

# Hoge dichtheid data opslag middels $NA > 1$

Jack van den Eerenbeemd • Ferry Zijp • Coen Verschuren • Dominique Bruls • Julian Lee • Remy Ripandelli • Paul Urbach • Philips Research • High Tech Campus 34 • 5656 AE Eindhoven

## SAMENVATTING

In optische systemen voor dataopslag op disks zien we bij iedere nieuwe generatie een aanzienlijke toename in opslagcapaciteit. Met de komst van de Blu-ray Disc, de beoogde opvolger van DVD, lijkt het erop dat de grenzen van de conventionele aanpak zijn bereikt. In dit artikel laten we zien hoe met behulp van aplanatische afbeeldingen een numerieke apertuur groter dan één kan worden bereikt waardoor een volgende stap in opslagcapaciteit kan worden gerealiseerd.

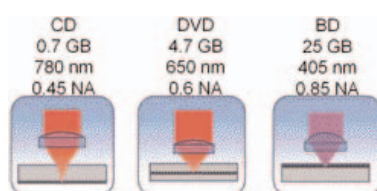
**Kernwoorden:** optische data opslag, aplanatische afbeelding, hoge NA, evanescente golven

## 1. INLEIDING

Door de introductie van de CD-R en CD-RW is het mogelijk om thuis grote hoeveelheden data op te slaan en te archiveren. Later zijn de DVD+R en DVD+RW geïntroduceerd waardoor de capaciteit van een plastic schijfje (12 cm in diameter) van 700 MB voor CD naar 4.7 GB voor DVD werd vergroot.

Inmiddels zijn er ook DVD+R platen verkrijgbaar met twee lagen waarin kan worden geschreven. Hierop past 8.5 GB aan data. Sinds de introductie van de Blu-ray Disc (BD) past er maar liefst 25 GB op een schijf met één enkele laag en 50 GB op een schijf met een dubbele laag. Deze toename in opslagcapaciteit is nodig bijvoorbeeld om beeldmateriaal met een steeds hogere resolutie en betere kwaliteit op een enkele plaat te kunnen zetten. Op een DVD-plaat past 2 uur video in PAL<sup>1</sup> formaat. Op een enkele BD plaat daarentegen kunnen we 2 uur video in HDTV kwaliteit opnemen.

De CD, DVD en BD standaarden bestaan uit complete families van platen waarbij ieder lid van de familie een specifieke toepassing heeft. Zo zijn er 'ROM' platen welke alleen gelezen kunnen worden die dienen voor distributie



Figuur 1. Opeenvolging van de verschillende generaties optische disks met de opslagcapaciteit, laser golflengte en numerieke apertuur genoemd.

van data, muziek, film en software. De 'R' platen zijn geschikt om eenmalig beschreven te worden, terwijl de 'RW' platen meerdere malen herschrijfbaar zijn. Deze platen worden uitgelezen en/of geschreven door een laserbundel te focuseren tot een klein lichtvlekje en daarmee een spoor af te 'tasten'. Dit is te vergelijken met de werking van een scannende microscoop. De grootte van het lichtvlekje bepaalt hoe klein de kleinst uitleesbare effecten op de plaat kunnen zijn en hoe dicht de sporen op elkaar kunnen staan en bepaalt daarmee uiteindelijk de opslagcapaciteit. De grootte van het lichtvlekje wordt bepaald door de golflengte van de gebruikte laser en de numerieke apertuur (NA) van de objectieflens.



Coen Verschuren



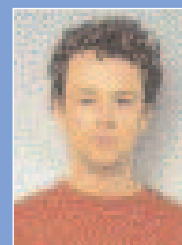
Julian Lee



Dominique Bruls



Paul Urbach



Ferry Zijp



Remy Ripandelli



Jack van den Eerenbeemd

In de moderne videorecorders en multimedia centra zitten tegenwoordig harde schijven waarop TV-uitzendingen worden opgenomen. De capaciteit van deze harde schijven kan oplopen tot wel 200 GB wat overeenkomt met ca. 40 DVD- of 8 BD-platen. Voor de archivering of het maken van een backup is de capaciteit van de momenteel beschikbare optische disks onvoldoende. In dit artikel worden twee systemen beschreven die beide een numerieke apertuur groter dan 1 hebben en een opslagcapaciteit beloven van meer dan 150 GB.

## 2. OVER APLANATISCHE AFBEELDINGEN EN EVANESCENTE GOLVEN

Door laserlicht met een kortere golflengte te gebruiken en de numerieke apertuur van de objectief lens te vergroten is de opslagcapaciteit per disk voor de opeenvolgende generaties optische disks toe genomen. Voor laserlicht met een golflengte<sup>2</sup> die aanzienlijk korter is dan de 405 nm die nu voor BD wordt gebruikt zijn er vrijwel geen goedkope materialen te vinden voor het maken van de lenzen en de disk. De numerieke apertuur van het Blu-ray Disc systeem (NA=0.85) zit dicht tegen de bovengrens van NA=1 aan, wat maximaal haalbaar is voor een conventionele objectieflens in lucht. Het lijkt er dus op dat via deze weg nog maar weinig winst te behalen valt in opslagcapaciteit. Er moeten dus andere wegen worden gezocht.

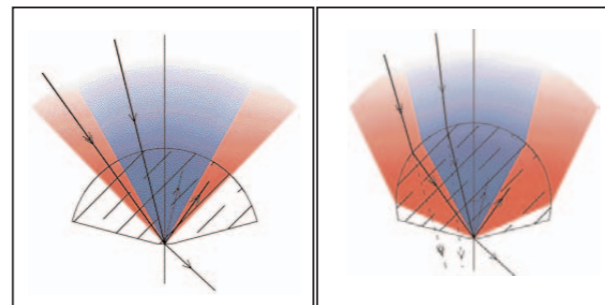
De effectieve numerieke apertuur van een lens kan worden vergroot door gebruik te maken van zogenaamde aplanatische afbeeldingen van een bolvormige lens. Aplanatische afbeeldingen zijn vrij van coma en sferische aberraties, zie bijv. [1]. Er zijn drie zulke afbeeldingen voor een bolvormige lens: 1) op het oppervlak wat geen vergroting van de effectieve numerieke apertuur oplevert, 2) halverwege de bol zoals getoond in figuur 2a) en 3) op  $R \cdot (1+n_{bol})/n_{bol}$ , figuur 2b).

Hier is  $R$  de straal van de bol en  $n_{bol}$  de brekingsindex van het materiaal waarvan de bol is gemaakt. De laatste configuratie wordt ook wel eens de Huygens aplanaat genoemd, bekend van de microscoop objectieven van het Amici type. In de optica wordt het gebruik van zo'n bolvormige lens onder een objectieflens vaste stof immersie genoemd, naar analogie van de vloeistof immersie microscopie, daarom duiden we de bolvormige lens ook wel aan met SIL, naar het engelse Solid Immersion Lens, zie [2].

In de halve bol configuratie wordt de bol aangestraald op het kromtemiddelpunt waardoor alle stralen loodrecht op het oppervlak invallen en dus niet breken.

De effectieve NA wordt dan gegeven door:  $NA_{eff} = n_{bol} \cdot \sin \theta = n_{bol} \cdot NA_o$ , waarbij  $NA_o$  de numerieke apertuur is van de objectieflens boven de SIL en  $\theta$  de halve openingshoek van de lichtkegel in de SIL. Bij de Huygens aplanaat worden de stralen wel gebroken op de SIL en wel zo dat:  $NA_{eff} = n_{bol}^2 \cdot NA_o$ .

Door gebruik te maken van glas met een brekingsindex van 2.086 voor de SIL en een objectieflens met  $NA_o = 0.7$  verkrijgen we een  $NA_{eff} = 1.46$  voor de halve bol configuratie. Met  $NA_o = 0.44$  wordt  $NA_{eff} = 1.9$  voor de Huygens aplanaat.

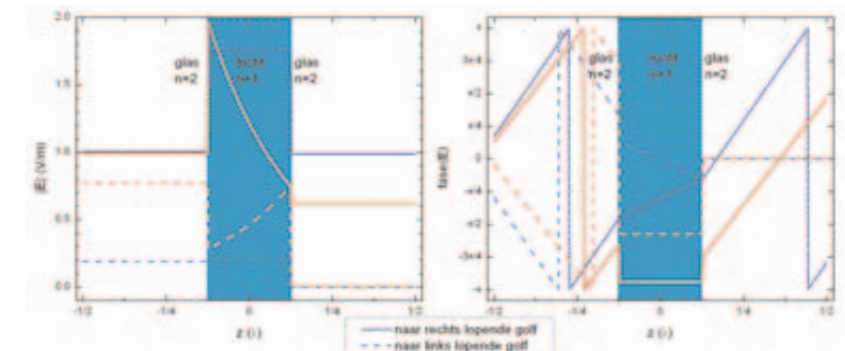


Figuur 2. a) Halve bol en b) Huygens configuratie.

Het probleem met deze aplanatische afbeeldingen is dat ze alleen binnen in de bol bestaan. Door de bol op de juiste dikte terug te slijpen, wat in figuur 2 is weergegeven, is het mogelijk om de afbeelding aan het oppervlak van de onderste glas-lucht overgang te leggen. Omdat we daar van glas naar lucht overgaan hebben we te maken met een grenshoek gegeven door  $\sin \theta_g = 1/n_{bol}$ . Golven met een invalshoek kleiner dan de grenshoek kunnen na breking aan het glas/lucht oppervlak zich verder voortplanten. Dit gebied vormt een kegel welke in figuur 2 in het blauw is weergegeven. Als de invalshoek groter wordt dan de grenshoek kunnen de golven zich niet meer voortplanten in lucht en is er sprake van totale interne reflectie. Dit is het rode gebied in figuur 2.

We beschouwen licht als elektromagnetische golven en niet als stralen omdat het stralenmodel tekortschiet in het beschrijven van wat er gebeurt voorbij de grenshoek bij totale interne reflectie. Door de Maxwell vergelijkingen met de juiste randvoorwaarden op te lossen kunnen we het elektrische veld van zo'n golf berekenen als het door een glas-lucht overgang gaat. Hieruit leren we dat de elektromagnetische golf, ook voorbij de grenshoek, bestaat in lucht. Deze zogenaamde evanescente golven transporteren in stationaire toestand echter geen energie door het oppervlak heen, maar planten zich voort parallel aan het oppervlak en vallen met een exponentieel verband af in een richting loodrecht op het oppervlak [3]. De amplitude van de evanescente golf valt binnen één tiende van de golflengte af tot minder dan 30%.

Als de evanescente golf wordt opgepikt door een tweede medium op een afstand van het oppervlak korter dan een fractie van de golflengte  $\lambda$ , kunnen we alsnog gebruik maken van de vergroting van de effectieve numerieke apertuur middels een aplanatische afbeelding. We kunnen dit laten zien door het veld van een elektromagnetische golf te berekenen voor twee overgangen: glas-lucht-glas. In figuur 3 laten we het elektrische veld zien voor twee golven die, met een amplitude  $E$  van 1 V/m, invallen op een luchtspleet van  $\lambda/4$  ingeklemd tussen twee media met een brekingsindex van  $n=2$ . Voor een golf met een hoek van  $0.8 \cdot \theta_g$  (de blauwe lijn) is de gereflecteerde naar links lopende golf relatief klein en zien we in de luchtspleet een faseverloop wat betekent dat de golf zich in lucht voortplant. Doordat op een overgang de  $z$ -component van  $n^2 \cdot E$  constant is (Maxwell vergelijkingen), is de amplitude van het elektrische veld groter in



Figuur 3. Het elektrische veld als functie van de  $z$ -coördinaat voor golf met een invalshoek  $0.8 \cdot \theta_g$  (blauw) en  $1.2 \cdot \theta_{gr}$  (rood).

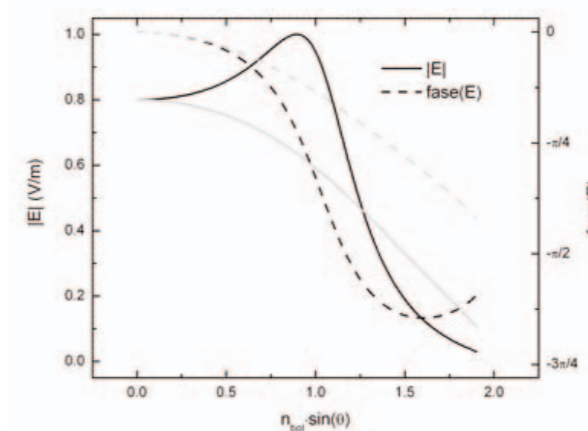
lucht dan in glas. Met een hoek voor de invallende golf van  $1.2 \cdot \theta_g$  (de rode lijn) is de amplitude van de naar links lopende gereflecteerde golf aanzienlijk groter. We zien ook dat de amplitude in lucht exponentieel afvalt in de richting loodrecht op het oppervlak (=  $z$ -richting) en dat de fase in lucht constant is. Dit betekent dat we te maken hebben met een zich niet voortplantende, evanescente golf.

Het tweede glazen medium is echter voldoende dichtbij om de exponentiële staart van het veld op te pikken waardoor in het glas weer een naar rechts lopende golf ontstaat. Er is dus energie de luchtspleet overgestoken! Dit effect is analoog aan wat er gebeurt bij het tunnelen van elektronen door een barrière in een elektronen tunneling microscoop [4].

## 3. ABERRATIES GEÏNTRODUCEERD DOOR DE LUCHTSPLEET

Als we voor dezelfde situatie als voorheen het veld uitrekenen als functie van de brekingsindex van het eerste medium maal de sinus van de invalshoek  $\theta$ , vinden we voor het veld dat zich in het tweede glazen medium voortplant de onderstaande grafiek. In deze grafiek geven de zwarte lijnen het veld weer voor p-polarisatie (licht gepolariseerd in het vlak van inval), en de witte lijnen voor s-polarisatie (polarisatie loodrecht op het vlak van inval).

In deze figuur is te zien dat behalve een verloop in amplitude er ook een sterk verloop in fase is die bovendien verschillend is voor de beide polarisaties. Dit betekent dat als de lens wordt aangestraald met lineair gepolariseerd licht er dan in het overgestoken elektromagnetische veld een aanzienlijke hoeveelheid astigmatisme ontstaat. Door niet met lineair maar met circu-



Figuur 4. Het elektrische veld als functie van  $n_{bol} \cdot \sin \theta$  in het tweede glazen medium, meteen nadat het de  $\lambda/4$ -luchtspleet is overgestoken. De p-polarisatie wordt weergegeven door de zwarte lijnen en s-polarisatie door de grijze lijnen. De absolute waarde van het elektrische veld wordt weergegeven door de doorgetrokken lijnen en de fase daarvan door de onderbroken lijnen.

lair gepolariseerd licht de lens aan te stralen wordt dit astigmatisme volledig onderdrukt<sup>3</sup>. Wat er dan nog overblijft zijn sferische aberratie en hogere orde sferische aberraties. De aanwezigheid

van de luchtspleet geeft dus aanleiding tot aberraties waar rekening mee moet worden gehouden en die zelfs bepalend kunnen zijn in de te maken systeem keuzes.

<sup>3</sup> Door gebruik te maken van lineair gepolariseerd licht wordt de rotatie symmetrie van de lens gebroken wat het genoemde astigmatisme maar ook andere niet rotatie symmetrische aberraties oplevert naast de aanwezige rotatie symmetrische aberraties. Met circulair gepolariseerd licht blijft de rotatie symmetrie behouden en blijven alleen de rotatie symmetrische aberraties over.

<sup>2</sup> In lucht!

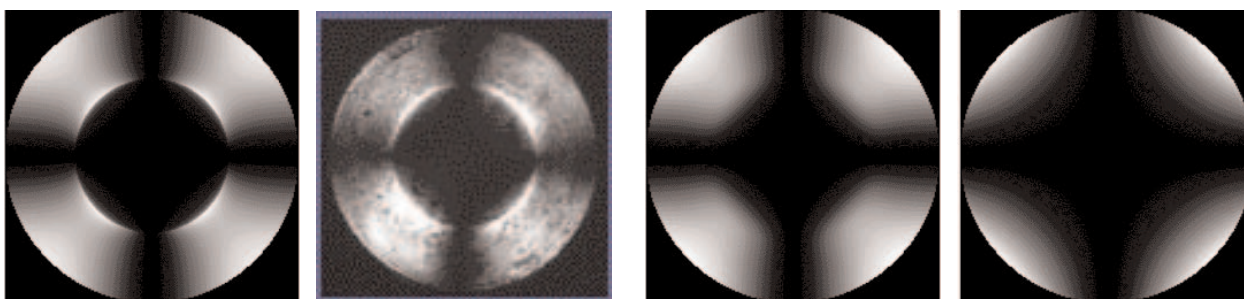
#### 4. NANOMETERS LUCHTSPLEET

Om voldoende intensiteit in te koppelen moet de onderkant van de SIL op 20~40 nm boven het oppervlak van de disk worden gebracht. Dat geldt voor zowel de  $NA=1.9$  als de  $NA=1.45$  lens. Om een idee te krijgen van deze minuscule dimensies stellen we ons het systeem een factor duizend vergroot voor. De SIL diameter wordt dan 1 meter en de lens moet dan op een afstand van 40  $\mu\text{m}$  (dunner dan een menselijk haar!) worden gebracht boven een disk met een diameter van 120 meter.

In een optische drive staat de disk bovendien niet stil maar draait met een lineaire snelheid (aan de rand) tot wel 60 km/uur onder de SIL door<sup>1</sup> en staat daarbij tot 40  $\mu\text{m}$  op en neer te zwabberen. De lens moet deze afstandsvariaties real-time kunnen volgen, waarbij de uiteindelijke luchtspleet constant wordt gehouden op, zeg, 30 nm, met een nauwkeurig

zich in lucht kan voortplanten en dus slechts weinig gereflecteerd word. De verhouding van de buitenste rand tot deze binnenste donkere ring geeft dan ook de numerieke apertuur van de lens weer,  $NA=1.9$  in dit geval. In de buitenste ring zien we een kruis ontstaan. Dit kruis ontstaat als volgt. Het licht met een invalshoek groter dan de grenshoek wordt totaal intern gereflecteerd. De polarisatie van de invallende bundel is langs de *horizontale* as van de pupil. Langs de horizontale as is het licht puur p-gepolariseerd waardoor in reflectie het licht horizontaal gepolariseerd blijft. Langs de verticale as echter hebben we te maken met pure s-polarisatie waardoor ook hier het gereflecteerde licht horizontaal gepolariseerd blijft.

Langs de diagonalen treedt er menging van s- en p-polarisatie op die verschillende fases hebben voor reflectie waardoor het gereflecteerde licht elliptisch gepolariseerd wordt. Als alleen de *verticale* polarisatie component wordt bekeken ontstaat er een kruis.



Figuur 5. Beelden van de afbeelding van de pupil voor het gereflecteerde en verticaal gepolariseerde licht voor a) een enkele glas-lucht overgang, b)  $\lambda/4$  en c)  $\lambda/20$  luchtspleet hoogte. Het beeld in het blauwe kader is een met een CCD-camera opgenomen, de overige beelden zijn berekend.

heid van enkele nm's. Om de plaat nauwkeurig te kunnen volgen is de objectieflens in een optische dataopslag systeem (in dit geval de combinatie objectieflens/SIL) in een elektromechanische actuator bevestigd. Door een stroom door de actuator te sturen kan de positie van de lens loodrecht op de disk nauwkeurig worden gevarieerd. Om dit te kunnen realiseren hebben we een signaal nodig dat de afstand tot de disk weergeeft en een elektronische regelaar die de actuator stuurt [5]. Hoe zo'n signaal tot stand komt staat hieronder uitgelegd.

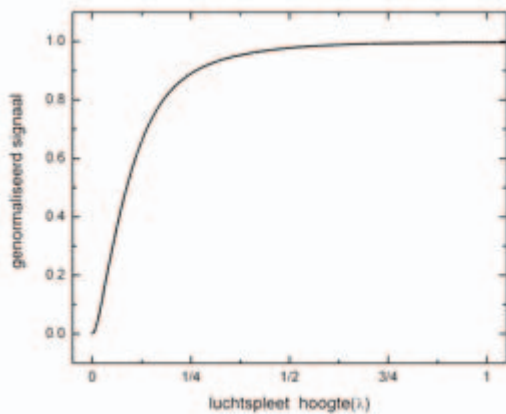
Een lens met daaronder een SIL wordt aangestraald met een *horizontaal* gepolariseerde bundel. Vervolgens splitsen we van het (aan de onderkant van de SIL) gereflecteerde licht de *verticaal* gepolariseerde component af en maken een afbeelding van de pupil van de lens. Een berekende versie van het zo verkregen beeld staat in figuur 5 weergegeven voor verschillende diktes van de luchtspleet.

In figuur 5 a) staat het beeld weergegeven voor een enkele glas-lucht overgang. De cirkel in het midden is donker omdat licht dat invalt met hoeken kleiner dan de grenshoek ( $NA < 1$ )

Als een derde medium in de nabijheid van het eerste wordt gebracht (figuur 5 b) en c)), kan een deel van de evanescente golf oversteken en verder propageren in het derde medium waardoor de reflectie kleiner wordt en het donkere gebied in het midden zich uitbreidt. Als de totale hoeveelheid licht over de pupil wordt opgeteld en genormaliseerd op de waarde voor het geval van een oneindige luchtspleet krijgen we een signaal zoals weergegeven in figuur 6. Dit zogenaamde GAP-error signaal is zeer geschikt om de hoogte van de SIL boven de disk te meten bij luchtspleten kleiner dan  $\lambda/2$ .

Voor circulair gepolariseerd licht kunnen we op dezelfde manier ditzelfde signaal maken. Het beeld ziet er echter heel anders uit. Omdat we langs de omtrek continu eenzelfde menging tussen de p- en s-polarisatie krijgen wordt het beeld rotatie symmetrisch met een lichte rand om een donker middendeel.

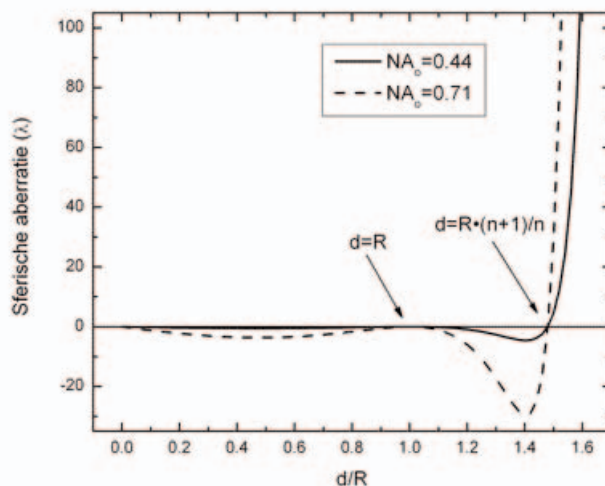
<sup>1</sup> Ter vergelijking in een 16x-DVD drive draait de plaat tot snelheden van 200 km/uur.



Figuur 6. Detector signaal als functie van de luchtspleet hoogte. De curve is berekend voor een  $NA=1.9$  lens met een  $n=2$  SIL boven  $n=2$  medium.

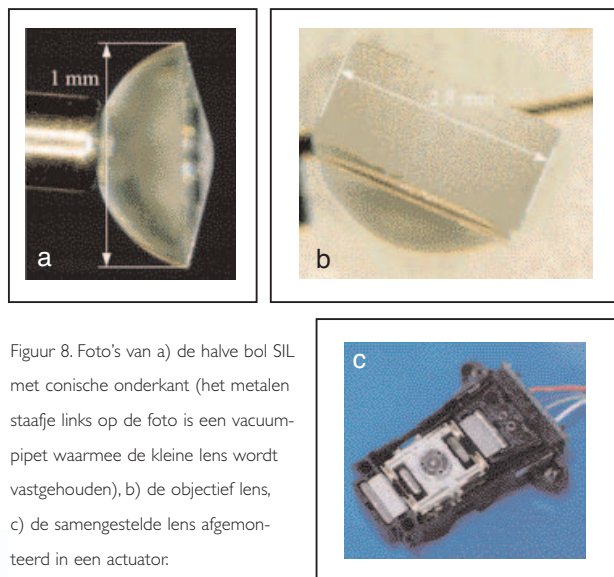
### 5. LENS ONTWERP EN FABRICAGE

In §2 zagen we dat er twee manieren zijn om een numerieke apertuur te realiseren groter dan de limietwaarde van 1 voor een lens in lucht. Middels de Huygens-aplanaat is het mogelijk extreem hoge waarden van bijvoorbeeld 1.9 te halen bij relatief kleine  $NA_0$ , terwijl dit voor de halve bol veel moeilijker is. In figuur 7 is de sferische aberratie als functie van de dikte  $d$  gedeeld door de straal  $R$  van de SIL weergegeven voor twee verschillende numerieke aperturen van de objectieflens boven de SIL, zie ook [6]. In de grafiek zijn de drie diktes terug te vinden waarvoor de sferische aberratie nul is, wat een deelvoorwaarde was voor het aplanaatisch zijn van een afbeelding. De afgeleide van de kromme op het punt  $d=R$  is nul wat betekent dat het totale lens ontwerp vrij tolerant zal zijn voor dikte fouten van de halve bol. Rondom het punt dat overeen komt met de Huygens aplanaat is de kromme zeer steil, hierdoor zal het lens ontwerp erg gevoelig zijn voor dikte fouten.



Figuur 7. Sferische aberratie als functie van de dikte gedeeld door de radius van een SIL een brekingsindex van  $n=2.1$ .

In de bestaande generaties optische dataopslag systemen is de data laag steeds beschermd geweest door een transparante laag van 1.2 mm voor CD, 0.6 mm voor DVD en 0.1 mm voor BD, zie figuur 1. De robuustheid van deze systemen is voor een groot deel te danken aan deze bescherm laag bijvoorbeeld doordat deze de laag waarin de data staat beschermt tegen krassen. Voor een systeem met  $NA>1$  moet de brekingsindex van deze laag minstens zo hoog zijn als de effectieve NA, anders komt het licht met  $\theta>\theta_g$  de laag niet in, laat staan door. De bescherm laag moet een minimale dikte hebben om als bescherm laag te kunnen werken, een dikte die een veelvoud van de golflengte is. Voor zover wij weten bestaan er geen materialen met een brekingsindex groter dan 1.7 die voldoende dik en op een eenvoudige wijze op een disk kunnen worden aangebracht. In een  $NA=1.9$  systeem is het dus vooralsnog niet mogelijk om een beschermende laag te gebruiken! Voor een  $NA<1.6$  lukt het wel om geschikte materialen te vinden die een voldoende hoge brekingsindex hebben.



Figuur 8. Foto's van a) de halve bol SIL met conische onderkant (het metalen staafje links op de foto is een vacuumpipet waarmee de kleine lens wordt vastgehouden), b) de objectieflens, c) de samengestelde lens afgemontereerd in een actuator.

We zijn begonnen met het ontwerpen en maken van een  $NA=1.9$  lens, welke dus werkt met een disk zonder bescherm laag. Met een radius van 0.5 mm wordt de tolerantie op de dikte van de SIL is  $\pm 0.1 \mu\text{m}$  op een totale dikte van 0.7397 mm. Deze tolerantie is zeer moeilijk te behalen met conventionele polijstmethode. Daarom worden deze SIL's teruggepolijst tot een dikte zo dicht mogelijk tegen de juiste waarde aan. Daarna wordt met behulp van een interferometer de hoeveelheid sferische aberratie gemeten. Tenslotte wordt bij de gemeten SIL een objectieflens gezocht die ongeveer evenveel sferische aberratie heeft maar dan van tegengesteld teken waardoor de samengestelde lens weer aberratie-vrij is.

De onderkant van de SIL is conisch geslepen zodat een tip ontstaat van ca.  $20\sim 40 \mu\text{m}$ . Dit is nodig omdat anders, al op

een afstand van 100 nm boven de disk, de SIL minder dan  $0.1/500=0.2$  mrad scheef mag staan t.o.v. de plaat voordat de rand van de SIL (diameter 1 mm) de disk raakt.

Met een tipdiameter van  $40\ \mu\text{m}$  wordt dit al  $0.04/20=2$  mrad op een hoogte van 40 nm, een factor 10 winst op een  $2^{1/2}$  keer zo kleine afstand.

Vanwege de krappe tolerantie op de dikte en het ontbreken van de mogelijkheid om een beschermlaag op de disk te zetten voor de  $\text{NA}=1.9$  lens hebben we ook een  $\text{NA}=1.45$  lens ontworpen en gemaakt, zie de foto's in figuur 8.

Deze lens is ontworpen voor een beschermlaag met een dikte van  $3\ \mu\text{m}$  en een brekingsindex van 1.58. De lagere NA maakt dat de te behalen dichtheid lager is vergeleken met de  $\text{NA}=1.9$  lens. Echter deze lens kan ook twee lagen met data lezen en/of beschrijven, analoog aan dubbellaags DVD en BD, waardoor de capaciteit per disk weer vergelijkbaar wordt met het  $\text{NA}=1.9$  systeem waarvoor geen meerlaags oplossingen mogelijk zijn.

De diktetolerantie van de 'halve bol' SIL voor de  $\text{NA}=1.45$  lens bedraagt  $10\ \mu\text{m}$  wat goed haalbaar is met conventionele polijsttechnieken. Dit is een belangrijk voordeel ten opzichte van de 'Huygens'  $\text{NA}=1.9$  SIL.

## 6. EXPERIMENTELE RESULTATEN

Er is een opstelling gebouwd waarmee platen kunnen worden uitgelezen en beschreven. Een foto van deze opstelling is te zien in de figuur hiernaast.

Zoals op deze foto te zien is werken we in een niet-geconditioneerde laboratoriumruimte. Er zijn geen speciale voorzieningen getroffen om stofarm te kunnen werken. Desondanks is het mogelijk om in deze 'stoffige' omgeving tot op hoogtes van 20 nm de disk te naderen met onze lenzen terwijl de disk draait. Daarbij werken we met polycarbonaat substraten vergelijkbaar met de substraten die nu voor Blu-ray Disc worden gebruikt zonder de  $100\ \mu\text{m}$  beschermlaag.

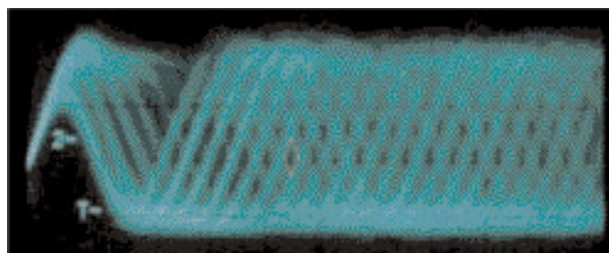
In de rode cirkel staat een monitor waarop het gap-error signaal, zoals beschreven in sectie 4, is weergegeven. Door dit licht te integreren op een enkele detector krijgen we het signaal voor de hoogte van de luchtspleet. Zoals aan dit beeld is te zien is het licht in de opstelling lineair gepolariseerd. Het is echter ook mogelijk om met circulair gepolariseerd licht te werken door een  $\lambda/4$ -plaat voor de objectief lens te plaatsen.

Op de andere monitor, in de blauwe cirkel, staat de afbeelding voor het parallel gepolariseerde licht. Hierin bevinden zich de data- en spoorvolgfout- signalen.

Met behulp van deze opstelling met daarin een  $\text{NA}=1.9$  lens hebben we op een polycarbonaat plaat met een spoorsteek van 160 nm data met een dichtheid overeenkomend met 50GB geschreven. Door de data terug te lezen ontstaat er een signaal dat een patroon laat zien zoals in figuur 10. Hierbij zijn meerdere oscilloscoop traces over elkaar heen gelegd. Zo'n patroon wordt ook wel een oogpatroon genoemd. Als de ogen in het patroon "voldoende open" zijn (dat wil zeggen: de signaal-ruis verhouding voldoende groot is) is het mogelijk om het oorspronkelijke signaal te reconstrueren en de data terug te lezen.



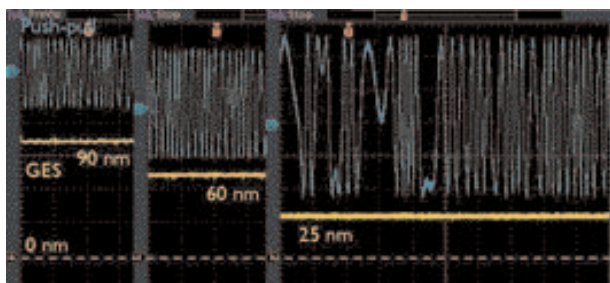
Figuur 9. Foto van de opstelling.



Figuur 10. Oogpatroon van een enkellaags 50GB datapatroon uitgelezen m.b.v. een  $\text{NA}=1.9$  lens.

Deze data is geschreven in een laag die aan het oppervlak van de disk ligt. Inmiddels hebben we deze aanpak verlaten en zijn we overgegaan op de  $\text{NA}=1.45$  lens waarbij de data laag beschermd wordt door een  $3\ \mu\text{m}$  dikke laklaag.

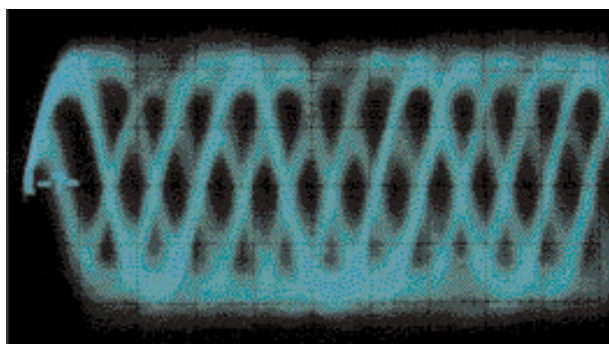
In figuur 11 staat voor verschillende hoogtes van de luchtspleet het foutsignaal voor de spoorvolgving weergegeven (gebaseerd op het principe van push-pull detectie, zie [7]). Het foutsignaal wordt groter naarmate de hoogte kleiner wordt.



Figuur 11. Het spoorvolgfout signaal (Push-pull) voor verschillende hoogtes van de luchtspleet.

Dit komt doordat de koppeling van de evanescente golven beter wordt naarmate de afstand tussen de SIL en de plaat kleiner wordt.

In de onderstaande figuur staat een mooi open oogpatroon van data op een ROM-plaat met een  $3\ \mu\text{m}$  beschermlaag, die met de  $\text{NA}=1.45$  lens is gelezen.



Figuur 12. Terug gelezen data signaal van een ROM-plaat met een  $3\ \mu\text{m}$  beschermlaag en een  $170\ \text{nm}$  spoorsteek.

De spoorsteek van de data op deze plaat is  $170\ \text{nm}$  welke alleen op te lossen is met een  $\text{NA}>1.2$ . Hiermee is voor het eerst aangetoond dat het mogelijk is om met een  $\text{NA}>1$  door een beschermlaag heen te lezen.

## 9. REFERENTIES

- [1] V.N. Mahajan, *Optical Imaging and Aberrations: Part 1*, §5.4, 1<sup>ste</sup> editie (SPIE Optical Eng. Press 1998)
- [2] S.M. Mansfield et al., *Solid immersion microscope*, *App.Phys.Lett.* **57** (1990) 2615-2616
- [3] M. Born and E. Wolf, *Principles of Optics*, §1.5.4, 7<sup>de</sup> editie (Cambridge University Press 2003)
- [4] P.K. Hansma et al., *Scanning Tunneling Microscopy*, *J.Appl.Phys.* **61** (1987) R1-23
- [5] J.I. Lee et al., *Development of an Air Gap Servo System for High Data Transfer Rate Near Field Optical Recording*, *Jpn. J. Appl. Phys.* **44** (2005) 3423-3426
- [6] Y. Zhang et al., *Advanced Lens Design for Bit-Wise Volumetric Optical Data Storage*, *J.Appl.Phys.* **43** (2004) 4929-4936
- [7] J.J.H.B. Schleipen et al., *Optical Heads in Encyclopedia of Optical Engineering*, Vol 2, pp 1684-1687 (Marcel Dekker, Inc 2003)

## 7. CONCLUSIES

Het is mogelijk om een nieuwe stap in opslagcapaciteit voor optische dataopslag te maken door gebruik te maken van lenzen met een numerieke apertuur groter dan één. We richten ons hierbij op een capaciteit van meer dan  $150\ \text{GB}$  op een  $12\ \text{cm}$  disk.

Het eerste pad waarbij een lens met een extreem hoge  $\text{NA}$  van  $1.9$  werd gebruikt is inmiddels verlaten omdat het dan niet mogelijk is de data te beschermen met behulp van een 'dikke' transparante laag.

Momenteel bewandelen we een tweede weg met een lens van  $\text{NA}=1.45$  en een  $3\ \mu\text{m}$  beschermlaag, waarbij de eerste experimentele resultaten veelbelovend zijn.

We hebben laten zien dat het mogelijk is om met behulp van een nieuw signaal, het gap-error signaal, in combinatie met een conventionele actuator een lens op afstanden van  $25\sim 90$  nanometer boven een draaiende disk te brengen en te houden. En, dat lukt in een 'normale' laboratorium omgeving dat wil zeggen niet stof arm!

## 8. DANKWOORD

We danken Frans van Gaal en Peter de Haas voor hun technische ondersteuning. Jean Schleipen, Alexander van der Lee en Jos van Haaren willen we bedanken voor het kritisch lezen van dit artikel. ♦