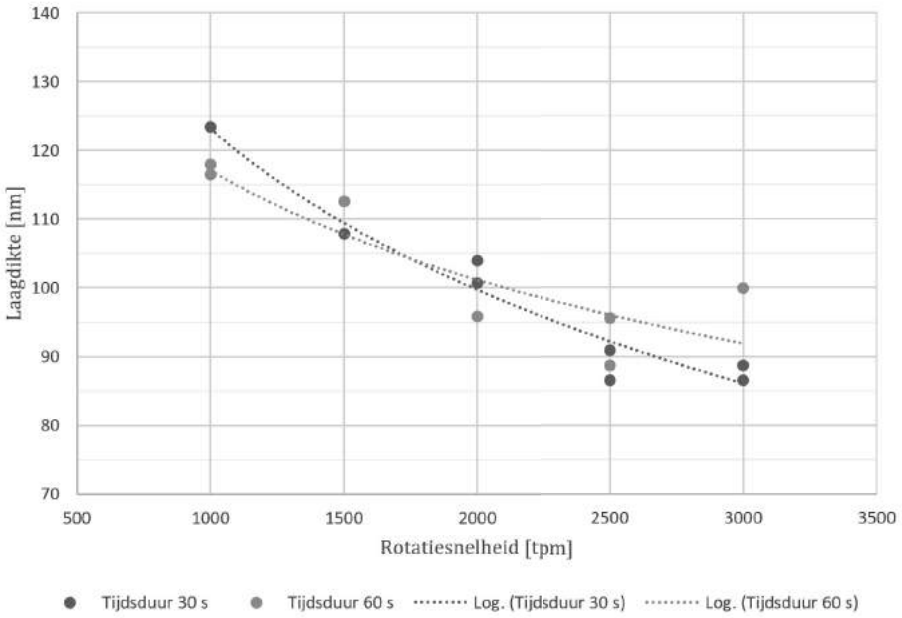
Tabel 4.3: De laagdikte en ruwheid bij diverse spincoatparameters.

Sample	Tijdsduur	Rotatiesnelheid	L	R_a
-	s	tpm	nm	nm
1	30	1000	123,38	6,60
2	30	1500	107,86	7,90
3	30	1500	93,94	6,91
4	30	2000	100,69	5,41
5	30	2000	103,99	10,61
6	30	2500	86,52	16,43
7	30	2500	90,85	4,83
8	30	3000	88,71	10,03
9	30	3000	86,47	4,21
10	60	1000	117,95	6,95
11	60	1000	116,47	12,32
12	60	1500	71,87	5,54
13	60	1500	112,58	5,38
14	60	2000	95,85	7,42
15	60	2000	123,11	6,56
16	60	2500	95,56	5,73
17	60	2500	88,73	9,83
18	60	3000	151,31	34,41
19	60	3000	99,97	5,62

De resultaten uit tabel 4.3 worden in figuren 4.4 en 4.3 op grafische wijze getoond.



Figuur 4.3: De oppervlakteruwheid van de PMMA-laag in functie van de rotatiesnelheid.



Figuur 4.4: De laagdikte van de PMMA-laag in functie van de rotatiesnelheid.

Figuur 4.3 geeft het verband weer tussen de oppervlakteruwheid (R_a) en de rotatiesnelheid van het substraat tijdens het spincoaten. De resultaten voor een rotatieduur van 30 en 60 seconden worden in één figuur gebundeld. Hieruit blijkt dat de ruwheden globaal tussen 4 nm en 8 nm gelegen zijn. Dit vormen aanvaardbare waarden voor optische toepassingen zoals de ontwikkelde lensmatrixfolie.

Uit figuur 4.4 volgt de invloed van de rotatiesnelheid op de laagdikte van de PMMA-film voor een rotatieduur van 30 en 60 seconden. Vastgesteld wordt dat er nagenoeg een dalend logaritmisch verband bestaat tussen beide grootheden. Intuïtief wordt vermoed dat naarmate de rotatiesnelheid toeneemt, de centrifugaalkrachten tevens toenemen waardoor gedurende het roteren een groter volume van de oplossing van het substraat geslingerd wordt. Dit heeft tot gevolg dat een kleiner volume op het substraat overblijft, waardoor de laagdikte afneemt. Dit vermoeden wordt bevestigd door de experimentele data. De gemiddelde laagdikte gemiddeld 100 nm. Meerdere lagen over elkaar afzetten vormt met spincoaten geen optie. De volgende laag zou echter de vorige laag oplossen, waarna de oplossing onder invloed van de centrifugaalkrachten van het substraat worden geslingerd. Op basis hiervan wordt ook spincoaten ongeschikt bevonden voor het vervaardigen van de PMMA-laag voor de lensmatrixfolie.

Tot slot kan algemeen vastgesteld worden dat de verkregen resultaten bij een rotatieduur van 30 en 60 seconden slechts gering afwijken. Dit is het gevolg van het lage kookpunt en de daarmee samenhangende hoge verdampingssnelheid van aceton. Na enkele seconden verdampt het aceton uit de oplossing waarna het gedroogde PMMA resteert. Verder roteren van het substraat is daarna zinloos en overbodig.

4.1.4 Combinatie van ultrasoon spraycoaten en spincoaten

Uit de paragrafen 4.1.2 en 4.1.3 resulteert respectievelijk dat de laagdikten bij ultrasoon spraycoaten en de oppervlakteruwheden bij spincoaten geschikt zijn voor de productie van de PMMA-laag van de lensmatrixfolie. De ruwheden bij ultrasoon spraycoaten en de laagdikten bij spincoaten zijn daarentegen ontoereikend. Daarom wordt in deze paragraaf de combinatie van beide technieken behandeld.

Hiervoor wordt over de eerder gespraycoatte substraten een PMMA-laag voorzien door middel van spincoaten. Een 0,5 m% PMMA-acetonoplossing wordt na het bereiken van het ingestelde toerental op het substraat gedruppeld. Dit wordt dynamisch spincoaten genoemd en is noodzakelijk om het overmatig oplossen van de gespraycoatte PMMA-laag te voorkomen. Hierbij is het wenselijk dat het gespincoatte PMMA de ruwheidsdalen van de gespraycoatte laag opvult om zo een ruwheidsreductie te verwezenlijken. De gespraycoatte substraten uit tabel ??? met nummer 11 en 20 worden voor dit experiment aangewend. Deze substraten bezitten namelijk de grootste laagdikten uit de reeks en worden gekenmerkt door relatief grote ruwheden ($\pm$ 1 µm). Tabel 4.4 toont de resultaten na het één- en driemaal spincoaten van substraat 11 en 20.

Tabel 4.4: De laagdikte en ruwheid na het spincoaten op gespraycoatte substraten bij diverse parameters.

Sample	Meting	C	# lagen	Tijdsduur	Rotatiesnelheid	L	L_{gem}	R_a	$R_{a\text{-}gem}$
-	-	m%	-	s	tpm	nm	nm	nm	nm
11	-	-	0	-	-	8210	8210	1295	1295
11	1	0,5	1	120	3000	7228		975,89	
11	2	0,5	1	120	3000	8082	7622	830,89	899
11	3	0,5	1	120	3000	7557		890,16	
11	1	0,5	3	120	3000	6170		1035,90	
11	2	0,5	3	120	3000	5707	5990	1039,27	1030
11	3	0,5	3	120	3000	6094		1014,02	
20	-	-	0	-	-	9217	9217	839	839
20	1	0,5	1	120	3000	9439		1324,34	
20	2	0,5	1	120	3000	8922	8806	1038,86	1182
20	3	0,5	1	120	3000	8056		-	
20	1	0,5	3	120	3000	9427		1155,02	
20	2	0,5	3	120	3000	7413	8474	1025,69	1156
20	3	0,5	3	120	3000	8583		1287,38	

Tabel 4.4 bevat de volgende grootheden:

- Sample [-]: het nummer van het substraat,
- Meting [-]: het nummer van de meting,
- C [m%]: de concentratie van PMMA in aceton,
- # lagen [-]: het aantal gespincoatte lagen over de gespraycoatte substraten,
- Tijdsduur [s]: de rotatieduur tijdens het spincoaten,
- Rotatiesnelheid [s]: de rotatiesnelheid tijdens het spincoaten,
- L [nm]: de laagdikte,
- L [nm]: de gemiddelde laagdikte,
- R_a [nm]: de oppervlakteruwheid (R_a).
- $R_{a\text{-}gem}$ [nm]: de gemiddelde oppervlakteruwheid.

Na het aanbrengen van de eerste laag over substraat 11 vermindert de ruwheid met 31 %. De laagdikte daalt gering. Na de derde laag wordt echter een laagdiktereductie van 27 % vastgesteld met daarnaast een significante stijging van de ruwheid. Dit wordt vermoedelijk veroorzaakt door het oplossen van de gespraycoatte laag door de acetonoplossing. Voor sample 20 stijgt zelfs na de eerste laag de ruwheid en daalt de laagdikte. Ter verlaging van de ruwheid van gespraycoatte substraten blijkt deze onderzoekspiste daarom ongeschikt.

4.1.5 Overige technieken

Zowel het ultrasoon spraycoaten en spincoaten afzonderlijk als de combinatie van beide technieken blijken niet de gewenste resultaten op te leveren. De laagdikte van de PMMA-film dient namelijk 20 µm te bedragen om inkjetetsen mogelijk te maken en de oppervlakteruwheid dient kleiner dan 5 nm te zijn voor optische toepassingen. Uiteindelijk werd voor het gebruik van een PMMA-folie geopteerd als basis voor het inkjetetsen en -printen. Er werden echter nog drie andere oplossingen geformuleerd die mogelijk in de toekomst hun nut kunnen betekenen. Deze methoden worden hierna kort toegelicht.

Het ultrasoon spraycoaten met geoptimaliseerde instellingen

Uit tabel 5.2 blijken de spraycoatparameters van meting 35, na het afzetten van 10 lagen, een PMMA-laag met een dikte van 503 nm en een ruwheid van 134 nm op te leveren. Hiervoor werd gebruik gemaakt van een 0,5 m% PMMA-acetonoplossing. Door 400 lagen met deze instellingen aan te brengen op een glazen substraat, kan mogelijk de gewenste laagdikte van 20 µm behaald worden. Naar verwachting zal de oppervlakteruwheid toenemen. Deze ruwheid kan nadien verminderd worden door de eerder besproken thermische warmtebehandeling of de nabehandeling op basis van acetondampen. De kans is reëel dat ook na deze behandelingen de ruwheid te hoog blijft. Daarnaast is het spraycoaten van 400 lagen industrieel minder interessant omwille van de toenemende productietijd.

Het spincoaten van een 20 m% PMMA-dichloorbenzeenoplossing

Bornside D. et al. [162] slaagde erin om een PMMA-laag van $\pm$ 2 µm te spincoaten op basis van een 16 m% PMMA-dichloorbenzeenoplossing. De spinsnelheid bedroeg 2000 tpm. Door het verhogen van het massapercentage van deze oplossing naar 20 m% en het verlagen van de spinsnelheid naar 500 tpm, kan mogelijk de gewenst laagdikte bekomen worden. Gebaseerd op de resultaten van het spincoaten van de PMMA-acetonoplossing, wordt ook hier een goede ruwheid verwacht. Het gebruik van dichloorbenzeen vereist echter een goed geventileerde ruimte met de nodige persoonlijke beschermingsmiddelen. Eventueel kan het spincoaten binnen de beschermde atmosfeer van een *glovebox* uitgevoerd worden.

Het blade coaten of dipcoaten van de PMMA-acetonoplossing

Hiervoor worden op de vier randen van het glazen substraat een strookje plakband aangebracht, zodanig dat in het centrum een vierkanten open ruimte verkregen wordt. Vervolgens wordt in het centrum de PMMA-acetonoplossing toegevoegd en wordt met een dun mes de resterende vloeistof afgestreken. Er bevindt zich nu op het glazen substraat een vierkante vloeistoffilm met een laagdikte gelijk aan deze van het plakband. Na het verdampen van het Aceton uit de oplossing, resteert een PMMA-laag met een dikte in het micrometerbereik.

Een tweede mogelijkheid is het dipcoaten van het substraat. Hierbij wordt het glazen substraat in de PMMA-acetonoplossing ondergedompeld en met een welbepaalde snelheid eruit getrokken. Deze snelheid bepaalt mede de laagdikte. Na het verdampen van het aceton wordt ook hierbij een voldoende dikke PMMA-laag overgehouden.

Het gebruik van een PMMA-folie als substraat

Tot slot ontstond het idee om een PMMA-folie als substraat aan te wenden. Deze folie wordt geleverd door Evonik en bezit een dikte en transparantie van 250 µm en 92 %. De oppervlakteruwheid van de folie bedraagt 2,86 nm (R_a). Met deze folie worden de basislaag voor het inkjetetsen en het substraat gecombineerd dat toelaat om de lensmatrixfolie op eenvoudige wijze aan een OLED te lijmen. Bijkomend wordt zo een flexibele lensmatrixfolie bekomen. In de toekomst zou zelfs het vervaardigen van de OLED aan de onderzijde van deze folie verder onderzocht kunnen worden.

4.2 Construeren van lensreservoirs

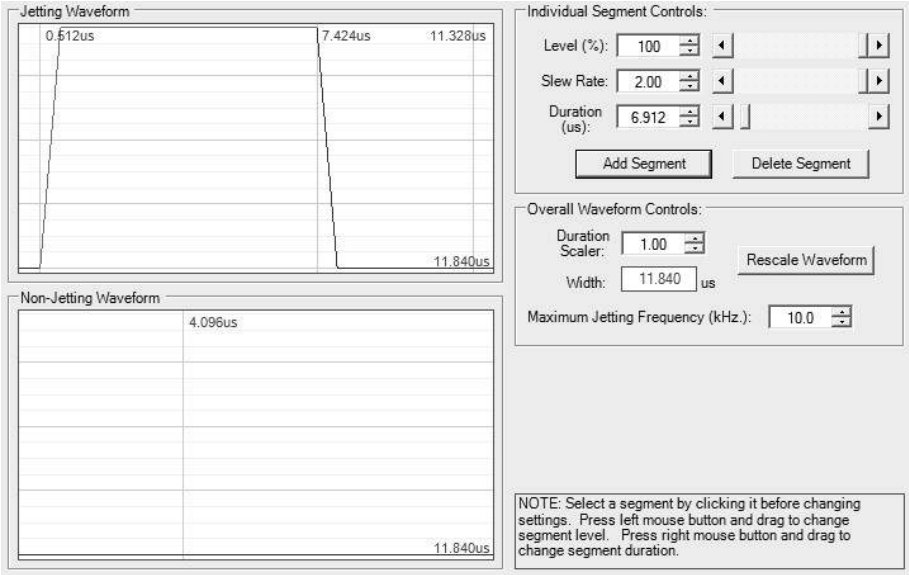
De lensreservoirs vormen een bassin voor de lenzen en zijn noodzakelijk om hoge fill factoren te realiseren en te voorkomen dat de vloeibare lenzen clusteren bij het aanbrengen op de PMMA-folie. Uiteindelijk worden deze reservoirs geconstrueerd op basis van het inkjetetsen van ringvormige patronen in de folie. Ten gevolge van het koffieringeffect ontstaan vervolgens opstaande randen. Alvorens tot deze oplossing gekomen werd, werden verscheidene pistes onderzocht. De volgende paragrafen bespreken de onderzochte technieken voor de productie van lensreservoirs.

De basis dat al deze technieken verbindt, is het inkjetprinten. Er wordt voor deze productietechniek gekozen omwille van zijn eenvoud, kostenefficiëntie en flexibiliteit. Zo zijn de noodzakelijke handelingen van de operator eerder beperkt, is de apparatuur relatief goedkoop en kan door het eenvoudig wijzigen van het printprogramma een volledig nieuwe lensmatrixfolie met verschillende lensgrootten en -rangschikkingen bekomen worden. Het gebruikte systeem is de *drop-on-demand* inkjetprinter DMP-2850 van de fabrikant Fujifilm Dimatix, uitgerust met piëzo-elektrische elementen voor de druppelvorming. De inktpatronen (DMC-11610) bezitten 16 spuitmonden met een opening van 21.5 µm en een druppelvolume van 10 pl. Figuur 4.5 toont de gebruikte inkjetprinter [4] en inktpatronen [5].



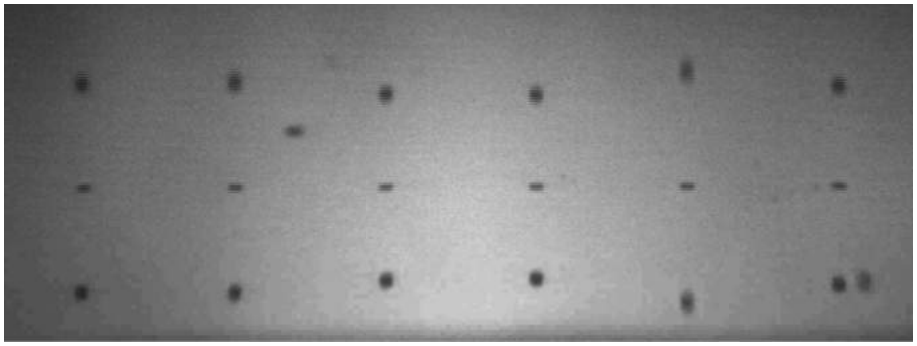
Figuur 4.5: De Dimatix Fujifilm DMP-2850 inkjetprinter (links) en het DMC-11610 inktpatroon (rechts).

Het inkjetetsen gebeurt met behulp van het solvent methoxybenzeen of anisol. De oplosbaarheid van PMMA in anisol is goed, waarbij anisol overigens veilig te gebruiken is in het labo en dit niet reageert met het kunststof waaruit de printercartridges zijn opgebouwd [133]. Daarnaast wordt een goede ventilatie aangeraden. Ditmaal niet vanwege van de toxiciteit, maar omwille van de sterke indringende geur van anisol. Dit solvent wordt geleverd door Sigma-Aldrich. Na optimalisatie wordt de golfvorm uit figuur 4.6 bekomen voor het aansturen van de piëzo-elektrische elementen met anisol als inkt.



Figuur 4.6: De optimaliseerde golfvorm voor het gebruik van anisol.

Deze golfvorm wordt met een frequentie van 84,5 kHz aangelegd aan de piëzo-elektrische elementen in de spuitmonden, waardoor anisol druppeltjes worden afgevuurd. Figuur 4.7 beeldt de verkregen druppels af.

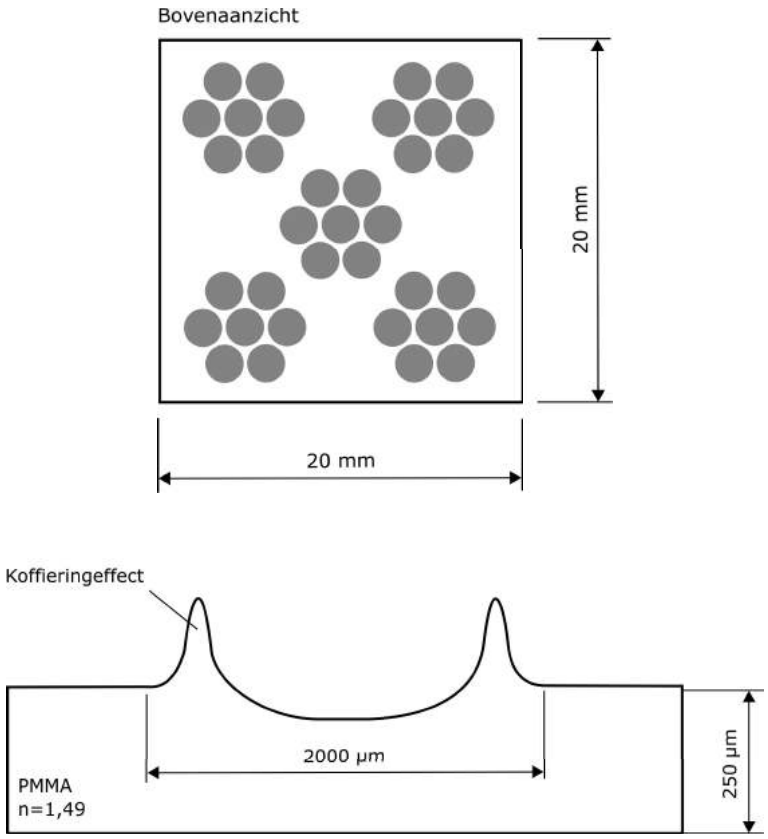


Figuur 4.7: De druppelvorming voor zes spuitmonden van het DMC-11610 inktpatroon.

Het inkjetprinten geschiedt op een PMMA-folie (Plexiglas Film Clear 99524 GT) van Evonik met een dikte en ruwheid van 250 µm en 2,86 nm (R_a). De transparantie bedraagt 92 % en het product wordt geleverd in A3-formaat. De fabrikant voegt aan deze PMMA-folies polybutylacrylaat toe ter verhoging van de slagvastheid en UV-absorbens. Polybutylacrylaat is eveneens oplosbaar in anisol en de UV-absorbens worden slechts in kleine concentraties toegevoegd, zodanig dat deze additieven de etsbaarheid niet beïnvloeden. De experimenten bevestigen dit. Bijkomend wordt deze folie aan weerszijden van een kraswerende folie uit polyetheen voorzien. Deze beschermfolie wordt verwijderd bij aanvang van het inkjetprinten. Aan de ene zijde heeft deze folie een blauwe kleur, de andere zijde bestaat uit een transparante beschermfolie. Uit de experimenten volgt dat deze kleuren niet duiden op een andere kwaliteit of samenstelling van de PMMA-folie. Om toch consistent te zijn, werd steeds op de zijde met de blauwe folie geprint. Omwille van deze beschermfolies blijft de PMMA-folie voldoende proper en was geen ultrasone reinigingsprocedure vereist voor het gebruik [163].

4.2.1 Inkjetetsen van cirkelvormige patronen

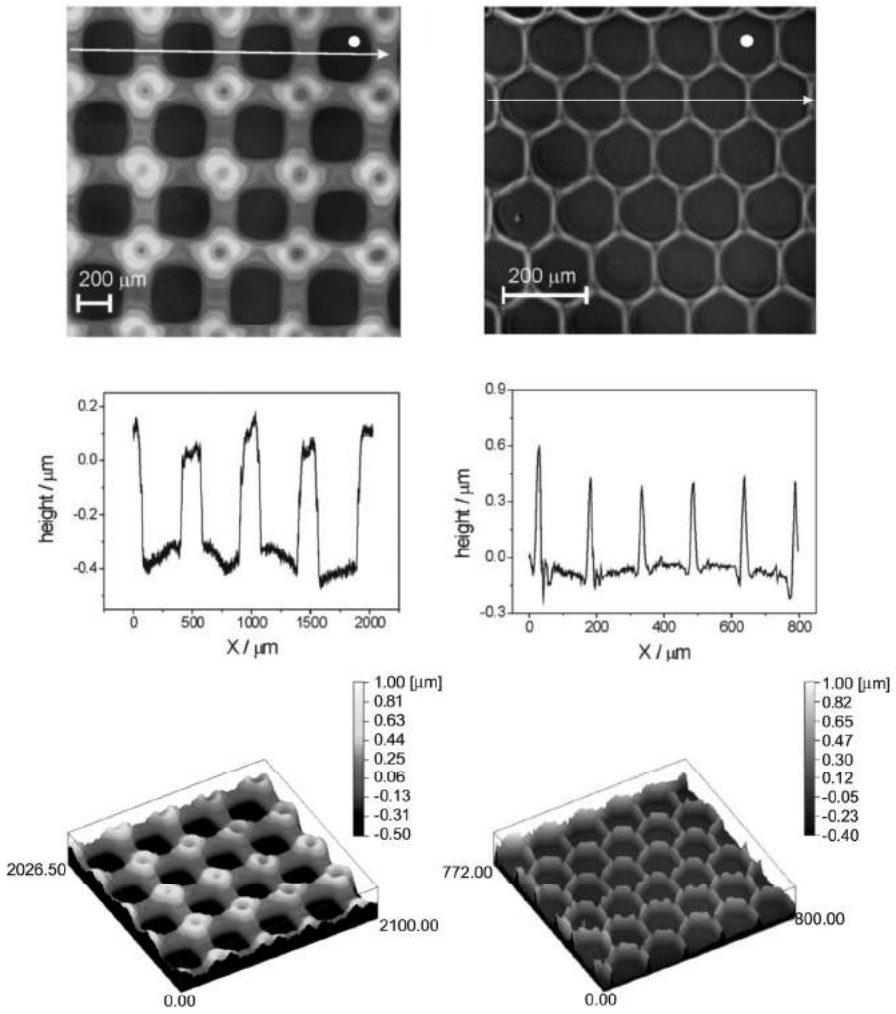
Allereerst wordt het printen van cirkelvormige solventpatronen op de PMMA-folie bestudeerd. De folie wordt hiervoor in substraten met de volgende afmetingen gesneden: 20 x 20 mm^2. Figuur 4.8 illustreert de patroonvorm en de gewenste kratervorm na het inkjetetsen.



Figuur 4.8: Hexagonale randschikking van cirkelvormige printpatronen (boven) met de resulterende kratervorm (onder).

Tijdens het printen worden fijne druppeltjes anisol met een diameter van ca. 40 µm langs elkaar aangebracht op het substraat. Deze druppeltjes clusteren echter en vloeien in elkaar over. Hierdoor vormt zich één grote druppel met een diameter die nagenoeg gelijk is aan de diameter van het cirkelvormig printpatroon. In deze anisol druppel lost het PMMA uit de folie op, waarna het koffieringeffect zorgt voor de typerende kratervorm uit figuur 4.8. In deze krater kunnen nadien de lenzen aangebracht worden.

Een aanzet tot dit idee werd bekomen uit [6,7,159]. De Gans et al. [6] inkjetetste cirkelvormige, kanaalvormige, vierkanten en zeshoekige kraters in een polystyreen (PS) laag met behulp van isopropylacetaat en acetofenon. Figuur 4.9 toont enkele lichtmicroscopie-, profilometrie- en 3D-beelden [6].

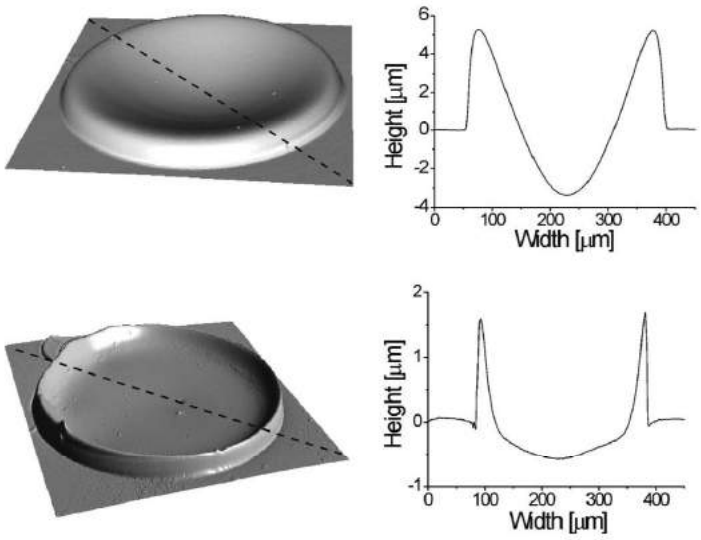


Figuur 4.9: Rechthoekige en zeshoekige kraterpatronen geëtst in polystyreen, door middel van acetofenon en isopropylacetaat.

De randhoogten en reservoirdiameters bedragen gemiddeld 600 nm en 200 µm.

Grimaldi et al. [159] wendde enerzijds N-methyl-2-pyrrolidon en anderzijds tolueen aan voor het inkjetetsen van cirkelvormige kraters in respectievelijk een polyimide laag en een polystyreen laag. De tot stand gebrachte randhoogten bedragen respectievelijk 0,8 nm en 3 µm. De reservoirs zijn gemiddeld 350 µm breed.

Karabasheva et al. [7] maakte eveneens gebruik van ethylacetaat en acetofenon voor het inkjetetsen van cirkelvormige kraters in een polystyreen laag. De randhoogten bedragen 4 µm - 5 µm. Ook hier zijn de reservoirs gemiddeld 350 µm breed. Figuur 4.10 visualiseert enkele resultaten [7].



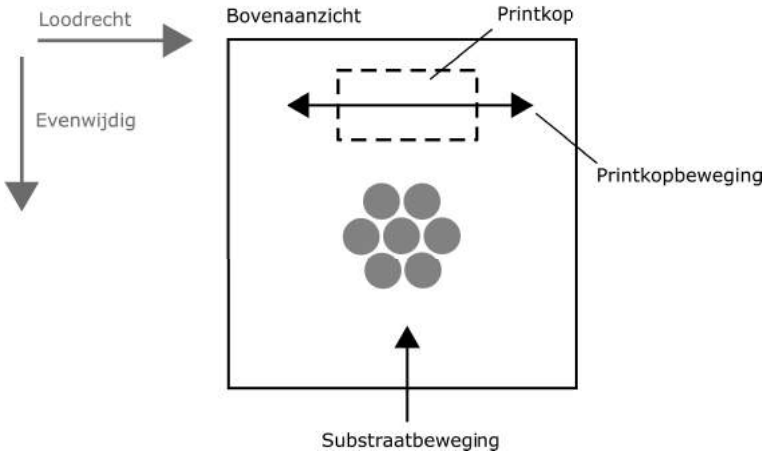
Figuur 4.10: Cirkelvormige kraters geëtst in polystyreen, door middel van acetofenon en ethylacetaat.

In deze masterproef worden daarentegen cirkelvormige patronen van anisol op een PMMA-folie geprint. De inkjetprinter beschikt over een waaier aan instelbare procesparameters. Enkel de invloed van het aantal lagen en de basisplaattemperatuur worden voor deze onderzoekspiste onder de loep genomen.

In bijlage geven figuren A.1 tot en met A.3 de lichtmicroscopiebeelden weer bij het variëren van het aantal anisol lagen van één tot en met drie. Figuren A.4 en A.5 tonen daarentegen de profilometriebeelden voor één tot en met zes anisol lagen. Het beschikbare meetapparatuur is: Zeiss Axiovert 40 MAT (lichtmicroscoop) en Dektak XT (profilometer). De instellingen van de Dektak kan men in tabel 4.2 terugvinden. De printerinstellingen bedragen:

- Aantal lagen: 1 - 2 - 3 - 4 - 5 - 6 [-],
- Patroondiameter: 2 [mm],
- Printhoogte: 250 [µm],
- Basisplaattemperatuur: 23,5 [°C],
- Spuitmondtemperatuur: 35 [°C],
- Aantal spuitmonden: 5 [-],
- Druppelafstand: 10 [µm],
- Leader bar: Nee.

Door middel van profilometrie worden doorsneden van de kratervormen bekomen, zowel evenwijdig als loodrecht op de printrichting. Figuur 4.11 toont de definitie van deze richtingen.



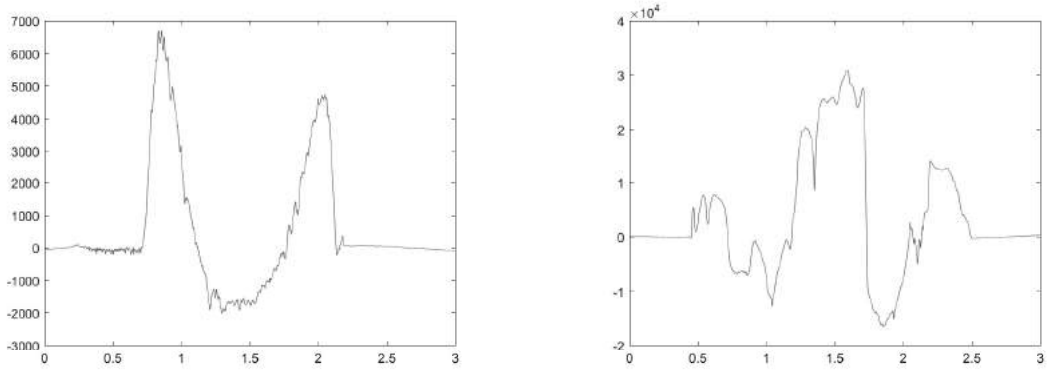
Figuur 4.11: Richtingsdefinities bij de profilometriemetingen.

Daarnaast dient vermeld te worden dat tussen het printen van twee opeenvolgende lagen een wachttijd van 5 minuten gehandhaafd wordt omwille van de volgende twee redenen.

Ten eerste krijgt het koffieringeffect de tijd om een krater te vormen. Slechts nadat het merendeel van het overtollige anisol verdampt is, mag de volgende laag worden aangebracht. Indien de volgende laag reeds geprint wordt op het moment dat nog een grote anisol druppel op het substraat aanwezig is uit de vorige printopdracht, zal het anisol uit de volgende printopdracht leiden tot een steeds groter druppelvolume op het substraat. Hierdoor neemt de kraterdiameter ongewenst toe. Het doel van meerdere anisol lagen bestaat echter uit het verhogen van de kraterdiepte en de randhoogte van de reservoirs en niet de kraterdiameter. Dit kan enkel verwezenlijkt worden na het drogen van de voorgaande laag. De hierbij gevormde krater doet vervolgens dienst als een bassin voor het nieuw toegevoegde anisol, dat voornamelijk de bodem van de krater zal oplossen en dit materiaal aan de groeiende randen afzet.

Ten tweede doet de combinatie van de lage printhoogte (250 µm) en de hogere basisplaattemperatuur, de spuitmondtemperatuur stijgen. Hierdoor daalt de viscositeit van het anisol, waardoor de druppelvorming mogelijk instabiel wordt. De wachttijd tussen twee printopdrachten laat de spuitmonden toe om af te koelen en de ingestelde temperatuur zo correct mogelijk te handhaven. Afhankelijk van het temperatuurverschil tussen de basisplaat en de spuitmond en de printduur kan de spuitmondtemperatuur 2 °C tot 5 °C stijgen boven de ingestelde waarde.

Figuur 4.12 vat vervolgens de resultaten samen bij respectievelijk één en zes lagen ter vergelijking.



(a) # lagen: 1 (b) # lagen: 6

Figuur 4.12: Profilometriebeelden met de verticale positie [nm] in functie van de horizontale positie [mm] voor cirkelvormige kraters in PMMA-folie ten gevolge van inkjetetsen.

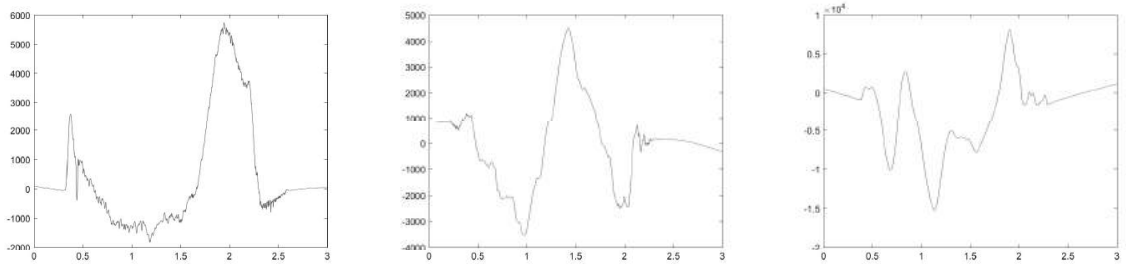
Hieruit volgt dat de gevormde krater bij één anisol laag, figuur 4.12a, gelijkend is op de gewenste vorm uit figuur 4.8. De R_a-waarde van de kraterbodem is echter niet optimaal en gelijk aan 559 nm en 490 nm voor respectievelijk de richtingen evenwijdig en loodrecht op de printrichting. Deze ruwheid dient kleiner te zijn dan 5 µm om lichtverstrooiingseffecten in het optisch centrum te vermijden. De randhoogte en de buitenste reservoirdiameter bedragen achtereenvolgens 6.7 µm en 1,7 mm.

Naarmate het aantal lagen stijgt, wordt de kratervorm steeds grilliger en afwijkend van de gewenste vorm. Bij zes lagen, figuur 4.12b, constateert men een lijvige heuvel met een hoogte van 30.9 µm in het centrum van de krater. Een toenemend aantal lagen leidt bijgevolg tot onbruikbare kratervormen.

In bijlage tonen figuren A.6 tot en met A.8 de profilometriemetingen bij het variëren van zowel het aantal lagen als de basisplaattemperatuur. De printinstellingen bedragen:

- Aantal lagen: 1 - 2 - 3 [-],
- Patroondiameter: 2 [mm],
- Printhoogte: 250 [µm],
- Basisplaattemperatuur: 23,5 - 40 - 55 [°C],
- Spuitmondtemperatuur: 35 [°C],
- Aantal spuitmonden: 5 [-],
- Druppelafstand: 10 [µm],
- Leader bar: Nee.

Figuur 4.13 vat, ter vergelijking, de resultaten samen voor één anisol laag bij de drie onderzochte basisplaattemperaturen.



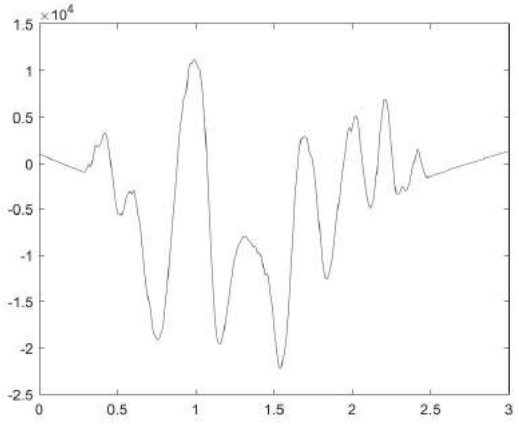
(a) # lagen: 1; basisplaattemp.: 23,5°C

(b) # lagen: 1; basisplaattemp.: 40°C

(c) # lagen: 1; basisplaattemp.: 55°C

Figuur 4.13: Profilometriebeelden met de verticale positie [nm] in functie van de horizontale positie [mm] voor cirkelvormige kraters in PMMA-folie ten gevolge van inkjetetsen.

Zoals reeds eerder aangehaald wordt bij 23,5 °C een aanvaardbare kratervorm bekomen. Bij deze temperatuur bezit het anisol namelijk een voldoende lage verdampingssnelheid, waardoor het koffieringeffect de tijd krijgt om een reservoir met opstaande randen te vormen. Naarmate de basisplaattemperatuur stijgt, neemt ook de verdampingssnelheid van het anisol toe. Bij 40 °C lost het PMMA ter hoogte van het centrum op, maar onmiddellijk slaat deze hoeveelheid neer doordat het solvent te spoedig verdampt. Hierdoor wordt een heuvel van PMMA ter hoogte van de optische as gevormd. Deze vorm is bijgevolg onbruikbaar. Naarmate de temperatuur en het aantal lagen verder toeneemt wordt de kratervorm steeds grilliger, zoals figuur 4.14 weergeeft voor drie lagen en een basisplaattemperatuur van 55 °C.

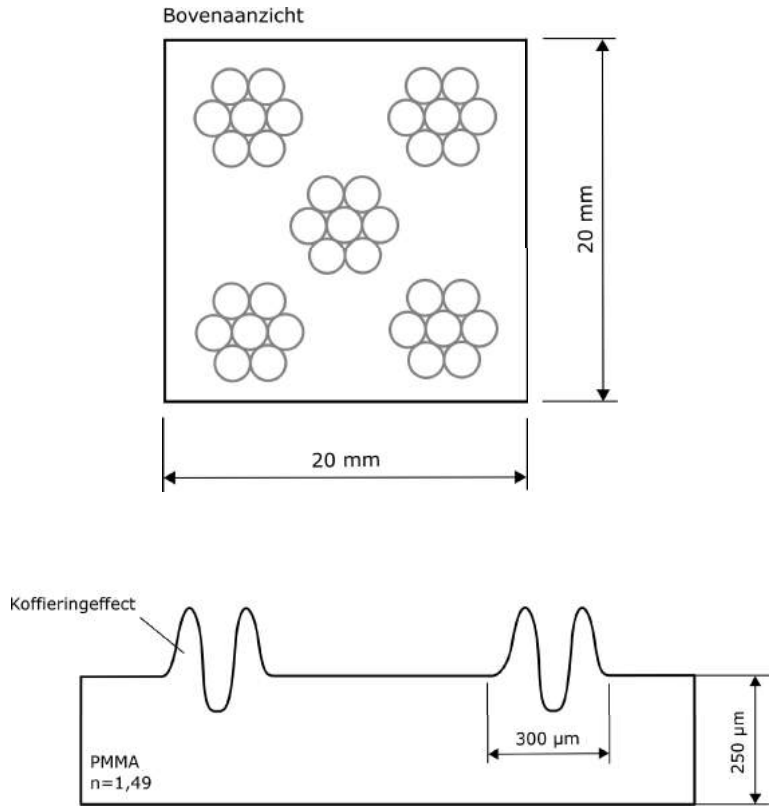


Figuur 4.14: Profilometriebeeld met de verticale positie [nm] in functie van de horizontale positie [mm] voor een cirkelvormige krater in PMMA-folie ten gevolge van inkjetetsen: # lagen: 3; basisplaattemp.: 55°C.

Op basis van voorgaande resultaten wordt geconcludeerd dat het printen van cirkelvormige patronen van anisol, onbruikbaar is om de gewenste reservoirs in de PMMA-folie te vormen. Bij één anisol laag en een basisplaattemperatuur van 23,5 °C wordt weliswaar een aanvaardbare kratervorm bekomen, maar de ruwheid op de bodem is te hoog voor optische toepassingen met lenzen.

4.2.2 Inkjetetsen van ringvormige patronen

Het construeren van lensreservoirs door het inkjetetsen van cirkelvormige patronen (paragraaf 4.2.1) levert geen bevredigende resultaten op. Hierbij is de kratervorm niet optimaal en is de ruwheid van de bodem te hoog. De PMMA-folie bezit echter een zéér goede oppervlakteruwheid van 2,86 nm (R_a). Het is zonde om dit te verslechteren door het etsen. Daarom wordt het volgende idee geponeerd en uitgewerkt. Figuur 4.15 illustreert wederom de patroonvorm en de gewenste kratervorm na het inkjetetsen.



Figuur 4.15: Hexagonale randschikking van ringvormige printpatronen (boven) met de resulterende kratervorm (onder).

Men wenst bijgevolg een omringende gracht met opstaande randen te creëren door het printen van ringvormige solventpatronen op de PMMA-folie. Deze techniek bezit de volgende voordelen ten opzichte van het printen van cirkelvormige patronen:

- de vorm van het reservoir is eenvoudiger te controleren, waardoor cirkelvormige, ellipsvormige, vierkanten en zeshoekige reservoirs geprint kunnen worden. Hierdoor komen nieuwe toepassingen vrij zoals microreactoren [164],
- zoals reeds eerder aangehaald wordt de oppervlakteruwheid van de folie niet gewijzigd ter hoogte van het centrum, waardoor de optische kwaliteit ongewijzigd blijft,
- vanwege de kleinere printoppervlakte, namelijk een ring in plaats van een volle cirkel, wordt het aangebrachte anisolvolume gereduceerd, dat een efficiënter gebruik van grondstoffen toelaat,
- daarnaast impliceert een kleinere printoppervlakte een daling van de printtijden en bijgevolg een verhoging van de productiviteit,

- tot slot bestaat de mogelijkheid om dunnere randen te printen, waardoor hogere fill factoren mogelijk worden.

Voor deze onderzoekspiste wordt de invloed van de printparameters bepaald. Hiervoor worden de volgende instellingen gevarieerd: het aantal spuitmonden, de printhoogte, het aantal lagen, de lijndikte van het printpatroon, de basisplaattemperatuur, de druppelafstand en de aanwezigheid van een leader bar. De invloed van elke parameter op het printresultaat wordt in de volgende paragrafen behandeld.

In tegenstelling tot de printprocedure uit de voorgaande paragraaf, wordt bij het printen van de ringvormige patronen geen wachttijd ingevoerd tussen het printen van twee opeenvolgende lagen. Ten eerste is het geprinte anisolvolume vele malen lager, waardoor het solvent nagenoeg volledig verdampt is alvorens de volgende laag aangebracht wordt. Ten tweede wordt de spuitmondtemperatuur naar 38 °C verhoogd. Uit de experimenten blijkt dat hierdoor de spuitmondtemperatuur weinig tot niet beïnvloed wordt door de basisplaattemperatuur.

Algemeen wordt uit de lichtmicroscopiebeelden vastgesteld dat zelfs na enkele weken nog steeds een kleine hoeveelheid anisol aanwezig is in de kratervorm van de omringende gracht. Dit solvent blijft de PMMA-folie verder aantasten, waardoor de randkwaliteit verslechtert in functie van de tijd. Voor toekomstig onderzoek wordt daarom aangeraden om de substraten na het printen uitvoerig te wassen met gedeïoniseerd water en te drogen met stikstof.

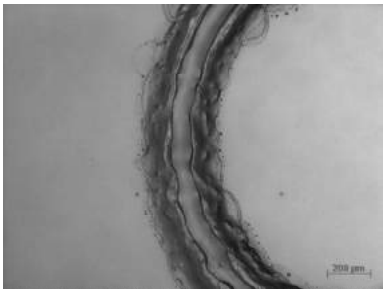
Het aantal spuitmonden

In bijlage tonen figuren A.9 tot en met A.16 de lichtmicroscopie- en profilometriebeelden van diverse lensreservoirs waarbij het aantal spuitmonden gevarieerd wordt. De metingen geschieden met behulp van respectievelijk de Zeiss Axiovert 40 MAT en de Dektak XT. De richtingsdefinities bij de profilometrie zijn analoog aan die getoond in figuur 4.11.

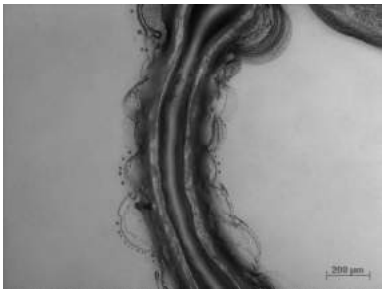
De printerinstellingen bedragen:

- Aantal spuitmonden: 1 - 2 - 3 - 4 - 5 - 6 [-],
- Printhoogte: 350 [µm],
- Substraatdikte: 300 [µm],
- Aantal lagen: 3 [-],
- Lijndikte van het patroon: 200 [µm],
- Basisplaattemperatuur: 45 [°C],
- Spuitmondtemperatuur: 38 [°C],
- Druppelafstand: 10 [µm],
- Leader bar: Nee.

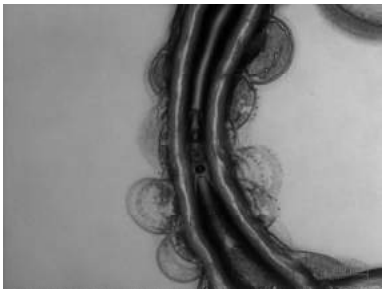
In figuur 4.16 worden de resultaten voor twee, drie en vijf spuitmonden gebundeld voor verdere analyse.



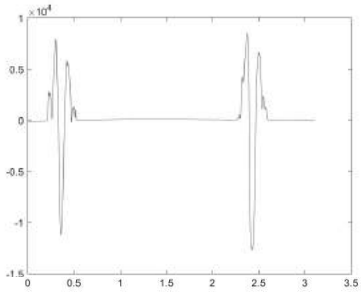
(a) Lichtmicroscopie, # spuitmonden: 2



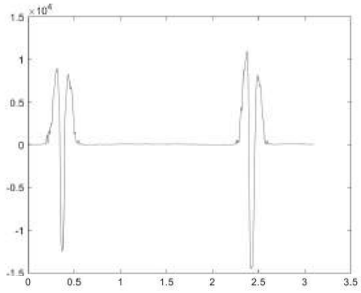
(b) Lichtmicroscopie, # spuitmonden: 3



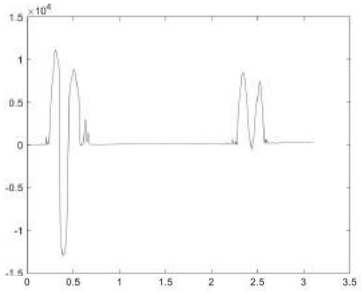
(c) Lichtmicroscopie, # spuitmonden: 5



(d) Profilometrie, # spuitmonden: 2



(e) Profilometrie, # spuitmonden: 3



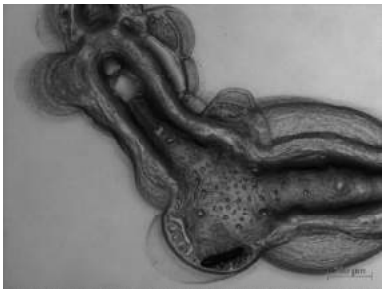
(f) Profilometrie, # spuitmonden: 5

Figuur 4.16: Lichtmicroscopie: versterking 5 x (boven). Profilometriebeeld met de verticale positie [nm] in functie van de horizontale positie [mm] voor een cirkelvormige krater in PMMA-folie (onder).

Men stelt vast dat naarmate het aantal spuitmonden toenemen, het koffieringeffect steeds uitgesprokener wordt. De randhoogte en -breedte stijgen. Daarnaast verslechtert de randkwaliteit, zoals weergegeven in figuur 4.17 voor één en zes spuitmonden.



(a) # spuitmonden: 1



(b) # spuitmonden: 6

Figuur 4.17: Lichtmicroscopie: versterking 5 x.

Dit is het gevolg van de dalende controleerbaarheid van het printproces. Bij het gebruik van meerdere spuitmonden is namelijk de kans groter dat de druppel- of baanvorming verstoord worden door vastzittende partikels in de monden. Daarom wordt het herhaaldelijk reinigen van de printkop aangeraden. Met IPA en gedeïoniseerd water wordt de kop gereinigd en vervolgens

gedroogd met stikstof op hogedruk. Daarna wordt met behulp van een spuit druk gezet op de luchttoevoer van het inktpatroon totdat het anisol uit de spuitmonden vloeit.

Het verband tussen de printtijden en het aantal spuitmonden wordt in tabel 4.5 getoond. Hieruit volgt dat op industrieel vlak het gebruik van zestien monden aangewezen is.

Tabel 4.5: Printtijd in functie van het aantal spuitmonden.

# spuitmonden [-]	1	2	3	4	5	6
Printduur [s]	410	202	135	101	82	69

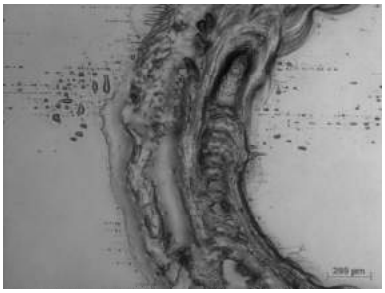
De printhoogte

In bijlage tonen figuren A.17 tot en met A.24 de lichtmicroscopie- en profilometriebeelden van diverse lensreservoirs waarbij de printhoogte gevarieerd wordt. De metingen geschieden met behulp van respectievelijk de Zeiss Axiovert 40 MAT en de Dektak XT. De richtingsdefinities bij de profilometrie zijn analoog aan die getoond in figuur 4.11.

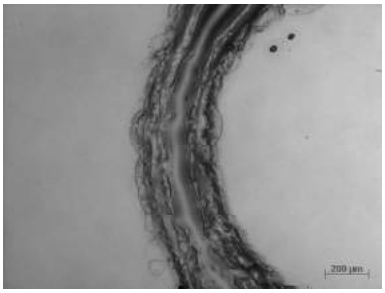
De printerinstellingen bedragen:

- Aantal spuitmonden: 3 [-],
- Printhoogte: 250 - 350 - 450 - 550 - 650 - 750 [µm],
- Substraatdikte: 300 [µm],
- Aantal lagen: 3 [-],
- Lijndikte van het patroon: 200 [µm],
- Basisplaattemperatuur: 45 [°C],
- Spuitmondtemperatuur: 38 [°C],
- Druppelafstand: 10 [µm],
- Leader bar: Nee.

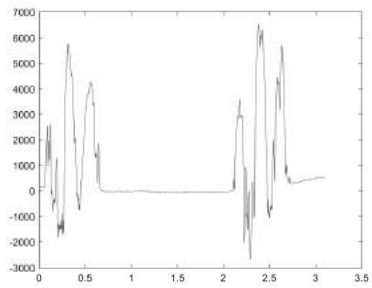
In figuur 4.18 worden de resultaten bij een printhoogte van 250 µm en 750 µm samengevat ter vergelijking.



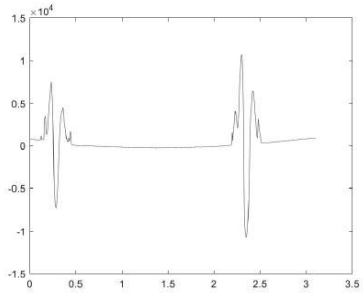
(a) Lichtmicroscopie, H: 250 µm



(b) Lichtmicroscopie, H: 750 µm



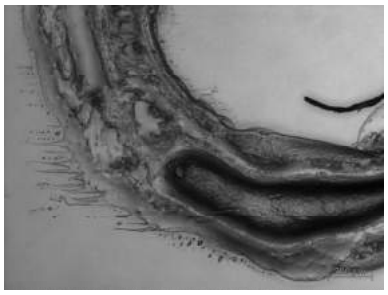
(c) Profilometrie, H: 250 µm



(d) Profilometrie, H: 750 µm

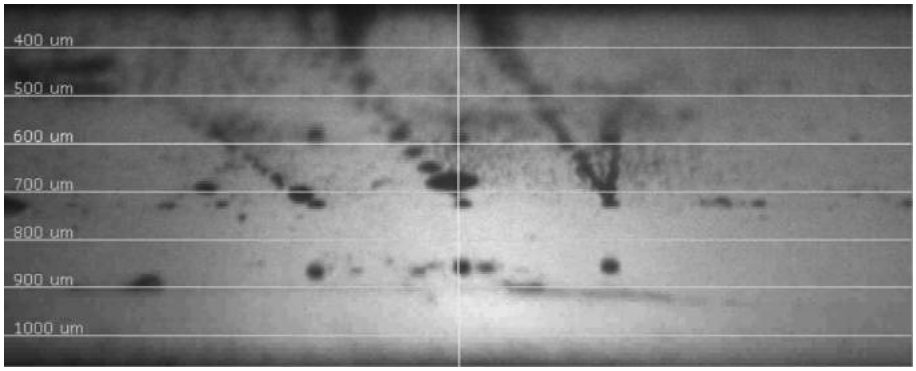
Figuur 4.18: Lichtmicroscopie: versterking 5 x (boven). Profilometriebeeld met de verticale positie [nm] in functie van de horizontale positie [mm] voor een cirkelvormige krater in PMMA-folie (onder).

Geconcludeerd wordt dat naarmate de printhoogte toeneemt, voornamelijk de randkwaliteit verbetert. Dit is enerzijds het gevolg dat een lage printhoogte in combinatie met een eventuele kromming van het substraat ertoe kan leiden dat de printkop contact maakt met het substraat. Hierdoor wordt het patroon over het substraat uitgesmeerd. Dit wordt men gewaar aan de anisolstrepen ter hoogte van de rand van het patroon, figuur 4.19.



Figuur 4.19: Lichtmicroscopie: versterking 5 x, printhoogte: 250 µm.

Anderzijds zorgt de hoge druppelsnelheid bij een lage hoogte voor het spetteren van het anisol tegen de printkop. Dit komt de druppel- en baanvorming niet ten goede. In figuur 4.20 kan men spetters tegen de printkop vaststellen.



Figuur 4.20: De druppelvorming ter hoogte van de printkop met de weergave van inktspetters.

Omwille van voorgaande redenen wordt een hoogte van 750 µm aangeraden. De randhoogte en -breedte daarentegen tonen geen significante verschillen.

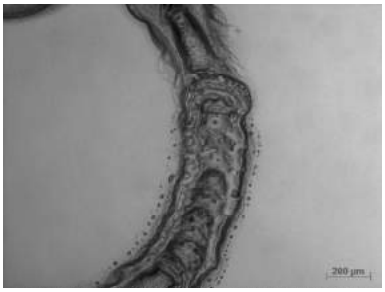
Aantal lagen

In bijlage tonen figuren A.25 tot en met A.32 de lichtmicroscopie- en profilometriebeelden van diverse lensreservoirs waarbij het aantal lagen gevarieerd wordt. De metingen geschieden met behulp van respectievelijk de Zeiss Axiovert 40 MAT en de Dektak XT. De richtingsdefinities bij de profilometrie zijn analoog aan die getoond in figuur 4.11.

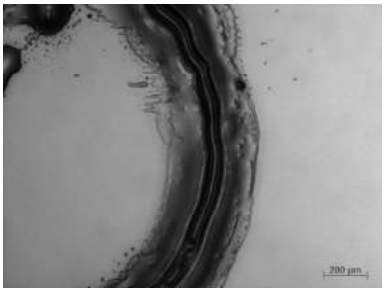
De printerinstellingen bedragen:

- Aantal spuitmonden: 3 [-],
- Printhoogte: 350 [µm],
- Substraatdikte: 300 [µm],
- Aantal lagen: 1 - 2 - 3 - 4 - 5 - 6 [-],
- Lijndikte van het patroon: 100 [µm],
- Basisplaattemperatuur: 45 [°C],
- Spuitmondtemperatuur: 38 [°C],
- Druppelafstand: 10 [µm],
- Leader bar: Nee.

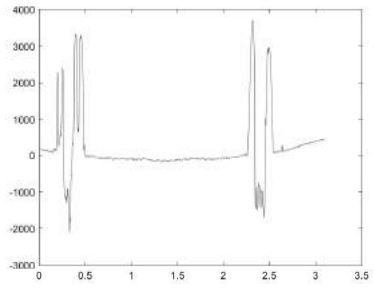
In figuur 4.21 worden de resultaten voor één en zes lagen gebundeld voor verdere analyse.



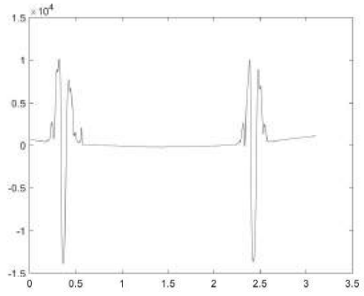
(a) Lichtmicroscopie, # lagen: 1



(b) Lichtmicroscopie, # lagen: 6



(c) Profilometrie, # lagen: 1



(d) Profilometrie, # lagen: 6

Figuur 4.21: Lichtmicroscopie: versterking 5 x (boven). Profilometriebeeld met de verticale positie [nm] in functie van de horizontale positie [mm] voor een cirkelvormige krater in PMMA-folie (onder).

Hieruit volgt dat naarmate het aantal lagen toeneemt, de randhoogte en daldiepte aanzienlijk stijgen. Deze gracht doet namelijk dienst als een reservoir voor het solvent, waarbij veeleer de bodem oplost dan de randen. Het materiaal vanuit de bodem wordt vervolgens, door het koffieringeffect, afgezet aan de opstaande randen. Hierdoor neemt de randhoogte toe. Deze vaststelling werd tevens door Grimaldi et al. [159] gedaan.

Daarnaast bemerkt men bij één laag dat de gracht bestaat uit een aaneenschakeling van cirkelvormige kraters, terwijl bij zes lagen de gracht volledig doorlopend is.

In functie van de gewenste randhoogte, kan het aantal lagen vrij gekozen worden.

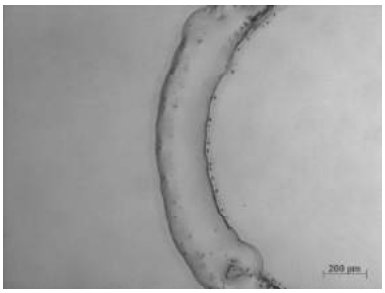
Lijndikte van het patroon

In bijlage tonen figuren A.33 tot en met A.40 de lichtmicroscopie- en profilometriebeelden van diverse lensreservoirs waarbij de lijndike van het patroon gevarieerd wordt. De metingen geschieden met behulp van respectievelijk de Zeiss Axiovert 40 MAT en de Dektak XT. De richtingsdefinities bij de profilometrie zijn analoog aan die getoond in figuur 4.11.

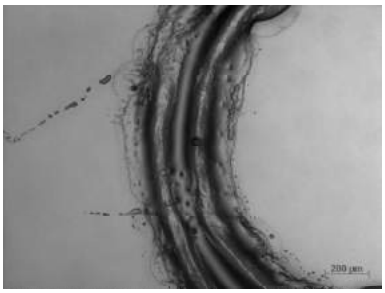
De printerinstellingen bedragen:

- Aantal spuitmonden: 3 [-],
- Printhoogte: 350 [µm],
- Substraatdikte: 300 [µm],
- Aantal lagen: 3 [-],
- Lijndikte van het patroon: 50 - 100 - 150 - 200 - 250 - 300 [µm],
- Basisplaattemperatuur: 45 [°C],
- Spuitmondtemperatuur: 38 [°C],
- Druppelafstand: 10 [µm],
- Leader bar: Nee.

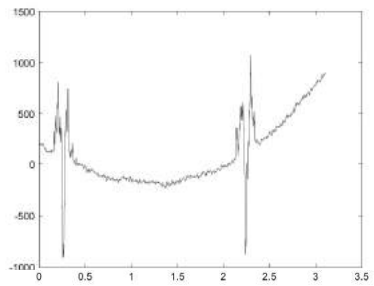
In figuur 4.22 worden de resultaten voor een lijndikte van 50 µm en 300 µm samengevat ter vergelijking.



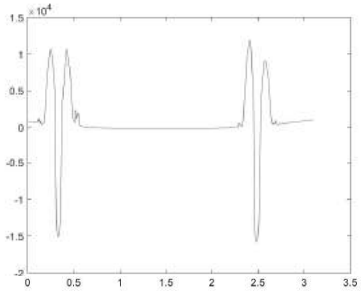
(a) Lichtmicroscopie, L: 50 µm



(b) Lichtmicroscopie, L: 300 µm



(c) Profilometrie, L: 50 µm



(d) Profilometrie, L: 300 µm

Figuur 4.22: Lichtmicroscopie: versterking 5 x (boven). Profilometriebeeld met de verticale positie [nm] in functie van de horizontale positie [mm] voor een cirkelvormige krater in PMMA-folie (onder).

Een grotere lijndikte heeft een aanzienlijke toename van de randhoogte tot gevolg, ten koste van een lichte stijging van de grachtbreedte. De reden hiervoor is dat bij een lijndikte van 300 µm meer anisol op de PMMA-folie wordt geprint, waardoor het effect van het etsen groter is.

Tot slot wordt, om goede resultaten te bekomen, een lijndikte van minimaal 200 µm aangeraden.

Basisplaattemperatuur

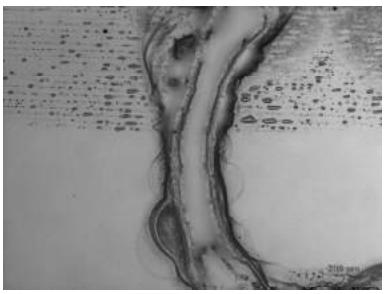
In bijlage tonen figuren A.41 tot en met A.48 de lichtmicroscopie- en profilometriebeelden van diverse lensreservoirs waarbij de basisplaattemperatuur gevarieerd wordt. De metingen geschieden met behulp van respectievelijk de Zeiss Axiovert 40 MAT en de Dektak XT. De richtingsdefinities bij de profilometrie zijn analoog aan die getoond in figuur 4.11.

De printerinstellingen bedragen:

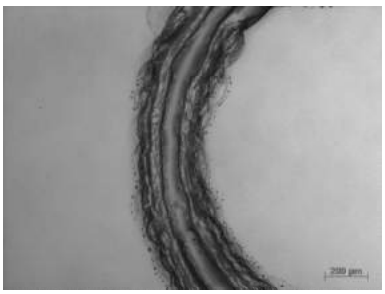
- Aantal spuitmonden: 3 [-],
- Printhoogte: 350 [µm],
- Substraatdikte: 300 [µm],
- Aantal lagen: 3 [-],
- Lijndikte van het patroon: 200 [µm],
- Basisplaattemperatuur: 30 - 35 - 40 - 45 - 50 - 55 [°C],
- Spuitmondtemperatuur: 38 [°C],
- Druppelafstand: 10 [µm],
- Leader bar: Nee.

Wanneer het verwarmingselement in de basisplaat uitgeschakeld wordt, neemt deze plaat de kamertemperatuur aan. Door omgevingsinvloeden is deze temperatuur echter niet constant en daardoor moeilijk reproduceerbaar. Als ondergrens voor dit experiment wordt daarom geopteerd voor een temperatuur van 30 °C, zodanig dat deze temperatuur ten alle tijde ingesteld kan worden.

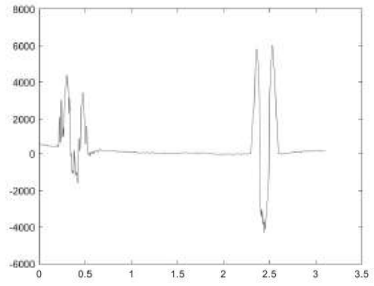
In figuur 4.23 worden de resultaten bij een basisplaattemperatuur van 30 °C en 45 °C gebundeld voor verdere analyse.



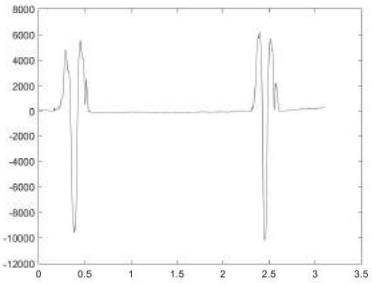
(a) Lichtmicroscopie, T: 30 °C



(b) Lichtmicroscopie, T: 45 °C



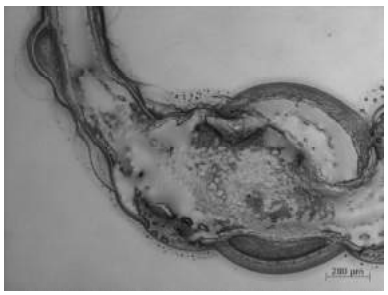
(c) Profilometrie, T: 30 °C



(d) Profilometrie, T: 45 °C

Figuur 4.23: Lichtmicroscopie: versterking 5 x (boven). Profilometriebeeld met de verticale positie [nm] in functie van de horizontale positie [mm] voor een cirkelvormige krater in PMMA-folie (onder).

Een lagere basisplaattemperatuur leidt tot een lagere verdampingssnelheid van het anisol, waardoor het solvent de kans krijgt om zich verder uit te spreiden over het substraat. Dit heeft bredere randen met een slechtere randkwaliteit tot gevolg, zoals getoond wordt in figuur 4.24.



Figuur 4.24: Lichtmicroscopie: versterking 5 x, T: 30 °C.

Een aanvaardbare randkwaliteit wordt bekomen vanaf 45 °C. Bij hogere temperaturen wordt de spuitmondtemperatuur door de basisplaattemperatuur beïnvloed. Deze kan hierdoor 5 °C tot 10 °C stijgen, waardoor de druppelvorming mogelijk instabiel wordt. Op basis hiervan wordt, voor een spuitmondtemperatuur van 38 °C, een basisplaattemperatuur van maximaal 45 °C aangeraden.

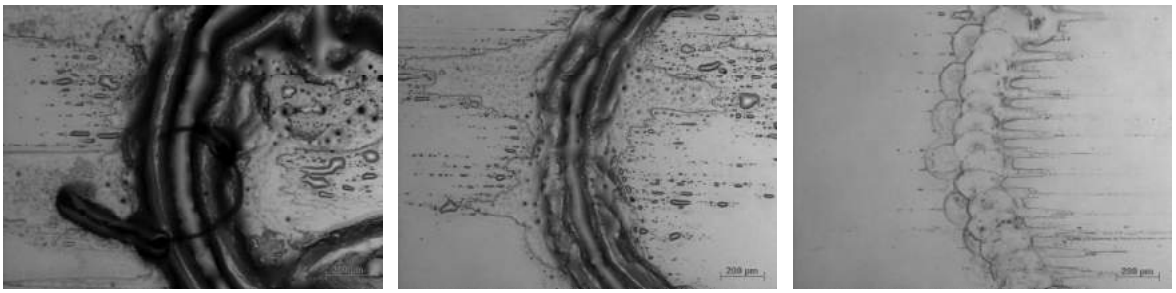
De druppelafstand

In bijlage tonen figuren A.49 tot en met A.56 de lichtmicroscopie- en profilometriebeelden van diverse lensreservoirs waarbij de druppelafstand gevarieerd wordt. De metingen geschieden met behulp van respectievelijk de Zeiss Axiovert 40 MAT en de Dektak XT. De richtingsdefinities bij de profilometrie zijn analoog aan die getoond in figuur 4.11.

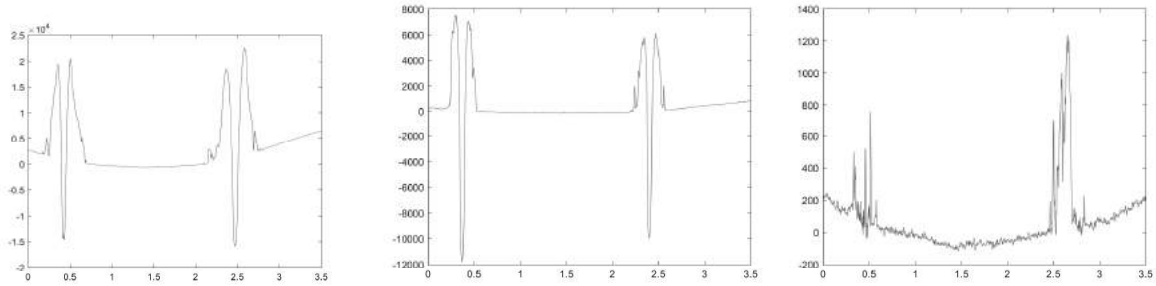
De printerinstellingen bedragen:

- Aantal spuitmonden: 3 [-],
- Printhoogte: 350 [µm],
- Substraatdikte: 300 [µm],
- Aantal lagen: 3 [-],
- Lijndikte van het patroon: 200 [µm],
- Basisplaattemperatuur: 45 [°C],
- Spuitmondtemperatuur: 38 [°C],
- Druppelafstand: 5 - 10 - 15 - 20 - 25 - 30 [µm],
- Leader bar: Nee.

In figuur 4.25 worden de resultaten bij een druppelafstand van 5 µm, 10 µm en 30 µm samengevat ter vergelijking.



(a) Lichtmicroscopie, D: 5 µm (b) Lichtmicroscopie, D: 10 µm (c) Lichtmicroscopie, D: 30 µm



(d) Profilometrie, D: 5 µm (e) Profilometrie, D: 10 µm (f) Profilometrie, D: 30 µm

Figuur 4.25: Lichtmicroscopie: versterking 5 x (boven). Profilometriebeeld met de verticale positie [nm] in functie van de horizontale positie [mm] voor een cirkelvormige krater in PMMA-folie (onder).

De druppelafstand wordt gedefinieerd als de centerafstand tussen druppels op het substraat, die achtereenvolgens worden afgevuurd [165]. Een lage druppelafstand (5 µm) impliceert dat een groter solventvolume per oppervlakte-eenheid wordt afgezet. Daardoor neemt de mate van etsen toe, dat zich vertaalt in diepere grachten en hogere randhoogten. Dit wordt bevestigd door figuur 4.25a. Het groter solventvolume per oppervlakte-eenheid heeft bijkomend tot gevolg dat de druppels gemakkelijker samenklusteren tot lijvige druppels met een verlies van randkwaliteit tot gevolg.

Bij een grote druppelafstand (30 µm) is daarentegen het solventvolume onvoldoende om kraters te vormen met een aanvaardbare diepte. De grachtbreedte laat zich daarentegen beter controleren. Tot slot visualiseert figuur 4.25c dat omwille van de grote afstand tussen de druppels, deze samenklusteren tot vele grotere druppels langs elkaar. Dit in tegenstelling tot de aaneengesloten gracht bij een lage druppelafstand.

Een belangrijke vaststelling is het verband tussen de druppelafstand en de printtijd. Dit wordt door tabel 4.6 weergegeven.

Tabel 4.6: Printtijd in functie van de druppelafstand.

Druppelafstand [µm]	5	10	15	20	25	30
Printduur [s]	353	134	90	66	53	45

De druppelafstand blijkt een grote invloed te bezitten op de printtijd. Een grote druppelafstand leidt tot kortere printtijden met een verhoging van de productiviteit tot gevolg. Dit is op industrieel vlak interessant. Bijgevolg dient de afweging gemaakt te worden tussen de printtijd en de printkwaliteit. Vervolgens wordt een druppelafstand van 10 µm aangeraden.

Leader bar

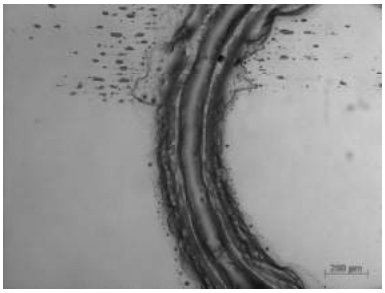
In bijlage tonen figuren A.57 tot en met A.59 de lichtmicroscopie- en profilometriebeelden van diverse lensreservoirs met al dan niet de aanwezigheid van een leader bar. De metingen geschieden met behulp van respectievelijk de Zeiss Axiovert 40 MAT en de Dektak XT. De richtingsdefinities bij de profilometrie zijn analoog aan die getoond in figuur 4.11.

De printerinstellingen bedragen:

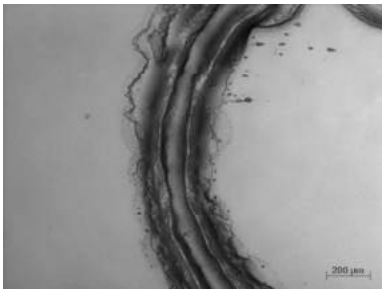
- Aantal spuitmonden: 3 [-],
- Printhoogte: 350 [µm],
- Substraatdikte: 300 [µm],
- Aantal lagen: 3 [-],
- Lijndikte van het patroon: 200 [µm],
- Basisplaattemperatuur: 45 [°C],
- Spuitmondtemperatuur: 38 [°C],
- Druppelafstand: 10 [µm],
- Leader bar: Ja - Nee.

De leader bar is een verticale lijn, die alvorens het gewenste patroon geprint kan worden. Deze functie wordt vaak ingeschakeld om de spuitmonden actief te houden en voor te bereiden op eigenlijke werk. Hierdoor wordt een uniforme druppelsnelheid gehandhaafd. Dit alles om de printkwaliteit te optimaliseren [165].

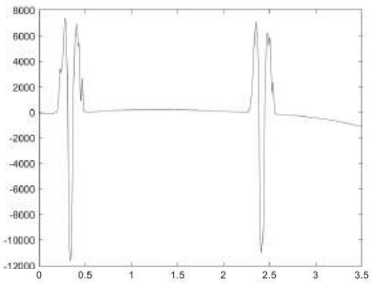
In figuur 4.26 worden de resultaten gebundeld voor verdere analyse.



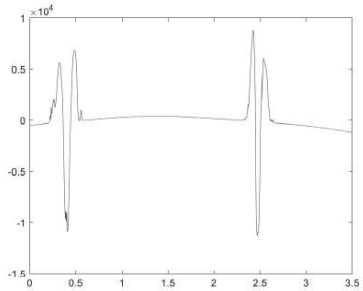
(a) Lichtmicroscopie, LB: Nee



(b) Lichtmicroscopie, LB: Ja



(c) Profilometrie, LB: Nee



(d) Profilometrie, LB: Ja

Figuur 4.26: Lichtmicroscopie: versterking 5 x (boven). Profilometriebeeld met de verticale positie [nm] in functie van de horizontale positie [mm] voor een cirkelvormige krater in PMMA-folie (onder).

Men constateert uiteindelijk geen merkwaardige verschillen door het toepassen van een leader bar. Omwille van het bijkomende verbruik van anisol, wordt daarom het gebruik van een leader bar voor de volgende experimenten afgeraden.

Reproduceerbaarheid van deze techniek

Initieel toonden de printresultaten weinig tot geen reproduceerbaarheid aan. Omwille het belang van een goede reproduceerbaarheid werd naar dit verschijnsel uitvoerig onderzoek gevoerd.

Ten eerste werd de PMMA-folie onder de loep genomen. De voor- en achterzijde van deze folie zijn namelijk voorzien van respectievelijk een blauwe en transparante beschermfolie. Gedacht werd dat de fabrikant op basis van deze kleuren, een verschil in de oppervlaktesamenstelling van het PMMA wilde duidelijk maken. Indien er daadwerkelijk een verschil bestaat en niet consistent op dezelfde zijde wordt geprint, zou dit mogelijk de oorzaak kunnen vormen voor het plotse verschil in printresultaten. Op beide zijden werd daarom de contacthoek van water gemeten en vervolgens een printopdracht uitgevoerd. De hydrofobiciteit van de folie werd gekarakteriseerd met behulp van de contacthoekmeter OCA van Dataphysics. Hierbij werden geen noemenswaardige verschillen vastgesteld. Bijgevolg is de folie niet de oorzaak van dit verschijnsel. Om inconsistentie uit te sluiten werden de volgende experimenten steeds op de blauwe zijde van de folie uitgevoerd.

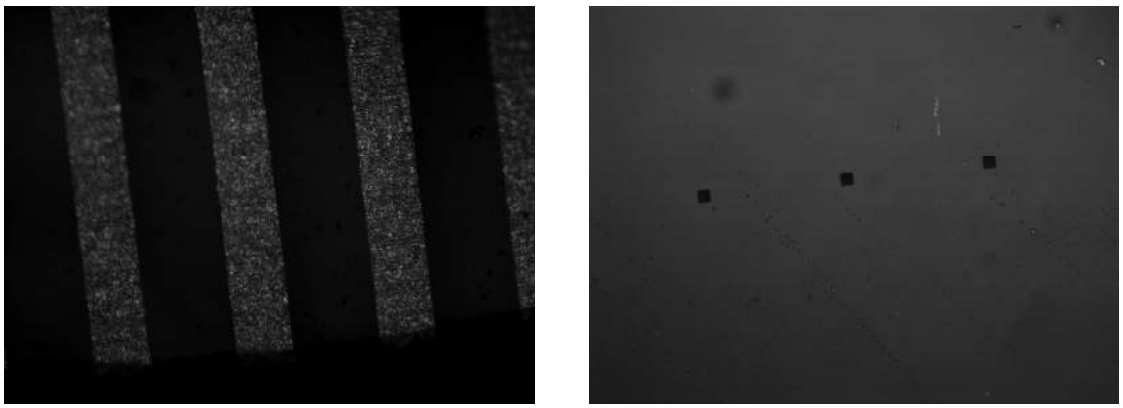
Ten tweede werd de invloed van de labo-afzuiging nader bestudeerd. Hoewel anisol relatief onschadelijk voor de gezondheid is, diende de afzuiging steevast op een hoog toerental ingeschakeld te worden. Dit omwille van de onaangename en indringende geur van anisol.

Het zuigeffect en de hierdoor ontstane luchtverplaatsingen zouden de baan van de afgevuurde druppeltjes uit de spuitmonden kunnen afbuigen met gewijzigde printresultaten tot gevolg. Dit effect werd als volgt bestudeerd. Met de ingebouwde camera van de inkjetprinter werden de zestien spuitmonden van het inktpatronen bekeken. Vervolgens werden alle spuitmonden aangeschakeld en de afzuiging op het maximale toerental ingesteld. De druppels bleven hun rechte baan behouden, waardoor uiteindelijk geen beïnvloeding werd vastgesteld. Om baanafwijkingen ten gevolge van luchtverplaatsingen te vermijden, dient de snelheid van de afgevuurde druppels voldoende hoog te zijn. Daarom werd voor de volgende experimenten steeds een snelheid van minstens 6 m/s ingesteld.

Ten derde werd de invloed van trillingen onderzocht. De aanwezigheid van collega-onderzoekers en de afzuiging in het labo brengen namelijk trillingen over naar de inkjetprinter. Wanneer niemand in het labo aanwezig was en de afzuiging werd uitgeschakeld, bleef het gebrek aan reproduceerbaarheid bestaan.

Ten vierde werd de invloed van de kromming van de PMMA-folie en, daarmee samenhangend, de werkelijke printhoogte geanalyseerd. De inkjetprinter is uitgerust met een vacuümsysteem waarmede het substraat aan de basisplaat wordt vastgezogen tijdens het printen. Door de beperkte afmetingen van de substraten (20 x 20 mm^2) en de geringe dikte van de folie is een goede aanzuiging moeilijk te verwezenlijken. Hierdoor vertoont de folie een lichte kromming bij het printen. Ten gevolge van deze kromming wijken de ingestelde en werkelijke printhoogte van elkaar af. De minimaal instelbare printhoogte, gemeten tussen het bovenvlak van het substraat en de onderzijde van de printkop, bedraagt 250 µm. Verondersteld wordt dat bij deze hoogte de afstand die de druppels dienen af te leggen te groot is, waardoor de fijne anisoldruppeltjes grotendeels verdampen gedurende hun vlucht. Hierdoor zou onvoldoende solvent het substraat bereiken om het koffieringeffect te laten plaatsvinden. Door de kromming van de folie is de werkelijke printhoogte veel kleiner waardoor mogelijk wel goede resultaten bekomen kunnen worden. Deze veronderstelling werd onderzocht door een substraat met grotere afmetingen (20 x 60 mm^2) aan te wenden. Het eigengewicht in combinatie met het grotere aanzuigoppervlak leidde tot een betere aanzuiging en het grotendeels verdwijnen van de kromming. Vervolgens werden zowel printopdrachten op de kleinere als grotere substraten uitgevoerd en dit op verschillende locaties op de folie. Ook hier werden geen significante verschillen vastgesteld. Integendeel, hoewel de foliedikte gelijk is aan 250 µm worden voor de volgende experimenten de printhoogte minimaal op 300 µm ingesteld om eventuele botsingen met het substraat te voorkomen.

Ten vijfde werd de elektronica en de printkop met behulp van de lichtmicroscoop nader onderzocht op mogelijke defecten, die de steeds wijzigende printresultaten kunnen verklaren. Hoewel het gebruik van anisol toegelaten is door de fabrikant [133], is de kans niet onbestaande dat door het anisol de elektronica of printkop beschadigd heeft. Figuur 4.27 toont de microscoopbeelden.

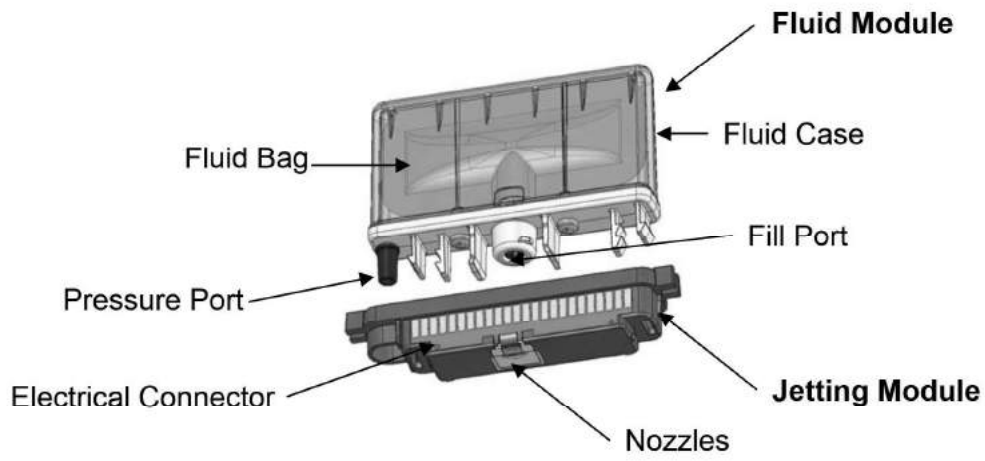


Figuur 4.27: Lichtmicroscopie van de elektroden (links) en spuitmonden (rechts) ter hoogte van de printkop.

Hieruit volgt dat de printkop geen beschadigingen vertoont. De vierkanten spuitmondvorm is intact en de overige oppervlakte is vrij van kraters en andere defecten. Eveneens worden aan de geleiders niets verontrustends vastgesteld.

Tot slot werd ontdekt dat de solventdepositie per tijdseenheid de onbekende schakel vormt voor een goede reproduceerbaarheid. Bij het gebruik van één tot twee spuitmonden werd initieel geen diepe en goede kratervorming vastgesteld. Naarmate het aantal spuitmonden daalt, stijgt de printtijd kwadratisch. Tabel 4.5 geeft de printtijden in functie van het aantal spuitmonden weer.

Omwille van de lange printtijden bij een gering aantal spuitmonden wordt per tijdseenheid een te lage hoeveelheid solvent op de PMMA-folie aangebracht. Het anisol verdampt bij aankomst en krijgt nagenoeg niet de kans om in het PMMA te etsen. Hoewel één spuitmond ontoereinkend is, werden echter na enkele weken goede resultaten, met diepe kraters, vastgesteld bij deze instelling. Dit deed de twijfel ontstaan dat een andere onbekende factor het gebrek aan reproduceerbaarheid veroorzaakte, zoals: een verschil in samenstelling van de folie, een baanafwijking van de druppels door luchtverplaatsingen of trillingen, een afwijkende werkelijke printhoogte ten gevolge van de foliekromming of ten slotte door defecten aan de elektronica en printkop. Dit was echter het gevolg van een stofdeeltje dat deze ene spuitmond op een positieve wijze beïnvloedde waardoor grotere druppels gevormd werden. Hierdoor steeg het druppelvolume en de solventdepositie per tijdseenheid. Deze verandering was door de onderzoeker nauwelijks op te merken met behulp van de voorziene camera op de printkop. Door het verhoogde druppelvolume verdampte het opgebrachte anisol minder snel, waardoor het koffieringeffect zich toonde. Bijkomend neemt het solventvolume bij elke heen-en-weergaande beweging van de printkop toe, dat de kans op het vroegtijdig verdampen van het anisol verlaagt. Op basis van deze vaststelling werd besloten om voor ieder gebruik de printkop met IPA en gedeïoniseerd water te reinigen en te drogen met stikstof op hogedruk. Daarna wordt met behulp van een spuit druk gezet op de luchttoevoer van het inktpatroon totdat het anisol uit de spuitmonden vloeit. Hierdoor wordt de printkop van vastzittende partikels ontdaan. Figuur 4.28 beeldt de luchttoevoer (*Pressure Port*) van het inktpatroon af [133].



Figuur 4.28: Illustratieve weergave van het inktpatroon met aanduiding van de belangrijkste elementen.

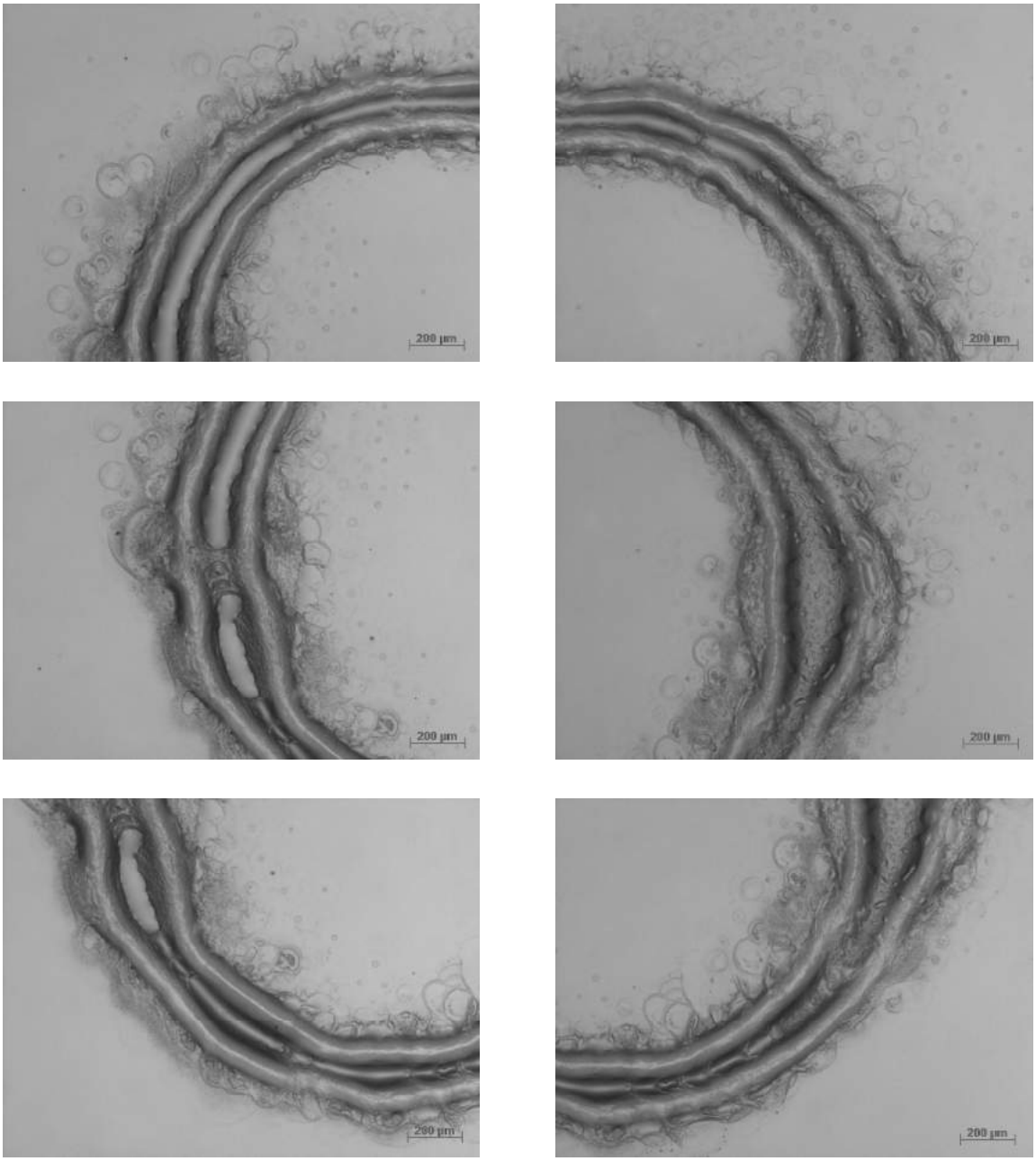
Een gereinigde printkop en een geoptimaliseerde golfvorm laten toe om met zestien spuitmonden tegelijk te printen. Hierdoor wordt een controleerbaar en reproduceerbaar proces bekomen met een optimale solventdepositie per tijdseenheid.

Resultaat: de lensreservoirfolie

Na het bestuderen van de invloed van iedere printparameter op de printkwaliteit en het -resultaat, worden de volgende geöptimaliseerde printerinstellingen bekomen:

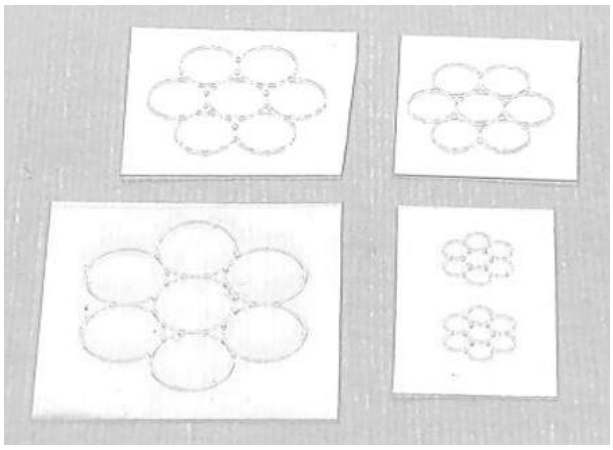
- Aantal spuitmonden: 16 [-],
- Printhoogte: 750 [µm],
- Substraatdikte: 300 [µm],
- Aantal lagen: 10 [-],
- Lijndikte van het patroon: 200 [µm],
- Basisplaattemperatuur: 38 [°C],
- Spuitmondtemperatuur: 38 [°C],
- Druppelafstand: 10 [µm],
- Leader bar: Nee.

Figuur 4.29 toont een lichtmiscroscoopbeeld van een ringvormig lensreservoir, dat bekomen werd op basis van deze printerinstellingen.



Figuur 4.29: Lichtmicroscopie (versterking: 5x) van een ringvormige krater in PMMA-folie door het inkjetetsen met de geöptimaliseerde printerinstellingen.

Figuur 4.29 toont een microstructuur bestaande uit een aangesloten gracht met een randhoogte van $\pm$ 15 µm. De mogelijkheid tot verdere optimalisatie wordt niet uitgesloten, maar het resultaat voldoet aan de eisen om een functionele lensmatrixfolie te creëren. Deze instellingen worden vervolgens aangewend voor de productie van verscheidene lensreservoirfolies, die zich onderscheiden door hun reservoirdiameter. Figuur 4.30 toont deze folies.



Figuur 4.30: Geprinte lensreservoirs in PMMA-folie: wijzerzin ⌀ 5, 4, 2, 7 mm.

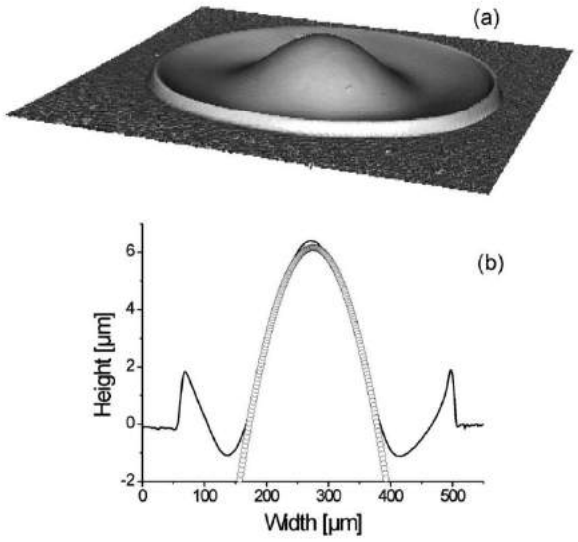
Nadien worden deze lensreservoirfolies van lenzen voorzien. Het bloemvormige patroon, bestaande uit een hexagonale rangschikking van zeven reservoirs, werd met een welbepaalde intentie geprint. Wanneer deze patronen namelijk opgevuld worden met lenzen en de middelste lens op een OLED-pixel geplaatst wordt, zal de beïnvloeding van het uitgestraalde licht van deze pixel door dit patroon hetzelfde zijn als voor een folie die volledig bedekt is met lenzen. Dit laat toe om in de onderzoeksfase sneller en efficiënter te werk te gaan, maar overigens wordt hierdoor spaarzamer omgesprongen met de benodigde grondstoffen.

4.2.3 Dubbelsolventsysteem

Uit de voorgaande paragrafen blijkt dat het koffieringeffect steeds dezelfde doorsnedevorm oplevert, namelijk een diep dal in het centrum met aan weerszijden een hoge opstaande rand.

Dit effect kan echter omgekeerd worden door gebruik te maken van een dubbelsolventsysteem of met andere woorden een mengsel van twee solventen. Karabasheva et al. [7] bereidde een dubbelsolventsysteem op basis van ethylacetaat (T_s = 77,1 °C, γ = 23,39 mN/m) en acetofenon (T_s = 220 °C, γ = 39,04 mN/m). Grimaldi et al. [159] wendde daarentegen een mengsel van tolueen (T_s = 110,6 °C, γ = 28,53 mN/m) en N-methyl-2-pyrrolidon (T_s = 202 °C, γ = 40 mN/m) aan. Na analyse van voorgenoemde stoffen wordt vastgesteld dat de minst vluchtige stof de hoogste oppervlaktespanning bezit. Deze eigenschap is noodzakelijk voor een goede werking. Aangezien de toegelaten vloeistoffen in de inktpatronen [133] eerder beperkt is, wordt geopteerd voor de combinatie van anisol (T_s = 153,8 °C, γ = 35 mN/m) met isopropanol (IPA) (T_s = 82,6 °C, γ = 23 mN/m). Merk op dat anisol de minst vluchtige stof met de grootste oppervlaktespanning is. Beide stoffen zijn veilig te gebruiken in het labo.

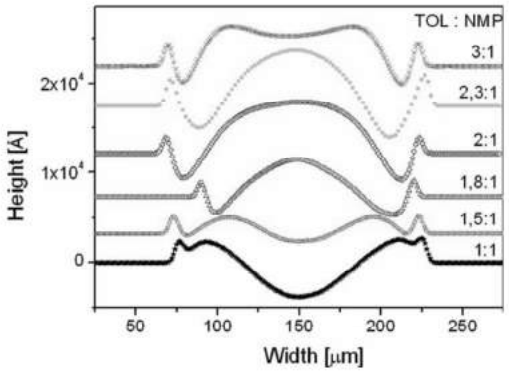
Vervolgens wordt dit mengsel op de folie aangebracht met de inkjetprinter of een micropipet. In de testfase van dit concept werd binnen deze masterproef gebruik gemaakt van een micropipet. Nadien lost het PMMA in deze solventdruppel op. Vanwege de hoge verdampingssnelheid van het meest vluchtige solvent, IPA, aan de rand van de druppel, stijgt hier lokaal de concentratie aan het minst vluchtige solvent, anisol. De hoge oppervlaktespanning van anisol doet een Maragoni stroming ontstaan van het druppelcentrum naar de randen. Hierdoor neemt de IPA concentratie ter hoogte van het centrum toe, waardoor het PMMA zich hier opeenstapelt [159]. Uiteindelijk wordt de kratervorm uit figuur 4.31 bekomen [7].



Figuur 4.31: Elektronenmicroscoop- en profilometriebeeld voor het inkjetetsen van een dubbelsolventsysteem.

De kenmerkende kratervorm bij het koffieringeffect met het centrale diepe dal, heeft plaats gemaakt voor een heuvel. De vorm is afhankelijk van de chemische en fysische eigenschappen van de solventen zoals het kookpunt en de oppervlaktespanning, maar voornamelijk van de volumeverhouding van beide.

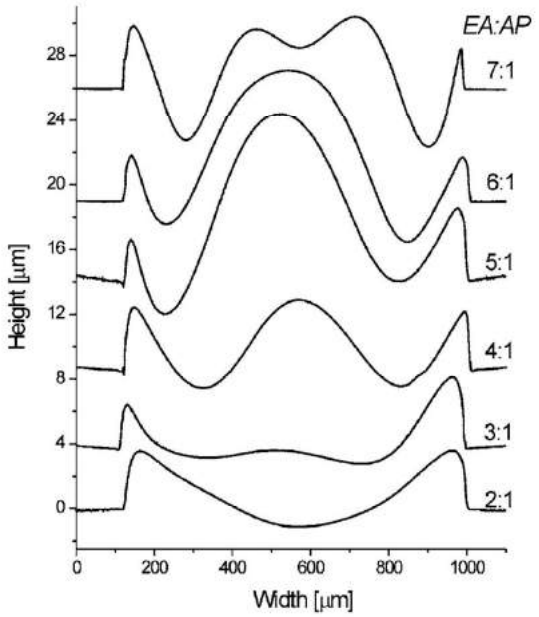
Het wijzigen van deze volumeverhouding leverden voor Grimaldi et al. [159] de volgende resultaten op, figuur 4.32.



Figuur 4.32: Profilometriebeelden voor het inkjetetsen van diverse volumeverhoudingen van het TOL:NMP-dubbelsolventsysteem.

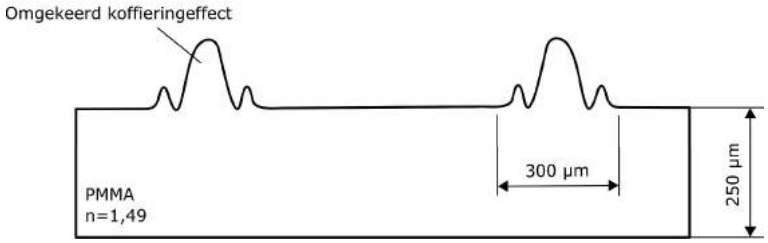
Bij een volumeverhouding van 2,3:1 (TOL:NMP) werd met behulp van tolueen en N-methyl-2-pyrrolidon een parabolische kratervorm bekomen. Zij zetten deze convexe lensvorm in ter verhoging van de efficiëntie van een OLED. De eerste resultaten toonden een stijging van 4 % aan, ten gevolg van de reductie van totale interne reflectie aan de substraat-omgevinginterface.

Ook Karabasheva et al. [7] onderzochten de invloed van de volumeverhouding. Ditmaal werd bij een samenstelling van 5:1 (EA/AF) het optimale resultaat bekomen, figuur 4.33.



Figuur 4.33: Profilometriebeelden voor het inkjetetsen van diverse volumeverhoudingen van het EA/AF-dubbelsolventsysteem.

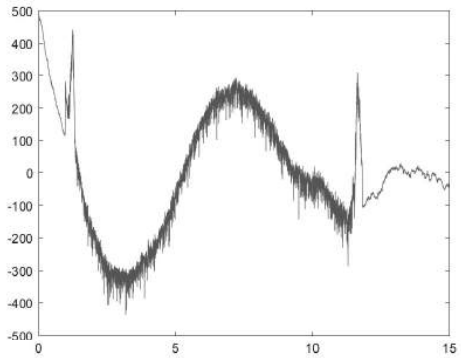
Deze parabolische kratervormen werden tevens ingezet voor de productie van asferische lenzen. In deze masterproef worden hiervoor twee mogelijk toepassingen gezien. Ten eerste kunnen deze vormen eveneens dienst doen als asferische lenzen voor het verhogen van de efficiëntie en het collimeren van het stralingspatroon van gepixelde OLED's. Daarnaast kan de vorm van de ringvormige randen uit paragraaf 4.2.2 gewijzigd worden in het volgende beeld, figuur 4.34.



Figuur 4.34: Kratervorm ten gevolge van het inkjetetsen in een ringvormig patroon met een dubbelsolventsysteem.

Uit de voorgenoemde onderzoeken volgt dat de meest vluchtige stof met de laagste oppervlaktespanning, steeds het grootste aandeel krijgt in het dubbelsolventsysteem. Dit valt te verwachten aangezien deze stof voornamelijk de centrale heuvel veroorzaakt. Omwille van deze reden worden in deze masterproef de volgende volumeverhoudingen van IPA/anisol onderzocht: 0/1, 1/1, 2/1, 3/1, 4/1, 5/1, 6/1, 7/1. Van deze samenstellingen worden druppels met een volume van 5 µl op de PMMA-folie gedruppeld door middel van een micropipet (bereik: 0,5 µl - 10 µl). In bijlage tonen de figuren A.60 tot en met A.61 de profilometriemetingen, die bekomen werden met de Dektak XT.

Voornamelijk de volumeverhouding 4/1 toont een gelijkaardige vorm aan de resultaten van Grimaldi en Karabasheva. De doorsnedeweergave wordt in figuur 4.35 gevisualiseerd.



Figuur 4.35: Profilometriebeelden met de verticale positie [nm] in functie van de horizontale positie [mm] voor het inkjetetsen van het IPA/anisol-dubbelsolventsysteem (4/1).

De aspect ratio van deze vorm is echter veel te laag om toegepast te worden als reservoirrand of lens. Deze grootheid wordt gedefinieerd als de verhouding van de heuvelhoogte tot de -breedte en bedraagt 600 nm / 8 mm = 75.10^{-6}. Deze lage waarde valt mogelijk te verklaren aan de beperkte oplosbaarheid van PMMA in IPA. Aangezien deze stof voor het merendeel aanwezig is in het dubbelsolventsysteem, wordt een beperkte heuvelopbouw verwacht. Op basis hiervan

wordt deze techniek voorlopig als ongeschikt bevonden voor de beoogde toepassingen in deze masterproef.

4.2.4 Overige technieken

In deze masterproef wordt voornamelijk gefocust op het inkjetetsten van een PMMA-folie om zo de gewenste reservoirvorm te verkrijgen. Dit is een subtractief proces. Men kan echter ook de inkjetprinter op een additieve wijze aanwenden. Hiervoor wordt een inkt bereid van een polymeer in een solvent. PMMA in anisol is een mogelijkheid. Daarna worden de eerder behandelde bloemvormige patronen afgezet op bijvoorbeeld een glazen substraat. Na het verdampen van het solvent blijf het polymeer volgens dit patroon over. Het herhaaldelijk over elkaar printen levert uiteindelijk lensreservoirs met opstaande randen op, waarbij het centrum onaangetast blijft. Deze nieuwe inkt vereist echter een uitgebreide optimalisatie van de golfvorm voor het aansturen van de piëzo-elektrische elementen in de spuitmonden.

4.3 Inkjetprinten van sferische lenzen

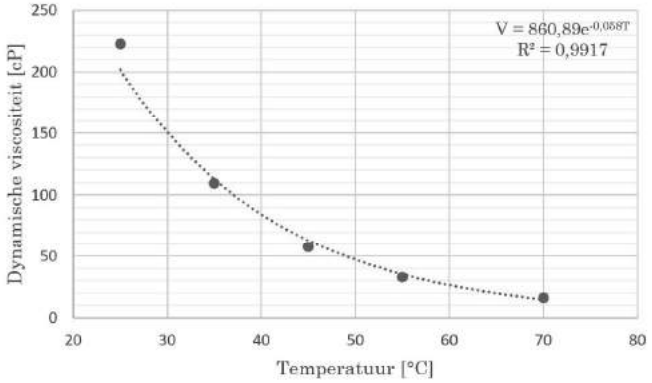
Tot slot worden de geproduceerde lensreservoirfolies uit paragraaf 4.2.2 van lenzen voorzien. Nadien worden ze op een gepixelde OLED bevestigd en gekarakteriseerd met behulp van een integrerende sfeer.

Voor de lensvloeistof wordt NOA geselecteerd. De producent Norland beschikt over meer dan 50 verschillende lensvloeistoffen, toegespitst op optische toepassingen. Deze verschillen van elkaar op het gebied van viscositeit, substraattype en brekingsindex. Afhankelijk van het type, hard de vloeistof uit onder invloed van UV-licht of zichtbaar licht. Meer bepaald gaat de keuze uit naar NOA 74. Dit materiaal bezit, volgens de fabrikant, een brekingsindex van 1,52 en een viscositeit van 80 cP - 95 cP bij 25 °C [154]. De viscositeit van NOA 74 kan eventueel verlaagd worden door het op te lossen in anisol voor een beter printgedrag. Nadien harden de microlenzen uit onder invloed van UV-licht.

4.3.1 Depositie van lenzen

Initieel werd gepland om de lenzen aan te brengen met behulp van de *drop-on-demand*-inkjetprinter (DMP-2850) van de fabrikant Fujifilm Dimatix. De fabrikant van de inkjetprinter raadt echter een inktviscositeit tussen 2 cP en 30 cP aan voor een optimaal printgedrag [133]. NOA 74 bezit volgens de productspecificaties een viscositeit van 90 cPS bij 25 °C. Door eventueel een kleine hoeveelheid solvent toe te voegen aan de inkt en de spuitmondtemperatuur licht te verhogen, kan de gewenste viscositeit bereikt worden. Chen et al. [120] constateerde dat NOA het beste opgelost wordt in een niet-vluchtig solvent om het inkjetprinten mogelijk te maken. Vluchtige solventen zoals tolueen en aceton verdampen ter hoogte van de spuitmonden met een blokkade tot gevolg. Daarom is anisol wederom voor deze taak aangewezen. Uit reologiemetingen blijkt daarentegen dat de viscositeit van NOA 74 bij kamertemperatuur vele malen hoger licht, namelijk 223 cP. Mogelijk zou dit het gevolg kunnen zijn van het vroegtijdig stollen van het materiaal door opname van het UV-licht afkomstig van de TL-lampen in het labo.

Deze waarde vereist echter een veel hogere toename van de spuitmondtemperatuur om een viscositeit tussen 2 cP en 30 cP te verkrijgen. Figuur 4.36 visualiseert het verband tussen de viscositeit van NOA 74 en de temperatuur. Deze meting wordt uitgevoerd met behulp van een reometer.



Figuur 4.36: Dynamische viscositeit in functie van temperatuur voor NOA 74.

Figuur 4.36 geeft bijgevolg een exponentieel verband aan tussen de dynamische viscositeit en de temperatuur voor NOA 74. Bij een temperatuur van 70 °C wordt een aanvaardbare viscositeit bekomen. De inkjetprinter is tevens in staat om deze temperatuur voor zijn inktpatronen in te stellen. Dit is niet optimaal. Idealiter dient de viscositeit van de inkt binnen het opgegeven bereik van de fabrikant te verkeren bij inbreng in het inktpatroon. De temperatuurinstelling van de spuitmonden dient slechts om het printgedrag te optimaliseren in plaats van het drastisch verlagen van de viscositeit. Overigens heeft bij 70 °C enkel de inkt in de buurt van de spuitmonden een goede viscositeit. De inkt verder weg bezit een veel hogere waarde, dat tot problemen kan leiden.

Bijgevolg dient de optimale concentratie van NOA 74 in anisol onderzocht te worden voor het verkrijgen van een viscositeitswaarde van nagenoeg 30 cP. Het variëren van de spuitmondtemperatuur maakt verdere *fine-tuning* mogelijk. Deze nieuwe inkt vereist een uitgebreide optimalisatie van de printparameters en golfvorm voor het aansturen van de spuitmonden. Omwille van de beperkte tijdspanne van één jaar werd voorlopig een zijspoor ingeslagen.

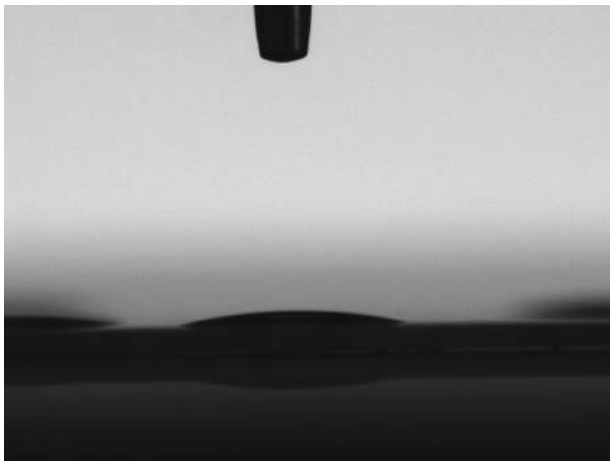
Het depositiesysteem van de contacthoekmeter, OCA van Dataphysics, gelijkt namelijk sterk op het gehanteerde inkjetsysteem uit [6, 7, 159]. Bijgevolg kan de contacthoekmeter gedeeltelijk als een inkjetprinter beschouwd worden, zodat alsnog aan de doelstelling voldaan wordt. Deze contacthoekmeter bestaat uit een lineaire actuator waartussen een glazen spuit met inkt wordt ingebracht. Door de translatie van de actuator wordt de spuit verticaal ingedrukt en kunnen volumes vanaf 0.1 µl afgezet worden.

Deze spuit wordt vervolgens boven de lensreservoirs gepositioneerd, waarna deze met een druppeltje NOA 74 uit de contacthoekmeter gevuld worden. Na inbreng van NOA 74 bleef deze vloeistof uit de spuit vloeien, waardoor een nauwkeurige depositie onmogelijk was. Uiteindelijk werd ook deze techniek voorlopig afgewezen.

Tot slot werd geopteerd om de lenzen aan de hand van een micropipet op te brengen. Het gehanteerde exemplaar heeft een bereik van 0.5 µl tot 10 µl. Daarnaast vormt de viscositeit van 223 van NOA 74 geen probleem voor dit toestel. Het voordeel van deze techniek is het feit dat de oppervlaktespanningseffecten zorgen voor een bolle lens met een zéér lage ruwheid. Bij het gebruik van matrijzen is nadien echter het polijsten van de lenzen noodzakelijk, dat bijgevolg vermeden wordt.

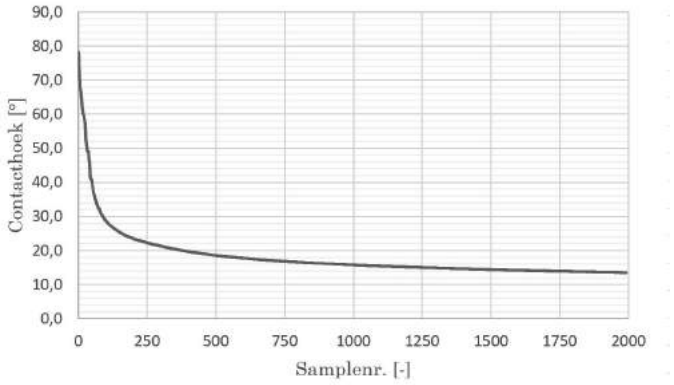
4.3.2 Bepalen van de reservoirsdimensies

Om het correcte lensvolume en de reservoirdiameter te bepalen, dient eerst de contacthoek van NOA 74 op PMMA geanalyseerd te worden. Figuur 4.37 toont een vloeibare NOA-druppel op de PMMA-folie.



Figuur 4.37: Vloeibare NOA 74-druppels op de PMMA-folie.

Het verloop van de contacthoek in functie van de tijd wordt in figuur 4.38 weergegeven.

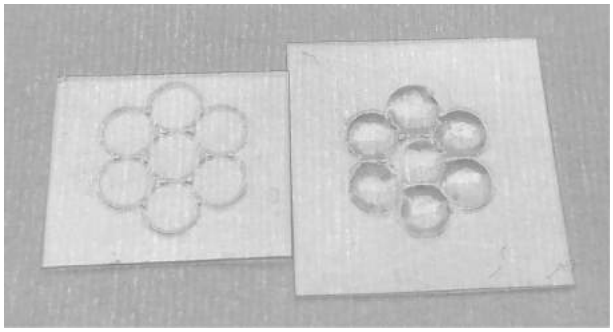


Figuur 4.38: Contacthoekverloop in functie van de tijd voor NOA 74 op PMMA-folie.

Vastgesteld wordt dat de contacthoek uiteindelijk naar een waarde van 13,5° stagneert.

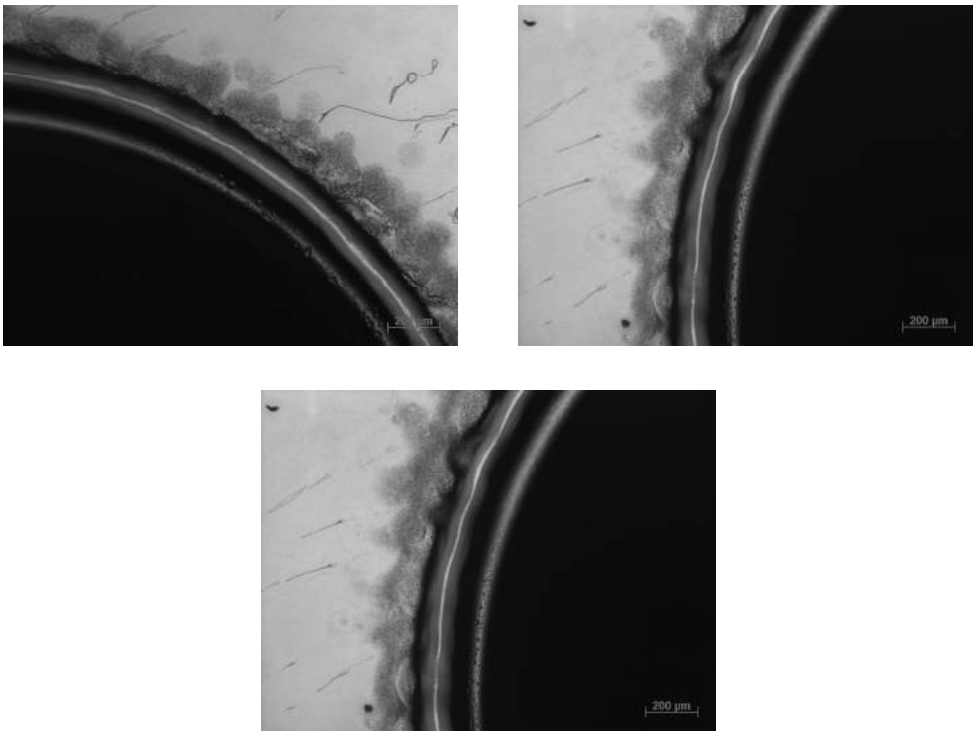
Uit berekeningen volgt dat een lensvolume van $\pm$ 0.1 µl benodigd is bij een reservoirdiameter van 2 mm en een contacthoek van 13,5°. Dit volume is kleiner dan de ondergrens van de micropipet ($<$ 0.5 µl). Bijgevolg wordt het lensvolume vastgelegd op 0.5 µl en de reservoirdiameter op basis hiervan berekend. De diameter dient hierbij 3,5 mm á 4 mm te bedragen. Een volume van $\pm$ 0.1 µl kan daarentegen wel door middel van het depositiesysteem van de contacthoekmeter afgezet worden, maar omwille van de voorgenoemde reden is dit systeem voorlopig onbruikbaar. Figuur 4.39 (links) visualiseert een lensreservoirfolie met een reservoirdiameter van 4 mm.

Vervolgens worden deze reservoirs met lensvloeistof opgevuld waarvan figuur 4.39 (rechts) het eindresultaat toont, een lensmatrixfolie.



Figuur 4.39: Lensreservoirfolie ⌀4 (links), lensmatrixfolie (rechts).

Figuur 4.40 toont enkele lichtmicroscopiebeelden waaruit vastgesteld wordt dat de lensreservoirs hun beoogde functie uitoefenen, namelijk het vasthouden van de vloeibare lenzen.

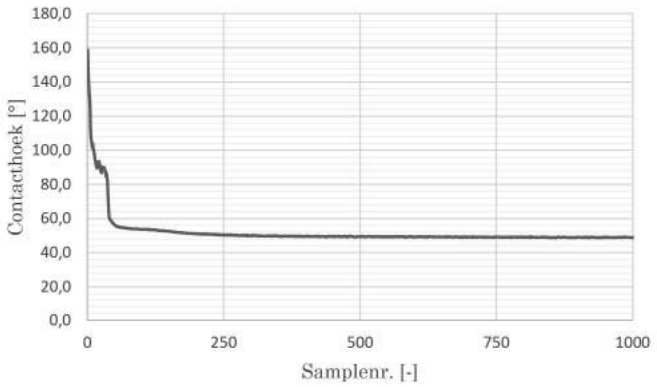


Figuur 4.40: Lichtmicroscopie van lensreservoirs gevuld met vloeibare lenzen: versterking 5 x.

Het uitharden van de lenzen geschiedt nadien door middel van een laagvermogen *black light* voor een tijdsduur van 30 minuten.

In de toekomst kan de lensdiameter verder verkleind worden door een hydrofobe coating aan te brengen over de PMMA-folie. Cytop is hiervoor een geschikte kandidaat. Bijkomend is Cytop tegen vele stoffen chemisch resistent, dat de PMMA-folie bijkomend beschermt. Een grotere contacthoek zorgt namelijk voor een bollere lens en daardoor voor eenzelfde volume op een kleinere oppervlakte. Bijkomend neemt hierdoor de efficiëntieverhogende werking van de lenzen toe, met een maximum bij 90° [18]. Bij wijze van *proof of concept* werd de PMMA-folie van een polyvinylideenfluoride (PVDF) coating voorzien. Nadien werd de contacthoek van NOA 74 op deze laag opgemeten. De contacthoek stijgt na toepassing van deze coating van

13,5° naar 49,1°. Figuur 4.41 beeldt het contacthoekverloop in functie van de tijd af voor een NOA 74-druppel op een PMMA-folie met een PVDF-coating.

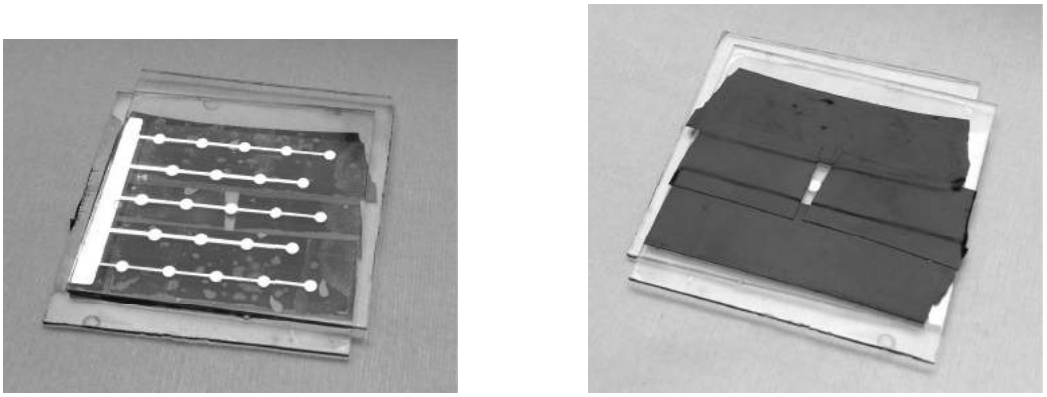


Figuur 4.41: Contacthoekverloop in functie van de tijd voor NOA 74 op PMMA-folie met PVDF-coating.

Daarnaast werd vastgesteld dat met oppervlaktespanningseffecten de contacthoek van de lenzen gecontroleerd kan worden. Tussen de randhoogte, de reservoirdiameter, het lensvolume, de oppervlaktespanning van de lensvloeistof en de contacthoek van de lens kan een verband gezocht worden. In [166] werd dit verschijnsel eerder bestudeerd. Het uitsluitende gebruik van een inkjetprinter en de afwezigheid van een hydrofobe coating, maakt deze techniek interessant. Dit onderzoek kan hopelijk een aanzet vormen voor verder onderzoek naar dit verschijnsel. Vanuit profilometriemetingen wordt geconstateerd dat door het aanbrengen van de vloeibare lensdruppel in het reservoir, de contacthoek stijgt naar 18°ten opzichte van de eerder behaalde 13,5° op een vlak substraat.

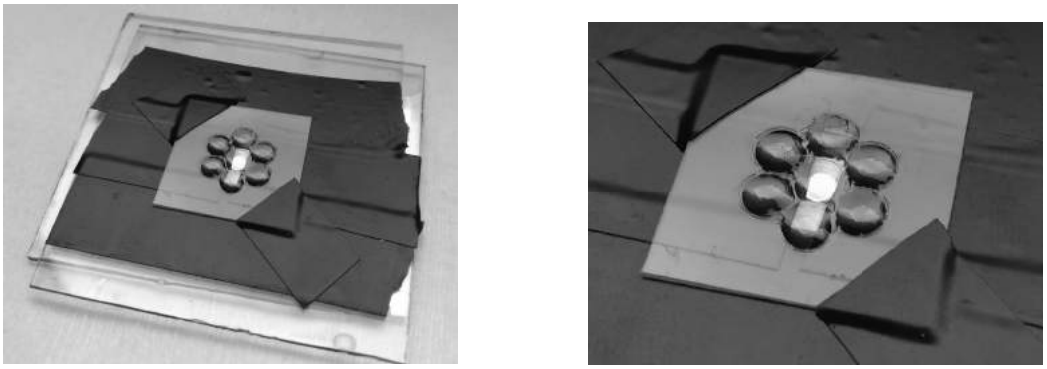
4.3.3 Lichtkarakterisatie van de lensmatrixfolie

Vervolgens wordt de ontwikkelde lensmatrixfolie gekarakteriseerd. Hiervoor wordt gebruik gemaakt van een gepixelde OLED, waarvan één pixel afgezonderd wordt door de overige af te plakken met ondoorschijnende zwarte tape. De pixeldiameter bedraagt 2 mm. Figuur 4.42 toont de OLED voor en na de uitgevoerde modificatie.



Figuur 4.42: Weergave van de OLED, voor (links) en na (rechts) de isolatie van één pixel door middel van zwarte tape.

De lensmatrixfolie en OLED dienen echter via een optisch adhesief aan elkaar bevestigd te worden. Indien hier niet aan voldaan wordt, blijft er een luchtspleet tussen beide bestaan. Deze luchtspleet leidt tot overmatige totale interne reflectie, waardoor het gebruik van een lensmatrixfolie zinloos wordt. Figuur 4.43 visualiseert een OLED met bevestiging van de ontwikkelde lensmatrixfolie.



Figuur 4.43: OLED met bevestiging van de ontwikkelde lensmatrixfolie.

Om de voorgaande vaststelling te beamen werden de lichtkarakterisaties van de lensmatrixfolie met en zonder optisch adhesief uitgevoerd. Voor dit adhesief werd tevens NOA 74 aangewend. De lichtmetingen werden bekomen via een integrerende sfeer. Tabel 4.7 toont de resultaten van deze karakterisatie. Enerzijds werd de invloed van de lensmatrixfolie onderzocht, anderzijds werd de invloed van het optisch adhesief bestudeerd.

Tabel 4.7: Lichtkarakterisatie van de ontwikkelde lensmatrixfolie, met en zonder optische adhesief, met en zonder lensmatrixfolie.

-	Spanning	Stroom	Elektrisch vermogen	Verlicht-ingssterkte	Lichtstroom	Specifieke lichtstroom	η-stijging
-	V	A	W	lux	lm	lm/W	%
ZOA ZL	4,00	$4{,}96.10^{-3}$	$19{,}84.10^{-3}$	34,25	$2{,}69.10^{-3}$	0,136	/
ZOA ML	4,00	$4{,}62.10^{-3}$	$18{,}48.10^{-3}$	25,90	$2{,}03.10^{-3}$	0,110	-19,0
MOA ZL	4,00	$35{,}12.10^{-3}$	$245{,}84.10^{-3}$	313,28	$24{,}6.10^{-3}$	0,100	/
MOA ML	4,00	$34{,}90.10^{-3}$	$244{,}30.10^{-3}$	378,65	$29{,}7.10^{-3}$	0,122	**+21,7**

Met:

- ZOA: zonder optische adhesief,
- MOA: met optische adhesief,
- ZL: zonder lensmatrixfolie,
- ML: met lensmatrixfolie.

De metingen zonder optische adhesief werden bij 4 V bekomen, deze met optische adhesief werden bij 7 V uitgevoerd.

Uit tabel 4.7 volgt dat door het implementeren van de lensmatrixfolie op de OLED, zonder toepassingen van een optisch adhesief, de specifieke lichtstroom met 19% daalt. Dit valt mogelijk te wijten aan overmatige TIR bij de overgang van het licht tussen beide. Daarnaast leidt het implementeren van de ontwikkelde lensmatrixfolie met een optische adhesief tot een stijging van de specifieke lichtstroom of *luminous power efficacy* met 21,68 %. De verlichtingssterkte en lichtstroom nemen daarentegen met 20,87 % en 20,89 % toe. Na optimalisatie van de contacthoek van de lenzen, op basis van de voorgestelde technieken, wordt verwacht om de doelstelling van 50 % te bereiken en zelfs te overschrijden.

Hoofdstuk 5

Conclusie en vooruitblik

Deze masterproef ontwikkelt een kostenefficiënte lensmatrixfolie op basis van inkjetprinten ter optimalisatie van de efficiëntie en het stralingspatroon van gepixelde OLED's.

Vanuit een uitgebreide literatuurstudie naar efficiëntieverhogende technieken van de OLED volgt dat lenzen hiervoor de meest belovende en effectiefste methode vormt. Zij worden namelijk gekenmerkt door een hoge mate van flexibiliteit, aangezien lenzen op de achterzijde van het substraat aangebracht worden zonder een aanpassing van het productieproces van de OLED uit te voeren [17, 18, 82].

De productie van lenzen geschiedt vaak via dure, complexe en arbeidsintensieve technieken, die weinig flexibel en ongeschikt zijn voor massaproductie. Dit staat het succes en een bredere implementatie van de OLED in de weg.

Bijgevolg wordt het inkjetprinten nader bestudeerd. Deze methode is namelijk relatief goedkoop en eenvoudig. Daarnaast is een hoge mate van flexibiliteit aanwezig, omdat door het aanpassen van het printprogramma een volledig nieuw lensontwerp bekomen wordt. Dit maakt deze techniek voor massaproductie geschikt.

De eerste stap in het ontwikkelingsproces bestaat uit het poneren van een ontwerp. Vanuit de literatuurstudie komen twee ontwerpen voort. Het eerste lensontwerp bestaat uit een module waarbij de kromming en optische eigenschappen van de lens variabel ingesteld worden door middel van elektrobevochtiging. Hierdoor wordt aan de gebruiker de mogelijkheid geboden om de uitstralingshoek van zijn verlichting te wijzigen. Dit betekent een groot voordeel voor de toepassing van OLED's in volledig bedekkende plafondverlichting. Intrinsiek worden OLED's namelijk gekenmerkt door een Lambertiaans of uniform stralingspatroon, dat een vage achtergrondverlichting met vele schaduweffecten oplevert. Bij het gebruik van een werkblad is het echter wenselijk om deze plaats lokaal sterker te verlichten. De ontworpen variabelelensmodule beantwoordt aan deze vraag. Omwille van de vele nieuwe elementen in dit ontwerp en het beperkte tijdsbestek van één jaar wordt in deze masterproef op het tweede ontwerp gefocust. Dit ontwerp bestaat uit een lensmatrixfolie, die volledig vervaardigd wordt op basis van inkjetprinten. In een folie worden allereerst ringvormige patronen geïnkjetetst. Het koffieringeffect leidt vervolgens tot het ontstaan van reservoirs in deze folie. In deze reservoirs worden nadien vloeibare lensvloeistofdruppels voorzien. Na het uitharden van deze druppels onder invloed van UV-licht wordt een lensmatrix bekomen.

De lensreservoirs vormen een bassin voor de lenzen en voorkomen dat de vloeibare lenzen samenvloeien bij het aanbrengen op het substraat. Hiervoor is een etsbare basislaag noodzakelijk. Daarom wordt allereerst het creëren van een PMMA-film onderzocht door middel van ultrasoon spraycoaten, spincoaten en de combinatie van beide technieken. De hiermee vervaardigde lagen vertonen enerzijds een te hoge oppervlakteruwheid en anderzijds een te kleine

laagdikte. Bijgevolg zijn deze technieken voorlopig ongeschikt. Uiteindelijk wordt geopteerd voor een flexibele PMMA-folie als basis voor het inkjetetsen.

Vervolgens worden diverse etspatronen geanalyseerd voor het verkrijgen van de gewenste reservoirvorm. Het gehanteerde etsmiddel is anisol. Het printen van cirkelvormige patronen leidt tot een grillige kratervorm met een te hoge ruwheid in het centrum en is daardoor onbruikbaar. Het inkjetetsen van ringvormige patronen levert daarentegen wel de gewenste resultaten op. Dit patroon biedt overigens de volgende voordelen ten opzichte van zijn cirkelvormige variant:

- de vorm van het reservoir is eenvoudiger te controleren, waardoor cirkelvormige, ellipsvormige, vierkanten en zeshoekige reservoirs geprint kunnen worden. Hierdoor komen nieuwe toepassingen vrij zoals microreactoren [164],
- zoals reeds eerder aangehaald wordt de oppervlakteruwheid van de folie niet gewijzigd ter hoogte van het centrum, waardoor de optische kwaliteit ongewijzigd blijft,
- vanwege de kleinere printoppervlakte, namelijk een ring in plaats van een volle cirkel, wordt het aangebrachte anisolvolume gereduceerd, dat een efficiënter gebruik van grondstoffen toelaat,
- daarnaast impliceert een kleinere printoppervlakte een daling van de printtijden en bijgevolg een verhoging van de productiviteit,
- tot slot bestaat de mogelijkheid om dunnere randen te printen, waardoor hogere fill factoren mogelijk worden.

Voor het ringvormige patroon worden de optimale printerinstellingen bepaald door zeven parameters te variëren en de printresultaten onder de loep te nemen. Op basis van deze instellingen worden lensreservoirfolies geprint, bestaande uit een hexagonale rangschikking van ringvormige reservoirs.

Bijkomend wordt de invloed van een dubbelsolventsysteem op het koffieringeffect bestudeerd. De typerende kratervorm van dit effect wordt namelijk gewijzigd door het combineren van twee solventen. Het dubbelsolventsysteem IPA/anisol op PMMA-folie vertoont overeenkomstige kratervormen aan die uit de literatuur. De lage aspect ratio maakt deze microstructuren echter ongeschikt als reservoirrand voor het samenvloeien van de vloeibare lenzen te voorkomen.

Tot slot vindt de depositie van lenzen in de reservoirs plaats. De lensvloeistof bestaat uit NOA 74, een optisch adhesief dat uithard onder invloed van UV. Inkjetprinten is voor deze taak aangewezen. Door middel van reologiemetingen wordt echter vastgesteld dat NOA 74 een hoge viscositeit bezit. Deze waarde kan verlaagd worden door NOA 74 op te lossen in anisol en de spuitmondtemperatuur van het inktpatroon te verhogen. Dit vergt een uitgebreide optimalisatie van de printparameters en de golfvorm voor het aansturen van de spuitmonden. Omwille van de beperkte tijdspanne van één jaar wordt voorlopig gebruik gemaakt van een micropipet.

Deze micropipet bezit een ondergrens van 0.5 µl. Uit metingen blijkt dat de contacthoek van NOA 74 op PMMA stagneert naar 13,5°. Op basis van deze gegevens wordt de benodigde reservoirdiameter op 4 mm vastgelegd. Deze afmetingen kunnen gereduceerd worden door het toepassen van een hydrofobe coating. Een bollere lens bezit namelijk een kleinere basisoppervlakte voor eenzelfde druppelvolume. Een proof of concept op basis van een PVDF-coating

toont een contacthoekstijging van 13,5° tot 49,1° aan. Bijkomend wordt vastgesteld dat door het inbrengen van de lensvloeistof in de reservoirs, de contacthoek toeneemt van 13,5° tot 18°. Dit is het gevolg van oppervlaktespanningseffecten. Tussen de randhoogte, de reservoirdiameter, het lensvolume, de oppervlaktespanning van de lensvloeistof en de contacthoek van de lens bestaat bijgevolg een verband. Het variëren van deze parameters maakt het controleren van de lenshoek mogelijk. Dit vormt een mogelijke stimulans voor toekomstig academisch onderzoek. Na het uitharden van de vloeibare lenzen wordt uiteindelijk de lensmatrixfolie bekomen.

De karakterisatie van deze lensmatrixfolie geschiedt aan de hand van een integrerende sfeer en een gepixelde OLED. De lensmatrixfolie en OLED dienen echter via een optisch adhesief aan elkaar bevestigd te worden. Indien hier niet aan voldaan wordt, blijft er een luchtspleet tussen beide bestaan. Deze luchtspleet leidt tot totale interne reflectie, waardoor het gebruik van een lensmatrixfolie zinloos wordt. Om deze vaststelling te beamen worden de lichtkarakterisaties van de lensmatrixfolie met en zonder optisch adhesief uitgevoerd. Voor dit adhesief wordt tevens NOA 74 aangewend. De resultaten tonen aan dat bij het gebrek aan een optisch adhesief, de specifieke lichtstroom met 19% daalt. Met optische adhesief en lensmatrixfolie stijgt daarentegen de specifieke lichtstroom en verlichtingsterkte met respectievelijk 21,68 % en 20,87 %. Na optimalisatie van de contacthoek van de lenzen tot 90° wordt verwacht de vooropgesteld 50 % efficiëntiestijging te bereiken en zelfs te overstijgen.

Naast het gebruik bij OLED's tonen de elementen uit dit onderzoek, zoals de lensreservoirs en de lensmatrixfolie, eveneens potentieel binnen andere domeinen van de opto-elektronica en de microchemie. Zo vinden lensmatrices bijkomend hun toepassing in onder meer vezeloptica, camera's, projectoren, fotokopieerapparaten, laserprinters, beeldverwerking, tv's, computers, fotovoltaïsche cellen, Hartmann-Shacksensoren, lasertechnologie etc. [7, 118, 135, 136, 167]. De reservoirs en grachtvormige structuren kunnen daarentegen aangewend worden in biochips, microfluïdica, microreactoren en andere toepassingsgebieden [164, 166, 168, 169]

Bibliografie

[1] Vincent H. Onderzoek en ontwikkeling van een efficiënte OLED-module met een gebundeld stralingspatroon.

[2] SMTnet. Ultrasonic Coating System to Be Highlighted at SEMICON West. http://www.smtnet.com/news/index.cfm?fuseaction=view_news&news_id=13189, 2013. Geopend: 10-04-2017.

[3] Eslamian M. A Mathematical Model for the Design and Fabrication of Polymer Solar Cells by Spray Coating. *Drying Technology*, 31(4):405–413, 2013.

[4] Labcompare. Dimatix Materials Printer DMP-2850 from Dimatix, Inc. http://www.labcompare.com/25718-Thin-Film-Deposition-Systems/10553826-Dimatix-Materials-Printer-DMP-2850/, 2017. Geopend: 29-05-2017.

[5] Dimatix Fujifilm. Dimatix Materials Cartridge. http://www.fujifilmusa.com/products/industrial_inkjet_printheads/deposition-products/materials-cartridge/index.html, 2017. Geopend: 29-05-2017.

[6] de Gans B., Hoeppener S., Schubert U. Polymer-Relief Microstructures by Inkjet Etching. *Advanced Materials*, 18:910–914, 2006.

[7] Karabasheva S., Baluschev S., Graf K. Microstructures on soluble polymer surfaces via drop deposition of solvent mixtures. *Applied Physics Letters*, 89:1–3, 2006.

[8] UHasselt. About IMO-IMOMEC. http://www.uhasselt.be/UH/IMO/About-IMO-IMOMEC/Preface.html, 2016. Geopend: 22-10-2016.

[9] UHasselt. Functional Materials Engineering. http://www.uhasselt.be/UH/IMO/Visit-the-groups/38170-Functional-Materials-Engineering.html, 2016. Geopend: 22-10-2016.

[10] European Commission. Frequently asked questions about the regulation on ecodesign requirements for non-directional household lamps. http://europa.eu/rapid/press-release_MEMO-09-113_en.htm, 2017. Geopend: 05-04-2017.

[11] European Commission. EuropeâĂŹs electricity bills could be slashed by the miracle of "OLED"(FP7 OLED project). http://ec.europa.eu/research/innovation-union/index_en.cfm?pg=stars2, 2015. Geopend: 05-04-2017.

[12] Wikipedia. Gloeilamp. https://nl.wikipedia.org/wiki/Gloeilamp#Rendement, 2017. Geopend: 05-04-2017.

[13] Philippe Muyters. Vlaamse overheid pakt eigen energieverbruik grondig aan. http://www.philippemuyters.be/nieuws/vlaamse-overheid-pakt-eigen-energieverbruik-grondig-aan, 2016. Geopend: 05-04-2017.

[14] Eom S., Wrzesniewski E., Xue J. Close-packed hemispherical microlens arrays for light extraction enhancement in organic light-emitting devices. *Organic Electronics: physics, materials, applications*, 12(3):472–476, 2011.

[15] Gilissen K. *Upscaling of Organic Light Emitting Devices: a focus on innovative materials, versatile printing techniques and state-of-the-art post-treatments*. PhD thesis, UHasselt, 2016.

[16] Mann V., Rastogi V. Dielectric nanoparticles for the enhancement of OLED light extraction efficiency. *Optics Communications*, 387:202–207, 2017.

[17] Saxena K., Jain V.K., Mehta D. A review on the light extraction techniques in organic electroluminescent devices. *Optical Materials*, 32:221–233, 2009.

[18] Sun Y., Forrest S. Organic light emitting devices with enhanced outcoupling via microlenses fabricated by imprint lithography. *Journal of Applied Physics*, 100(7):1–6, 2006.

[19] Shufen C. et al. Recent Developments in Top-Emitting Organic Light-Emitting Diodes. *Advanced Materials*, 22:5227–5239, 2010.

[20] Chen S. et al. Recent developments in top-emitting organic light-emitting diodes. *Advanced Materials*, 22(46):5227–5239, 2010.

[21] Adamovich V.I., D'Andrade B.W., Weaver M.S., Brown J.J. Recent progress in phosphorescent white organic light-emitting devices for displays and lighting. *Applied Physics*, 5048(90):1–2, 2001.

[22] Hoon Y., Pyo Y., Chul D., Whan T. Enhancement of out-coupling efficiency due to an organic scattering layer in organic light-emitting devices. *Organic Electronics*, 22:197–201, 2015.

[23] Qian M. et al. Theoretical model for the external quantum efficiency of organic light emitting diodes and its experimental validation. *Organic Electronics*, 25:200–205, 2015.

[24] Patel N. et al. High-Efficiency Organic Light-Emitting Diodes. *IEEE Journal on Selected Topics in Quantum Electronics*, 8(2):346–361, 2002.

[25] Lee J. et al. Cavity effects on light extraction in organic light emitting devices. *Applied Physics Letters*, (92):1–3, 2008.

[26] Wikipedia. Surface plasmon polariton. https://en.wikipedia.org/wiki/Surface_plasmon_polariton, 2017. Geopend: 05-03-2017.

[27] Wikipedia. Wet van Snellius. https://nl.wikipedia.org/wiki/Wet_van_Snellius, 2017. Geopend: 04-03-2017.

[28] Wikipedia. Total internal reflection. https://en.wikipedia.org/wiki/Total_internal_reflection, 2017. Geopend: 30-05-2017.

[29] Melpignano P. et al. Efficient light extraction and beam shaping from flexible, optically integrated organic light-emitting diodes. *Applied Physics Letters*, 153514(88):1–3, 2006.

[30] Oh M., Park J., Jeon H., Go J. Hollow-core polymeric nanoparticles for the enhancement of OLED outcoupling efficiency. *Displays*, 37:72–78, 2015.

[31] Wikipedia. Optical microcavity. https://en.wikipedia.org/wiki/Optical_microcavity, 2016. Geopend: 06-05-2017.

[32] Schubert E. et al. Highly Efficient Light-Emitting Diodes with Microcavities. *Science*, 265(5174):943–945, 1994.

[33] Lu M., Sturm J. Optimization of external coupling and light emission in organic light-emitting devices: modeling and experiment. *Journal of Applied Physics*, 91(2):595–604, 2002.

[34] Bulovic V. et al. Weak microcavity effects in organic light-emitting devices. *Physics*, 58:3730–3740, 1998.

[35] Wikipedia. Non-radiative lifetime. https://en.wikipedia.org/wiki/Non-radiative_lifetime, 2015. Geopend: 06-05-2017.

[36] Wikipedia. Non-radiative recombination. https://en.wikipedia.org/wiki/Non-radiative_recombination, 2014. Geopend: 06-05-2017.

[37] Wikipedia. Carrier generation and recombination. https://en.wikipedia.org/wiki/Carrier_generation_and_recombination, 2016. Geopend: 06-05-2017.

[38] Chen S., Kwok H. Light extraction from organic light-emitting diodes for lighting applications by sand-blasting substrates. *Optics Express*, 18(1):37–42, 2010.

[39] Zhou J. et al. Roughening the white OLED substrateâĂŹs surface through sandblasting to improve the external quantum efficiency. *Organic Electronics*, (12):648–653, 2011.

[40] Cheng Y. et al. Enhanced light outcoupling in a thin film by texturing meshed surfaces. *Applied Physics Letters*, 90:1–3, 2007.

[41] Gu G. et al. High-external-quantum-efficiency organic light-emitting devices. *Optics Letters*, 22(6):396–398, 1997.

[42] D'Andrade B., Brown J. Organic light-emitting device luminaire for illumination applications. *Applied Physics Letters*, 88(19):1–3, 2006.

[43] Madigan C., Lu M., Sturm J. Improvement of output coupling efficiency of organic light-emitting diodes by backside substrate modification. *Applied Physics Letters*, 76(13):1650–1652, 2000.

[44] Nakamura T. et al. Thin-film waveguiding mode light extraction in organic electroluminescent device using high refractive index substrate. *Journal of Applied Physics*, (97):1–6, 2005.

[45] Tsutsui T. et al. Doubling Coupling-Out Efficiency in Organic Light-Emitting Devices Using a Thin Silica Aerogel Layer. *Advanced Materials*, 13(15):1149–1152, 2001.

[46] Yamasaki T., Sumioka K., Tsutsui T. Organic light-emitting device with an ordered monolayer of silica microspheres as a scattering medium. *Applied Physics Letters*, 76:1243–1245, 2000.

[47] Chang C. et al. Fourfold power efficiency improvement in organic light-emitting devices using an embedded nanocomposite scattering layer. *Organic Electronics*, 13:1073–1080, 2012.

[48] Shiang J. et al. . *Journal of Applied Physics*, 95:2889, 2004.

[49] Tang W., VanSlyke S. Organic electroluminescent diodes. *Applied Physics Letters*, 51:913, 1987.

[50] Tang W., VanSlyke S. Electroluminescence of doped organic thin films. *Applied Physics Letters*, 65:3610, 1989.

[51] Liao L., Klubek K., Tang C. High-efficiency tandem organic light-emitting diodes. *Applied Physics Letters*, 84:167–169, 2004.

[52] Lin C., Lin H., Wu C. High-efficiency tandem organic light-emitting diodes. *Applied Physics Letters*, 87:1–3, 2005.

[53] Jordan R., Rothberg L., Dodabalapur A., Slusher R. Efficiency enhancement of microcavity organic light emitting diodes. *Applied Physics Letters*, 69:1997, 1996.

[54] Lu M. et al. High-efficiency top-emitting organic light-emitting devices. *Applied Physics Letters*, 81:3921, 2002.

[55] Cho T., Lin C., Wu C. Microcavity two-unit tandem organic light-emitting devices having a high efficiency. *Applied Physics Letters*, 88:1–3, 2006.

[56] Peng H. et al. High-efficiency microcavity top-emitting organic light-emitting diodes using silver anode. *Applied Physics Letters*, 88:1–3, 2006.

[57] Mehta D., Saxena K. . *Proceedings of the Ninth Asian Symposium on Information Display*, 6:198, 2006.

[58] Forrest S. et al. . *Organic Electronics*, 4:45, 2006.

[59] Kim J., Ho P., Greenham N., Friend R. . *Journal of Applied Physics*, 88:1073, 2000.

[60] Lu M., Madigan C., Strum J. . *IEDM*, 7:607, 2000.

[61] Nakamura T. et al. . *Journal of Applied Physics*, 96:6016, 2004.

[62] Nakamura T. et al. . *Optical Review*, 13:104, 2006.

[63] Ziebarth J. et al. . *Advanced Functional Materials*, 14:451, 2004.

[64] Neyts K., Nieto A. . *Journal of the Optical Society*, 23:1201, 2006.

[65] Li F., Li X., Zhang J., Yang B. Enhanced light extraction from organic light-emitting devices by using microcontact printed silica colloidal crystals. *Organic Electronics*, 8:338–345, 2007.

[66] Bathelt R. et al. . *Organic Electronics*, 8:293, 2007.

[67] Duggal A. et al. . *Applied Physics Letters*, 80:3470, 2002.

[68] Krummacher B. et al. . *Applied Physics Letters*, 88:113506, 2006.

[69] Möller S., Forrest S. Improved light out-coupling in organic light emitting diodes employing ordered microlens arrays. *Journal of Applied Physics*, 91(5):3324–3327, 2002.

[70] Peng H. et al. . *SID 04 Digest*, page 158, 2004.

[71] Wei M., Su I. . *Optics Express*, 12:5777, 2004.

[72] Shiga T. et al. . *Journal of Applied Physics*, 93:19, 2003.

[73] Liu X. et al. . *Journal of Vacuum Science and Technology*, 22:764, 2004.

[74] Tischler J. et al. . *Physics Review Letters*, 95:036401, 2005.

[75] Boroditsky M. et al. . *Applied Physics Letters*, 75:1036, 1999.

[76] Grifford D. et al. . *Applied Physics Letters*, 81:4315, 2002.

[77] Bulovic V. et al. . *Organic Electronics*, 8:77, 2007.

[78] Lee Y. et al. . *Applied Physics Letters*, 82:3779, 2003.

[79] Hsu S. et al. . *Applied Physics Letters*, 92:013303, 2008.

[80] Choulis S. et al. . *Applied Physics Letters*, 88:213503, 2006.

[81] Sun Y., Forrest S. Enhanced light out-coupling of organic light-emitting devices using embedded low-index grids. *Nature Photonics*, 2:483–487, 2008.

[82] Galeotti F., Mróz W., Scavia G., Botta C. Microlens arrays for light extraction enhancement in organic light-emitting diodes: A facile approach. *Organic Electronics*, 14:212–218, 2013.

[83] Zhang P. et al. Microlens fabrication using an etched glass master. *Microsystem Technologies*, 13:339–342, 2007.

[84] Ehrfeld W. et al. LIGA process: sensor construction techniques via X-ray lithography. *Proceedings of the IEEE Technical Digest: Solid-State Sensor and Actuator Workshop*, pages 1–4, 1988.

[85] Liu K. et al. Fabrication of various dimensions of high fill-factor micro-lens arrays for OLED package. *Sensors and Actuators A: Physical*, 159:126–134, 2010.

[86] Cheng C., Chang C., Yeh J. Variable focus dielectric liquid droplet lens. *Optics Express*, 14:4101–4106, 2006.

[87] Ren H., Yi-Hsin L., Shin-Tson W. Flat polymeric microlens array. *Optics Communications*, 261:296–299, 2006.

[88] Nose T., Sato S. A liquid crystal microlens obtained with a nonuniform electric field. *Liq. Cryst.*, 5:1425–1433, 1989.

[89] Ren H., Fan Y., Gauza S., Wu S. Tunable-focus flat liquid crystal spherical lens. *Applied Physics Letters*, 84:4789–4791, 2004.

[90] Wang B. et al. Liquid crystal lens with spherical electrode. *Applied Physics*, 41:1232–1233, 2002.

[91] Patel J., Rastani K. Electrically controlled polarization-independent liquid-crystal Fresnel lens arrays . *Optics Letters*, 16:532–534, 1991.

[92] Nabeel A., DeJule M. Three-terminal adaptive nematic liquid-crystal lens device. *Optics Letters*, 19:1013–1015, 1994.

[93] Naumov A., Love G., Loktev M., Vladimirov F. Control optimization of spherical modal liquid crystal lenses. *Optics Express*, 4:344–352, 1999.

[94] Commander L., Day S., Selviah D. Variable focal microlenses. *Optics Communications*, 177:157–170, 2000.

[95] Kyu T., Nwabunma D. Simulations of Microlens Arrays Formed by Pattern-Photopolymerization-Induced Phase Separation of Liquid Crystal/Monomer Mixtures. *Macromolecules*, 34:9168–9172, 2001.

[96] Masuda S. et al. Dependence of optical properties on the device and materials parameters in liquid crystal microlenses. *Journal of Applied Physics*, 35:4668, 1996.

[97] Ren H., Fan Y., Lin H., Wu S. Tunable-focus microlens arrays using nanosized polymer-dispersed liquid crystal droplets. *Optics Communications*, 247:101–106, 2005.

[98] Sung-II C., Yoon J. Shape-controlled, high fill-factor microlens arrays fabricated by a 3D diffuser lithography and plastic replication method. *Optical Society of America*, 12:6366–6371, 2004.

[99] Nam H., Jung D., Yi G., Choi H. Close-Packed Hemispherical Microlens Array from Two-Dimensional Ordered Polymeric Microspheres. *Langmuir*, 22:7358–7363, 2006.

[100] Hutley M. Optical techniques for the generation of microlens arrays. *Journal of Modern Optics*, 37:253–265, 1990.

[101] Chien C. et al. A study of the geome-try of microball lens arrays using the novel batch-fabrication technique. *Sensors and Actuators A: Physical*, 1:55–63, 2005.

[102] Chung C., Hong Y. Fabrication and analysis of the reflowed microlens arrays using JSR THB-130N photoresist with different heat treatments. *Microsystem Technologies*, 13:523–530, 2007.

[103] Lu Y., Yin Y., Xia Y. A self-assembly approach to the fabrication of patterned, two-dimensional arrays of microlenses of organic polymers. *Advanced Materials*, 13:34–37, 2001.

[104] Yang H. High fill-factor microlens array mold insert fabrication using a thermal reflow process. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 14:1197–1204, 2004.

[105] Oder T., Shakya J., Lin Y., Jiang H. Nitride microlens arrays for blue and ultraviolet wavelength applications. *Applied Pysics Letters*, 82:3692–3694, 2003.

[106] Ho J. et al. A novel method for fabrication of self-aligned double microlens arrays. *Sensors and Actuators A*, 135:465–471, 2007.

[107] Lee Y., Wu C. Excimer laser micromachining of aspheric microlenses with precise surface profile control and optimal focusing capability. *Optics and Lasers in Engineering*, 45:116–125, 2007.

[108] Kopitkovas G. et al. Fabrication of beam homogenizers in quartz by laser micromachining. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 166:135–140, 2004.

[109] Smuk A., Lawandy N. Direct laser fabrication of dense microlens arrays in semiconductor-doped glass. *Journal of Applied Physics*, 87:4026–4030, 2000.

[110] Däschner W. et al. General aspheric refractive micro-optics fabricated by optical lithography using a high energy beam sensitive glass gray-level mask. *Journal of Vacuum Science and Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures*, 14:3730–3733, 1996.

[111] Chang C., Yang S., Chu M. Rapid fabrication of ultraviolet-cured polymer microlens arrays by soft roller stamping process. *Microelectronic Engineering*, 84:355–361, 2007.

[112] Moon S., Lee N., Kang S. Fabrication of a microlens array using micro-compression molding with an electroformed mold insert. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 13:98–103, 2002.

[113] Huang W., Ko C., Chen F. Organic selective-area patterning method for microlens array fabrication. *Microelectronic Engineering*, 83:1333–1335, 2006.

[114] Tsou C., Lin C. A New Method for Microlens Fabrication by a Heating Encapsulated Air Process. *IEEE Photonics Technology Letters*, 18:2490–2492, 2006.

[115] Lu J., Huang W., Chen F. Self-positioning microlens arrays prepared using ink-jet printing. *Optical Engineering*, 48:1–3, 2009.

[116] Dutta R., van Kan J., Bettiol A., Watt F. Polymer microlens replication by nanoimprint lithography using proton beam fabricated Ni stamp. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B*, 260:464–467, 2007.

[117] Danzebrink R., Aegerter M. Deposition of optical microlens arrays by ink-jet processes. *Thin Solid Films*, 392:223–225, 2001.

[118] Biehl S., Danzebrink P., Oliveira P., Aegerter M. Refractive Microlens Fabrication by Ink-Jet Process. *Journal of Sol-Gel Science and Technology*, 13:177–182, 1998.

[119] Wikipedia. Photolithography. `https://en.wikipedia.org/wiki/Photolithography`, 2017. Geopend: 13-05-2017.

[120] Chen F., Lu J., Huang W. Using Ink-Jet Printing and Coffee Ring Effect to Fabricate Refractive Microlens Arrays. *IEEE Photonics Technology Letters*, 21(10):648–650, 2009.

[121] Warnecke H., Mult H. *Inleiding in de productietechniek*.

[122] Bose S. et al. Process Optimization of Ultrasonic Spray Coating of Polymer Films. *Langmuir*, 29:6911–6919, 2013.

[123] JASCO Romania S.R.L. Ultrasonic Atomization. `http://www.jasco.ro/?download_file_id=4738&file=Atomizing-writeup.pdf`. Geopend: 09-04-2017.

[124] Sono-Tek Corporation. About Us. `http://www.sono-tek.com/about-us/`, 2017. Geopend: 08-04-2017.

[125] IMO-IMOMEC. Spray coater protocol IMO-IPC.

[126] Sono-Tek. Ultrasonic Glass Coating Equipment. `http://www.sono-tek.com/ultrasonic-glass-coating-equipment/`, 2017. Geopend: 31-05-2017.

[127] Graco Inc. Atomization. `http://www.elliottequipment.com/MediaLibraries/ElliottEquipment/PDFs/Ask%20Elliott/ATOMIZ_1.PDF`, 1995. Geopend: 08-04-2017.

[128] University of Louisville. Spin Coating Theory. `https://louisville.edu/micronano/files/documents/standard-operating-procedures/SpinCoatingInfo.pdf/view`, 2013. Geopend: 31-05-2017.

[129] Laboratory of Laser induced Photochemistry. Facilities. http://llp.inflpr.ro/FACILITIES, -. Geopend: 29-05-2017.

[130] Madhusudan S. et al. Inkjet printing - Process and Its Applications. *Advanced Materials*, 22:673–685, 2010.

[131] Martin G., Hoath S., Hutchings I. Inkjet printing - the physics of manipulating liquid jets and drops. *Journal of Physics: Conference Series*, 105:1–14, 2008.

[132] Wikipedia. Inkjet printing. https://en.wikipedia.org/wiki/Inkjet_printing#Thermal_DOD, 2017. Geopend: 31-05-2017.

[133] Dimatix Fujifilm. Materials Printer and Cartridge DMP-2800 Series Printer and DMC-11600 Series Cartridge: FAQ. https://www.fujifilmusa.com/shared/bin/FAQs_DMP-2800_Series_Printer_DMC-11600+Series+Cartridge.pdf, 2008. Geopend: 25-05-2017.

[134] Yang J. Light out-coupling enhancement of organic light-emitting devices with microlens array. *Applied Physics Letters*, 97(22):1–3, 2010.

[135] Kim et al. Directly fabricated multi-scale microlens arrays on a hydrophobic flat surface by a simple inkjet printing technique. *Journal of Materials Chemistry*, 22(7):3053–3058, 2012.

[136] Bonaccurso et al. Fabrication of microvessels and microlenses from polymers by solvent droplets. *Applied Physics Letters*, 86:1–3, 2005.

[137] Cramer J. Ontwerp en depositie van een gepixelde OLED op flexibele substraten aan de hand van ultrasoon spraycoaten.

[138] Klingels B., Bollen H. Innovatieve 2D-coatingtechnieken als tool voor de ruwheidsreductie van 3D-geprinte substraten.

[139] Saurei L., Peseux J., Laune F., Berge B., editor. *Tunable liquid lens based on electrowetting technology: Principle, properties and applications*.

[140] Park Y., Seo S., Gruenberg P., Lee J. Self-Centering Effect of a Thickness-Gradient Dielectric of an Electrowetting Liquid Lens. *IEEE Photonics Technology Letters*, 25(6):623–625, 2013.

[141] Krogmann F., Mönch W., Zappe H. Electrowetting for Tunable Microoptics. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 17:1501–1512, 2008.

[142] Berge B. Liquid lens technology: Principle of electrowetting based lenses and applications to imaging. *Proc. 18th IEEE Int. Conf. MEMS*, pages 227–230, 2005.

[143] Liu H., Dharmatilleke S., Maurya D., Tay A. Dielectric materials for electrowetting-on-dielectric actuation. *Microsystem Technology*, 16:449–460, 2010.

[144] Chang C., Sze S. ULSI technology. *McGraw Hill Co. Inc.*, 1996.

[145] Thomas R. et al. Wettability of polished silicon oxide surfaces. *Journal of The Electrochemical Society*, 143:643–648, 1996.

[146] Imanaka Y., Shioga T., Baniecki J. Decoupling capacitor with low inductance for high-frequency digital applications. *Fujitsu Scientific and Technical Journal*, 38:22–30, 2002.

[147] Chae J. et al. Optimum thickness of hydrophobic layer for operating voltage reduction in EWOD systems. *Sensors and Actuators A: Physical*, 215:8–16, 2014.

[148] Poly(methyl methacrylate) (pmma).

[149] Liu H. et al. Dielectric materials for electrowetting-on-dielectric actuation. *Microsystem Technologies*, 16(3):449–460, 2010.

[150] Chou M., et al. A novel method to fabricate gapless hexagonal micro-lens array. *Sensors and Actuators A: Physical*, 118:298–306, 2005.

[151] Pan C., Su C. Fabrication of high fill factor optical film using two-layer photoresists. *Journal of Modern Optics*, 55:33–42, 2008.

[152] Pan C., Su C. Fabrication of gapless triangular micro-lens array. *Sensors and Actuators A: Physical*, 134:631–640, 2007.

[153] Choonee K., Syms R., Ahmad M., Zou H. Post processing of microstructures by PDMS spray deposition. *Sensors and Actuators A: Physical*, 155:253–262, 2009.

[154] Norland Optical Adhesive. Norland Optical Adhesive 74. `https://www.norlandprod.com/adhesives/noa%2074.html`, 2017. Geopend: 25-05-2017.

[155] Seo S., Park Y., Lee J. Lateral positioning of tunable liquid microlens with four coplanar electrodes. *International Conference on Optical MEMS and Nanophotonics*, -:27–28, 2014.

[156] Im M. et al. Electrowetting on a polymer microlens array. *Langmuir*, 26(14):12443–12447, 2010.

[157] Im M. et al. Adhesion Force Change by Electrowetting on a Polymer Microlens Array. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 26:2079–2086, 2012.

[158] An J. et al. Spherically Encapsulated Variable Liquid Lens on Coplanar Electrodes. *IEEE Photonics Technology Letters*, 23(22):1703–1705, 2011.

[159] Grimaldi I. et al. Microstructuring of Polymer Films by Inkjet Etching. *Journal of Applied Polymer Science*, 122:3637–3643, 2011.

[160] Hielscher. Ultrasonic Cavitation in Liquids. `https://www.hielscher.com/ultrasonic-cavitation-in-liquids-2.htm`, 2017. Geopend: 26-05-2017.

[161] Linzas M., Slegers S. Het reduceren van de oppervlakteruwheid van additive manufacturing producten met behulp van ultrasoon spraycoaten.

[162] Bornside D., Macosko C., Scriven L. Spin Coating of a PMMA/Chlorobenzene Solution. *Journal of The Electrochemical Society*, 138:317–320, 1991.

[163] Evonik Industries. Plexiglas and Europlex Films Always On Top. `https://www.plexiglas-shop.com/pdfs/en/112-4-PLEXIGLAS-and-EUROPLEX-Films-en.pdf`, 2011. Geopend: 27-05-2017.

[164] Bao B. et al. Fabrication of Patterned Concave Microstructures by Inkjet Imprinting. *Advanced Functional Materials*, 25:3286–3294, 2015.

[165] Dimatix Fujifilm. Dimatix Materials Printer DMP-2800 Series: User Manual. `http://opsola.com/uploads/tx_opsolacore/L68P0_Fujifilm%20Dimatix_DMP-2800%20User%20Manual%20v1.3.pdf`, 2006. Geopend: 28-05-2017.

[166] Seemann R. et al. Wetting morphologies at microstructured surfaces. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 102(6):1848âĂŞ1852, 2004.

[167] Wikipedia. Microlens. `https://en.wikipedia.org/wiki/Microlens`, 2017. Geopend: 30-05-2017.

[168] Downing T. et al. Biophysical regulation of epigenetic state and cell reprogramming. *Nature Materials*, 12:1154–1162, 2013.

[169] Kraus T. et al. Nanoparticle printing with single-particle resolution. *Nature Nanotechnology*, 2:570–576, 2007.

Bijlagelijst

A. Aanbrengen van een PMMA-film 145

Ultrasoon spraycoaten 145

A.1 De laagdikte en ruwheid bij diverse ultrasonespraycoatparameters 146

A.2 De laagdikte en ruwheid bij diverse ultrasonespraycoatparameters (vervolg) 147

B. Construeren van lensreservoirs 148

Inkjetetsen van cirkelvormige patronen 148

B.1 Lichtmicroscopie (versterking: 5x) van een cirkelvormige krater in PMMA-folie door het inkjetetsen van één anisol laag 148

B.2 Lichtmicroscopie (versterking: 5x) van een cirkelvormige krater in PMMA-folie door het inkjetetsen van twee anisol lagen 149

B.3 Lichtmicroscopie (versterking: 5x) van een cirkelvormige krater in PMMA-folie door het inkjetetsen van drie anisol lagen 150

B.4 Profilometriebeelden met de verticale positie [nm] in functie van de horizontale positie [mm] voor cirkelvormige kraters in PMMA-folie door het inkjetetsen van verscheidene anisol lagen 151

B.5 Profilometriebeelden met de verticale positie [nm] in functie van de horizontale positie [mm] voor cirkelvormige kraters in PMMA-folie door het inkjetetsen van verscheidene anisol lagen (vervolg) 152

B.6 Profilometriebeelden met de verticale positie [nm] in functie van de horizontale positie [mm] voor cirkelvormige kraters in PMMA-folie door het inkjetetsen van verscheidene anisol lagen bij diverse basisplaattemperaturen 153

B.7 Profilometriebeelden met de verticale positie [nm] in functie van de horizontale positie [mm] voor cirkelvormige kraters in PMMA-folie door het inkjetetsen van verscheidene anisol lagen bij diverse basisplaattemperaturen (vervolg) 154

B.8 Profilometriebeelden met de verticale positie [nm] in functie van de horizontale positie [mm] voor cirkelvormige kraters in PMMA-folie door het inkjetetsen van verscheidene anisol lagen bij diverse basisplaattemperaturen (vervolg) 155

Inkjetetsen van ringvormige patronen **156**

Aantal spuitmonden **156**

B.9 Lichtmicroscopie (versterking: 5x) van een ringvormige krater in PMMA-folie door het inkjetetsen met één spuitmond 156

B.10 Lichtmicroscopie (versterking: 5x) van een ringvormige krater in PMMA-folie door het inkjetetsen met twee spuitmonden 157

B.11 Lichtmicroscopie (versterking: 5x) van een ringvormige krater in PMMA-folie door het inkjetetsen met drie spuitmonden 158

B.12 Lichtmicroscopie (versterking: 5x) van een ringvormige krater in PMMA-folie door het inkjetetsen met vier spuitmonden 159

B.13 Lichtmicroscopie (versterking: 5x) van een ringvormige krater in PMMA-folie door het inkjetetsen met vijf spuitmonden 160

B.14 Lichtmicroscopie (versterking: 5x) van een ringvormige krater in PMMA-folie door het inkjetetsen met zes spuitmonden 161

B.15 Profilometriebeelden met de verticale positie [nm] in functie van de horizontale positie [mm] voor ringvormige kraters in PMMA-folie door het inkjetetsen met verscheidene spuitmonden. 162

B.16 Profilometriebeelden met de verticale positie [nm] in functie van de horizontale positie [mm] voor ringvormige kraters in PMMA-folie door het inkjetetsen met verscheidene spuitmonden (vervolg) 163

Printhoogte **164**

B.17 Lichtmicroscopie (versterking: 5x) van een ringvormige krater in PMMA-folie door het inkjetetsen bij een printhoogte van 250 µm 164

B.18 Lichtmicroscopie (versterking: 5x) van een ringvormige krater in PMMA-folie door het inkjetetsen bij een printhoogte van 350 µm 165

B.19 Lichtmicroscopie (versterking: 5x) van een ringvormige krater in PMMA-folie door het inkjetetsen bij een printhoogte van 450 µm 166

B.20 Lichtmicroscopie (versterking: 5x) van een ringvormige krater in PMMA-folie door het inkjetetsen bij een printhoogte van 550 µm 167

B.21 Lichtmicroscopie (versterking: 5x) van een ringvormige krater in PMMA-folie door het inkjetetsen bij een printhoogte van 650 µm 168

B.22 Lichtmicroscopie (versterking: 5x) van een ringvormige krater in PMMA-folie door het inkjetetsen bij een printhoogte van 750 µm 169

B.23 Profilometriebeelden met de verticale positie [nm] in functie van de horizontale positie [mm] voor ringvormige kraters in PMMA-folie door het inkjetetsen bij verscheidene printhoogten 170

B.24 Profilometriebeelden met de verticale positie [nm] in functie van de horizontale positie [mm] voor ringvormige kraters in PMMA-folie door het inkjetetsen bij verscheidene printhoogten (vervolg) 171

Aantal lagen **172**

B.25 Lichtmicroscopie (versterking: 5x) van een ringvormige krater in PMMA-folie door het inkjetetsen van één anisol laag 172

B.26 Lichtmicroscopie (versterking: 5x) van een ringvormige krater in PMMA-folie door het inkjetetsen van twee anisol lagen 173

B.27 Lichtmicroscopie (versterking: 5x) van een ringvormige krater in PMMA-folie door het inkjetetsen van drie anisol lagen 174

B.28 Lichtmicroscopie (versterking: 5x) van een ringvormige krater in PMMA-folie door het inkjetetsen van vier anisol lagen 175

B.29 Lichtmicroscopie (versterking: 5x) van een ringvormige krater in PMMA-folie door het inkjetetsen van vijf anisol lagen 176

B.30 Lichtmicroscopie (versterking: 5x) van een ringvormige krater in PMMA-folie door het inkjetetsen van zes anisol lagen 177

B.31 Profilometriebeelden met de verticale positie [nm] in functie van de horizontale positie [mm] voor ringvormige kraters in PMMA-folie door het inkjetetsen van verscheidene anisol lagen 178

B.32 Profilometriebeelden met de verticale positie [nm] in functie van de horizontale positie [mm] voor ringvormige kraters in PMMA-folie door het inkjetetsen van verscheidene anisol lagen (vervolg) 179

Lijndikte van het patroon **180**

B.33 Lichtmicroscopie (versterking: 5x) van een ringvormige krater in PMMA-folie door het inkjetetsen met een lijndikte van 50 µm voor het printpatroon 180

B.34 Lichtmicroscopie (versterking: 5x) van een ringvormige krater in PMMA-folie door het inkjetetsen met een lijndikte van 100 µm voor het printpatroon 181

B.35 Lichtmicroscopie (versterking: 5x) van een ringvormige krater in PMMA-folie door het inkjetetsen met een lijndikte van 150 µm voor het printpatroon 182

B.36 Lichtmicroscopie (versterking: 5x) van een ringvormige krater in PMMA-folie door het inkjetetsen met een lijndikte van 200 µm voor het printpatroon 183

B.37 Lichtmicroscopie (versterking: 5x) van een ringvormige krater in PMMA-folie door het inkjetetsen met een lijndikte van 250 µm voor het printpatroon 184

B.38 Lichtmicroscopie (versterking: 5x) van een ringvormige krater in PMMA-folie door het inkjetetsen met een lijndikte van 300 µm voor het printpatroon 185

B.39 Profilometriebeelden met de verticale positie [nm] in functie van de horizontale positie [mm] voor ringvormige kraters in PMMA-folie door het inkjetetsen van verscheidene lijndiktes van het printpatroon 186

B.40 Profilometriebeelden met de verticale positie [nm] in functie van de horizontale positie [mm] voor ringvormige kraters in PMMA-folie door het inkjetetsen van verscheidene lijndiktes van het printpatroon (vervolg) 187

Basisplaattemperatuur **188**

B.41 Lichtmicroscopie (versterking: 5x) van een ringvormige krater in PMMA-folie door het inkjetetsen bij een basisplaattemperatuur van 30 °C 188

B.42 Lichtmicroscopie (versterking: 5x) van een ringvormige krater in PMMA-folie door het inkjetetsen bij een basisplaattemperatuur van 35 °C 189

B.43 Lichtmicroscopie (versterking: 5x) van een ringvormige krater in PMMA-folie door het inkjetetsen bij een basisplaattemperatuur van 40 °C 190

B.44 Lichtmicroscopie (versterking: 5x) van een ringvormige krater in PMMA-folie door het inkjetetsen bij een basisplaattemperatuur van 45 °C 191

B.45 Lichtmicroscopie (versterking: 5x) van een ringvormige krater in PMMA-folie door het inkjetetsen bij een basisplaattemperatuur van 50 °C 192

B.46 Lichtmicroscopie (versterking: 5x) van een ringvormige krater in PMMA-folie door het inkjetetsen bij een basisplaattemperatuur van 55 °C 193

B.47 Profilometriebeelden met de verticale positie [nm] in functie van de horizontale positie [mm] voor ringvormige kraters in PMMA-folie door het inkjetetsen bij verscheidene basisplaattemperaturen 194

B.48 Profilometriebeelden met de verticale positie [nm] in functie van de horizontale positie [mm] voor ringvormige kraters in PMMA-folie door het inkjetetsen bij verscheidene basisplaattemperaturen (vervolg) 195

Druppelafstand **196**

B.49 Lichtmicroscopie (versterking: 5x) van een ringvormige krater in PMMA-folie door het inkjetetsen bij een druppelafstand van 5 µm 196

B.50 Lichtmicroscopie (versterking: 5x) van een ringvormige krater in PMMA-folie door het inkjetetsen bij een druppelafstand van 10 µm 197

B.51 Lichtmicroscopie (versterking: 5x) van een ringvormige krater in PMMA-folie door het inkjetetsen bij een druppelafstand van 15 µm 198

B.52 Lichtmicroscopie (versterking: 5x) van een ringvormige krater in PMMA-folie door het inkjetetsen bij een druppelafstand van 20 µm 199

B.53 Lichtmicroscopie (versterking: 5x) van een ringvormige krater in PMMA-folie door het inkjetetsen bij een druppelafstand van 25 µm 200

B.54 Lichtmicroscopie (versterking: 5x) van een ringvormige krater in PMMA-folie door het inkjetetsen bij een druppelafstand van 30 µm 201

B.55 Profilometriebeelden met de verticale positie [nm] in functie van de horizontale positie [mm] voor ringvormige kraters in PMMA-folie door het inkjetetsen bij verscheidene bij een verscheidene druppelafstanden 202

B.56 Profilometriebeelden met de verticale positie [nm] in functie van de horizontale positie [mm] voor ringvormige kraters in PMMA-folie door het inkjetetsen bij verscheidene bij een verscheidene druppelafstanden (vervolg) 203

Leader bar **204**

B.57 Lichtmicroscopie (versterking: 5x) van een ringvormige krater in PMMA-folie door het inkjetetsen zonder het gebruik van een leader bar 204

B.58 Lichtmicroscopie (versterking: 5x) van een ringvormige krater in PMMA-folie door het inkjetetsen met het gebruik van een leader bar 205

B.59 Profilometriebeelden met de verticale positie [nm] in functie van de horizontale positie [mm] voor ringvormige kraters in PMMA-folie door het inkjetetsen met en zonder het gebruik van een leader bar 206

Dubbelsolventsysteem **207**

B.60 Profilometriebeelden met de verticale positie [nm] in functie van de horizontale positie [mm] voor cirkelvormige kraters in PMMA-folie door het inkjetetsen van diverse volumeverhoudingen van het IPA/anisol-dubbelsolventsysteem 207

B.61 Profilometriebeelden met de verticale positie [nm] in functie van de horizontale positie [mm] voor cirkelvormige kraters in PMMA-folie door het inkjetetsen van diverse volumeverhoudingen van het IPA/anisol-dubbelsolventsysteem (vervolg) 208

Bijlagen

A. Aanbrengen van een PMMA-film

Ultrasoon spraycoaten

Tabel 5.1: De laagdikte en ruwheid bij diverse ultrasonespraycoatparameters.

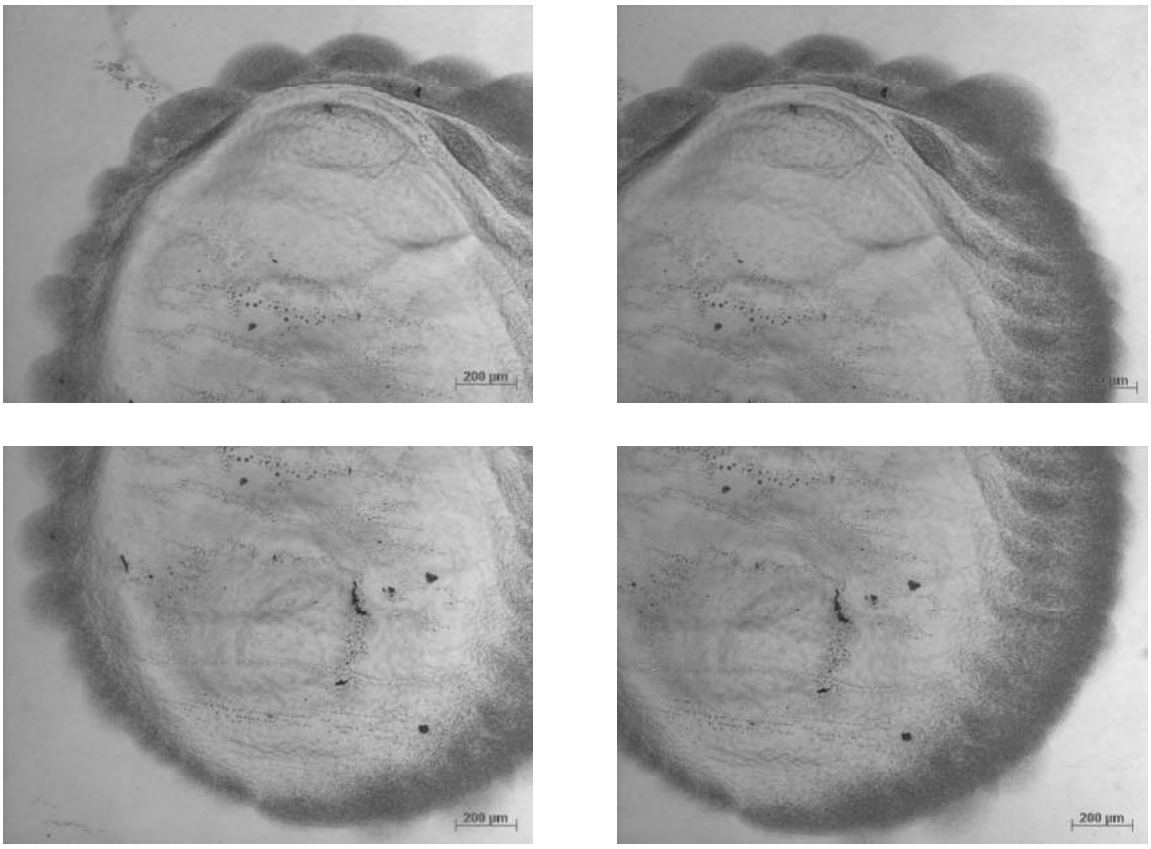
Sample	C	V	v	f	P	$p_{drijfgas}$	# lagen	T	H	L	R_a
-	m%	ml/min	mm/s	kHz	W	psi	-	°C	mm	nm	nm
1	0,5	2,0	10	120	0,8	2,0	100	30	65 (0)	-	-
2	0,5	2,0	10	120	2,5	2,0	20	30	65 (0)	2682,26	667,06
3	0,5	1,5	10	120	2,5	2,0	20	30	65 (0)	1502,11	415,47
4	0,5	1,0	10	120	2,5	2,0	20	30	65 (0)	856,55	299,38
5	0,5	1,0	10	120	2,0	2,0	20	30	65 (0)	684,35	183,78
6	0,5	1,0	10	120	1,5	2,0	20	30	65 (0)	803,22	220,95
7	0,5	1,0	10	120	1,2	2,0	20	30	65 (0)	741,86	255,09
8	0,5	1,0	10	120	1,0	2,0	20	30	65 (0)	650,97	190,18
9	0,5	1,0	10	120	0,8	2,0	20	30	65 (0)	535,51	198,24
10	0,5	1,0	10	120	0,8	2,5	20	30	65 (0)	976,04	300,75
11	2,0	2,0	10	120	1,3	2,5	20	30	70 (5)	8210,29	1295,33
12	2,0	1,5	10	120	1,3	2,0	20	30	70 (5)	4446,88	940,17
13	2,0	1,0	10	120	1,3	2,0	20	30	70 (5)	2395,10	488,92
14	2,0	1,5	10	120	1,0	2,0	20	30	70 (5)	4316,33	830,30
15	2,0	1,5	10	120	1,6	2,0	20	30	70 (5)	4522,66	870,19
16	2,0	1,0	10	120	1,0	2,0	20	30	70 (5)	1867,01	486,17
17	2,0	1,0	10	120	1,6	2,0	20	30	70 (5)	2160,39	607,47
18	2,0	1,5	10	120	1,3	2,5	20	30	70 (5)	2012,19	659,12
19	2,0	1,5	10	120	1,3	3,0	20	30	70 (5)	6108,94	911,39
20	2,0	2,0	10	120	1,3	3,0	20	30	70 (5)	9216,92	839,23

Tabel 5.2: De laagdikte en ruwheid bij diverse ultrasonespraycoatparameters (vervolg).

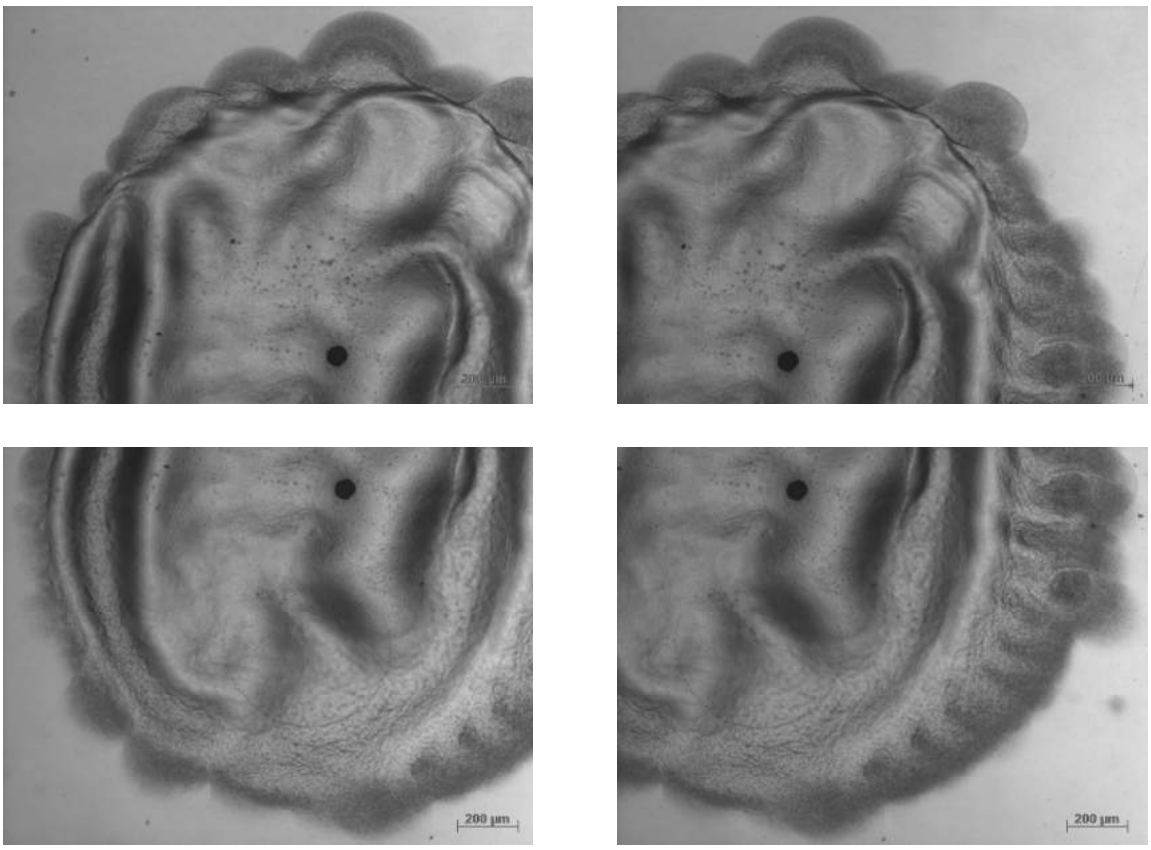
Sample	C	V	v	f	P	$p_{drijfgas}$	# lagen	T	H	L	R_a
-	m%	ml/min	mm/s	kHz	W	psi	-	°C	mm	nm	nm
21	0,5	0,1	10	120	0,8	0,4	10	30	110 (45)	815,95	371,89
22	0,5	0,3	10	120	0,8	2,0	10	30	110 (45)	434,5	160,64
23	0,5	0,5	10	120	0,8	2,0	10	30	65 (0)	330,26	152,11
24	0,5	0,7	10	120	0,8	2,0	10	30	65 (0)	947,05	362,48
25	0,5	0,9	10	120	0,8	2,0	10	30	65 (0)	1143,14	350,82
26	0,5	1,1	10	120	0,8	2,0	10	30	65 (0)	1796,08	626,06
27	0,5	1,3	10	120	0,8	2,0	10	30	65 (0)	1287,57	384,43
28	0,5	1,5	10	120	0,8	2,0	10	30	65 (0)	2540,36	1313,2
29	0,5	0,1	10	120	0,8	2,0	10	30	65 (0)	1662,09	537,59
30	0,5	0,1	10	120	0,8	2,0	10	30	65 (0)	344,2	126,4
31	0,5	0,3	10	120	0,8	2,0	10	30	65 (0)	400,15	132,4
32	0,5	1,1	10	120	0,8	2,0	10	30	65 (0)	1792,15	459,39
33	0,5	1,3	10	120	0,8	2,0	10	30	65 (0)	2044,37	792,06
34	0,5	0,1	5	120	0,8	2,0	10	30	65 (0)	236,74	100,3
35	0,5	0,3	5	120	0,8	2,0	10	30	65 (0)	503,14	134,47
36	0,5	0,5	5	120	0,8	2,0	10	30	65 (0)	1069,83	293,08
37	0,5	0,1	5	120	0,8	2,0	20	30	65 (0)	-	85,67
38	0,5	1,1	10	120	0,8	2,0	10	30	75 (10)	1465,64	302,68

B. Construeren van lensreservoirs

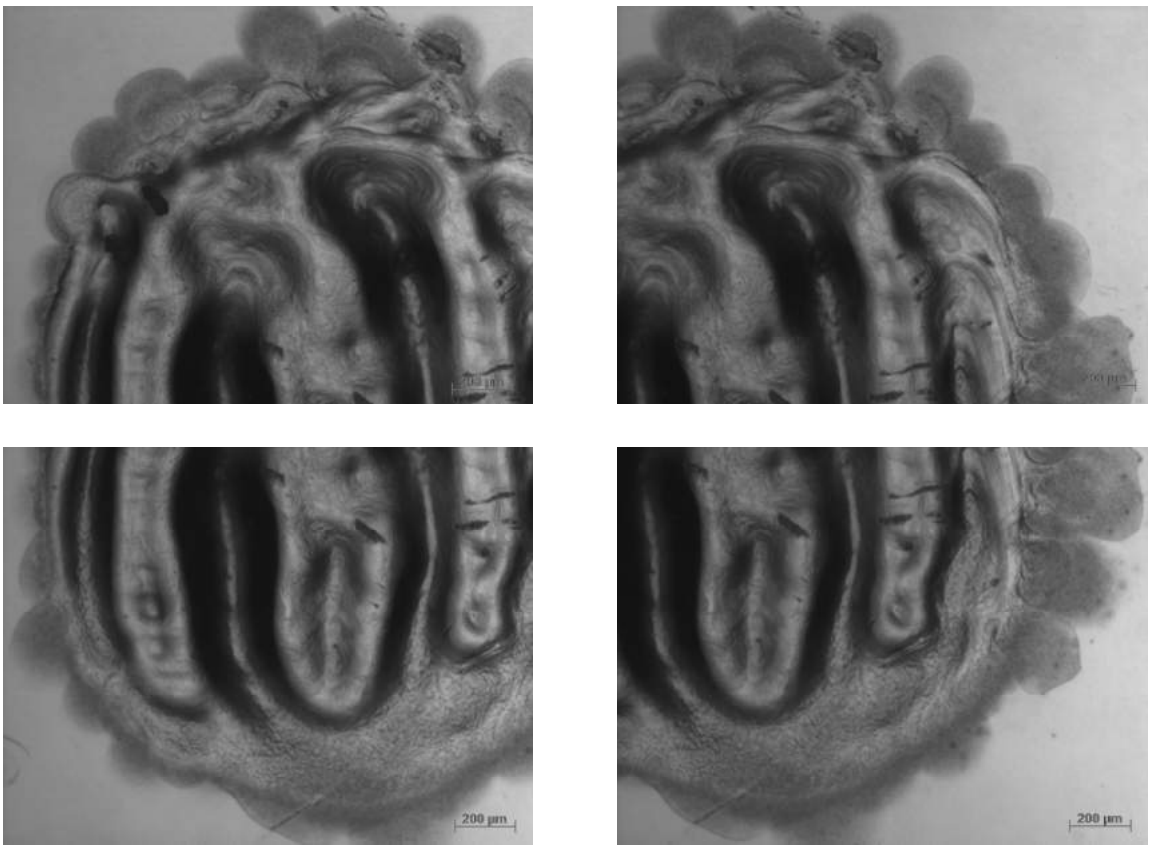
Inkjetetsen van cirkelvormige patronen



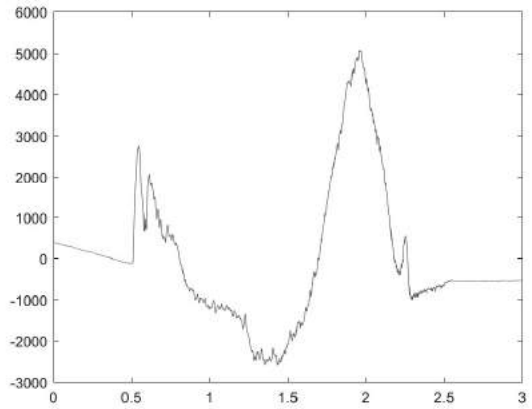
Figuur A.1: Lichtmicroscopie (versterking: 5x) van een cirkelvormige krater in PMMA-folie door het inkjetetsen van één anisol laag.



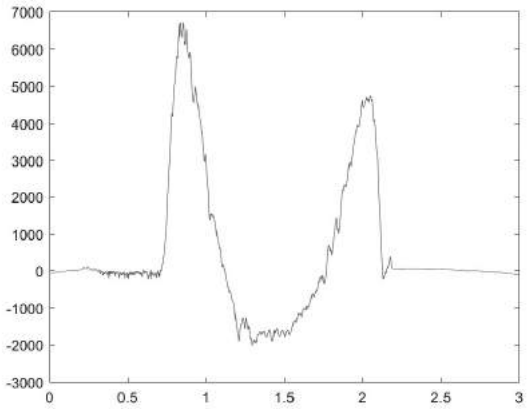
Figuur A.2: Lichtmicroscopie (versterking: 5x) van een cirkelvormige krater in PMMA-folie door het inkjetetsen van twee anisol lagen.



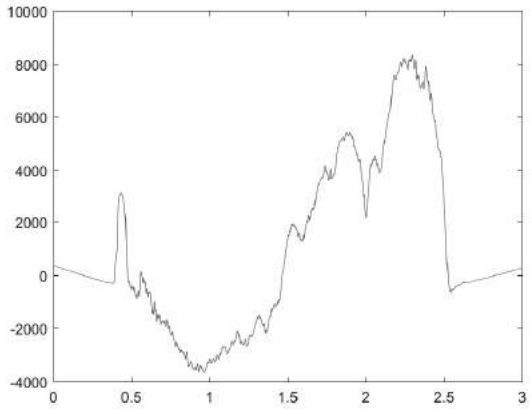
Figuur A.3: Lichtmicroscopie (versterking: 5x) van een cirkelvormige krater in PMMA-folie door het inkjetetsen van drie anisol lagen.



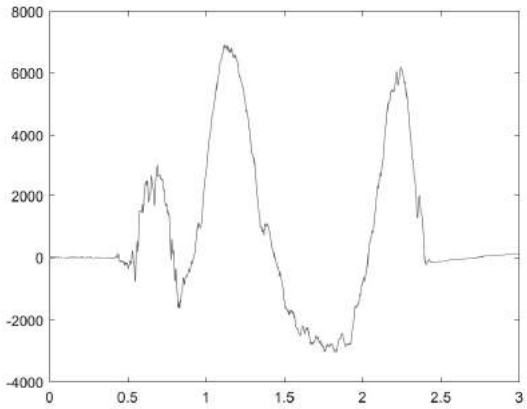
(a) Eén laag, loodrecht op de printrichting.



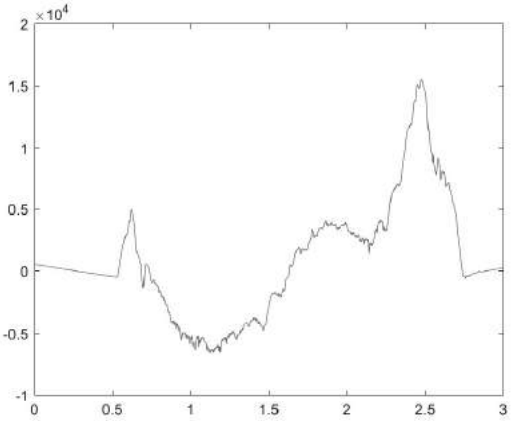
(b) Eén laag, evenwijdig met de printrichting.



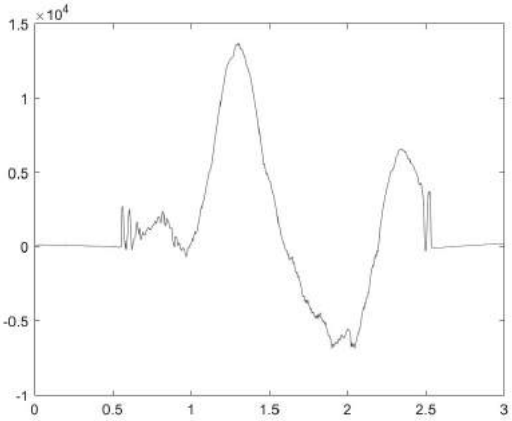
(c) Twee lagen, loodrecht op de printrichting.



(d) Twee lagen, evenwijdig met de printrichting.

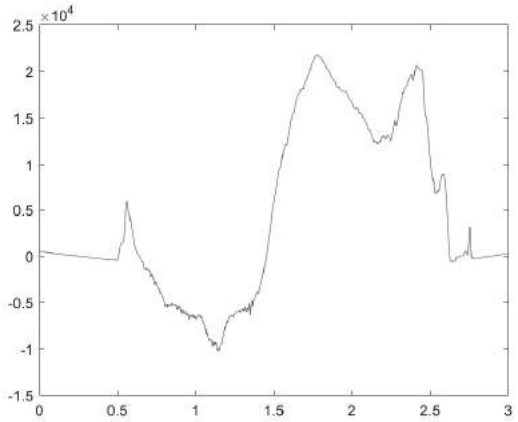


(e) Drie lagen, loodrecht op de printrichting.

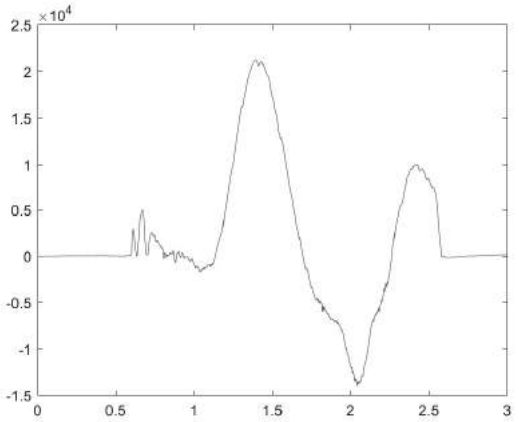


(f) Drie lagen, evenwijdig met de printrichting.

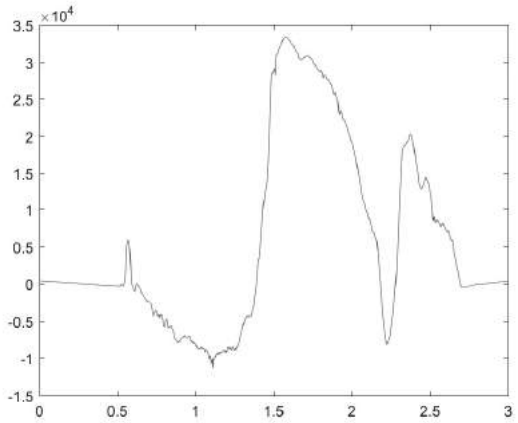
Figuur A.4: Profilometriebeelden met de verticale positie [nm] in functie van de horizontale positie [mm] voor cirkelvormige kraters in PMMA-folie door het inkjetetsen van verscheidene anisol lagen.



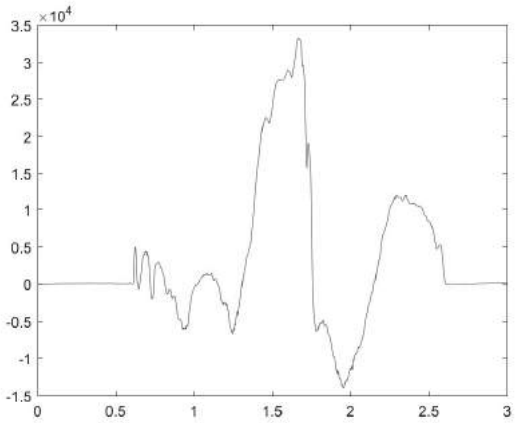
(a) Vier lagen, loodrecht op de printrichting.



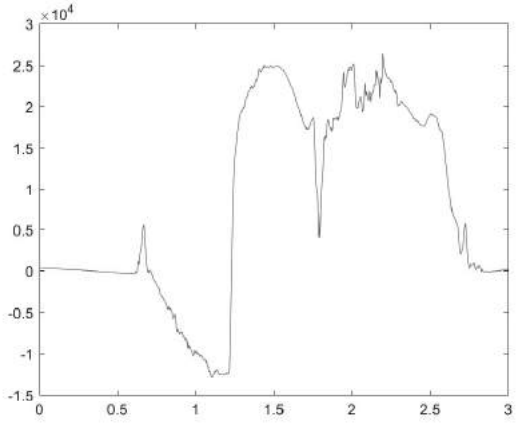
(b) Vier lagen, evenwijdig met de printrichting.



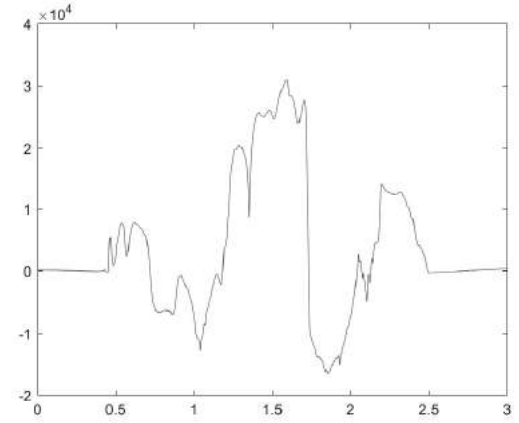
(c) Vijf lagen, loodrecht op de printrichting.



(d) Vijf lagen, evenwijdig met de printrichting.

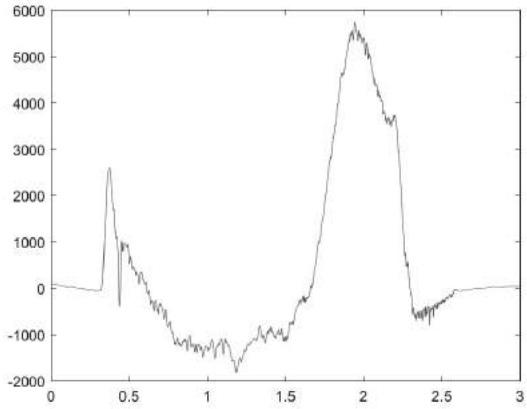


(e) Zes lagen, loodrecht op de printrichting.

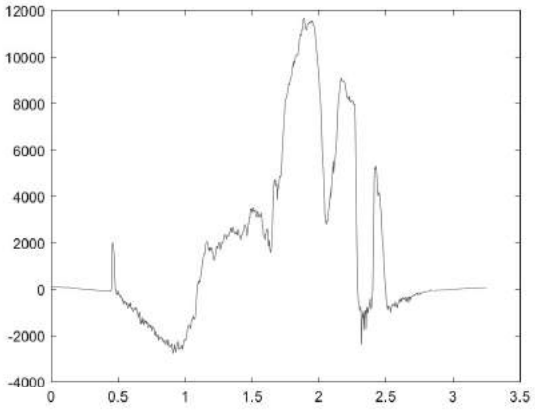


(f) Zes lagen, evenwijdig met de printrichting.

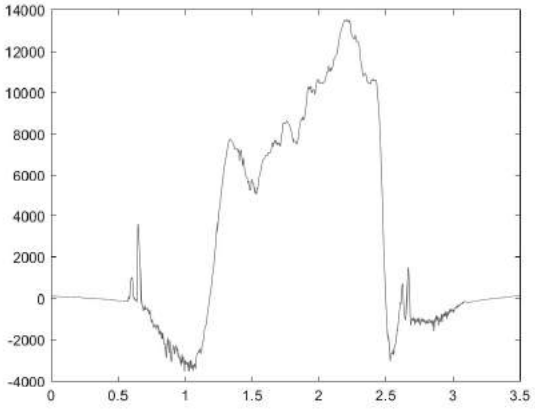
Figuur A.5: Profilometriebeelden met de verticale positie [nm] in functie van de horizontale positie [mm] voor cirkelvormige kraters in PMMA-folie door het inkjetetsen van verscheidene anisol lagen (vervolg).



(a) 23,5°C, één laag, loodrecht op de printrichting.

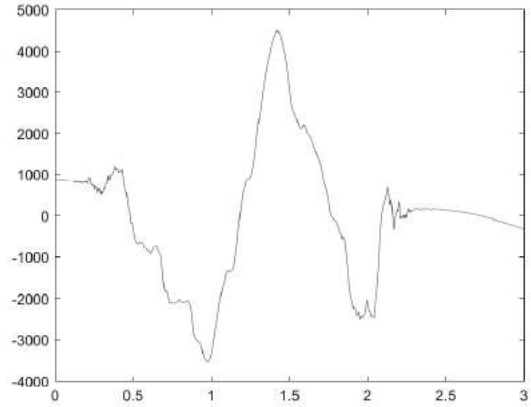


(b) 23,5°C, twee lagen, loodrecht op de printrichting.

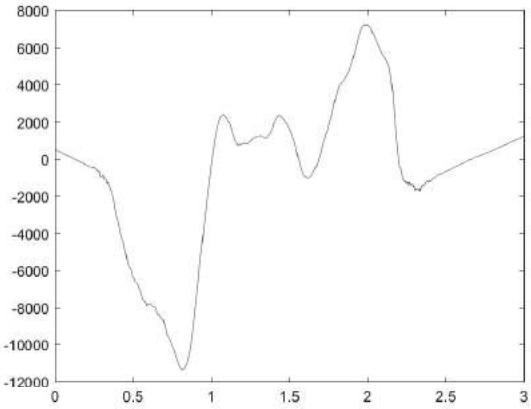


(c) 23,5°C, drie lagen, loodrecht op de printrichting.

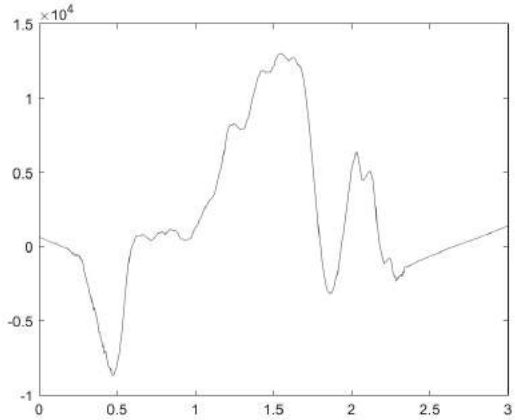
Figuur A.6: Profilometriebeelden met de verticale positie [nm] in functie van de horizontale positie [mm] voor cirkelvormige kraters in PMMA-folie door het inkjetetsen van verscheidene anisol lagen bij diverse basisplaattemperaturen.



(a) 40°C, één laag, loodrecht op de printrichting.

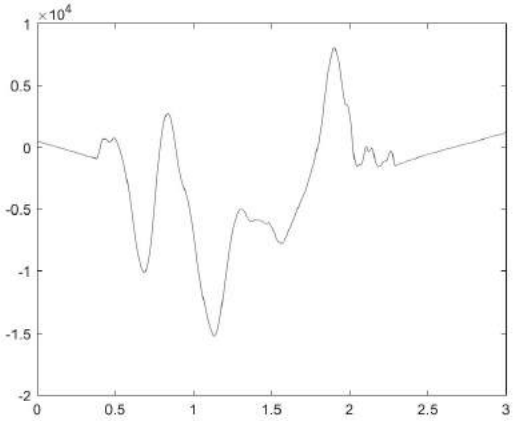


(b) 40°C, twee lagen, loodrecht op de printrichting.

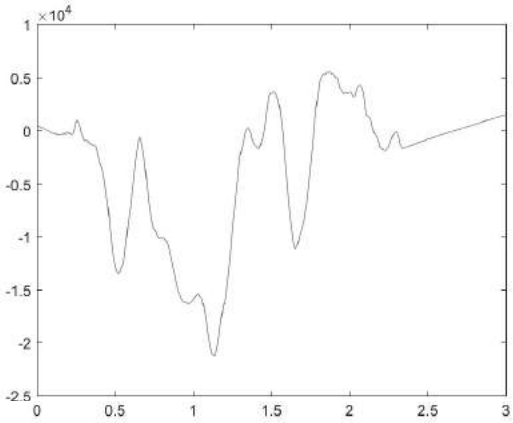


(c) 40°C, drie lagen, loodrecht op de printrichting.

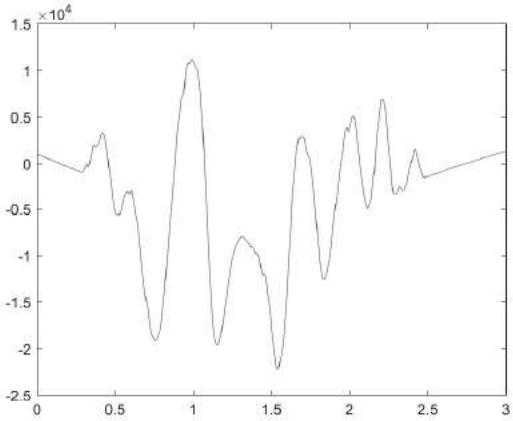
Figuur A.7: Profilometriebeelden met de verticale positie [nm] in functie van de horizontale positie [mm] voor cirkelvormige kraters in PMMA-folie door het inkjetetsen van verscheidene anisol lagen bij diverse basisplaattemperaturen (vervolg).



(a) 55°C, één laag, loodrecht op de printrichting.



(b) 55°C, twee lagen, loodrecht op de printrichting.

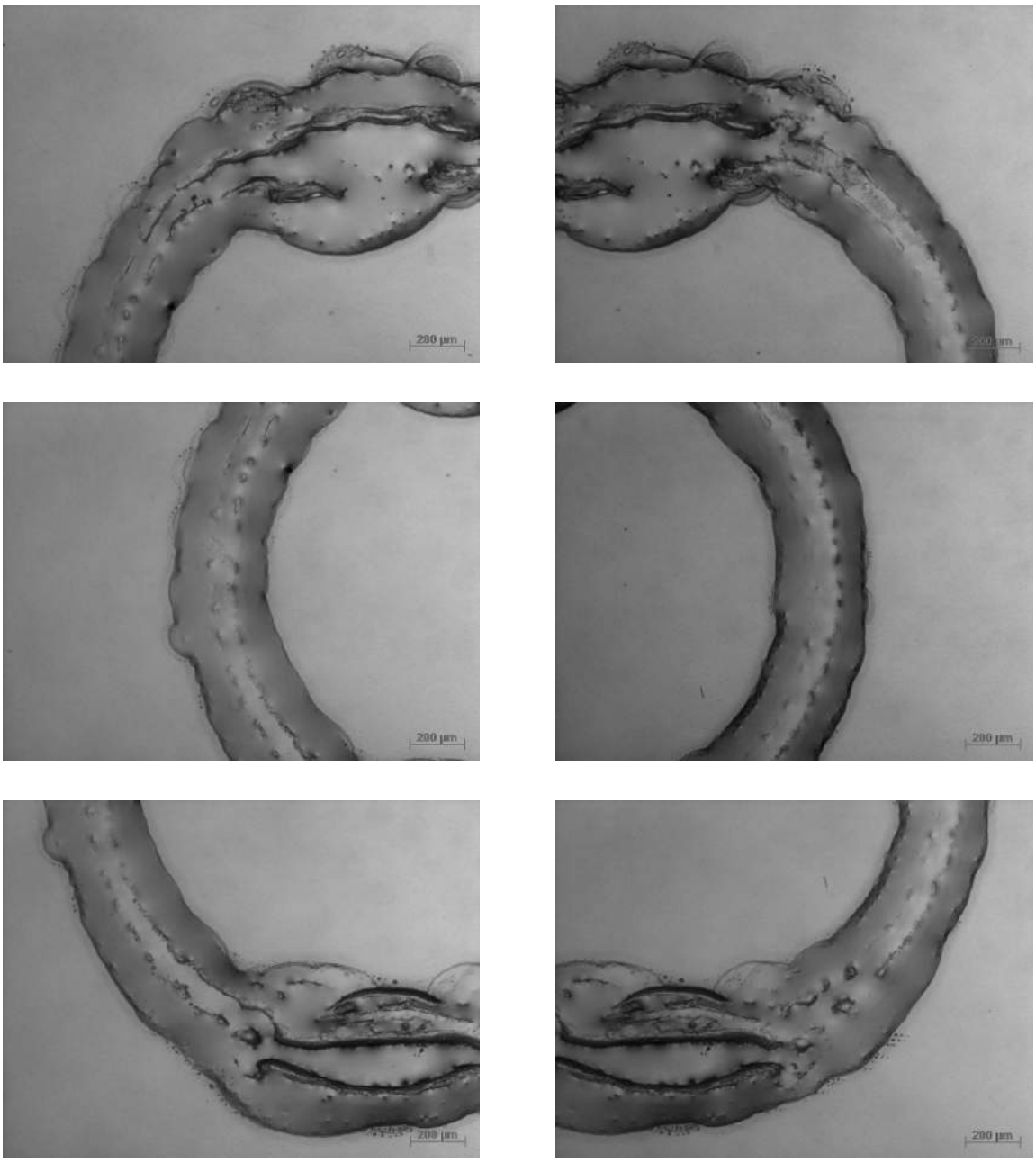


(c) 55°C, drie lagen, loodrecht op de printrichting.

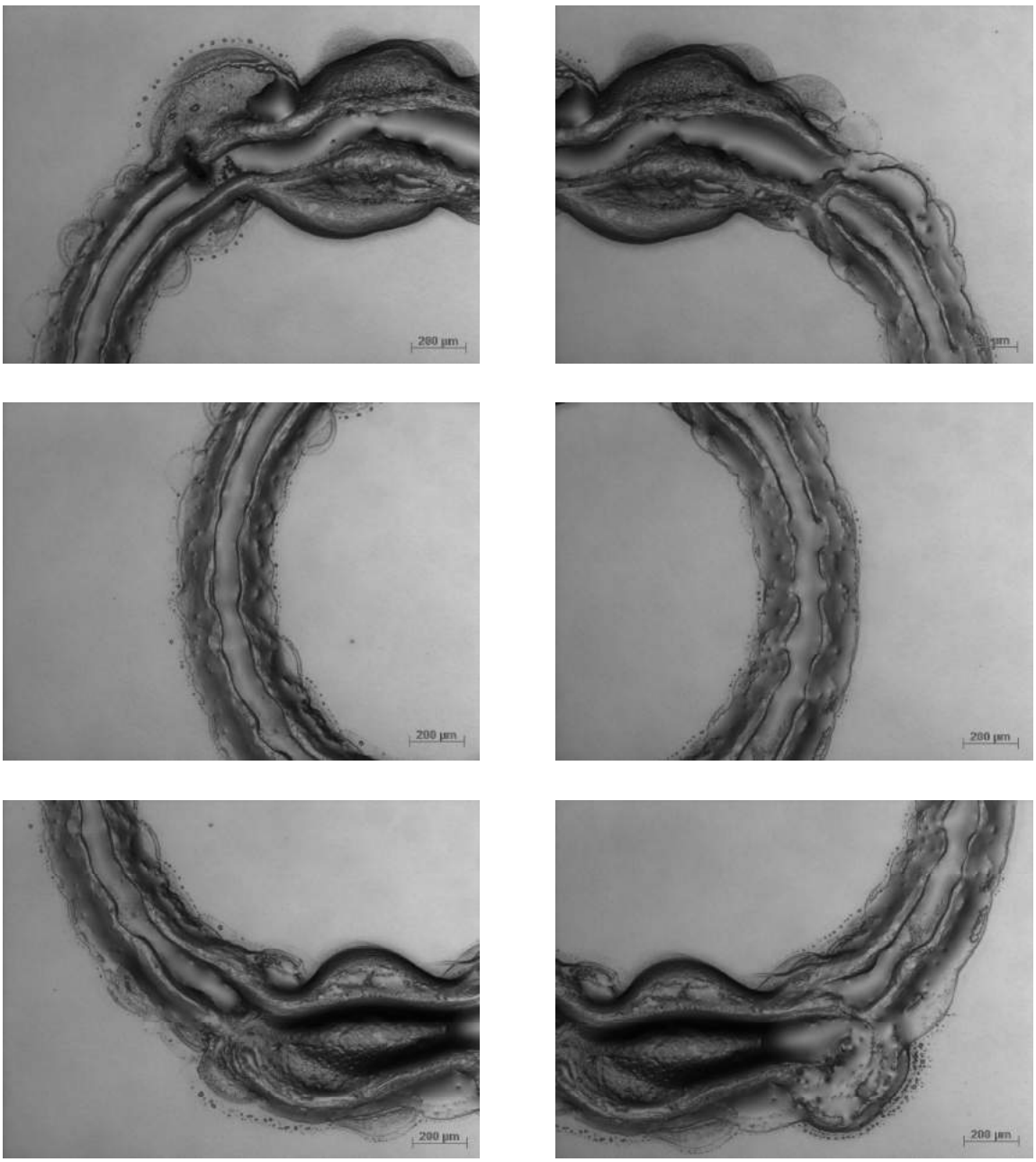
Figuur A.8: Profilometriebeelden met de verticale positie [nm] in functie van de horizontale positie [mm] voor cirkelvormige kraters in PMMA-folie door het inkjetetsen van verscheidene anisol lagen bij diverse basisplaattemperaturen (vervolg).

Inkjetetsen van ringvormige patronen

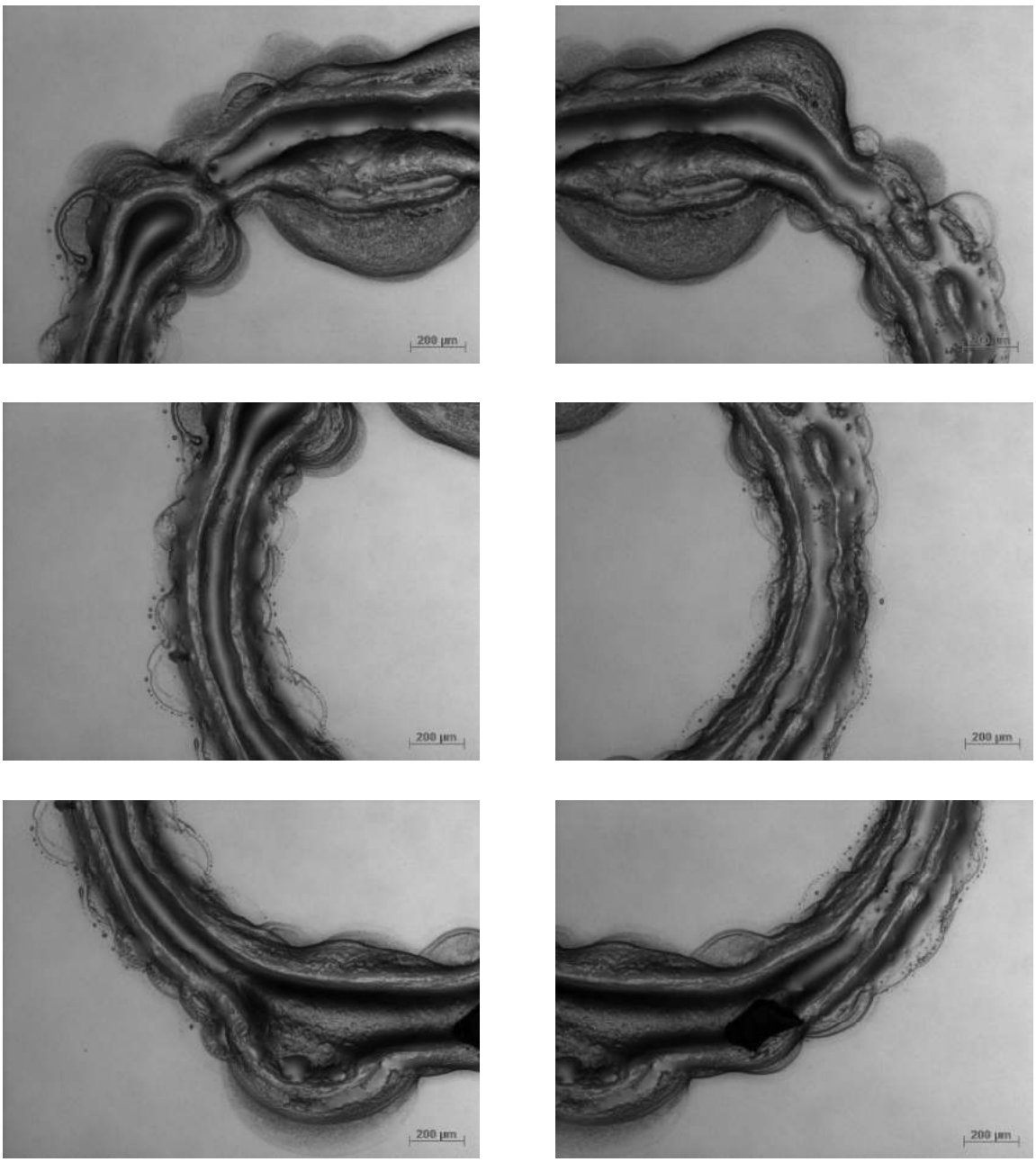
Aantal spuitmonden



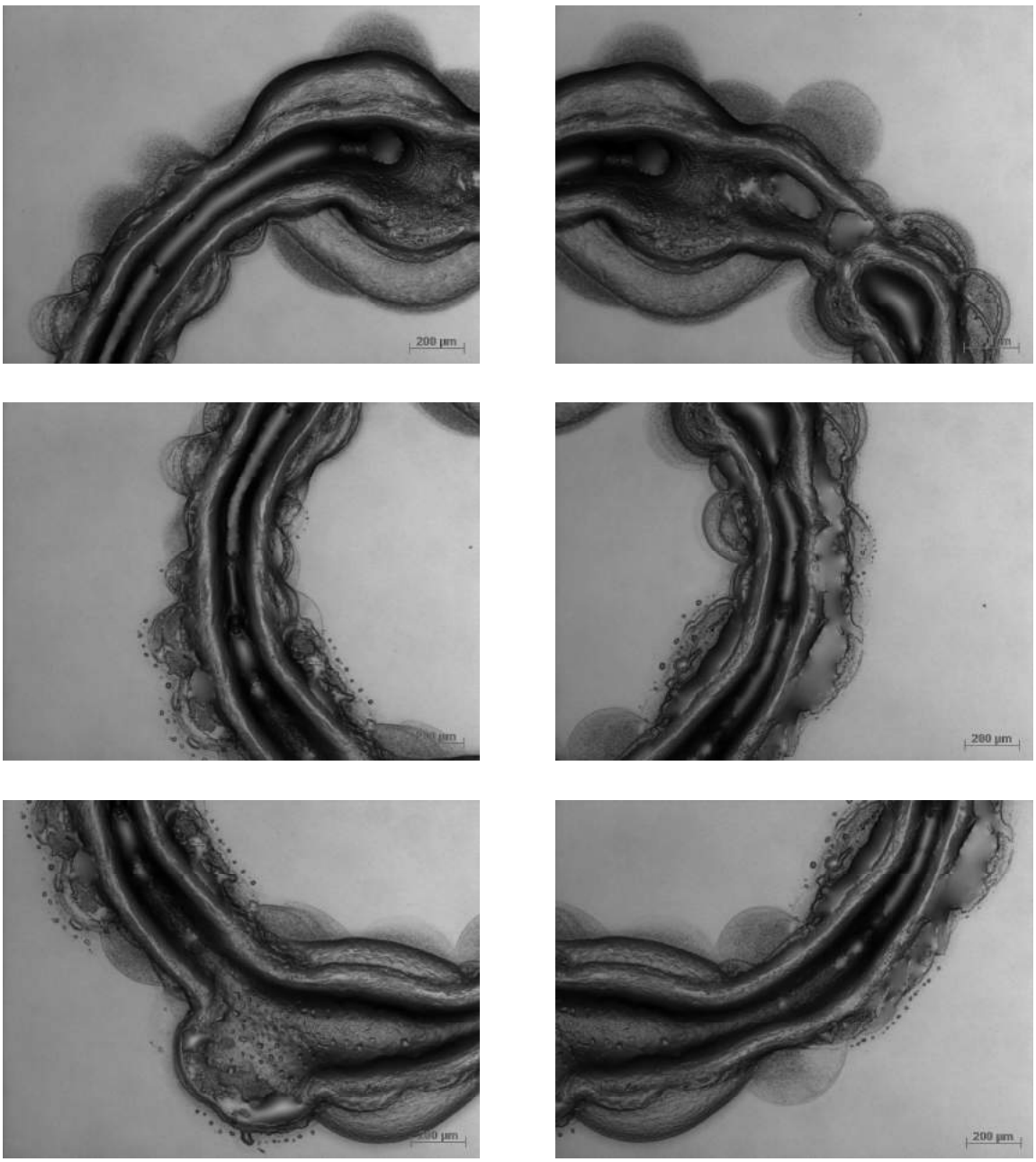
Figuur A.9: Lichtmicroscopie (versterking: 5x) van een ringvormige krater in PMMA-folie door het inkjetetsen met één spuitmond.



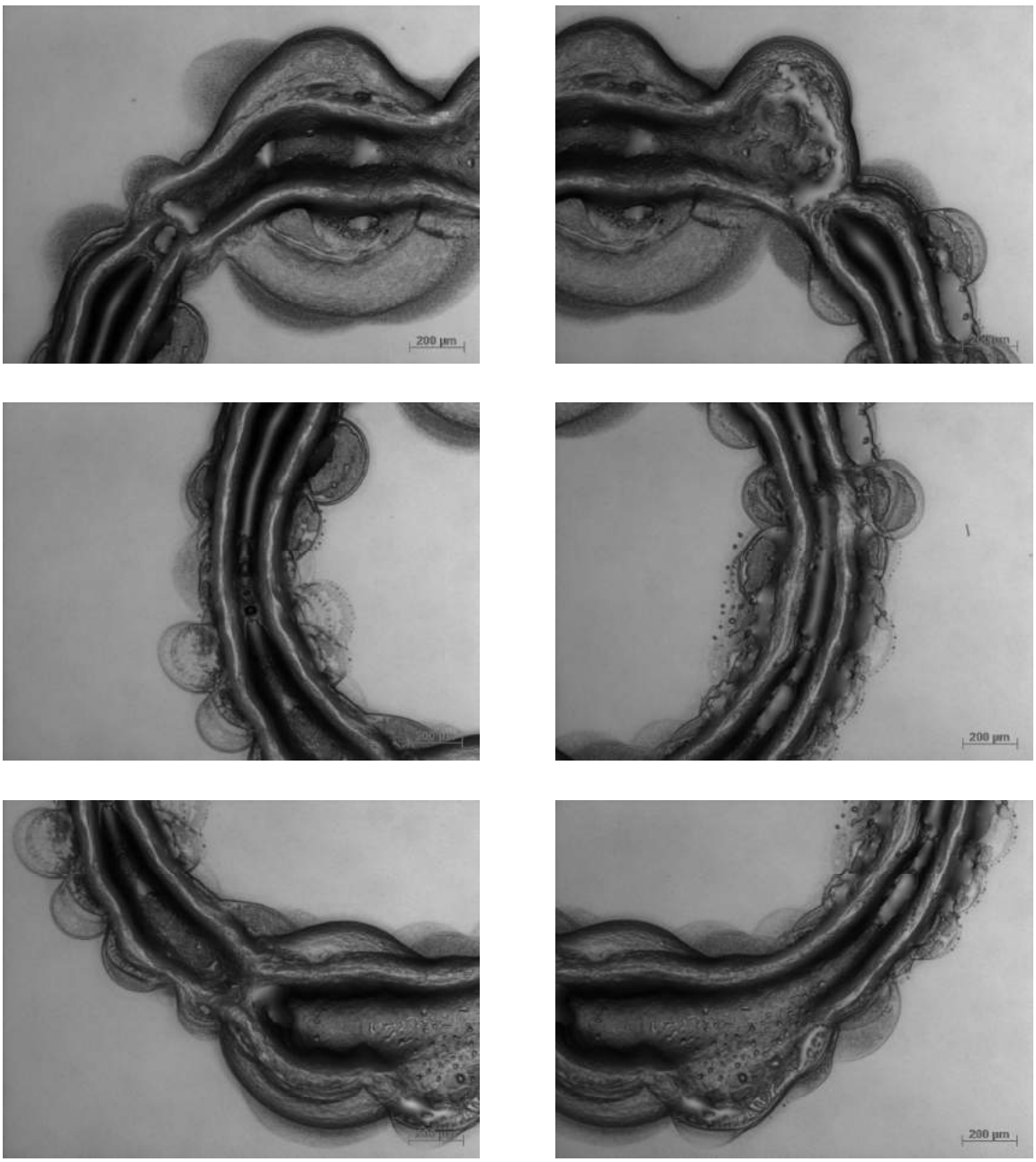
Figuur A.10: Lichtmicroscopie (versterking: 5x) van een ringvormige krater in PMMA-folie door het inkjetetsen met twee spuitmonden.



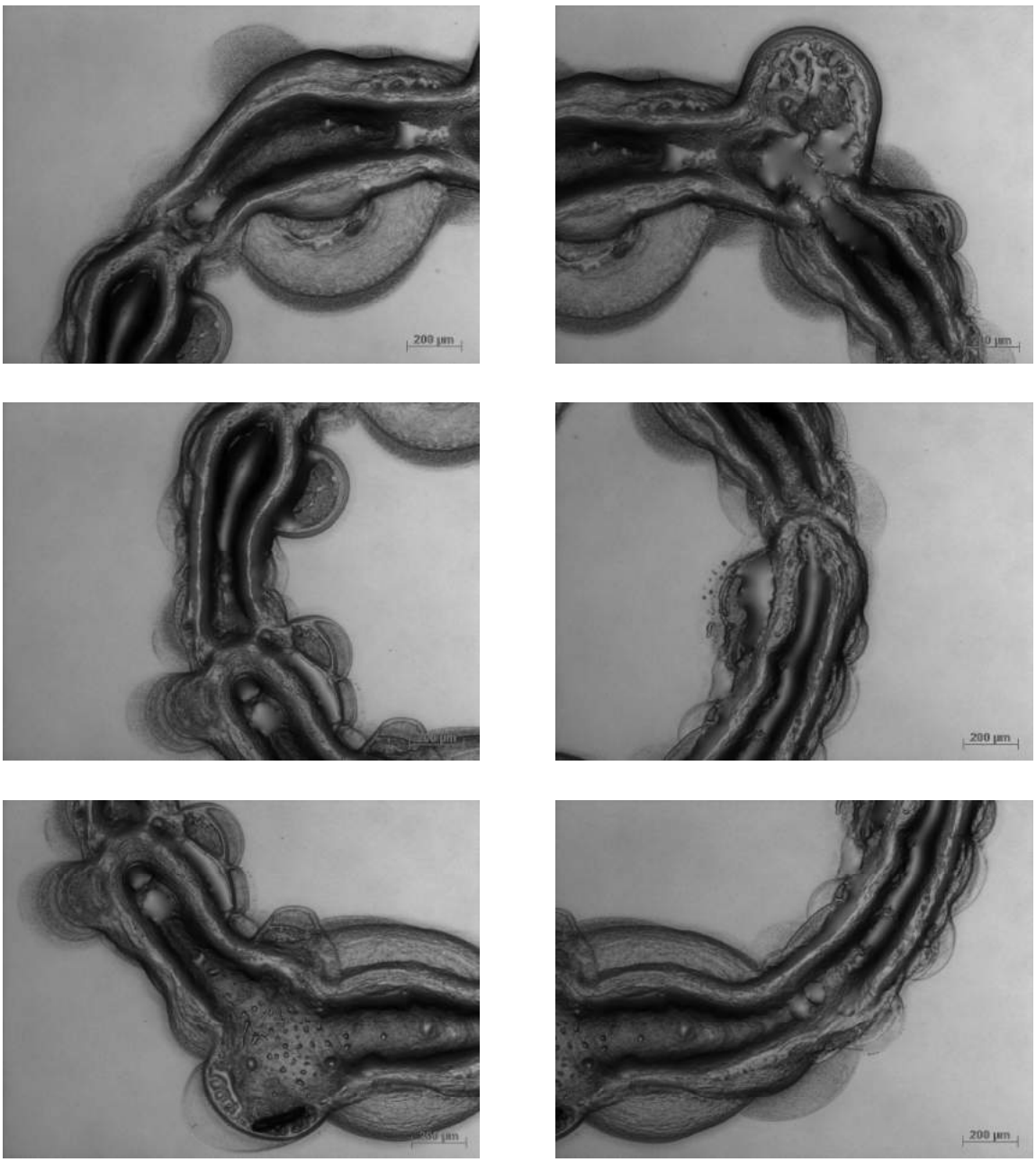
Figuur A.11: Lichtmicroscopie (versterking: 5x) van een ringvormige krater in PMMA-folie door het inkjetetsen met drie spuitmonden.



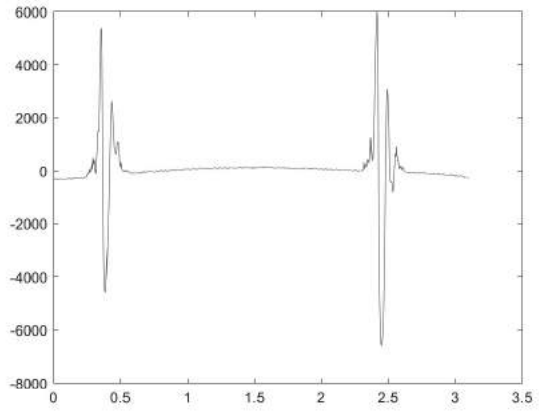
Figuur A.12: Lichtmicroscopie (versterking: 5x) van een ringvormige krater in PMMA-folie door het inkjetetsen met vier spuitmonden.



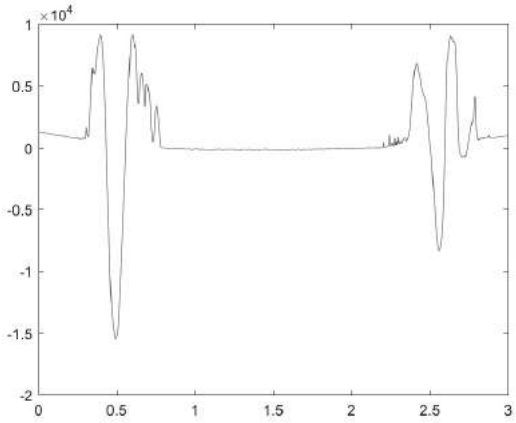
Figuur A.13: Lichtmicroscopie (versterking: 5x) van een ringvormige krater in PMMA-folie door het inkjetetsen met vijf spuitmonden.



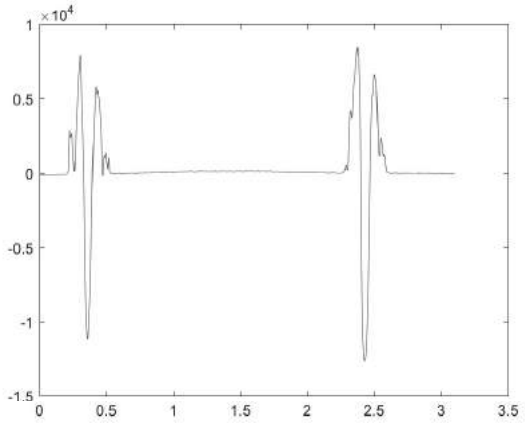
Figuur A.14: Lichtmicroscopie (versterking: 5x) van een ringvormige krater in PMMA-folie door het inkjetetsen met zes spuitmonden.



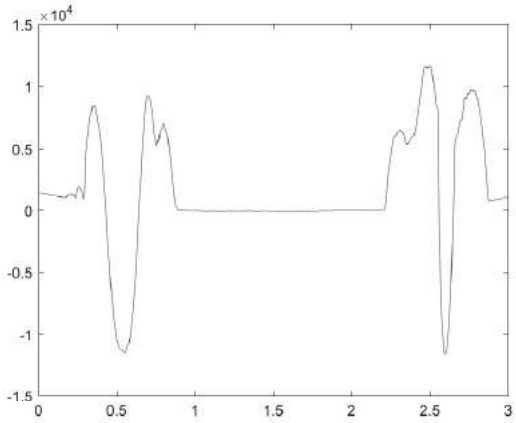
(a) Eén spuitmond, loodrecht op de printrichting.



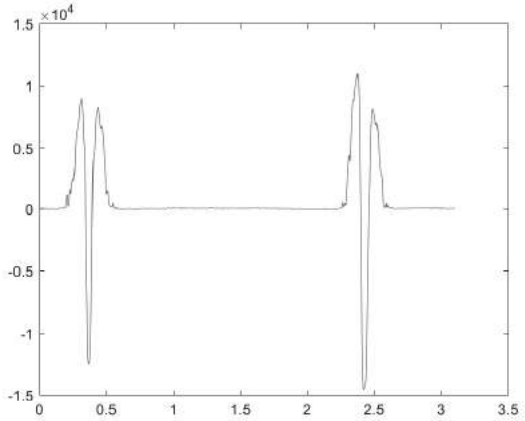
(b) Eén spuitmond, evenwijdig met de printrichting.



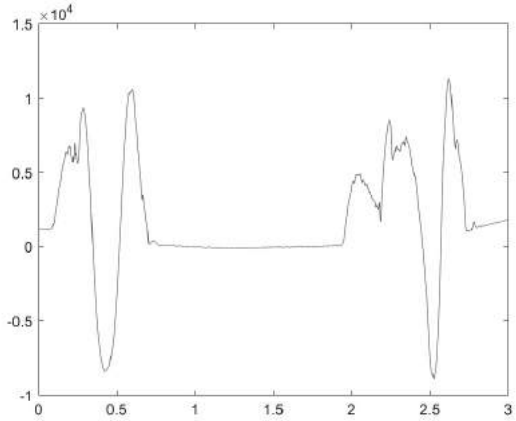
(c) Twee spuitmonden, loodrecht op de printrichting.



(d) Twee spuitmonden, evenwijdig met de printrichting.

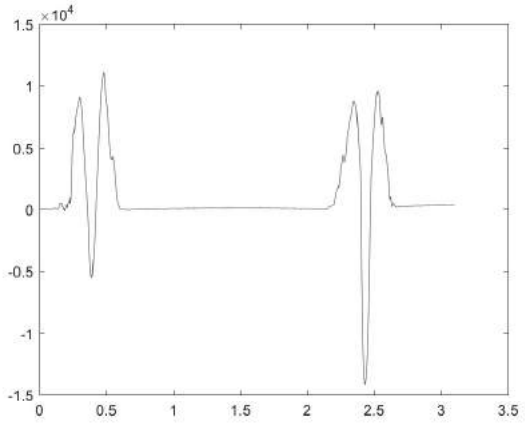


(e) Drie spuitmonden, loodrecht op de printrichting.

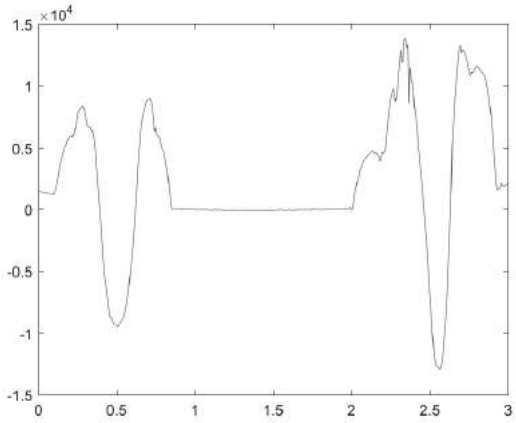


(f) Drie spuitmonden, evenwijdig met de printrichting.

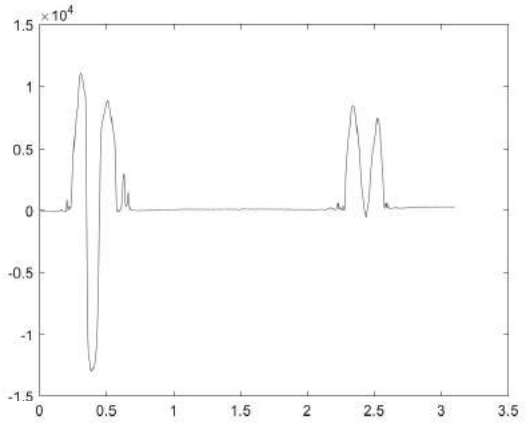
Figuur A.15: Profilometriebeelden met de verticale positie [nm] in functie van de horizontale positie [mm] voor ringvormige kraters in PMMA-folie door het inkjetetsen met verscheidene spuitmonden.



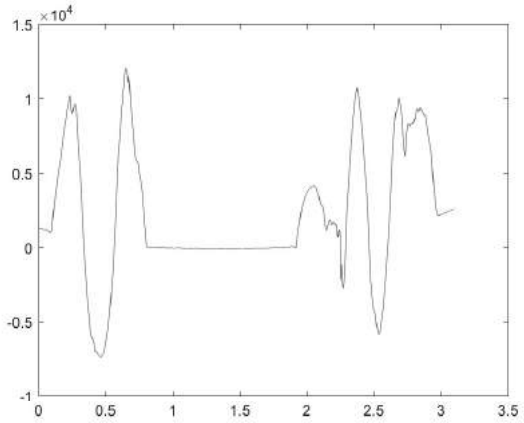
(a) Vier spuitmonden, loodrecht op de printrichting.



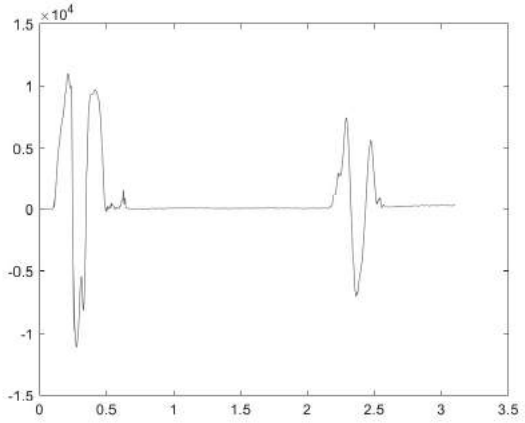
(b) Vier spuitmonden, evenwijdig met de printrichting.



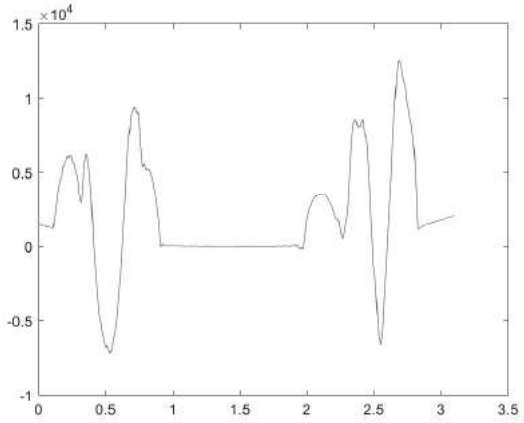
(c) Vijf spuitmonden, loodrecht op de printrichting.



(d) Vijf spuitmonden, evenwijdig met de printrichting.



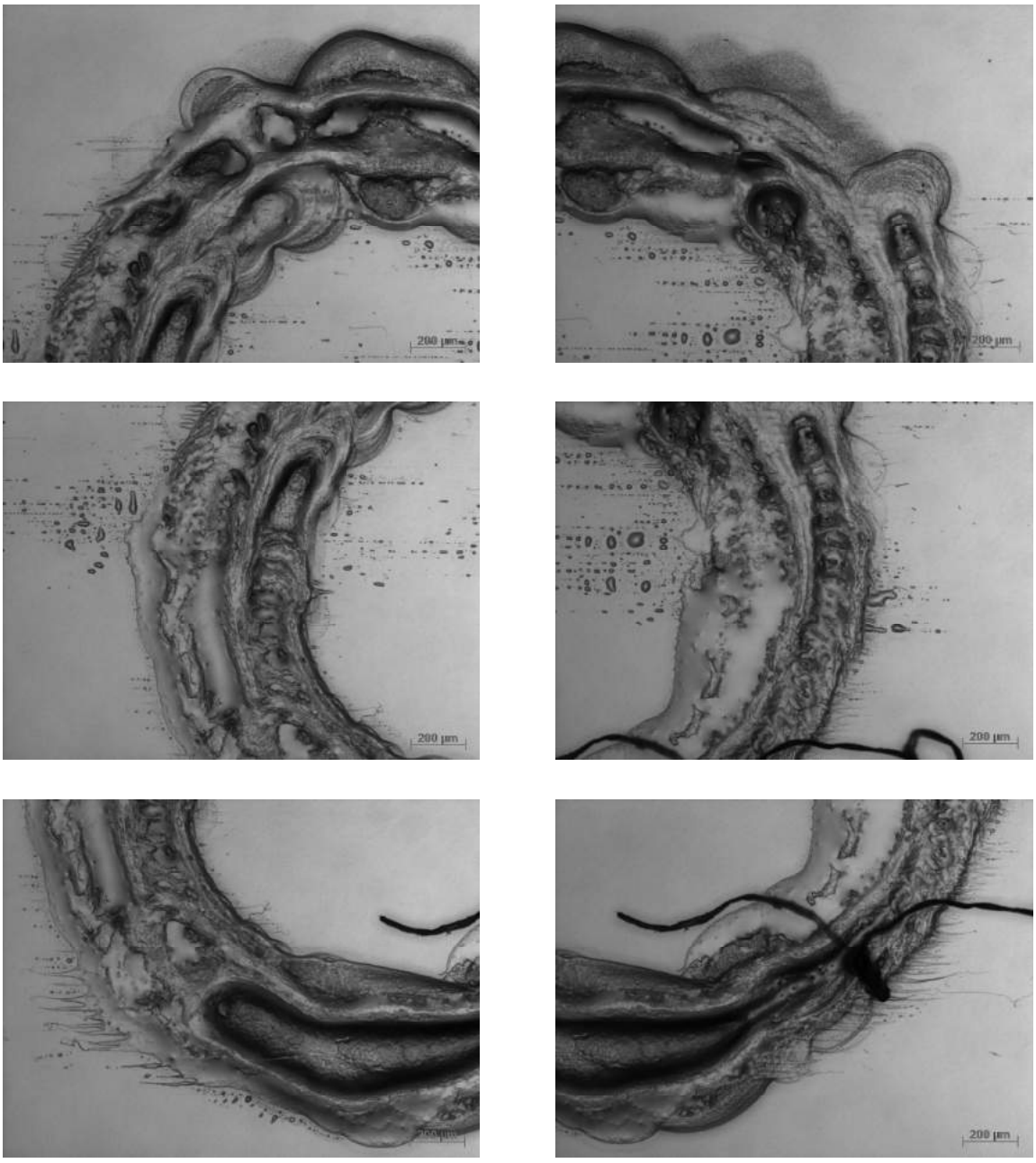
(e) Zes spuitmonden, loodrecht op de printrichting.



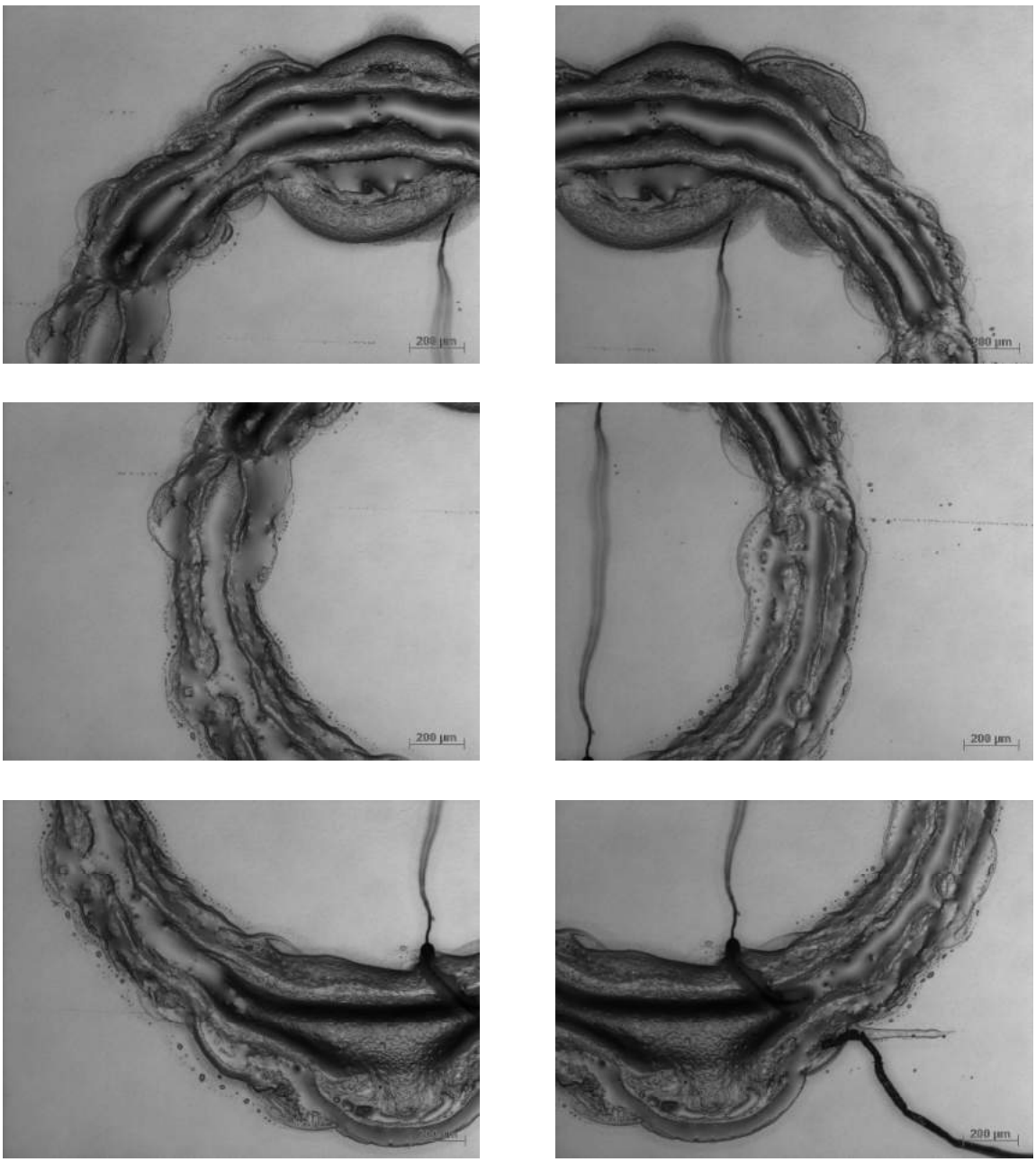
(f) Zes spuitmonden, evenwijdig met de printrichting.

Figuur A.16: Profilometriebeelden met de verticale positie [nm] in functie van de horizontale positie [mm] voor ringvormige kraters in PMMA-folie door het inkjetetsen met verscheidene spuitmonden (vervolg).

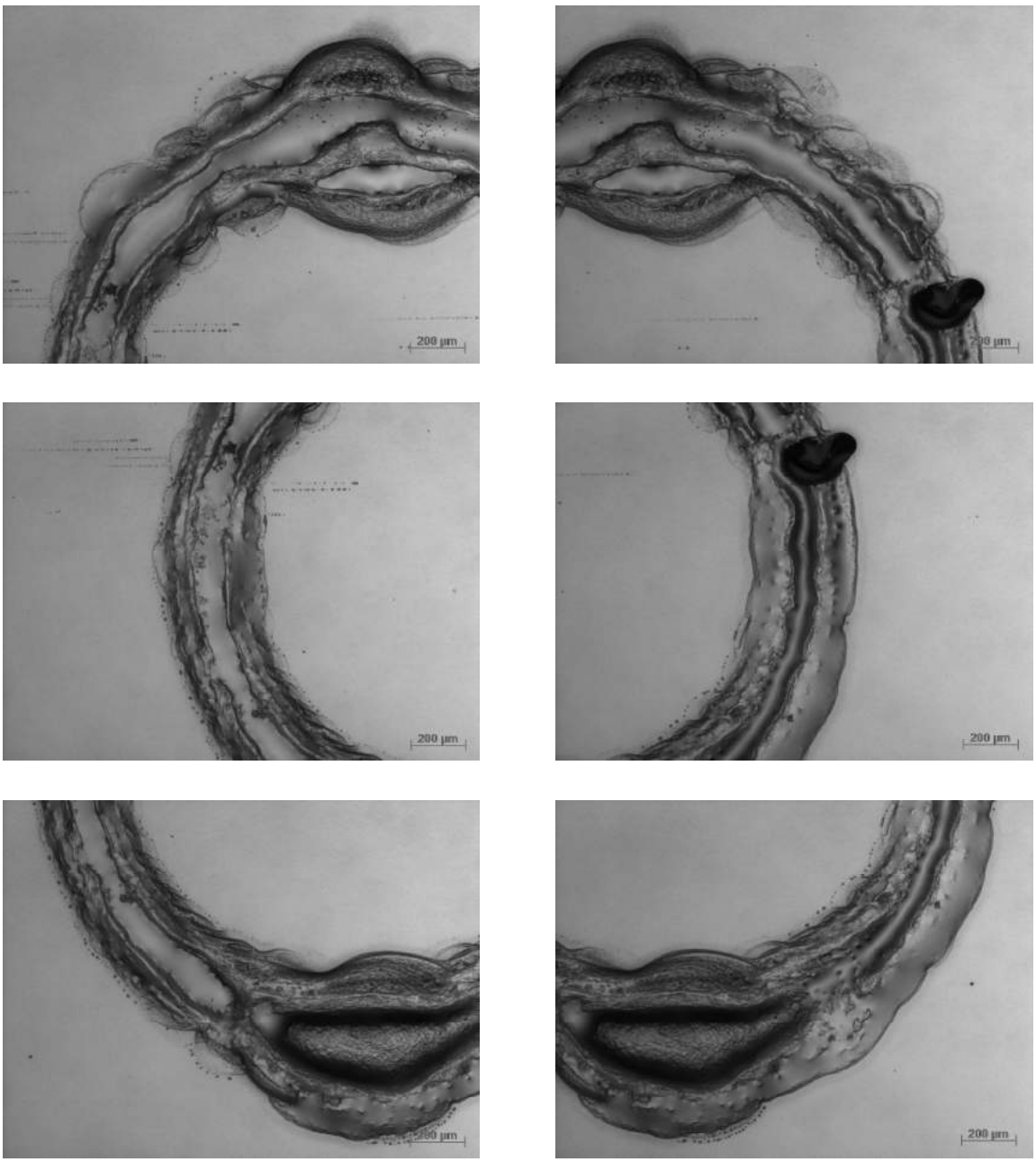
Printhoogte



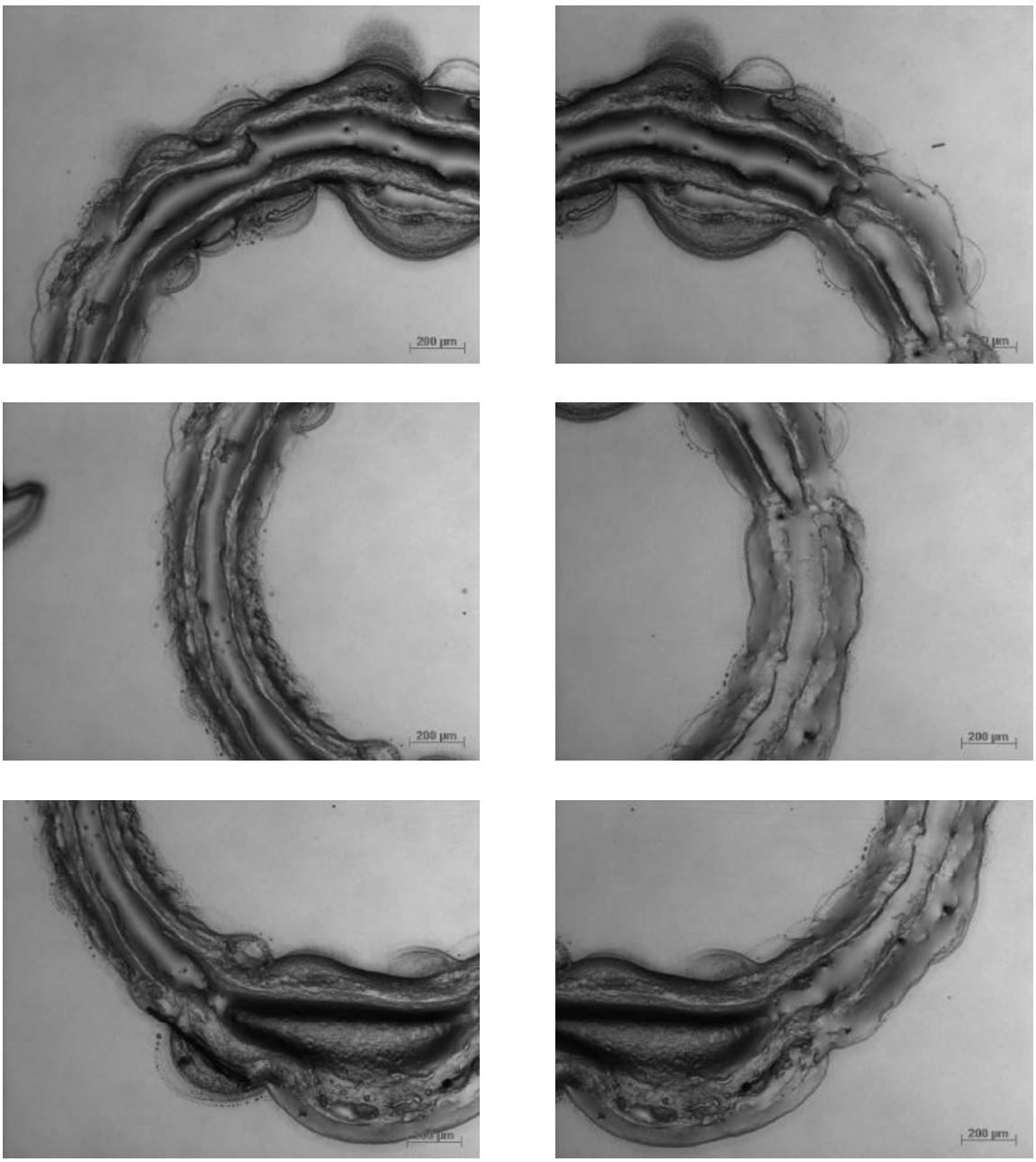
Figuur A.17: Lichtmicroscopie (versterking: 5x) van een ringvormige krater in PMMA-folie door het inkjetetsen bij een printhoogte van 250 µm.



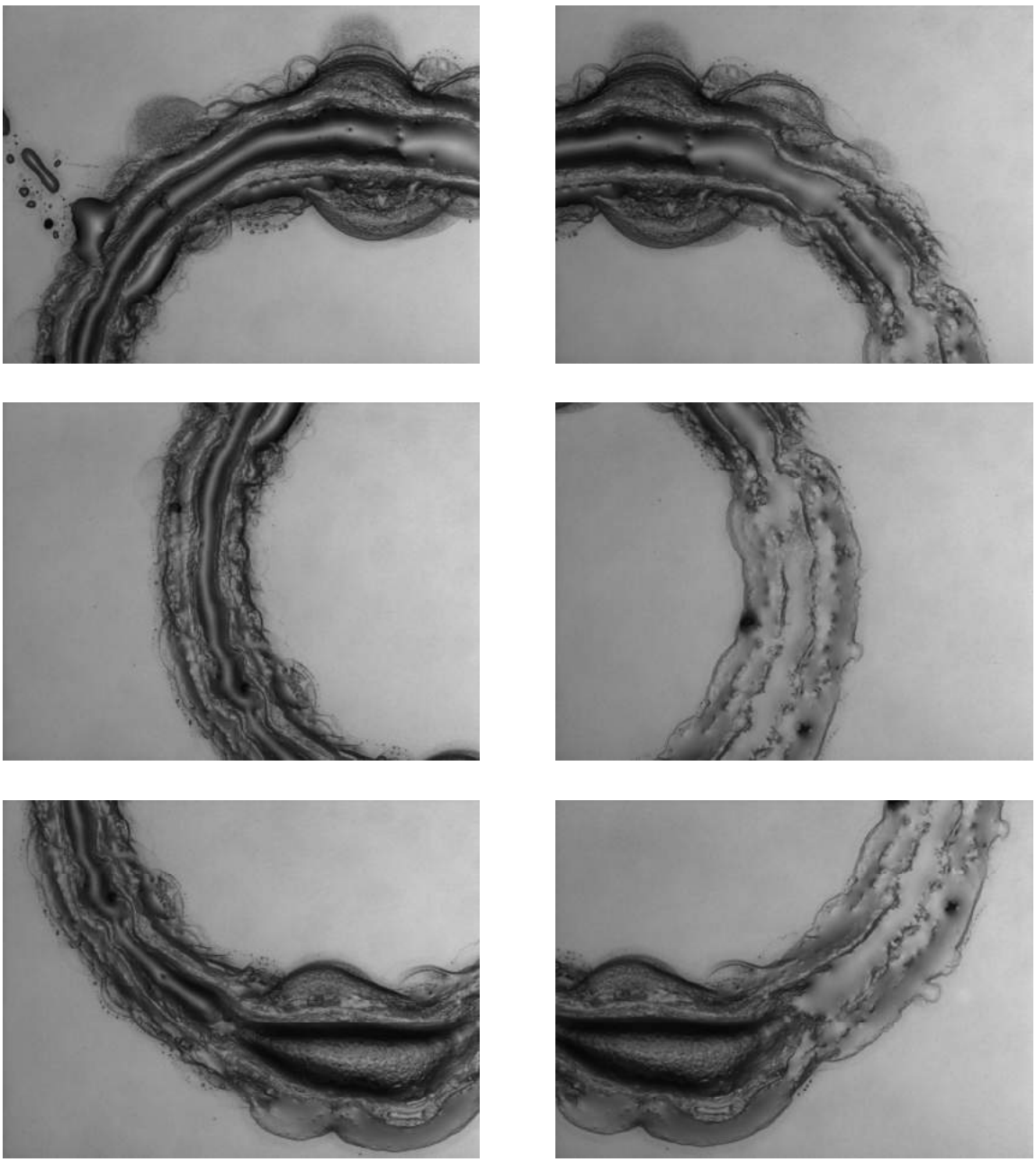
Figuur A.18: Lichtmicroscopie (versterking: 5x) van een ringvormige krater in PMMA-folie door het inkjetetsen bij een printhoogte van 350 µm.



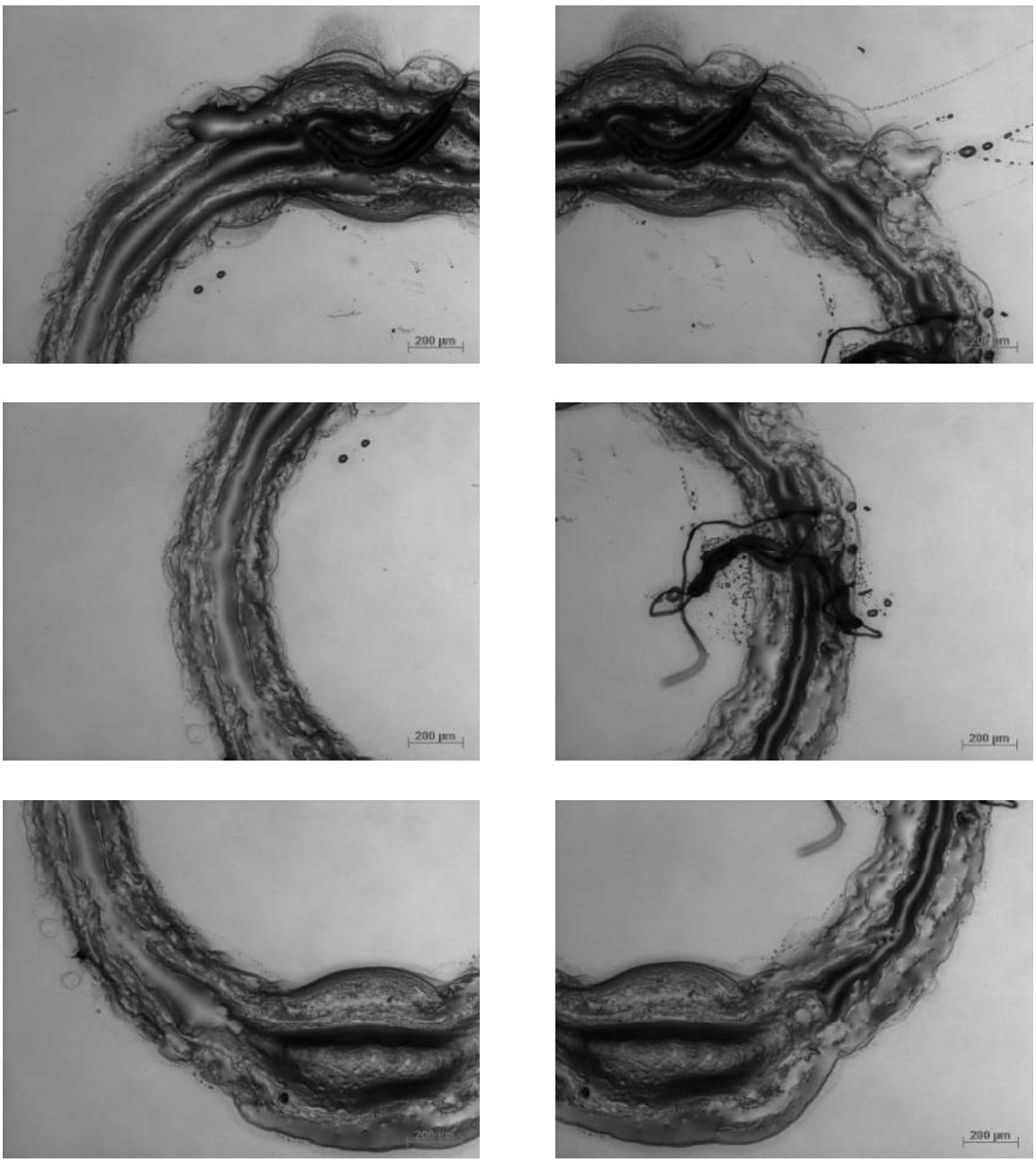
Figuur A.19: Lichtmicroscopie (versterking: 5x) van een ringvormige krater in PMMA-folie door het inkjetetsen bij een printhoogte van 450 µm.



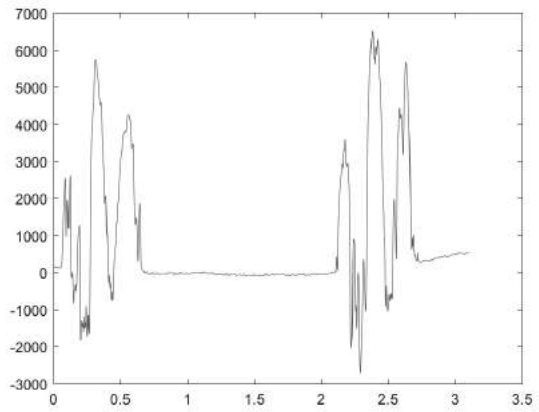
Figuur A.20: Lichtmicroscopie (versterking: 5x) van een ringvormige krater in PMMA-folie door het inkjetetsen bij een printhoogte van 550 µm.



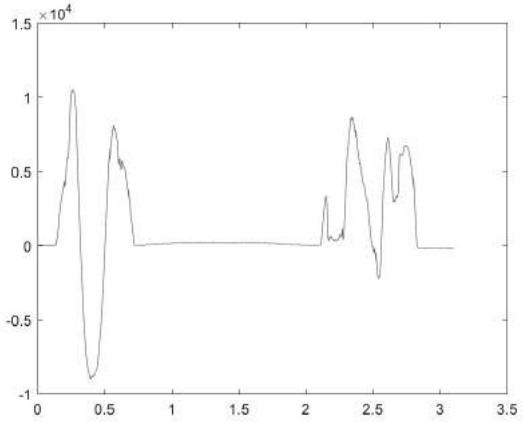
Figuur A.21: Lichtmicroscopie (versterking: 5x) van een ringvormige krater in PMMA-folie door het inkjetetsen bij een printhoogte van 650 µm.



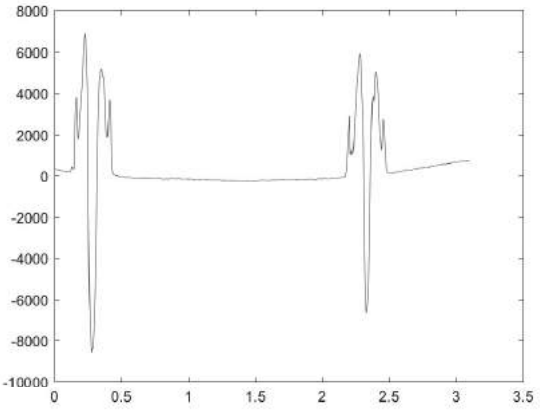
Figuur A.22: Lichtmicroscopie (versterking: 5x) van een ringvormige krater in PMMA-folie door het inkjetetsen bij een printhoogte van 750 µm.



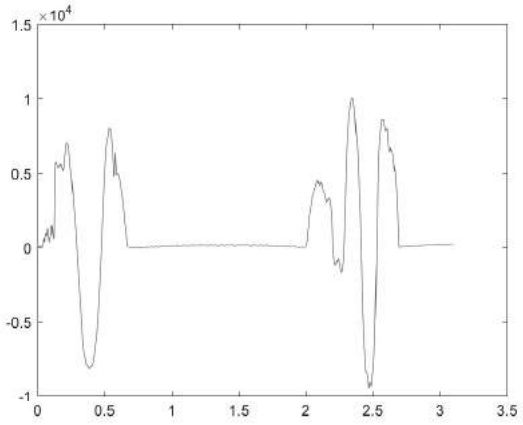
(a) Printhoogte: 250 µm, loodrecht op de printrichting.



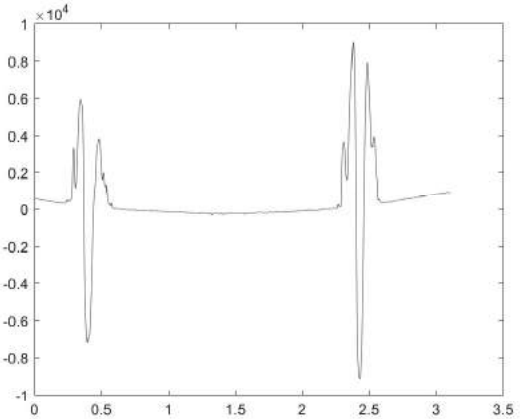
(b) Printhoogte: 250 µm, evenwijdig met de printrichting.



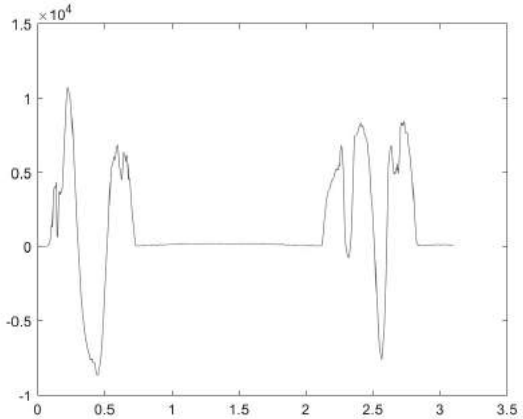
(c) Printhoogte: 350 µm, loodrecht op de printrichting.



(d) Printhoogte: 350 µm, evenwijdig met de printrichting.

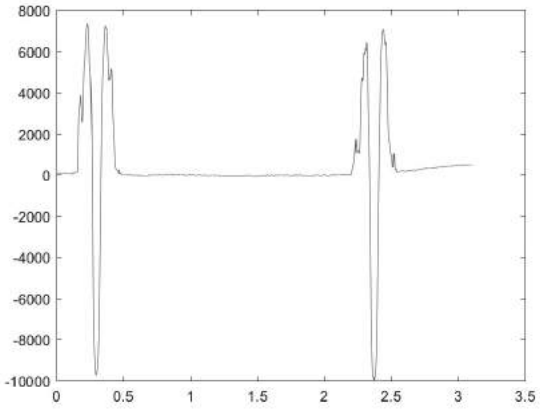


(e) Printhoogte: 450 µm, loodrecht op de printrichting.

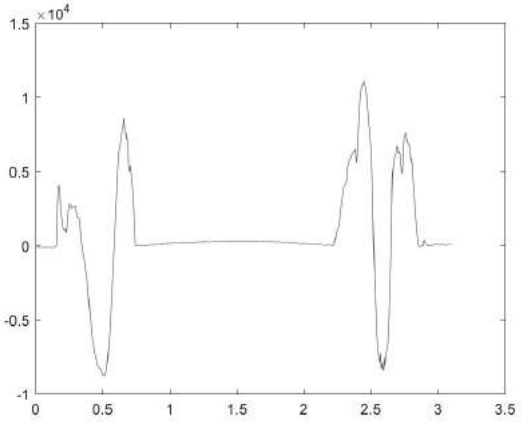


(f) Printhoogte: 450 µm, evenwijdig met de printrichting.

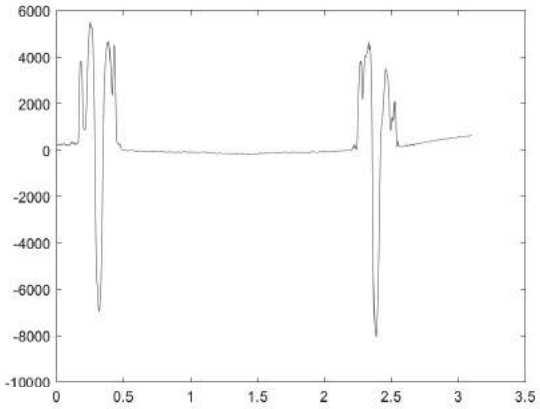
Figuur A.23: Profilometriebeelden met de verticale positie [nm] in functie van de horizontale positie [mm] voor ringvormige kraters in PMMA-folie door het inkjetetsen bij verscheidene printhoogten.



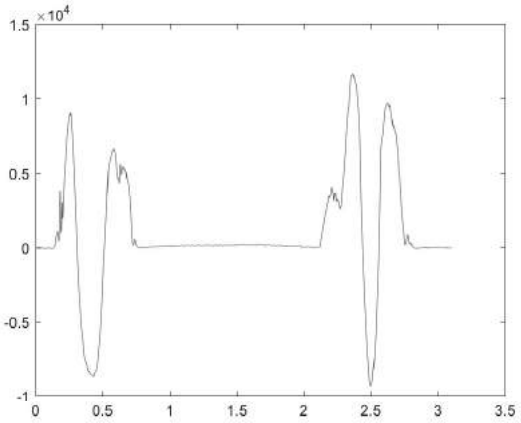
(a) Printhoogte: 550 µm, loodrecht op de printrichting.



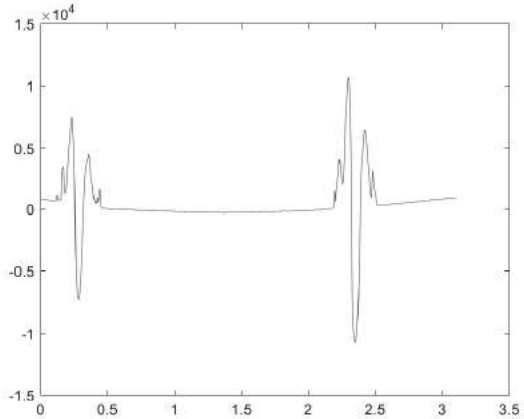
(b) Printhoogte: 550 µm, evenwijdig met de printrichting.



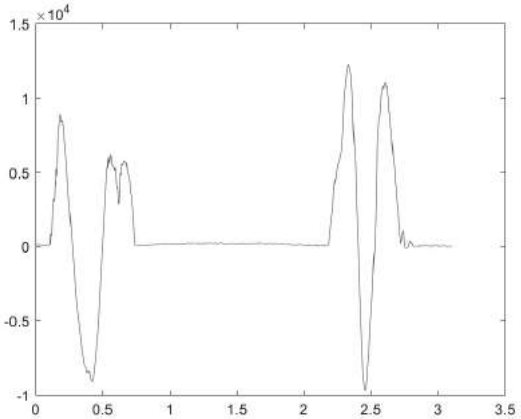
(c) Printhoogte: 650 µm, loodrecht op de printrichting.



(d) Printhoogte: 650 µm, evenwijdig met de printrichting.



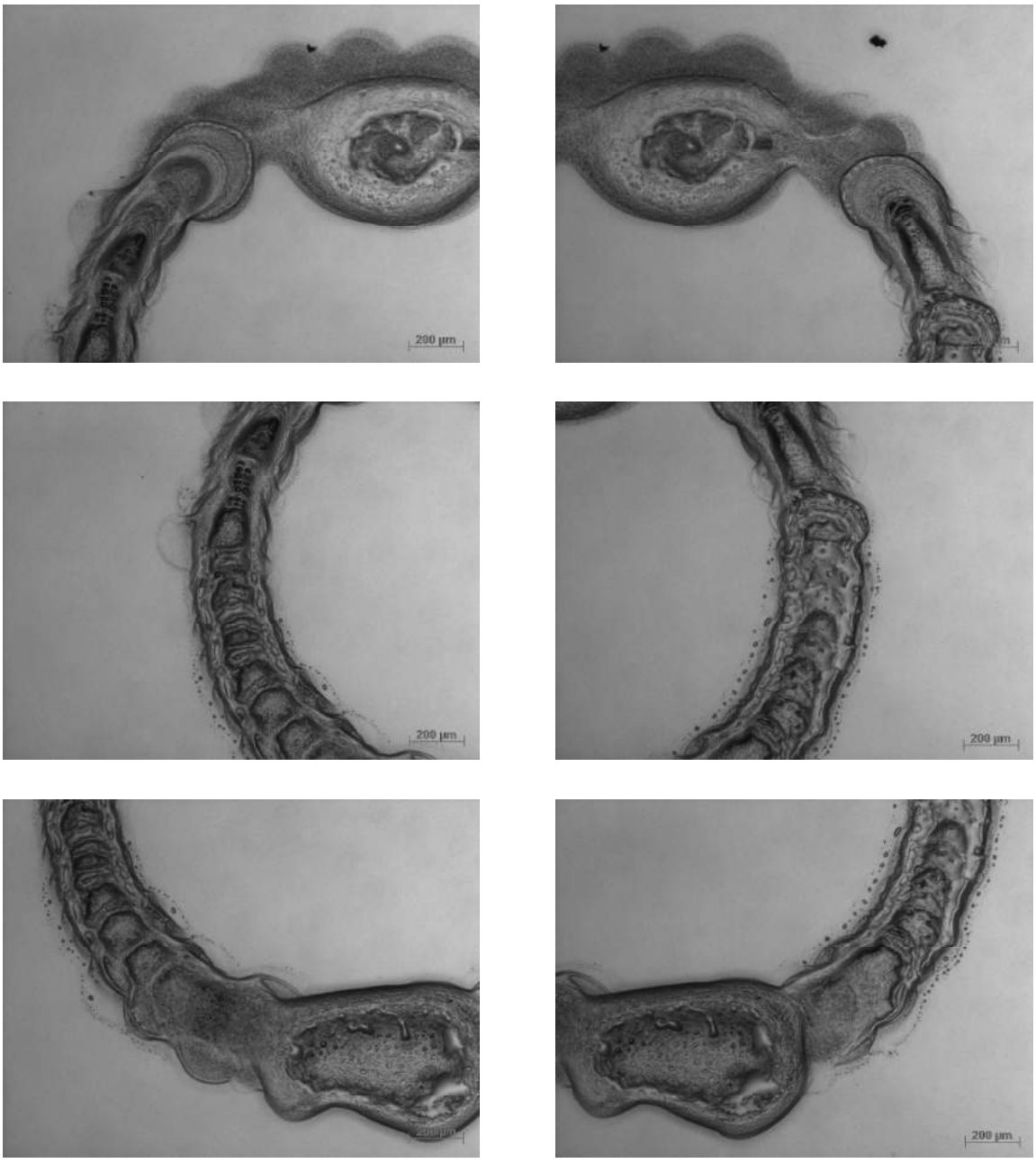
(e) Printhoogte: 750 µm, loodrecht op de printrichting.



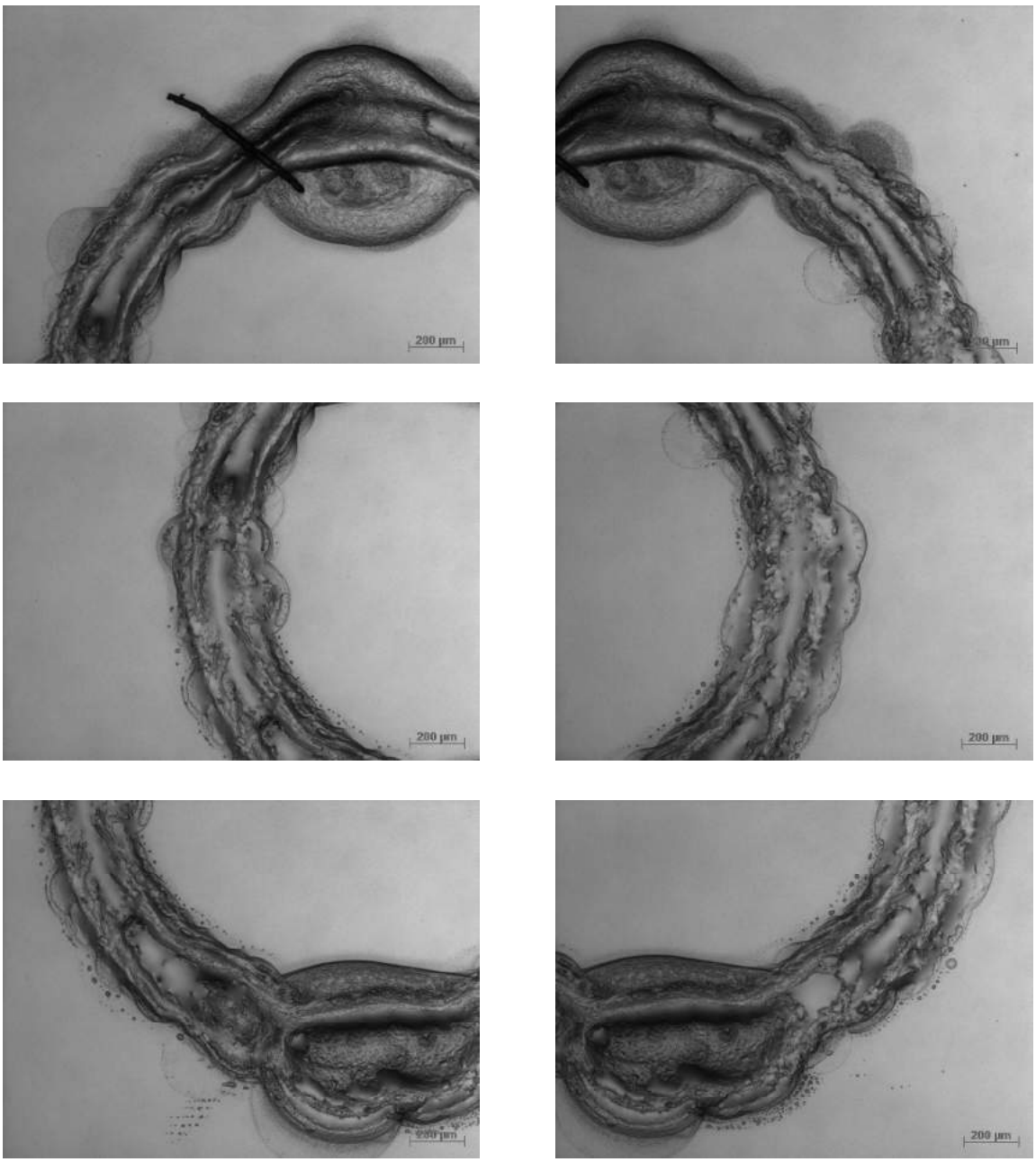
(f) Printhoogte: 750 µm, evenwijdig met de printrichting.

Figuur A.24: Profilometriebeelden met de verticale positie [nm] in functie van de horizontale positie [mm] voor ringvormige kraters in PMMA-folie door het inkjetetsen bij verscheidene printhoogten (vervolg).

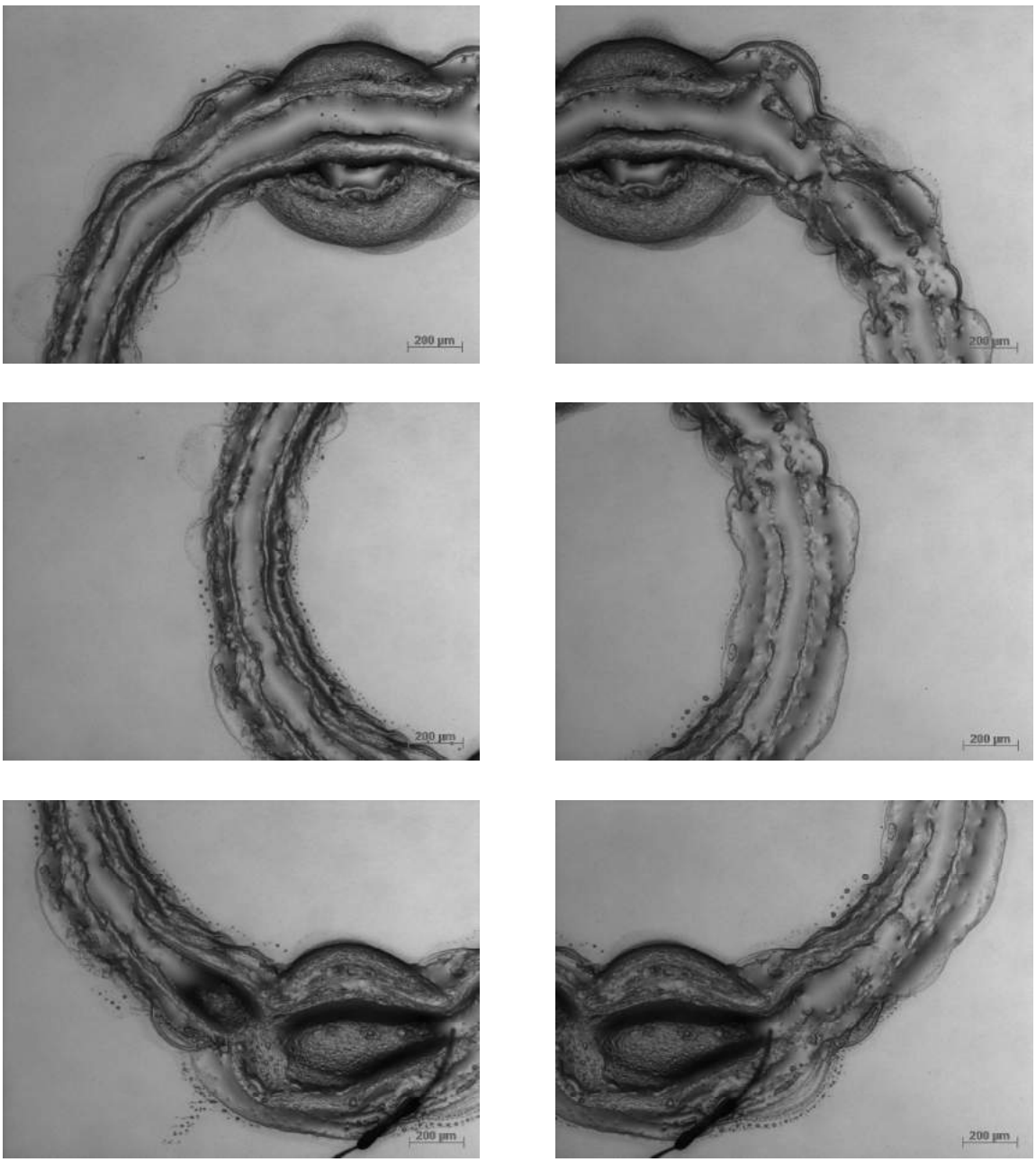
Aantal lagen



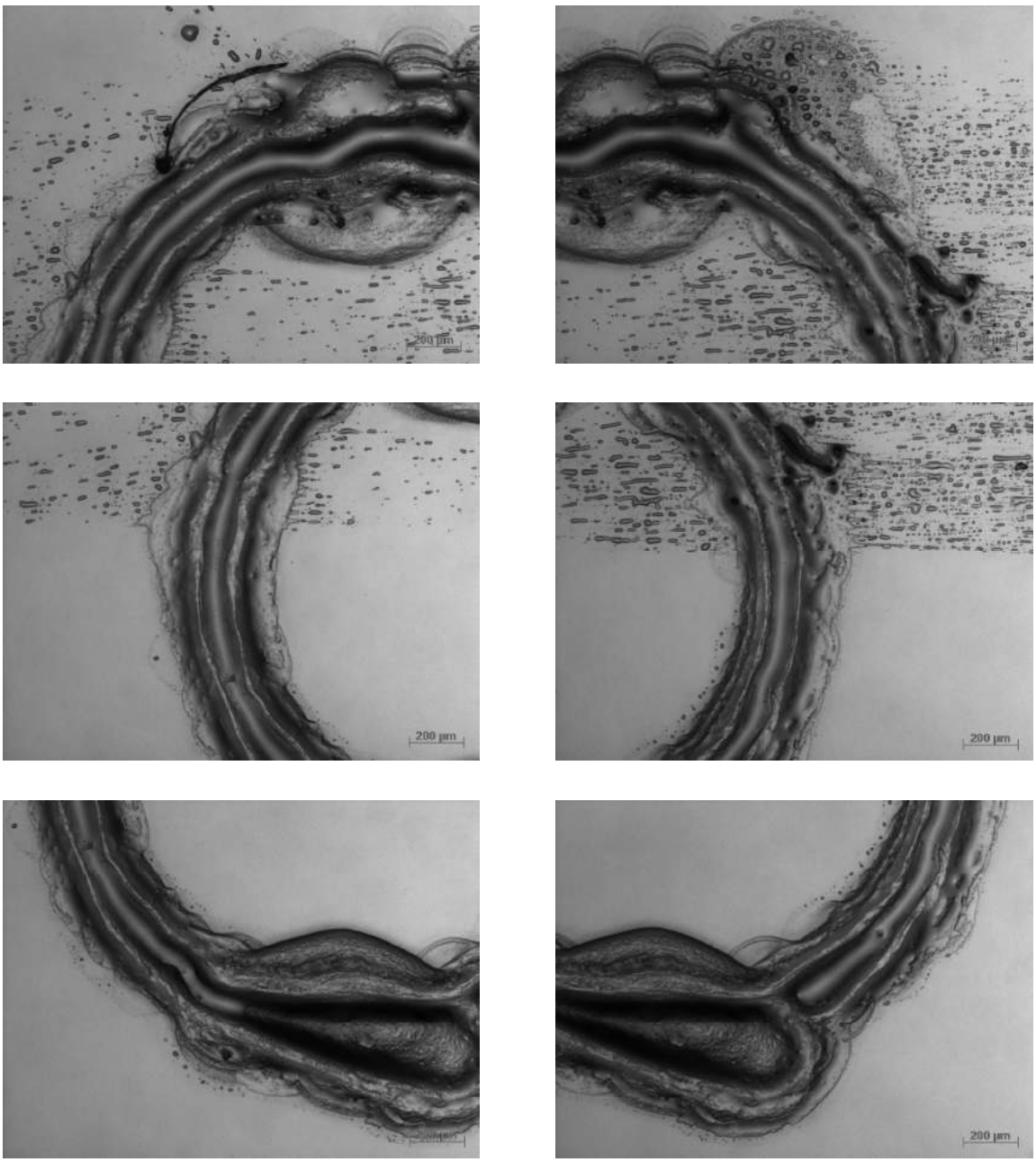
Figuur A.25: Lichtmicroscopie (versterking: 5x) van een ringvormige krater in PMMA-folie door het inkjetetsen van één anisol laag.



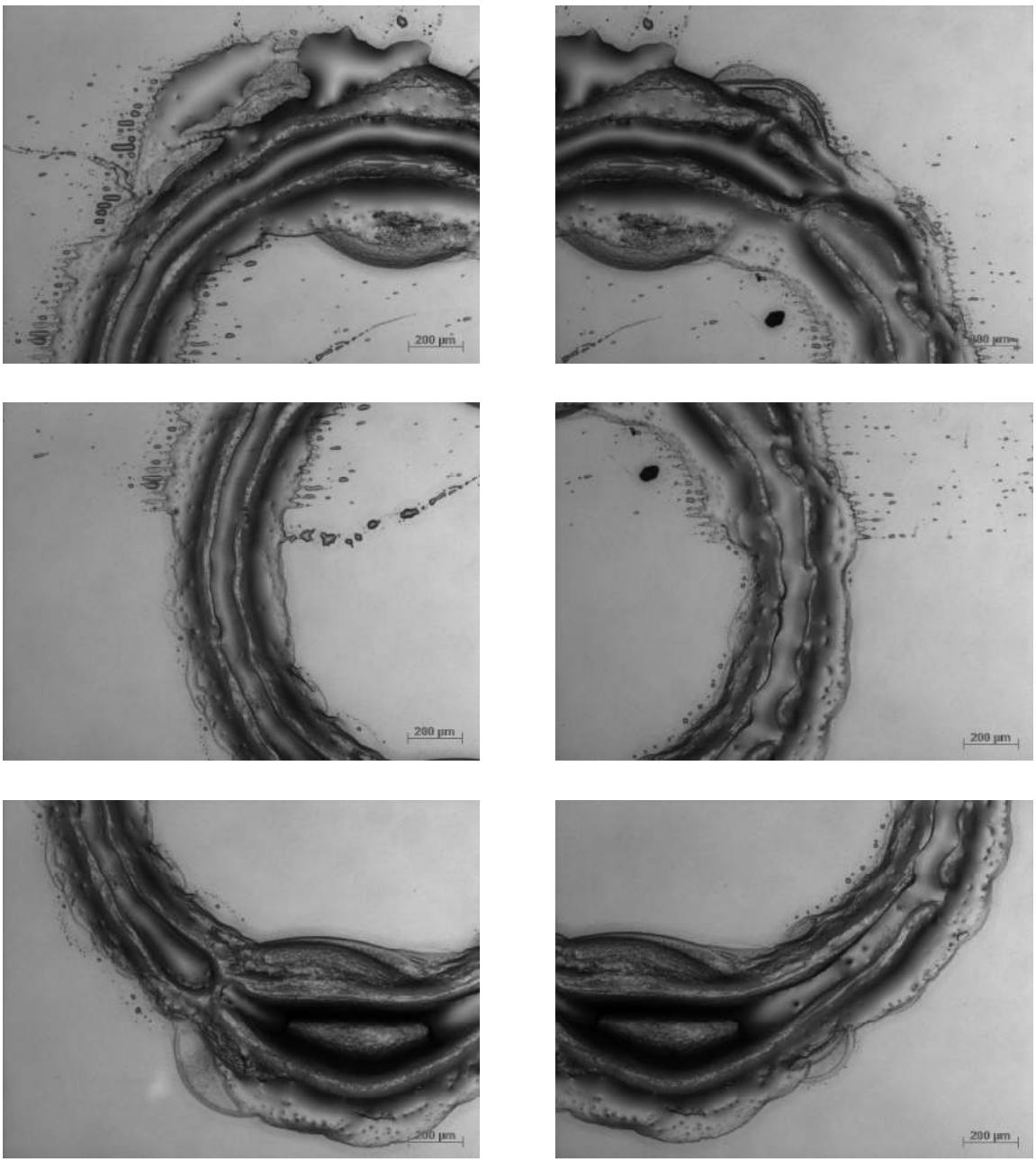
Figuur A.26: Lichtmicroscopie (versterking: 5x) van een ringvormige krater in PMMA-folie door het inkjetetsen van twee anisol lagen.



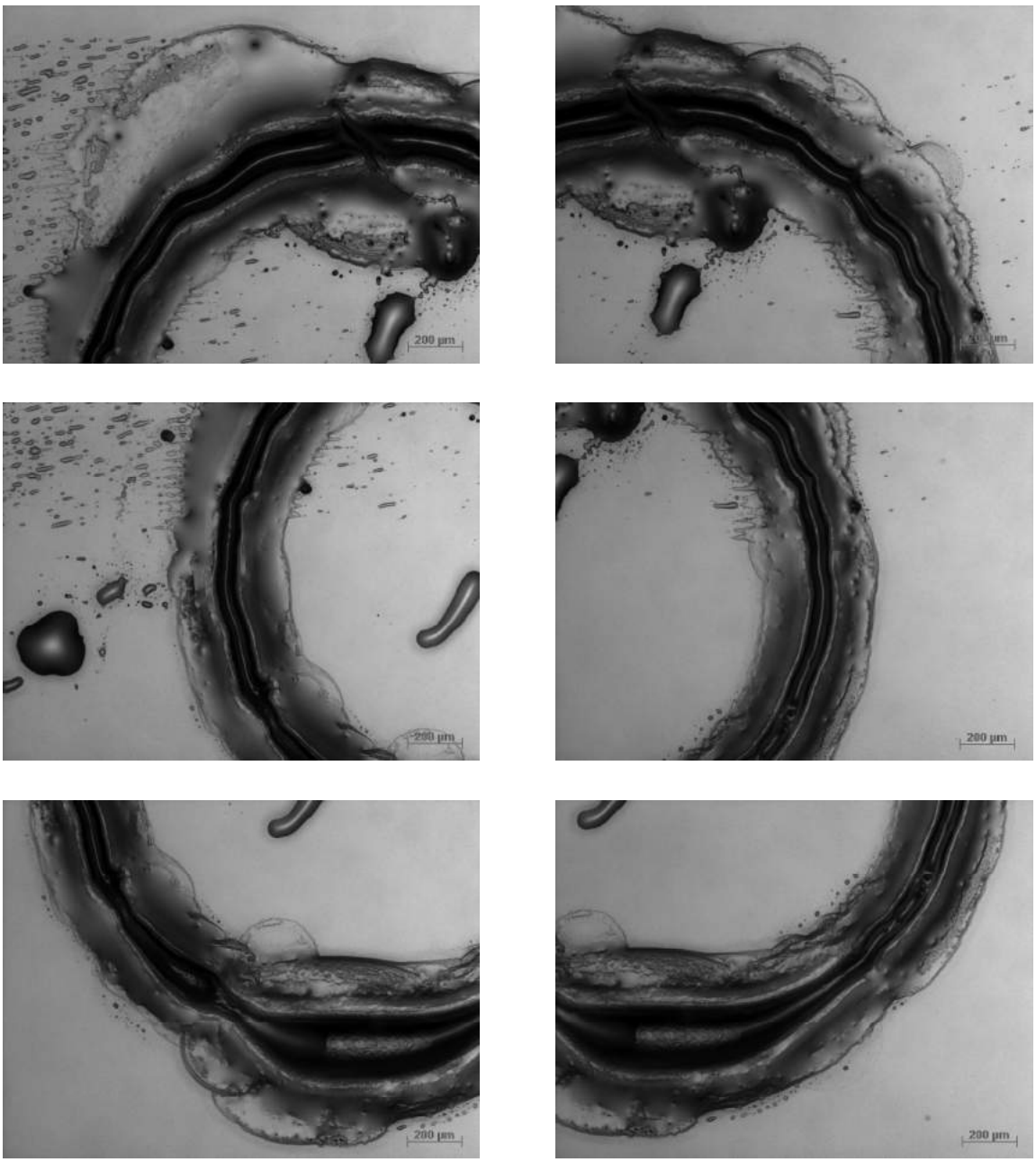
Figuur A.27: Lichtmicroscopie (versterking: 5x) van een ringvormige krater in PMMA-folie door het inkjetetsen van drie anisol lagen.



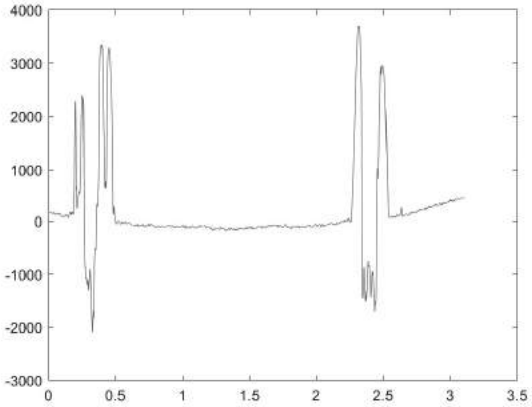
Figuur A.28: Lichtmicroscopie (versterking: 5x) van een ringvormige krater in PMMA-folie door het inkjetetsen van vier anisol lagen.



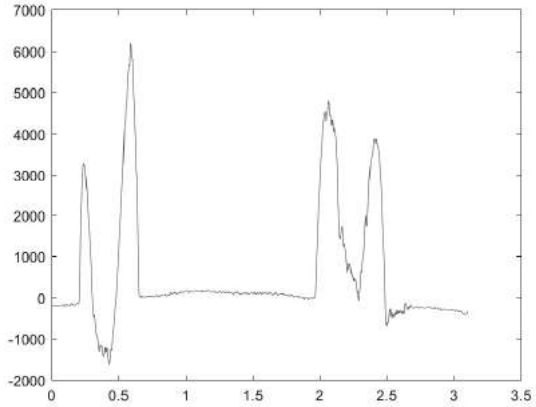
Figuur A.29: Lichtmicroscopie (versterking: 5x) van een ringvormige krater in PMMA-folie door het inkjetetsen van vijf anisol lagen.



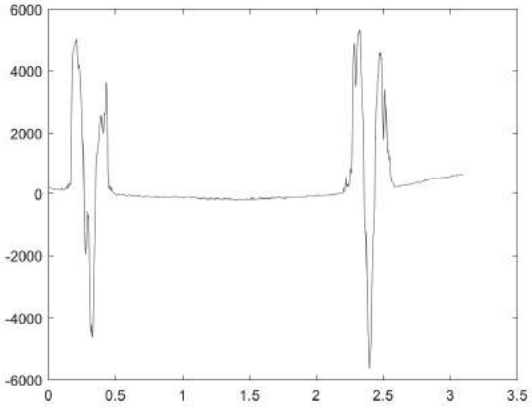
Figuur A.30: Lichtmicroscopie (versterking: 5x) van een ringvormige krater in PMMA-folie door het inkjetetsen van zes anisol lagen.



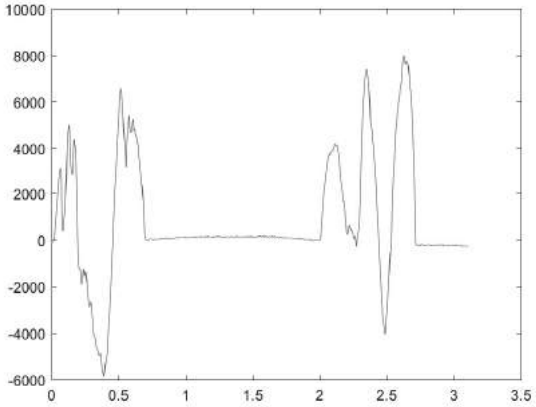
(a) Eén laag, loodrecht op de printrichting.



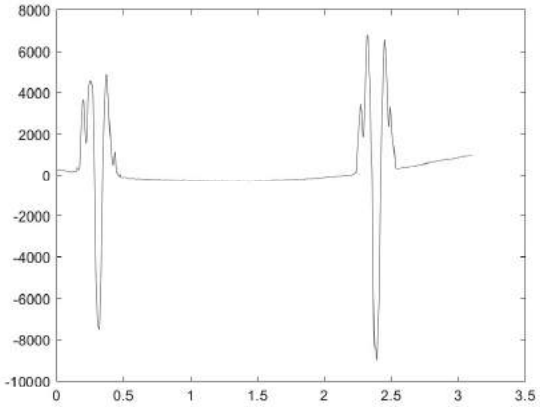
(b) Eén laag, evenwijdig met de printrichting.



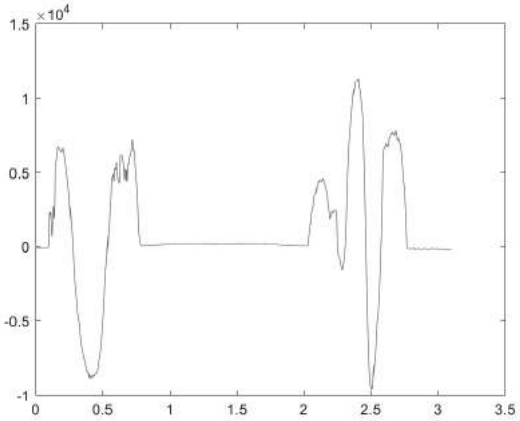
(c) Twee lagen, loodrecht op de printrichting.



(d) Twee lagen, evenwijdig met de printrichting.

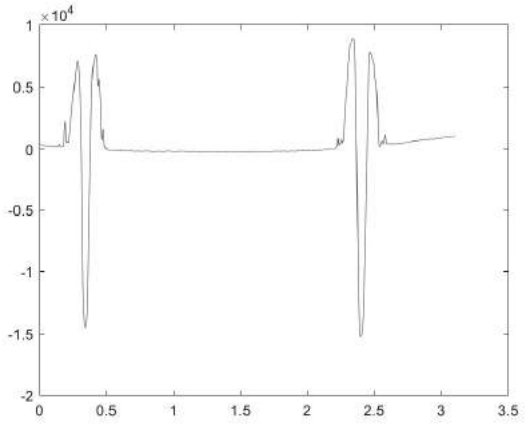


(e) Drie lagen, loodrecht op de printrichting.

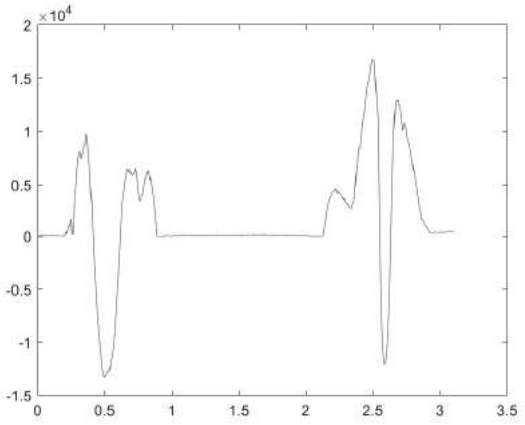


(f) Drie lagen, evenwijdig met de printrichting.

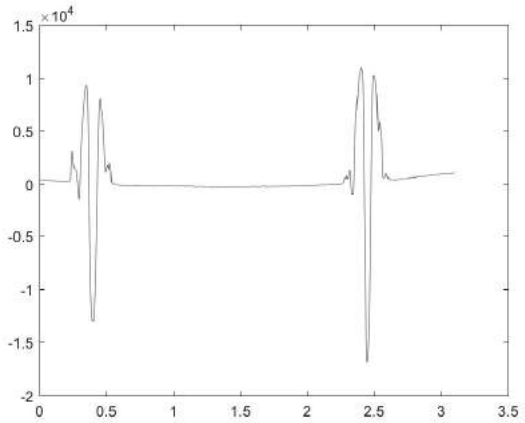
Figuur A.31: Profilometriebeelden met de verticale positie [nm] in functie van de horizontale positie [mm] voor ringvormige kraters in PMMA-folie door het inkjetetsen van verscheidene anisol lagen.



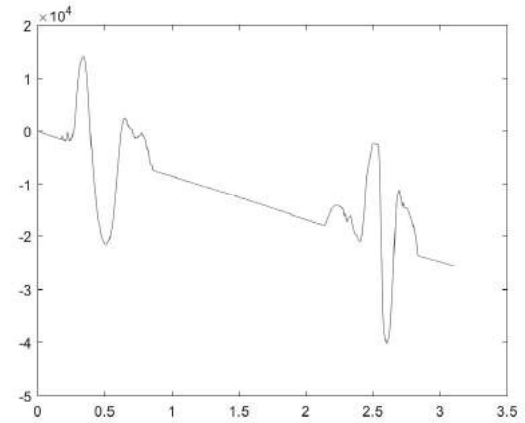
(a) Vier lagen, loodrecht op de printrichting.



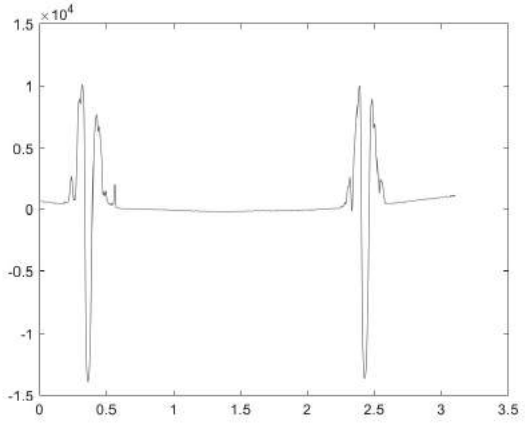
(b) Vier lagen, evenwijdig met de printrichting.



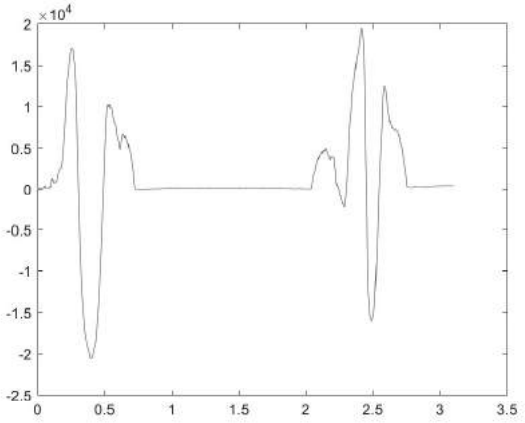
(c) Vijf lagen, loodrecht op de printrichting.



(d) Vijf lagen, evenwijdig met de printrichting.



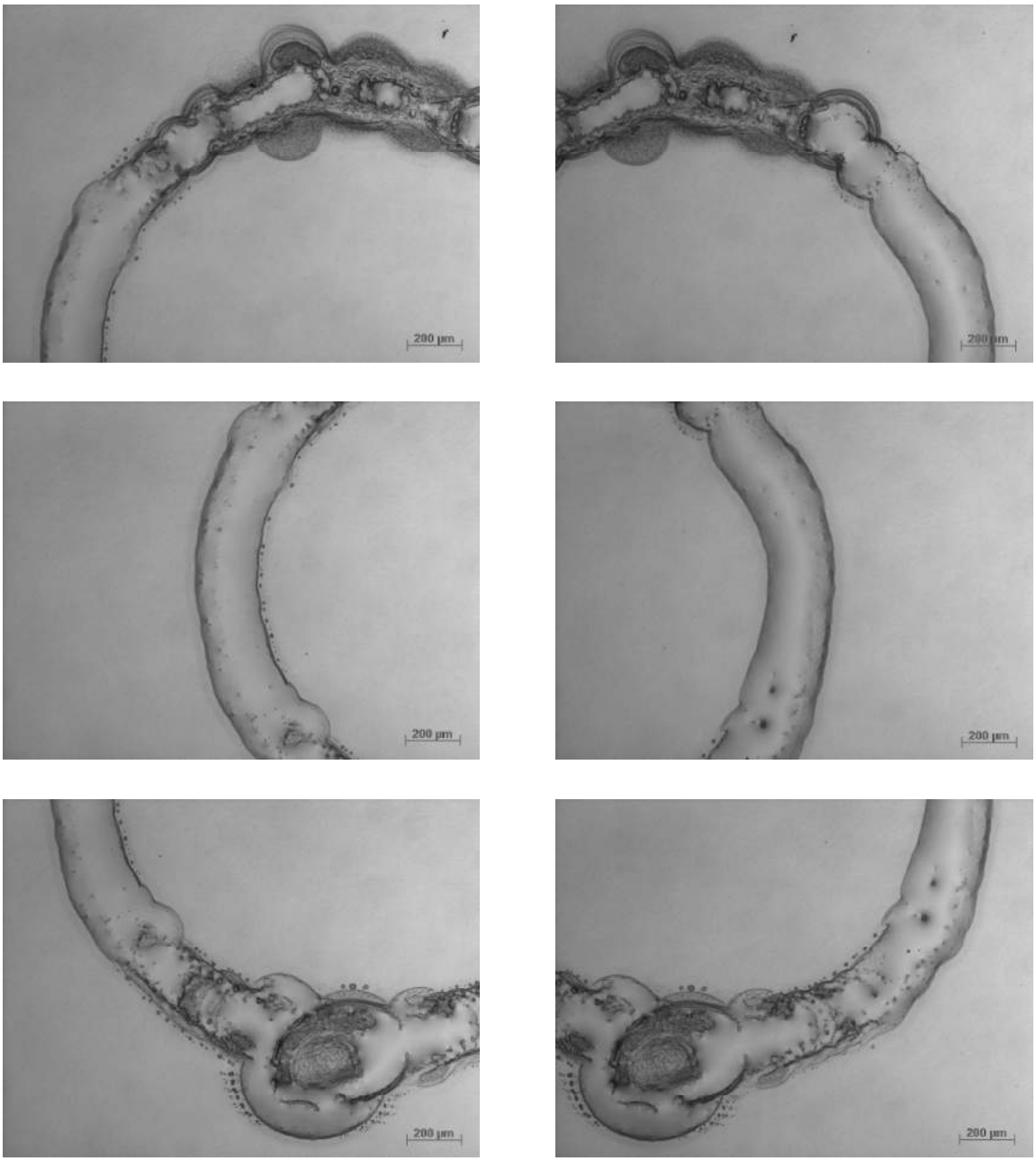
(e) Zes lagen, loodrecht op de printrichting.



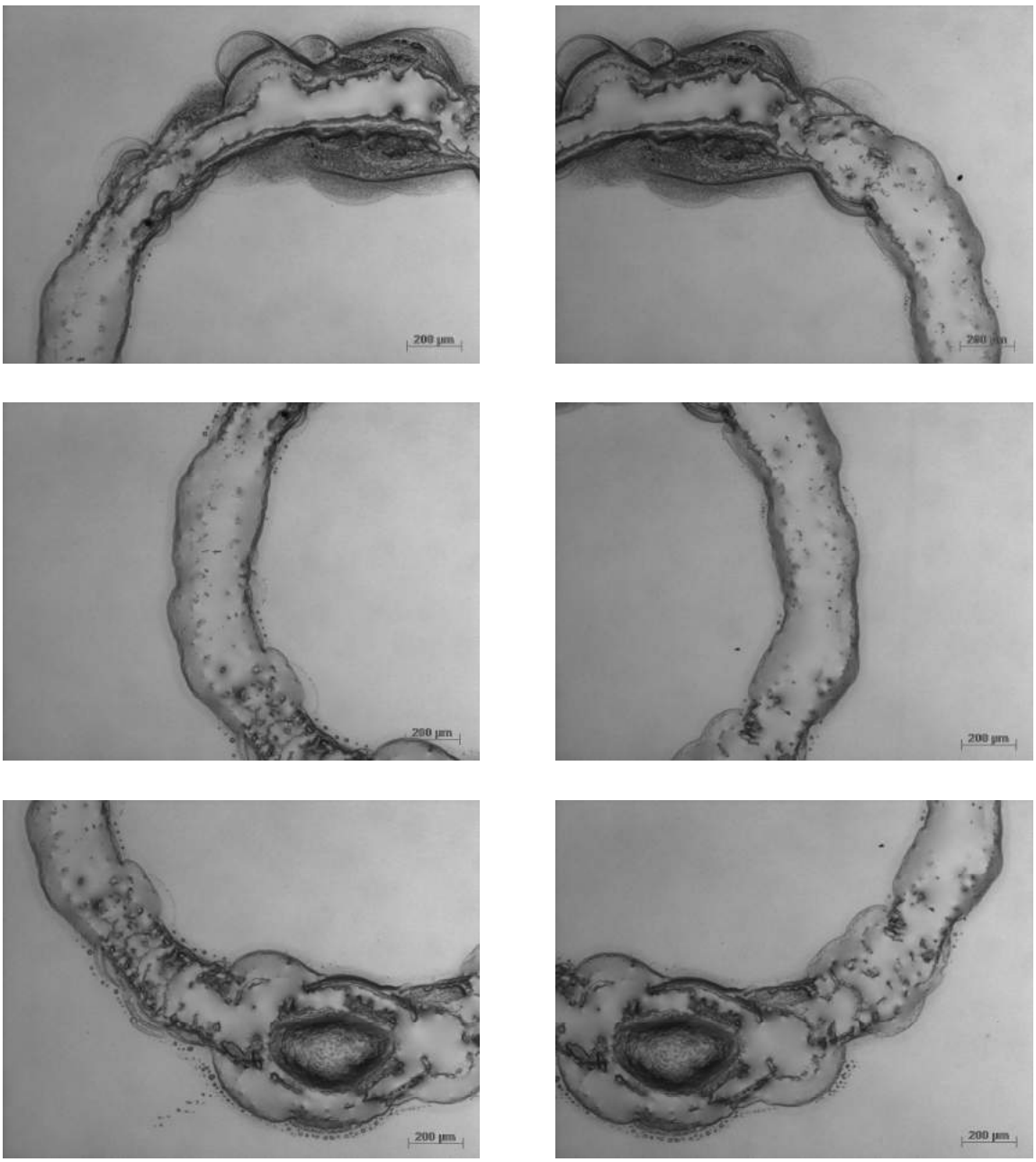
(f) Zes lagen, evenwijdig met de printrichting.

Figuur A.32: Profilometriebeelden met de verticale positie [nm] in functie van de horizontale positie [mm] voor ringvormige kraters in PMMA-folie door het inkjetetsen van verscheidene anisol lagen (vervolg).

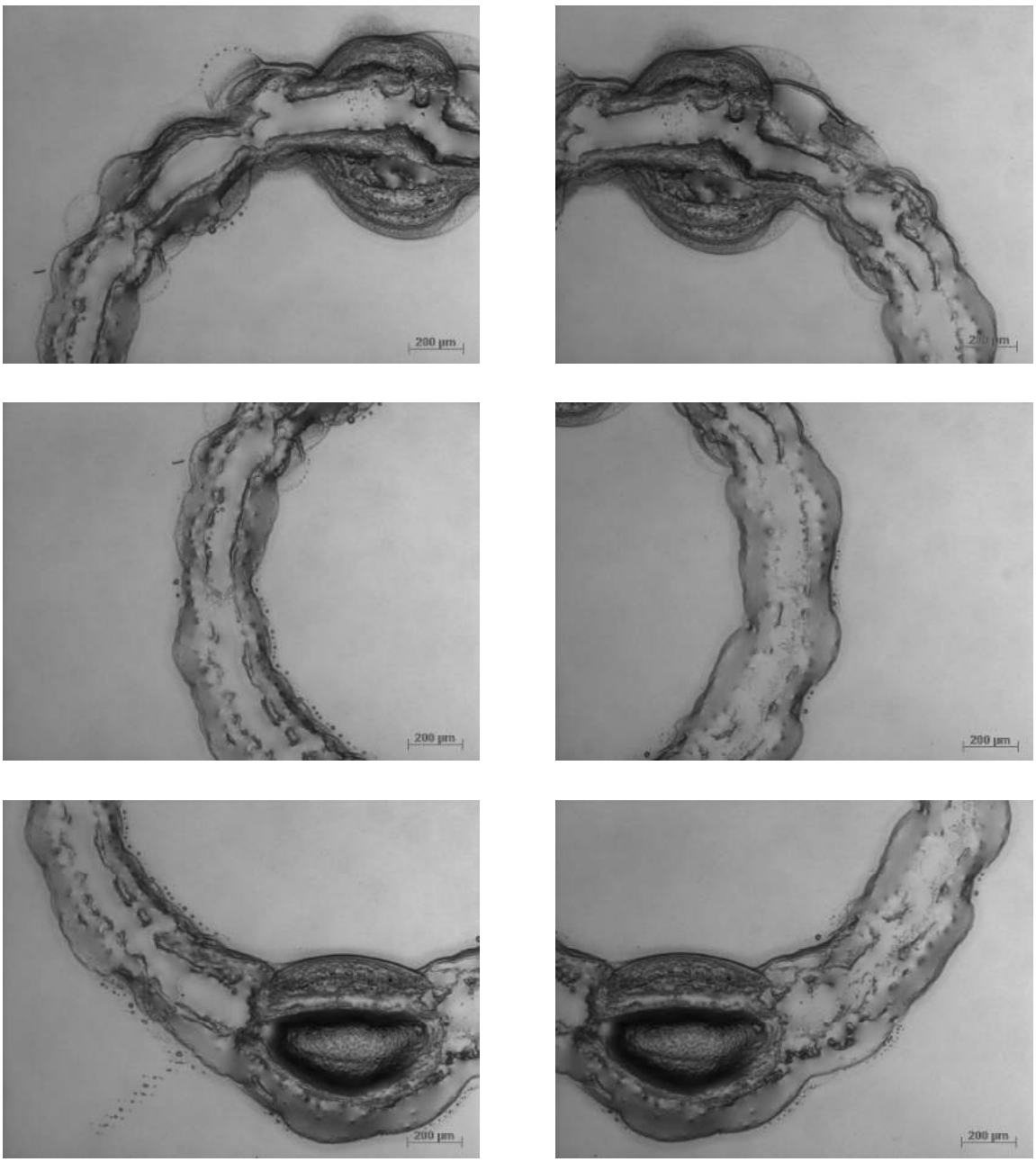
Lijndikte van het patroon



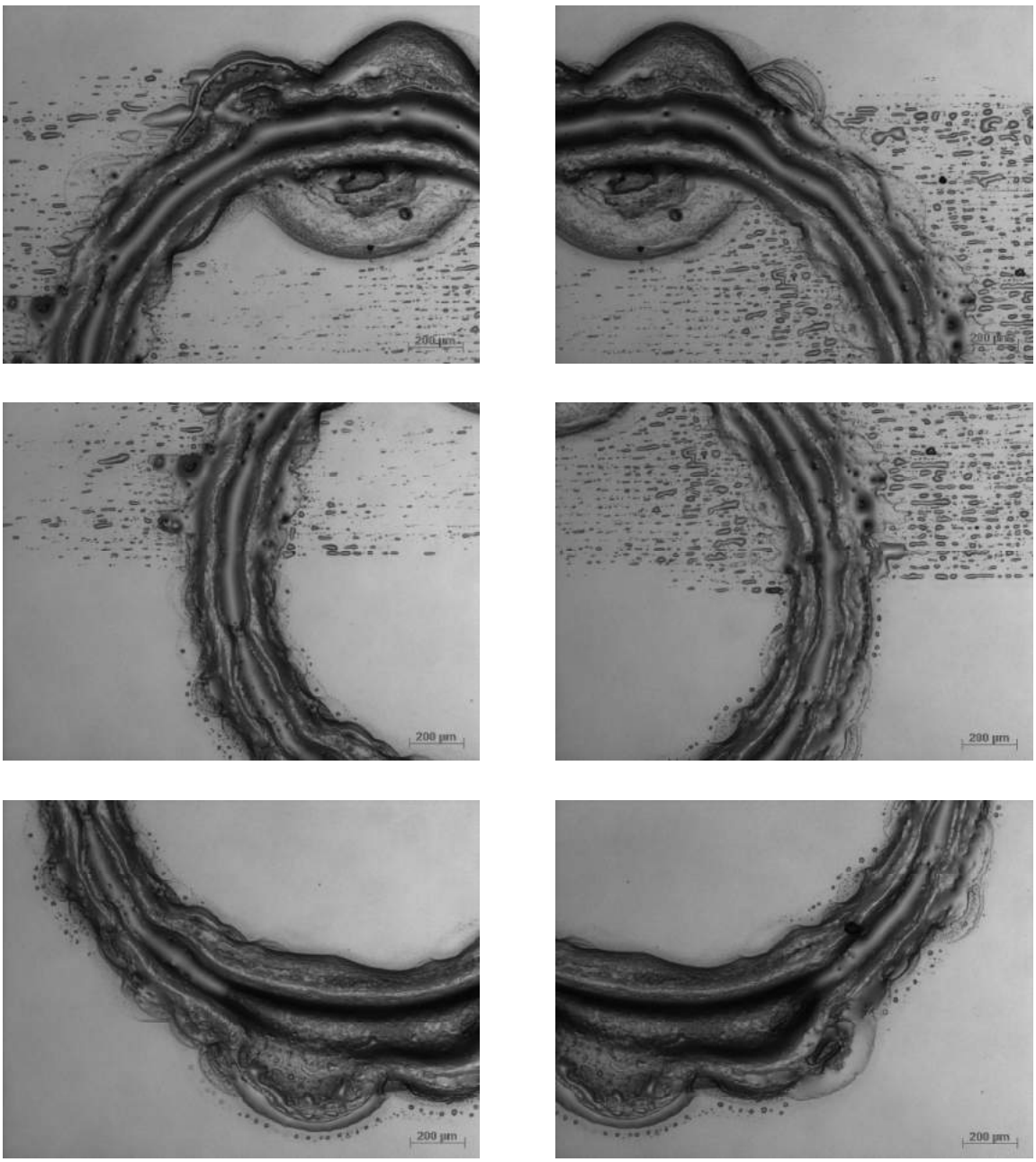
Figuur A.33: Lichtmicroscopie (versterking: 5x) van een ringvormige krater in PMMA-folie door het inkjetetsen met een lijndikte van 50 µm voor het printpatroon.



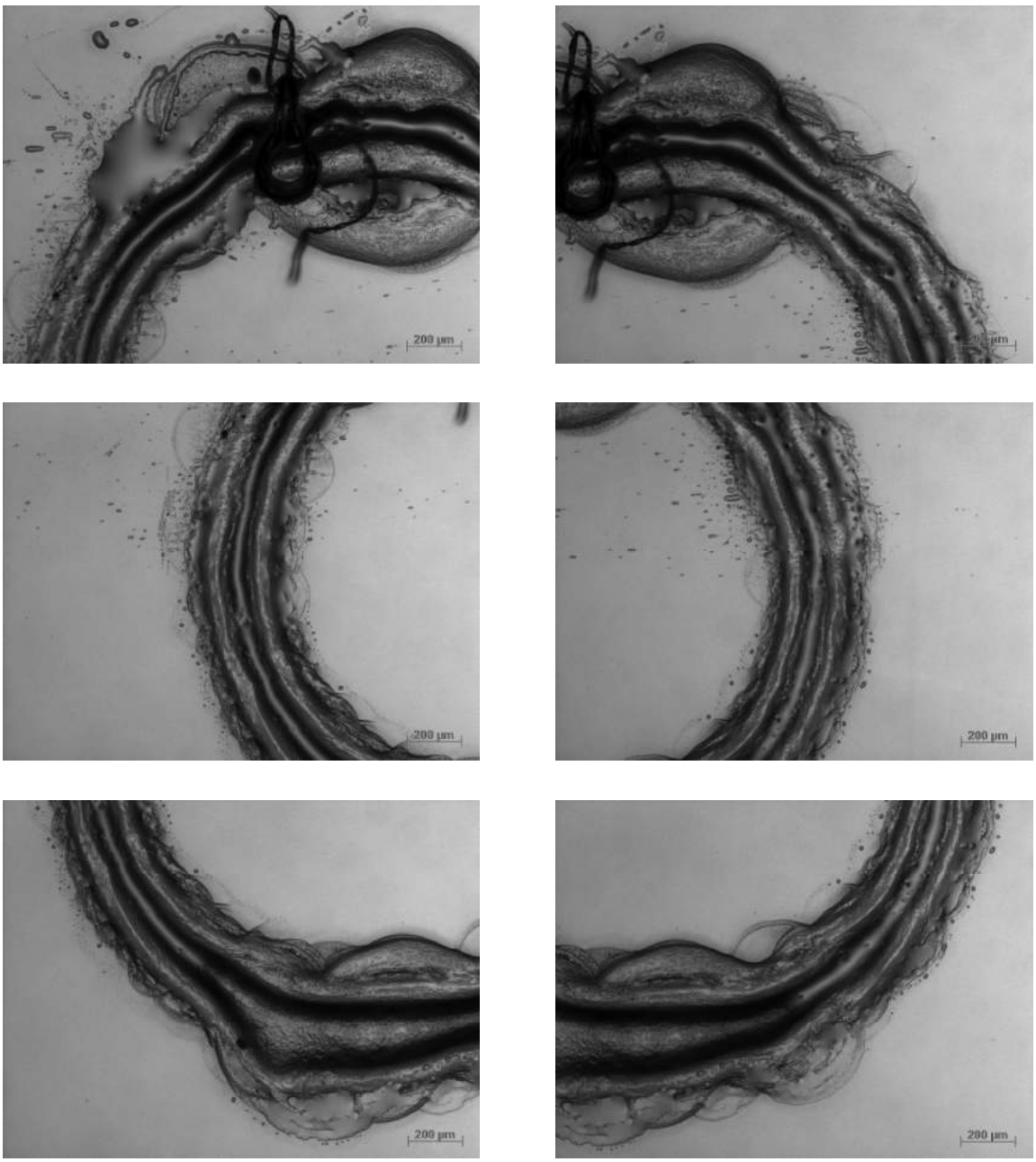
Figuur A.34: Lichtmicroscopie (versterking: 5x) van een ringvormige krater in PMMA-folie door het inkjetetsen met een lijndikte van 100 µm voor het printpatroon.



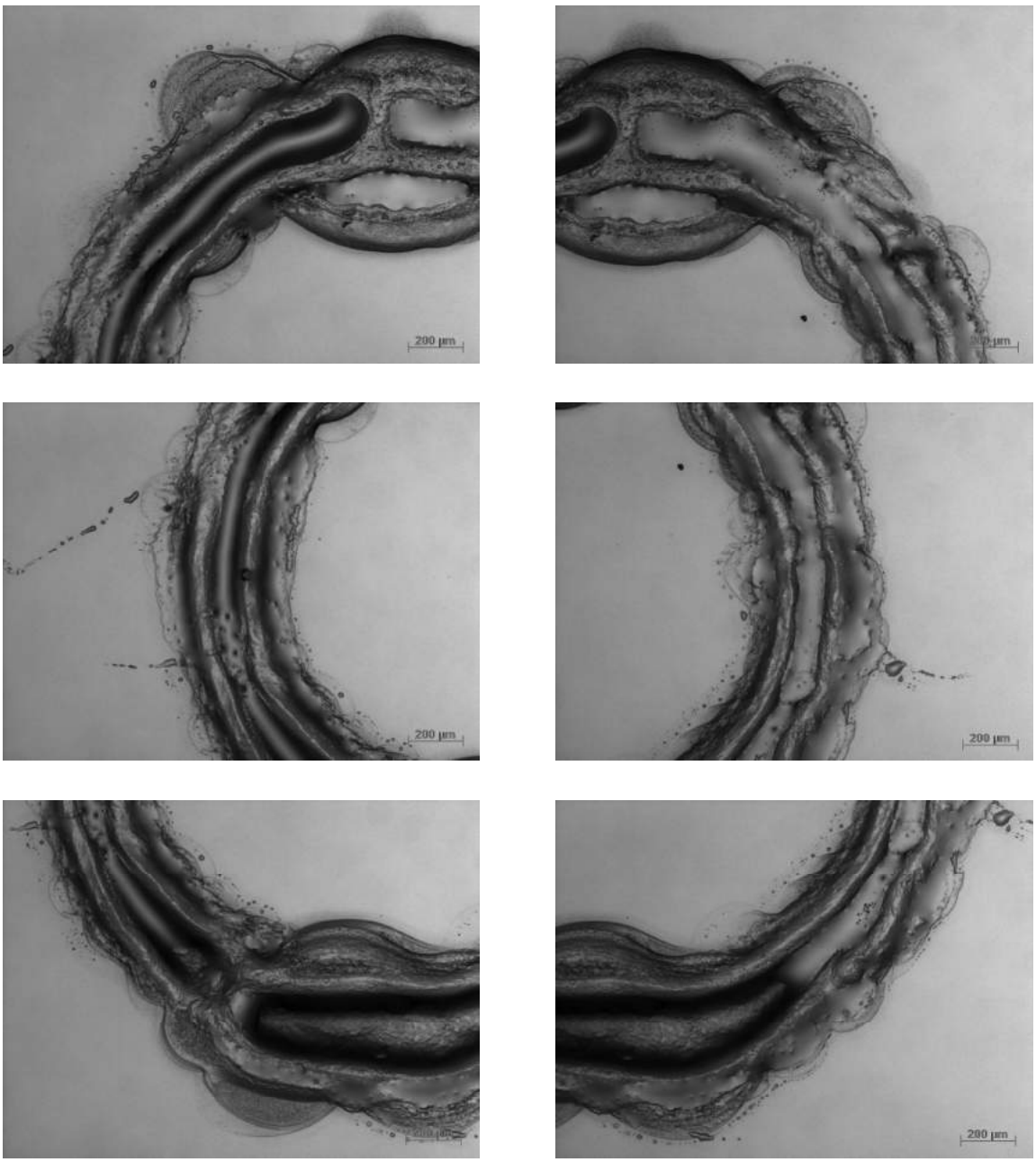
Figuur A.35: Lichtmicroscopie (versterking: 5x) van een ringvormige krater in PMMA-folie door het inkjetetsen met een lijndikte van 150 µm voor het printpatroon.



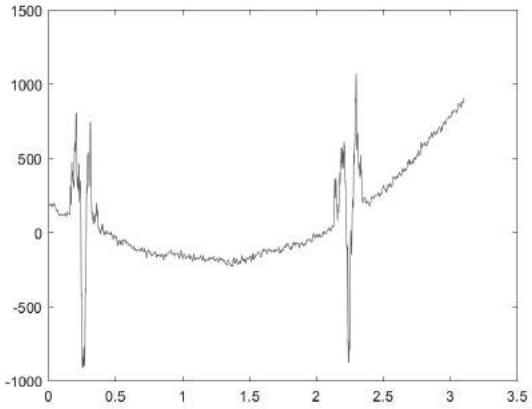
Figuur A.36: Lichtmicroscopie (versterking: 5x) van een ringvormige krater in PMMA-folie door het inkjetetsen met een lijndikte van 200 µm voor het printpatroon.



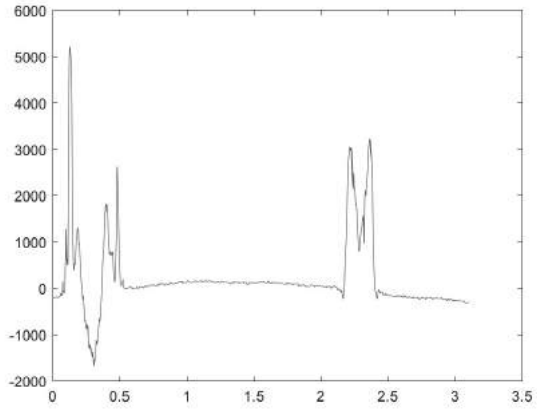
Figuur A.37: Lichtmicroscopie (versterking: 5x) van een ringvormige krater in PMMA-folie door het inkjetetsen met een lijndikte van 250 µm voor het printpatroon.



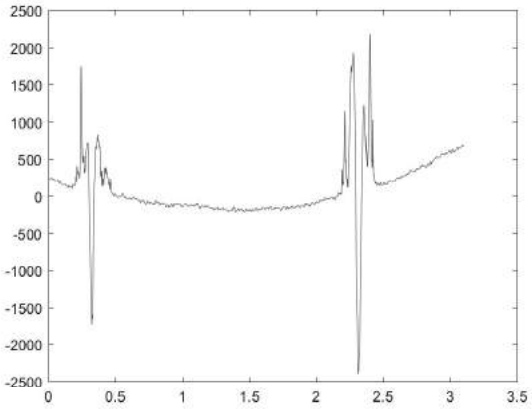
Figuur A.38: Lichtmicroscopie (versterking: 5x) van een ringvormige krater in PMMA-folie door het inkjetetsen met een lijndikte van 300 µm voor het printpatroon.



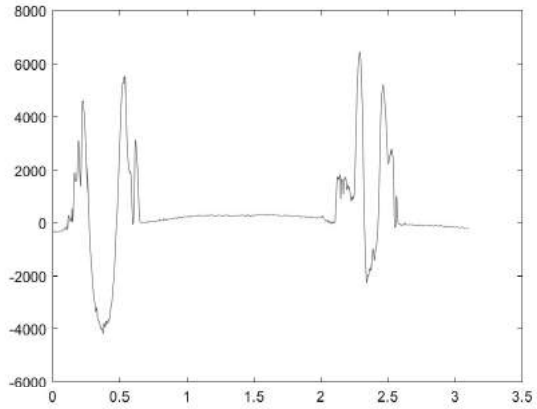
(a) Lijndikte: 50 µm, loodrecht op de printrichting.



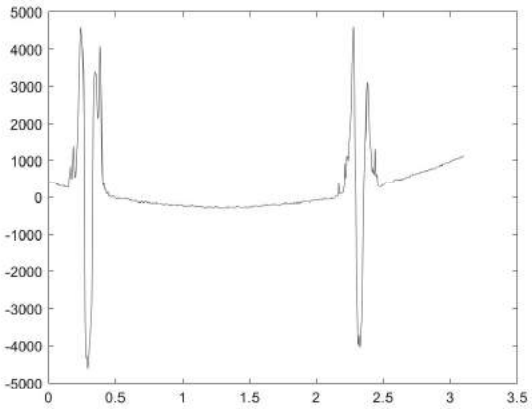
(b) Lijndikte: 50 µm, evenwijdig met de printrichting.



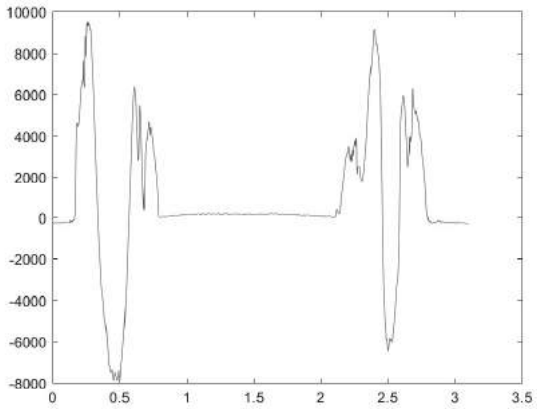
(c) Lijndikte: 100 µm, loodrecht op de printrichting.



(d) Lijndikte: 100 µm, evenwijdig met de printrichting.

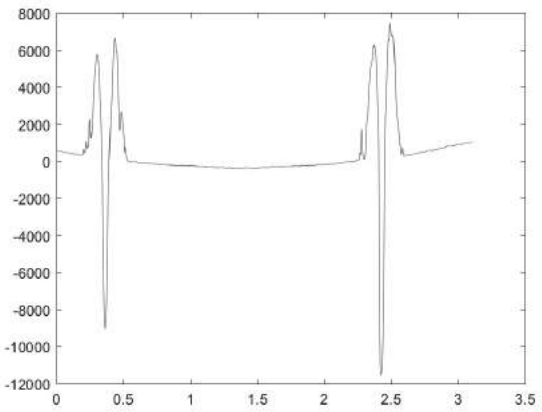


(e) Lijndikte: 150 µm, loodrecht op de printrichting.

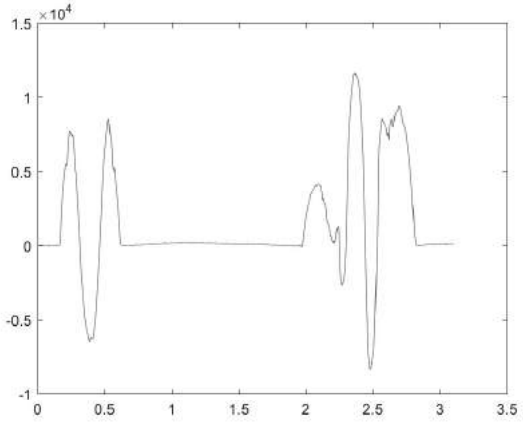


(f) Lijndikte: 150 µm, evenwijdig met de printrichting.

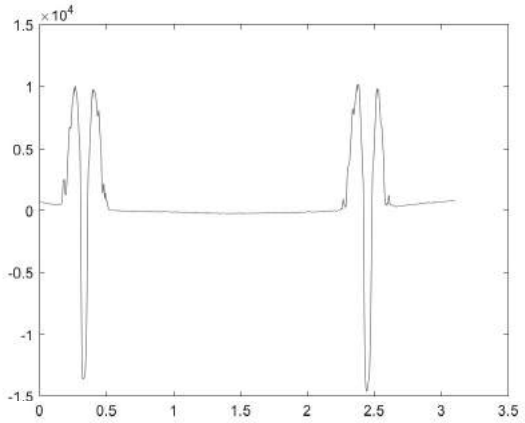
Figuur A.39: Profilometriebeelden met de verticale positie [nm] in functie van de horizontale positie [mm] voor ringvormige kraters in PMMA-folie door het inkjetetsen van verscheidene lijndiktes van het printpatroon.



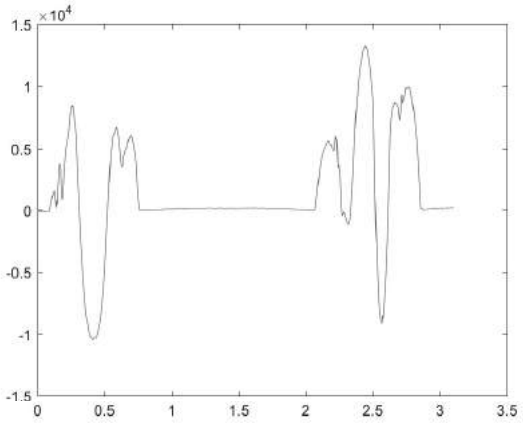
(a) Lijndikte: 200 µm, loodrecht op de printrichting.



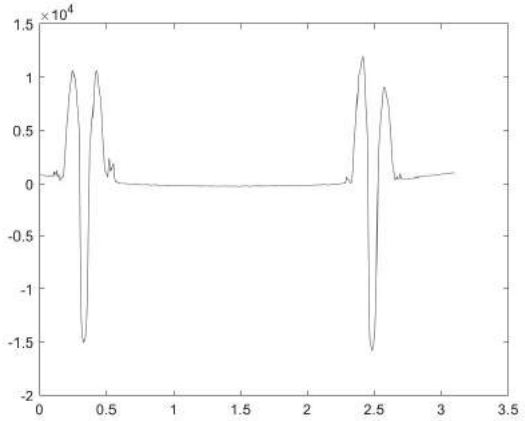
(b) Lijndikte: 200 µm, evenwijdig met de printrichting.



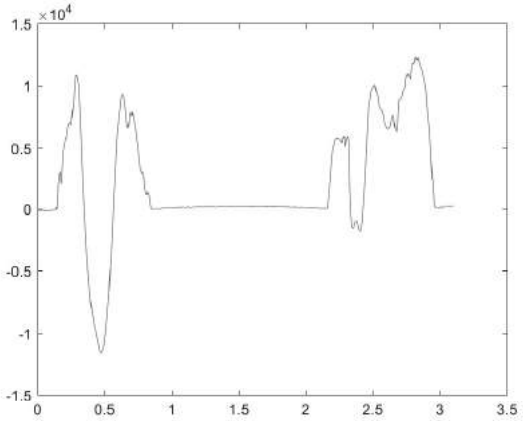
(c) Lijndikte: 250 µm, loodrecht op de printrichting.



(d) Lijndikte: 250 µm, evenwijdig met de printrichting.



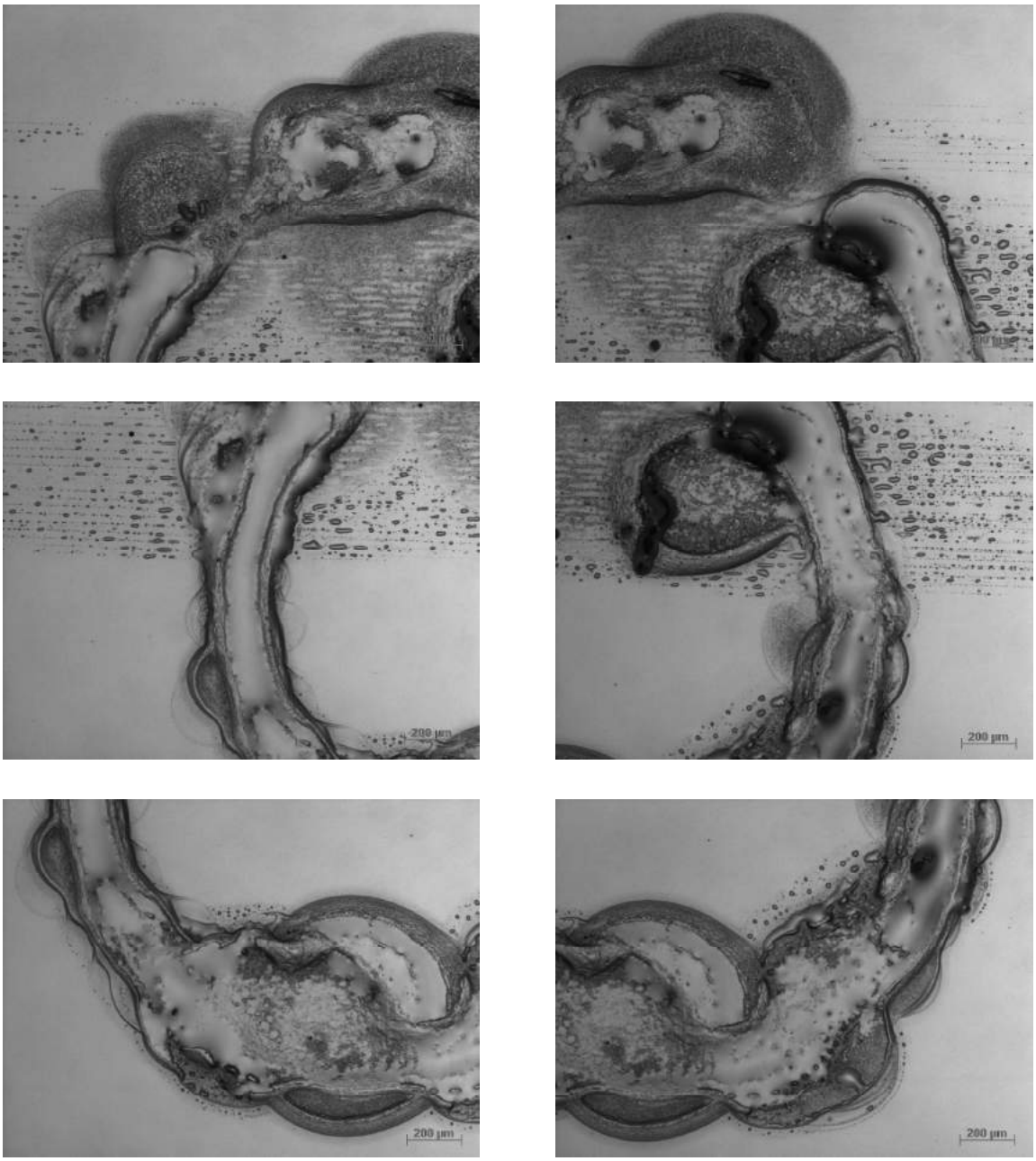
(e) Lijndikte: 300 µm, loodrecht op de printrichting.



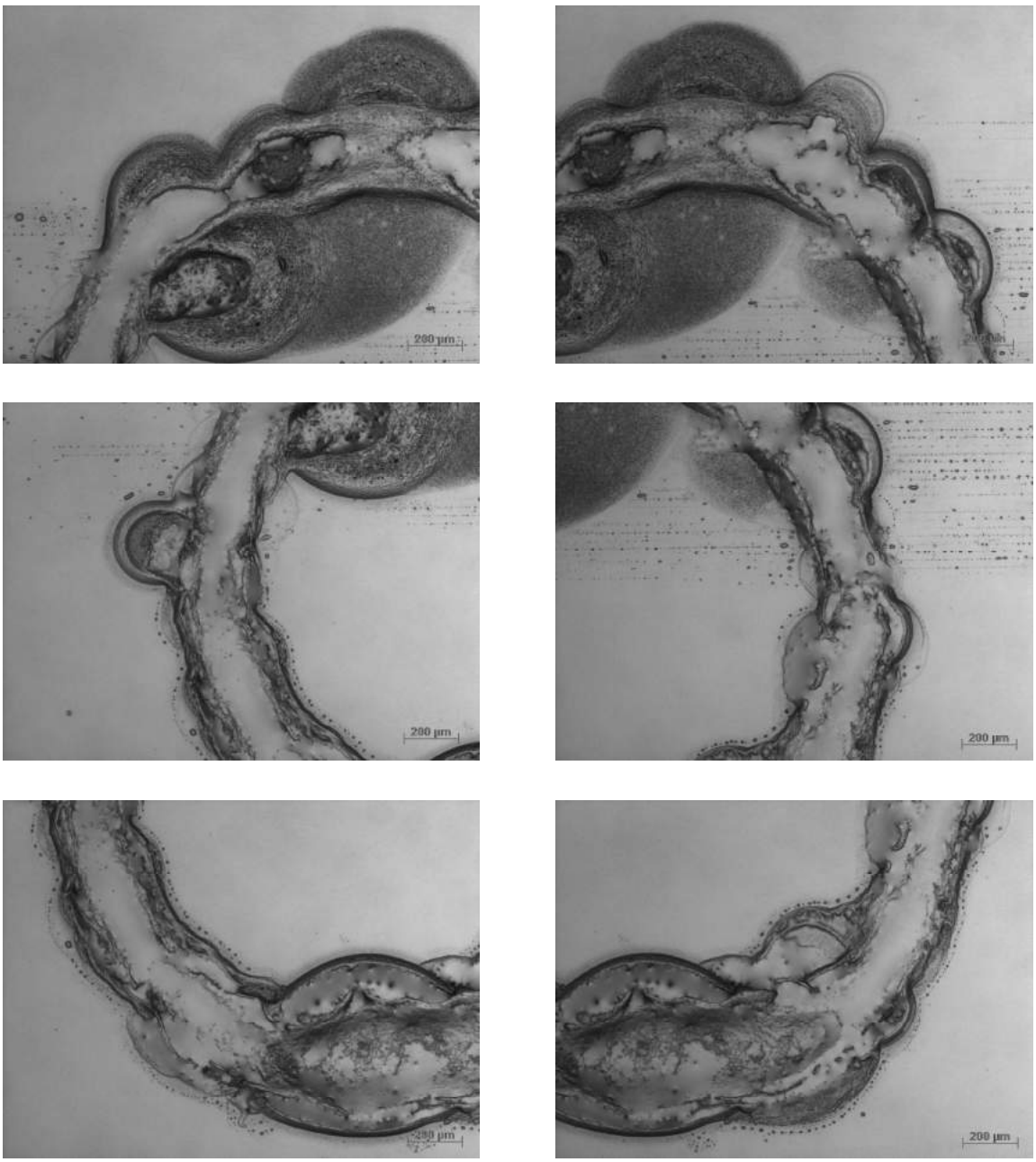
(f) Lijndikte: 300 µm, evenwijdig met de printrichting.

Figuur A.40: Profilometriebeelden met de verticale positie [nm] in functie van de horizontale positie [mm] voor ringvormige kraters in PMMA-folie door het inkjetetsen van verscheidene lijndiktes van het printpatroon (vervolg).

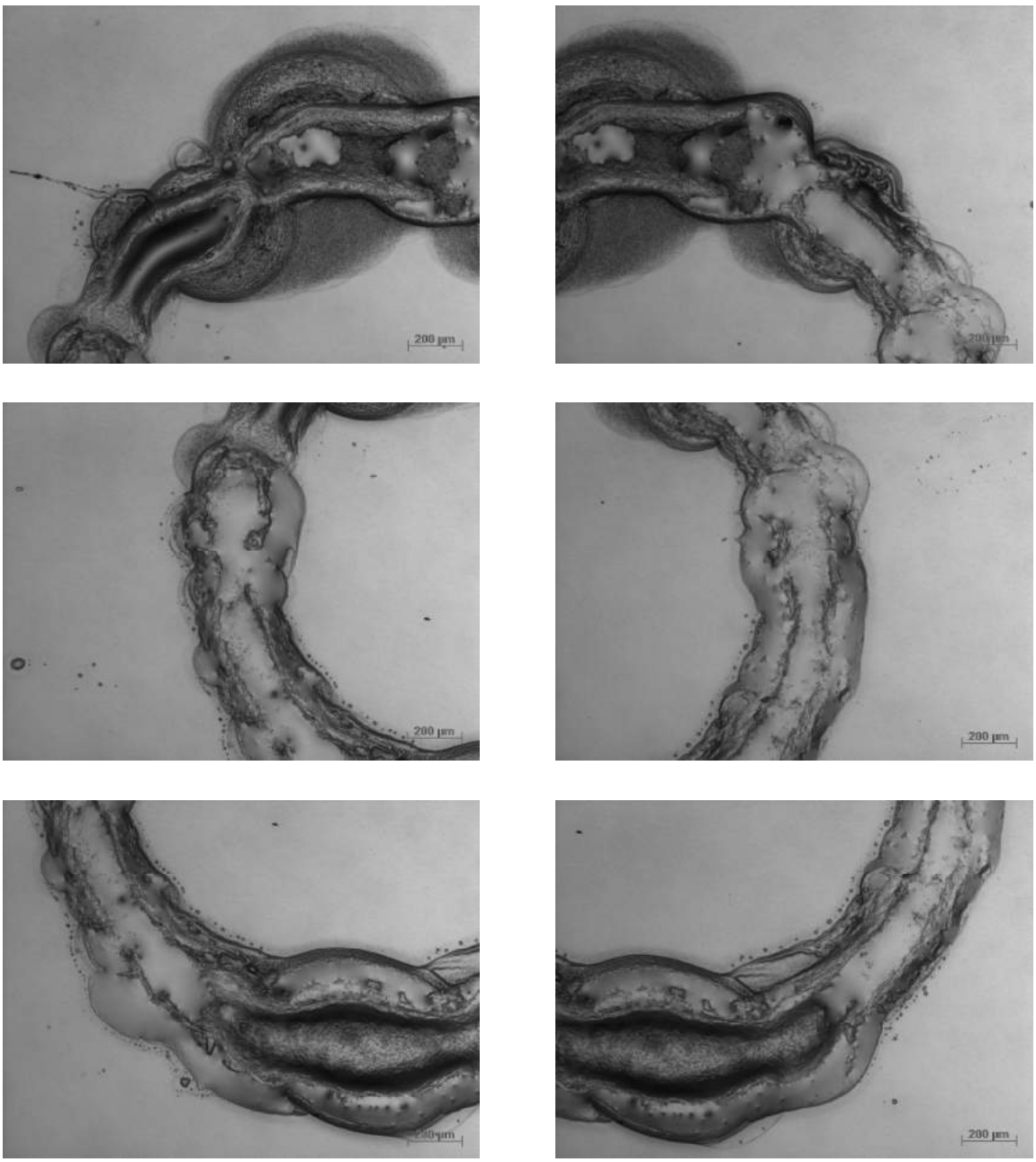
Basisplaattemperatuur



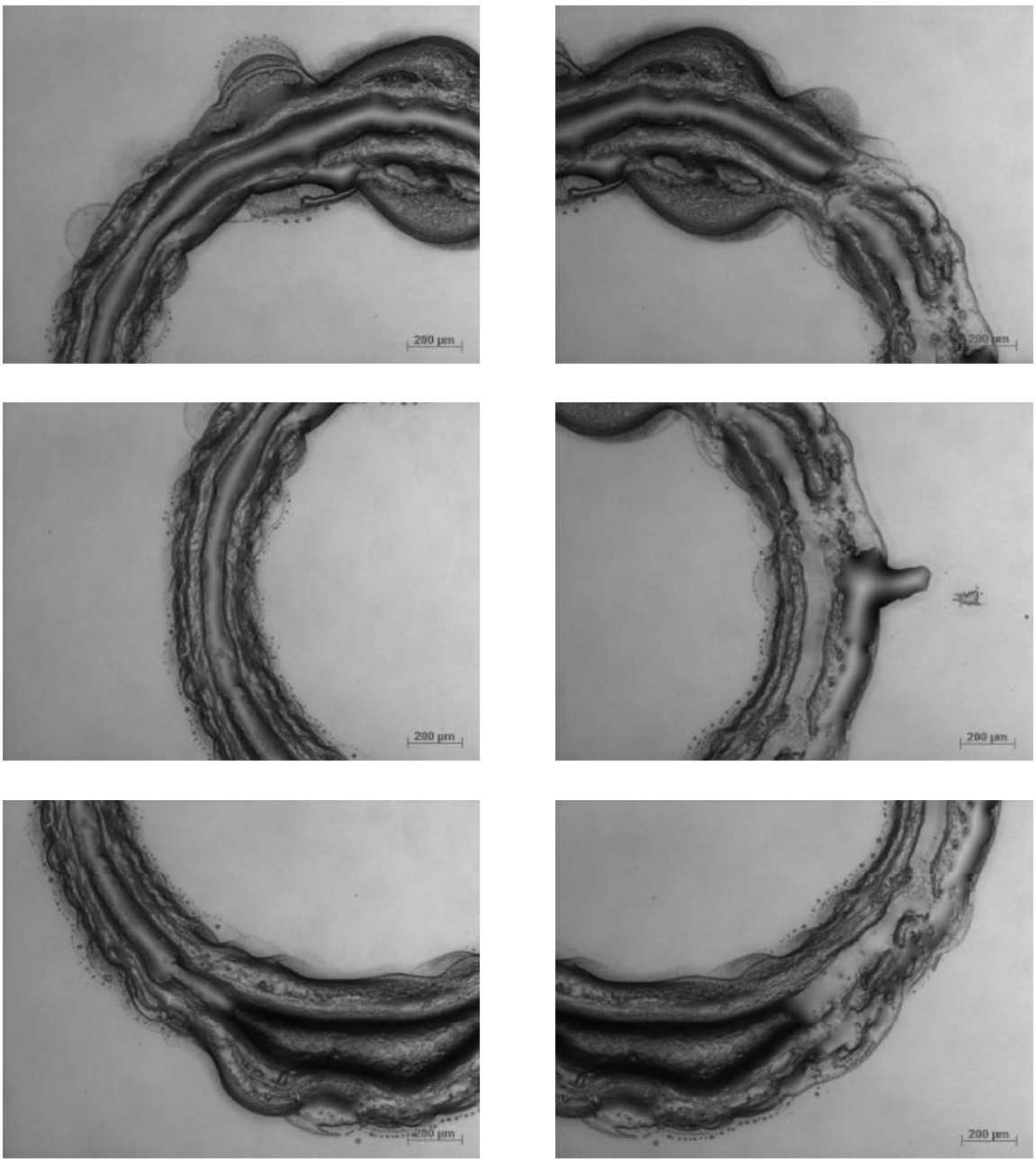
Figuur A.41: Lichtmicroscopie (versterking: 5x) van een ringvormige krater in PMMA-folie door het inkjetetsen bij een basisplaattemperatuur van 30°C.



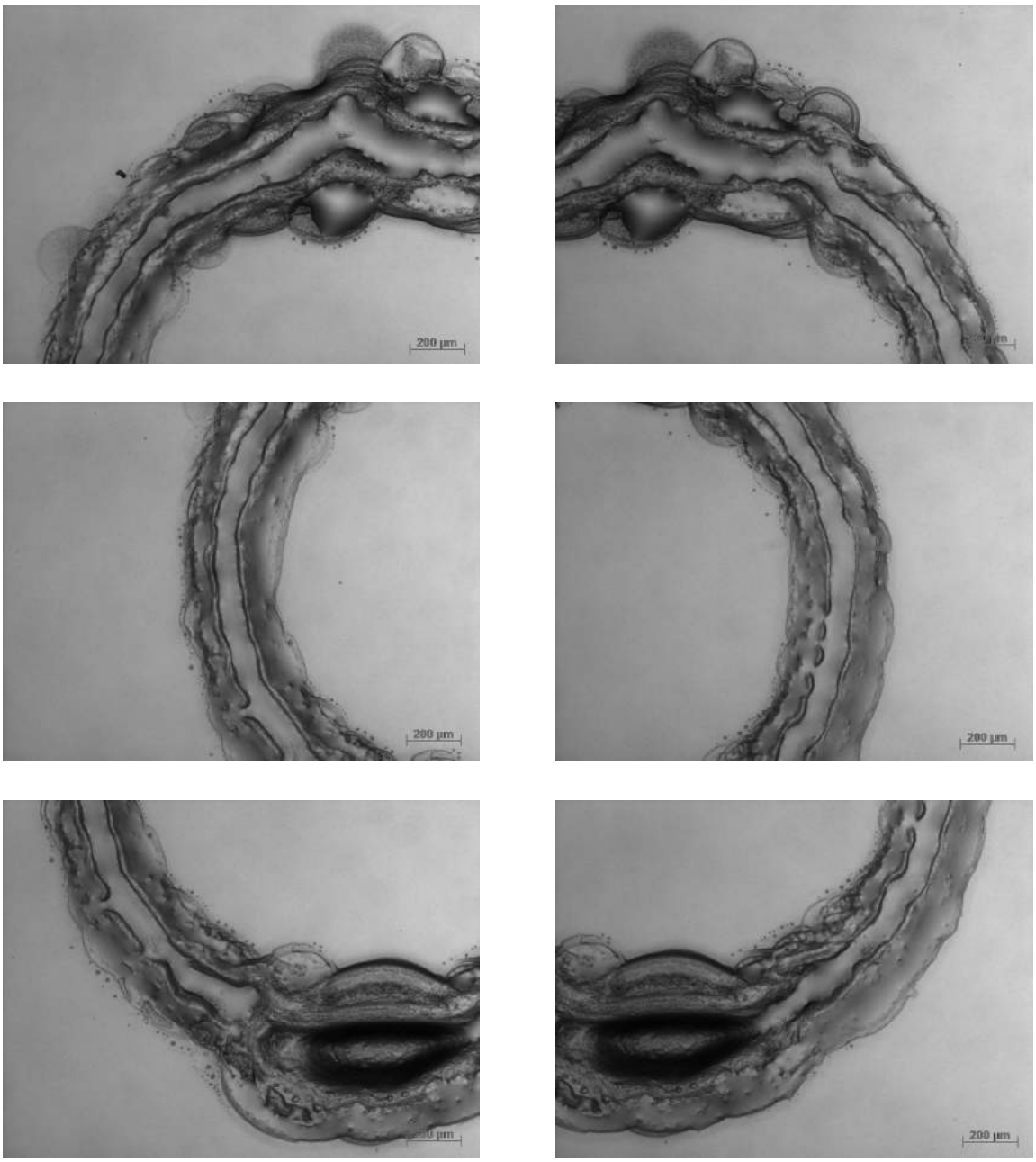
Figuur A.42: Lichtmicroscopie (versterking: 5x) van een ringvormige krater in PMMA-folie door het inkjetetsen bij een basisplaattemperatuur van 35°C.



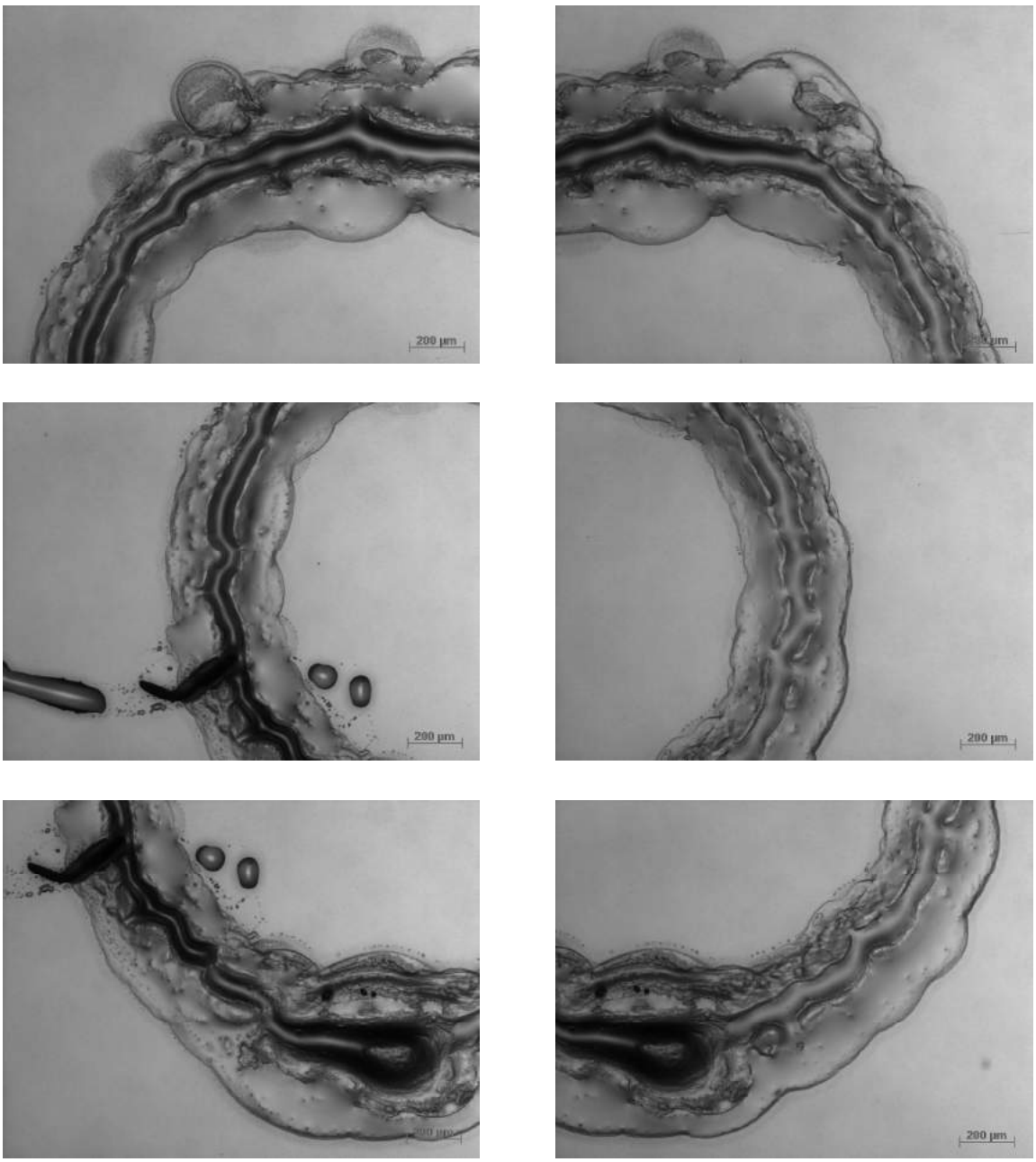
Figuur A.43: Lichtmicroscopie (versterking: 5x) van een ringvormige krater in PMMA-folie door het inkjetetsen bij een basisplaattemperatuur van 40°C.



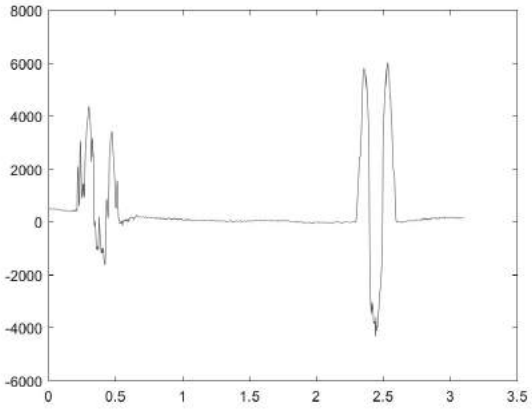
Figuur A.44: Lichtmicroscopie (versterking: 5x) van een ringvormige krater in PMMA-folie door het inkjetetsen bij een basisplaattemperatuur van 45°C.



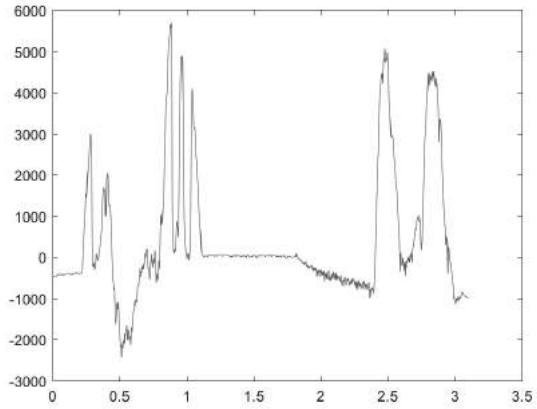
Figuur A.45: Lichtmicroscopie (versterking: 5x) van een ringvormige krater in PMMA-folie door het inkjetetsen bij een basisplaattemperatuur van 50°C.



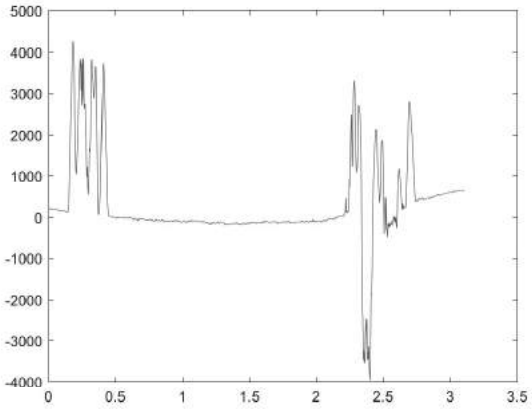
Figuur A.46: Lichtmicroscopie (versterking: 5x) van een ringvormige krater in PMMA-folie door het inkjetetsen bij een basisplaattemperatuur van 55°C.



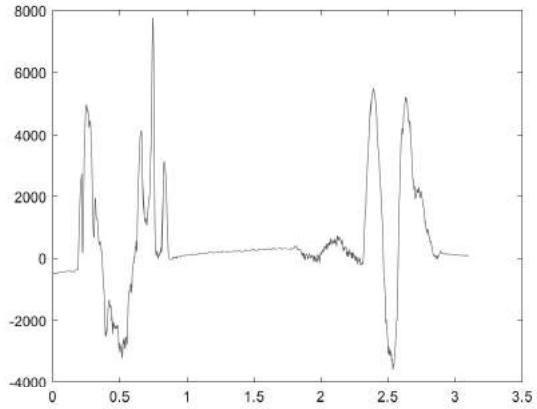
(a) Basisplaattemperatuur: 30°C, loodrecht op de printrichting.



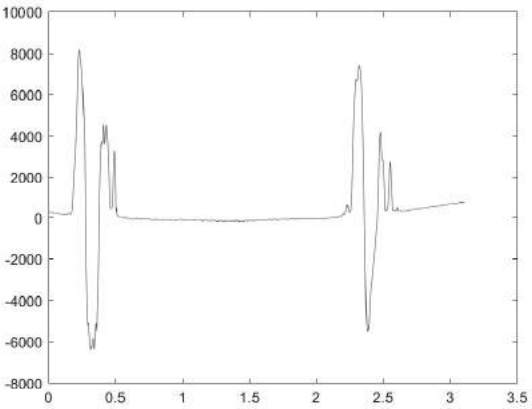
(b) Basisplaattemperatuur: 30°C, evenwijdig met de printrichting.



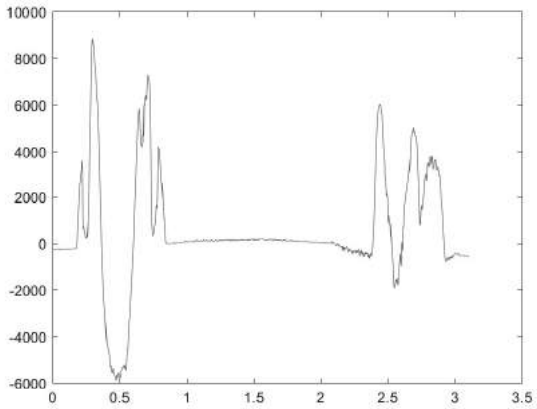
(c) Basisplaattemperatuur: 35°C, loodrecht op de printrichting.



(d) Basisplaattemperatuur: 35°C, evenwijdig met de printrichting.

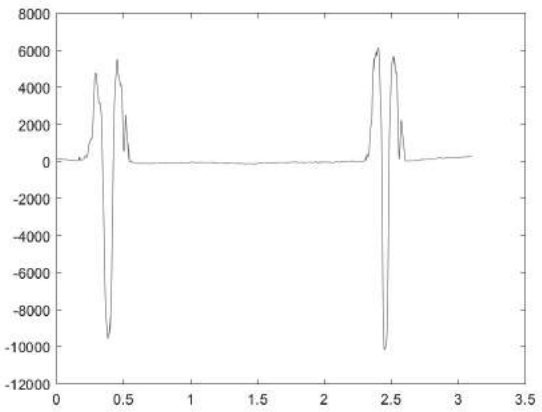


(e) Basisplaattemperatuur: 40°C, loodrecht op de printrichting.

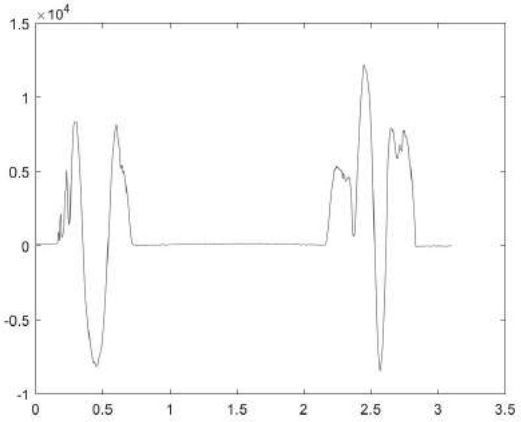


(f) Basisplaattemperatuur: 40°C, evenwijdig met de printrichting.

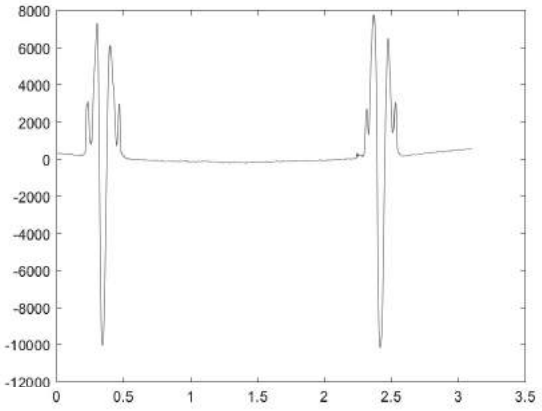
Figuur A.47: Profilometriebeelden met de verticale positie [nm] in functie van de horizontale positie [mm] voor ringvormige kraters in PMMA-folie door het inkjetetsen bij verscheidene basisplaattemperaturen.



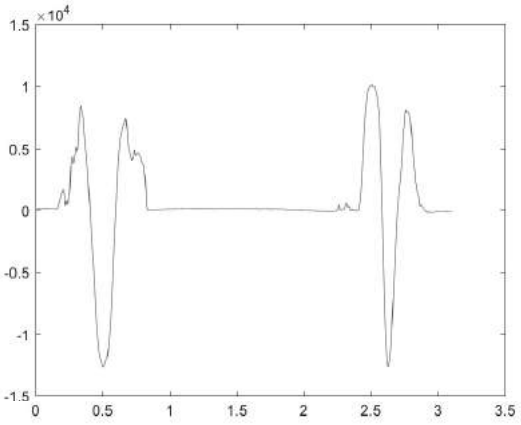
(a) Basisplaattemperatuur: 45°C, loodrecht op de printrichting.



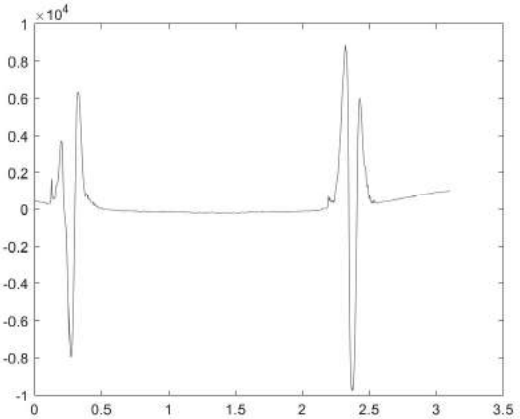
(b) Basisplaattemperatuur: 45°C, evenwijdig met de printrichting.



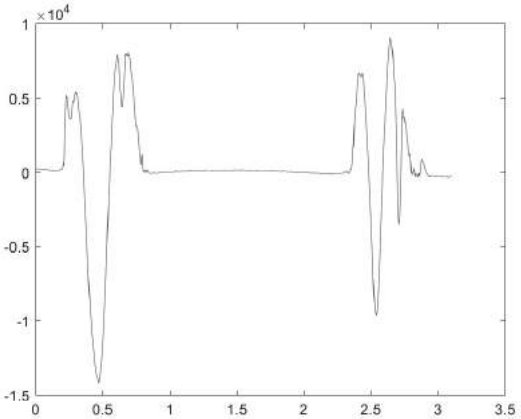
(c) Basisplaattemperatuur: 50°C, loodrecht op de printrichting.



(d) Basisplaattemperatuur: 50°C, evenwijdig met de printrichting.



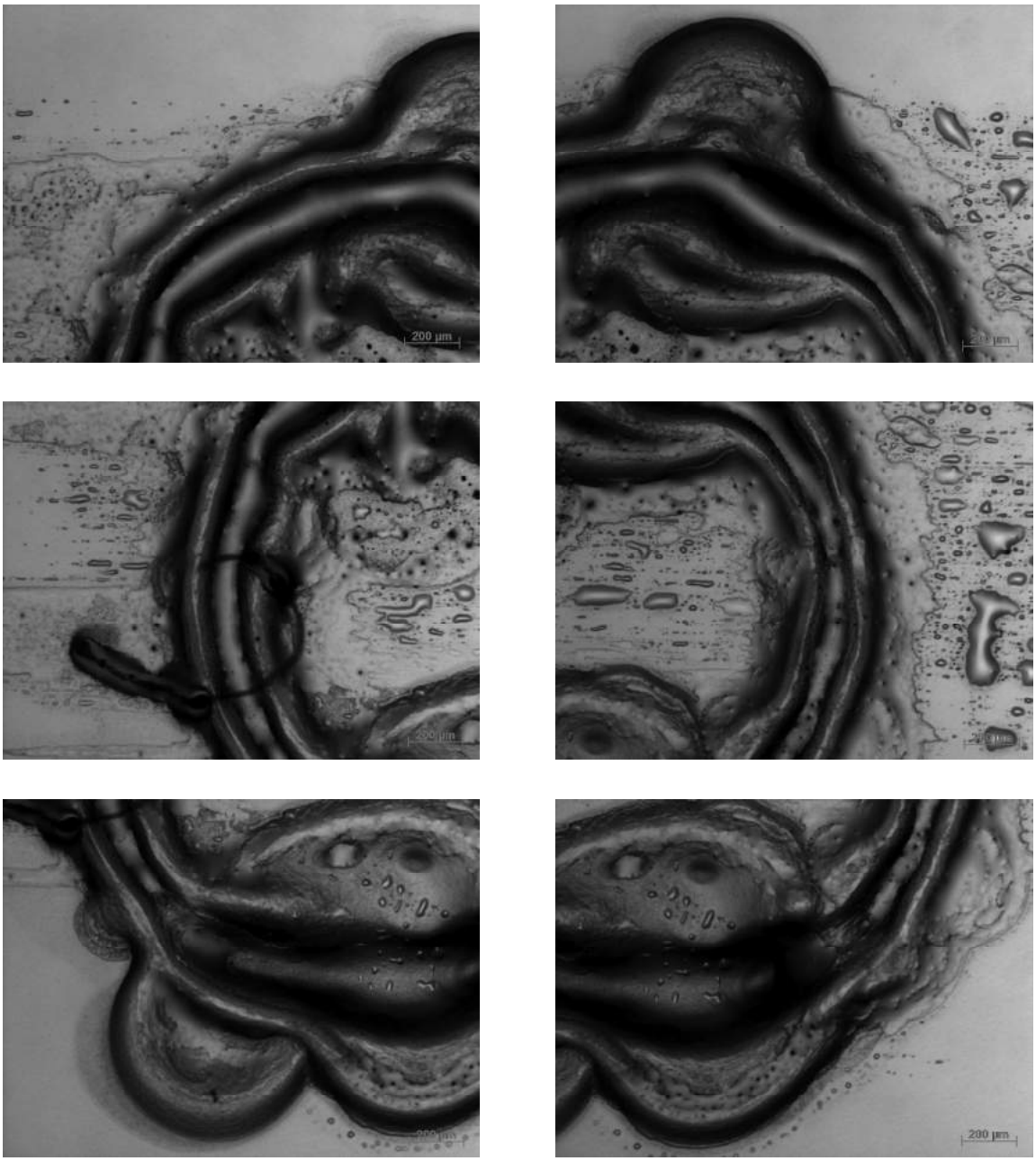
(e) Basisplaattemperatuur: 55°C, loodrecht op de printrichting.



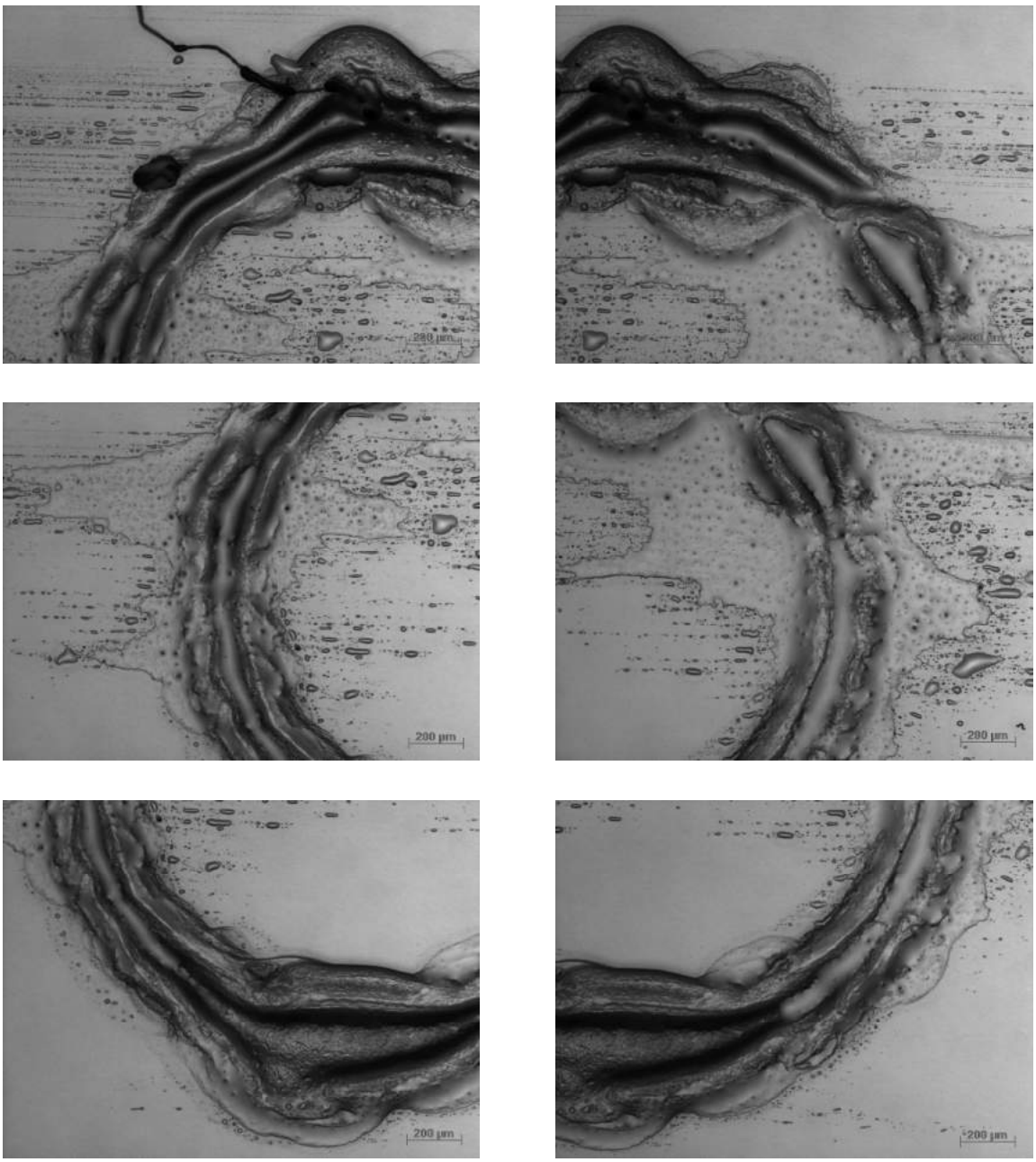
(f) Basisplaattemperatuur: 55°C, evenwijdig met de printrichting.

Figuur A.48: Profilometriebeelden met de verticale positie [nm] in functie van de horizontale positie [mm] voor ringvormige kraters in PMMA-folie door het inkjetetsen bij verscheidene basisplaattemperaturen (vervolg).

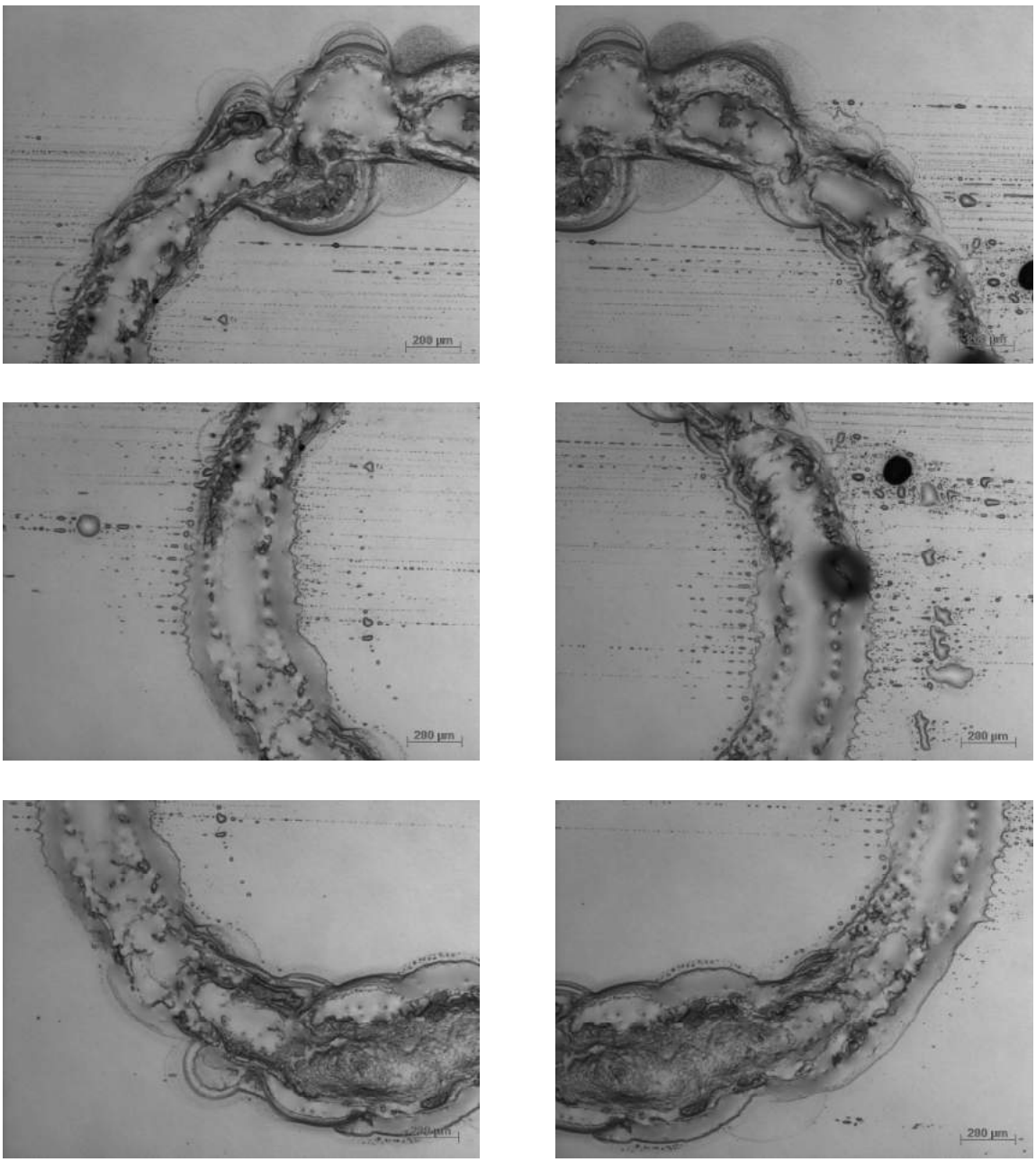
Druppelafstand



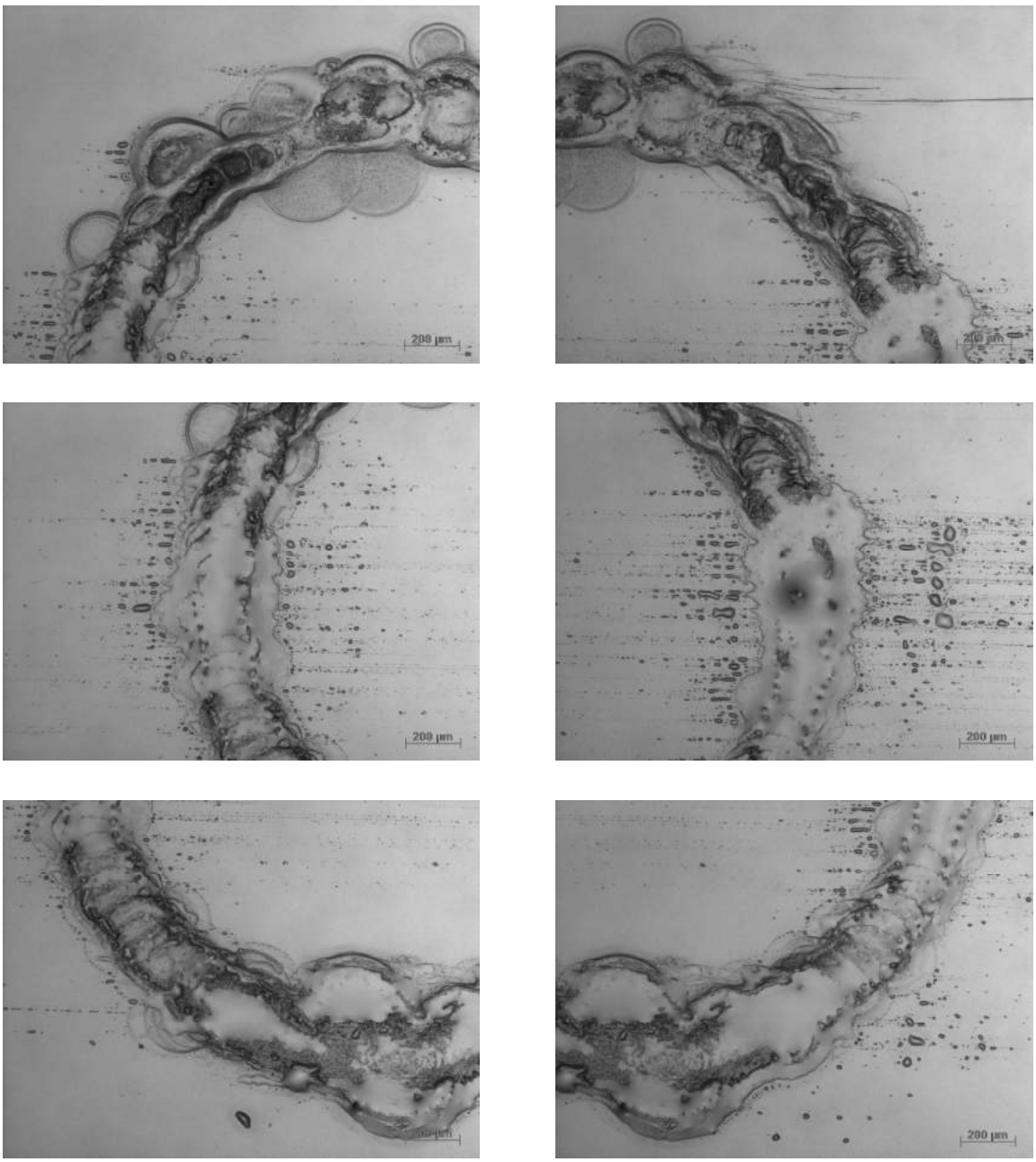
Figuur A.49: Lichtmicroscopie (versterking: 5x) van een ringvormige krater in PMMA-folie door het inkjetetsen bij een druppelafstand van 5 µm.



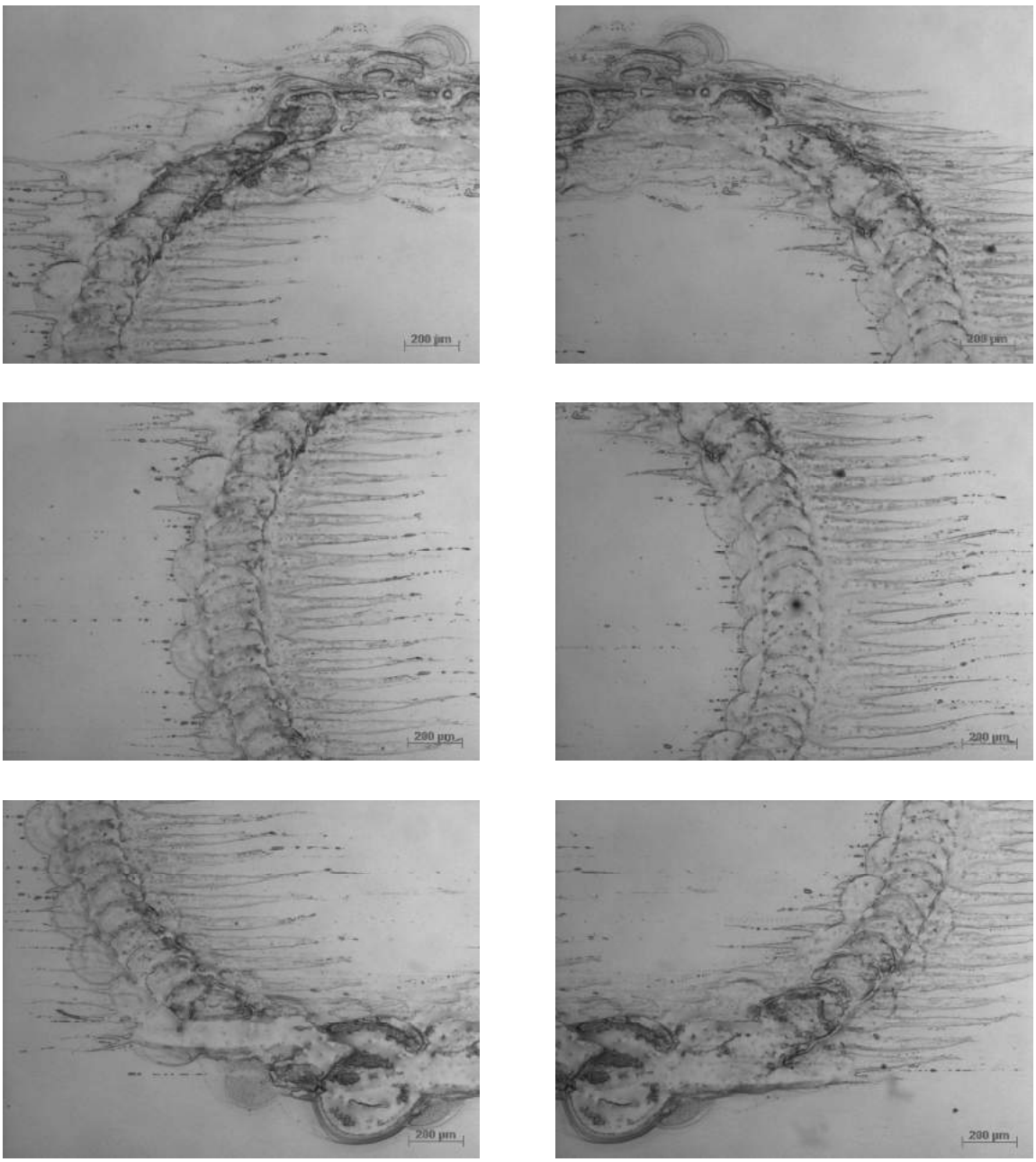
Figuur A.50: Lichtmicroscopie (versterking: 5x) van een ringvormige krater in PMMA-folie door het inkjetetsen bij een druppelafstand van 10 µm.



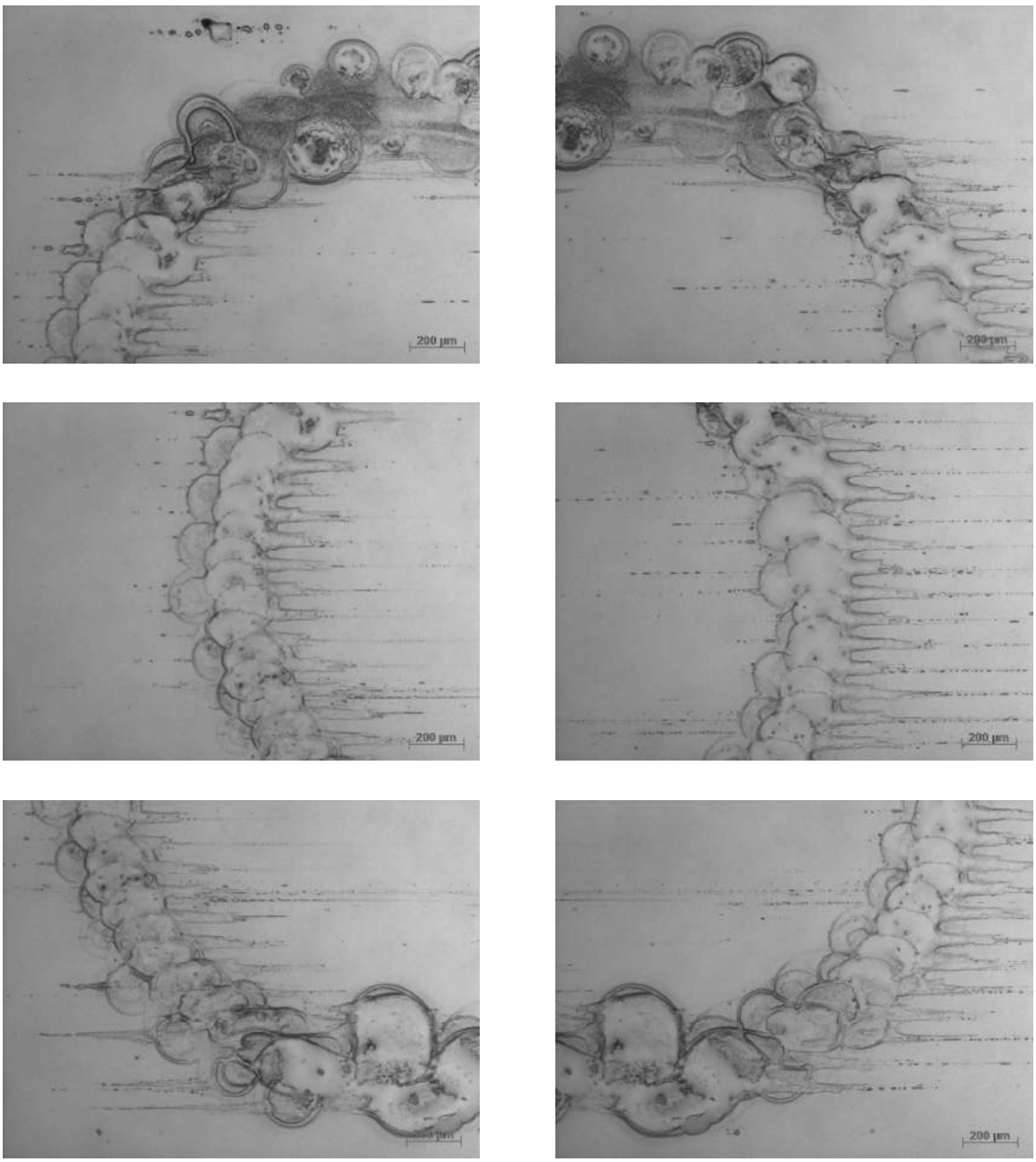
Figuur A.51: Lichtmicroscopie (versterking: 5x) van een ringvormige krater in PMMA-folie door het inkjetetsen bij een druppelafstand van 15 µm.



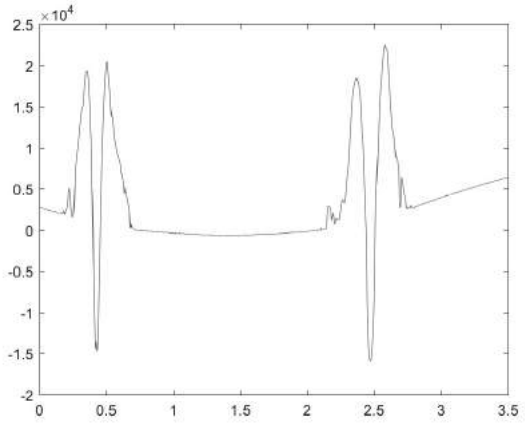
Figuur A.52: Lichtmicroscopie (versterking: 5x) van een ringvormige krater in PMMA-folie door het inkjetetsen bij een druppelafstand van 20 µm.



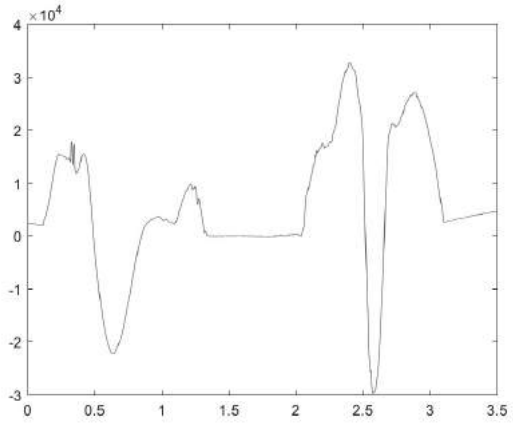
Figuur A.53: Lichtmicroscopie (versterking: 5x) van een ringvormige krater in PMMA-folie door het inkjetetsen bij een druppelafstand van 25 µm.



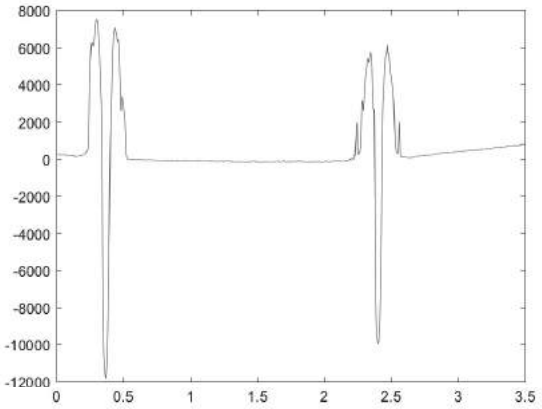
Figuur A.54: Lichtmicroscopie (versterking: 5x) van een ringvormige krater in PMMA-folie door het inkjetetsen bij een druppelafstand van 30 µm.



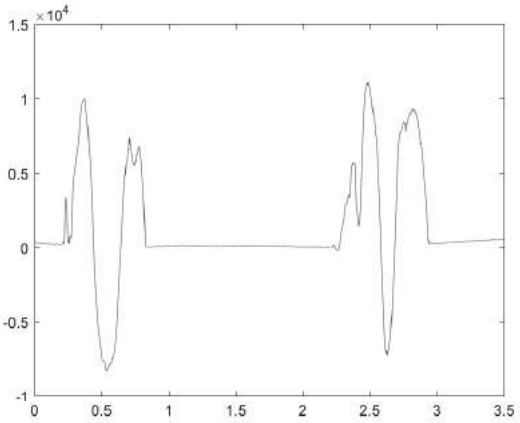
(a) Druppelafstand: 5 µm, loodrecht op de printrichting.



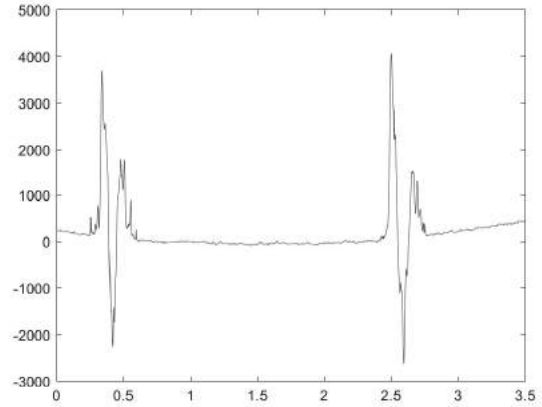
(b) Druppelafstand: 5 µm, evenwijdig met de printrichting.



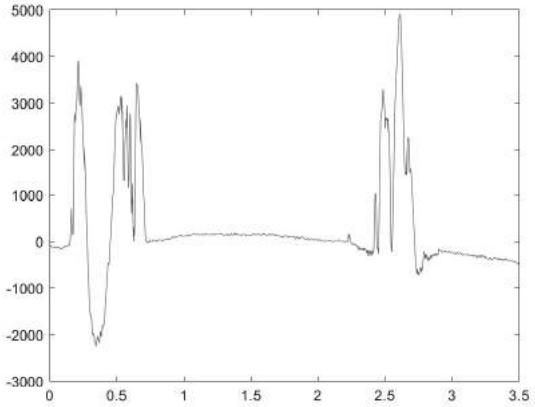
(c) Druppelafstand: 10 µm, loodrecht op de printrichting.



(d) Druppelafstand: 10 µm, evenwijdig met de printrichting.

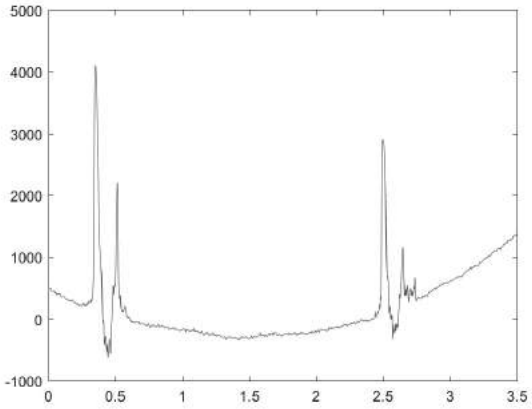


(e) Druppelafstand: 15 µm, loodrecht op de printrichting.

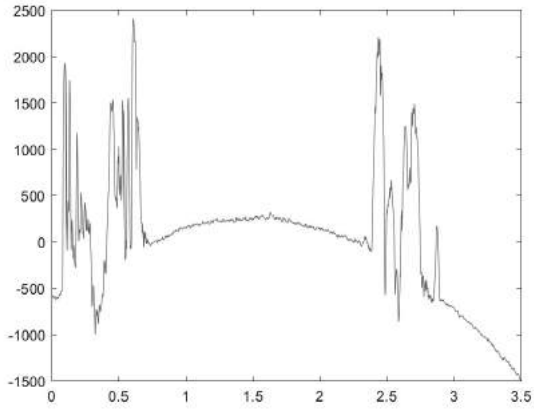


(f) Druppelafstand: 15 µm, evenwijdig met de printrichting.

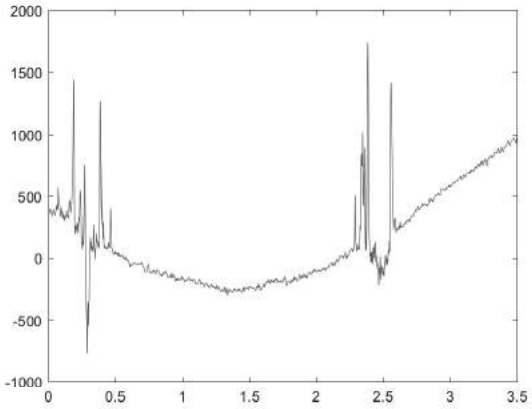
Figuur A.55: Profilometriebeelden met de verticale positie [nm] in functie van de horizontale positie [mm] voor ringvormige kraters in PMMA-folie door het inkjetetsen bij verscheidene bij een verscheidene druppelafstanden.



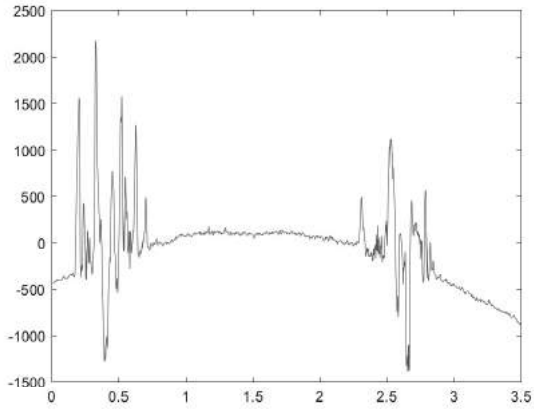
(a) Druppelafstand: 20 µm, loodrecht op de printrichting.



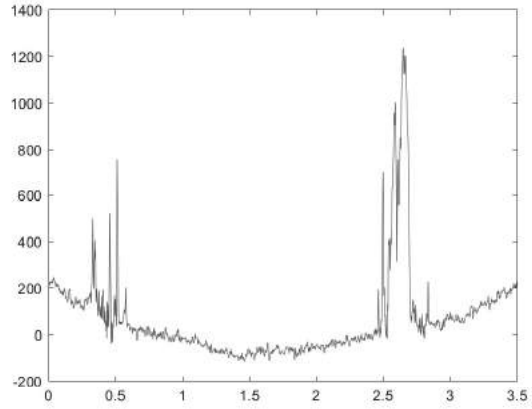
(b) Druppelafstand: 20 µm, evenwijdig met de printrichting.



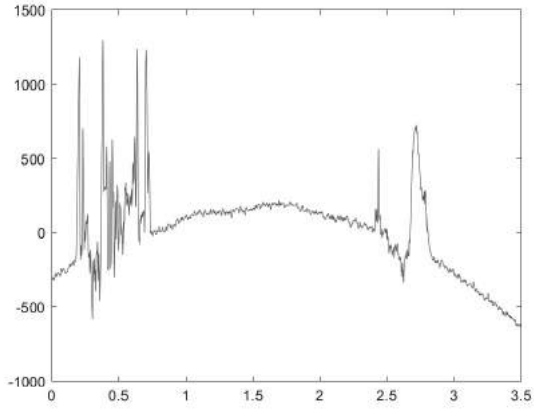
(c) Druppelafstand: 25 µm, loodrecht op de printrichting.



(d) Druppelafstand: 25 µm, evenwijdig met de printrichting.



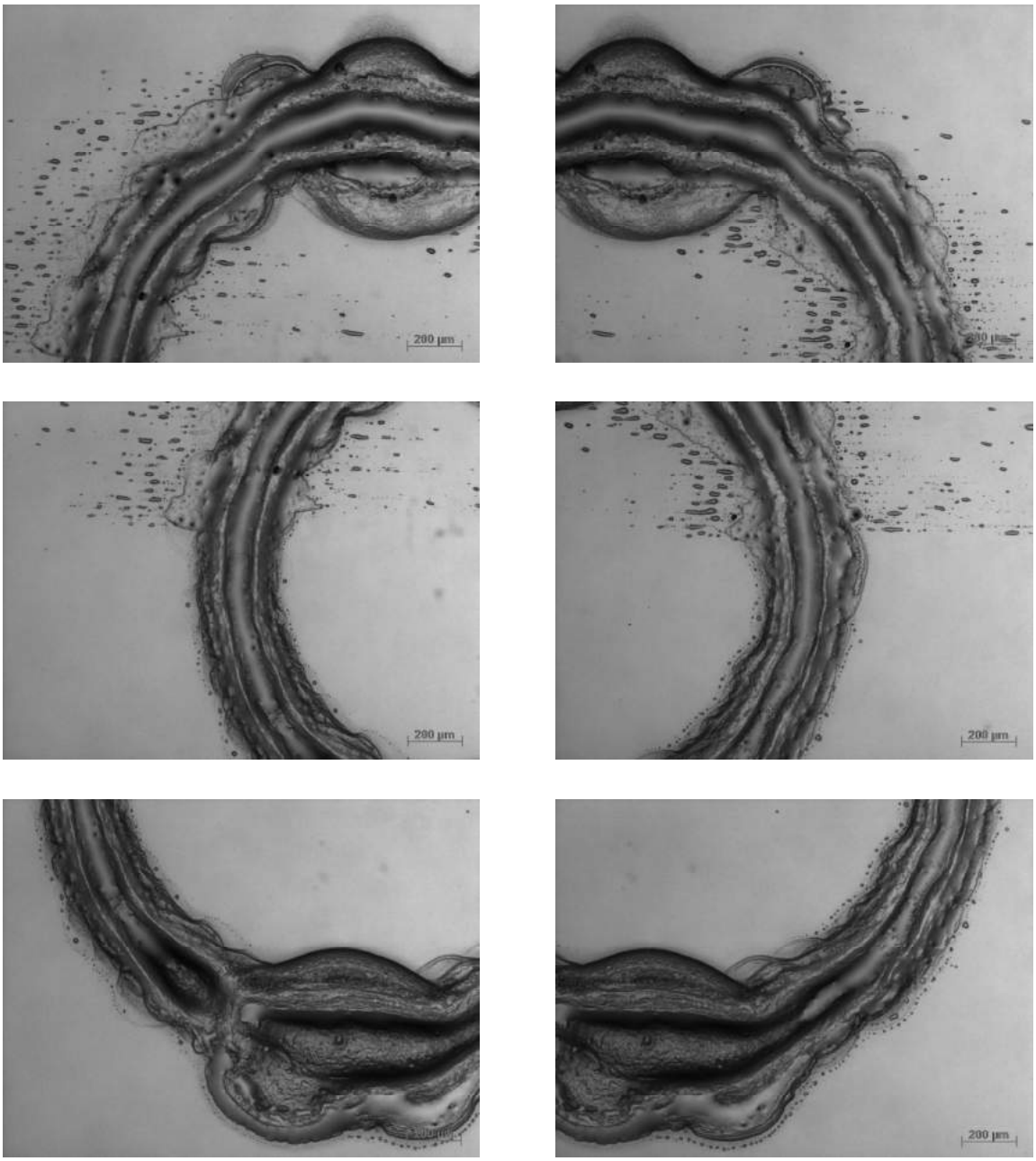
(e) Druppelafstand: 30 µm, loodrecht op de printrichting.



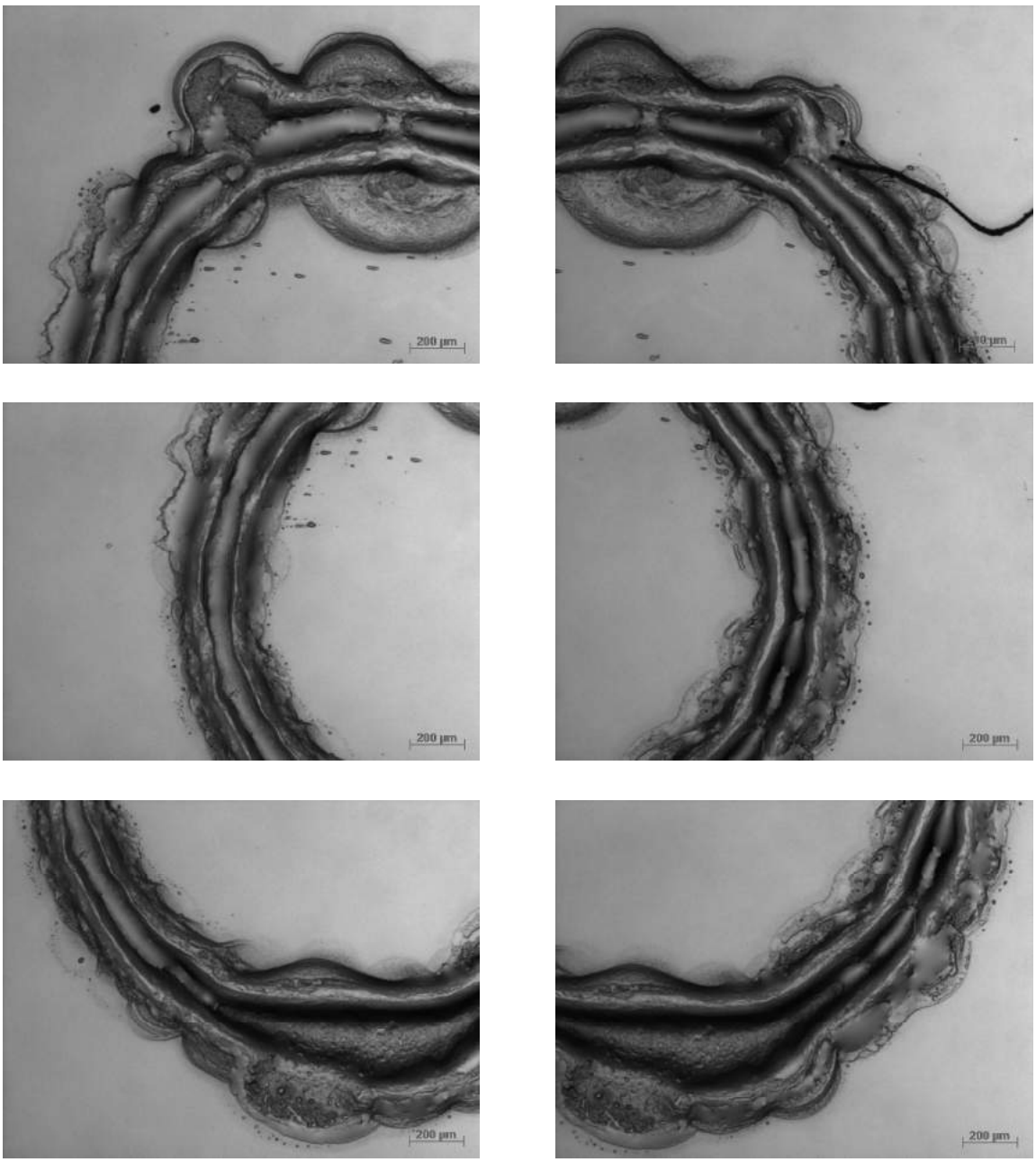
(f) Druppelafstand: 30 µm, evenwijdig met de printrichting.

Figuur A.56: Profilometriebeelden met de verticale positie [nm] in functie van de horizontale positie [mm] voor ringvormige kraters in PMMA-folie door het inkjetetsen bij verscheidene bij een verscheidene druppelafstanden (vervolg).

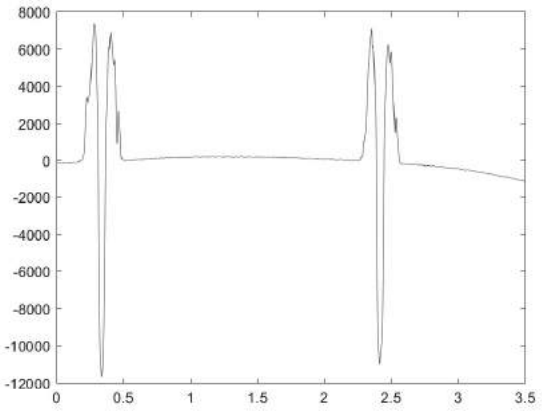
Leader bar



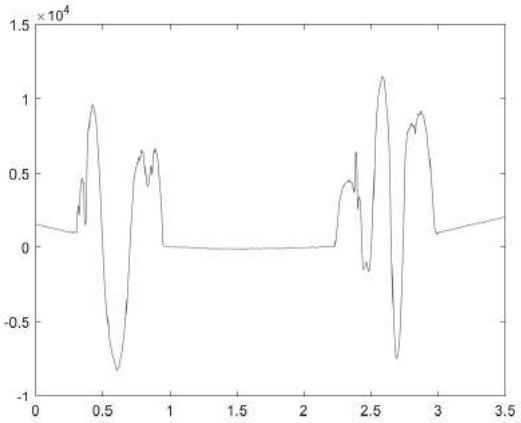
Figuur A.57: Lichtmicroscopie (versterking: 5x) van een ringvormige krater in PMMA-folie door het inkjetetsen zonder het gebruik van een leader bar.



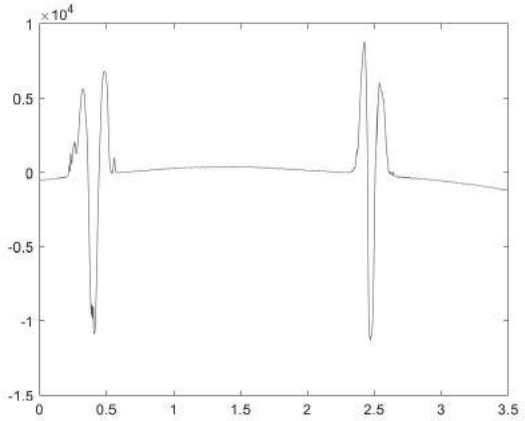
Figuur A.58: Lichtmicroscopie (versterking: 5x) van een ringvormige krater in PMMA-folie door het inkjetetsen met het gebruik van een leader bar.



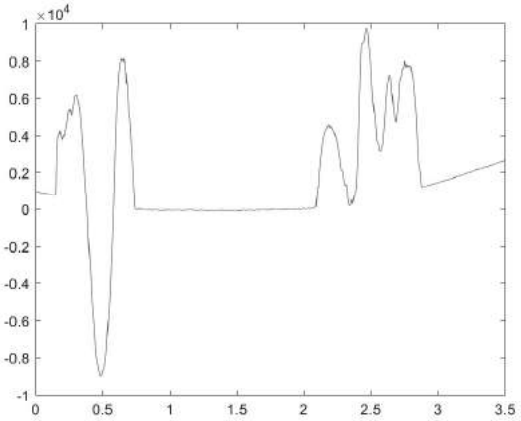
(a) Geen leader bar, loodrecht op de printrichting.



(b) Geen leader bar, evenwijdig met de printrichting.



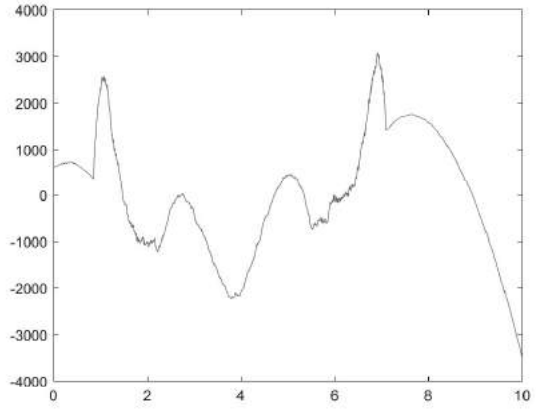
(c) Leader bar, loodrecht op de printrichting.



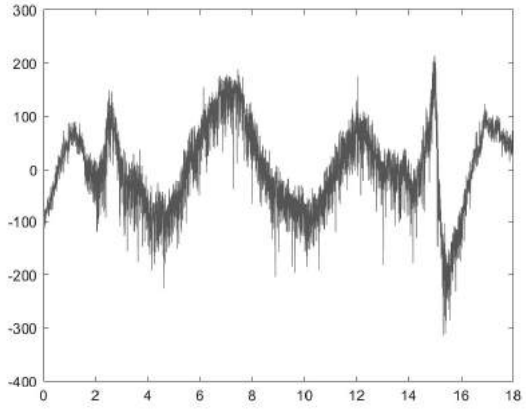
(d) Leader bar, evenwijdig met de printrichting.

Figuur A.59: Profilometriebeelden met de verticale positie [nm] in functie van de horizontale positie [mm] voor ringvormige kraters in PMMA-folie door het inkjetetsen met en zonder het gebruik van een leader bar.

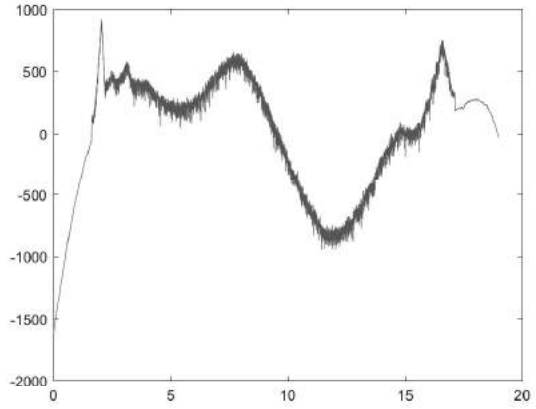
Dubbelsolventsysteem



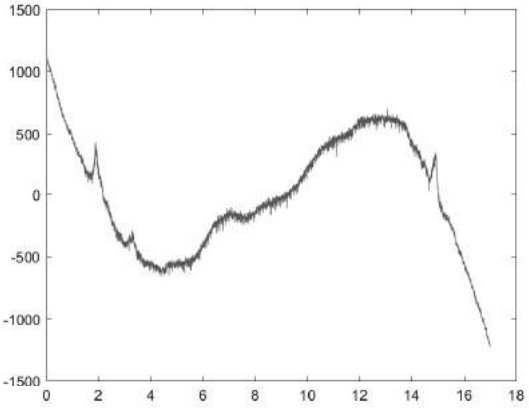
(a) Volumeverhouding: 0/1



(b) Volumeverhouding: 1/1

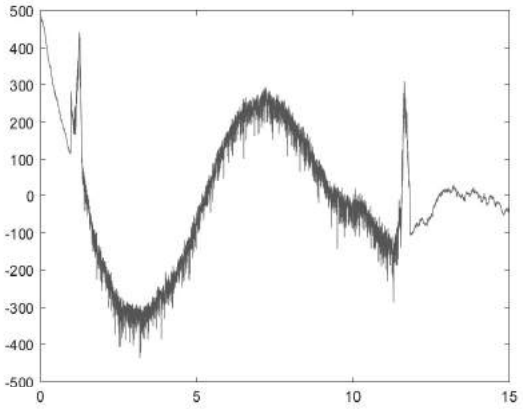


(c) Volumeverhouding: 2/1

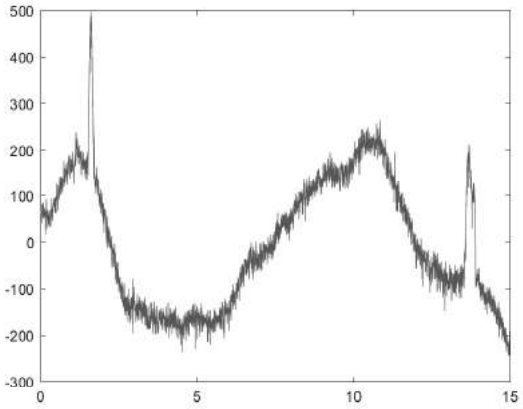


(d) Volumeverhouding: 3/1.

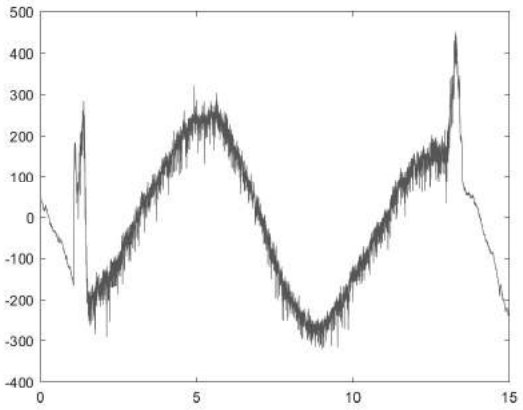
Figuur A.60: Profilometriebeelden met de verticale positie [nm] in functie van de horizontale positie [mm] voor cirkelvormige kraters in PMMA-folie door het inkjetetsen van diverse volumeverhoudingen van het IPA/anisol-dubbelsolventsysteem.



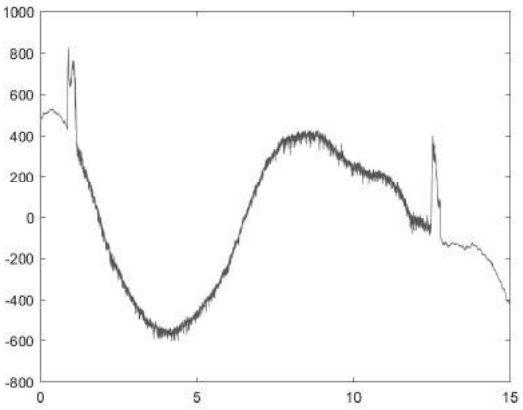
(a) Volumeverhouding: 4/1



(b) Volumeverhouding: 5/1.



(c) Volumeverhouding: 6/1.



(d) Volumeverhouding: 7/1.

Figuur A.61: Profilometriebeelden met de verticale positie [nm] in functie van de horizontale positie [mm] voor cirkelvormige kraters in PMMA-folie door het inkjetetsen van diverse volumeverhoudingen van het IPA/anisol-dubbelsolventsysteem (vervolg).

Auteursrechtelijke overeenkomst

Ik/wij verlenen het wereldwijde auteursrecht voor de ingediende eindverhandeling:
Ontwikkeling van een lensmatrixfolie op basis van inkjetprinten ter optimalisatie van de efficiëntie en het stralingspatroon van gepixelde OLED's

Richting: **master in de industriële wetenschappen: elektromechanica**
Jaar: **2017**

in alle mogelijke mediaformaten, - bestaande en in de toekomst te ontwikkelen - , aan de Universiteit Hasselt.

Niet tegenstaand deze toekenning van het auteursrecht aan de Universiteit Hasselt behoud ik als auteur het recht om de eindverhandeling, - in zijn geheel of gedeeltelijk -, vrij te reproduceren, (her)publiceren of distribueren zonder de toelating te moeten verkrijgen van de Universiteit Hasselt.

Ik bevestig dat de eindverhandeling mijn origineel werk is, en dat ik het recht heb om de rechten te verlenen die in deze overeenkomst worden beschreven. Ik verklaar tevens dat de eindverhandeling, naar mijn weten, het auteursrecht van anderen niet overtreedt.

Ik verklaar tevens dat ik voor het materiaal in de eindverhandeling dat beschermd wordt door het auteursrecht, de nodige toelatingen heb verkregen zodat ik deze ook aan de Universiteit Hasselt kan overdragen en dat dit duidelijk in de tekst en inhoud van de eindverhandeling werd genotificeerd.

Universiteit Hasselt zal mij als auteur(s) van de eindverhandeling identificeren en zal geen wijzigingen aanbrengen aan de eindverhandeling, uitgezonderd deze toegelaten door deze overeenkomst.

Voor akkoord,

Cramer, Martijn

Datum: **4/06/2017**