




MASTER ONDERZOEKSTAGE



Het meten van vloeistofeigenschappen met een PlexiLoC optische uitbreidingskit

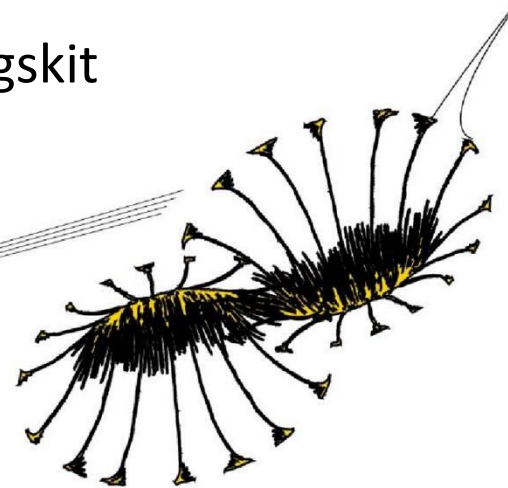
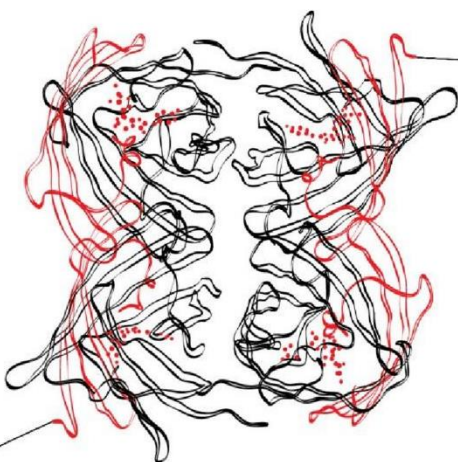
ing. L.P.P. Blommestijn

S1478060

21-09-2021

Beoordelaar 1: dr. J.J. Wietsma

Beoordelaar 2: ing. J.P. Korterik



ELAN, Faculteit Gedragwetenschappen

UNIVERSITEIT TWENTE.



Voorwoord

Dit verslag gaat over het natuurkundig onderzoek dat ik verrichtte bij de groep Optical Sciences, onderdeel van de faculteit Science and Technology (TNW). Begeleid door Jeroen Korterik die veelvuldig meegedacht heeft en me voorzien heeft van achtergronden, ideeën en praktische hulp. De rijke ervaring die hij heeft in het maken van werkende oplossingen en vooral het inschatten wat niet werkt, heeft me in hoge mate geholpen om te komen tot een zeker resultaat. Vanaf deze plek mijn hartelijke dank voor je support en richting gevende adviezen. Ook al is het eindresultaat niet een succesvolle proef, het ontdekken hoe ik een opstelling kan maken en testen is mijn persoonlijke resultaat.

Frans Segerink, bedankt voor je uitleg en tijd om me opstellingen en meetinstrumenten te laten zien en ermee laten werken. Vooral de versnellingsmetingen in het gebouw blijft me bij, evenals jouw uitleg over de Fabry-Perót interferometer die je zelf bouwt om de zon te kunnen observeren.

Dit onderzoek is opgezet in opdracht van dr. Jan Jaap Wietsma, verbonden aan Pre-University van Universiteit Twente ten behoeve van het leerlingenlab van de UT. Een grote wens bij de experimenteersset voor lab-on-a-chip is om proeven te kunnen doen met licht. Dat was de aanleiding om te onderzoeken of een praktische opstelling of proef kon worden gerealiseerd die gebruik maakt van licht. Het heeft even geduurd voor ik door had hoe dat onderzoeken in zijn werk gaat. Het lastigste punt was om zelf het doel, de middelen en het pad te bepalen – iets dat ik niet eerder in deze mate heb ervaren. De hulp van Jan Jaap was belangrijk in mijn zoektocht en hij heeft me meer dan eens geholpen bij het brainstormen en verder ontwikkelen van mijn ideeën. Vooral het praktische nut van het onderzoek heeft me gemotiveerd om een werkend prototype van een proef te trachten te ontwikkelen. Bedankt Jan Jaap, het zijn niet alleen de middelbare scholieren die enthousiast worden van proeven in een lab.

Dan wil ik ook Jan Brouwer bedanken, docent in de werkplaatsen van Windesheim, die meerdere keren uren samen heeft zitten denken, tekenen, lasersnijden en 3D-printen om zo te komen tot een uitbreiding op de bestaande PlexiLoc. Jouw kennis en kunde heeft bijgedragen om een prototype te maken dat er niet alleen goed uitziet maar ook eenvoudig en goed werkt. Bedankt voor jouw ervaring en enthousiasme mij verder te helpen.

Abstract

A research has been done to develop an experiment on a PlexiLoC, part of the NLT lab on a chip course for high school students. With this PlexiLoC high school students can design and build their own microfluidic chip. Effort had been done to develop a setting where the refractive index of a fluid is measured inside a homemade microfluidic chip.

Using a CCD camera and a home build LabView program images are captured and analysed. By replacing the fluid to one with a different refractive index a light beam is deflected sideways in a parallel direction. From tests it is concluded that an image can be processed and compared to a reference testfluid. Results show a clear measurable shift between images when the fluid layer is 10 mm thick. In case of a microfluidic chip with a channel of 500 micrometer and a change of refractive index from 1.333 to 1.424, the shift is in the order of a single pixel of the used camera and thus below the measuring threshold for this setup. A mechanical setup has been designed and build as a demonstration add-on for the PlexiLoC so camera (pinhole type) and light source can be easily managed.

Some suggestions have been made to further investigate enhancements for this type of measurements using a PlexiLoC.

Samenvatting

Er is een onderzoek gedaan naar een mogelijke optische proef die als uitbreiding op de reeds bestaande proeven voor NLT Lab on a Chip (LoC) experimenteerset gebruikt kan worden. Deze bestaat uit twee perspex platen met een gestandaardiseerd gatenpatroon en montage materiaal. Tussen de platen kan een microfluidische chip gelegd worden gemaakt van lamineerfolie waar vloeistoffen doorheen geleid kunnen worden. De foliechip is door middelbare scholieren zelf te maken uit lamineerfolie met gebruik van mes of schaar. Met een 2D-tekenpakket en een geschikte freesmachine kan ook een patroon in lamineerfolie uitgesneden wordt. Dit laat toe om zelf een chipontwerp te maken en direct te testen.

In dit onderzoek is een ontwerp gemaakt en gefabriceerd van een opstelling om de brekingsindex van een vloeistof te meten aan de hand van lichtbreking via een tralie. Een lichtbron schijnt op een tralie gemaakt van een stuk CD of DVD. De diffractie die daarvan het gevolg is, kan met een CCD-camera aangesloten op een PC vastgelegd worden. Een speciaal programma geschreven in LabView zorgt dat de ruwe data uit een selecteerbaar deel van het camerabeeld opgeslagen kan worden. Hierin is positie en gemeten helderheid en kleur van ieder pixel van de CCD te exporteren naar een tekst- of CSV-bestand. De proeven laten zien dat de brekingsindex met een camera meetbaar is in een opstelling met een vloeistoflaag van 10 mm. De proeven laten ook zien dat een vloeistoflaag van 500 micrometer te weinig verplaatsing van de lichtbundel levert om met de gebruikte camera te kunnen vastleggen. De demping als functie van de golflengte is meetbaar met deze werkwijze, alhoewel de gevoeligheid niet is bepaald.

De verplaatsing ligt in de orde van de pixelafstand van de camera bij verandering van de brekingsindex van 1,333 (gedemineraliseerd water) naar 1,424. Met dit resultaat kan geconcludeerd worden dat de resolutie van gebruikte camera bij deze meetmethode niet voldoende is.

Er zijn enkele suggesties gegeven om nader te onderzoeken hoe de kans vergroot kan worden op een succesvolle meetmethode voor de brekingsindex van een vloeistof in een foliechip.

Inhoud

Voorwoord	2
Abstract.....	3
Samenvatting	3
1 Inleiding.....	6
1.1 Experimenteersset voor NLT lab-on-a-chip.....	6
1.2 Vervolgontwikkeling.....	7
1.3 Onderzoeksvragen.....	9
1.4 Relevantie.....	10
1.5 Overzicht van de studie	11
2 Context en theoretisch kader	12
2.1 Propagatie, diffractie en breking	12
2.2 Absolute en relatieve metingen met diffractie en brekingsindex.....	15
3 Onderzoeksaanpak.....	16
3.1 Opstelling 1	16
3.2 Opstelling 2	18
3.3 Opstelling 3	21
3.4 Opstelling 4	23
4 Resultaten	25
4.1 Resultaten deelonderzoek 1	25
4.2 Resultaten deelonderzoek 2.....	26
4.3 Resultaten deelonderzoek 3.....	28
4.4 Resultaten deelonderzoek 4.....	30
4.5 Fabriceren van benodigde materialen voor de optische uitbreidingskit	31
5 Conclusies.....	32
Conclusies deelonderzoek 1	32
Conclusies deelonderzoek 2	32
Conclusies deelonderzoek 3	32
Conclusies deelonderzoek 4	33
Conclusies ten aanzien van de hoofdonderzoeksvraag.	33
6 Discussie.....	35
7 Aanbevelingen.....	38
Bijlage A: Receptuur voor het lasersnijden van CD of DVD	41
Bijlage B: Onderdelen van de uitbreidingsset.....	43
Bijlage C: CD of DVD bewerken	44
Bijlage D: Specificaties van de camera voor opstelling 1 en 2	46

1 Inleiding

Universiteiten en wetenschappelijke instituten ondersteunen op diverse wijzen het onderwijs op middelbare scholen. Een vorm daarvan is het project IMPULS (Veen, 2019), het samenwerkingsverband van vijf Nederlandse Universiteiten ter versterking van bètadidactiek door voor vijf bètavakken nieuwe leermiddelen te ontwikkelen. Om het onderzoeksgebied van microfluidica onder de aandacht te brengen is voor het vak NLT een lessenserie met practicumproeven uitgewerkt gebruik makend van microfluidische lab-on-a-chip devices (Wietsma, Veen, Buesink, Berg, & Odijk, 2018). In lab-on-a-chip devices (chips) zijn laboratorium apparatuur of functies geminiaturiseerd, vaak met vloeistoffen in kanalen met afmetingen van enkele micrometers tot meer dan honderd micrometer. Daarbij worden de vloeistoffen gemanipuleerd om analyses te kunnen doen op het gebied van chemie, biologie, optica of informatietechnologie (Whitesides, 2006).

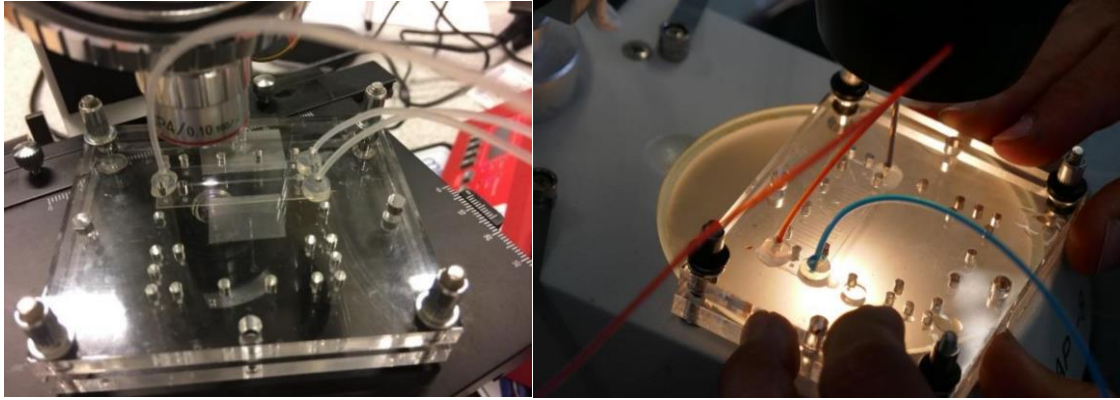
De practicumproeven voor NLT betreffen de basisprincipes van de microfluidica: laminaire stroming, mengen en druppelvorming. Verder is het mogelijk proeven te doen met het tellen en manipuleren van microbolletjes en meten van geleidbaarheid. Om deze proeven op scholen te kunnen doen is er een experimenteersset ontwikkeld met daarin alle apparatuur en materialen die nodig zijn. Om de beschikbaarheid op meer scholen mogelijk te maken, waar kostprijs een rol in speelt, zijn goedkopere alternatieven voor onderdelen ontwikkeld.

1.1 Experimenteersset voor NLT lab-on-a-chip

De bestaande experimenteersset bevat injectiespuit-pompen, chiphouders, microfluidische chips van glas in diverse uitvoeringen, slangen en ander aansluitmateriaal. Glaschips en chiphouder zijn commercieel verkrijgbare producten van fabricaat Micronit. De chiphouder wordt gebruikt ter bescherming van de chip en zorgt voor in combinatie met afdichtringen (ferrules) voor vloeistofdichte aansluitingen naar de toe- en afvoerslangen. Door het gebruik van gestandaardiseerde afmetingen en de locaties voor vloeistofaansluitingen zijn chips en chipklem op elkaar afgestemd.

In plaats van de Micronit chips kan ook voor goedkopere zelfmaak-chips gekozen worden, op basis van lamineerfolie. Wietsma et al. (2018) beschrijven dit uitgebreid. Naast een handmatig bewerkte variant is er ook een variant die in eigen beheer produceerbaar is met behulp van een tekenpakket en een lasersnijder. De maatvoering daarvan is geschikt voor de Micronit chiphouder.

Voor de chiphouder van Micronit is ook een goedkoop en zelf te produceren alternatief ontwikkeld van 6 mm dik gegoten PMMA, de PlexiLoC. Met een lasersnijder is dit eenvoudig en snel te maken. De klem bestaat uit twee platen van 70x80 mm. Ze worden bijeengehouden door het plaatsen van M4 bouten en moeren. Een glaschip of foliechip wordt tussen de platen gelegd en uitgelijnd met de aansluitgaten. Tussen foliechip en afdekplaat komen ferrules, gaten in de bovenste plaat zijn doorvoeren voor de slangen. Door het samendrukken van de ferrules ontstaat een vloeistofdichte aansluiting tussen de slangen en de chips. Deze configuratie is niet geschikt voor hoge volumestromen: vooral de foliechip delamineert bij hogere drukken. In figuur 1 zijn PlexiLoC, foliechip en aansluitlangens te zien.



Figuur 1; Links een PlexiLoC onder de lichtmicroscop. De bouten voor het aanklemmen zijn duidelijk zichtbaar op de hoeken van de plexiglas platen. Onder het oculair is de foliechip zichtbaar met aangesloten vloeistofslangen. Rechts zijn de rode en blauwe aangesloten slangen met de ferrules zichtbaar. De (ongebruikte) gestandaardiseerde aansluitgaten zijn eveneens duidelijk zichtbaar. (Wietsma J. , Veen, Buesink, Berg, & Odijk, 2018)

Een handig voordeel van de transparante PlexiLoC is de mogelijkheid de processen in de foliechip onder een microscoop te volgen of er opnames van te maken.

1.2 Vervolgontwikkeling

Een grote wens van de ontwerpers van de NLT module lab-on-a-chip is een optische meting of optische detectie gebruik makend van de PlexiLoC en foliechips. Hiervoor komen een aantal optische effecten in aanmerking: reflectie, transmissie, polarisatie, interferentie, coherentie (laser) en diffractie (Hecht, 1975). Coherentie en interferentie vereisen bij gebruik van zichtbaar licht veelal maatvoering in de orde van grootte van de golflengtes. Dit is voor een zelfgemaakte foliechip ver buiten de haalbare specificaties. Deze effecten zijn daarom niet verder onderzocht. Polarisation is verder niet onderzocht omdat er op dit moment geen ideeën waren hoe deze bruikbaar kon zijn voor een optische meting in de PlexiLoC.

Daarmee resteren reflectie, transmissie of absorptie en diffractie als basis voor een proef met de PlexiLoC. Voorafgaand aan dit onderzoek was er al een proefopstelling waarbij van transmissie gebruik gemaakt is. Een LED- lichtbron schijnt daarbij vanaf de normaal op het oppervlak van de foliechip en gaat onder meer door een kanaal in de foliechip. De hoeveelheid licht aan de andere zijde gemeten wordt met een sensor. Het verschil, dat beschreven wordt door de wet van Lambert-Beer, is afhankelijk van onder meer de optische weglengte die het licht door de vloeistof aflegt, hier precies de kanaalhoogte. Door de gebruikte kanaalbreedte gaat een groot van het invallende licht langs de inhoud van het kanaal. Dit beperkt de gevoeligheid van een meetopstelling, zeker wanneer de absorptiecoëfficiënt eveneens klein is zoals in transparante vloeistoffen. Vergroten van de weglengte in de vloeistof kan hier verbetering opleveren in de gevoeligheid van de metingen.

In de verkennende fase voor dit onderzoek is nagedacht h oe de transmissie met een hogere gevoeligheid gemeten kan worden. Daartoe kan onder meer de optische weglengte vergroot worden, het volume vergroten van de vloeistof waar het licht doorheen valt of het licht zo manipuleren dat hetzelfde volume meermaals doorkruist wordt. In principe is het niet wenselijk de weglengte te vergroten door de kanaalhoogte te vergroten, omdat daarmee de voordelen van microfluidica verloren gaan en daarmee de essentie van het experiment.

In literatuur zijn meerdere oplossingen te vinden waarbij het licht in de lengterichting door een kanaal gaat. Bij veel van deze oplossingen zijn hightech hulpmiddelen vereist, zoals een clean room, trillingvrije opstellingen, of er worden stoffen gebruikt die niet veilig zijn voor gebruik door leerlingen. Daarmee vervalt de mogelijkheid voor leerlingen om zelf een chip te ontwerpen en te testen, hetgeen onwenselijk is.

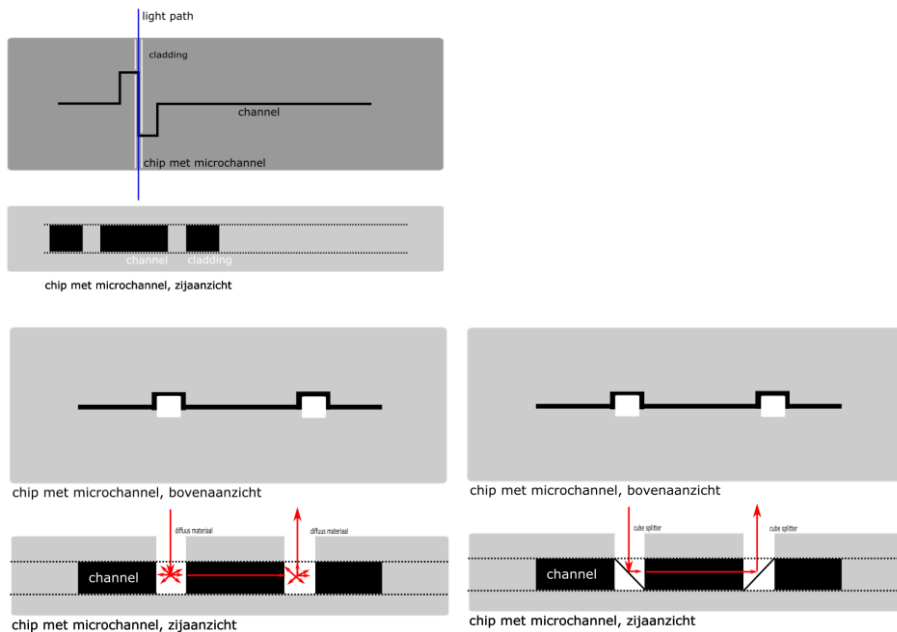
Een eerste idee voor grotere optische weglengte is het inkoppelen van licht in een kanaal vanaf de zijkant van de lamineerfolie die bij de foliechip geadviseerd is. Wegens de geringe totale dikte van 375 micron van de 3-lagen folie en 125 micron van het resulterende kanaal is het zinvol om een optische overgang te maken tussen folie en lichtbron. De lichtbron heeft immers meestal een grotere diameter. Gevolg is dat het uitlijnen van de lichtbron en de folie een van de uitdagingen is bij deze aanpak. Licht dat onder en boven de folie langs strijkt zou de sensor kunnen verblinden. Er is gedacht aan een 3D-geprint koppelstuk waar de folie ingeschoven kan worden. Ook de lichtbron zoals een LED kan in een koppelstuk geplaatst worden. 3D-printen heeft echter toleranties in de orde van de dikte van een foliechip waardoor de aansluiting problematisch kan zijn. Om deze reden is hier verder geen onderzoek naar gedaan.

Inkoppelen vanaf de normaal van de foliechip

Een alternatief voor inkoppelen vanaf de zijkant is inkoppelen vanaf de normaal van de foliechip. Enkele literatuurbronnen geven aan hiervan gebruik te maken, zoals Mogensen & Kutter (2009, p. 92) en Barrios & Canalejas (2017). De methode van Barrios & Canalejas maakt gebruik van een aluminium tralie koppeling (grating coupler) die in een lichtgeleider van 'scotch tape' is geplaatst. De vanaf de normaal invallende lichtbundel wordt bij 635 nm met een efficiency van 20% ingekoppeld in licht geleidende laag. Dit idee leidde in dit onderzoek tot de vraag of een CD of DVD als goedkope bron voor een grating bruikbaar is om de optische weglengte te vergroten. Alternatief voor de daar gebruikte aanpak is wellicht het benutten van een optisch diffuse plug waarbij er ook een deel van het licht in de lengterichting van het kanaal zal kaatsen. In figuur 2 is dit idee in boven en zijaanzicht getekend. Een vergelijkbare potentiële oplossing is het plaatsen van een cube splitter die het licht vanaf de normaal onder een 90° hoek weerkaatst, zie figuur 2. Voordeel van de laatste is het behoud van het merendeel van de lichtintensiteit, alhoewel de verwachting is dat een aanzienlijk deel van de doorsnede van de lichtbundel buiten het kanaal in de folie zal vallen. Voordeel van een optisch diffuse plug waarschijnlijk eenvoudiger te fabriceren valt. Een belangrijke overweging om een grating te willen benutten te opzichte van bijvoorbeeld een spiegellend oppervlak is dat de grating het mogelijk maakt de lichtbundel onder een hoek te verstrooien terwijl de grating zelf vlak tegen het vloeistofkanaal gemonteerd kan worden. Een spiegel zou onder een hoek gemonteerd moeten worden indien het licht van de lichtbron vanaf de normaal komt. Montage van een spiegel onder een hoek vereist mechanische oplossingen en lijkt minder eenvoudig te realiseren.

Terug naar de door Barrios & Canalejas beschreven scotchtape lichtgeleider, die omgeven is door lucht waardoor het licht opsluit in de geleider. Lucht met een lagere brekingsindex dan het kunststof fungeert hier als reflectielaag (cladding), waardoor totale reflectie resulteert. Bij de foliechip in de PlexiLoC is het de bedoeling dat de voortplanting zoveel mogelijk in het vloeistofkanaal plaatsvindt. Een van de uitdagingen is dan ook te zorgen dat het licht zo veel mogelijk in de folie blijft, ondanks het ontbreken van een cladding waardoor totale interne reflectie niet automatisch aanwezig is. In het kanaal is immers een waterige oplossing met een lagere brekingsindex (ongeveer 1,3-1,4) dan het folie die de kanaalwanden vormt (circa 1,5). Daardoor zal het licht in het kanaal sterk kunnen verstrooien in de folielagen. Resultaat is dat er dan minder licht aankomt bij de sensor.

Zelfs wanneer er voldoende licht uit het kanaal op de sensor valt dan is het nog geen uitgemaakte zaak dat de gevoeligheid van de meting verbeterd is. Uit onderzoek door Jensen & Bak (2002) blijkt dat het verhogen van de sterkte van het lichtbron niet zonder meer tot hogere gevoeligheid leidt. Net zo min leidt het optische pad verlengen automatisch tot een hogere resolutie van de meting. Beter is het te streven naar het vergroten van *de verhouding* tussen bronsterkte en gemeten signaalsterkte. Het verlengen van de optische weglengte of verhogen van de sterkte van het invallende licht levert alleen verbetering zolang de genoemde verhouding daardoor toeneemt.



Figuur 2; Drie ideeën om de optische weglengte in een foliechip te verlengen. Boven door links en rechts van het microkanaal cladding aan te brengen (luchtspleet) en het licht vanaf de rand van de foliechip in te koppelen. Onder door een diffuus materiaal (li) of een cube splitter (re) in het kanaal te plaatsen en vanaf de normaal te belichten.

1.3 Onderzoeksvragen

Uitgaande van de primaire wens om een optische detectie of meting aan de PlexiLoC met foliechips toe te voegen, is gestart met een reeds aanwezig prototype die de absorptie van vloeistof in het kanaal kan meten. De interactielengte is daarbij beperkt tot de hoogte van het microkanaal. Voor dit onderzoek is in eerste instantie nagedacht over een manier waarop het licht een grotere interactie met de vloeistof kan aangaan.

De hoofdonderzoeksvraag luidt: Op welke wijze is een optisch effect met licht of laser te gebruiken om detectie of metingen te doen aan vloeistoffen in folie-chips bij gebruik van een PlexiLoC chiphouder?

Om deze hoofdvraag te beantwoorden zijn de onderstaande deelvragen opgesteld. Bij de uitwerking van de deelvragen zijn twee aandachtsrichtingen gebruikt. Enerzijds is dit of een optisch effect op de schaal van de foliechips meetbaar is met relatief eenvoudige middelen. Anderzijds is nagedacht over de wijze waarop dit praktisch gemaakt kan worden als uitbreiding op de PlexiLoC experimenteerkit. Vanwege de noodzaak dat een experiment voor VO-leerlingen begrijpelijk en werkbaar blijft, zijn veeleisende of foutgevoelige procedures zo veel mogelijk vermeden.

Deelvraag 1: Welke optische effecten en detectie zijn bruikbaar bij gebruik van een PlexiLoC experimenteersset met foliechips?

De optische eigenschappen absorptiecoëfficiënt en brekingsindex (refractive index, RI) hebben de eerste voorkeur gehad, vooral vanwege dat deze voor VO-leerlingen toegankelijker zijn. Zijn deze effecten zodanig groot zijn dat dit meetbaar is in een microkanaal? Dit hangt samen met de eigenschappen van de toegepaste vloeistof, de beschikbare optische weglengte in een foliechip en de aard van het optische effect zelf.

Deelvraag 2: Welke mogelijkheden zijn er om de optische weglengte in een PlexiLoC met foliechip te vergroten?

De voorverkenning zoals weergegeven in paragraaf 1.2 geeft enkele van de mogelijkheden weer die gekozen konden worden. Een tralie heeft vele toepassingen en de beschikbaarheid van een

goedkope tralie in de vorm van een DVD is nader onderzocht op zijn bruikbaarheid. Er zijn voorbeelden van refractometers die gemaakt zijn van een stuk CD. De vraag is of dit ook bruikbaar is met een foliechip – dit zou een aantrekkelijk alternatief kunnen zijn voor relatief dure commerciële tralies.

Deelvraag 3: Is een grating (tralie) bruikbaar voor effectief detecteren of meten en toch voldoende eenvoudig toepasbaar voor VO-leerlingen?

De huidige experimenteersset kent momenteel alleen een absorptiemeting. Door aanpassingen of uitbreiding zou de PlexiLoC liefst meerdere optische proeven bieden. Bij voorkeur moeten deze uitbreidingen in een goedkope variant (zelf) te maken zijn. Er is een uitbreiding ontworpen die in eerste instantie dient als deel van de opstelling.

Deelvraag 4: Voldoet de uitbreiding van de PlexiLoC experimenteersset als goedkope oplossing voor optische detectie of metingen?

De opstellingen en de bijbehorende onderzoeksdoelen

In dit onderzoek is niet zuiver vanuit de hoofdvraag met de deelvragen is toegewerkt naar het eindresultaat, maar de resultaten van elke stap invloed hebben gehad op de volgende stap – en dus de volgende opstelling. Als eerste is met de ideeën van Barrios & Canalejas-Tejero (2017) nagegaan, waarbij een tralie benut wordt om licht vanaf de normaal in een kanaal te koppelen, of dit op eenvoudige wijze ook met een DVD kan. Uit eerste (hier niet gedocumenteerde) probeersels is het idee ontstaan om de invloed van de brekingsindex van een vloeistof in het lichtpad zichtbaar te maken. De vraag bij opstelling 1 betrof dan ook of diffractie van een monochrome lichtbundel voldoende meetbaar resultaat oplevert. Als vloeistof is bij aanvang met oplossingen van keukenzout gebruikt. Vanwege het beperkte effect is daarna met kristalsuikeroplossingen gewerkt die bij hoge concentraties ook een grotere verschuiving van de brekingsindex heeft.

In opstelling 2 is dit verder uitgewerkt naar een witte lichtbron. De beschikbaarheid van een CCD-camera en een LabView programma om het diffractiepatroon vast te leggen gaf richting aan het idee dat golflengte afhankelijke verschuiving ten gevolge van de brekingsindex mogelijk meetbaar zou kunnen zijn. Gebruik van een kleurencamera opende de mogelijkheid om dit naar de diverse kleuren te kunnen doen.

De derde opstelling is een aangepast versie van opstelling 2 zodat dezelfde metingen op en met een PlexiLoC met foliechip uitgevoerd kon worden. Een eenvoudige LED lichtbron, een verstelbare camera gemonteerd op de PlexiLoC dient om na te gaan of de verschuiving op deze schaal nog meetbaar is met een camera.

Uit berekeningen blijkt het meten van de verschuiving met een camera aan de fysieke grenzen te raken. Daarom is met opstelling 4 een alternatieve sensor onderzocht, de kwadrantcel, geschikt voor uiterst geringe verschuivingen (10^{-7} m), alhoewel niet in combinatie met een foliechip en de PlexiLoC.

1.4 Relevantie

De wetenschappelijke relevantie van dit onderzoek is het selecteren van een bruikbare methode van meten of detecteren met behulp van een optisch effect voor gebruik in een zelf te fabriceren foliechip en een PlexiLoC. Het resultaat moet aangepast zijn aan gebruik door leerlingen in het voortgezet onderwijs in practicumlessen. Verder zijn lage materiaal- en productiekosten relevant om zoveel mogelijk scholen in staat te stellen de NLT lab-on-a-chip module inclusief practica in het onderwijs op te nemen. Daarmee is het mogelijk leerlingen direct met de vakgebieden optica, lab-on-a-chip en microfluidica kennis te laten maken op een activerende manier.

De relevantie voor het vakgebied van microfluidica en lab-on-a-chip beperkt zich tot kennismaking door toekomstige onderzoekers.

1.5 Overzicht van de studie

Het onderzoek is als volgt opgebouwd: in hoofdstuk twee wordt de theoretische context van het onderzoek besproken ter beantwoording van deelvraag 1. In het derde hoofdstuk wordt de onderzoeksmethode uiteengezet aan de hand van de meetopstellingen. De resultaten daarvan worden uiteengezet in het vierde hoofdstuk. Ook de wijze van waarop de meetopstelling in een PlexiLoC geïntegreerd kan worden komt aan de orde. Conclusies en discussie volgen in het vijfde en zesde hoofdstuk.

2 Context en theoretisch kader

2.1 Propagatie, diffractie en breking

Alle optische verschijnselen zijn door diverse auteurs in samenhang gebracht. Daarbij valt op dat de indeling niet altijd hetzelfde is. Zo deelt Fowles (1989) optische verschijnselen in naar propagatie, reflectie, coherentie, interferentie en diffractie. Hecht (1975) voegt daar transmissie en polarisatie aan toe. Garmire (2012) laat in een overzicht in tabel 1 over non-lineaire effecten van licht zien hoe propagatie, absorptie en in beperkte mate reflectie met de eigenschappen van het medium en de vorm van het object samenhangt.

<u>Character of medium:</u>	Transparent	Absorbing	Scattering	Non-Local	
<u>Atom-light interaction:</u>	Non-resonant	Resonant	Incoherent	Coherent	Transient
<u>Optics geometry:</u>	Plane Wave	Finite Beam	Waveguide	Wave-Mixing	Reflection
<u>Device Geometries:</u>	Bulk	Periodic	Fibers	Resonators	Micro-cavities

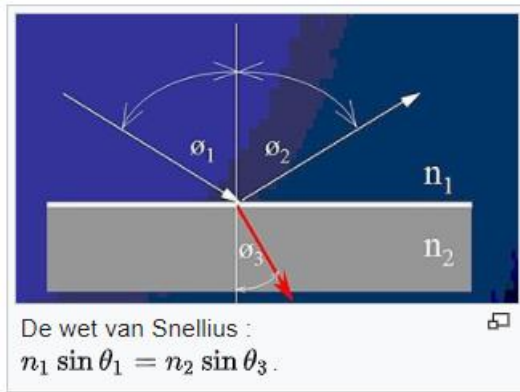
Tabel 1: Classificatie van niet-lineaire optische fenomenen (Garmire, 2012).

In de klassieke optica, waarbij het licht als golf beschouwd wordt, zijn de termen breking (refraction), diffractie, scattering en spiegelen gebruikelijk. Volgens Fowles zou men de term scattering voor elk van deze verschijnselen kunnen gebruiken maar historisch worden de termen als volgt gebruikt: elastische scattering vanaf een oppervlak wordt spiegeling genoemd, elastische scattering in een transparant materiaal in heet breking, scattering vanaf geordende kleine objecten of patronen op oppervlakken heet diffractie en elastische scattering op willekeurig geordende kleine deeltjes heet eenvoudig scattering of verstrooiing (Fowles, 1989).

Wanneer geometrie van een object gebruikt wordt om optische effecten te verkrijgen, dan zijn de afmetingen daarvan veelal in dezelfde orde van grootte als de golflengte van het toegepaste licht. In foliechips zijn structuren op micrometerschaal niet met eenvoudige middelen realiseerbaar. In de structuren die gemaakt zijn met handgereedschappen als mes of schaar, zoals bij het lab-on-a-chip practicum, dient licht als golf in een bulkmateriaal gezien te worden.

Transparante overgangen

Deze effecten die beschouwd worden vanuit een inkomende vlakke golf (plane wave) en ontstaan door overgangen naar een materiaal met een andere brekingsindex behoeft weinig uitleg. De meest gebruikte relatie is hier ongetwijfeld de wet van Snellius, waarbij de hoeken van inval en uitreden gerelateerd zijn. We gaan er hier vanuit dat beide materialen transparant zijn, derhalve met een lage absorptiegraad.



Figuur 3; Wet van Snellius waarbij een vlakke golf in een bulkmateriaal invalt met een andere brekingsindex. Bron: https://nl.wikipedia.org/wiki/Wet_van_Snellius geraadpleegd op 2-7-2021.

Breking treedt op zodra een lichtgolf de grens van de ene naar de andere stof passeert met een andere brekingsindex n (refractive index of RI). Materialen absorberen veelal een zeker deel van het licht, aangeduid met de absorption index k of extinction coefficient. De beide eigenschappen samen worden ook wel aangeduid als de complexe brekingsindex N (Tilley, 2011). Soms is ook wel de absorptie coëfficiënt α_a in gebruik die volgens Tilley (2001) gerelateerd is aan k als:

$$[2.1] \quad \alpha_a = \frac{4\pi k}{\lambda}$$

De absorptie wordt beschreven door de wet van Lambert-Beer en deze beschrijft hoe de intensiteit van het invallende licht exponentieel afneemt met de materiaaldikte d , de molaire concentratie c en extinctie coëfficiënt k . In formulevorm is deze relatie gegeven door (Jensen & Bak, 2002):

$$[2.2] \quad \frac{I_1}{I_0} = 10^{-kcd}$$

Jensen & Bak duiden de term kcd aan als de absorptie A_s die afhankelijk is van het golfgetal van het licht. Het golfgetal daarbij is de inverse van de golflengte. Voor gevoelige detectie door het verschil te meten tussen invallend licht I_0 en de intensiteit na passage door materiaal of vloeistof, is het verleidelijk aan te nemen dat meer optische weglengte of meer bronsignaal tot meer interactie of demping leidt en dus hogere gevoeligheid van de meting. Jensen & Bak (2002) laten zien dat het vergroten van de verhouding tussen bronsterkte en gemeten signaalsterkte bepalend is voor de gevoeligheid of resolutie. Hieruit volgt ook dat het verlengen van de optische weglengte of verhogen van de sterkte van het invallende licht alleen verbetering oplevert zolang de genoemde verhouding daardoor toeneemt.

Wanneer een vlakke golf vanuit een ander medium door een homogeen transparante balk gaat dan treedt er uiteraard breking op, uitgaande van de brekingsindexen van beide media. Bij het uittreden treedt breking in de omgekeerde richting op. Hierdoor zal een lichtstraal een planparallele verplaatsing ondergaan die lineair afhangt van de dikte van de balk. Tatum (2020) leidt hiervoor de vergelijking af:

$$[2.3] \quad h = t(\sin\theta - \cos\theta \tan\varphi)$$

waarbij h de verplaatsing, t de dikte van de transparante balk en θ de hoek van inval is. De hoek φ is de brekingshoek die door de wet van Snellius gekoppeld is aan de brekingsindex van de balk en de hoek van inval. Zodoende is deze relatie geheel te schrijven in de termen t , θ en n

$$[2.4] \quad h = t \sin\theta \left(1 - \frac{\cos\theta}{\sqrt{n^2 - \sin^2\theta}} \right)$$

zoals ook te zien in figuur 4. In de analyse door Tatum (2020, p. figuur 1.7) wordt duidelijk dat een grotere dikte t meer effect op verplaatsing h heeft wanneer hoek θ het grootst is wanneer deze richting 90° gaat.

Example 1.3.1: Refraction through a glass block

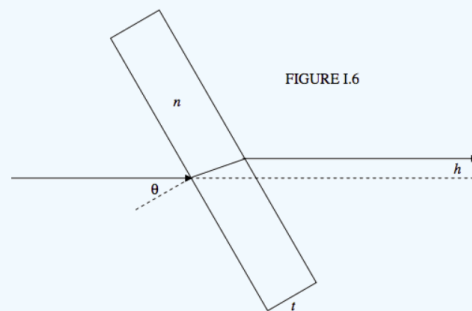


Figure 1.6 shows a ray of light passing through a rectangular glass block of thickness t and refractive index n (taken to be 1.5 in the drawing). The normal to the surface of the block makes an angle θ with the incoming ray. It is a matter of simple geometry (do it!) to show that the lateral displacement h of the ray is given by

$$h = t(\sin \theta - \cos \theta \tan \phi), \tag{1.3.9}$$

where ϕ is the angle of refraction, given by $\sin \theta = n \sin \phi$. In terms of θ , n and t , this is

$$h = t \sin \theta \left(1 - \frac{\cos \theta}{\sqrt{n^2 - \sin^2 \theta}} \right). \tag{1.3.10}$$

Figuur 4; Planparallele breking door een transparante balk. Bron: 1.3: Refraction at a Plane Surface - Physics LibreTexts geraadpleegd op 2-7-2021.

DiffRACTIE

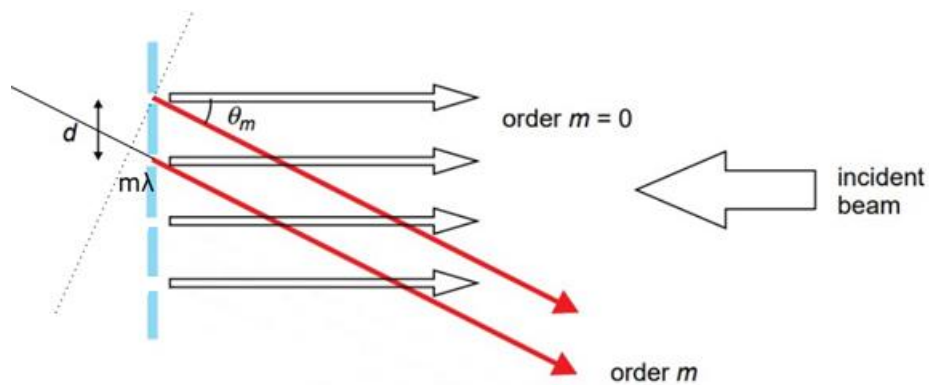
Wanneer een vlakke golf weerkaatst op een oppervlak met het regelmatig patroon, zoals het groevenpatroon van een tralie (grating), dan zal elke groef reflecteren in alle richtingen. De reflecties in een bepaalde richting afkomstig van meerdere groeven zullen voor een gegeven golflengte in fase zijn en elkaar versterken. In die richting ontstaat dan een maximum voor die golflengte. Waar ze interfereren en in tegenfase zijn ontstaat een minimum. De fase van twee reflecties zijn gelijk wanneer de weglengte van beide golven gelijk is of een geheel aantal golflengtes verschilt. Het resultaat is dat voor een gegeven golflengte λ en afstand d tussen de groeven er discrete uittreehoeken zijn waaronder dit maximum ontstaat (Palmer, 2005, p. 22).

Palmer (2005) geeft de relatie die de reeks van uittreehoeken beschrijft als de tralievergelijking:

$$[2.5] \quad m\lambda = d(\sin \theta + \sin \varphi)$$

daarin is $m=0,1,2,..$ en is de orde van het maximum, θ de hoek van inval van de vlakke golf en φ de hoek van uittreden van het maximum. Palmer geeft het resultaat weer van een uitgebreidere analyse zoals door Hecht (2017, pp. 496-500)

Een CD en een DVD hebben regelmatige patronen in de vorm van een spiraliserend spoor, de in het materiaal geperste tracks. Deze tracks hebben een onderlinge afstand d van $1,6 \mu\text{m}$ respectievelijk 740 nm . Gebruik makend van rood licht met een golflengte van 640 nm , een invalshoek loodrecht op het oppervlak van een CD levert dit als uittreehoeken $\varphi = \sin^{-1}(\frac{m\lambda}{d})$. Voor $m=1$, het eerste orde maximum, is de uittreehoek $\varphi 23,6^\circ$. Voor $m=2$ is deze hoek $53,1^\circ$ maar voor $m=3$ is er geen hoek meer en zal er geen 3^e orde maximum zijn. Alleen door de hoek van inval te vergroten kan een 3^e orde of hoger maximum ontstaan. Het is eenvoudig te zien dat er geen maxima van ordes 2 of hoger te verwachten zijn wanneer in bovenstaand voorbeeld een golflengte van 800 nm of langer gebruikt wordt.



Figuur 5; diffractie door spiegeling op een grating (Tilley, 2011, p. 226)

2.2 Absolute en relatieve metingen met diffractie en brekingsindex

Het meten van absolute hoeken en verplaatsingen vergt nauwkeurig ontworpen en rigide opstellingen. PMMA van 6 mm dikte is daarvoor minder geschikt vanwege de lage stijfheid in vergelijking met laboratoriumopstellingen met optische tafels. Het is echter wel mogelijk om veranderingen tussen twee opeenvolgende metingen te benutten, relatieve metingen. Het is dan van belang om de beide metingen zo uit te voeren dat er zo min mogelijk veranderingen optreden in de omstandigheden. Een CCD-kleurencamera is een relatief goedkoop maar nauwkeurig instrument om optische verschijnselen vast te leggen.

De optische chip van een van de toegepaste camera's heeft 752 pixels in horizontale richting. De pixels liggen $6,0 \mu\text{m}$ uit elkaar. De intensiteit wordt met 8 bits vastgelegd waardoor 256 niveaus beschikbaar zijn. Doordat de helderheid van een beeld altijd instelbaar is door langer of korter te belichten kunnen in een meting de relatieve verschillen met 8 bits vastgelegd. Afhankelijk van de afbeeldingsmaatstaf is dit dus met een spatieel onderscheid van micrometers.

Wanneer een meting van het effect van verandering van de brekingsindex betreft, dan is dit als een verplaatsing van de locatie van een lichtspot (monochroom) of het diffractiepatroon te zien in een camerabeeld. Om een nauwkeurige relatieve meting te kunnen doen is een referentiepunt vereist dat in de opeenvolgende metingen constant blijft. Door een nauwkeurig optisch filter toe te passen kan een markeerpunt in het diffractiepatroon gevonden worden. Door een zorgvuldig gekozen selectie in het camerabeeld te kiezen die direct gerelateerd is aan de pixelpositie op de optische chip, is een verschuiving van een lichtspot met een resolutie van enkele pixels vast te leggen. Uiteraard spelen optische en elektronische ruis een versturende rol, naast de invloed van omgevingslicht. Door het toepassen van een aangepast LabView programma dat de ruwe pixelinformatie uit een camera haalt, valt eenvoudig vast te stellen dat de gemeten lading per pixel in de orde van 4 eenheden hoger of lager fluctueert tussen de frames. Daarmee is een signaal-ruisniveau van 30 dBV in het camerabeeld van deze pinhole versie aanwezig. Die is derhalve de beperkende factor voor de gevoeligheid van een meting die daarop gebaseerd is. Het aanpassen van het meetbereik doordat de lichtgevoeligheid instelbaar is maakt het dynamische bereik wel veel groter dan deze 30 dBV.

3 Onderzoeksaanpak

In dit hoofdstuk is beschreven welke hulpmiddelen gebruikt zijn, de testopstellingen die gebouwd zijn en de procedures bij gebruik van de onderdelen voor de PlexiLoC uitbreiding. Bij de eerste twee opstellingen is de focus gelegd op het zichtbaar maken van voldoende effect. Er is beperkt gekwantificeerd en geen bepaling gedaan van de gevoeligheid van de meetmethodiek.

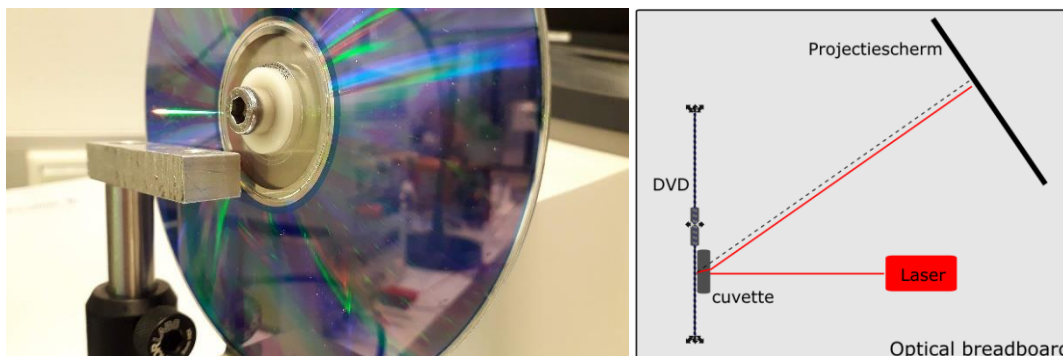
Na vaststellen van haalbaarheid van een meetbaar effect is de derde opstelling gefabriceerd als uitbreiding op de PlexiLoC. Doel daarvan is om na te gaan of daarmee meetbare resultaten mogelijk zijn met de verkorte optische weglengtes. In opstelling 3 is het resultaat ook kwantitatief uitgewerkt. Een vierde opstelling dient als verkenning of het principe van een kwadrantcel geschikt is als detectiemethode.

3.1 Opstelling 1

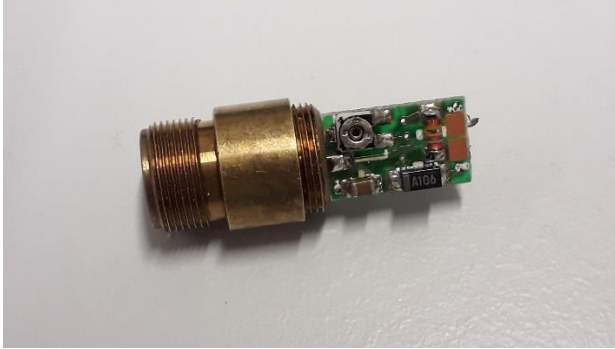
De eerste opstelling met een rode laser (gecollimeerde bundel) en een papieren projectiescherm bestaat uit de volgende onderdelen:

- Optical breadboard (Thorlabs, honeycomp breadboard 60mm)
- ½" optical posts, clamps & holders (Thorlabs, stainless steel post, post holder).
- Rode laser met collimatielens, merkloos (vergelijkbaar met Roithner Laser Technik RLDC series dot Laser Modules), 640nm, 5 mW.
- Diafragma, 1", merk/type onbekend
- Power supply (Agilent E3630A, set at 5,05 Vdc, max 0,50A)
- DVD, pre-recorded 4,8 GB, gemonteerd met M4 en vulringen op een aluminium steun, verticaal gemonteerd. Afspeelzijde naar lichtbron gericht.
- Macro Cuvette (Greiner Bio-One, item 614101, binnen-afmeting 10x10x43 mm, wanddikte 1 mm, 4ml, polystyrene).
- Afstand Led (lens) tot DVD-oppervlak circa 100 mm. Oriëntatie normaal ten opzichte van de lichtbron.
- Afstand DVD – aluminium plaat met papier beplakt (projectiescherm) circa 160 mm.

De laserbron schijnt op de DVD, normaal georiënteerd waarbij de reflectie van de geprojecteerde spot terugkaatst nèt onder de collimatielens van de laser. Dat is met opzet zo ingesteld zodat de gereflecteerde laserspot niet direct op de collimatielens van de laser valt. Wanneer de laserspot wél in de laser terecht zou komen, dan zou de laser-resonantieholte instabiliteit gaan vertonen door deze extra terugkoppeling met dezelfde golflengte. Raakpunt van de laser is op de horizontale middellijn van de DVD. In dit geval projecteren de eerste maxima in het horizontale vlak uit ten gevolge van de grating (tralie). Dat komt omdat de DVD-tracks daar precies verticaal lopen.

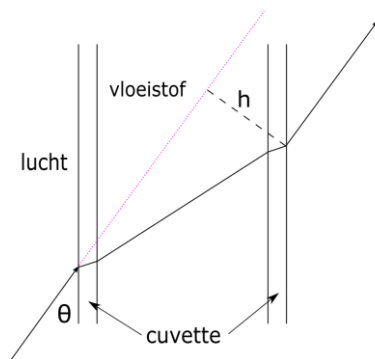


Figuur 6; (li) detail van montage van de DVD en de steun voor de cuvette. Aan de linkerkant is een deel van het diffractiepatroon te zien. (Re) bovenaanzicht van de gebruikte opstelling. De cuvette bevat vloeistof met een bekende brekingsindex.



Figuur 7; rode laser in messing behuizing, 640nm, 50mW. Versie zonder instelbare collimatielens.

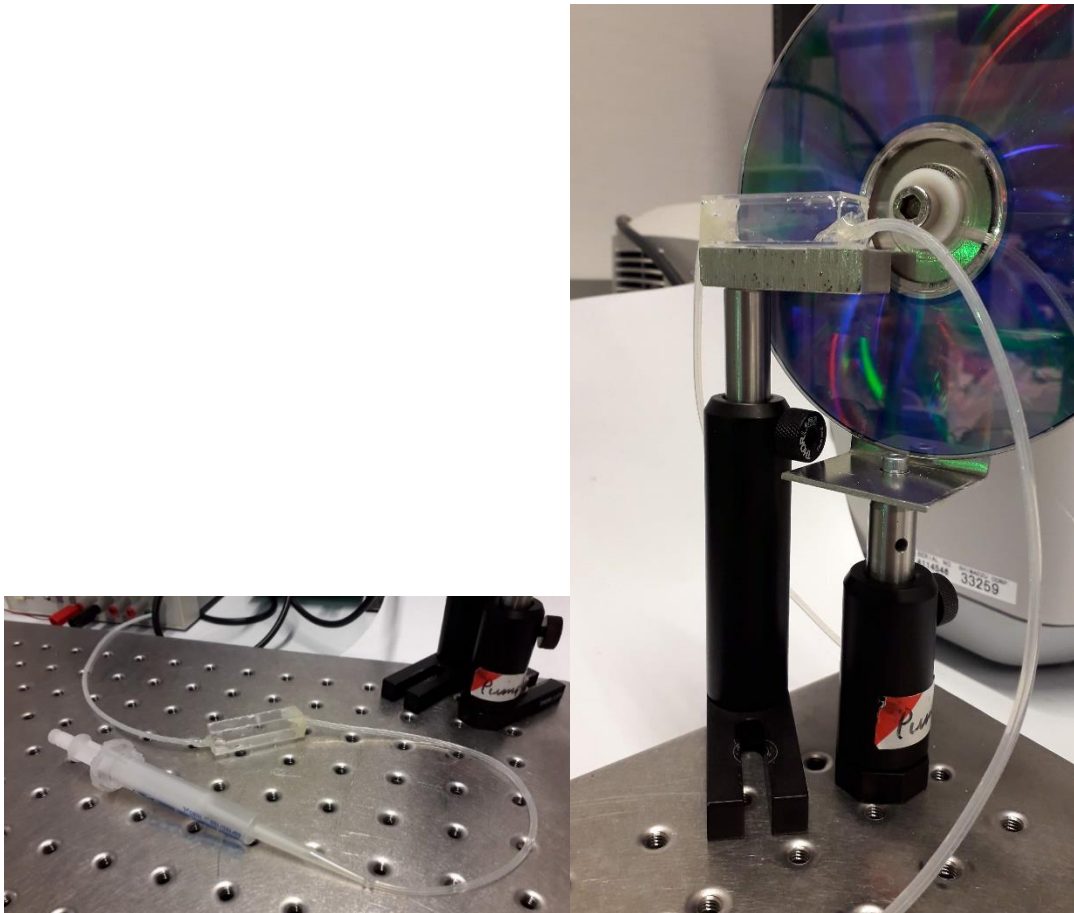
Het eerste maximum ten gevolge van de diffractie projecteert op het papier van het projectiescherm. Het raakpunt van de laserspot is aangetekend. De eerste meting is gedaan zonder objecten in het lichtpad. De tweede en derde meting is uitgevoerd door een polystyreen cuvette, geschikt voor het meten van optische spectra (300 – 900 nm), plat tegen de DVD aan te leggen waarbij de laserbundel en het eerste maximum vrij kunnen invallen en uittreden. Gebruik van de cuvettes is om praktische redenen, deze zijn bedoeld voor gebruik in een fotospectrometer en waren in ruime mate voorhanden. De cuvettes zijn gevuld met gedemineraliseerd water (RI 1,333; (Lide, 2003-2004, p. 8.57)) en met hotglue afgesloten op zodanige wijze dat er hooguit een kleine luchtbel (<2,mm) in het cuvette overblijft. Tevens is er zorg voor gedragen dat de cuvette niet lekt. De tweede cuvette is gevuld met een NaCl oplossing van 0,500 gr / 4ml in demi-water en ook deze is afgesloten met hotglue. Als alternatief voor het afsluiten van de cuvette is ook parafoel of een cuvettedop geschikt.



Figuur 8; Planparallele verschuiving h door cuvette en vloeistof. De lichtbundel komt links-onder binnen en buigt achtereenvolgens in de cuvette wand, de vloeistof en de cuvette wand. Vrij naar Tatum (2020)

De RI van het cuvette materiaal (polystyreen) ligt tussen 1,467 en 1,6818 (Galiatsatos, 2007) en de 11%(m) zoutoplossing heeft een theoretische RI van 1,35 (Lide, 2003-2004, p. 8.77). De RI van lucht wordt bij definitie op 1,0 gesteld. Bij de meting is opnieuw de plaats van de laserspot op het projectiescherm aangetekend.

Vanwege het idee om meerdere metingen te gaan doen waarbij zo min mogelijk veranderd aan een opstelling is een oplossing gevonden om de vloeistof in de cuvette te vervangen via slangen en een injectiespuit. De injectiespuit wordt gevuld met de nieuwe oplossing en het cuvette wordt zo doorgespoeld. De cuvettes liggen horizontaal op een steun nagenoeg tegen de DVD aan. Dubbelzijdig tape dient voor vastleggen ervan en levert beter vergelijkbare meetresultaten. De cuvette is voorzien van een dunne siliconenslang van 1,5 mm aan beide uiteinden en vervolgens met hotglue waterdicht afgesloten. De positie van de slangen is zodanig dat bij het vullen er minimaal luchtballen in de cuvette achterblijven. Met behulp van een injectiespuit van 10 mL met een spitse tuit is het mogelijk de vloeistof door de cuvette te spoelen zodat tijdens een meting de vloeistof te vervangen is.



Figuur 9; (li) cuvette afgesloten met hotglue en voorzien van slangen. Het geheel ligt op een optical breadbord dat voor opstellingen 1 en 2 gebruikt is.

Figuur 10; (re) Steun voor de DVD grating met daarop de met hotglue gesloten cuvette met slangen om de vloeistof te kunnen wisselen.

3.2 Opstelling 2

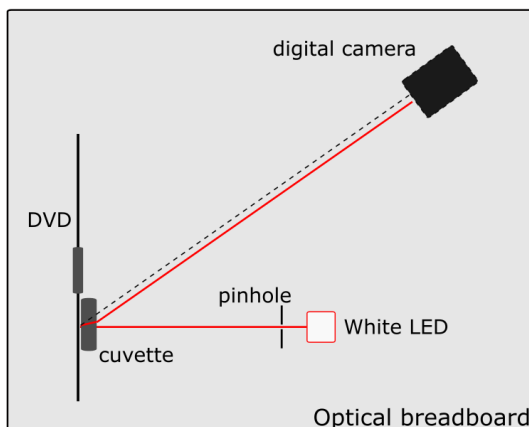
De tweede opstelling is een aanpassing van opstelling 1 waarbij de rode diode laser is vervangen door een witte LED, een diafragma als "pinhole" is gebruikt en een CCD-camera. Een met te onderzoeken vloeistof gevulde cuvette is zodanig geplaatst in het lichtpad van de bron, dat de reflectie en het eerste maximum vanaf de DVD-grating ongehinderd kunnen uittreden. Bij deze opstelling is achtereenvolgens getest met dezelfde twee cuvettes met inhoud en RI als in opstelling 1. Tevens is de cuvette met de slangen gebruikt uit opstelling 1. Om het diffractiepatroon en een verschuiving eenduidig vast te kunnen leggen is een camera gemonteerd op de plek van het projectiescherm.

De opstelling bestaat uit de volgende onderdelen:

- Optical breadboard (Thorlabs, honeycomp breadboard 60mm)
- ½ " optical posts, clamps & holders (Thorlabs, stainless steel post, post holder).
- Witte led met lens (Luxeon 2710 LXHL-LW3C), gemonteerd op een Aluminium koellichaam, voorzien van serieweerstand 5 Ω, 20 W.
- Diafragma, 1", merk/type onbekend
- Labvoeding (Agilent E3630A, set at 4,0 Vdc, max 0,50A)
- DVD, prerecorded 4,8 GB, gemonteerd met M4 en vulringen op een aluminium steun, verticaal gemonteerd. Afspeelzijde naar lichtbron gericht.

- Monochrome CCD camera (Bassler, uEye, type UI-1225LE), voorzien van macrolens. Scherp te stellen tussen 0,15 m en 1 m.
- Macro Cuvette (Greiner Bio-One, item 614101, binnenafmeting 10x10x44mm, wanddikte 1,0mm, 4ml, polystyrene).
- Slangen, siliconen 1,5 mm 0,48mm binnendiameter
- Injectiespuit met spitse tuit, passend op de slang, merk/type onbekend
- Afstand Led (lens) tot DVD-oppervlak 101,5mm. Oriëntatie loodrecht op lichtbron.
- Afstand DVD – aluminium plaat met papier beplakt circa 75 mm breed.
- LabView 2015, SP1 voorzien van “Ueye 1225 old camera.vi” programma (eigen ontwikkeling OS, Universiteit Twente, auteur J.Kortेरik).

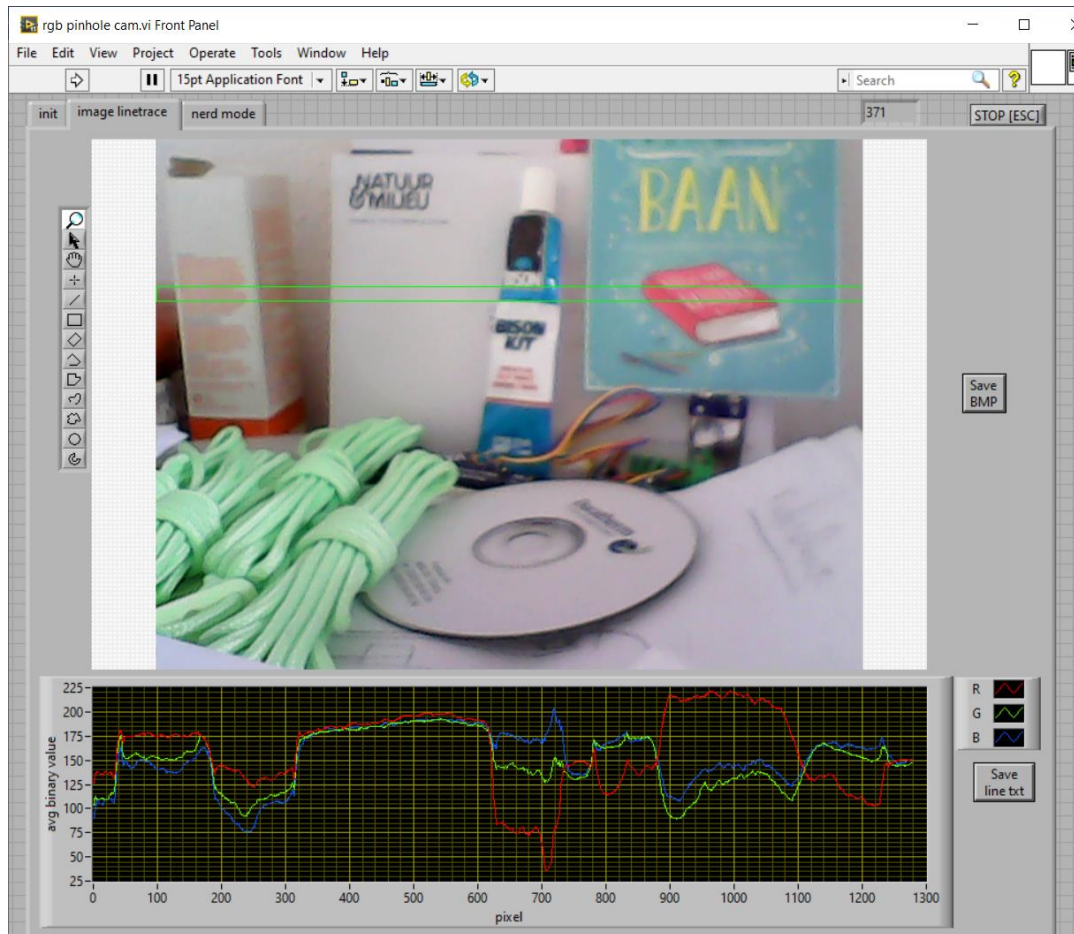
De lichtbron is een witte LED voorzien van een heldere lens, die middels een diafragma gedeeltelijk gecollimeerd is (lichtbundels parallel). Het diafragma en de voedingsspanning op de witte LED bepalen de lichtintensiteit van het diffractiepatroon in het camerabeeld. Dit is nodig omdat de CCD van de camera op bepaalde plaatsen overbelicht wordt. De reductie zorgt dat de pixels niet verzadigen tot de maximale waarde die de AD-converter aankan. Verder is het wenselijk het omgevingslicht te verlagen wegens de storende werking door andere bronnen, met name reflecties op glanzende oppervlakken. In deze opstelling is de reflectie van de lichtbundel zodanig ingesteld dat deze onder een hoek van circa 5° van de normaal terugkaatst. Hierdoor is het lichtpad in de opstelling instelbaar zonder dat elementen elkaar fysiek in de weg zitten. Er is geen optische noodzaak voor deze verdraaiing. De camera wordt gebruikt om het diffractiepatroon vast te leggen. Bij de gebruikte camera was scherpstellen noodzakelijk. Door eerst de scherpstelling te doen zonder de lichtbron in te schakelen en de focus in te stellen op de lens van de LED, maakt scherpstellen eenvoudiger. Met ingeschakelde lichtbron is het lastig te bepalen waarop scherp gesteld is.



Figuur 11; Bovenaanzicht van opstelling 2. De cuvette is voorzien van slangen en kan voorzien worden van een nieuwe vloeistof met andere eigenschappen.

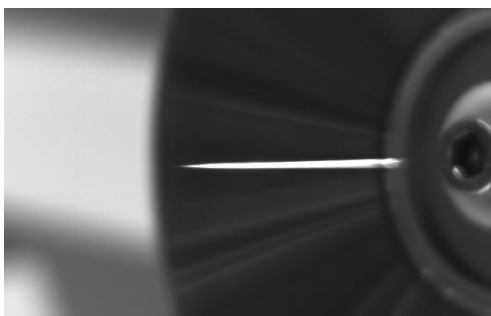
Met het bestaande, door Kortेरik ontwikkelde, LabView programma (2021) is het mogelijk live camerabeelden te zien en zo de afstelling van de optische elementen te bepalen. Wanneer de camera scherp ingesteld is op de lens van de LED lichtbron, dan is ook het diffractiepatroon scherp afgebeeld. Na stilzetten van het live beeld kan een vorm (rechthoek) geselecteerd worden rond het diffractiepatroon. Het programma selecteert vervolgens alleen de pixels die binnen de geselecteerde vorm vallen. Meetwaarden van de intensiteit van boven elkaar liggende pixels worden gemiddeld waardoor als het ware één beeldlijn berekend wordt. Zowel het beeldframe als het gemiddelde beeldlijn kan opgeslagen worden in een bestand voor verdere analyse. Het programma gaat uit van de ruwe data die de camera levert waardoor in elk frame de waarde van elke individuele CCD-pixel te herleiden is.

Door het gebruik van LabView is het mogelijk het nu gebruikte programma naar wens aan te passen. Zo zou er ook gemeten kunnen worden over meerdere beeldframes, zodat aanwezige stoorsignalen zoals optische ruis gereduceerd kan worden. Ook zou een wiskundig algoritme toegevoegd kunnen worden om de detectie meer gevoelig te maken. Het aanpassen van dit LabView programma valt niet binnen de verwachte competenties van VO-leerlingen.



Figuur 12; Gedeelte van het programma voor de gemiddelde intensiteit van pixels op één of meer horizontale beeldlijnen. In het onderste deel is het licht intensiteitsdiagram te zien. Elke pixel op de x-as stelt het gemiddelde voor van de meetwaarden in een kolom. Het pixelnummer is tellend vanaf de linkzijde van het groene selectievak en is de pixelpositie. De verticale waarde is de ruwe 8-bits waarde die de AD converter voor deze pixels heeft gemeten.

Het programma kent meer mogelijkheden, zoals het bevroren van het beeld zodat er met één frame gewerkt kan worden. Tevens zijn allerlei aanpassingen mogelijk aan de instellingen van de camera. Het gebruik van een monochrome camera is minder gunstig gebleken: het is lastiger om het diffractiepatroon te onderscheiden van reflecties met een langwerpige vorm.



Figuur 13; monochrome beeld van een diffractiepatroon, vastgelegd met opstelling 2.

Zoals te zien is in de figuur 13 loopt het diffractiepatroon horizontaal in het beeld. Hiervoor is het nodig om de lichtspot van de LED op de horizontale middellijn van de DVD te laten vallen. Daar lopen de DVD-tracks precies verticaal en zal het diffractiepatroon in het horizontale vlak uitwaaien. Ook de camera dient daarvoor op dezelfde hoogte ingesteld te zijn. Zodra dit beeld bevroren is kan een rechthoek rondom het diffractiepatroon geselecteerd worden. De software bepaald vervolgens de gemiddelde intensiteit per verticale pixelgroep. Hierdoor ontstaat een gemiddelde beeldlijn intensiteit. Het onderste deel van het beeld geeft het resultaat weer van de berekeningen. De horizontale as is het aantal pixels, tellend vanaf links. Verticaal is de intensiteit een getalswaarde direct uit de 10-bit ADC, of het gemiddelde van de getalswaarden van verticaal georiënteerde pixels.

Wanneer de RI van een vloeistof in een cuvette veranderd, dan zal dit diffractiepatroon in horizontale richting verplaatsen. Zoals in het bovenstaande beeld zichtbaar is het patroon voor een witte LED breed. Door de camera dichterbij te plaatsen zal het patroon geheel op het beeld opgenomen kunnen worden. Bij de toegepaste camera (UI-1225LE) lukt dit niet wegens de minimale afstand van 0,15 m waarop scherp gesteld kon worden. Voor het zichtbaar maken van het verschuiven kan het voldoende als de linkerzijde (of rechter-) in beeld is en de kleine verschuiving geregistreerd kan worden. Voor een meting is de procedure als volgt:

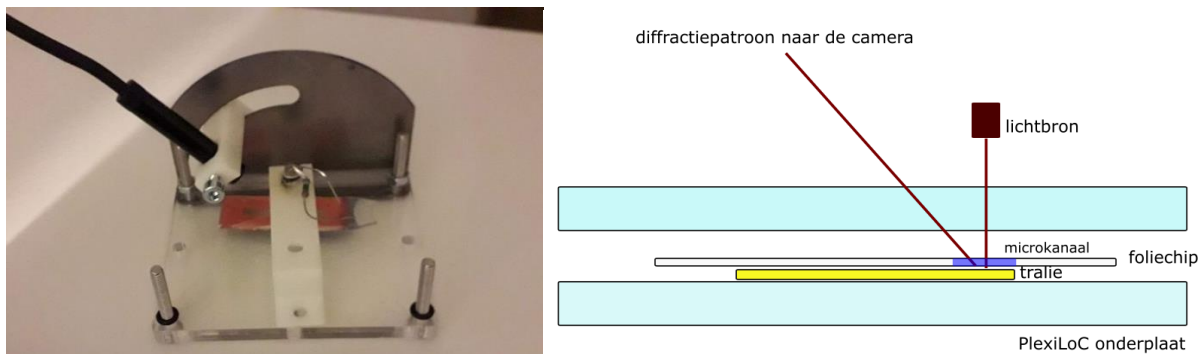
- Stel een scherp beeld in van het diffractiepatroon met een cuvette met demi-water in het lichtpad.
- Bevestig één frame van de camera en selecteer daar het diffractiepatroon binnen een rechthoek. Neem tenminste één van de uiteinden mee.
- Leg het beeld en het intensiteitspatroon vast in een bestand.
- Vervang de cuvette of de vloeistof in de cuvette door de vloeistof van interesse, in deze proevenserie door een NaCl-oplossing.
- Leg opnieuw het beeld en het intensiteitspatroon vast in een bestand.

Een proef waarbij een lichtbron is voorzien van een 545 nm band- of notch-filter met een spectrale breedte van 75 nm dient om een scherpe band in het linetrace te creëren. Daaruit bleek dat het diffractiepatroon in deze opstelling circa 350 pixels op de CCD breed is.

3.3 Opstelling 3

Deze opstelling is een verkleinde versie van opstelling 2 en gekoppeld met de PlexiLoC experimenteerkit. De verschillen met de vorige opstellingen zijn:

- Een complete DVD of CD past niet in de PlexiLoC waardoor er een passend stuk gemaakt moet worden. Hiervoor is gebruik gemaakt van de methoden die in paragraaf 3.5 beschreven worden.
- In plaats van de eerder toegepaste cuvette is gebruik gemaakt van een folie-vloeistof chip. Deze ligt bovenop de spiegelende CD of DVD
- Beide onderdelen worden op de boven- en onderzijde van PlexiLoC gelegd
- De monochrome camera is vervangen door een kleine kleurencamera in pinhole formaat die gekenmerkt wordt door een grote beeldhoek en ook dichtbij (tot circa 3 cm) scherp beeld kan geven.
- Een stalen beugel, in eigen beheer ontworpen en geproduceerd, die met de PlexiLoC verbonden wordt en een kunststoffen camerahouder (eigen ontwerp en productie) die samen zorgen voor een stabiele, draaibare cameraopstelling. Met een klemschroef is na instellen de positie vastgezet. Het draaipunt is zodanig ontworpen dat de camera in elke stand naar hetzelfde punt gericht is.
- Monochrome gele LED 589 nm, Farnell 1497979, Optek OVLGY0C9B9 op 1,67V_{dc}, 750hm serieweerstand.



Figuur 14; PlexiLoC zonder bovenplaat met de uitbreiding voor een pinhole camera (zwart) die een hoekinstelling mogelijk maakt. In het midden is de steun voor de lichtbron te zien. Een stuk DVD met een 500 micron kanaal ligt op de meetpositie.

De DVD is bewerkt zodat een rechthoekig stuk ontstaat dat passend in de PlexiLoC gelegd kan. Daarbij is er op gelet dat de tracks haaks op de lengterichting staan. Door nu vanaf de normaal te belichten met een lichtbron, bijvoorbeeld een witte of monochrome LED, zal het diffractiepatroon zijwaarts uitwaaiëren. De beweegbare opstelling van de camera laat toe dat deze optimaal uitgelijnd wordt. De draaiingsas van de camera valt nagenoeg samen met de positie van de grating. Hierdoor is het beeld automatisch gericht op het belichte deel van de chip. Tevens zal daardoor het diffractiepatroon in beeld zijn, mits de juiste hoek ingesteld wordt.

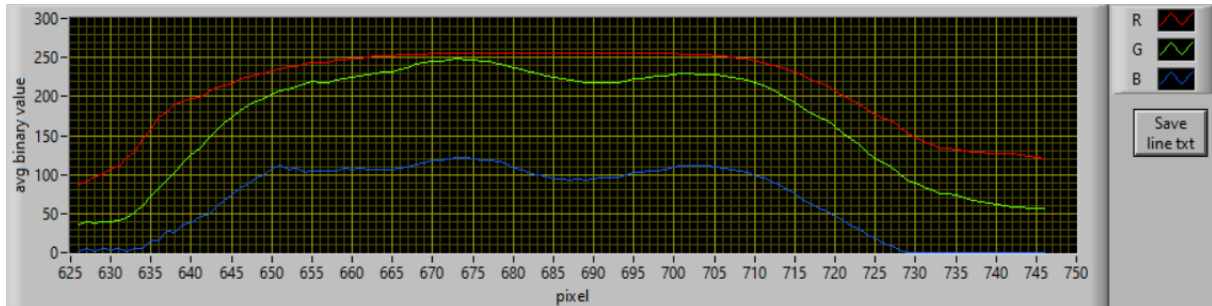
Het LabView meetprogramma dat hier gebruikt wordt is dezelfde als in opstelling 2, alhoewel door het wisselen van de camera een andere set van features ingesteld moet worden. Hiervoor is een aangepaste versie gebruikt (Korterk, 2021). Deze pinhole camera biedt geen mogelijkheid om de belichting en de kleurbalans handmatig in te stellen. Dit is nadelig voor het herhaalbaar maken van de metingen.

In de eerste meting is alleen uitgegaan van een DVD scherf waarop een laagje vloeistof is gelegd. Vervolgens is een meting uitgevoerd en vastgelegd. Er zijn vier keer gedemineraliseerd wateroplossingen gebruikt met achtereenvolgens 0 gr, 4 gr, 8gr en weer 0 gr suiker volledig opgelost (in 15 mL gedemineraliseerd water). De oplossing is met een pipet op de DVD scherf aangebracht zodanig dat een cirkelvormig oppervlak van meer dan 1 cm diameter ontstaan is. De laagdikte is geschat op 3 mm. Vervolgens is het beeld en de pixel / intensiteit vastgelegd. Tevens is het intensiteitsdiagram per verticale pixelkolom vastgelegd. Na elke meting is de oplossing met filterpapier verwijderd zonder de DVD scherf te verplaatsen. De RI van ieder van deze oplossingen is respectievelijk 1,333 voor 0% (m); 1,3753 (interpolatie) voor 26,5% (m); 1,4243 (interpolatie) voor 53,3% (m). Deze verschuiving van de RI is groter dan bij gebruik van NaCl oplossingen mogelijk is (Lide, 2003-2004) doordat de concentratie suiker veel hoger kan zijn.

Een tweede serie metingen is gedaan met een foliechip waarbij het kanaal direct op de DVD-scherf is verlijmd. De toplaag is vervangen door een stuk overheadfolie. Deze is helder transparant in tegenstelling tot de folie die normaal bij PlexiLoC ingezet wordt. De laatste is voorzien van een lijmlaag die diffuus is en pas na lamineren helder wordt. De lichtbron is een geelkleurige LED met een piekgolflengte van 589 nm, gevoed met een spanning van 1,67 V_{dc} en een serieweerstand van 75Ω. Hiervan zijn screenshots met het LabView programma (Korterk, RGB pinhole cam.vi, 2021) gemaakt en de gemeten waarden zijn in een exportbestand opgeslagen. De gebiedsselectie is zo goed mogelijk passend gekozen rondom de lichtvlek op het camerabeeld. Deze selectie is tussen metingen in deze serie niet veranderd en daardoor direct vergelijkbaar.

Omgevingslicht was van invloed op de mate van verzadiging van de CCD. Tijdens de metingen is het kunstlicht (LED TL-buizen) in de ruimte uitgeschakeld geweest. Er is echter geen gebruik gemaakt van een verduisterde labruimte. Zolang de omgevingsverlichting gedimd is en zo goed als constant, wordt er geen hinder verwacht in de meetresultaten door strooilicht. Deze aanname is gedaan omdat het meetprogramma alleen de pixels meet die door de gekozen rechthoek in het beeld geselecteerd zijn.

De aanwezigheid van gedempt omgevingslicht beperkt het contrast in een beeld waardoor de belichtingsregeling van de camera, die niet van buitenaf instelbaar was, het meetgebied onder het verzadigingsniveau houdt. Bij overbelichting van de meetplek op de CCD komt de intensiteitsinformatie van een pixelkolom altijd op de maximale waarde (255) terecht komt, zoals in figuur 15 te zien tussen pixelkolommen 665 en 705.



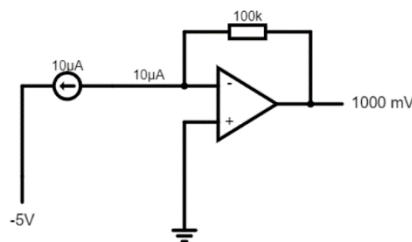
Figuur 15; De intensiteit van het rood is tussen 660 nm en 705 nm op of boven de maximale waarde van CCD en AD-converter gekomen. In dit geval is de detailinformatie voor rood verloren.

Dezelfde proef is met een IR-LED (piekgolflengte 850 nm) wel uitgevoerd maar niet verder uitgewerkt. Bij deze golflengte en een DVD grating is er geen 1^e orde maximum in een hoek kleiner dan 90 graden. Vooralsnog is geen meerwaarde in het gebruik van infrarood vastgesteld.

3.4 Opstelling 4

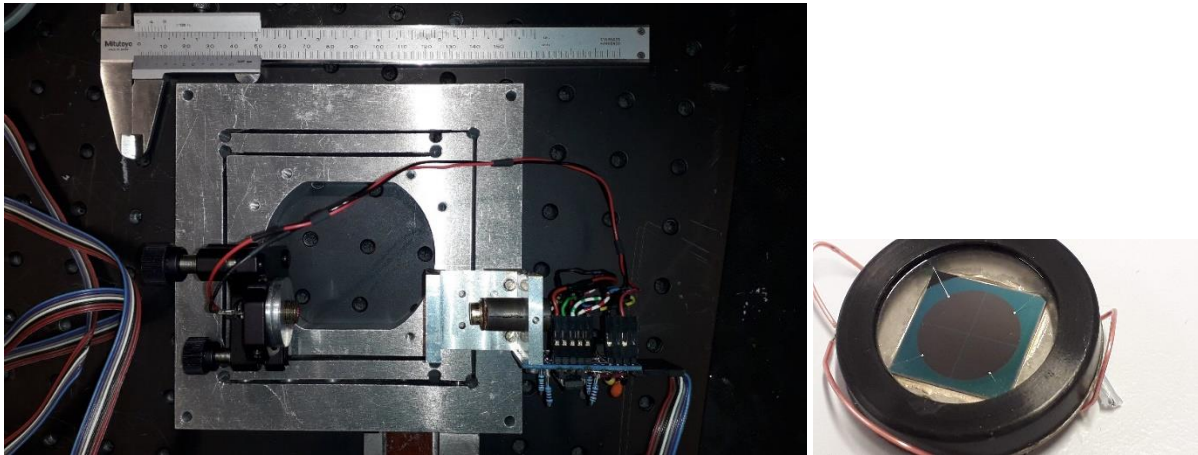
Er is een exploratie uitgevoerd op de bruikbaarheid van een kwadrantcel als sensor voor brekingsindex en ter vervanging van de CCD camera uit opstelling 3. Hiertoe is een meetopstelling opgebouwd bestaande uit:

- Kwadrantcel (bijvoorbeeld OptoDiode ODD-3W2, Hamamatsu S4349)
- Oscilloscoop 60 MHz
- Transconductantieverstker gebaseerd op opamps type LT1058CN met zeer laag ruisniveau en drift, geschakeld volgens onderstaande schema in figuur 16, eigendom en ontwerp Universiteit Twente.



Figuur 16; Principeschema transconductantieverstker als voorversterker, direct gekoppeld aan een van de sectoren van de kwadrantcel. De stroombron stelt hier de sector van de kwadrantcel voor.

- Rode laser, gemonteerd op 2-axis lineair translation XY-stage (Thorlabs)
- Optical breadboard (Thorlabs, honeycomp breadboard 60mm)
- ½ " optical posts, clamps & holders (Thorlabs, stainless steel post, post holder)
- Flexure translational stage, Thorlabs, single axis, eigen fabrikaat Universiteit Twente, 145x145mm



Figuur 17; (links) Bovenaanzicht van de meting met een kwadrant fotodiode op een flexure stage. Links de rode laser, rechts de kwadrant fotodiode. Onder is nog een deel van de piëzo transducer te zien die de laser in sub-micrometerstappen in y-richting (op de foto) kan verplaatsen. Bron: eigen foto.

Figuur 18; (rechts) Afbeelding van een kwadrantcel waaraan duidelijk de vier lichtgevoelige sectoren te zien zijn. Bij belichting ontstaat een diodestroom in elke sector die onafhankelijk is van de andere sectoren. Bron: eigen foto.

Met een optical breadboard als stabiel platform is een rode diodelaser symmetrisch op een kwadrantcel gericht. De mechanische opstelling is gedaan met behulp van een *flexure stage*, in dit geval een unidirectionele versie. Een flexure stage is een metalen blok met sleuven waarbij het centrale deel enigszins kan buigen in één richting ten opzichte van de buitenrand. De kwadrantcel is vastgezet op het vaste deel, de laserdiode met yz-afstelling op het beweeglijke deel. Zo kunnen ze in de y-richting richting ten opzichte van elkaar bewegen. De gebruikte flexure stage heeft een bereik van $\pm 1\text{mm}$. Met een micrometer of piezotransducer kunnen bewegingen in de orde van enkele tientallen nanometers ingesteld worden.

De kwadrantcel, een viervoudige fotodiode met een nauwkeurig in vieren gedeeld lichtgevoelig oppervlak. De vier vlakken, meestal A, B, C en D genoemd, zijn gescheiden door een nauwkeurig bepaalde onderbreking. Het centrale deel van het gehele diodeoppervlak wordt door de laser beschenen en door nauwkeurig optisch afregelen is de opgewekte diodestroom op ieder van de vier kwadranten zodanig regelbaar dat deze in hoge mate gelijk zijn. Overigens zijn er vele namen voor deze PIN-fotodiode in gebruik, zoals *quadrant photodiode* of *segmented photodiodes*.

De diodestroom wordt versterkt en omgezet naar een spanning via een viervoudige transconductatieversterker. Deze vier versterkte signalen worden gekoppeld met een versterkereenheid die enerzijds de verschillen tussen links en rechts, anderzijds boven en onder versterkt. Tijdens het optisch afregelen worden deze beide verschilsignalen zo klein mogelijk gemaakt door de laserspot nauwkeurig verticaal en horizontaal te verschuiven. Dit gebeurt in stappen met oplopende versterkingsfactor totdat het opto-mechanisch niet meer nauwkeuriger kan.

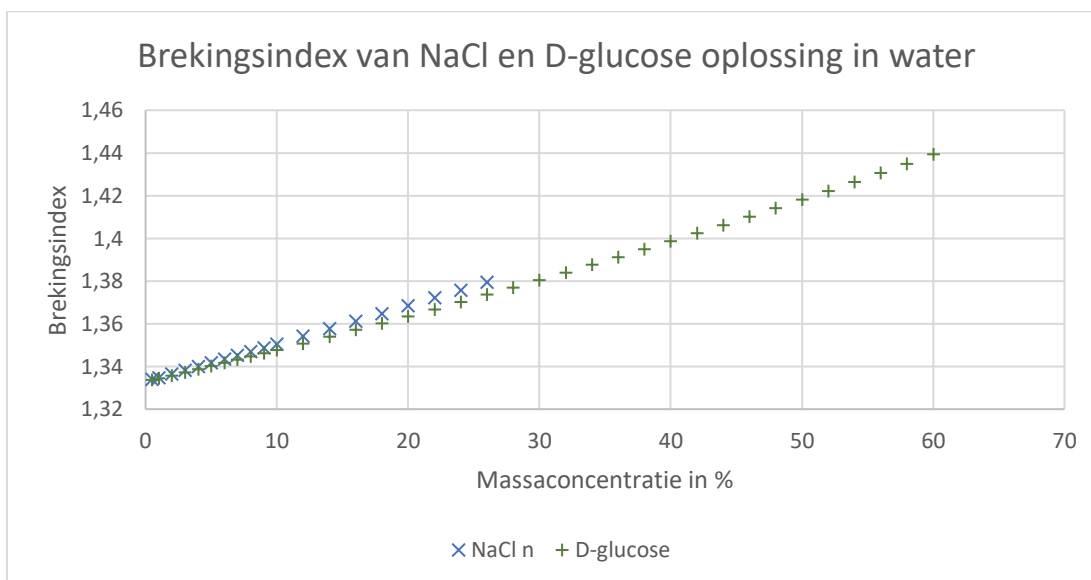
Vervolgens is door het exiteren van de piëzotransducer met een externe sinusspanning, de laserdiode enkele honderden nanometers verschoven in één richting. Het resulterende signaal uit de meetversterkers heeft een amplitude in de orde van 5 volt piek-piek. Dit is eenvoudig zichtbaar te maken op een oscilloscoop.

4 Resultaten

4.1 Resultaten deelonderzoek 1

De uittreehoek van het maximum van de DVD-tralie is bij benadering gemeten, ongeveer 60 graden en blijkt daardoor in overeenstemming te zijn met de theoretische waarde van 59,9 graden bij een golflengte van 640 nm. Er is geen tweede maximum te zien omdat deze voorbij de 90 graden zou komen en daardoor achter het reflectievlak van de DVD vallen. Opvallend is dat de vrijwel ronde spot die de laser projecteert na diffractie ovaal van vorm is. Een verklaring voor dit verschijnsel is niet gezocht.

Voor het meten van het effect van een verandering in de brekingsindex van een vloeistof in het lichtpad is gebruik gemaakt van gedemineraliseerd water en oplossingen van keukenzout en suiker. Beide stoffen zijn veilig in het gebruik en in elke school aanwezig. Suiker kan tot hoge concentraties opgelost worden, tot wel 60 massa % (Lide, 2003-2004, p. 8.64) in tegenstelling tot NaCl dat tot 26 massa % opgelost kan worden bij kamertemperatuur. Voordeel van suiker ten opzichte van zout is dat de brekingsindex (RI) daardoor verder verhoogd kan worden dan een verzadigde oplossing van keukenzout, 1,3975 tegen 1,4394. De brekingsindex varieert daarbij vrijwel lineair zoals te zien in figuur 19.



Figuur 19 - brekingsindex van oplossingen in water (Lide, 2003-2004, pp. 8-64; 8-77)

Achtereenvolgens zijn metingen uitgevoerd met verschillende oplossingen, zoals beschreven in paragraaf 3.1. De brekingsindices waren oplopend in waarde van 1,0 (definitie), 1,333 en 1,35. Het verschil tussen demi-water en zout water levert een verschuiving op van ongeveer 1 mm. In eerste instantie leverde dit de conclusie op dat de verschuiving van de laserspot waarneembaar is in deze opstelling. Bij het berekenen van de theoretische waarde van de verschuiving levert dit een resultaat op dat niet helemaal in overeenstemming is met de gemeten waarden. Deze verschuiving valt te bepalen door middel van de relatie [4-1].

$$[4-1] \quad h = t \sin(\theta) \left(1 - \frac{\cos \theta}{\sqrt{n^2 - \sin^2 \theta}} \right)$$

Waarbij t de dikte van 12 mm van het cuvette is en θ de hoek met de normaal van de invallende lichtbundel op het cuvette. De hoek van inval θ is bij een DVD 59,9° wat oplevert dat de verschuiving

5,2476 mm (RI = 1,333) en 5,3578 mm (RI = 1,350) is, een verschil van 0,11 mm. De brekingsindex van het kunststof van de cuvette is gemakshalve gelijkgesteld aan die van de vloeistof omdat deze in beide metingen dezelfde invloed heeft. De berekende waarde wijkt daarmee een factor tien af van de gemeten waarde. De verschuiving tussen de metingen zonder of met cuvette in het lichtpad is ruim 5 mm wat in overeenstemming is met het gemeten verschil.

Gebruik van een glucoseoplossing kan een grotere verandering van de RI geven zodat de verschuiving h eenvoudiger meetbaar zou kunnen zijn. De RI verschuift vanaf een 0% massaconcentratie met een RI van 1,3333 naar 1,4394 bij een concentratie van 60% (m). De berekende verplaatsing h varieert daardoor van 5,2476 naar 5,8559 mm, waarmee een verschil van 0,61 mm te realiseren valt. Deze verplaatsing is met een camera goed vast te leggen. De in opstelling 2 benutte CCD camera heeft een pixelpitch van 6,0 μm waardoor, bij een 1:100 afbeelding op de CCD-chip, de verschuiving tot 10 pixels kan bedragen.

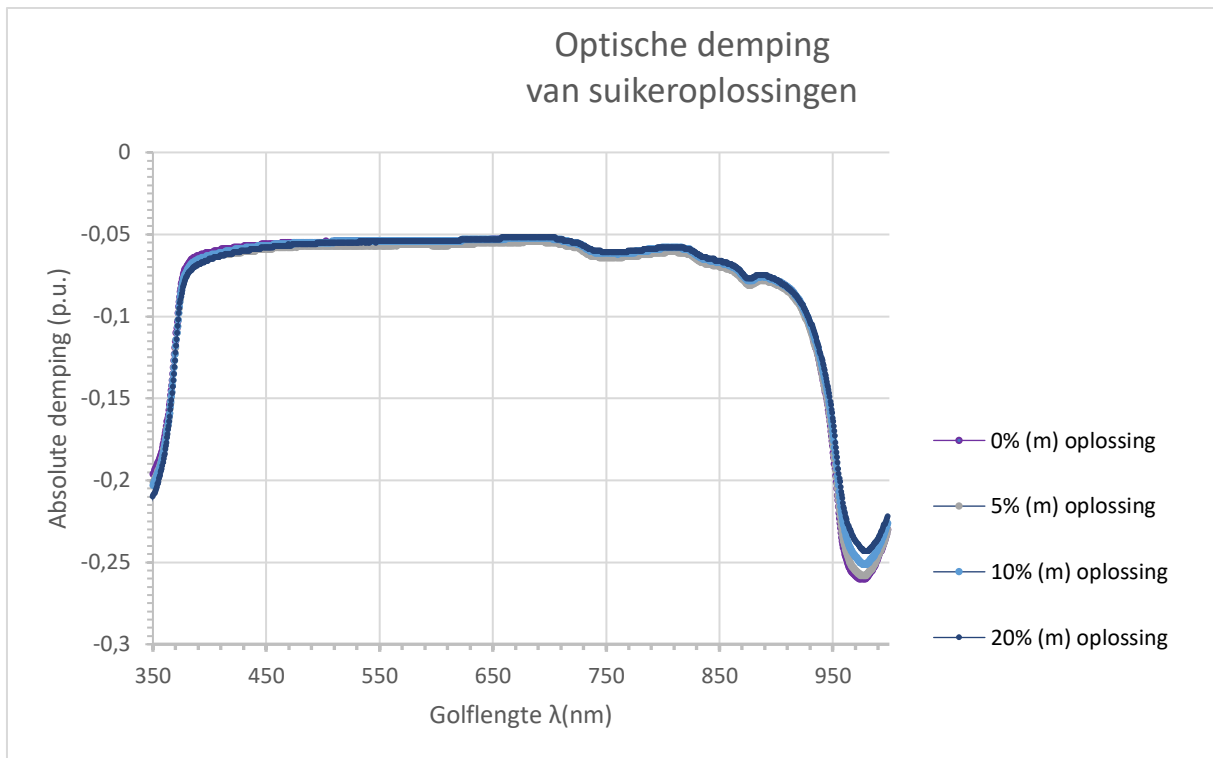
4.2 Resultaten deelonderzoek 2

De te beantwoorden vraag is of een verandering van de RI in het lichtpad leidt tot zichtbaar en meetbaar verschuiven van het diffractiepatroon op een camerabeeld. De tweede vraag is of door het vervangen van de vloeistof in het cuvette de demping als functie van de golflengte in het diffractiepatroon te bepalen valt.

In tegenstelling tot de rode laser heeft de witte LED een breed spectrum in het zichtbare licht. Op het oog is het een doorlopend spectrum dat op het papier valt, vanaf rood tot en met violet. Wanneer de camera op een afstand van 15 cm staat, de minimum afstand waarop het gebruikte exemplaar scherp kan stellen, dan is het diffractiepatroon op het camerabeeld zo breed dat deze deels buiten de CCD opnamechip valt. Door de camera dichterbij te plaatsen is de afbeelding van het diffractiepatroon wel binnen een horizontale beeldlijn te krijgen. De brandpuntafstand van de gebruikte camera en lens lieten dit niet toe. Camera en lens konden niet dichterbij de DVD met de cuvette gepositioneerd omdat de onderdelen elkaar mechanisch in de weg zitten. Om deze reden is ervoor gekozen het diffractiepatroon bij de proeven gedeeltelijk buiten het camerabeeld te laten vallen. Door een van de beide diffractieranden in beeld te brengen is een harde referentie gecreëerd. Zo is er toch te meten aan een verplaatsing van het diffractiepatroon.

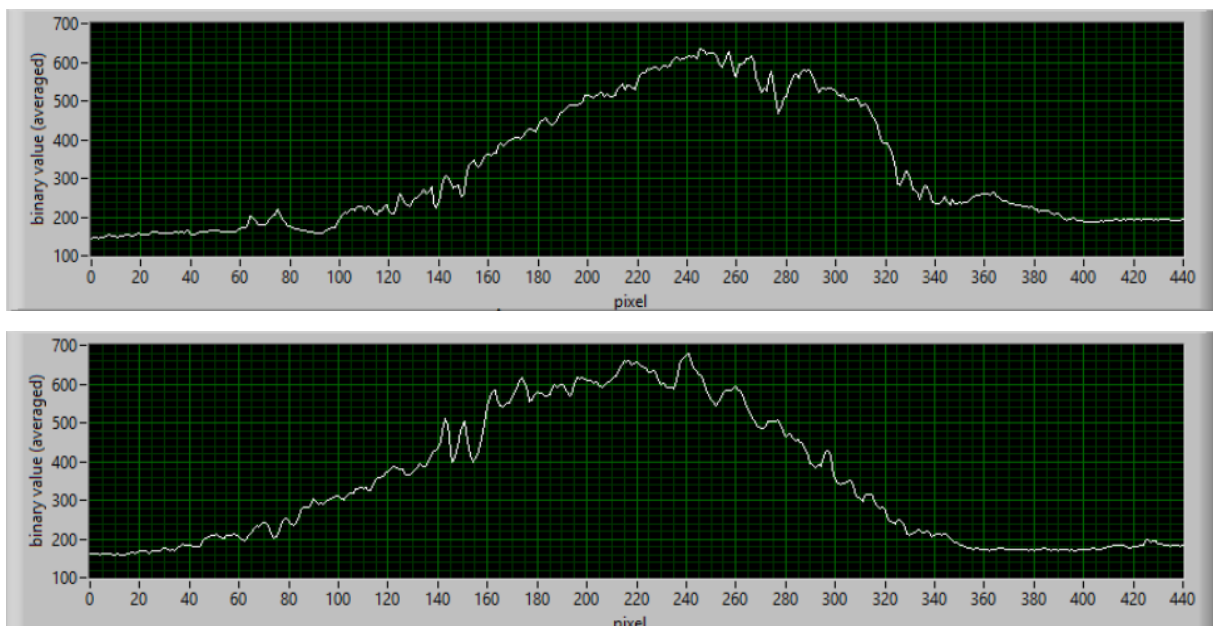
De verplaatsing h van het patroon is, bij de gebruikte vloeistof en materialen, de afhankelijkheid van de RI voor de golflengte factoren kleiner dan voor verandering van de RI ten gevolge van de opgeloste stof. Vergelijking [4-1] is daarom ook hier van toepasbaar.

Naast de verandering van de RI zal de oplossing mogelijk enige toename van demping laten zien. Om dit na te gaan is een spectrummeting gedaan van vier concentraties suikeroplossingen. In figuur 20 zijn de resultaten van deze vier metingen te zien. Hieruit blijkt de demping door het oplossen van suiker tussen 350 en 950 nm binnen 0,8% p.u. (370 nm) en 0,2% p.u. (855 nm) te blijven. Alleen in het infrarood is bij 970 nm is een groter verschil te constateren.



Figuur 20; Absolute demping van D-glucose oplossingen als functie van de golflengte in nm.

Met het LabView programma (Kortrijk, 2021) zijn twee metingen onder vrijwel dezelfde lichtomstandigheden gedaan en vastgelegd. De eerste van gedemineraliseerd water, de tweede van een oplossing met 8 gr suiker in 15 mL water. De gebruikte lichtbron is een witte LED, voorzien Van een 545 nm notch filter van 75 nm breed. De horizontale as geeft het pixelnummer weer van het geselecteerde gebied.



Figuur 21; (boven) Intensiteit van een 0gr/15mL suikeroplossing in het diffractiepatroon gemeten over 441 pixels horizontaal. Lichtbron is een witte LED voorzien van een 545 nm notch filter van 75 nm breed. De rechterzijde is de hellingshoek van het notch filter.

Figuur 22; (onder) Intensiteit van een 8gr/15mL (53%) suikeroplossing in het diffractiepatroon gemeten over 441 pixels horizontaal. Dezelfde lichtbron is gebruikt als in figuur 15. De rechterzijde betreft de hellinghoek van het notch filter.

Zonder de data met mathematische hulpmiddelen te analyseren is af te lezen dat de piek bij figuur 21 meer naar links is geschoven dan in figuur 22. Dit wijst op de verplaatsing van het diffractiepatroon naar links. Vooral de rechterrands is van nut vanwege dat die door het 540 nm notchfilter een vaste referentie levert.

De verticale as, binary value, is een gemiddelde over alle pixels in het omliggende vak in verticale richting. De meting fluctueert door variatie in de lading die in elke pixel is gemeten – een soort optische ruis. Het trekken van conclusies uit bovenstaande metingen geeft een vrij grote onzekerheid ten aanzien van de exacte locatie van de lichtvlek. Horizontaal zijn de pixellocaties in beide metingen precies dezelfde locatie op de CCD. Dit levert een absolute resolutie van $6,0\ \mu\text{m}$ van de afbeelding van het diffractiepatroon op de CCD-chip.

4.3 Resultaten deelonderzoek 3

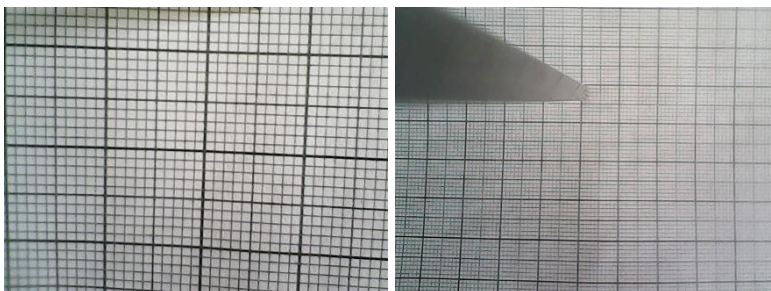
De te beantwoorden vraag is of de verandering van de RI in het kanaal van een fluidische foliechip voldoende verschuiving van het diffractiepatroon geeft zodat deze nog gemeten kan worden met de camera. Verder is de vraag of deze meetmethode kwantitatieve metingen toelaat.

De verschuiving van het diffractiepatroon is in principe te meten wanneer de vloeistoflaag maar hoog genoeg is. In het theoretisch kader is getoond hoe de dikte t van de vloeistoflaag evenredig is met de verplaatsing h van een lichtstraal. Bij de eerste meting is eerst een monochrome LED normaal ten opzichte van een stuk (scherf) van een DVD geplaatst, op een afstand van 12 mm vanaf de voorzijde van de lens. Normaal is bij een PlexiLoC meting met een foliechip een 6 mm PMMA afdekplaat aanwezig. Deze geeft reflecties op zowel het boven- als het ondervlak wat leidt tot extra lichtspots op het camerabeeld. Om te voorkomen dat een reflectie gemeten wordt, is de afdekplaat bij de metingen weggelaten.

De camera, hier een pinhole camera, is in de juiste hoek geplaatst zodat het eerste maximum in beeld is. De afstand tussen cameralens en foliechip is 37 mm. Vervolgens is een aantal druppels testvloeistof op de DVD scherf aangebracht en het beeld met het hulpprogramma vastgelegd. De intensiteitsmeting is eveneens ingesteld en niet meer veranderd tussen metingen.

De vraag is nu hoeveel spatiële resolutie het camerabeeld levert ten opzichte van de lichtspot van het gekozen maximum. De breedte van het digitale beeld op 100mm lens-object afstand is 101 mm. Op 37 mm is dit 38 mm. De vervorming van het opgenomen beeld is duidelijk zichtbaar aan de krom lopende lijnen, te zien in de figuur 23.

Foto beeld op 37 mm



Figuur 23; Beeldveld van de pinhole camera op millimeterpapier. Links op een afstand van 37 mm is een getoond horizontaal beeldveld van 38 mm weergegeven, rechts op een afstand van 100 mm is een getoond horizontaal beeldveld van 101 mm weergegeven. Dat leidt tot de constatering dat bij een objectafstand van 37 mm de spatiële resolutie $30\ \mu\text{m}/\text{mm}$ bedraagt.

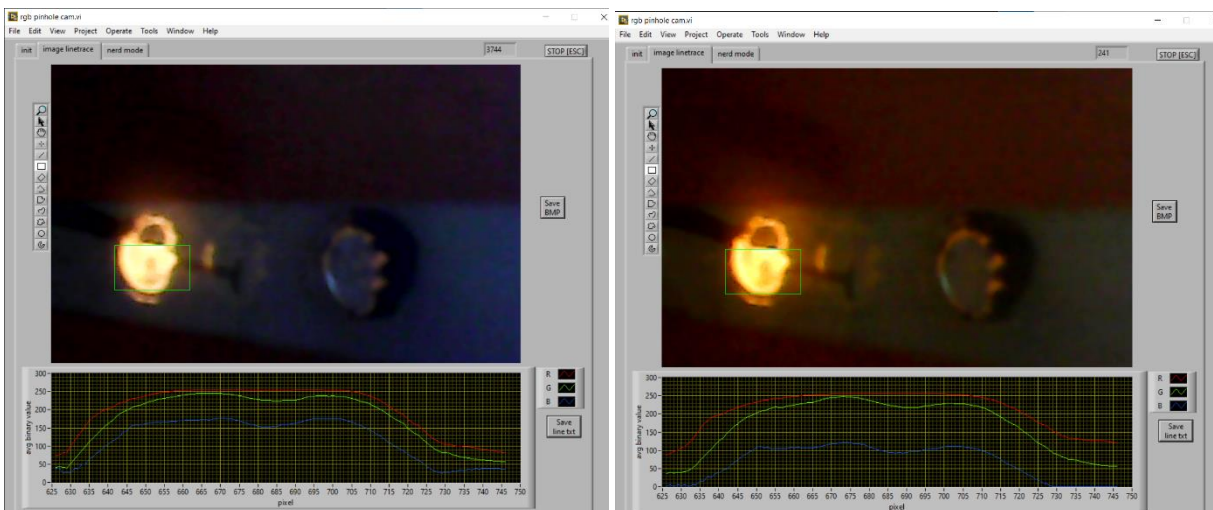
Horizontaal worden 1280 pixels weergegeven. De camera staat door de hoekinstelling op de PlexiLoC in dezelfde richting als de lichtstralen. In die positie staat de voorzijde van de cameralens tot het kanaal op 37 mm afstand en zal deze derhalve met een resolutie van $33,7\ \text{pixels}/\text{mm}$ weergegeven.

Daaruit volgt dat een verplaatsing h van $30\ \mu\text{m}$ van een lichtspot ten gevolge van verandering van de brekingsindex in het kanaal, leidt tot verplaatsing van de lichtspot op de CCD met één pixel. Wanneer door de verandering van de brekingsindex een lichtspot verplaatst, dan is dit maximaal in stappen van $30\ \mu\text{m}$ te meten. Aangenomen kan worden dat met de juiste wiskundige algoritmen de spatiële resolutie verder op te voeren is.

Meting met een foliechip.

Een vaak toegepaste foliechip heeft een totale dikte van minimaal $375\ \mu\text{m}$, de dikte van 3 lagen folie. Aangezien de verplaatsing h evenredig is met de vloeistofhoogte, en dus gelijk aan de kanaalhoogte, is gekozen om te meten met een foliechip met een kanaalhoogte van $500\ \mu\text{m}$. Om de invloed van de PlexiLoC afdeklaag uit te sluiten, is de chip gevuld met de testvloeistof door de chip handmatig te vullen en af te dekken met een losse transparante folielaag (overheadsheets). Daardoor is het kanaal wel begrensd, maar niet drukvast. Hiervoor is gekozen omdat de gebruikelijke folie zonder te lamineren een diffuse lijmlaag heeft die de lichtspot geheel verstrooide.

De RI van een suikeroplossing verandert vanaf een 0% massaconcentratie met een RI van 1,3333 naar RI = 1,4394 bij een massaconcentratie van 60% (Lide, 2003-2004). Bij een kanaalhoogte van 500 micron verandert de verplaatsing h daardoor van 0,22 mm naar 0,24 mm. Deze verplaatsing ligt onder de grens van $30\ \mu\text{m}$ die met de toegepaste camera te onderscheiden valt.



Figuur 24; Links meting van het eerste maximum van de grating met gedemineraliseerd water. Rechts dezelfde opstelling met een suikeroplossing 20% (m). Beiden uitgevoerd met een kanaal van $500\ \mu\text{m}$ hoogte en 4,5 mm breed. Toegepaste lichtbron is een monochrome LED met een piekgolflengte bij 589 nm. De verschuiving door de verandering van de brekingsindex zou in de onderste intensiteitsgrafieken te zien moeten zijn in horizontale richting.

In figuur 24 zijn het camerabeeld en het intensiteitsdiagram van een foliechip van $500\ \mu\text{m}$ hoogte en een monochrome LED met een piekgolflengte van 589 nm te zien. Achtereenvolgens zijn dit gedemineraliseerd water (links) en een 20% (m) suikeroplossing (rechts). In beide gevallen zijn de pixels die in de rechthoeken vallen gebruikt voor het intensiteitsdiagram er onder. Het betreft dezelfde fysieke pixels op de CCD-chip. Er is geen duidelijke verschuiving zichtbaar tussen de intensiteitsdiagrammen. Deze metingen zijn ieder van één vastgelegd beeldframe en geven de situatie van gedemineraliseerd water respectievelijk een suikeroplossing weer. Het niet kunnen vaststellen van een verschuiving is in overeenstemming met de berekende waarde van de verschuiving die beneden de resolutie van de camera ligt.

Mechanisch ontwerp

De beschikbare brontekeningen van de PlexiLoC in Adobe Illustrator format klopten qua maatvoering niet exact. Sommige maten bleken enigszins verschoven te zijn ten opzichte van het gekozen 5 mm grid. Verder waren om onduidelijke redenen overbodige features aanwezig in het bronbestand. Om die reden is voor dit onderzoek het ontwerp overgenomen in het 3D-CAD pakket SolidWorks 2020 student edition en de afwijkingen gecorrigeerd. De tekeningen kunnen geëxporteerd worden naar het Adobe Illustrator bestandsformaat. Ook kan direct gekozen worden voor het DXF-bestandsformaat waar veel lasersnijders direct mee kunnen werken. Het DXF-formaat heeft als voordeel dat de maatvoering gedefinieerd is en zo geen ongewenste verscaling kan plaatsvinden waardoor de maatvastheid van het product beter gegarandeerd blijft. Op basis van dit 3D-model zijn de aangepaste onderdelen geproduceerd en bij de onderzoeken benut.

Bijkomend voordeel van het overnemen van de tekeningen naar SolidWorks is dat de uitbreidingsset volledig in de samenstelling met de PlexiLoC uitgewerkt kon worden. Dit garandeert een juist passing voor alle onderdelen en de juiste werking van bewegende delen.

Bij het werken met de camerasteun is geconstateerd dat deze voldoende draaibereik heeft. Verder is het draaipunt op het correcte punt gericht waardoor hetzelfde punt van het kanaal in elke hoek in beeld blijft. Bij gebruik van een LED met een zeer smalle uittreehoek, bij het gebruikte exemplaar 6° , blijkt ook buiten deze ruimtehoek nog licht uit te stralen. Het strooilicht is geblokkeerd door een kunststof buisje tegen de LED te lijmen.

4.4 Resultaten deelonderzoek 4

De vraag die beantwoord wordt in deelonderzoek 4 is: [Is een kwadrantcel een geschikte alternatief voor het meten van de verplaatsing van de lichtvlek bij verandering van de brekingsindex in het microkanaal?](#)

In de resultaten van deelonderzoek 3 is te zien dat de verplaatsing t lineair afhankelijk is van de weglengte door de vloeistof. In plaats van de weglengte vergroten kan een kwadrantcel als sensor met een veel grotere gevoeligheid voor verplaatsing h benut worden. In dat deelonderzoek is een kwadrantcel (fotodiode met vier segmenten) gemonteerd op een flexure stage en belicht door een rode laser (640nm, 3mW). Er is getracht kwalitatief zicht te krijgen op de gevoeligheid als functie van de verplaatsing. De excitatie van een lineaire piëzo-actuator verschuift de cel tot maximaal $1 \mu\text{m}$ in de x-richting (haaks op de laserstraal). Na versterking met een factor 100 van de stroom door ieder van de vier kwadranten is de signalamplitude uit de versterker in de orde van 5 V_{tt} en lineair afhankelijk van de positie van de laserspot.

Bij het instellen van de laser is de rustpositie wordt de (ronde) laserspot op het lichtgevoelige deel van de kwadrantcel gericht. Door afstelling met een micrometer op een flexure stage is de lichtspot zo uit te lijnen dat ieder van de fotodiode-segmenten een gelijke stroom leveren. In dat geval zijn de vier segmenten met evenveel lichtintensiteit belicht. De versterkingsfactor van de signaalversterker wordt opgevoerd naar 100 maal. Door afstellen van de micrometers is de lichtintensiteit tussen links en rechts, respectievelijk boven en onder in hoge mate gelijk te maken. De verstelling van de micrometers met ongeveer 100 nm levert een verandering van het uitgangssignaal van circa 1 V op. Bij een versterkingsfactor van 100 keer door de voorversterkers betekent het dat de eerste versterkertrap met een transconductantieverstker $0,1 \text{ V}/\mu\text{m}$ levert. Met terugkoppelweerstand van 100 k Ω is dit een signaalstroom van $100 \text{ mV}/100 \text{ k}\Omega = 10^{-6} \text{ A}/\mu\text{m}$. Het signaal uit de versterker is met een minimale signaalruisverhouding (SNR) van 60dB goed meetbaar.

Gebaseerd op deze proefmetingen is het resultaat dat deze cel meer dan genoeg gevoelig bereik heeft om verplaatsingen van enkele tientallen nanometers van een lichtbundel te meten. Overigens is hier met een gecollimeerde laserbundel gemeten en niet met een witte LED. Deze laatste heeft

een veel minder gedefinieerde lichtspot, waardoor mogelijk de relatie tussen verschuiving en meetwaarden minder lineair zal worden.

4.5 Fabriceren van benodigde materialen voor de optische uitbreidingskit

De PlexiLoC is in het oorspronkelijke ontwerp niet geschikt om een lichtbron en een camera op eenvoudige wijze te monteren. Door het toevoegen van een stalen steun aan de zijkant en een kunststoffen camerahouder kan de camera in een klem gemonteerd worden. De beweegbare kunststof houder zorgt voor het instellen van de hoek waaronder de camera staat. Door het draaipunt zo te plaatsen is de camera in elke hoek gericht op het punt waar een foliechip met het kanaal ligt. Een eenvoudige 3D-geprinte kunststof beugel is bruikbaar als houder voor een LED. De samenstelling is te zien in figuur 14. Beide onderdelen zijn in het kader van dit onderzoek ontworpen en gefabriceerd. De CAD-bestanden zijn beschikbaar.

In dit onderzoek is gebruik gemaakt van een CD of DVD als grating, maar de gehele schijf past niet in een PlexiLoC. Diverse methoden van bewerken van de schijf zijn onderzocht en staan in bijlage C uitgewerkt.

5 Conclusies

Met de resultaten uit de diverse onderzoeken kunnen nu een aantal conclusies getrokken worden ten aanzien van de deelvragen en de hoofdvraag.

Conclusies deelonderzoek 1

De kwalitatieve vraag in deelonderzoek 1 gesteld is: Is de verschuiving van een monochrome, gecollimeerde lichtbundel door een verandering van brekingsindex duidelijk waarneembaar en met eenvoudige middelen vast te stellen. Het antwoord op deze vraag is dat dat bij een opstelling met een laserbundel en een vloeistofhouder van 10 mm duidelijk waarneembaar is.

De laserspot verplaatst in de uitgevoerde proeven van opstellingen 1 en 2 met een 11%(m) NaCl oplossing circa een millimeter en is daardoor duidelijk meetbaar. De gemeten verplaatsing is echter niet in overeenstemming met de theoretisch berekende waarde van 0,11 mm en is een factor tien te groot. Er is geen verklaring gezocht voor dit verschil. Bij het gebruik van een suikeroplossing van 53,3% (m) is de te verwachten verplaatsing nog groter. Uit berekeningen aan de meetgegevens van het LabView programma en de gebruikte camera is te concluderen dat een verplaatsing van 0,60 mm door een brekingsindex die van 1,333 naar 1,4394 veranderd, op een camerabeeld meetbaar moet zijn.

Conclusies deelonderzoek 2

In opstelling 2 is nagegaan of een verandering van de brekingsindex een waarneembare of meetbare verplaatsing van het diffractiepatroon oplevert. Een verplaatsing is niet eenduidig terug te zien in de gemeten beelden. Wel is in de intensiteitsdiagrammen een verschuiving van pieken te zien, naar schatting zo'n tien pixels naar links. Hieruit volgt dat bij een lichtbundel die door een vloeistoflaag van 10 mm geleid wordt, na diffractie op een DVD tralie, meetbaar is met een CCD-camera en een geschikt programma, hier in LabView gerealiseerd.

De plaatsbepaling van de pieken zijn niet berekeningen bepaald. Mogelijk dat door het gebruik van een geschikt optisch filter er een duidelijke referentie in de intensiteitsdiagrammen aan te brengen is.

Sterke suikeroplossingen zien er transparant uit maar bij het meten was een demping van de intensiteit meetbaar. De spectrale demping van de gebruikte suikeroplossingen zijn gemeten met een fotospectrummeter, gebruik makend van dezelfde vloeistofhouders. Geconcludeerd kan worden dat demping van een suikeroplossing bij hoge concentraties meetbaar is. Er is geen golflengte afhankelijkheid tussen 400 nm en 900 nm, terug te zien in de zeer kleine verschillen tussen de diverse metingen. Daaruit valt te concluderen dat voor een proef met golflengte afhankelijke demping een suikeroplossing niet geschikt is.

Conclusies deelonderzoek 3

Op de vraag of kwantitatieve metingen van een diffractiepatroon mogelijk zijn met de PlexiLoC, een foliechip en camerabeelden, valt te concluderen dat bij de metingen van zowel monochroom als met een witte lichtbron, er geen sprake is van een duidelijk resultaat. In de gebruikte derde opstelling is niet te concluderen dat een verschuiving van het diffractiepatroon meetbaar is. Daardoor is er met de huidige werkwijze geen meting van de brekingsindex mogelijk. Uit berekeningen aan de verplaatsing van het diffractiepatroon blijkt dat verwacht mag worden van de berekende verplaatsing ter grootte van 20 micrometer buiten de mogelijkheden resolutie van de CCD chip (30

micrometer, afmeting van één kleurenpixel) van de camera ligt. Er is geen algoritme gebruikt om de data van de beeldinformatie te analyseren om een verplaatsing te meten.

De elektrische en optische ruis die aanwezig is in de gemeten intensiteiten, ligt in dezelfde orde van grootte van de te verwachten verplaatsing. Dit is bepaald op basis van visueel inschatting van de variaties.

Conclusies deelonderzoek 4

Op de vraag of een kwadrantcel voldoende gevoelig is om een verplaatsing van een lichtspot door een verandering in de brekingsindex te kunnen vaststellen is zonder twijfel positief. In opstelling 4 is nagegaan dat verplaatsingen van minder dan een micron een duidelijk meetresultaat oplevert. Uitgaande van een verplaatsing van 20 micron bij de 53% (m) suikeroplossing is dit ruim voldoende. Op basis van het principe van een kwadrantcel zou met een CCD ook kunnen. Door de pixels in vier gebieden als segmenten te beschouwen zal met een te ontwikkelen LabView programma emulatie van een kwadrantcel mogelijk zijn. Of deze de benodigde gevoeligheid behaald zou in een vervolgonderzoek bepaald kunnen worden. Nadeel van het gebruik van de kwadrantcel is het verlies van de mogelijkheid om onderscheid te maken naar golflengte.

Conclusies ten aanzien van de hoofdonderzoeksvraag.

De hoofdonderzoeksvraag “Op welke wijze is een optisch effect met licht of laser te gebruiken om detectie of metingen te doen aan vloeistoffen in folie-chips, bij gebruik van een PlexiLoC chiphouder” is nu te beantwoorden.

Het antwoord op de eerste deelvraag is dat er drie optische effecten bij PlexiLoC met foliechips geschikt zijn, enerzijds doordat leerlingen deze uit eigen ervaring kennen en ze in de lesstof voorkomen van de middelbare school, anderzijds omdat ze relatief eenvoudig te gebruiken zijn. Dat zijn absorptie, diffractie en brekingsindex. Het gebruik van een camera en een monochrome of witte lichtbron in combinatie met een LabView meetprogramma levert een meetinstrument op dat in potentie optische metingen van deze drie effecten mogelijk maakt. Door het construeren van een mechanische uitbreiding met camerasteun voorzien van een geleider voor een penvormige camera maken stabiele beeldopnames mogelijk. Door wijze waarop de constructie van de uitbreiding is ontworpen zorgt dat het beeld automatisch gericht is op het centrum van een geplaatste foliechip waardoor afstellen sterk vereenvoudigd.

Het antwoord op de tweede deelvraag is dat het oorspronkelijke onderzoeksdoel waarbij vergroten van de optische weglengte centraal stond, is slechts ten dele gelukt: een lichtbundel wordt door een tralie verstrooid en legt in een foliechip ruim tweemaal de kanaalhoogte af door de te meten vloeistof. Indien de afstand door de vloeistof in de orde van 10 millimeter is dan is het mogelijk de verschuiving van een lichtbundel ten gevolge van verandering van de brekingsindex van een vloeistof waar te nemen en vast te leggen met een kleurencamera. In de opstelling met een PlexiLoC en met een kanaalhoogte van 500 micrometer is dit niet gelukt. De belangrijkste reden is dat de verplaatsing te klein is om met de resolutie van de gebruikte camera CCD-chip vast te leggen viel. Verder is de signaal-ruisverhouding in opeenvolgende beelden (frames) in dezelfde orde van grootte als het te meten effect, de verplaatsing.

De derde deelvraag kan beantwoord worden als positief op het aspect of een diffractiepatroon van een lichtbundel die op een DVD-tralie valt met een kleuren CCD-camera vast te leggen valt. Ook lukt het om een dergelijke camera toe te passen in combinatie met een PlexiLoC en een foliechip. De gemeten beelden zijn te analyseren binnen een vrij selecteerbaar gebied van een beeld, de

intensiteiten van de hoofdkleuren rood, groen en blauw – de spectrale informatie - zijn per fysieke pixelkolom afleesbaar en de meetgegevens zijn te exporteren naar een bestand. Dit geeft de mogelijkheid om de data verder te bewerken. De beschikbaarheid per fysieke pixelkolom geeft extra informatie over de precieze locatie op de CCD-chip, de zogenoemde ruwe data.

De derde deelvraag kan niet positief beantwoord worden op het aspect van het meten van de brekingsindex. Het meten van verschillen in brekingsindex van suikeroplossingen zijn niet aangetoond met de toegepaste opstelling op een PlexiLoC en een foliechip met een kanaalhoogte van 500 μm . De hoogte van het kanaal is voor deze meetmethode niet genoeg om dit met de camera te kunnen onderscheiden, ondanks de gebruikte grote verandering van de brekingsindex.

De toegepaste oplossingen van suiker en keukenzout zijn praktisch omdat beiden veilige stoffen zijn voor gebruik door leerlingen, op elke school voorhanden is en de verandering van de RI tot bijna 8% gekozen kan worden door het toepassen van hoge concentraties. Verder is de verandering van de RI nagenoeg lineair wat ijken eenvoudiger maakt.

De vierde deelvraag kan met het ontbreken van een meetbaar resultaat voor de brekingsindex en het ontbreken van meetresultaten voor golflengte afhankelijke demping niet beantwoord worden. Wel kan gesteld worden dat de uitbreiding mechanisch voldoet aan stabiliteit en instelbaarheid. De camerabeelden zijn eenvoudig maken zonder ingewikkelde afstellingen.

Het antwoord op de hoofdonderzoeksvraag (*“Op welke wijze is een optisch effect met licht of laser te gebruiken om detectie of metingen te doen aan vloeistoffen in folie-chips bij gebruik van een PlexiLoC chiphouder”*) is ten dele beantwoord. Er is een manier waarop de brekingsindex van een vloeistof te meten valt, alhoewel niet met de gebruikte opzet. Het is mogelijk de spectrale informatie met de intensiteit vast te leggen. Het is met de opzet zoals in dit onderzoek gebruikt niet mogelijk om hier metingen mee te doen. Het effect van het verschuiven van een lichtbundel valt buiten de resolutie van de meetmiddelen. Wel is het mogelijk, maar niet getest in dit onderzoek, om de spectrale informatie te gebruiken om absorptie van bepaalde golflengtes te kunnen vastleggen en nader te analyseren.

6 Discussie

Het resultaat van de proeven met de eerste twee opstellingen is een verplaatsing van de lichtbundel in de orde van 1 millimeter als gevolg van een vloeistoflaag van 10 mm, plus nog 2 mm transparant polystyreen. De verandering van de brekingsindex die deze verplaatsing veroorzaakt gaat van 1,333 naar 1,350. Op basis van dit resultaat is af te leiden dat de verplaatsing bij een twintig maal dunnere vloeistoflaag wegens het lineaire verband in de orde van 50 micrometer zal zijn. Metingen aan verplaatsingen met deze orde van grootte voldoen niet meer aan “duidelijk waarneembaar en eenvoudig meetbaar” meer – waarbij de aard van de apparatuur en de doelgroep in aanmerking genomen is. Toch is het onderzoek in deze richting voortgezet onder meer omdat de gedachte was dat de uittreehoek vanaf de tralie – hier een DVD – bij verhogen van de brekingsindex het kleurenpatroon ten gevolge van diffractie verder zou spreiden. Dit is achteraf gezien een onjuiste aanname geweest. De golflengte afhankelijke diffractie is IN de vloeistof inderdaad aanwezig, maar bij uittreden naar lucht worden deze verschillen in afbuiging weer teniet gedaan en vervolgen alle golflengtes hun weg onder de hoek van inval. Dit volgt ook uit de resultaten van de tweede opstelling. Alleen wanneer de tralie zich in de vloeistof bevindt, dan zouden de verschillen in de uittreehoek blijven bestaan omdat de golflengte afhankelijke hoek op het grensvlak van tralie en vloeistof plaatsvindt. In dit laatste geval is ook de afhankelijkheid van de vloeistof laagdikte afwezig. Hieruit volgt een suggestie voor een vervolgonderzoek naar het meten van de brekingsindex van een vloeistof met behulp van een tralie welke in direct contact met de te meten vloeistof staat.

Bij de tweede opstelling is het resultaat dat het diffractiepatroon duidelijk met een CCD-camera vast te leggen is. Door een verschilmeting uit te voeren met water respectievelijk een gekleurde vloeistof is het mogelijk om een golflengte afhankelijke dempingsmeting te doen. Het spectrum is met de camera in de derde opstelling met PlexiLoC en een foliechip goed vast te leggen. Het resultaat van de demping bij diverse golflengtes valt te analyseren met behulp van het LabView programma. De suggestie voor een vervolgonderzoek is, dat dit een mogelijke kandidaat is voor een proef door leerlingen met een zelfgemaakte foliechip.

Het programma geeft de opvolgende frames op het beeldscherm live weer. Daarin is te zien dat er fluctuaties zijn van de intensiteit tussen de frames. Dat wordt door ruis in de camera veroorzaakt, naar verwachting zowel optisch als elektrisch. Door het verwerken van meerdere frames tot één te analyseren beeld maakt het mogelijk de ruisinvloed te verkleinen. Dit zou in het LabView meetprogramma toegevoegd kunnen worden. Een andere verbetering zou bereikt kunnen worden door de invallende lichtbundel onder een grotere hoek te plaatsen, in plaats van de normaal van het folie-oppervlak. Een grote uittreehoek θ geeft volgens berekeningen een meer dan evenredig grotere verplaatsing vanwege een gunstiger h/t (h = verplaatsing, t = hoogte vloeistoflaag of kanaal) verhouding.

De oorspronkelijke vraag die leidde tot dit onderzoek - ontwikkel een meting met de PlexiLoC met licht- heeft niet tot een toepasbaar resultaat geleid. Het meten van de brekingsindex van een vloeistof in een foliechip blijkt met de huidige aanpak niet goed te meten, uitgaande van een kanaalhoogte van 500 micrometer. Vanuit het theoretisch kader is deze bevinding niet bijzonder verrassend te noemen en was in een eerder stadium voorspelbaar geweest.

Een van de doelstellingen van dit onderzoek om de vloeistof-licht-interactie in een microkanaal te vergroten door een langere optische weglengte te realiseren, is slechts ten dele gerealiseerd. De weglengte is met de huidige aanpak ruim twee maal de kanaalhoogte. De weglengte is daarmee nog steeds beperkt tot minder dan een millimeter.

CD en DVD zijn niet als tralie ontworpen waardoor de diffractie maxima minder scherp gedefinieerd zijn. Tralies van hogere optische kwaliteit kunnen mogelijk hogere gevoeligheid opleveren met scherpere afbakening van de lichtspot. Hierdoor zal een kleine verschuiving van de lichtspot duidelijker te onderscheiden zijn en daardoor eenvoudiger meetbaar. In dit onderzoek is niet nagegaan wat in dit geval theoretisch de best haalbare resolutie dan zal zijn. Een DVD is geschikt om, na een eenvoudige mechanische bewerking, als goedkope tralie gebruikt te worden in proeven. Het verdient aanbeveling om nader te onderzoeken hoe dit precies zou kunnen leiden tot een bruikbaar experiment voor de PlexiLoC met foliechips. Een van de suggesties is de bodem van een vloeistofkanaal niet te laten vormen door een laag lamineerfolie maar juist van de traliezijde van (een deel van) een gesplitste DVD. Aangezien de diffractie op het grensvlak plaatsvindt is de verwachting dat dit beter meetbaar is met een camera.

Een verdere suggestie is de data uit de camera verder te bewerken met een LabView of ander programma. Het benutten van meerdere frames van een proef kan het ruisniveau van de meting verlagen. Verder is een idee om het principe van een kwadrantcel toe te passen op een deel van het camerabeeld. Door deze selectie van een deel van de beeldinformatie en de beschikbare ruwe data waarin de optische informatie van de individuele fysieke pixels aanwezig is, maakt de emulatie van een kwadrantcel een kwestie van een reeks rekenregels. De verwachting is dat dit de resolutie voor de verplaatsing kan verhogen. Daarbij blijft ook de spectrale informatie beschikbaar, in tegenstelling tot de situatie waarbij de camera vervangen wordt door een kwadrantcel. Voor proeven door leerlingen neemt dit complexiteit uit het meten, mits de balans tussen enerzijds reductie van complexiteit en anderzijds een black-box waarin iets onbegrijpelijk gebeurt, in de gaten gehouden wordt.

De meerwaarde van het gebruik van een tralie in dit onderzoek is discutabel wanneer er gekeken wordt naar de wijze waarop deze toegepast wordt. De tralie heeft in de meting van de brekingsindex alleen als doel de verstrooiing onder een hoek terwijl de lichtbron vanaf de normaal belicht. Dit kan ook met een spiegel of een metaallaag. Een argument dat pleit in het voordeel van een tralie is dat de vlakke montage van de tralie eenvoudiger is dan voor een spiegel die onder een hoek geplaatst wordt. Een neven doelstelling van het experiment in een PlexiLoC is een nadere kennismaking met optische verschijnselen als meetinstrument waarbij het gebruik van een DVD als tralie een nieuwe manier van gebruik is van een herkenbaar object uit het dagelijks leven.

De eerste ideeën voor het fabriceren van het inkoppelen van licht in het kanaal van een foliechip lijken nog steeds zinvol voor vervolgonderzoek. Diverse bronnen zoals (Schaap, Rohrlack, & Bellouard, 2012), (Jung, Jung, & Kong, 2017) (Lee, Lee, & Rajeev, 2007) (Mogensen, Klank, & Kutter, 2004) geven richting aan alternatieve oplossingsrichtingen. Het toepassen van een reflectieve grating als bodem van het vloeistofkanaal is ook terug te vinden in de genoemde bronnen.

Leerproces tijdens het onderzoek

Voorafgaand aan het doen van onderzoek bij OS aan de UT is een lange periode voorafgegaan waarin de doelstellingen en eindtermen van de onderzoekstage aanvankelijk weinig meer waren dan 'iets interessants met licht uitzoeken voor in het leerlingenlab'. Bepaalde randvoorwaarden, waaronder de uitvoering aan UT, zijn gaandeweg pas duidelijk geworden. Nadat de onderzoeksopdracht in 2019 vorm gekregen heeft, heb ik in januari 2020 de start gemaakt bij de vakgroep OS. In diezelfde periode zwol de aanwezigheid van Covid-19 aan tot een niveau dat in maart leidde tot de lock-down en daarmee kon de UT niet meer bezocht worden. Per saldo stond het onderzoek stil. Na de zomer van 2020 ben ik wekelijks bij OS te vinden geweest. De aanwezigheid bij OS heb ik steeds als stimulans ervaren omdat er altijd anderen bezig waren met hun onderzoek en geïnteresseerd waren in wat ik deed. Omgekeerd heb ik ideeën gekregen, of verworpen na gesprekken met master-studenten,

PHD's of vaste onderzoekers. Het aanwezig zijn in de academische onderzoeksomgeving heeft in die zin ook deel uitgemaakt van mijn persoonlijke groei, ondanks de zes uur reistijd om een dag op locatie te zijn.

Bij aanvang heb ik me geconcentreerd op het zicht krijgen op de werking van een tralie in combinatie met een laser. Een boek van een leverancier gaf zicht op de wijze van produceren van tralies. De eerste praktische probeersels waren met een CD, zwart plakband en een kleine rode laser. Ik heb getracht te zien of het laserlicht vanaf het oppervlak van de CD ook in het vlak van de kunststofschiif verspreidde, zoals de Spaanse studenten (Barrios & Canalejas-Tejero, 2017) hebben laten zien. Vanaf de zijkant schijnen werkte goed, de hele rand van de CD laat verstrooid laserlicht zien. Vanaf het oppervlak van de CD werkte het echter niet, of ik heb er overheen gekeken. Al brainstormend is het idee ontstaan om de CD-tralie niet te benutten om het licht in een kanaal te koppelen maar de diffractie te trachten te benutten. Daarmee heb ik me laten verleiden om een andere richting in te slaan dan eerder gekozen doelstelling.

De aanpak om eerst proeven te doen op grotere schaal is een goede keuze geweest omdat dit duidelijk gemaakt heeft dat het bedenken en maken van een optische opstelling bepaald geen vanzelfsprekende aanpak heeft. Hoe eenvoudiger de opstelling uiteindelijk is, hoe meer denkwerk voorafgaand is gedaan. De meeste tijd heb ik nodig gehad om een opstelling te construeren. Vanuit dat oogpunt is onderzoek doen voor een deel ook fijnmechanische engineering. Dat is echter op geen enkel moment onderdeel geweest van mijn opleidingstraject. Gelukkig heb ik hier mensen gevonden, zoals Jan Brouwer, die me waardevolle tips of praktische ondersteuning hebben geboden. Een tweede aspect dat van belang is betreft het doen van metingen en proeven met bestaande apparatuur zoals de spectrophotometer, transparante kunststoffen zoals PMMA en de inhoud van een kast met optische filters. Het gevoel krijgen voor de afmetingen in micrometer en nanometers lukt ook alleen door bijvoorbeeld het oppervlak van een gesplitste DVD met een AFM microscoop af te tasten en te zien hoe het oppervlaktepatroon eruit ziet.

Verder heeft het duidelijk gemaakt dat de stap naar een verkleinde versie van de proefopstelling leidt tot een schaalverandering die nadelig kan uitwerken. De resolutie van de opstelling is eveneens geschaald waardoor uiteindelijk de meting niet meer waargenomen wordt met de beschikbare apparatuur. Direct op het schaalniveau van microkanalen had wellicht tot andere resultaten geleid.

Het onderzoek met de kennis van nu

Wanneer ik dit onderzoek opnieuw zou doen en met behoud van de opgedane kennis, dan zou mijn focus meer verschuiven naar het tijdig onderbouwen van de verwachte of geconstateerde tussenresultaten. Dat voorkomt het realiseren van een opstelling die bijvoorbeeld niet in staat is de verlangde resolutie te halen. In dat geval zou de aandacht meer uitgaan naar het verhogen van de resolutie, bijvoorbeeld door gebruik te maken van wiskundige algoritmen op de beeldinformatie. Tevens is het verstandig om nog veel meer dan ik nu gedaan heb, anderen te betrekken in de ideevorming zodat ik vaker feedback krijg over mijn oplossingsrichting. Ook dat proces helpt tijdig doodlopende onderzoekrichtingen te herkennen en passende maatregelen te nemen.

Verreweg de belangrijkste keuze is dat ik bij de oorspronkelijk vraag blijf om de interactielengte van het licht in een kanaal te vergroten. Ik ben benieuwd of een tralie als bodem van een kanaal inderdaad een manier kan zijn om licht in het kanaal te krijgen. Voor de verstrooiing van het licht naar buiten het kanaal vergt dan nog een oplossing. Aangezien de tralie transparant is, de tralie zit immers onder de aluminiumlaag van de DVD, zal het licht van bijvoorbeeld de onderzijde van de PlexiLoC moeten komen. Het diffractiepatroon of het afgebogen licht kan aan de andere zijde weer opgevangen worden.

7 Aanbevelingen

In deze aanbevelingen zijn naast suggesties voor verder onderzoek ook een aantal bevindingen genoemd die in tijdens het onderzoek geconstateerd zijn en mogelijk interessant voor een verdere ontwikkeling van de PlexiLoC.

Het mechanische ontwerp is nu zodanig dat de lichtbron nu alleen loodrecht op het oppervlak van de PlexiLoC en een foliechip schijnt. Door het draaibaar maken van de steun voor de lichtbron is deze onder een hoek op de tralie te richten. Zo zou het verstrooide licht ook in de geleider terecht kunnen komen. Dit zou tegemoet komen aan de eerste ideeën van het verlengen van de optische weglengte en het inkoppelen van het oppervlak van de foliechip. Voor naar buiten laten treden van het licht ten behoeve van een meting moet dan nog een oplossing komen.

De topplaat van de PlexiLoC is nu een dichte kunststof plaat uitgezonderd de gaten voor de slangen. Deze zou van een opening voorzien kunnen worden zodat spiegelingen van de topplaat vermeden worden. Wel moeten de gaten voor de slangen blijven bestaan zodat de drukkichte vloeistofkoppelingen blijven behouden.

De tekeningen van de complete PlexiLoC zou het beste uitgevoerd kunnen worden als een samenstelling in het 3D-CAD pakket. Op die wijze valt een juiste maatvoering voor alle onderdelen te garanderen.

Een richting die voor scholen eenvoudig toegang geeft tot optische bewerkingssoftware en metingen is het programma Coach van CMA. Veel scholen beschikken al over licenties en vaak zijn er ook ervaren gebruikers zodat de drempel om hiermee te werken relatief laag ligt. Of Coach versie 7 in staat is de data van een CCD-camera te verwerken en metingen te doen tot op fysiek pixelniveau is een richting die nog onderzocht kan worden.

Literatuur

- Barrios, C., & Canalejas-Tejero, V. (2017). An analysis of the surface-normal coupling efficiency of a metal grating coupler embedded in a Scotch tape optical wave guide. *Optics Communications*, 477-484.
- Broek, J. v., & Schulp, A. (2004). Zelfbouw Spectroscop. In J. v. Broek, & A. Schulp, *Wetenschappelijke experimenten voor huis, tuin en keuken*. Veen Magazines.
- CMA-science Producten. (sd). Opgeroepen op 09 11, 2021, van cma-science: <https://cma-science.nl/producten>
- Fowles, G. (1989). *Introduction to modern optics*. Mineola N.Y.: Dover Publications, Inc.
- Galiatsatos, V. (2007). Refractive Index, Stress-Optical Coefficient, and Optical Configuration Parameter of Polymers. In M. J. (eds), *Physical Properties of Polymers Handbook* (p. 837). doi:10.1007/978-0-387-69002-5_50
- Garmire, E. (2012). *Overview of Non Linear Optics* (Vol. Chapter 1). (D. N. (Ed.), Red.) Intech. Opgeroepen op 05 12, 2021, van <http://www.intechopen.com/books/nonlinear-optics/overview-of-nonlinear-optics>
- Hecht, E. (1975). *Schaum's outline of Theorie and Problems of Optics*. McGraw-Hill, Inc.
- Hecht, E. (2017). *Optics* (Fifth international edition ed.). Essex: Pearson.
- Het PRE University programma van de UT. (sd). Opgeroepen op 05 05, 2021, van University of Twente: <https://www.utwente.nl/onderwijs/pre-university/pre-u/>
- Honeycomb Optical Breadboards. (sd). Opgeroepen op 05 16, 2021, van www.thorlabs.com: https://www.thorlabs.com/navigation.cfm?guide_id=44
- Ivanov, D., & Nicolaev, S. (2010). White light diffraction with a CD. *Physics Education*(45), 227-228. Opgeroepen op 05 03, 2021, van <https://doi.org/10.1088/0031-9120/45/3/F04>
- Jensen, P., & Bak, J. (2002). Near-Infrared Transmission Spectroscopy of Aqueous Solutions: Influence of Optical Pathlength on Signal-to-Noise Ratio. *Applied Spectroscopy*, 2002(Volume 56, Number 12), 1600-1606. doi:10.1366/000370202321115878
- John R. Rumble, e. (2020). Physical Constants of Organic Compounds. In e. John R. Rumble, *CRC Handbook of Chemistry and Physics* (101st Edition (Internet Version 2020) ed.). CRC Press/Taylor & Francis.
- Jung, D., Jung, D., & Kong, S. (2017). A Lab-on-a-Chip-based non-invasive optical sensor for measuring glucose in saliva. *Sensors*, 2017(17). doi:10.3390/s17112607
- Kortेरik, J. (2021, 06 20). RGB pinhole cam.vi. Opgeroepen op 06 20, 2021
- Kortेरik, J. (2021, 02 05). Ueye 1225 old camera.vi. Opgeroepen op 02 05, 2021
- Lee, K., Lee, H., & Rajeev, R. (2007). Polymer waveguide backplanes for optical sensor interfaces in microfluidics. *Lab chip*, 2007(7), 1539-1545. doi: 10.1039/b709885p
- Lide, D. (. (2003-2004). CONCENTRATIVE PROPERTIES OF AQUEOUS SOLUTIONS:. In D. (. Lide, *Handbook of Chemistry and Physics* (pp. 8-77). CRC Press.

- Mogensen, K., & Kutter, J. (2009). Optical detection in microfluidic systems. *Electrophoresis*, 592-5100.
- Mogensen, K., Klank, H., & Kutter, J. (2004). Recent developments in detection for microfluidics systems. *Electrophoresis*, 3498-3512. doi:10.1002/elps.200406108
- Oskam, I., & Souren, P. (2017). *Ontwerpen van technische innovaties* (Druk 2 ed.). Noordhoff Uitgevers.
- Palmer, C. (2005). *Diffraction grating handbook*. New York: Newport Corporation.
- Safe and Easy Way to prepare DVDs as Diffraction Grating. (sd). Opgeroepen op 05 08, 2021, van <https://www.youtube.com/watch?v=SikRklaY5hg>
- Schaap, A., Rohrlack, T., & Bellouard, Y. (2012). Lab on a Chip technologies for algae detection: a review. *Journal of Bio Photonics*, 2012(5, No 8-9), 661-672. doi:10.1002/jbio.201200051
- Tatum, J. (2020, 08 10). *Reflection and Refraction*. Opgehaald van Physics Libretexts: [https://phys.libretexts.org/Bookshelves/Optics/Book%3A_Geometric_Optics_\(Tatum\)/01%3A_A_Reflection_and_Refraction/1.03%3A_Refraction_at_a_Plane_Surface](https://phys.libretexts.org/Bookshelves/Optics/Book%3A_Geometric_Optics_(Tatum)/01%3A_A_Reflection_and_Refraction/1.03%3A_Refraction_at_a_Plane_Surface)
- Tilley, R. (2011). *Colour and the Optical Properties of Materials*. Wiley.
- Veen, J. (2019). *IMPULS versterking bètadidactiek: het leren van concepten uit hedendaagse wetenschapsconcepten*. Universiteit Twente, BMS ELAN. Opgeroepen op 05 04, 2021, van <https://www.utwente.nl/en/bms/elan/researchanddevelopment/projects/impuls/19504-impuls-eindreportage-bms-elan-digitaal.pdf>
- Whitesides, G. (2006, juli 27). The origins and future of microfluidics. *Nature*(442). doi:10.1038/nature05058
- Wietsma, J. (n.d.). *IMPULS versterking bètadidactiek: het leren van concepten uit hedendaagse wetenschapscontexten*. Universiteit Twente, Faculteit BMS-ELAN. Opgeroepen op 05 04, 2021, van <https://www.utwente.nl/en/bms/elan/researchanddevelopment/projects/impuls/19504-impuls-eindreportage-bms-elan-digitaal.pdf>
- Wietsma, J., Veen, J. v., Buesink, W., Berg, A. v., & Odijk, M. (2018). Lab-on-a-Chip: Frontier Science in the Classroom. *Journal of Chemical Education*(95), 267-275. doi:10.1021/acs.jchemed.7b00506
- Wietsma, J., Veen, J. v., Buesink, W., Berg, A. v., & Odijk, M. (2018). *Lab-on-a-Chip: Frontier Science in the Classroom; supporting information*. doi:10.1021/acs.jchemed.7b00506
- Wypych, G. (2016). PMMA polymethylmethacrylaat. In G. Wypych, *Handbook of polymers*. ChemTech publishing.
- Zhou, R., & Burkhart, T. (2009). Optical Properties of Particle-Filled Polycarbonate, Polystyrene, and Poly(methyl methacrylate) Composites. *Journal of Applied Polymer Science*(Vol. 115), 1866–1872 (2010). doi:10.1002/app.31331

Bijlage A: Receptuur voor het lasersnijden van CD of DVD

Het snijden van een CD is uitgetest op de lasersnijder BRM lasers model BugetLaser6090 met een laservermogen van 80 W. Onderstaande getallencodes zijn de schrijfsnelheid van de kop gevolgd door het percentage van het maximale vermogen. Bij vergroten van de snelheid heeft het snijpunt minder tijd om de smelten of verdampen. Bij het verlagen van de procentuele vermogen wordt de laser pulsend aangestuurd met steeds minder 'aan'-tijd.

De resultaten zijn de mate van verkleuring voor en eventueel achter, hoeveelste deel van de schijf doorsneden is.

1. Test met rechte lijnen startend van buiten het DVD oppervlak, bewegend naar binnen. Snijden nog stopt in het DVD oppervlak.
 - 50/30: duidelijke verkleuring, doorsnijden 100%
 - 50/40: duidelijke verkleuring, doorsnijden 100%
 - 50/20: verkleuring minimaal, verkleuring achterzijde gemiddeld, doorsnijden 75-100%
 - 60/30: verkleuring minimaal, verkleuring achterzijde gemiddeld, doorsnijden 75-100%
 - 80/40: verkleuring gemiddeld vooral eindpunt en achterzijde; doorsnijden geheel
 - 90/40: verkleuring gemiddeld vooral eindpunt en achterzijde; doorsnijden geheel
 - 90/40 zonder stop (start snijden buiten het DVD oppervlak): verkleuring gemiddeld vooral achterzijde; doorsnijden >50% materiaaldikte 1,2mm.
 - 100/40: verkleuring laag gemiddeld; doorsnijden >50%
 - 200/70: Verkleuring vooral op achterzijde en eindpunt; doorsnijden 25-50%.
 - 200/80: Verkleuring vooral op achterzijde en eindpunt; doorsnijden 25-50%.
 - 200/90: Verkleuring vooral op achterzijde en eindpunt; doorsnijden 25-50%
2. Rechthoeken
 - 200/90 rechthoek: verkleuring weinig, sterk op de hoekpunten. Doorsnijden 50-75%.
 - 220/90 rechthoek: verkleuring weinig, sterk op de hoekpunten. Doorsnijden 50-75%.
 - 220/90 (2) rechthoek: verkleuring weinig, sterk op de hoekpunten. Doorsnijden 25-50%.

Rechte lijn geheel vallend op het DVD oppervlak, helft voorzien van snijpoeder (DiffuTherm, Klumpf Technischer Chemie KG, 500 ml, www.diffu-therm.de).

- Verkleuring op beide vlakken visueel gelijkelijk; doorsnijden 100%

Het is uitgaande van deze tests en bij gebruik van de aangegeven lasersnijder aan te bevelen met een snijsnelheid van 220 mm/s bij een vermogen van 90% te werken. Het lijkt mogelijk om een nog verdere verbetering van deze bewerkingsmethode te bereiken waarbij de 'brandvlekken' nog minder aanwezig zijn. Bij deze instelling snijdt de laser de schijf tot ongeveer de helft in. Door breken zijn de delen op te splitsen. Bij ondieper insnijden, dat geldt ook bij gebruik van een mes, leidt breken van het materiaal tot zichtbare scheuren in de aluminiumlaag. Onduidelijk is of dit gevolgen heeft voor de bruikbaarheid van deze zelfgemaakte tralie.

Verder is het aan te bevelen de bewerkingstekening met de snijlijnen zodanig te ontwerpen dat de laser niet stopt in het vlak van de CD of DVD, maar aan de rand of zelfs daarbuiten. Ook hoeken tekenen in het CD-vlak zijn af te raden wegens de sterke neiging tot verkleuren.

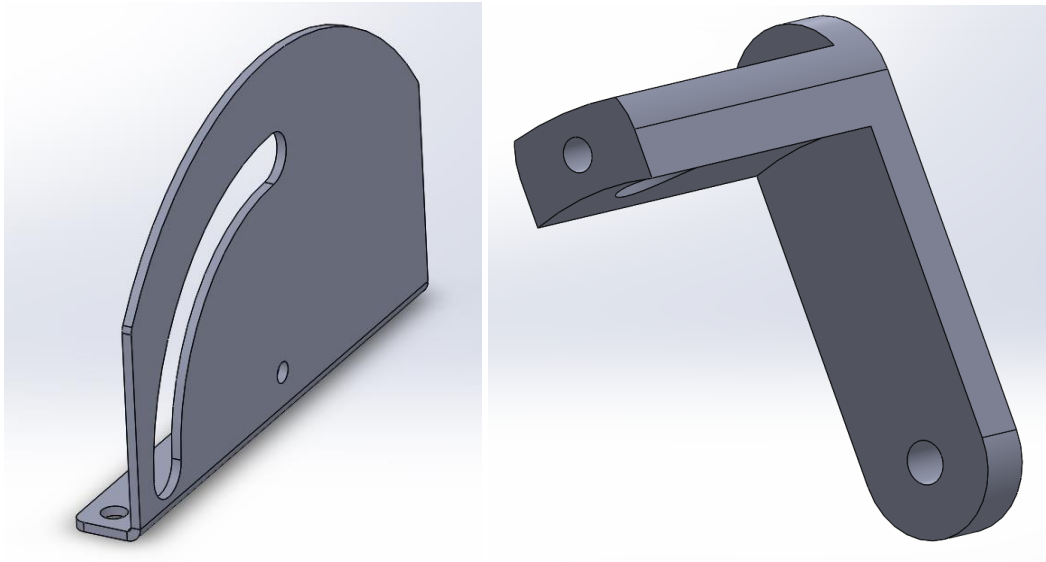
Alternatief

Niet uitgeprobeerd maar mogelijk wel werkzaam is het in water voorverwarmen van de schijven. Volgens een youtube-bron (Safe and Easy Way to prepare DVDs as Diffraction Grating) zou dit knippen met een grote schaar mogelijk maken.

Bijlage B: Onderdelen van de uitbreidingsset

Camerageleider en steun

Met een 3D-pakket ontwerpen en met lasersnijder en 3D-printer zijn de camerageleider en de camerasteun gemaakt. Door toepassen van 1,5 mm staal voor de geleider is een zeer rigide verticale opbouw op de PlexiLoC gemaakt. Deze wordt door middel van M4 boutjes verbonden met de perspex platen. De camerasteun is 3D-geprint omdat daarmee de vorm precies overeen komt met de sleuf in de geleider. De combinatie is qua hoek instelbaar en met een inbusbout M4 vast te zetten tijdens metingen.



Figuur 255; camerageleider en -steun. Na montage op de standaard montagegaten van de PlexiLoC kan de camera hiermee in de gewenste hoek vastgezet worden.

Vanwege de omvang van een lasersnijder voor metaalplaat en de vereiste gassen is deze bewerkingstechniek waarschijnlijk minder geschikt voor middelbare scholen en hun leerlingen. Ook het zetten van de rand voor de montage vergt een zetbank. De metalen geleider kan dan het beste als onderdeel bij de PlexiLoC meegeleverd.

Bijlage C: CD of DVD bewerken

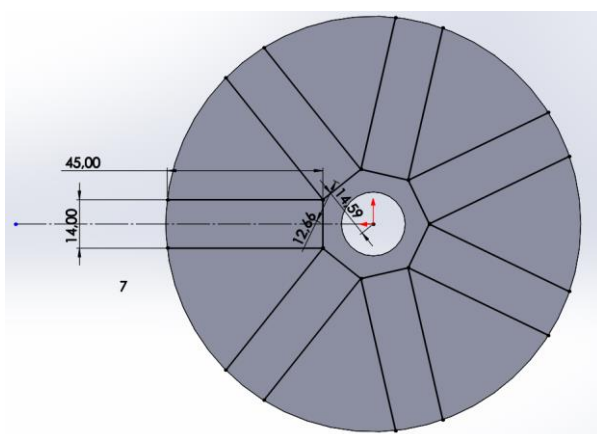
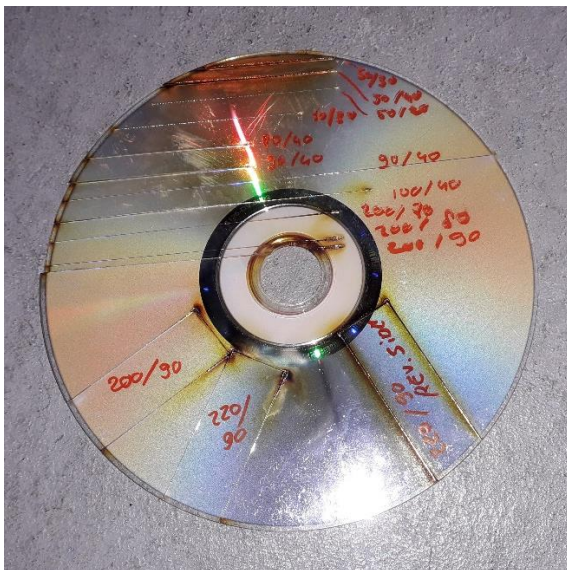
Het is voor een correcte oriëntatie in de PlexiLoC van belang dat het gratingpatroon haaks op de bewegingsas van de camera ligt. Wanneer de camera in de Y-richting kan bewegen, dan moet het gratingpatroon in de X-richting liggen. Daardoor projecteert de grating de maxima precies in de camera bewegingsas. De grating zal waarschijnlijk meer een verbruiksartikel zijn, net als de foliechips, zodat een folie direct op de grating gelijmd kan worden. Om dan het aantal verbruikte schijven te beperken is een tekening gemaakt om met een lasersnijder of frees de schijf in geschikte stukken te verdelen.

DVD's zijn opgebouwd uit twee lagen PC of COC. Wanneer het voor een toekomstige proef praktisch is om een tralie in direct contact te kunnen brengen met een vloeistof, dan is het splitsen van de delen van de DVD een optie. Het splitsen van DVD's maakt een goedkope tralie beschikbaar met een nauwkeurig gedefinieerd aantal lijnen per millimeter. Vandaar dat voorbeelden van methoden uitgetest zijn voor het eenvoudig splitsen van beide lagen. In de opstellingen in dit onderzoek zijn geen gesplitste DVD's gebruikt.

DVD opdelen

Voor het opdelen van een DVD of CD zijn methoden als zagen, lasersnijden, breken en snijden uitgetest. De bewerkingen zijn gekozen op basis van beschikbare gereedschappen en hulpmiddelen tijdens de onderzoeksperiode.

Voor het lasersnijden is een 2D-tekening gemaakt met SolidWorks, studentenversie 2020. Deze wordt als DXF-formaat geëxporteerd naar het hulpprogramma dat meegeleverd is bij de lasersnijder. De lasersnijder is specifiek geschikt voor het snijden van kunststoffen, waaronder PMMA, PC en ABS. Het betreft BRM lasers model BugetLaser6090 met een laser vermogen van 80 W maximaal. Een schrijfsnelheid van 220mm/s en een vermogen van 90% levert redelijke resultaten met beperkt brandvlekken.



Figuur 266; CD met bewerkingen met een lasersnijder. De bruinverkleuringen door oververhitting treden aan beide zijden van de schijf op. Vooral waar de hoeken gemaakt worden is het verkleuren sterker zoals te zien bij instelling 200mm/s en 90% van 80W voor het vermogen van de laser. Rechts het patroon waarbij 7 identieke rechthoeken uit een CD of DVD gehaald kunnen worden. Uit de proeven blijkt dat de verkleuringen op hoeken en eindpunten ontstaan. Door het patroon van doorlopende lijnen te voorzien (met 6 rechthoeken) is dit sterk te beperken.

Er zijn enkele tests gedaan om de beste wijze van verwijderen van de opgedampte aluminiumlaag. Deze aluminiumlaag is de spiegellaag en die is over de grating heen gelegd. Door deze te verwijderen komt de grating op het oppervlak beschikbaar. Dit gaat eenvoudig met een standaard plakband dat weinig lijmresten achterlaat. Soms is het nodig de afdeklaag in te krassen voordat de laag er met plakband af te halen is.

Bijlage D: Specificaties van de camera voor opstelling 1 en 2

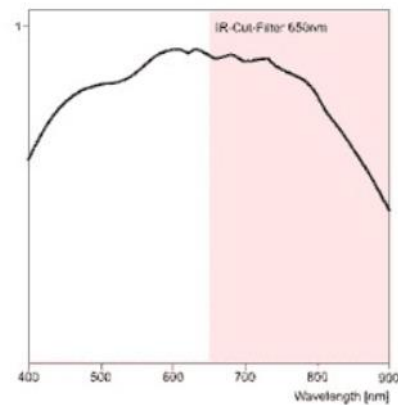
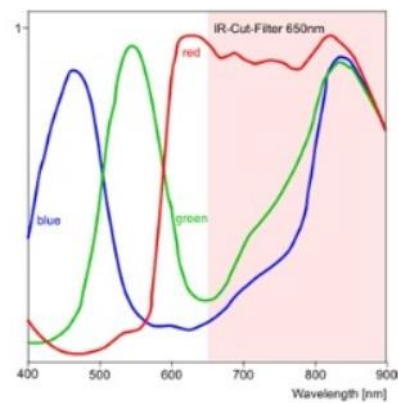


UI-1220LE / UI-1225LE - USB 2.0 Camera

Technical Specifications

[Request quote](#)

Interface	USB
Lens Mount	C-Mount CS-Mount
Sensor Technology	CMOS (Aptina)
Model Description (color)	UI-1225LE-C
Model Description (mono)	UI-1225LE-M
Resolution (h x v)	752 x 480
Resolution Depth	8bit (10bit ADC)
Resolution Category / Pixel Class	Wide VGA
Sensor Size	1/3"
Shutter	Global
max. fps in Freerun Mode	87 fps
Exposure Time in Freerun Mode	80µs-5.5s
Exposure Time in Trigger Mode	80µs-5.5s
AOI Modes	horizontal + vertical
Binning Modes	horizontal + vertical
Subsampling Modes	---
I/O - Strobe	-
I/O - Trigger	-
I/O - RS-232	-
I/O - GPIO	-
I/O - I2C	-
HDR (High Dynamic Range)	-
Sensor Model (m/c)	MT9V032STM / MT9V032STC
Pixelpitch in µm	6.00
Optical Size	4.512 x 2.880 mm
Protection Classes	IP30
Dimensions H/W/L	44.00 mm, 44.00 mm, 25.40 mm
Mass	32.00 g
Power Supply	USB



Bassler UI-1225LEM camera zoals gebruikt in opstelling 2.