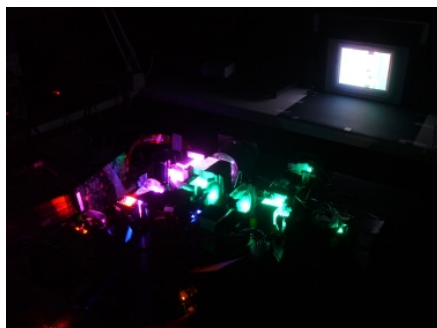


Nieuwe optische architecturen voor op LED gebaseerde LCOS-projectoren

Novel Optical Architectures for LED-based LCOS Projectors

Ir. Hüseyin Murat



Promotor: prof. dr. ir. H. De Smet
Proefschrift ingediend tot het behalen van de graad van
Doctor in de Ingenieurswetenschappen: Elektrotechniek

Vakgroep Elektronica en Informatiesystemen
Voorzitter: prof. Dr. Ir. J. Van Campenhout
Faculteit Ingenieurswetenschappen
Academiejaar 2008-2009



ISBN 978-90-8578-255-1
NUR 959
Wettelijk depot: D/2009/10.500/13

Promotor:

Prof. dr. ir. H. De Smet

Onderzoekseenheid CMST
Vakgroep Elektronica en Informatiesystemen
Technologiepark 914
B-9052 Zwijnaarde

Dankwoord

Dit proefschrift is de neerslag van mijn onderzoek uitgevoerd aan de vakgroep Elektronica en Informatiesystemen binnen de onderzoekseenheid CMST. Om dit werk tot een goed einde te brengen, heb ik de hulp en ondersteuning van heel wat mensen kunnen gebruiken. Alvorens ik overga naar de wetenschappelijke beschrijving van het werk, wil ik hier eerst deze mensen vermelden en vooral bedanken.

Allereerst wil ik mijn promotor Herbert De Smet bedanken. Zonder hem zou dit werk niet gelukt zijn. Hij stond steeds klaar met goede raad bij de diverse wetenschappelijke obstakels die ik ben tegengekomen in de voorbije jaren. Hij maakte steeds tijd vrij voor mij en was enorm geïnteresseerd in mijn onderzoek. Het vertrouwen dat hij in mij stelde, heeft me een duw in de rug gegeven in de moeilijke periodes van het onderzoek. Daarnaast wil ik vanzelfsprekend ook André Van Calster, groepsleider van CMST, bedanken voor de kans die ik gekregen heb om dit doctoraat te mogen doen. Ik wil hem ook nog bedanken voor de toffe werksfeer en leuke activiteiten buiten het werk die hij mogelijk gemaakt heeft.

Eén van de personen die een speciale vermelding verdient; is zonder twijfel Dieter Cuypers. Ik heb hem nooit ‘nee’ horen antwoorden op de vraag die ik zo dikwijls stelde: “Mag ik je even storen?” Bedankt Dieter. Ik wil hier ook iedereen bedanken die mij ondersteuning verleende in de cleanroom. Hierbij denk ik vooral aan Nadine Carchon, Kristof Dhaenens, An Gielen, Peter Geerinck, Björn Vandecasteele en Bert De Roo.

De leuke werksfeer was er niet geweest zonder de bureaugenoten: San Lam, Kristof Dhaenens, Roel Beernaert en Aykut Avci. Zij hebben niet enkel voor een leuke sfeer gezorgd maar uit vele wetenschappelijke en pseudowetenschappelijke discussies heb ik veel bijgeleerd. Soms waren de discussies zeer hevig, maar dat heeft onze vriendschap alleen maar versterkt.

De interculturele middagpauzes gaan me zeker bijblijven. Bedankt collega's, wat zeg ik, vrienden voor alles.

De officiële en informele samenwerking met VUB verliep zeer goed. Hierbij wil ik voornamelijk Lawrence Bogaert, Youri Meuret en Bart Van Giel bedanken voor de goede samenwerking en uitwisseling van kennis en componenten. Ook de mensen van BARCO, waaronder Bart Maximus, Gert Stuyven, Rik Defever, Michael Mertens en Andy De Mets, wil ik bedanken voor de samenwerking en hun geloof en enthousiasme voor dit onderzoeksproject.

De mensen die mij ondersteuning gegeven hebben bij technische en praktische zaken mag ik zeker niet vergeten. Peter Sebrechts wil ik bedanken voor het up-to-date houden van de computerinfrastructuur, persoonlijke gesprekken en adviezen, de lifts naar het station na lange werkdagen, etc. Luc Haentjens (van INTEC) en Filip Thielemans, de maestro's van het atelier, verdienen zeker een dank voor het realiseren van heel wat in huis ontworpen optische en mechanische componenten die essentieel waren voor de bouw van de demonstratoropstelling. Katrien Vanneste, onze secretaresse, wil ik ook bedanken voor al het paperassen werk en de moeite die ze voor mij deed om een aangepast menu te laten samenstellen bij CMST-etentjes.

Een speciaal dankwoord gaat uit naar alle andere mensen van de onderzoekseenheid CMST voor hun vriendelijkheid en behulpzaamheid.

Ik wil ook mijn goede vriend Kris Demoor bedanken voor het nalezen van dit proefschrift en het aanbrengen van de nodige taalcorrecties.

Natuurlijk mag ik mijn ouders niet vergeten. Ze zijn me steeds blijven steunen en hebben me aangemoedigd in moeilijke tijden. Ik kan hen niet genoeg bedanken voor de liefde, steun en vertrouwen die ze me de voorbije eenendertig jaar gegeven hebben.

Ten slotte wil ik ook nog mijn vrouw Fatma en mijn dochtertje Feyza bedanken. Het geluk dat ze mij bezorgd hebben, heeft ertoe geleid dat ik zorgeloos aan dit onderzoek kon werken en met succes kon afronden.

Hüseyin Murat,

Antwerpen, 1 november 2008.

Inhoudsopgave

| | |
|---|----------|
| Hoofdstuk 1: Inleiding | 1 |
| 1 Geschiedenis van projectiesystemen | 1 |
| 2 Bespreking van projectorarchitectuur..... | 6 |
| 2.1 Definities | 6 |
| 2.1.1 Étendue | 6 |
| 2.1.2 Het f-getal | 8 |
| 2.2 Systeemarchitectuur..... | 9 |
| 2.2.1 Illuminatiesysteem | 10 |
| 2.2.2 Lenzensysteem..... | 12 |
| 2.2.3 Modulatie | 14 |
| 2.2.4 Projectie | 16 |
| 3 Lichtkleptechnologieën | 17 |
| 3.1 MEMS-technologie: DMD-lichtklep..... | 17 |
| 3.2 Vloeibaar-kristaltechnologie..... | 20 |
| 3.2.1 De transmissieve LCD-lichtklep..... | 20 |
| 3.2.2 De reflectieve LCOS-lichtklep | 23 |
| 4 Lichtbronnen | 29 |
| 4.1 Een klassieke projectielichtbron:de UHP-lamp..... | 29 |
| 4.2 Alternatieve lichtbronnen | 32 |
| 4.2.1 LED..... | 32 |
| 4.2.2 Laser..... | 34 |

| | | |
|---|--|-----------|
| 5 | Situering van dit onderzoek..... | 37 |
| | Referenties | 39 |
| Hoofdstuk 2: Belichtingssystemen met LED's | | 43 |
| 1 | LED als lichtbron | 43 |
| 2 | LED-merken | 47 |
| 2.1 | Luxeon (Lumileds) | 47 |
| 2.2 | OSTAR (OSRAM) | 48 |
| 3 | Lichtcollectie en homogenisatie | 49 |
| 3.1 | Commerciële collectielenzen..... | 49 |
| 3.2 | Ontwerp van collectiereflectoren..... | 55 |
| 3.2.1 | Parabolische reflector | 56 |
| 3.2.2 | Elliptische reflector..... | 59 |
| 3.2.3 | Resultaten reflectoren | 63 |
| 3.3 | Alternatieve collectiecomponenten | 64 |
| 3.3.1 | 'Tapered Light Pipe'-model..... | 64 |
| 3.3.2 | Gradually Tapered Light Pipe..... | 66 |
| 3.3.3 | Multi-LED-systemen met GTLP | 68 |
| 3.4 | Besluit belichtingssysteem | 70 |
| 4 | LED gebaseerde illuminatiesysteem met GTLP's..... | 70 |
| 4.1 | Simulatie GTLP voor 0.82" lichtklep..... | 71 |
| 4.2 | Fabricage | 73 |
| 4.3 | Experimentele waarnemingen | 74 |
| 4.3.1 | Collectie-efficiëntie binnen het gewenste f-getal..... | 74 |
| 4.3.2 | Polarisatie recuperatie systeem..... | 76 |
| 4.3.3 | Étendue recuperatie systeem..... | 77 |
| 5 | Besluit..... | 79 |
| | Referenties | 81 |

Hoofdstuk 3: Intelligente methodes voor luminantieverhoging ... 83

| | | |
|-------|--|-----|
| 1 | Introductie | 83 |
| 2 | Luminantieverhoging door afwisselend pulsen van meerdere LED's | 85 |
| 2.1 | Principe | 85 |
| 2.2 | Configuraties | 86 |
| 2.2.1 | Met bewegende onderdelen | 87 |
| 2.2.2 | Zonder bewegende onderdelen | 90 |
| 2.3 | Realisaties | 92 |
| 2.3.1 | Twee gepulste LED's met halfspiegelende schijf..... | 93 |
| 2.3.2 | Twee gepulste LED's met PBS..... | 96 |
| 2.4 | Besluiten | 104 |
| 3 | Levensduurmeting van gepulste LED's | 105 |
| 3.1 | Testopstelling..... | 105 |
| 3.2 | Resultaten | 107 |
| 4 | Colorimetrische verschijnselen onder gestreste toestand | 109 |
| 4.1 | Kleurverschuivingen gepulste LED's..... | 109 |
| 4.1.1 | Het experiment..... | 110 |
| 4.1.2 | Besluit..... | 113 |
| 4.2 | Saturatiestromen bij verschillende duty cycles..... | 113 |
| 4.3 | Wall-plug-efficiëntie en uitkoppeling bij Luxeon LED's.... | 119 |
| 5 | Enkele conclusies | 121 |
| | Referenties | 123 |

Hoofdstuk 4: Projectie-architecturen..... 125

| | | |
|---|---------------------------|-----|
| 1 | Inleiding..... | 125 |
| 2 | 3-LCOS-architectuur | 126 |

| | | |
|-------|---|-----|
| 2.1 | Beschrijving simulatiemodel en veronderstellingen..... | 126 |
| 2.2 | Simulaties en resultaten | 131 |
| 2.3 | Besluit en kanttekeningen..... | 136 |
| 3 | 2-LCOS-architectuur | 137 |
| 3.1 | Systeembeschrijving en veronderstellingen..... | 137 |
| 3.2 | Architectuur | 139 |
| 3.2.1 | Belichtingssysteem voor LED's met GTLP..... | 140 |
| 3.2.2 | Groene kanaal | 141 |
| 3.2.3 | Rode/blauwe kanaal..... | 143 |
| 3.2.4 | Volledige architectuur..... | 144 |
| 3.3 | Simulaties en resultaten | 145 |
| 3.3.1 | Optische efficiëntie, uniformiteit en contrast..... | 145 |
| 3.3.2 | OSTAR LED's en kleurbalancering | 148 |
| 3.3.3 | Resultaten..... | 149 |
| 3.3.4 | Besluit | 150 |
| 3.4 | Experimentele opstelling | 151 |
| 3.4.1 | Mechanisch ontwerp | 151 |
| 3.4.2 | QXGA LCOS-paneel..... | 154 |
| 3.4.3 | Aanpassing balder-bord voor kleursequentieel werking | 157 |
| 3.4.4 | Gammacorrectie..... | 159 |
| 3.4.5 | De sync-puls | 161 |
| 3.5 | Elektronische aansturing..... | 162 |
| 3.5.1 | LED-schakelingen | 163 |
| 3.5.2 | FLC-schakeling..... | 164 |
| 3.5.3 | Vertragingsschakeling..... | 166 |
| 3.5.4 | Pulsduurbepaling (ADC) | 167 |
| 3.5.5 | Microcontroller: coördinatie van subsystemen | 168 |

| | | |
|-------|--|-----|
| 3.6 | Experimentele resultaten | 171 |
| 3.6.1 | Karakterisatie optische componenten | 171 |
| 3.6.2 | Afregeling kleurbalans en opmeten van experimentele performanties | 174 |
| 3.6.3 | Beelduniformiteit | 180 |
| 3.6.4 | Contrastproblematiek | 181 |
| 3.6.5 | Bespreking resultaten 2-LCOS-projector | 190 |
| 3.7 | Toekomstperspectieven: verdere optimalisatie | 193 |
| 3.8 | Besluit: 2-LCOS-projector | 196 |
| 4 | Algemeen besluit | 197 |
| | Referenties | 199 |

Hoofdstuk 5: Besluiten en toekomstperspectieven.....203

| | | |
|---|------------------------------|-----|
| 1 | Besluiten | 203 |
| 2 | Verdere optimalisaties | 207 |
| 3 | Algemeen besluit | 208 |

Publicatielijst209

Bijlagen A: Fundamentele begrippen en grootheden213

| | | |
|-----|--|-----|
| 1 | Grootheden en eenheden | 213 |
| 1.1 | Radiometrische (energetische) grootheden | 213 |
| 1.2 | Fotometrische grootheden | 214 |
| 2 | Termen en begrippen | 215 |

Bijlagen B: Kleurentheorie221

| | | |
|---|------------------------------|-----|
| 1 | De kleurwaarneming | 221 |
| 2 | CIE-1931-kleurfuncties | 222 |

| | | |
|---|--|------------|
| 3 | De kleurberekening | 223 |
| 4 | Het kleurendiagram | 225 |
| 5 | De kleurtemperatuur | 227 |
| Bijlagen C: Demonstratoropstelling met aanstuurelektronica ... | | 229 |
| 1 | Foto's van de demonstratoropstelling | 229 |
| 2 | Foto's van de aanstuurelektronica | 233 |
| 3 | Broncode van de microcontroller | 237 |
| Bijlagen D: Foto's geprojecteerde beelden | | 239 |
| 1 | Beelden zonder omgevingslicht | 239 |
| 1.1 | Foto's bewegende beelden..... | 239 |
| 1.2 | Foto's stilstaande beelden..... | 242 |
| 2 | Beelden met omgevingslicht | 244 |
| 2.1 | Foto's bewegende beelden..... | 244 |
| 2.2 | Foto's stilstaande beelden..... | 244 |

Lijst van tabellen

| | | |
|-----|---|-----|
| 1.1 | Overzicht van de verschillende applicaties van projectiesystemen..... | 5 |
| 1.2 | Gegevens van enkele typische projectielampen..... | 30 |
| 2.1 | Parameters van Luxeon LED's (groen) | 48 |
| 2.2 | Simulatieresultaten van systemen met collectiereflectoren | 63 |
| 2.3 | Simulatieresultaten GTLP | 72 |
| 2.4 | Resultaten polarisatie recuperatie | 77 |
| 3.1 | Experimentele resultaten van in anti-fase gepulste LED's met draaiwiel..... | 96 |
| 3.2 | Samenvatting formules efficiëntie, winst en verliezen | 100 |
| 3.3 | Resultaten voor 50% duty cycle (Luxeon LED)..... | 100 |
| 3.4 | Resultaten voor 33% duty cycle..... | 102 |
| 3.5 | Resultaten colorimetrische verschuivingen t.g.v. het overpulsen | 111 |
| 3.6 | Samenvatting resultaten saturatiestroom metingen..... | 117 |
| 3.7 | Wall-plug-efficiënties Luxeon III en OSTAR LED's..... | 119 |
| 4.1 | Parameters gesimuleerde PBS | 130 |
| 4.2 | Parameters gesimuleerde LED's..... | 132 |

| | | |
|------|---|-----|
| 4.3 | Samenvatting van de verliezen doorheen het systeem..... | 133 |
| 4.4 | Samenvatting uniformiteiten belichting lichtkleppen | 135 |
| 4.5 | Parameters gesimuleerde PBS | 138 |
| 4.6 | Simulatie resultaten systeemefficiëntie en contrast | 146 |
| 4.7 | Resultaten ANSI-uniformiteit LCOS-panelen | 147 |
| 4.8 | Samenvatting beschikbare lichtopbrengst LED's en kleur- balancerings..... | 148 |
| 4.9 | Gebalanceerde lichtopbrengst 2-LCOS-projector..... | 149 |
| 4.10 | Parameters HELF PBS voor $f^{\#}$ van 2.88 | 172 |
| 4.11 | Vergelijking tussen simulatie- en experimentele efficiënties | 173 |
| 4.12 | Vergelijking tussen gesimuleerde en opgemeten LED fluxen | 176 |
| 4.13 | Simulatie versus experimentele projector performanties..... | 177 |
| 4.14 | Resultaten ANSI-uniformiteit geprojecteerd beeld..... | 181 |
| 4.15 | Resultaten contrastmeting projector opstelling..... | 189 |
| A.1 | Overzicht van de belangrijkste radiometrische en fotometrische grootheden..... | 214 |

Lijst van figuren

| | | |
|------|--|----|
| 1.1 | Het werkingsprincipe van het eerste elektronische projectiesysteem..... | 3 |
| 1.2 | Eidophor: de eerste lichtklepprojector | 4 |
| 1.3 | Een elementaire stralenbundel | 7 |
| 1.4 | Brandpuntsafstand f , diameter D en aanvaardingshoek α van een lens | 9 |
| 1.5 | De bouwblokken van een elektronisch projectiesysteem..... | 9 |
| 1.6 | Homogenisatie door ontstaan van virtuele bronnen bij een integratorpijp..... | 11 |
| 1.7 | Een optisch systeem met lensarrays om een rechthoekige, uniforme lichtverdeling te verkrijgen | 12 |
| 1.8 | Lenzensysteem 1-op-1-afbeelding | 13 |
| 1.9 | Principe van verschillende types lichtkleppen: a) transmissief (LCD) b) reflectief (LCOS) c) reflectief (DMD)..... | 15 |
| 1.10 | Het werkingsprincipe van een DMD-spiegel (links) en een 3x3 pixel DMD-paneel (rechts) | 18 |
| 1.11 | Doorsnede van een transmissief LCD..... | 21 |
| 1.12 | Actieve matrix aansturing | 21 |
| 1.13 | Werking LCD-paneel: a) aan-pixel b) uit-pixel..... | 22 |
| 1.14 | Doorsnede van een LCOS-pixel | 24 |
| 1.15 | Het gedrag van een VAN-mode LCOS-pixel | 27 |

| | | |
|------|---|----|
| 1.16 | UHP-lamp met de vlamboog..... | 30 |
| 1.17 | UHP-lamp gebaseerde projectie-architectuur | 31 |
| 1.18 | Haitz wetmatigheid | 34 |
| 2.1 | 3-paneel-LCOS-projector met UHP-lamp | 44 |
| 2.2 | 3-paneel-LCOS-projector met LED's..... | 45 |
| 2.3 | Een belichtingssysteem met UHP-lamp..... | 46 |
| 2.4 | Luxeon LED: foto (links) en voorstelling interne structuur (rechts) | 48 |
| 2.5 | OSTAR LED: 2x3-module (links) en close-up van één chip (rechts) | 49 |
| 2.6 | Commerciële collectielenzen: a) collimator lens b) Narrow Beam lens c) Narrow Beam Low Profile lens..... | 50 |
| 2.7 | Meetopstelling voor het bepalen van de hoekverdeling..... | 51 |
| 2.8 | Angulaire verdeling Luxeon III-collectielens combinatie | 52 |
| 2.9 | Gecollecteerde lichtflux binnen een bepaalde hoekkegel | 53 |
| 2.10 | Gecollecteerde lichtflux in functie van étendue..... | 54 |
| 2.11 | Geometrische overlap tussen de collectielenzen en de lichtpijp: a) Luxeon III b) Luxeon V..... | 55 |
| 2.12 | a) een parabool b) het werkingsprincipe c) parabolische reflector..... | 57 |
| 2.13 | Belichtingssysteem met vier Luxeon III LED's en parabolische reflectoren: a) LED/reflector-combinatie b) bovenaanzicht c) 3D-beeld | 58 |
| 2.14 | a) een ellips b) elliptische reflector c) het werkingsprincipe | 59 |
| 2.15 | Belichtingssysteem met vier Luxeon III LED's en elliptische reflectoren: a) bovenaanzicht b) 3D-beeld c) ruimtelijke lichtverdeling na de pijp..... | 61 |

| | | |
|------|--|----|
| 2.16 | Belichtingssysteem met twee OSTAR LED's en elliptische reflectoren: a) bovenaanzicht b) 3D-beeld c) ruimtelijke lichtverdeling na de pijp..... | 62 |
| 2.17 | Belichtingssysteem met vier OSTAR LED's en elliptische reflectoren: a) bovenaanzicht b) 3D-beeld c) ruimtelijke lichtverdeling na de pijp..... | 63 |
| 2.18 | Reflectieprincipe aan de wand van een getaperde lichtpijp | 65 |
| 2.19 | CPC met randstralen | 67 |
| 2.20 | Een GTLP-structuur..... | 67 |
| 2.21 | Belichting rechthoekige uitgang GTLP | 68 |
| 2.22 | a) belichtingssysteem met twee OSTAR LED's en GTLP's b) ruimtelijke lichtverdeling na GTLP's | 69 |
| 2.23 | Oorsprong van verliezen van de gesimuleerde GTLP | 72 |
| 2.24 | a) Gefreesde GTLP b) gepolijste GTLP + LED-opstelling | 74 |
| 2.25 | Meetopstelling voor het bepalen van collectie efficiëntie GTLP | 75 |
| 2.26 | Opgemeten efficiëntie gerelateerd naar gesimuleerde efficiëntie | 75 |
| 2.27 | Opgemeten relatieve helderheidsverhoging i.f.v. fractie spiegelend oppervlak achter de GTLP | 78 |
| 3.1 | Combinatieprincipes gebaseerd op: a) de spectra b) de polarisatie c) het pulsen | 84 |
| 3.2 | Kleursequentiële architectuur met a) UHP-lamp b) LED's | 85 |
| 3.3 | Het principe van een gepulst systeem met twee LED's..... | 86 |
| 3.4 | LED-carrousel met a) roterende LED's b) roterende spiegel ... | 87 |
| 3.5 | Oplossing met twee pulserende LED's in anti-fase | 89 |
| 3.6 | Uitbreiding naar vier LED's met 25% duty cycle..... | 89 |

| | | |
|------|---|-----|
| 3.7 | a) het gepulst systeem met twee LED's, PBS en FLC b) uitbreiding van dit systeem naar 4 LED's | 90 |
| 3.8 | Een methode voor luminantieverhoging bij DMD's..... | 92 |
| 3.9 | Pulsefficiëntie in functie van duty cycle | 93 |
| 3.10 | Het gesegmenteerde wiel | 94 |
| 3.11 | Demonstratoropstelling..... | 95 |
| 3.12 | De meetopstelling | 97 |
| 3.13 | Lichtopbrengst van nominale en gepulste LED | 101 |
| 3.14 | Lichtopbrengst van gepulst systeem ten opzichte van nominaal aangestuurd systeem..... | 101 |
| 3.15 | Systeem met vier alternerende gepulste LED's (25%) | 103 |
| 3.16 | Relatieve lichtoutput in functie van de tijd | 108 |
| 3.17 | CIE-1931-kleurendiagram met de gevormde kleurendriehoek | 110 |
| 3.18 | Recuperatie effect na een tijdje inactiviteit LED | 112 |
| 3.19 | Flux-stroom-karakteristiek bij verschillende duty cycles | 116 |
| 3.20 | Saturatiestroom en optisch vermogen bij I_{sat} in functie van duty cycle | 118 |
| 4.1 | 3-LCOS-architectuur: a) het vooraanzicht b) het bovenaanzicht c) een close-up van PBS en LCOS-paneel d) het 3D zicht van de projector | 127 |
| 4.2 | Stralingspatroon OSTAR LED en een perfecte Lambertiaanse straler | 128 |
| 4.3 | CIE-kleurendiagram met de gevormde kleurendriehoek | 132 |
| 4.4 | Ruimtelijke lichtverdeling op rode, groene en blauwe LCOS- paneel..... | 135 |

| | | |
|------|--|-----|
| 4.5 | Ruimtelijke lichtverdeling op rode, groene en blauwe LCOS-paneel (grafiek van een doorsnede) | 135 |
| 4.6 | Architectuur 2-LCOS-projector | 140 |
| 4.7 | Het groene kanaal | 142 |
| 4.8 | Het blauwe/rode kanaal..... | 143 |
| 4.9 | Lichtdistributies op de LCOS-panelen: a) groen 1 b) groen 2 c) rood d) blauw | 147 |
| 4.10 | Opstelling 2-LCOS-projector..... | 152 |
| 4.11 | 2-LCOS-demonstrator..... | 154 |
| 4.12 | Voorstelling tijdsdiagram LCOS-belichting | 156 |
| 4.13 | Tijdsdiagram van een geval met ‘color bleeding’ | 156 |
| 4.14 | Gamma curven voor een CRT | 160 |
| 4.15 | Gamma behandeling van het videosignaal..... | 161 |
| 4.16 | Positie van de sync-puls..... | 161 |
| 4.17 | Blokdiagram elektronische aansturing..... | 162 |
| 4.18 | De LED-schakeling..... | 164 |
| 4.19 | De FLC-schakeling | 165 |
| 4.20 | Schema vertragingsschakeling sync-puls..... | 166 |
| 4.21 | Werking monostabiele operatie mode 555..... | 167 |
| 4.22 | ADCs voor bepaling pulsduur blauwe en rode LED | 168 |
| 4.23 | Blokdiagram elektronische aansturing..... | 168 |
| 4.24 | Assembler programma die de coördinatie realiseert in de microcontroller..... | 169 |
| 4.25 | Reactieverloop LCOS: geval 1 (links), geval 2 (rechts) | 175 |
| 4.26 | Het spectrum van het ingestelde witpunt | 179 |
| 4.27 | CIE-kleurendiagramma met gevormde kleurendriehoek | 180 |
| 4.28 | Testbeeld voor uniformiteitsmeting (13-puntsmethode)..... | 181 |

| | | |
|------|---|-----|
| 4.29 | Depolarisatiegraad bij PBS-overgang in functie van invalshoek | 184 |
| 4.30 | Hoekdistributie belichting..... | 187 |
| 4.31 | Hoekdistributie gelekte lichtstromen voor respectievelijk R, G, B | 188 |
| 4.32 | Diafragma's voor (R,G,B)-kanalen voor contrastverhoging... | 188 |
| 4.33 | Foto's van geprojecteerde testbeelden | 191 |
| 4.34 | Foto's van realistische beelden (geprojecteerd)..... | 193 |
| | | |
| A.1 | Standaard spectrale ooggevoeligheidsfunctie $V(\lambda)$ voor fotopisch zicht..... | 215 |
| A.2 | Werking van een X-kubus | 216 |
| A.3 | Begrippen van een optisch systeem | 217 |
| A.4 | De apertuurstop, de ingangs- en uitgangspupil van een optisch systeem..... | 218 |
| A.5 | Telecentriciteit aan de kant van het object..... | 219 |
| | | |
| B.1 | De standaard CIE (1931) 2° kleurmatching-functies..... | 222 |
| B.2 | Het CIE-1931-kleurendiagram..... | 225 |
| | | |
| C.1 | 2-LCOS-demonstrator..... | 230 |
| C.2 | Demonstator in werking..... | 231 |
| C.3 | Het groene kanaal | 232 |
| C.4 | Het rode/blauwe kanaal..... | 232 |
| C.5 | Het balder-bord met sync-pin | 233 |
| C.6 | De modi-borden met LCOS panelen..... | 233 |
| C.7 | LED- en FLC-aanstuurborden | 234 |
| C.8 | Vertragingsschakeling voor sync-puls (555-schakeling) | 234 |

| | | |
|------|---|-----|
| C.9 | ADC-circuits voor de rode en blauwe kanalen | 235 |
| C.10 | 8051-microcontrollerbord | 235 |
| C.11 | Het elektronische schema van het microcontrollerbord..... | 236 |
| C.12 | De broncode voor synchronisatie van de aanstuurschakelingen: a) initialisatie deel b) pulsduur bepaling R en B c) genereren van aanstuursignalen..... | 238 |
| D.1 | Foto's bewegende beelden (zonder omgevingslicht)..... | 241 |
| D.2 | Foto's stilstaande beelden (zonder omgevingslicht)..... | 243 |
| D.3 | Foto's bewegende beelden (met omgevingslicht)..... | 244 |
| D.4 | Foto's stilstaande beelden (met omgevingslicht)..... | 244 |

Summary

Since the introduction of the first electronic projector (a CRT-projector) around 1930, there has been considerable evolution both from a technological and from a commercial point of view. Nowadays, most electronic projectors in the field are light valve projectors based on the modulation of incoming light. The types of light valves that are most frequently used are transmissive LCDs, reflective LCOS or reflective DMD panels. LCD panels are mostly used in low-end applications and are cheaper, while LCOS and DMD panels are used in high-end applications. The current projectors almost exclusively use an arc lamp as the light source. In most cases this is an UHP lamp. The user profile of projection systems has also strongly changed through the years. The market has been diversified enormously. Formerly the projectors had only business applications (presentations, movie theatre, etc.), but nowadays they have become a consumer product with many applications (rear projection television, home cinema, pocket projectors, etc.) and therefore accessible to a broad public. Because of this, the projection market has become huge and very important.

Another discipline in science is that of the light emitting diodes (LED). The light flux (lm) of LEDs has improved constantly since their invention. Recently, this progress has made it interesting to use these devices as light source for projection applications. LEDs have very interesting properties compared to the traditional projection light sources (arc lamps). They are compact, robust and have a lower supply voltage. Therefore the LED is the ideal light source for compact and inexpensive projection systems that can even operate on batteries. The absence of dangerous mercury and explosion hazard will increase the portability of the projector. LEDs have other obvious advantages: they have a very long lifetime, they are more reliable

and demand less maintenance, They radiate no UV or infrared, they have a narrow spectrum (available in red, green and blue) and will exhibit a larger colour gamut (increased colour quality). As LEDs can switch rapidly, there is the possibility to pulse them. An important disadvantage is the limited luminance. The optical power per unit of étendue of an LED is significantly lower than e.g. an UHP lamp. In view of the trend of light valves becoming smaller, this can be a serious obstruction.

In this PhD, the use of LEDs in quality projection systems is investigated. As the light valve high resolution LCOS panels are used. In the first chapter the history, the different types and the architecture of projection systems are described. Also the different light valve technologies are investigated with the emphasis on the 'Vertical Aligned Nematic Liquid Crystal mode' LCOS panels. Because of the high intrinsic contrast of this mode, this type of light valves is used in this research. Furthermore, the possible projection light sources, like the traditional arc lamps, LED and lasers are discussed. Because of the many advantages and the availability, LEDs are preferred as alternative light sources for projection systems. The issues of LEDs as a projection light source are also discussed.

LEDs are totally different from classic light sources: they have a different shape, package, radiation pattern, driving requirements, physical and thermal properties, etc. Therefore the illumination engine, which determines the brightness and uniformity of the system, has to be redesigned for LED based projectors. Although there are about twenty known optical projector architectures for reflective displays (with an UHP lamp as the light source), they are not suitable for LED-projectors. New optical architectures and electronic drivers have to be developed. The illumination engine is responsible for collecting and homogenising the light flux and adapting the spatial and angular distributions. This part requires the main adaptations. In the second chapter, a new illumination engine is designed. Primary attention is paid to the choice of the LEDs and the collection and homogenisation components. After a thorough analysis of the available LEDs, the OSTAR LEDs of OSRAM are preferred. The most important criterion for this choice is the amount of brightness. Moreover a set of commercially available collection components are discussed. They are experimentally characterized. The collection efficiency (in function of brightness) of these components in ideal circumstances lies between 40 and 50 percent, which is very low. For this reason, new custom-made components are designed. Firstly, parabolic and elliptical reflectors are studied. Several LED-reflector-systems are combined to realise maximum collection efficiency (brightness). Two and

four LED-reflector sets are combined. The best result is obtained with four OSTAR-elliptical-reflector-combinations (77%). However, the illumination engine becomes too voluminous and the power efficiency (light flux) too low, because a lot of light flux is lost by the mismatch of the étendues. Therefore an alternative collection component named a 'Gradually Tapered Light Pipe' (GTLP) is designed. The GTLP collects the light, adapts the spatial and angular distributions and homogenizes the resulting rectangular beam. The LED and the GTLP together make up the illumination engine. This component is compact and efficient (81%). The uniformity of the realized rectangular beam is very good. Subsequently the GTLP is fabricated and is optically characterized. For this the final choice for the dimensions of the LED die and the LCOS panel (0.82") is made. The measurements show that the production process has succeeded very well. Finally some recycling (polarisation and étendue) experiments are implemented and discussed. One can conclude that in this chapter, an illumination engine is developed which is almost 80% étendue efficient and has a very good uniformity so that the light valve can be illuminated uniformly.

The most important disadvantage of the LEDs is the limited brightness (lumen per étendue). This will improve in the future but will probably remain the bottleneck. In chapter three some methods are discussed which will apparently increase the brightness. Several LEDs are alternately pulsed with a higher peak current. During the pulse time, the peak flux will be higher than the nominal flux, albeit that the average flux will not increase. By pulsing several LEDs alternately, their increased flux can be added up in time and will generate a higher average flux within the same étendue (brightness). The pulsed LED has to be brought in the light path of the projector. Two different configurations are developed. The first configuration is a system where two LEDs are positioned orthogonally with a rotating segmented disk (reflective-transparent) in the bisector plane. By rotating this disk synchronously with the pulsed LEDs, an increased brightness will be obtained. The light appears to emerge from one LED. The net gain is measured and amounts almost 50%. The second configuration is a system without moving components and that can only be used in systems with polarisation based light valves such as LCOS panels. Two pulsed LEDs are combined with a PBS which only propagates one polarisation state per LED in the right direction. The light that is illuminating the LCOS panel has to be polarized. After the PBS, the polarisation state of light originating from one LED has to be changed whereas light originating from the other remains

unchanged. This is realised by using a switchable retarder (half wave plate) after the PBS which will be activated synchronously with the pulsing of the LEDs. Depending on the type of LEDs, PBS and switchable retarder that are used, the achieved gain will be different. With the implemented setup, the measured net gain amounts 36%. These methods allow increasing the apparent brightness of the LEDs at the expense of using an additional LED and lower power efficiency.

The lifetime of LEDs is always presented in the datasheets at nominal current. Pulsing at higher currents will certainly shorten this lifetime. To examine this, in chapter 3, a lifetime measurement test is started with a pulsed LED and a nominally driven LED. Pulsing will not only shorten the lifetime, but will also cause colour shifts. To examine this, an experiment is conducted where the most important spectral properties (such as the spectrum, FWHM, colour coordinates, etc.) of pulsed LEDs are monitored. Finally measurements of the saturation currents at several duty cycles, the wall-plug-efficiencies and light outcoupling of the LEDs are performed. The saturation currents are the maximum currents above which the light flux of the LEDs will not increase anymore or will even decrease. It is important to know these currents so that we can stay well below them in the pulsed state.

In chapter 4 two optical architectures are discussed. In both architectures the GTLPs are used in the illumination engine. The first architecture is a compact three-LCOS-system, where each light valve is modulating one basic colour. Each colour channel consists of one LED and one GTLP. After the modulation, the three channels are recombined by means of a dichroic component. This architecture is simulated in ZEMAX. The system efficiency, contrast, uniformity and the colour gamut of the projector are discussed. It is an efficient system with moderate light output (85 lm), a good contrast (400: 1) and a moderate uniformity. The colour gamut is much larger (+72%) than that of a standard television system, as a result of which the colour quality will be very good. The colour balance needed to obtain a reference (D65) white point is calculated. With the current generation LEDs (OSTARs), green will be the limiting colour. Besides, red and blue LEDs are generating a much (twice) higher light flux than necessary. This means that in principle one light valve can alternately modulate red and blue without introducing an additional loss of flux and thus by doing this one can save

one LCOS panel. Because of the moderate uniformity and the sub-optimal use of the panels, this architecture is not further developed (experimentally set up).

The second architecture is a two-LCOS-system whereby one panel is permanently modulating green information, while the other alternately modulates red and blue information. To increase the brightness of the green channel, the method with two pulsed green LEDs combined by a PBS, as introduced in chapter 3, is used. Since red and blue are alternately modulated, these LEDs are also pulsed as a result of which their brightness increases. To recombine these channels, one uses a PBS. This architecture is first simulated and the efficiency, contrast, uniformity and the colour gamut are discussed. The efficiency of this architecture is lower, but the light output is higher (130 lm) than that of the three-LCOS-system because of the larger system étendue (larger LCOS panels) and the applied methods for increasing the brightness. Contrast ($> 2500:1$) and uniformity are much higher than that of the previous architecture. In addition the LEDs and the light valves are optimally utilized. The possible colour gamut is approximately the same as before (the same LEDs are used). After the discussion of the simulation results, a demonstrator setup is built. The QXGA LCOS panels (0.82") of the company Gemidis are used here. The operation of these panels and the necessary adaptations for this two-LCOS-system are described. The driving of the LEDs (and the switchable retarder), the synchronisation with the panels and the information source (personal computer) is implemented by means of self-designed electronic circuits. The different circuits are controlled by a micro controller. The simulated properties are also experimentally measured and the setup is further optimised. The differences with the simulation results are discussed and explained. The desired colour balance (D65 white point) is tuned and measured with a spectrometer. The contrast issues are exhaustively discussed and certain techniques are applied (introducing of a diaphragm, use of quarter wave plates, introducing anti reflective coatings, etc.) to increase the contrast. Some photographs of pictures which are imaged with this LED-projector are shown and discussed. At the end of this chapter, some short- and long-term optimisation ideas are presented.

In the last chapter the achieved results and the conclusions are once more summarized and some suggestions are given for further research. This research has led to the realisation of a projection system which uses LEDs as the light source. As a result of the superior properties of these light sources, the realised projection system has a very good image quality, a long lifetime, etc. LED projection also opens new application domains which were impossible with traditional arc lamps. The light output is still moderate, but this will also improve in the future with new technological developments which have been already predicted.

Samenvatting

Sinds de uitvinding van de eerste elektronische projector, een CRT-projector, rond 1930 zijn er heel wat evoluties geweest zowel op technologisch vlak als op commercieel vlak. De meest gebruikte elektronische projectoren tegenwoordig zijn de lichtklepprojectoren die op modulatie van het inkomende licht gebaseerd zijn. Het type lichtklep dat hierbij gebruikt wordt, is bijna altijd een transmissief LCD-, een reflectief LCOS- of een reflectief DMD-paneel. De LCD-panels worden vaak in 'low-end'-applicaties gebruikt en zijn goedkoper, de LCOS- en DMD-panels echter worden in 'high-end'-applicaties gebruikt. De hedendaagse projectoren gebruiken bijna uitsluitend een booglamp als lichtbron. Meestal betreft het een UHP-lamp. Het gebruikersprofiel van projectiesystemen is doorheen de jaren ook sterk veranderd. De markt is tegenwoordig enorm gediversifieerd. Daar waar vroeger de projectoren enkel 'Business'-toepassingen hadden (presentaties, simulatoren, etc.), is het nu ook een 'Consumer'-product geworden (retroprojectietelevisie, home cinema, pocketprojectoren, etc.) en dus toegankelijk voor het brede publiek. Hierdoor is de projectiemarkt zeer groot en belangrijk geworden.

Een andere discipline in de wetenschap is die van de licht emitterende diodes (LED). Sinds hun uitvinding is de geproduceerde lichtflux (lm) van deze componenten blijven stijgen. Deze vooruitgang heeft ervoor gezorgd dat het op dit moment interessant wordt om deze componenten als lichtbron te gebruiken in projectiesystemen. LED's hebben zeer interessante eigenschappen vergeleken met de klassieke projectielichtbronnen (booglampen). Ze zijn compact, robuust en werken op lage spanningen. Vandaar dat een LED de ideale lichtbron is om een compact en goedkoop projectiesysteem te bouwen, dat zelfs op batterijen kan werken. Door het ontbreken van ontploffingsgevaar en de afwezigheid van giftige stoffen zoals bij UHP-lampen, kan de draagbaarheid van de projector verhoogd worden. LED's hebben nog andere interessante voordelen. Ze hebben een zeer grote levensduur, ze zijn betrouwbaarder en vergen weinig onderhoud, ze stralen

geen UV of IR uit, ze zijn smalbandig (verkrijgbaar in rood, groen en blauw) waardoor het projectiesysteem een breder kleurengamut (een hogere beeldkwaliteit) zal beschrijven. LED's hebben een ogenblikkelijke schakeltijd waardoor ze kunnen gepulst worden. Een belangrijk nadeel is de beperkte helderheid (lumen per étendue) van LED's vergeleken met UHP-lampen. Gezien de trend van steeds kleiner wordende lichtkleppen, kan dit een ernstige belemmering zijn.

In dit doctoraat is er onderzoek verricht rond gebruik van LED's in kwalitatieve projectiesystemen. Hiervoor wordt als lichtklep hoogresolutie LCOS-panelen gebruikt. In het eerste hoofdstuk wordt de geschiedenis, de verschillende types en de opbouw van projectiesystemen beschreven. Hierin worden ook de verschillende lichtkleptechnologieën bestudeerd met nadruk op het 'verticaal gealigneerd nematisch vloeibaar kristal mode' LCOS-panelen. Omwille van het hoge intrinsiek contrast bij deze mode worden dit type lichtkleppen gebruikt in dit onderzoek. Vervolgens worden de mogelijke lichtbronnen waaronder de klassieke booglampen, LED's en lasers besproken. Omwille van de vele voordelen en de beschikbaarheid worden LED's geprefereerd als alternatieve lichtbronnen voor projectiesystemen. De problematiek van LED's als projectielichtbron wordt eveneens besproken.

LED's zijn totaal verschillend van UHP-lampen. Ze hebben een andere vorm, package, stralingspatroon, aansturing, fysische en thermische eigenschappen, etc. Hoewel er een twintigtal optische architecturen bekend zijn voor reflectieve beeldschermen (met een UHP-lamp als lichtbron), zijn ze niet geschikt voor LED-projectoren en moeten nieuwe optische architecturen en een elektronische aansturing ontwikkeld worden. Het belichtingssysteem is verantwoordelijk voor het collecteren en homogeniseren van het licht en het aanpassen van de ruimtelijke en angulaire distributies. Dit deel vereist de voornaamste aanpassingen. In het tweede hoofdstuk wordt er een nieuw belichtingssysteem ontworpen. Hierbij gaat de aandacht vooral naar de keuze van de LED's en de collectie- en homogenisatiecomponenten. Na een grondige analyse van de beschikbare LED-merken, gaat de voorkeur naar OSTAR LED's van OSRAM. Bij deze keuze is het belangrijkste criterium de helderheid. Daarnaast wordt er een set van commercieel beschikbare collectiecomponenten besproken. Uit metingen blijkt dat de collectie-efficiëntie (in functie van helderheid) van deze componenten in het beste geval tussen de 40 en 50 procent ligt, wat vrij laag is. Daarom wordt er overgegaan naar collectiecomponenten die op maat ontworpen zijn. Eerst worden parabolische en elliptische reflectoren bestudeerd. Meerdere LED-reflector-systemen worden gecombineerd om

een maximale collectie-efficiëntie (helderheid) te realiseren. Hierbij worden zowel twee als vier sets gecombineerd. Het beste resultaat wordt verkregen met vier OSTAR-elliptische-reflector-combinaties (77%). Het belichtingssysteem wordt echter te volumineus en de vermogenefficiëntie (lichtflux) te laag, omdat er veel licht verloren gaat door de mismatch van de étendues. Vervolgens wordt er een alternatieve collectiecomponent ontworpen die de naam ‘Gradually Tapered Light Pipe’ (GTLP) krijgt. De GTLP collecteert de lichtstralen, past de ruimtelijke en angulaire distributies aan en homogeniseert de verkregen rechthoekige bundel. De GTLP vormt samen met de LED het belichtingssysteem. Deze component is compact en efficiënt (81%). Bovendien is de uniformiteit van de hiermee gevormde rechthoekige lichtbundel zeer goed. Vervolgens wordt de GTLP gefabriceerd en optisch gekarakteriseerd. Hiervoor wordt er de finale keuze gemaakt van de afmetingen van de te gebruiken LED en het LCOS-paneel (0.82”). Uit metingen blijkt dat het fabricageproces zeer goed gelukt is en er worden nog enkele experimenten besproken waarmee de verkeerde polarisatie en overtollige étendue gedeeltelijk kunnen gerecupereerd worden. Dit hoofdstuk wordt afgesloten met het besluit dat er een belichtingssysteem ontwikkeld is dat bijna 80% étendue-efficiënt is en een zeer goede uniformiteit vertoont zodat de lichtklep uniform kan belicht worden.

Het belangrijkste nadeel van LED's is de te lage helderheid (lumen per étendue). Dit zal in de toekomst verbeteren, maar zal waarschijnlijk steeds de bottleneck zijn. In hoofdstuk drie worden er methodes besproken die het mogelijk maken om de helderheid schijnbaar te verhogen. Hiervoor worden meerdere LED's afwisselend gepulst met een hogere pulsstroom waardoor ze gedurende de pulsduur een hogere piekflux genereren dan de nominale flux. De gemiddelde flux per LED is echter lager dan de nominale flux. Door verschillende piekfluxen in de tijd op te tellen (= verschillende LED's afwisselend pulsen) en de gepulste LED op een mechanische of een optische manier in het optische pad te brengen, zal de lichtflux binnen eenzelfde étendue of de helderheid verhoogd worden. Er zijn twee verschillende configuratie uitgewerkt. De eerste configuratie is een systeem waarbij twee LED's orthogonaal gepositioneerd worden met een ronddraaiende gesegmenteerde schijf (spiegelend-transparant) in hun bissectricevlak. Door deze schijf synchroon te laten draaien met de gepulste LED's wordt er een verhoogde helderheid verkregen. De lichtflux komt als het ware van één LED. De toename wordt opgemeten en bedraagt bijna 50%. De tweede configuratie is een systeem zonder bewegende onderdelen en is enkel toepasbaar op polarisatie gebaseerde lichtkleppen zoals LCOS-panels. Twee gepulste LED's worden hier gecombineerd met een PBS die slechts één polarisatie per LED doorlaat in de gewenste richting. Het licht dat op het

LCOS-paneel invalt, mag slechts één polarisatie bevatten. Na de PBS moet dus de polarisatierichting van het licht afkomstig van ene LED omgewisseld worden terwijl de andere onveranderd blijft. Dit wordt gerealiseerd door een schakelbare halfgolflengteplaat achter de PBS te plaatsen die synchroon met de LED's gepulst wordt. Afhankelijk van de gebruikte LED's, PBS en halfgolflengteplaat kan de toename in helderheid verschillend zijn. Bij de gerealiseerde opstelling wordt er een winst van 36% opgemeten. Deze methodes laten dus toe om de schijnbare helderheid van de LED's te doen toenemen ten koste van de invoering van een extra LED en dus een lagere vermogensefficiëntie.

De levensduur van LED's wordt opgegeven in de datasheets bij nominale aansturing. Het pulsen zal deze zeker inkorten. Om dit na te gaan wordt er in hoofdstuk 3 eveneens een levensduurmeting uitgevoerd waarbij zowel een nominaal aangestuurde LED als een gepulste LED getest wordt. Het pulsen zal niet enkel de levensduur inkorten, maar zal ook de kleurverschuivingen veroorzaken. Om dit na te gaan wordt er eveneens een experiment uitgevoerd waarbij de belangrijkste spectrale eigenschappen (het spectrum, FWHM, kleurcoördinaten, etc.) van gepulste LED's gemonitord worden. Ten slotte wordt er ook de saturatiestromen bij verschillende duty cycles, de wall-plug-efficiënties en de lichtuitkoppeling van de LED's opgemeten. De saturatiestromen zijn stromen waarboven de lichtopbrengst van de LED niet meer toeneemt en zelfs afneemt. Deze stromen moeten gekend om bij het pulsen met piekstromen daaronder te blijven.

In het vierde hoofdstuk worden er twee optische architecturen besproken. In beide architecturen worden als belichtingssysteem GTLP's gebruikt. De eerste architectuur is een compact 3-LCOS-systeem, waarbij elke lichtklep belicht wordt met een basiskleur. Elk kleurkanaal bestaat uit één LED en één GTLP. Na de modulatie, worden de drie kanalen gerecombineerd door middel van een dichroïsche component. Deze architectuur wordt gesimuleerd in ZEMAX. De systeemefficiëntie, het contrast, de uniformiteit en de kleurengamut van de projector worden besproken. Het is een efficiënt systeem met een matige lichtopbrengst (85 lm), een goed contrast (400:1) en een matige uniformiteit. De kleurengamut is veel groter (+72%) dan bij een standaard televisiesysteem, waardoor de kleurkwaliteit zeer goed zal zijn. De noodzakelijke kleurenbalans om een referentie (D65) witpunt te verkrijgen wordt berekend. Hieruit blijkt dat met de huidige generatie LED's (OSTAR's) groen de limiterende kleur is en dat rood en blauw dubbel zoveel licht genereert als nodig is. Dit betekent dat in principe één lichtklep afwisselend rood en blauw kan moduleren zonder een bijkomstig verlies van lichtflux te introduceren. Omwille van de matige uniformiteit en niet

optimaal gebruik van de panelen wordt deze architectuur niet verder uitgewerkt (experimenteel opgesteld).

De tweede architectuur is een 2-LCOS-systeem waarbij één paneel continu groene informatie moduleert, terwijl het andere afwisselend rode en blauwe informatie moduleert. Om de helderheid van het groene kanaal te verhogen, wordt gebruik gemaakt van de methode met twee gepulste groene LED's gecombineerd met een PBS die besproken wordt in hoofdstuk 3. Aangezien rood en blauw afwisselend gemoduleerd worden, worden ook deze LED's gepulst waardoor hun helderheid eveneens verhoogt. De recombinitie van de twee kanalen gebeurt hier met behulp van een PBS. Deze architectuur wordt eerst gesimuleerd en de efficiëntie, het contrast, de uniformiteit en de kleurengamut worden besproken. De efficiëntie van deze architectuur is lager, maar de lichtopbrengst is hoger (130 lm) dan het 3-LCOS systeem omdat de systeemétendue hier groter is (grotere LCOS-panelen) en er ook helderheidsverhogende methodes toegepast zijn. Het contrast ($> 2500:1$) en de uniformiteit zijn veel beter dan bij de vorige architectuur. Bovendien worden de LED's en de lichtkleppen ten volle benut. De mogelijke kleurengamut is ongeveer terug dezelfde (zelfde LED's). Na de bespreking van de simulatieresultaten wordt er een demonstratoropstelling gebouwd. Hierin worden QXGA LCOS-panelen (0.82") van de firma Gemidis gebruikt. De werking van deze panelen en de nodige aanpassingen voor dit 2-LCOS-systeem worden beschreven. De aansturing van de LED's (en de schakelbare halfgolf lengteplaat) en de synchronisatie met de panelen en de informatiebron gebeurt door middel van zelf ontworpen schakelingen. De verschillende schakelingen worden gecontroleerd met een microcontroller. De gesimuleerde eigenschappen worden ook experimenteel opgemeten en de opstelling verder geoptimaliseerd. Het verschil met de simulatieresultaten wordt besproken en verklaard. De gewenste kleurbalans (D65-licht) wordt afgeregeld en opgemeten met een spectrometer. De contrastproblematiek wordt uitvoerig besproken en er worden bepaalde technieken toegepast (invoeren van een diafragma, gebruik van kwartgolf lengteplaten, aanbrengen van antireflectie coatings, etc.) om het contrast te verhogen. De kwaliteit van de met deze LED-projector geprojecteerde beelden wordt geïllustreerd aan de hand van enkele foto's. Ten slotte worden in dit hoofdstuk nog opportuniteiten geïdentificeerd voor verdere optimalisatie op korte en lange termijn.

In het laatste hoofdstuk worden de behaalde resultaten en de besluiten nog eens overlopen en worden er enkele suggesties gegeven voor verder onderzoek. Dit onderzoek heeft dus geleid tot de realisatie van een projectiesysteem dat LED's gebruikt als lichtbron. Ten gevolge van de

superieure eigenschappen van deze lichtbronnen heeft het verwezenlijkte projectiesysteem een zeer goede beeldkwaliteit, een lange levensduur, etc. LED-projectie opent eveneens nieuwe applicatiedomeinen die met klassieke booglampen onmogelijk waren. De lichtopbrengst is nog matig, maar dit zal ook wel verbeteren door nieuwe technologische ontwikkelingen die nu al voorspeld worden.

Afkortingen

| | |
|------|--|
| ADC | Analog-to-digital converter |
| ANSI | American National Standards Institute |
| AR | Anti Reflection |
| B | Blauw |
| BFL | Back Focal Length |
| BK7 | Een glasoort met brekingsindex van 1.5168 bij d-light |
| CA | Clear Aperture |
| CCT | Correlated Color Temperature |
| CIE | Commission International de l'Eclairage |
| CMOS | Complementary Metal Oxide Semiconductor |
| CPC | Compound Parabolic Concentrator |
| CRT | Cathode Ray Tube |
| D65 | CIE Standard Illuminant D65 met kleurcoördinaten $(x,y) = (0.3128,0.3290)$ |
| DC | Direct Current |
| DLP | Digital Light Processing |
| DMD | Digital Micromirror Device |
| DVI | Digital Visual Interface |
| ER | Elliptische Reflector |
| FFL | Front Focal Length |

| | |
|--------|--|
| FLC | Ferroelectric Liquid Crystal |
| FPS | Frames Per Second |
| FWHM | Full Width at Half Maximum |
| G | Groen |
| GTLP | Gradually Tapered Light Pipe |
| HBLED | High-Brightness Light Emitting Diode |
| HDTV | High Definition Television |
| IR | Infrarood |
| ITO | Indium Tin Oxide |
| kh | Kilo uur (duizend uur) |
| kV | Kilovolt |
| LASER | Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation |
| LC | Liquid Crystal |
| LCD | Liquid Crystal Display |
| LCOS | Liquid Crystal On Silicon |
| LED | Light Emitting Diode |
| LUT | Lookup Table |
| LV | Light Valve |
| MEMS | Micro Electro Mechanical System |
| MOSFET | Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor |
| NB | Narrow Beam lens |
| NBLP | Narrow Beam Low Profile lens |
| NTSC | National Television System Committee |
| PAL | Phase Alternating Line |
| PBS | Polarizing Beam Splitter |
| PDLC | Polymer Dispersed Liquid Crystal |

| | |
|-------|--|
| PMMA | Polymethylmethacrylaat |
| PR | Parabolische Reflector |
| PWM | Pulse-width modulation |
| QXGA | Quad eXtended Graphics Array (resolution of 2048x1536) |
| R | Rood |
| rpm | Revolutions Per Minute |
| RPTV | Rear Projection Television |
| SECAM | Séquentiel couleur à mémoire |
| SF2 | Een glasoort met brekingsindex van 1.6477 bij d-light |
| SF57 | Een glasoort met brekingsindex van 1.8467 bij d-light |
| SLM | Spatial Light Modulator |
| SRAM | Static Random Acces Memory |
| TFT | Thin Film Transistor |
| TIR | Total Internal Reflection |
| TLP | Tapered Light Pipe |
| UHP | Ultra High Performance – ‘Trademark of Philips’ |
| UV | Ultraviolet |
| VAN | Vertically Aligned Nematic |

Hoofdstuk 1

Inleiding

1. Geschiedenis van projectiesystemen

Informatie heeft een belangrijke plaats in onze moderne samenleving. Van kindsbeen af worden we er al mee geconfronteerd onder de vorm van medische beeldinformatie, kleurboeken, tekenfilms, etc. Er moet een medium zijn om de informatie te visualiseren. Dit kan bijvoorbeeld een beeldscherm zijn. Informatie die hiermee kan afgebeeld worden, kan zowel textueel, grafisch of videodata zijn. Het doelpubliek van deze informatie kan zowel één persoon als een groep mensen zijn. In geval van een groep die samen naar een zelfde scherm kijken, dient het scherm groter te zijn voor een betere zichtbaarheid. Bovendien kan een groter scherm ook aangenamer zijn bij entertainmenttoepassingen. Om die redenen worden de beeldschermen alsmar groter. Voorbeelden van grotere beeldschermen in de commerciële wereld zijn o.a. de plasma-tv's met schermdiagonalen van 100 cm of groter. Vanaf een bepaalde diagonaal wordt het minder aantrekkelijk om een beeld direct op een scherm te tonen en lijkt projectie een aangewezen oplossing, dit zowel voor commerciële als voor professionele toepassingen. Dit is een alternatieve methode om informatie te visualiseren.

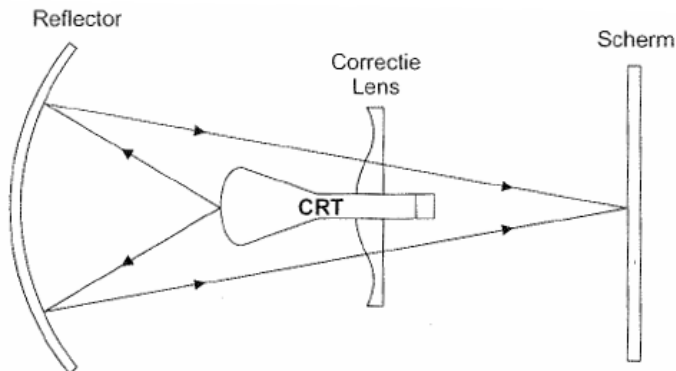
Bij een projectiesysteem bevindt zich een projectiescherm tussen de waarnemer en het beeldvormend element. De waarnemer en het beeldvormend element kunnen zich aan dezelfde kant van het scherm bevinden (frontprojector) of aan weerszijden ervan (retroprojector). Bij een frontprojector dient het scherm dus zoveel mogelijk licht van de projector te reflecteren. Bij een retroprojector echter dient zoveel mogelijk licht doorgelaten te worden. In tegenstelling tot direct-view-beeldschermen wordt

er hier niet gekeken naar het beeldvormend element maar naar een projectie ervan.

Projectiesystemen kan men opdelen in twee grote groepen, namelijk de klassieke en de elektronische projectoren. Bij een klassieke projector is het beeldvormend element iets tastbaar (een vast element) zoals een negatief van een foto, transparanten, filmpellicules, etc. De informatie op deze media kan niet eenvoudig gewijzigd worden en bij nieuwe informatie dient de informatiedrager vervangen te worden. Voorbeelden van klassieke projectoren zijn o.a. diapprojectoren, overheadprojectoren, klassieke cinemaprojectoren die werken met fotografische filmpellicules, etc. Een belangrijk nadeel van deze projectoren is de onmogelijkheid van live-uitzendingen en het feit dat de filmpellicule fysiek dient aanwezig te zijn. Voor bioscooptoepassingen is het bovendien erg duur om de vele kopieën van een film te maken die nodig zijn voor de verspreiding ervan, om nog niet te spreken over de vervoerskosten, en er zal onvermijdelijk verlies aan kwaliteit optreden door het maken van verschillende generaties kopieën. Bovendien lijdt de pellicule onder het veelvuldig projecteren (krassen, verkleuringen), waardoor de beeldkwaliteit geleidelijk aan nog verder afneemt.

Elektronische projectoren zijn systemen waarbij geen afdruk van de beeldinformatie vereist is en men rechteer kan werken met de elektronische beeldinformatie. Dit maakt het o.a. ook mogelijk om live-uitzendingen te vertonen. De draagbaarheid en de reproduceerbaarheid van de beeldinformatie zal vergemakkelijkt worden en de beeldkwaliteit zal bij herhaaldelijk gebruik niet degraderen. Voorbeelden hiervan zijn digitale cinemaprojectoren, beamers, retroprojectie-tv's (RPTV), head-up-displays etc. Elektronische projectiesystemen kan men classificeren in twee groepen; deze die gebaseerd zijn op een emissieve technologie en deze die gebaseerd zijn op een modulatie-technologie.

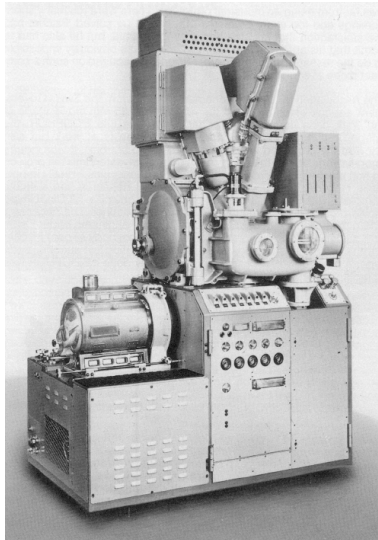
Voorbeelden van emissieve systemen zijn CRT's (kathodeluminescentie) [1] en laser-CRT's [2]. Het allereerste elektronische projectiesysteem, rond 1930, was een CRT-projector (zie figuur 1.1). De kathodestraalbuis scant, zoals in een klassieke televisie, serieel het beeld af. Het licht van de CRT wordt gecollecteerd door een sferische spiegel en wordt op een scherm geprojecteerd door een asferische correctielens.



Figuur 1.1: Het werkingsprincipe van het eerste elektronische projectiesysteem

De op modulatie gebaseerde systemen maken gebruik van microdisplays, ook wel lichtkleppen (light valve LV) of spatiale lichtmodulatoren (SLM) genoemd, omdat hun functie bestaat uit het moduleren van inkomend licht, afhankelijk van de invalshoek op de SLM. Dit zijn miniaturbeeldschermen waar de beeldinformatie op gezet wordt, maar die zo klein zijn dat het beeld optisch vergroot moet worden. Naast de projectietoepassingen voor deze microdisplays zijn er ook 'near-to-eye'-toepassingen zoals 'personal viewers'. Het essentiële verschil met projectie is dat hier een virtueel beeld gevormd wordt, en bij projectie een reëel beeld.

De eerste elektronische projector die op modulatie gebaseerd is, werd ontwikkeld in 1939 door Fritz Fischer en kreeg de naam 'Eidophor' [3]. Hierbij werd een elektronenkanon gericht op een laagje olie en werd een beeld geschreven gelijkaardig aan de manier waarop de elektronenstraal het beeld aftast in een normale beeldbuis. De olie zelf gaf geen licht maar vervormde, zodat een erop gerichte sterke lichtbundel meer of minder gereflecteerd werd. Het zo ontstane beeld werd met lenzen op een scherm geprojecteerd. Omdat het licht van een externe lamp kwam, had de Eidophor een zeer helder en contrastrijk beeld. Bij modulatiegebaseerde systemen wordt de generatie en de modulatie van het licht gescheiden. Zoals in figuur 1.2 afgebeeld is, was de Eidophor vrij volumineus.



Figuur 1.2: Eidophor: de eerste lichtklepprojector

De Eidophor was de eerste lichtklepprojector die succesvol was. Vervolgens is men op zoek gegaan naar alternatieve lichtkleptechnologieën die compacter, efficiënter en goedkoper zijn. Zo heeft men een aantal technologieën ontwikkeld. Tegenwoordig zijn de meeste microdisplays gebaseerd op vloeibare kristallen of micro-elektromechanische systemen (MEMS). Voorbeelden hiervan zijn 'Liquid Crystal Display'- (LCD) en 'Liquid Crystal On Silicon'- (LCOS) panelen voor vloeibare kristallen en 'Digital Mirror Device' (DMD) voor MEMS-technologie. LCD- (transmissief) en LCOS-systemen (reflectief) berusten op polarisatie en DMD's (reflectief) zijn in essentie een matrix van draaibare spiegels geïntegreerd op een Si-substraat, die de inkomende lichtbundel al dan niet in de richting van de projectielens reflecteren. De huidige projectiesystemen maken bijna uitsluitend gebruik van één van deze drie types. Deze worden dan ook uitvoerig besproken in de volgende paragrafen.

Varianten op deze microdisplays, die minder vaak voorkomen, zijn microdisplays met 'Polymer Dispersed Liquid Crystals' (PDLC), waarvan de werking op verstrooiing in plaats van polarisatie berust, en diverse op diffractie gebaseerde systemen. Deze systemen gaan we niet bespreken.

De performanties van de verschillende projectiesystemen worden alsmaar beter, terwijl de kostprijs blijft dalen. De lichtklepprojectoren beginnen de markt te domineren wanneer we kijken naar de opbrengsten die ze genereren

voor de industrie. Deze projectoren hebben hogere performanties dan de klassieke CRT-projectoren. Ze hebben hogere resoluties en een grotere lumenoutput en zijn compacter. De markt voor projectiesystemen is ook enorm gediversifieerd. Daar waar vroeger de projectoren enkel 'Business'-toepassingen hadden (presentaties, cinema), is het nu ook een 'Consumer'-product geworden en dus toegankelijk voor het brede publiek [4]. Het is geen nichemarkt meer, maar een markt die miljarden dollars vertegenwoordigt met verschillende deelsegmenten, zowel professioneel als op de consumentenmarkt gericht. Naast de klassieke beamerapplicaties kunnen we nog tientallen toepassingen opsommen. Enkele voorbeelden zijn vliegtuigsimulators, cockpitdisplays, retroprojectietelevsie, draagbare projectoren, pocketprojectoren, head-up-displays, etc. In tabel 1.1 zijn de verschillende applicaties van een projectiesysteem getabelleerd [5]. Hierbij is telkens per type applicatie de gebruikelijke schermdiagonaal, de modulatietechnologie, en de vereiste performanties zoals aantal pixels, luminanties, etc. weergegeven.

| Applicatie | Diagonaal beeldscherm | Technologieën | Vereiste performanties |
|------------------------------------|-----------------------|---|--|
| <i>Bureau – toepassingen</i> | 50 cm tot 75 cm | 1- en 3-paneel-lichtvalven systeem | 1280 x 1024 pixels Luminanties > 100 cd/m ² Uniformiteit >85 % |
| <i>Huishoudelijke toepassingen</i> | 100 cm tot 200 cm | 3-CRT rear screen 1-en 3-lichtvalven | 720 x 480 pixels (4:3) 1920 x 1080 pixels (16:9) Luminanties: van 300 tot 450 cd/m ² |
| <i>Presentaties</i> | 1.2 m tot > 3 m | 3-CRT 1- en 3-LV | SVGA (800 x 600) XGA (1024 x 720) SXGA (1280 x 1024) UXGA (1600 x 1200) Luminantie > 250 cd/m ² |
| <i>Auditorium</i> | 2 m tot > 4.5 m | 3-CRT 3-LV | Luminantie > 100 cd/m ² |
| <i>Elektronische cinema</i> | 6 m tot 12 m | 3-LV of meer | 2000 x 1000 pixels 60 cd/m ² voor 48 fps |

Tabel 1.1: Overzicht van de verschillende applicaties van projectiesystemen

De diversificatie van de toepassingen en de daling van de prijzen heeft van projectiesystemen een gemakkelijk toegankelijk voorwerp gemaakt en het gebruik ervan is exponentieel toegenomen.

2. Bespreking van projectorarchitectuur

In de vorige paragraaf werd het ontstaan, de evolutie en de soorten projectiesystemen geïntroduceerd. We gaan ons hier verder toespitsen op elektronische projectiesystemen die gebaseerd zijn op modulatie, waarbij er dus gebruik wordt gemaakt van microdisplays. We gaan de architectuur schematisch bespreken waarbij vooral de nadruk ligt op de functionaliteit van de verschillende bouwblokken van de projector. De verschillende types van microdisplays worden later besproken.

2.1 Definities

Vooraleer we de bouwblokken bespreken, gaan we eerst enkele termen toelichten, die essentieel zijn in een projectiesysteem. Een meer complete uitleg is terug te vinden in bijlage A, waar we de belangrijkste optische termen bespreken. Daarin wordt eveneens een lijst van lichtgrootheden met hun eenheden gegeven.

2.1.1 Étendue

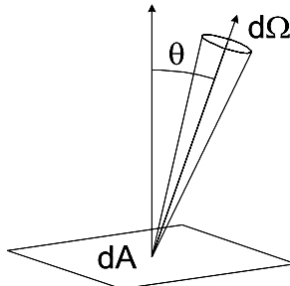
De geometrische optica werd afgeleid van het principe van Fermat dat zegt dat een lichtstraal de snelste weg volgt als het propageert van het ene punt naar het andere. Dat betekent dat de optische weglengte L , die gedefinieerd wordt als product van de geometrische afstand l met de plaatsafhankelijke brekingsindex n (formule 1.1), bij propagatie van de lichtstraal van A naar B, minimaal (stationair $\delta L=0$) moet zijn.

$$L = \int_A^B n \cdot dl \quad (1.1)$$

Als we een elementaire stralenbundel beschouwen met een oppervlakte dA en een ruimtehoek $d\Omega$ (zie figuur 1.3), dan volgt uit het principe van Fermat dat de grootte $d^2E = n^2 \cos\theta dA d\Omega$, met θ de hoek die $d\Omega$ maakt met de normaal op dA , behouden blijft. Dit wordt de étendue van de stralenbundel genoemd [33][34]. De étendue is een zuiver geometrische grootte die enkel de omvang van de stralenbundel bepaalt, en dus gerelateerd is met de divergentie van de lichtbundel en de oppervlakte die men beschouwt, en niets zegt over de precieze lichtverdeling in de stralenbundel. Indien men deze étendue-wet combineert met de wet van behoud van energie, dan vindt men dat de luminantie (flux per eenheid van étendue) van een elementaire

stralenbundel enkel maar kan dalen. Voor een macroscopische bundel, kan men de étendue als volgt definiëren:

$$E = \iint n^2 \cos \theta dA d\Omega \quad (1.2)$$



Figuur 1.3: Een elementaire stralenbundel

Hierbij is E de étendue, n de brekingsindex van het materiaal waarin het oppervlak zich bevindt, en de dubbele integraal wordt genomen over het oppervlak dat ons interesseert en het stralingspatroon van de bundel bij dat oppervlak. De hoek θ is de hoek tussen de normaal op het oppervlakelement dA en de elementaire ruimtehoek $d\Omega$. We kunnen hier nogmaals zien dat de étendue een zuiver geometrische grootheid is en de optische intensiteit er helemaal niet in voorkomt. De étendue wordt uitgedrukt in mm^2sr . De étendue van een puntbron met eender welke divergentiehoek of van een uitgestrekte bron met parallelle stralenbundel is dus steeds nul, aangezien we het product moeten nemen van de divergentiehoek met hetstralend oppervlak.

Men gaat er meestal van uit dat de macroscopische étendue niet daalt, maar dat deze gelijk blijft (bijvoorbeeld bij de propagatie van een lichtbundel door een gecorrigeerd optisch lenzensysteem) of toeneemt (bijvoorbeeld gedeeltelijke reflectie, verstrooiing of diffractie). Echter, er zijn ook uitzonderlijke gevallen waarbij de étendue kan dalen (bijvoorbeeld bij een veel-op-één-afbeelding of een transparante bron voor een spiegel).

De étendue voor een lichtbron kan berekend worden door middel van formule 1.2. Voor bepaalde lichtbronnen (met niet-gekromd oppervlak) kan deze integraal herleid worden tot een eenvoudige formule. Hiervoor moet echter voldaan zijn aan een aantal voorwaarden; de lichtbron moet namelijk

oppervlaktehomogeen zijn, de brekingsindex moet plaats- en hoekonafhankelijk zijn en het stralingspatroon moet centrosymmetrisch zijn. De meeste lichtbronnen voldoen aan deze voorwaarden. Zo kan de étendue herleid worden tot:

$$E = \pi \cdot n^2 \cdot A \cdot [\sin(\theta_{1/2})]^2 \quad (1.3)$$

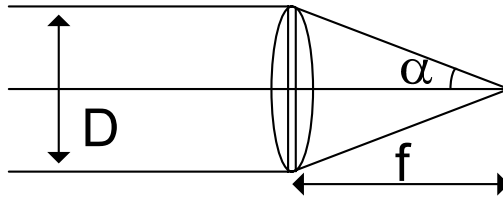
met n de brekingsindex van het uitkoppelmedium (is 1 in lucht), A hetstralend oppervlak en $\theta_{1/2}$ de halve openingshoek.

Naast de bronétendue, is er ook de systeemétendue. Deze wordt gedefinieerd als de étendue van de limiterende component, of een combinatie van optische componenten, (met de kleinste étendue) in een projectiesysteem. De systeemétendue is vaak kleiner dan de bronétendue waardoor de bruikbare étendue van de lichtbundel en dus de ‘flux throughput’ beperkt wordt. E_{sys} is dus de maximale étendue die kan doorgelaten worden. Is de étendue van de lichtbundel groter dan deze E_{sys} , dan treedt er verlies op van lichtflux en zegt men dat het systeem étendue-beperkt is. Bij een lichtklepprojector wordt E_{sys} meestal bepaald door de oppervlakte van de lichtklep en het f-getal ($f^\#$ zie volgende paragraaf) van het projectiesysteem. Als A_{LV} de oppervlakte is van de lichtklep dan vinden we:

$$E_{\text{sys}} = \frac{\pi \cdot A_{LV}}{4 \cdot (f^\#)^2} \quad (1.4)$$

2.1.2 Het f-getal

Het f-getal ($f^\#$) van een optisch systeem wordt gedefinieerd als de verhouding van de brandpuntsafstand f op de vrije diameter D (zie figuur 1.4). Dit kan ook geschreven worden als $(2 \cdot \text{tg}\alpha)^{-1}$, met α de halve openingshoek, ook wel de aanvaardingshoek (acceptance angle) genoemd.

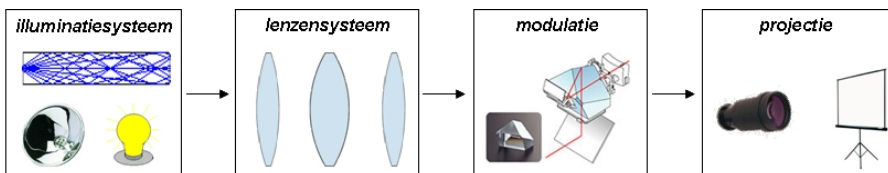


Figuur 1.4: Brandpuntsafstand, diameter D en aanvaardingshoek α van een lens

Voor kleine hoeken kan de tangens vervangen worden door de sinus. Als we nu deze betrekking substitueren in formule 1.3, dan bekomen we formule 1.4 die de systeemétendue weergeeft. Het f -getal drukt dus de maximale aanvaardingshoek van het optisch systeem uit. Hoe kleiner $f^\#$, des te groter de aanvaardingshoek, en dus de étendue van het systeem wordt. Het f -getal is een parameter van de projectielens. Deze wordt dus bepaald door de projectielens, maar aangezien de werking van de optische componenten en de microdisplay degradeert bij grotere hoeken, tracht men de hoeken klein te houden en kiest men dus een projectielens met een hoog f -getal. Bij al te grote hoeken zal het contrast van het projectiesysteem drastisch verminderen.

2.2 Systeemarchitectuur

Een projectiesysteem kan opgedeeld worden in vier grote blokken: het illuminatiesysteem, het lenzensysteem, het modulatiedeel en het projectiedeel. Het illuminatiesysteem zorgt voor de creatie van een geschikte lichtbundel om de lichtklep te belichten. Via het lenzensysteem wordt de lichtbundel overgebracht op de modulerende lichtklep. Het modulatiedeel zorgt voor de beeldvorming (informatieweergave) die dan door middel van een projectielens geprojecteerd wordt op het projectiescherm. In sommige configuraties kan het lenzensysteem overbodig zijn. Figuur 1.5 geeft een schematische voorstelling van een mogelijk projectiesysteem.



Figuur 1.5: De bouwblokken van een elektronisch projectiesysteem

2.2.1 Illuminatiesysteem

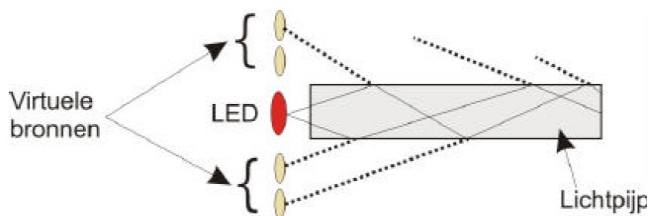
Het illuminatiesysteem bestaat meestal uit een lichtbron, een collectiesysteem om het licht te collecteren, een aantal filters en een homogenisator. Gelet op de hierboven vermelde étendue-overwegingen, dient de lichtbron een zo klein mogelijke étendue te hebben (dus een zo groot mogelijke luminantie of helderheid). Dit betekent ofwel een zeer goed gecollimeerde bundel (laser) of voor een conventionele bron een zo klein mogelijk stralend oppervlak. Meestal worden hiervoor hogedruk-gasontladinglampen gebruikt, bijvoorbeeld Xenon- en UHP-lampen. Deze lampen hebben een uiterst kleine boog (als stralend oppervlak) en dus een zeer hoge luminantie, wat ze zeer geschikt maakt voor deze toepassing. Bijna alle projectoren zijn voorzien van dergelijke lampen. Andere mogelijke lichtbronnen zijn lasers, LED's, etc.

De lichtstralen die van de bron komen, zijn meestal niet goed gericht en hebben ook niet altijd het juiste f-getal. Door gebruik te maken van collectoren worden deze lichtstralen naar de juiste richting gereflecteerd en de hoekverdeling wordt eveneens aangepast aan het geschikte f-getal. Deze componenten dienen dus zoveel mogelijk licht te collecteren en om te zetten naar de geschikte vorm om ze verder aan te bieden aan de homogenisator. Deze collectoren kunnen zowel reflectoren als lenzen zijn. Voorbeelden van reflectoren zijn parabolische en elliptische reflectoren, compound-parabolic-reflectoren (CPC) en nog meer gesofisticeerde reflectoren. De lenzen kunnen ook redelijk complexe vormen aannemen.

Na de reflector kunnen er nog een aantal filters aanwezig zijn in het optische pad om een bepaald deel van het licht weg te filteren. Afhankelijk van het type lichtbron kunnen dat o.a. UV-filters, IR-filters, kleurfilters, etc. zijn. Bij sommige kleursequentiële projectiesystemen kan er ook een kleurwiel (een reeks opeenvolgende, ronddraaiende kleurfilters) aanwezig zijn.

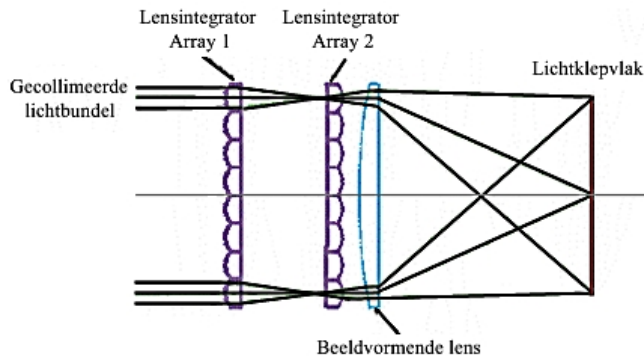
Vervolgens passeren de lichtstralen doorheen een homogenisator. De reflectoren zijn zo ontworpen dat de homogenisator een maximale hoeveelheid licht opvangt. Het doel van de homogenisator is om de lichtbundel, die meestal cirkelvormig van doorsnede is, de juiste vorm te geven (de vorm van de lichtklep is meestal rechthoekig) en deze bundel te homogeniseren zodat het kan gebruikt worden om de microdisplay uniform te belichten. Er bestaan twee methodes om dit te realiseren, namelijk een methode gebaseerd op integratorpijpen [6], ook wel lichtpijpen genoemd, en een methode op basis van lensletintegratoren [7].

Het principe van de lichtpijp is vrij eenvoudig. Het licht propageert doorheen een pijp door reflectie aan de wanden. Deze pijp heeft een doorsnede die overeenkomt met de lichtklep. Door meervoudige reflecties ontstaat een reeks van virtuele bronnen, zoals te zien is in figuur 1.6, die bijdragen tot de spatiale homogenisatie van de lichtverdeling doorheen de integratorpijp. Een goede vuistregel bestaat erin te stellen dat, om een hoge uniformiteit te verkrijgen, een lichtstraal minstens drie maal moet gereflecteerd worden vooraleer hij de uitgang van de lichtpijp bereikt. Aangezien er meerdere reflecties vereist zijn, moet de lichtpijp dus voldoende lang zijn. Om een goede uniformiteit te realiseren, kiest men meestal de lengte van de lichtpijp vijf keer de diagonaal van het ingangsvlak. De lichtpijp kan zowel hol zijn, met reflecterende binnenwanden, of massief, waarbij het licht totaal intern gereflecteerd wordt.



Figuur 1.6: Homogenisatie door ontstaan van virtuele bronnen bij een integratorpijp

De tweede methode maakt gebruik van lensarrays (figuur 1.7). Het licht wordt eerst gecollimeerd met de parabolische reflector (is niet weergegeven in de figuur). Hierna gaat de bundel door een lensarray. Deze lensarray bestaat uit microlenzen met dezelfde vorm als de lichtklep, maar herschaald. Elke lens zal de stralenbundel focuseren in de overeenkomstige lens van de tweede array en vormt hierbij een beeld van de bron. De tweede lensarray, samen met de beeldvormende lens, beeldt de rechthoekige lenzen van de eerste array af op de lichtklep. De circulaire fluxverdeling van de parabolische reflector wordt bemonsterd door de rechthoekige elementen van de lensarrays en deze worden dan gesuperponeerd in het vlak van de lichtklep. Hierdoor verkrijgt men een homogenisatie van de reflectoroutput en wordt de geometrie van de lichtverdeling van de lichtbron omgezet in een rechthoekige verdeling.



Figuur 1.7: Een optisch systeem met lensarrays om een rechthoekige, uniforme lichtverdeling te verkrijgen

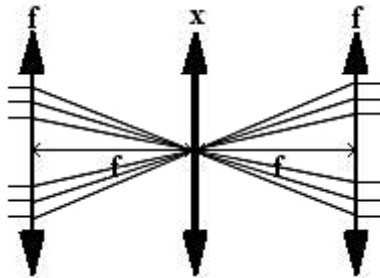
2.2.2 Lenzensysteem

Om de lichtvlek over te brengen van de integratorpijp naar de lichtklep worden er een aantal lenzen gebruikt. Deze lenzen kunnen ofwel een één-op-één-afbeelding realiseren ofwel een herschaling van de doorsnede van de lichtpijp afhankelijk van de gekozen grootte ervan. Indien men de integratorpijpdoorsnede even groot kiest als de oppervlakte van de lichtklep, dan wordt er een één-op-één-afbeelding gerealiseerd en worden de stralingshoeken niet meer gewijzigd. Men kan echter ook kiezen voor een kleinere integratorpijp om dan vervolgens de lichtvlek te vergroten door middel van het lenzensysteem tot de oppervlakte van de lichtklep. Hierbij gaat de vergroting van de vlek samen met een verkleining van de stralingshoeken, daar ze onderling verbonden zijn door de étenduwet. Men kan kiezen voor een kleinere integratorpijp om het projectiesysteem compact te maken, en de lichtvlek vervolgens te vergroten. Hier zal de omhullende hoekkegel in de lichtpijp groter zijn dan de omhullende kegel die de display belicht.

Een dergelijk lenzensysteem kan worden gebruikt bij systemen met reflectieve displays zoals LCOS of DMD om de lichtvlek (achterkant lichtpijp) over te brengen naar de display. Bij transmissieve displays zal dit overbodig zijn en kan de display direct achter de lichtpijp geplaatst worden. Dit zal de totale architectuur compacter maken.

Het eenvoudigste bruikbare lenzensysteem is een systeem met drie lenzen zoals weergegeven in figuur 1.8. Dit is een systeem dat één-op-één-afbeelding realiseert, en dus de lichtvlek na de lichtpijp kopieert naar de display. De eerste en de derde lenzen zijn identiek en zijn zo gepositioneerd

dat hun brandpuntsvlakken samenvallen. Deze twee lenzen zorgen voor de één-op-één-afbeelding. De laatste lens, zijnde een veldlens, in het brandpuntsvlak dient om enerzijds lichtstralen op te vangen en af te buigen naar de derde lens die anders verloren zouden kunnen gaan door de eindige afmeting van de lensdiameters. Deze lens zorgt ervoor dat de lichtvlek niet aan intensiteit verliest. Anderzijds kan door de kromming aan te passen de plaats van het beeldvlak opgeschoven worden. Dit kan nodig zijn omdat er een zekere ruimte nodig kan zijn tussen de laatste lens en de display om bijvoorbeeld een polariserende bundelsplitter (PBS) te plaatsen bij een LCOS-lichtklep.



Figuur 1.8: Lenzenstelsel 1-op-1-afbeelding

Tussen de lenzen kunnen er eventueel nog andere componenten geplaatst worden. Dat kan bijvoorbeeld een polarisatierecuperator zijn, of een ‘switchable retarder’, maar ook een aluminiumspiegel om het optische pad op te vouwen.

In het brandpuntsvlak van de eerste lens, waar de veldlens geplaatst wordt, is er een transformatie van de angulaire lichtverdeling van de rechthoekige vlek, afkomstig van de lichtpijp, naar een spatiale lichtverdeling. Met andere woorden, elk punt in het brandpuntsvlak komt overeen met een bepaalde hoek na de lichtpijp. Hoe groter de hoeken zijn, hoe verder de getransformeerde afbeelding van de optische as ligt. Deze transformatieformule kan gevonden worden door te vertrekken van de lenspropagatieformule. Hierbij duidt het subscript ‘new’ op de toestand na de lens en ‘old’ op de toestand ervoor. ‘Y’ is de plaatsvariabele, ‘u’ is de tangens van de hoek, ‘f’ de brandpuntsafstand van de lens en ‘t’ de afstand vanaf de lens tot het vlak waar de toestand bekeken wordt. Hier kunnen we ‘t’ vervangen door ‘f’ daar we in het brandpuntsvlak zitten. Deze betrekking wordt gegeven door formule 1.5.

$$y_{new} = y_{old} + t_{afs \tan d} * (u_{old} - \frac{y_{old}}{f}) = f * u_{old} \quad (1.5)$$

Aangezien het systeem een bepaald f -getal heeft, wil men de hoeken die groter zijn dan gewenst, uit het systeem wegfilteren om de hoeveelheid strooilicht verderop in de projector te minimaliseren. Het strooilicht zal de werking van de projector (het contrast) sterk degraderen. Het brandpuntsvlak is dan ook de meest geschikte plaats om dit te doen. Meestal plaatst men hier een apertuur om de ongewenste hoeken uit de angulaire distributie weg te filteren. Afhankelijk van de gebruikte lichtklep kan dit een circulaire apertuur zijn, maar de apertuur kan ook een veel complexere vorm aannemen [8].

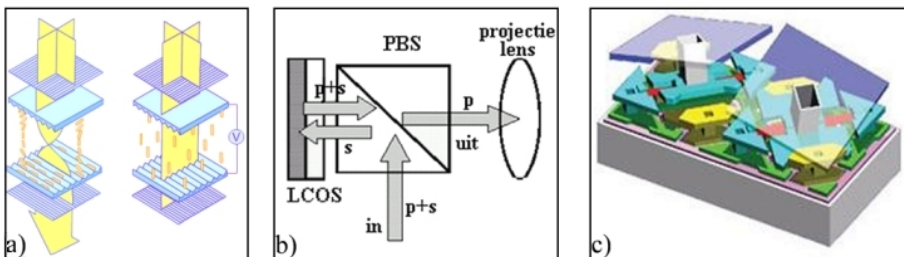
2.2.3 Modulatie

De verkregen rechthoekige, uniforme lichtbundel belicht rechtsreeks of via het lenzensysteem de lichtklep waar de beeldinformatie op een elektronische wijze terechtkomt. Deze lichtklep moduleert de invallende lichtbundel en zo ontstaat er een beeld op de lichtklep. Elke pixel van de display moduleert de lichtintensiteit plaatselijk. Deze modulatiemethode is afhankelijk van het type display, maar betreft wel altijd intensiteitsmodulatie.

Bij vloeibare-kristalgebaseerde lichtkleppen, zoals LCD en LCOS, is de modulatie gebaseerd op de polarisatietoestand van het licht. Het vloeibare kristal kan onder invloed van het aangelegd elektrisch veld, de polarisatierichting/toestand van het licht veranderen. Door het licht na de display te laten passeren door een analysator, laat men enkel het licht door dat volgens die richting gepolariseerd is. Door de polarisatierichting/toestand te wijzigen, wijzigt men ook de hoeveelheid licht die door de analysator passeert, en dus moduleert men zo de lichtintensiteit. Dit principe wordt getoond in figuur 1.9a. Hier kunnen we verder onderscheid maken tussen transmissieve (LCD) en reflectieve displays (LCOS). Bij LCD is er voor en na het vloeibare kristal een polarisator aanwezig, een optische component die slechts één polarisatietoestand doorlaat (zie figuur 1.9a). De eerste polarisator filtert de ene polarisatierichting weg, vervolgens wordt de polarisatierichting van het overblijvende licht al dan niet gedraaid en zorgt de tweede polarisator, ook wel de analysator genoemd, ervoor dat de intensiteit gemoduleerd wordt. In principe heeft een LCOS-lichtklep dezelfde werking, maar omdat deze reflectief is, bevindt het invallende en gereflecteerde licht zich in dezelfde ruimte boven het LCOS-paneel. Om deze twee bundels van elkaar te onderscheiden, gebruikt men een optische

component die een polarisatiegebaseerde werking heeft. Een ‘polarizing beam splitter’ (PBS) is een component die de ene polarisatie-richting doorlaat (de p-polarisatie) en de andere reflecteert (de s-polarisatie), waardoor de invallende en de gereflecteerde gemoduleerde bundels van elkaar gescheiden kunnen worden. Het licht waarvan de polarisatie gewijzigd wordt in het vloeibare kristal, wordt dan doorgelaten in de richting van de projectielens. Dit wordt getoond in figuur 1.9b.

Een alternatieve lichtkleptechnologie betreft DMD's gebaseerd op MEMS-technologie. DMD-lichtkleppen bestaan uit een set van microspiegeltjes, één per pixel, geïntegreerd op een Si-substraat, die kunnen kantelen via een scharnier en dus twee toestanden hebben (figuur 1.9c). In de ene toestand wordt het inkomend licht gereflecteerd naar de projectielens, de ‘aan-toestand’, in de andere toestand wordt het licht gereflecteerd naar een absorber, de ‘uit-toestand’. Het schakelen gebeurt door middel van een aangelegd elektrisch veld. Door de microspiegels, dus de pixels, in een bepaalde toestand te zetten, wordt er een beeld geschreven in de display. Deze methode noemt men ook ‘aan-uit-modulatie’.



Figuur 1.9: Principe van verschillende types lichtkleppen
 a) transmissief (LCD) b) reflectief (LCOS) c) reflectief (DMD)

Verder bestaan ook nog andere modulatiemethodes die op diffractie of verstrooiing van het licht berusten afhankelijk van een uitwendige actuator, meestal een aangelegd elektrisch veld. Hierbij is het telkens de bedoeling om een deel van het licht door te laten naar de projectielens zodat we er een intensiteitsmodulatie verkrijgen.

Men kan een kleurenprojector maken door ofwel de drie basiskleuren sequentieel te moduleren, ofwel door de drie kleuren permanent te moduleren, maar dan moeten de drie kleurkanalen na de modulatie en voor de projectielens terug gerecombineerd worden. Dit kan door middel van een

X-kubus [9]. Dit is een optische component in de vorm van een kubus waarbij op de diagonaalvlakken bepaalde optische coatings aangebracht worden die de combinatie van de kleuren mogelijk maken. De drie zijvlakken worden gebruikt voor de drie basiskleuren als ingangsvlakken en het vierde vlak als uitgangsvlak van het gerecombineerd licht dat naar de projectielens gaat.

2.2.4 Projectie

Het projectiedeel kan men opsplitsen in twee delen, namelijk de projectielens en het projectiescherm. Het beeld dat gevormd wordt op de microdisplay is een miniaturbeeld en moet vergroot worden. Dit wordt gedaan door middel van een projectielens. Een projectielens bestaat in feite uit een set van lenzen die geoptimaliseerd zijn voor een bepaald bereik en waarbij de aberraties geminimaliseerd zijn. De projectielens wordt gekarakteriseerd door het f-getal en de 'front focal length'(FFL). Het f-getal bepaalt samen met de oppervlakte van de microdisplay de systeemétendue en is dus een belangrijk gegeven. Deze parameter bepaalt de maximale hoek waaronder de stralen mogen invallen op de projectielens zodat ze nog kunnen geprojecteerd worden. Voor projectiesystemen zijn de gangbare f-getallen tussen 2.5 en 3.0 dat overeenkomt met maximale hoeken tussen 11.5° en 9.5° . De tweede parameter is de FFL. Dit is de afstand van het laatste lensoppervlak tot het brandpuntsvlak. Aangezien de microdisplay op een veel groter scherm afgebeeld moet worden en dus vele keren vergroot wordt, moet het object (microdisplay) bijna in het brandpuntsvlak van de projectielens geplaatst worden. Aangezien er zich een aantal componenten, zoals polarisator, PBS, X-kubus, etc. kunnen bevinden tussen de lichtklep en de projectielens, dient de FFL voldoende groot te zijn. Verder bestaan er projectielenzen met regelbare FFL. Dit vergemakkelijkt het gebruik van het projectiesysteem, doordat de beeldafstand niet vast hoeft te zijn.

Het beeld wordt tenslotte geprojecteerd op een projectiescherm. Dit kan transmissief of reflectief zijn. Voorbeelden hiervan zijn respectievelijk schermen bij een projectietelevisie en frontprojectiebeamers. Verder bestaan er allerhande types projectieschermen. Het meest eenvoudige frontprojectiescherm is een wit scherm dat lambertiaans reflecteert. Dit is ook het meest gebruikte type. Daarnaast zijn er schermen die niet lambertiaans maar eerder gericht reflecteren of doorlaten door middel van een interne microlenzenstructuur. Men spreekt van de directiviteit van het scherm. Deze schermen zullen een beperkte kijkhoek hebben, maar binnen die kijkhoek een hogere helderheid. Meestal zijn de schermen niet polarisatiebehoudend. Er bestaan echter ook schermen die de polarisatie

behouden. Dergelijke schermen kan men aanwenden om toepassingen te visualiseren die gebaseerd zijn op polarisatie, zoals stereoscopische applicaties [29][30].

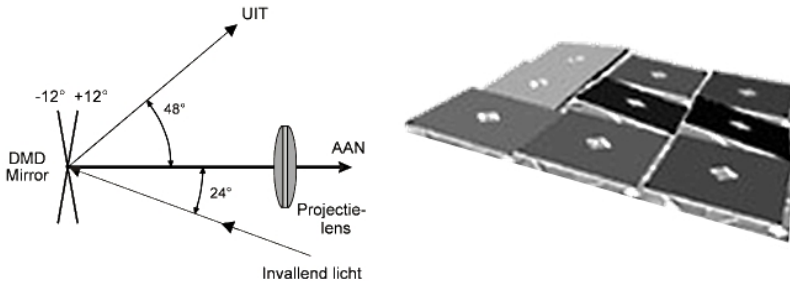
3. Lichtkleptechnologieën

Voor lichtkleppen kan men gebruik maken van een ganse reeks van technologieën met als belangrijkste: polarisatiewijziging d.m.v. een vloeibaar-kristallaag en reflectie d.m.v. draaibare spiegels (MEMS). Belangrijkste voorbeelden van vloeibaar-kristaltechnologie zijn de transmissieve LCD (Liquid Crystal Displays)- en reflectieve LCOS (Liquid Crystal On Silicon)-lichtkleppen; van MEMS-technologie (micro-electromechanical system) is dit de DMD-lichtklep (Digital Micromirror Device) [8]. Deze beeldschermen gaan we hier verder in detail bespreken. Transmissieve LCD's worden vaak in 'low-end'-applicaties gebruikt en zijn goedkoper; de LCOS- en DMD-panelen daarentegen worden in 'high-end'-applicaties gebruikt.

3.1 MEMS-technologie: DMD-lichtklep

Een DMD-microdisplay is een micro-elektromechanisch systeem (MEMS) dat bestaat uit een matrix van kleine draaibare spiegelstukjes gemonteerd op een halfgeleiderchip. Deze spiegelstukjes kunnen door middel van elektrostatische krachten worden geroteerd over $\pm 12^\circ$ en kennen twee stabiele toestanden. Deze component werd ontwikkeld door Texas Instruments [10] en wordt momenteel enkel door dat bedrijf geproduceerd.

De modulatie gebeurt door het wijzigen van de reflectierichting van de invallende lichtbundel. In de aan-toestand wordt het licht gereflecteerd naar de pupil van de projectielens en in de uit-toestand zal het licht erbuiten gereflecteerd worden. Dit principe wordt geïllustreerd in figuur 1.10.



Figuur 1.10: Het werkingsprincipe van een DMD-spiegel (links) en een 3x3 pixel DMD-paneel (rechts)

Aangezien er maar twee stabiele toestanden zijn, is dit in principe een ‘aan-uit-modulator’ en kan hij enkel een zwart-wit beeld genereren. Gezien het digitale karakter van de DMD-spiegeltjes wordt deze technologie “Digital Light Processing” (DLP) genoemd. Deze spiegeltes kunnen zeer snel schakelen (tot 16 kHz) en hebben een zeer grote levensduur (10^5 uur). Een dergelijk DMD-paneel kan 0.8 tot 1.4 miljoen kleine spiegeltes bevatten, afhankelijk van de grootte van het paneel (één spiegelte heeft een zijde van $14 \mu\text{m}$).

Doordat een DMD volledig digitaal werkt, zijn er geen verschillende toestanden mogelijk voor de implementatie van verschillende grijswaarden. Bij een DMD-chip genereert men een reeks van digitale lichtpulslen van verschillende tijdsduur die bij de waarnemer de sensatie van grijswaarden teweegbrengt. Deze techniek noemt men binair gecodeerde pulsbreedtemodulatie (PWM). Dit kan men realiseren omdat de spiegeltes zeer snel kunnen schakelen. Indien men 256 grijsniveaus wenst te realiseren, zal een frame onderverdeeld worden in 255 subframes en zullen de verschillende subframes achtereenvolgens in aan- of uit-toestand gezet worden naargelang het gewenste grijsniveau. De grijsniveaus worden voorgesteld door een 8-bit waarde. Een DMD-display heeft een lineaire grijsdistributie.

De DMD wordt monolithisch gefabriceerd op een CMOS-adresseringscircuit. In tegenstelling tot de meeste andere MEMS waar het aansturingscircuit buiten het gebied van het actief mechanisch element gelegen is, vormt dit één geheel bij een DMD-chip. Elk DMD-spiegelte wordt gefabriceerd boven een SRAM-cel die zich in twee toestanden kan bevinden. Deze geheugencellen dienen voor de opslag van het volgende frame. Lijn per lijn worden er nieuwe toestanden ingelezen in deze geheugencellen. De spiegeltes reageren echter niet op deze nieuwe

adresseringsspanningen. Pas wanneer het nieuwe frame getoond moet worden, wordt de informatie in het geheugen doorgegeven naar de spiegeltjes en het geheugen wordt weer opgevuld met de volgende frame-informatie. Een voordeel van dergelijke manier van aansturen is dat alle spiegels tegelijk naar hun nieuwe toestand roteren in plaats van lijn per lijn, indien ze onmiddellijk de aangelegde adresseringsspanningen van de geheugencellen zouden volgen.

Aangezien de modulatie gebaseerd is op de wijziging van de reflectierichting en niet die van de polarisatietoestand, kan men hier beide polarisatietoestanden van het licht moduleren en hoeft men niets weg te filteren. Hierdoor zal een op DMD gebaseerd projectiesysteem een hogere optische efficiëntie vertonen. Door de monolithische structuur kunnen DMD's gekoeld worden langs de achterkant en zullen de mogelijke thermische problemen vermeden worden. Door het verbergen van het aansturingscircuit achter de spiegels, hebben DMD-displays een zeer hoge vulfactor (90%).

De belangrijkste voor- en nadelen van DMD's gaan we hier kort samenvatten. Aangezien een DMD-lichtklep volledig digitaal werkt, is deze component uiterst geschikt voor het weergeven van digitale informatie (internet, digitale televisie, DVD, etc.). Met deze lichtklep is het immers mogelijk om het volledige proces, van de digitale beeldgeneratie tot de vertoning van de beelden, digitaal te laten verlopen. Bij een DMD-projector zijn de grijswaarden onafhankelijk van de temperatuur en ouderdom, aangezien de grijswaarden worden bepaald door de tijdsindeling van de aan- en uit-toestand. Bij vele andere lichtkleptechnologieën zal dit wel een probleem zijn. De vulfactor van de DMD is hoog doordat de afstand tussen de spiegeltjes klein is. Dit is natuurlijk voordelig voor de optische efficiëntie van het projectiesysteem, maar ook voor de geprojecteerde beeldkwaliteit. Doordat de DMD-chip gebruik maakt van een monolithisch productieproces is het redelijk eenvoudig om over te gaan naar hogere resoluties, maar de afmetingen van de lichtklep zullen evenredig toenemen. Het thermische probleem kan vermeden worden door afkoeling van de chip langs de achterkant, zodat de lichtklep zeer hoge helderheden aankan. Een laatste voordeel is de niet-gepolariseerde werking waardoor we geen licht hoeven weg te filteren.

DMD's hebben ook aanzienlijke nadelen: ze zijn moeilijk verkrijgbaar (één leverancier) en vermoedelijk daardoor ook duurder dan bijvoorbeeld LCOS-panelen. De verkoopstrategie zal veel minder klantvriendelijk zijn. Een ander nadeel, vergeleken met LCOS, is de resolutiebeperking per

oppervlakte. De spiegelafmetingen kunnen niet eenvoudig verkleind worden, waardoor we naar grotere microdisplays moeten overgaan om grotere resoluties te kunnen hebben. Er zijn wel al enkele verschillende pixelafmetingen gerealiseerd, maar dit vergt telkens een lange ontwerpfase.

3.2 Vloeibaar-kristaltechnologie

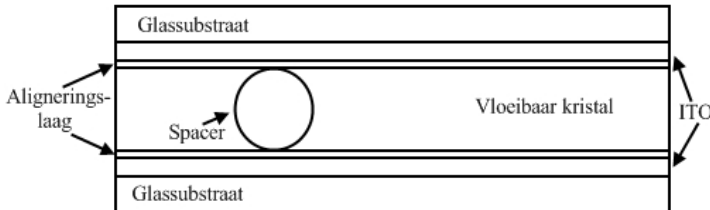
Vloeibare kristallen (LC) vormen een fase, de mesogene fase, tussen de kristallijne vaste stoffen en de isotrope vloeistoffen en ze hebben eigenschappen gemeen met beide fases. LC-moleculen zijn meestal organisch en ze hebben een langwerpige structuur. Deze zorgt ervoor dat de optische en elektrische eigenschappen verschillen naargelang ze evenwijdig met of loodrecht op de moleculaire as worden beschouwd. Doordat men de oriëntatie van de moleculen kan manipuleren door het aanleggen van een elektrisch veld, kan men de optische eigenschappen veranderen. Dit maakt deze materialen uiterst geschikt voor gebruik in beeldschermen en projectiesystemen.

Naargelang de aard van de ordening worden de vloeibare kristallen onderverdeeld in de nematische, smectische en cholesterische fase [11]. Voor microdisplays maakt men meestal gebruik van de nematische fase. Deze bestaat uit staafvormige moleculen die een oriëntationele orde vertonen, maar geen positionele orde. Door gebruik te maken van oppervlaktestructuren waarmee de LC-moleculen een sterke affiniteit hebben, de zogenaamde aligneringslagen, kan men de oriëntatie van de moleculen vastleggen. Door het aanleggen van een elektrisch veld over de LC-laag kan men deze oriëntatie wijzigen. Er bestaan verschillende modi voor de nematische vloeibare kristallen, afhankelijk van de precieze oriëntatie van de aligneringslagen en de vloeibare kristallen zelf. Belangrijk is dat het vloeibaar kristal de polarisatierichting van invallend gepolariseerd licht kan veranderen en deze verandering afhankelijk is van de precieze oriëntatie van de LC-moleculen die op haar beurt afhankelijk is van het aangelegd elektrisch veld.

3.2.1 De transmissieve LCD-lichtklep

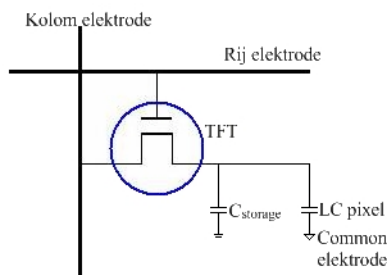
In transmissieve LCD-lichtkleppen plaatst men een vloeibaar kristal tussen twee glassubstraten. Op elk substraat bevindt zich een transparante geleider (ITO) en een aligneringslaag zoals te zien is in figuur 1.11. De ‘spacers’ zorgen voor een uniforme en juiste dikte van de LC-laag over gans de lichtklep. Deze dikte is cruciaal aangezien ze samen met het aangelegd

elektrisch veld, de polarisatiedraaiing bepaalt. Ze zal eveneens de reactiesnelheid van het vloeibaar kristal bepalen.



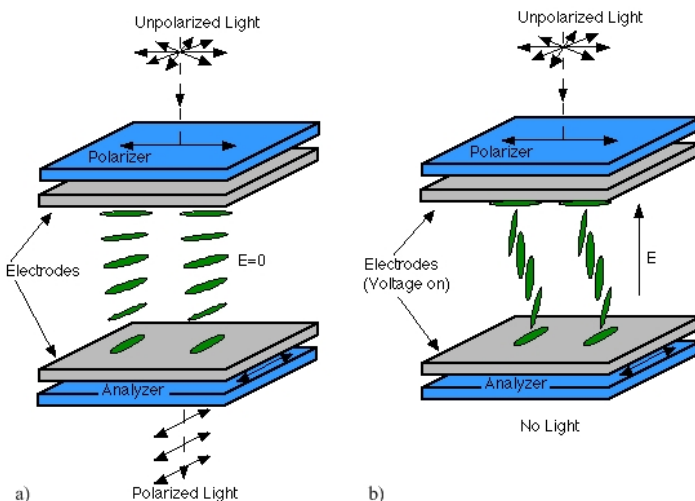
Figuur 1.11: Doorsnede van een transmissief LCD

De elektroden worden van een patroon voorzien om de individuele pixels te definiëren. Er bestaan twee adresseringsmethodes, namelijk een passieve matrix (PM)- en een actieve matrix (AM)-adressering [11]. Bij de PM-adressering bestaat de ene laag uit een set van rijelektrodes en de andere uit een set van kolomelektrodes zodat ze samen een matrixstructuur vormen. Hiermee kunnen slechts displays met een beperkte resolutie goed aangestuurd worden. Daarentegen wordt bij een AM-adressering elke pixel voorzien van een dunnefilmtransistor (TFT) die als schakelend element functioneert. Hiermee wordt de resolutiebeperking opgeheven. De rijelektrodes worden verbonden met de 'gate' en de kolomelektrodes met de 'drain'. De 'source' van de transistor wordt verbonden met de LC-elektrode en een 'storage'-capaciteit die de spanning op het LC-cel constant houdt gedurende de frametijd. De AM-aansturing van één pixel wordt voorgesteld in figuur 1.12. Op het eerste glassubstraat bevinden zich nu naast de rij- en kolomelektrodes ook de TFT-transistoren. Deze aansturing moet nu naast de pixels liggen, waardoor de vulfactor van deze lichtklep niet zo groot kan zijn (< 70%). Dit probleem wordt belangrijker wanneer de resolutie van de transmissieve LC-lichtkleppen hoger wordt. De elektrode op het tweede substraat is een gemeenschappelijke elektrode.



Figuur 1.12: Actieve matrix aansturing

In figuur 1.13 wordt de werking van een LCD-microdisplay voorgesteld met respectievelijk een aan-pixel ($E=0$) en een uit-pixel ($E \neq 0$). Vóór (boven) en achter (onder) de display worden twee onderling gekruiste polarisatoren geplaatst. De aligeringslagen op de bovenste en de onderste glassubstraten, volgens welke de langwerpige vloeibaar-kristalmoleculen zich richten, zijn eveneens orthogonaal aangebracht. De moleculen wentelen zich in de rusttoestand van de ene richting naar de andere (laagste potentiële energietoestand), waardoor de polarisatietoestand veranderd wordt. Door de juiste keuze van de dikte van de vloeibaar-kristallaag wordt de ene polarisatietoestand omgezet naar de andere. De s-polarisatie wordt door de eerste polarisator doorgelaten. Doorheen het kristal wordt deze omgezet naar p-polarisatie en doorgelaten door de analysator die gekruist is ten opzichte van de polarisator. Het licht komt er dus (in principe) ongeattenuëerd door. Dit wordt de aan-toestand genoemd. Leggen we nu een voldoende groot elektrisch veld aan (zie 1.13b), dan gaan de moleculen (met uitzondering van de moleculen die gehecht zijn aan de aligeringslagen) zich richten volgens dit veld en ziet het licht geen dubbelbrekend materiaal meer. Hierdoor zal de polarisatie niet gedraaid worden en het licht wordt dus tegengehouden door de analysator. Dit is de uit-toestand. Met een elektrisch veld tussen deze uiterste toestanden zullen de moleculen zich gedeeltelijk oriënteren, waardoor ze nog steeds dubbelbrekend werken. De polarisatie van het inkomend licht zal niet volledig gedraaid worden waardoor een fractie van het licht doorgelaten wordt door de analysator. Hiermee kan men op een analoge manier grijsniveaus realiseren (door modulatie van het aangelegd elektrisch veld).



Figuur 1.13: Werking LCD-paneel: a) aan-pixel b) uit-pixel

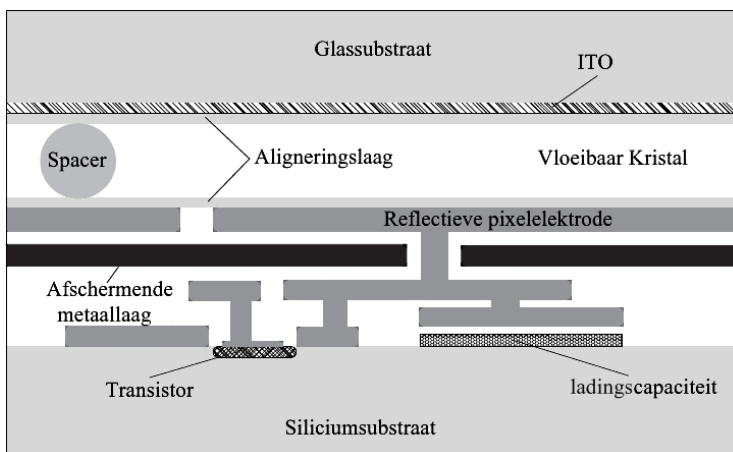
Het grootste voordeel van een LCD-paneel is de mogelijkheid om analoge grijsniveaus te realiseren. Hierdoor kan er meer kleurdiepte (aantal grijswaarden) verkregen worden. Bovendien is de LCD-technologie geen monopolie van één bedrijf, er zijn vele concurrenten wat de klant ten goede komt (prijs, klantvriendelijkheid, etc.) Er zijn echter ook een aantal belangrijke nadelen vergeleken met de DMD-technologie. Het werkingsprincipe is op polarisatie gebaseerd waardoor, ingeval van een ongepolariseerde lichtbron, de helft van het licht weggefilterd wordt. De framedata wordt rij per rij aangeboden aan het vloeibaar kristal waardoor een zekere dode tijd moet geïntroduceerd worden per subframe bij kleursequentiële systemen. Bovendien heeft het vloeibaar kristal een grote reactietijd (5 tot 8 ms) die mede bepaald wordt door de celdikte. Hierdoor zal het beeld niet echt scherp zijn bij bewegende beelden. Een LCD-paneel kan niet zo gemakkelijk gekoeld worden als een DMD waardoor het niet geschikt is voor zeer grote lichtstromen. Door de integratie van de aansturing op het paneel zelf is de vulfactor beperkt (hoogstens 70%). Dit veroorzaakt een lagere throughput en een onaangename zichtbare grid (artefact) tussen de pixels. Dit effect wordt ook wel ‘Screen Door Effect’ genoemd [12] en hierdoor wordt de resolutie van een LCD-paneel beperkt. De vloeibaar-kristalmoleculen en de aligeringslagen zijn gevoelig voor UV-licht en degraderen na verloop van tijd. Deze slijtage zal zowel de efficiëntie als de grijsniveaus doen verlopen.

LCD-panelen hebben dus een beperkte resolutie, een beperkte throughput, een grote reactietijd en zijn goedkoper. Hierdoor worden ze enkel gebruikt in low-end toepassingen.

3.2.2 De reflectieve LCOS-lichtklep

Een ander voorbeeld van de vloeibaar-kristaltechnologie is de reflectieve LCOS-lichtklep. Dit is een lichtklep die zoals een DMD reflectief werkt, maar de modulatie is gebaseerd op polarisatiewijziging. Inkomende en uitgaande bundels passeren door eenzelfde vlak. De reflectieve cellen worden aangestuurd door een actieve matrix die in een kristallijn siliciumsubstraat wordt gevormd met CMOS-processen. Aangezien het vloeibaar kristal boven een siliciumsubstraat komt, spreekt men van ‘Liquid Crystal On Silicon’ (LCOS). Er zijn meerdere firma’s die LCOS-lichtkleppen produceren en steeds meer projectiesystemen worden met deze technologie ontworpen. Er zijn ook digitale cinemaprojectoren op de markt gebracht die gebruik maken van deze technologie [13]. Dit illustreert de mogelijkheid om LCOS-projectoren te ontwikkelen met een hoge helderheid, hoge resolutie en goede optische eigenschappen.

In figuur 1.14 wordt de architectuur van een LCOS-pixel geïllustreerd. De vloeibare-kristallaag ligt bovenop een reflectieve elektrode die bijna de volledige pixel bedekt. De transistor die de pixel aanstuurt, is verbonden met deze elektrode. Bovenop de LC-laag komt een transparante ITO-elektrode waarlangs het licht invalt. Twee aligneringslagen zorgen ervoor dat het vloeibaar kristal de juiste rust-oriëntatie aanneemt. Met de ‘spacers’ wordt de dikte van de kristallaag, die uiterst uniform moet zijn, bepaald. Doordat de LC-laag twee keer wordt doorlopen door het invallende licht, mag de dikte van deze laag twee maal kleiner zijn dan bij transmissieve LCD’s. Dit is voordelig voor de schakelsnelheid aangezien de reactietijd kleiner wordt naarmate de LC-laag dunner wordt. Aangezien men kristallijn silicium gebruikt voor de actieve matrix van de LCOS-lichtklep, kan men deze fabriceren met gekende CMOS-processen. Deze aansturing wordt verborgen onder de reflectieve pixelelektrode. Hierdoor kunnen er zeer hoge resoluties behaald worden. De resolutiebeperving is in feite de beperking van de CMOS-technologie. Er is bovendien nood aan een ladingscapaciteit voor iedere pixel die de spanning over de LC-laag constant houdt tot de data vernieuwd zijn. Dit moet gebeuren met voldoende precisie opdat de grijswaarden niet zouden veranderen. Verder moet de aansturing beschermd worden tegen het invallende licht dat elektron-gat-paren kan genereren in het siliciumsubstraat. Daarom wordt een extra metaallaag aangebracht die de onderliggende structuur afschermt van het invallende licht.



Figuur 1.14: Doorsnede van een LCOS-pixel

De reflectieve elektrode moet een hoge reflectiecoëfficiënt hebben. Aangezien aluminium één van de meest reflectieve metalen is voor zichtbaar

licht, gebruikt men dit materiaal voor de reflectieve elektrode. De reflectie van deze elektrode kan nog vergroot worden door het aanbrengen van een aantal diëlektrische lagen [14]. Een reflectiviteit van 75% is een goede richtwaarde. Het is van groot belang dat deze elektrode geen oneffenheden vertoont om geen verstrooiing te verkrijgen. Dit bereikt men door enkele chemische en mechanische polijstprocessen in te voeren in het fabricageproces. Samen met deze eigenschappen van de reflectieve elektrode wordt de optische efficiëntie mede bepaald door de vulfactor. De specifieke architectuur van de reflectieve lichtklep zorgt ervoor dat men de afstand tussen twee pixelelektrodes heel klein kan maken. Deze afstand wordt bepaald door de gebruikte lithografische technieken. Vandaar dat het mogelijk is om de vulfactor van een LCOS-paneel boven de 90% te houden, ook al werkt men bij heel hoge resoluties.

De architectuur van de lichtklep maakt het mogelijk om de aansturingselektronica samen met de actieve matrix in één chip samen te brengen. Verder wordt de koeling ook meestal in de totale chip geïmplementeerd. Doordat het LCOS-paneel reflectief werkt kan deze koeling aan de achterkant van de chip worden aangebracht. Het thermisch probleem kan hierdoor vermeden worden, zodat de lichtklep zeer hoge lichtfluxen aankan.

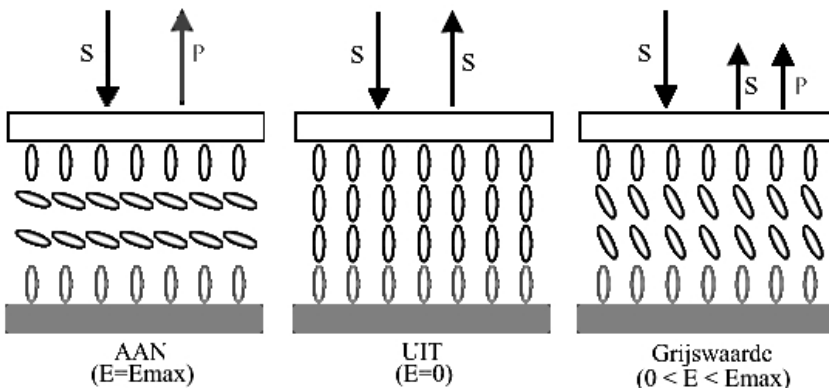
De werking van een LCOS-lichtklep werd reeds geïllustreerd in figuur 1.9b. In tegenstelling tot transmissieve lichtkleppen, bevindt het invallende en gereflecteerde licht zich in dezelfde ruimte boven het LCOS-paneel. Dit zorgt ervoor dat de optische architectuur van een LCOS-projector verschilt met deze van een transmissieve LCD-projector. Voor het scheiden van het licht in de aan- en uit-toestand gebruikt men een PBS. De optische coating van de PBS reflecteert het s-gepolariseerde licht naar het LCOS-paneel en laat het p-gepolariseerde licht door. De pixels in de aan-toestand ($E = E_{\max}$) zullen de polarisatierichting van het invallende licht veranderen zodat het na reflectie wordt doorgelaten door de PBS-coating en propageert naar de projectielens die de pixel afbeeldt op het scherm. De pixels in de uit-toestand ($E=0$) zullen de polarisatierichting van het invallende licht niet veranderen zodat dit licht bij zijn terugkeer wordt gereflecteerd aan de PBS-coating, zodat het terug naar de lichtbron propageert. De pixels met een bepaald grijsniveau, voorbeeld 50%, ($0 < E < E_{\max}$) zullen slechts een deel van het s-gepolariseerde licht veranderen in p-gepolariseerd licht zodat een deel doorgelaten wordt door de PBS naar de projectielens. Hiermee kan de intensiteit (grijswaarden) gemoduleerd worden.

Er bestaan verschillende types LCOS-lichtkleppen afhankelijk van het gebruikte vloeibaar kristal. Een veel voorkomend type zijn de nematische vloeibare kristallen. Deze klasse kent een grote verscheidenheid aan modes, die onderscheiden kunnen worden van elkaar door de initiële oriëntatie en de schakelmechanismes. Op basis van een aantal criteria kan men een mode selecteren die het meest geschikt is voor gebruik in reflectieve lichtkleppen. Deze criteria zijn hoge contrastverhouding, hoge lichtefficiënties, beperkte analoge aanstuurspanningen en voldoende korte schakeltijden. De meest geschikte mode, degene die voldoet aan vrijwel al deze criteria, is de 'verticaal gealigneerd nematisch vloeibaar kristal mode' (VAN) [15]. Deze mode is een pure dubbelbrekingsmode, waarbij het vloeibaar kristal initieel zo goed als verticaal georiënteerd wordt. Het belangrijkste voordeel van deze mode is de enorme contrastverhouding die mogelijk is, samen met een relatief grote tolerantie voor allerlei afwijkingen op celparameters. Nadelen bevinden zich in de afwijkende methodes die gebruikt worden voor de alignering en de beperkte beschikbaarheid van vloeibaar kristal met negatieve diëlektrische anisotropie, die nodig is voor de goede werking van deze mode.

Zoals reeds vermeld komt bij de VAN-mode de rusttoestand overeen met een verticale oriëntatie van de moleculen. Dit wordt mogelijk gemaakt door de homeotropische aligneringslagen. Een kleine afwijking van de verticale toestand, de pretilt, is nodig om ervoor te zorgen dat bij het aanleggen van een elektrisch veld de moleculen uniform dezelfde richting kiezen voor het omklappen. Hoe groter de pretilthoek des te kleiner de reactietijd zal zijn, maar het contrast zal ook verminderen. Dit komt doordat de uit-toestand dan niet volledig donker is. Door de pretilthoek zal er reeds dubbelbreking optreden. Bij de keuze van de celdikte maakt men een trade-off tussen de reactietijd en de benodigde aanstuurspanningen, die omgekeerd evenredig zijn met de celdikte. Bovendien wordt de elektro-optische responscurve bij grote celdiktes zo steil dat ze niet meer bruikbaar is voor de reproductie van grijswaarden.

In figuur 1.15 wordt het gedrag van een VAN-mode LCOS afgebeeld. Wanneer er geen spanning over de LC-laag staat, is de oriëntatie van de moleculen loodrecht op de elektroden. Het materiaal is dan niet dubbelbrekend en de polarisatierichting zal niet worden veranderd. De vloeibare kristallen die gebruikt worden bij VAN-mode hebben een negatieve diëlektrische anisotropie waardoor hun oriëntatie loodrecht op het elektrisch veld komt te liggen. Wanneer er een spanning over de LC-laag wordt aangelegd, zullen de moleculen (niet degene die geankerend zijn aan de alignatielagen) roteren waardoor het materiaal dubbelbrekend wordt voor het

invallende licht en de polarisatie-richting van dit licht wordt gewijzigd. Zo wordt het invallende s-gepolariseerde licht volledig omgezet in p-gepolariseerd licht. Door het aanleggen van een lagere spanning is het mogelijk om het invallende licht slechts gedeeltelijk om te zetten waardoor het gereflecteerde licht zowel s- als p-gepolariseerd licht zal bevatten. Enkel het p-gepolariseerde licht zal doorgelaten worden naar de projectielens. Op deze manier kan men verschillende grijswaarden realiseren.



Figuur 1.15: Het gedrag van een VAN-mode LCOS-pixel

We gaan hier even de voor- en nadelen van een LCOS-lichtklep samenvatten en deze vergelijken met een DMD-lichtklep. De LCOS-technologie heeft het grote voordeel dat ze eigenlijk een samensmelting is van twee volwassen technologieën, namelijk de technologie van geïntegreerde schakelingen en de technologie van de vloeibare kristallen die aangewend wordt voor transmissieve lichtkleppen. Dit zorgt ervoor dat er heel wat kennis en apparatuur beschikbaar is en dat de investeringen niet zo groot zijn vooraleer men tot de productie kan overgaan. De DMD-chip en andere MEMS die voor projectie kunnen gebruikt worden hebben ook een actieve matrix uit kristallijn silicium, maar bij de constructie van een LCOS-lichtklep zijn de gebruikte CMOS-processen veel meer gestandaardiseerd dan bij MEMS. De belangrijkste reden echter waarom men zal kiezen voor LCOS-panelen is de mogelijkheid tot zeer hoge resolutie. Door de reflectieve mode kan men de aansturing achter de reflectieve elektrode plaatsen waardoor de vulfactor van LCOS-lichtkleppen heel hoog zal zijn. Aangezien de afmetingen van de optische componenten van een projector afhankelijk zijn van de afmetingen van de lichtklep mag deze niet te groot worden. Als men de resolutie wil verhogen moeten de pixels dus kleiner worden. Bij reflectieve LC-lichtkleppen kan men dit zonder probleem doen en is de afmeting van een

pixel enkel beperkt door de minimale afmeting van de onderliggende schakeling. Bij DMD-chips kan men de vulfactor ook heel groot maken, maar het is heel wat moeilijker om de spiegeltjes te verkleinen. Doordat de actieve matrix van een LCOS-lichtklep gemaakt is in een kristallijn siliciumsubstraat zal de schakelsnelheid van de transistoren heel wat groter zijn dan bij TFT's. Door de geschikte keuze van de vloeibare-kristalmoden kunnen de LCOS-panelen hoge contrasten realiseren. Dankzij de reflectieve werking kunnen LCOS-panelen, zoals DMD-panelen, gekoeld worden langs achter. Dit maakt de LCOS-projectoren geschikt voor zeer hoge lichtstromen. Een ander voordeel is de leverbaarheid. Er zijn meerdere leveranciers voor LCOS-panelen. Hierdoor zullen de panelen goedkoper zijn dan DMD's en zal de verkoopsstrategie klantvriendelijker zijn. Een laatste voordeel vergeleken met DMD-panelen is de realisatie van analoge grijsniveaus. Hierdoor kunnen er meer grijsniveaus verkregen worden

Er zijn ook enkele nadelen aan deze technologie. Doordat de werking op polarisatie gebaseerd is, zal in geval van een ongepolariseerde lichtbron de helft van het licht niet bruikbaar zijn. Dit zal de optische efficiëntie sterk reduceren. Vergeleken met transmissieve LCD's, hebben LCOS-panelen een kleinere reactietijd. Dit is echter nog steeds veel groter dan de transitietijd van een DMD-spiegel die bijna ogenblikkelijk de juiste toestand aanneemt. Tenslotte zijn vloeibare kristallen gevoelig aan bepaalde straling en slijten ze sneller dan MEMS-structuren.

De bovenstaande factoren zorgen ervoor dat men in staat is om LCOS-projectoren te ontwikkelen met een goede prestatie. De introductie van een digitale cinema-projector op basis van LCOS-technologie is hiervan de perfecte illustratie. Deze technologie is dus een belangrijke speler voor het ontwikkelen van hoogperformante, hoogresolutie projectiesystemen [16][17].

In dit doctoraatswerk hebben we LCOS-panelen van het Gentse bedrijf Gemidis gebruikt. Deze panelen hebben een diagonaal van 0.82" met een aspect ratio 4:3 en een QXGA-resolutie ($2048 \times 1536 = 3$ megapixel). Het vloeibaar kristal is in de VAN-mode en heeft dus een hoog intrinsiek contrast (3500:1 bij een $f^\#$ van 2.88). Door de aanwezigheid van een kleine pretiilhoek zal de reactietijd van het kristal, bijvoorbeeld van uit- naar aan-toestand, klein zijn. Voor deze panelen is dit ongeveer 2.3 ms.

4. Lichtbronnen

Bij modulatiegebaseerde projectiesystemen wordt de generatie en de modulatie van het licht gescheiden. De lichtflux die afkomstig is van een lichtbron wordt gemoduleerd door de microdisplay. Er is dus een externe lichtbron nodig die de lichtflux levert. Er bestaan allerlei soorten lichtbronnen, maar deze zijn niet allemaal even geschikt om te dienen als lichtbron voor een projectiesysteem. De lichtbronnen moeten voldoen aan een aantal eisen eigen aan projectiesystemen.

Een van de belangrijkste vereisten is vanzelfsprekend dat ze veel licht moeten leveren. Dit moeten we echter verder nuanceren. Een grotere bron levert weliswaar meer lichtvermogen, maar zal niet per se meer bijdragen tot het projectiesysteem. In een vorige paragraaf kwam het onderwerp étendue aan bod. Een projectiesysteem is een systeem dat étendue gelimiteerd is, en dus enkel het licht dat binnen deze étendue valt, kan erdoor propageren. Daarom mogen we niet zomaar een grotere bron gebruiken om meer licht te verkrijgen [18]. De bron moet dus niet alleen veel lichtflux (lumen) leveren, maar ook veel lichtflux per eenheid étendue ($\text{lm}/\text{mm}^2\text{sr}$). Dit wordt ook wel de luminantie of de helderheid genoemd. Geschikte lichtbronnen voor projectiesystemen zijn dus bronnen met hoge luminantie. Daarnaast is de energetische efficiëntie ook belangrijk. Het aantal gecreëerde fotonen (lichtflux) per hoeveelheid ingepompte elektrische energie dient hoog te zijn om een systeem met hoog rendement te verkrijgen, wat tegenwoordig een onmisbare vereiste is. Levensduur is ook een belangrijke parameter die in het oog moet gehouden worden bij de keuze van een lichtbron.

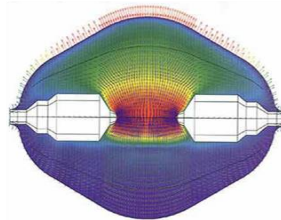
4.1 Een klassieke projectielichtbron: de UHP-lamp

Omwille van hun efficiëntie en hoge helderheid zijn booglampen uiterst geschikte lichtbronnen voor projectietoepassingen. Een booglamp is een lamp waarin een elektrische stroom een zeer hete boog van licht veroorzaakt, ook wel vlamboog genoemd. De lamp bestaat uit twee elektrodes in een transparante glazen omhulsel, waarin zich een gas bevindt. Het type van de lamp wordt meestal naar dat gas vernoemd. Dit kan neon, argon, xenon, krypton, natrium, metaalhalide of kwik zijn. Deze hoge-intensiteitsgasontladinglampen werken op een hogere stroom en een hogere druk dan de fluorescerende lampen. Hieronder staat een tabel met rendement en levensduur voor verschillende soorten booglampen. UHP-lampen hebben de beste levensduur, een goede efficiëntie en een étendue die overeenkomt met de systeemétendue van veel gebruikte microdisplays.

| type | MH | MH | Xe | UHP ^a | |
|-------------|------|-------|-------|------------------|-------|
| Vermogen | 125 | 575 | 750 | 100 | Watt |
| Lichtstroom | 7750 | 49000 | 23500 | 6000 | lumen |
| Efficiëntie | 62 | 85 | 31 | 60 | lm/W |
| Levensduur | 3000 | 3000 | 1000 | >4000 | uren |

Tabel 1.2: Gegevens van enkele typische projectielampen [4]

Hedendaagse dataprojectoren gebruiken bijna uitsluitend een booglamp als lichtbron. Meestal betreft het UHP-lampen (Ultra High Performance) waarin zich een kwikdamp bevindt onder ultrahoge druk. Het licht van de vlamboog is wit en heel erg fel. Deze lampen zijn zeer efficiënt (60 lm/W) en hebben een zeer hoge luminantie (400 à 500 lm/mm²sr). Door hun kleine boog lengte (elektrodeafstand) hebben ze een kleine étendue en zijn ze dus zeer aantrekkelijk voor microdisplayprojectoren aangezien de lichtkleppen steeds kleiner worden gemaakt. Figuur 1.16 geeft aan waar de vlamboog gevormd wordt en waar hij het heetst is.



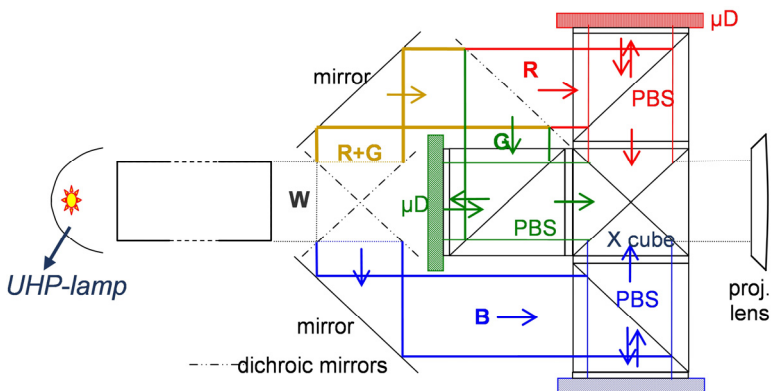
Figuur 1.16: UHP-lamp met de vlamboog [31]

UHP-lampen hebben echter ook belangrijke nadelen. Ze hebben een zeer beperkte levensduur van ongeveer 5 kh. Gewoonlijk is er voor een consumer product een levensduur van minstens 25 kh vereist en alle andere componenten van een projectiesysteem voldoen daaraan. De lamp beperkt dus de levensduur van de projector drastisch en moet een paar keer vervangen worden, wat de onderhoudskost doet toenemen. Het zijn bovendien vrij dure lichtbronnen. UHP-lampen vertonen ook een plotse faling, wat onaanvaardbaar is voor de meeste applicaties.

UHP-lampen vereisen hoge aanstuurspanningen (kV's) voor de ontsteking en hebben een groot volume mede door hun lawaaijige koeling. Bovendien zijn ze niet zo robuust en kunnen ze gevaarlijk zijn: ontploffingsgevaar en het vrijkomen van giftige kwikdampen. Dit alles maakt de projector minder draagbaar.

Een UHP-lamp straalt wit (maar ook UV en IR) licht uit, dat in de projector opgesplitst moet worden in de basiscomponenten R, G en B om een kleurenprojector te realiseren. Hiervoor zijn echter bijkomende dichroïsche spiegels nodig, wat de prijs en het volume van de projector zal doen toenemen. Bijkomend moet ook de ongewenste UV- en IR-straling weggefilterd worden. Bovendien zal elke bijkomende component een extra verlies introduceren, zodat de lichtoutput zal verminderen. Het licht van de UHP-lamp heeft een breed spectrum. Nadat het opgesplitst wordt in de basiscomponenten, heeft elke component nog steeds een breed spectrum wat zal leiden tot een gereduceerd kleurengamut, wat overeenkomt met minder gesatureerde basiskleuren en een kleiner gamma aan mogelijke kleuren. UHP-lampen hebben een lange opwarmtijd nodig.

In figuur 1.17 wordt een mogelijke 3-paneelsprojector functioneel getoond die werkt met een UHP-lamp. Na filtering van ongewenste straling wordt het licht van de UHP-lamp opgesplitst in de drie basiskleuren rood, groen en blauw door middel van dichroïsche spiegels. Vervolgens wordt elke kleur onafhankelijk gemoduleerd door een andere lichtklep. Tenslotte worden de drie kanalen gecombineerd met behulp van een X-kubus en gaat het beeld naar de projectielens.



Figuur 1.17: UHP-lamp gebaseerde projectie-architectuur

De opgesomde nadelen van de booglampen en de evoluerende markt van applicaties noodzaken ons om op zoek te gaan naar alternatieve lichtbronnen.

4.2 Alternatieve lichtbronnen

4.2.1 LED

Sinds de uitvinding van de lichtemitterende diode (LED) is de geproduceerde lichtstroom (lm) van deze component blijven stijgen. Deze vooruitgang heeft ervoor gezorgd dat het op dit moment interessant wordt om deze componenten als lichtbron te gebruiken in projectiesystemen. Een LED is een kleine, robuuste lichtbron met een lage werkspanning. Vandaar dat een LED de ideale lichtbron is om een compact en goedkoop projectiesysteem te bouwen, dat zelfs op batterijen kan werken [19]. Deze aspecten van de LED's, samen met het ontbreken van ontploffingsgevaar en de afwezigheid van giftige stoffen zoals bij UHP-lampen, kan de draagbaarheid van de projector verhogen.

LED's hebben nog andere interessante voordelen [18][20]. Ze hebben een zeer grote levensduur (tot 10^5 uur) wat ruim voldoende is voor de levensduur van een projectiesysteem en deze zal dus weinig onderhoud vergen. In tegenstelling tot de UHP-lampen is de degradatie van de lichtoutput geleidelijk, wat de betrouwbaarheid van het systeem ten goede komt. LED's zijn overigens goedkoper dan de UHP-lampen, en vooral duurzamer en dienen meestal ook niet te vervangen worden wat de kost ook sterk kan verminderen.

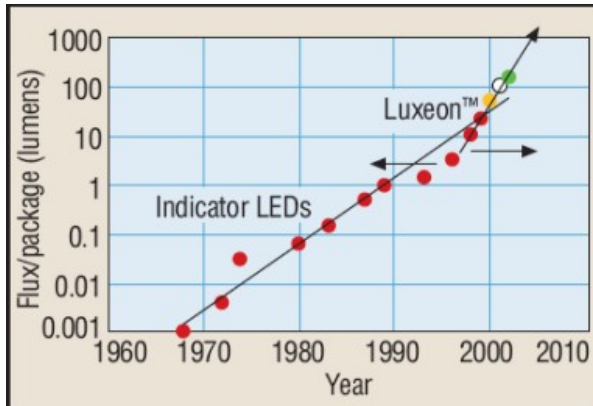
LED's zijn zeer smalbandige lichtbronnen en vormen dus gesatureerde basiskleuren, wat zal leiden tot een breder kleurengamut (kleurendriehoek). Dit vergroot het gamma aan kleuren dat kan gevormd worden en dus ook de beeldkwaliteit. Omdat ze zo smalbandig zijn, zijn ze beschikbaar in de basiskleuren rood, groen en blauw. Dat betekent dat kleurscheiding niet nodig is en we dus een aantal componenten, zoals de dichroïsche spiegels, kunnen uitsparen. Ze stralen ook geen UV of IR uit zodat deze filters ook kunnen weggelaten worden. Dit zal eveneens leiden tot een compacter systeem dat minder kost en zuiniger omgaat met de beschikbare lichtflux.

LED's hebben een grote verduisteringsratio. Daar waar UHP-lampen enkel aan- en uitgeschakeld kunnen worden, kunnen de LED's ook nog verduisterd worden naar de gewenste lichtintensiteit. Door de intensiteit bij donkere beelden te verminderen, kan het dynamische bereik vergroot worden en dit zal leiden tot een verhoogd contrast. Dit principe wordt "adaptive dynamic range control" genoemd [21] en wordt ook gebruikt bij projectoren met UHP-lampen, maar daar wordt het dynamisch bereik verwezenlijkt door een mechanische sluiters te plaatsen in het optische pad om zo de optische

throughput te verminderen. Het bereik zal nooit zo groot zijn als bij elektronische verduistering en het systeem zal ook trager werken. Bovendien is een mechanische component ongewenst in het systeem wegens slijtagegevaar. De verduistering kan gerealiseerd worden door o.a. de stroom door de LED's te moduleren, maar de optische respons zal niet lineair zijn met de stroom.

Een andere belangrijke troef is de ogenblikkelijke schakeltijd. Dit betekent dat de projector niet warm moet draaien zoals bij UHP-lampen (enkele minuten opwarmtijd). LED's kunnen dus gepulst worden, wat niet mogelijk is bij klassieke lichtbronnen. Het pulsen is een zeer belangrijk kenmerk, dat veel mogelijkheden biedt. Zo kan bijvoorbeeld het verduisteren gerealiseerd worden door de pulsbreedte te moduleren. In tegenstelling tot de stroommodulatie is de pulsbreedtemodulatie wel lineair met de gecreëerde lichtflux en de gewenste verduistering kan eenvoudig gerealiseerd worden. Een ander voorbeeld is dat bij kleursequentiële systemen de drie kleuren afwisselend kunnen gepulst worden en er dus geen ronddraaiend kleurwiel nodig zal zijn zoals bij UHP-lampen [20].

Er zijn ook enkele tekortkomingen aan LED's. Qua efficiëntie zijn de meeste booglampen voorlopig nog beter dan de beste LED's. De UHP-lampen hebben een efficiëntie van 60 lm/W, terwijl de LED's aan efficiënties komen van hoogstens 25 à 30 lm/W. De luminantie of de helderheid, een parameter die van cruciaal belang is voor projectiesystemen, ligt bij LED's ook nog veel lager dan bij UHP-lampen (50 lm/mm²sr versus 500 lm/mm²sr). LED's worden wel steeds performanter. Het aantal lumen per package verdubbelt om de 18 à 24 maanden; deze trend noemt men de wet van Haitz [22]. Na de invoering van hoogvermogen-LED's (High Brightness LED's, HBLED's) eind jaren '90, is deze trend versneld en kan men een afwijking zien van de wet van Haitz (zie figuur 1.18). Als deze trend zich voortzet, kan men dus verwachten dat LED's over een paar jaar in alle opzichten beter zullen zijn dan traditionele lichtbronnen en de performanties van booglampen mogelijk zullen overtreffen. Lumileds (Luxeon LED's) [23] zijn de gangmakers geweest van HBLED's, maar zijn ondertussen qua projectieperformanties voorbijgestreefd door produkten van andere fabrikanten zoals Osram (OSTAR) [24] en Luminus (Phlatlight) [25]. In het vervolg van dit werk zullen we spreken van LED's, maar bedoelen we HBLED's.



Figuur 1.18: Haitz wetmatigheid

4.2.2 Laser

Hoewel een laser als een ideale projectielichtbron kan beschouwd worden, is het gebruik ervan tot nu toe beperkt gebleven tot enkele speciale toepassingen, omwille van het laag rendement (lm/W) en de grote afmetingen. Met de nieuwe generatie vastestoflasers is deze mogelijkheid aantrekkelijker geworden. Een voorloper van vastestoflasers voor projectie is het bedrijf Novalux met hun NECSEL-technologie [26][27].

Lasers als projectielichtbron hebben inherente voordelen. Ze zijn uiterst smalbandig (monochromatisch) zodat ze zeer gesatureerde kleuren produceren. Lasers bevinden zich op het CIE-1931-kleurendiagram op de spectrumlocus (hoefijzeromtrek) en door een geschikte keuze van de drie basiskleuren kan de grootst mogelijke kleurendriehoek gevormd worden. Dit betekent een zeer breed gamma aan kleuren en dus een superieure beeldkwaliteit. Bijna alle mogelijke kleuren kunnen gereproduceerd worden. Ze zijn verkrijgbaar in de basiskleuren en zijn dus vergelijkbaar met LED's, waardoor geen kleurscheiding of filtering van ongewenste golven vereist is. Hierdoor bekomen we een compacter, goedkoper en efficiënter systeem.

Lasers zijn gerichte lichtbronnen, dat wil zeggen dat ze een parallelle bundel genereren met een étendue vrijwel gelijk aan nul en dus een quasi oneindige helderheid (luminantie) hebben. In werkelijkheid is er een zekere divergentie waardoor de étendue verschillend van nul zal zijn, maar toch uiterst klein. Hierdoor zal er geen étenduebeperving meer optreden en mag de microdisplay verder verkleind worden om de kostprijs te drukken. De verdere miniaturisering van de microdisplays zal de op laser gebaseerde

projectiesystemen niet beïnvloeden. Een kleine divergentiehoek zal bovendien voor een beter systeemcontrast zorgen.

Vastestoflasers, bijvoorbeeld NECSEL's, zijn bovendien compacte, robuuste lichtbronnen met een levensduur die vergelijkbaar is met die van LED's, dus ruimschoots voldoende voor een projectiesysteem en zullen dus geen vervanging of onderhoud vereisen. Ze zijn van nature betrouwbaarder en duurzamer dan UHP-lampen. Afwezigheid van giftige stoffen is eveneens een voordeel. Ze werken op lage spanningen en kunnen zelfs gevoed worden met batterijen. Hiermee kunnen dus compacte, robuuste en draagbare projectoren gebouwd worden die weinig onderhoud vereisen.

Lasers hebben zoals de LED's ogenblikkelijke schakeltijden en kunnen dus gepulst worden. Dit zorgt ervoor dat ze eveneens een grote verduisteringsratio kunnen realiseren, wat kan gebruikt worden om het contrast, dat al superieur is aan systemen met andere lichtbronnen, verder te verbeteren. Het pulsen is analoog aan LED's en dus zijn de voordelen die daar opgesomd zijn, hier ook geldig.

Een enkelvoudige laservlek heeft een Gaussische lichtverdeling. Novalux lasers bestaan uit een array van lasers die samen een uniforme vlek teweegbrengen. Door hun zeer kleine divergentiehoek (bijna parallel) en de uniformiteit, zal de optische architectuur van laserprojectiesystemen helemaal anders zijn. Zo zullen er bijvoorbeeld geen lichtpijpen, lensarrays, collectoren, kleurwiel, kleurfilters, spiegels en lenzensysteem nodig zijn. Lasers produceren gepolariseerd licht. In geval van op polarisatie gebaseerde lichtkleppen, bijvoorbeeld LCOS, zullen er dus ook geen polarisatoren en analysatoren nodig zijn. Dit zal de architectuur vereenvoudigen en het totale systeem zeer compact maken. Bovendien zal er een factor twee winst zijn op gebied van efficiëntie omdat het licht reeds gepolariseerd is.

Het rendement (lm/W) van vastestoflasers is al veel beter dan van de klassieke lasers, maar nog zeker niet vergelijkbaar met het rendement van UHP-lampen en heeft nog een lange weg te gaan. Het is vergelijkbaar met de efficiëntie van LED's. Lumen per étendue daarentegen is veel beter dan bij zowel LED's als UHP-lampen omwille van hun zeer kleine étendue.

Qua prijs zijn NECSEL-lichtbronnen goedkoper dan UHP-lampen [26]. Door de eenvoud van de architectuur en het ontbreken van vele componenten zal de prijs van het projectiesysteem verder gedrukt worden. Aangezien de lichtbron een zeer kleine étendue heeft, kan de lichtklep ook verder geminiaturiseerd worden, wat kosten zal besparen. Omwille van de

kleine divergentiehoek van de laserbron, volstaat het systeem met een eenvoudige, goedkope projectielens (een groot f-getal). Dit alles samen zorgt ervoor dat laserprojectie betaalbaarder is dan op LED- of UHP-gebaseerde systemen.

Bij laserprojectoren kan men twee typen onderscheiden. Een eerste type is een klassieke op modulatie gebaseerde projector waarbij men een microdisplay (LCOS, LCD, DMD) gebruikt. De microdisplay wordt belicht met een array van laserbronnen. Dit zijn compacte projectoren. Het tweede type maakt in plaats van microdisplays gebruik van MEMS-technologie om een beeld serieel af te scannen zoals bij CRT's. De lichtbron is hierbij een enkelvoudige laserbundel die heel snel het volledige beeld afscaant. Bij deze projectoren is zelfs geen projectielens nodig en is het systeem enorm compact; het wordt daarom ook wel een picoprojector genoemd [28].

Er zijn ook enkele belangrijke nadelen aan laserprojectie. Een bekend probleem bij lasers is het ontstaan van een 'speckle'-patroon. Speckle of spikkel is een willekeurig intensiteitspatroon dat ontstaat door interferentie van coherente golven, die onderworpen zijn aan fase en/of intensiteitsfluctuaties. Speckle is een storend patroon dat optreedt bij lasers en moeilijk vermeden kan worden omwille van de grote coherentielengte van het laserlicht.

Lasers hebben een te laag rendement, en hoewel er een grote vooruitgang is bij vastestoflasers, is de efficiëntie (lm/W) nog altijd veel lager dan die van booglampen. De laservlek bij de scanningpicoprojector is te intens waardoor er een veiligheidsrisico ontstaat als het mechanisch systeem dat de scanning doet, het begeeft en de laser op één plaats blijft schijnen. Zo kan er inbranding op het scherm of zelfs in het oog (retroprojectie) optreden.

5. Situering van dit onderzoek

De digitale projectie begon met de zoektocht naar een elektronische projector waarmee men live-uitzendingen naar de cinemazaal kon brengen. Tegenwoordig zijn er echter veel meer toepassingen voor deze digitale projectoren. Er is een uitgebreid gamma aan diverse producten die gebaseerd zijn op projectie met lichtkleppen, gaande van kleine draagbare projectoren, over projectoren voor conferentieruimtes, tot de grootste projectoren die geschikt zijn voor digitale cinema. Voorbeelden hiervan zijn ultracompacte presentatiebeamers, retroprojectietelevisietoestellen, head-up-displays, cockpit-displays, home-theaterprojectoren, etc. Daar waar in het begin bijna enkel helderheid van belang was, zijn er met de huidige toepassingen veel meer aspecten die belangrijk geworden zijn.

Tot nu toe werd bij vrijwel al deze projectoren hetzelfde type van lichtbron gebruikt, namelijk een ultrahogedrukgasontladingslamp (UHP) omwille van de hoge vermogensefficiëntie en hoge luminantie. Deze lichtbronnen hebben echter een aantal tekortkomingen (die al werden besproken in de vorige paragraaf) die in de huidige projectietoepassingen alsmaar belangrijker worden. Dit zijn o.a. levensduur, kostprijs, compactheid, kleurzuiverheid, draagbaarheid, etc. Om deze tekortkomingen te verhelpen, moet men op zoek gaan naar alternatieve lichtbronnen die deze nadelen niet hebben.

Het onderwerp van dit doctoraat is het gebruiken van alternatieve lichtbronnen om kwalitatieve, duurzame projectoren te ontwerpen. Er werden in het voorgaande LED's en vastestoflasers voorgesteld en uitvoerig besproken. Deze lichtbronnen zijn in de meeste opzichten beter dan UHP-lampen en zijn dus een volwaardig alternatief. Ze hebben momenteel een lage lichtopbrengst, maar kunnen toch gebruikt worden voor laagvermogenprojectoren, in afwachting van verdere verbetering van de performantie. In dit onderzoek hebben we geopteerd voor LED's als alternatieve lichtbron. Bij het begin van dit onderzoek was er nog geen sprake van efficiënte vastestoflasers en waren LED's de enige veelbelovende lichtbronnen. Bovendien hebben lasers ook last van speckle wat de beeldkwaliteit zal ondermijnen. Om die redenen hebben we in dit onderzoek LED's trachten te gebruiken. Als lichtkleptechnologie ging onze voorkeur uit naar LCOS-panelen. LCOS-technologie heeft een aantal voordelen t.o.v. andere technologieën (zie hoger) en binnen de onderzoeksgroep is er ook meer kennis en ervaring met deze lichtkleptechnologie. Dankzij het bestaan van de firma Gemidis waren we verzekerd van de beschikbaarheid van LCOS-panelen; wat belangrijk is om de onderzoeksresultaten kracht bij te zetten door het bouwen van een demonstrator opstelling.

Samengevat werd in dit doctoraat onderzoek verricht naar het gebruik van LED's in projectoren met LCOS-lichtkleppen wat ook de naam van het werk verklaart: "*Nieuwe optische architecturen voor op LED gebaseerde LCOS-projectoren*".

LED's zijn totaal verschillend van UHP-lampen. Ze hebben een andere vorm, package, stralingspatroon, aansturing, fysische en thermische eigenschappen, etc. Hoewel er een twintigtal optische architecturen bekend zijn voor reflectieve beeldschermen (met een UHP-lamp als lichtbron), zijn ze niet geschikt voor LED-projectoren en moeten nieuwe optische architecturen en een elektronische aansturing ontwikkeld worden. Het illuminatiedeel vereist de voornaamste aanpassingen. In het tweede hoofdstuk gaan we een nieuw belichtingssysteem ontwerpen. Hierbij gaat de aandacht vooral naar de keuze van de LED's en de collectiecomponenten. Gezien de beschikbare collectoren niet goed genoeg zijn, zullen we zelf een component ontwerpen en fabriceren.

Het belangrijkste nadeel van LED's is de te lage luminantie (lumen per étendue). In hoofdstuk drie gaan we enkele methodes bespreken die het mogelijk maken om de luminantie te verhogen. Hiervoor moeten de LED's gepulst worden. We gaan eveneens de resultaten van levensduurmetingen en verschuivingen van LED-karakteristieken onder gepulst regime bespreken.

In het vierde hoofdstuk gaan we twee architecturen bespreken die met LED's werken. De eerste architectuur is een compact 3-LCOS-systeem, dat we enkel gesimuleerd hebben. De tweede architectuur is een 2-LCOS-systeem, dat we nog uitvoeriger gaan bespreken. Hier hebben we zowel simulaties als experimentele waarnemingen. Een demonstrator-opstelling van deze architectuur werd gebouwd en is operationeel.

In het laatste hoofdstuk worden de behaalde resultaten nog eens overlopen en geven we enkele suggesties voor verder onderzoek. Op het einde van dit manuscript vinden we nog vier bijlagen. In bijlage A worden fundamentele begrippen en grootheden in verband met projectiesystemen toegelicht [8]. In bijlage B wordt de kleurentheorie behandeld [4][32]. In bijlage C worden foto's van de projectoropstelling (2-LCOS-systeem) en de aanstuurschakelingen ervan getoond. Ten slotte in bijlage D zijn er foto's van de beelden geprojecteerd met deze LED-projector terug te vinden.

Referenties

- [1] http://en.wikipedia.org/wiki/CRT_projector#cite_ref-1
- [2] http://en.wikipedia.org/wiki/Laser_video_projector
- [3] <http://en.wikipedia.org/wiki/Eidophor>
- [4] Prof. P. De Visschere, “Display Technology”, 2008.
- [5] E.H. Stupp, M.S. Brennessoltz, “Projection Displays”, SID Series in Display Technology, Wiley, 1999.
- [6] M.P.C.M. Krijn, B.A. Salters, O.H. Willemsen, “LED-based mini-projectors”, *Photonics in Multimedia Proc. SPIE*, pp. 619602, 2006.
- [7] B. Van Giel, Y. Meuret, H. Thienpont, “Using a fly's eye integrator in efficient illumination systems with multiple LED light sources”, *Optical engineering Vol 46*, pp. 32767, 2007.
- [8] Y. Meuret, “De contrast- en kleurenproblematiek van digitale projectoren met een grote helderheid”, *Doctoraatsproefschrift Faculteit Toegepaste Wetenschappen, Universiteit Gent*, Promotor: P. De Visschere, pp. 1-225, 2004.
- [9] D. Schuberg, L. Boutsikaris, “X-cube integrated solid optics component”, US Patent 6363186, NEC Research Institute, 2002-03-26.
- [10] <http://www.dlp.com>
- [11] A. Monté, “Design of an Intelligent High-Voltage Display Driver to Minimize the Power Consumption in Bistable Displays”, *Doctoraatsproefschrift Faculteit Toegepaste Wetenschappen, Universiteit Gent*, Promotor: J. Doutreloigne, pp. 1-210, 2008.

- [12] http://en.wikipedia.org/wiki/Screen_door_effect
- [13] R.D. Sterling, W.P. Bleha, "D-ILA technology for electronic cinema", *SID Int Symp Digest of Technical Papers*, pp. 310-313, 2000.
- [14] T. Kozakai, Y. Hori, M. Sugihara, F. Sato, K. Hamagami, "Reflection Improvement for D-ILA", *SID Int Symp Digest of Technical Papers*, pp. 910-913, 2000.
- [15] D. Cuypers, "Vertically Aligned Nematic Liquid Crystal Microdisplays for Projection Applications", *Doctoraatsproefschrift Faculteit Toegepaste Wetenschappen, Universiteit Gent*, Promotor: H. De Smet, pp. 1-320, 2005.
- [16] H. Zou, A. Schleicher and J. Dean, "Single-Panel LCOS Color Projector with LED light Sources", *SID Int Symp Digest of Technical Papers*, pp. 1698-1701, 2005.
- [17] G. Van Doorselaer, D. Cuypers, H. De Smet, J. Van den Steen, A. Van Calster, K.-S. Ten and L.-Y. Tseng, "A XGA VAN-LCOS Projector", *Proceedings of the 22nd International Display Research Conference*, pp. 205-208, 2002.
- [18] H. Murat, H. De Smet, D. Cuypers, Y. Meuret, H. Thienpont, M. Vervaeke, and L. Desmet, "Increased lumens per étendue by combining pulsed light-emitting diodes", *Opt. Eng.* 45(3), pp. 034002, 2006.
- [19] M. Keuper, G. Harbers, S. Paolini, "RGB LED Illuminator for Pocket-Sized Projectors", *SID Int Symp Digest of Technical Papers*, pp. 943-945, 2004.
- [20] G. Harbers, M. Keuper, S. Paolini, "Performance of high power LED illuminators in color sequential projection displays", *Proc. 10th Int. Display Workshop*, pp. 1585-1588, 2003.
- [21] H. Iisaka, T. Toyooka, S. Yoshida, and M. Nagata, "Novel projection system based on an adaptive dynamic range control concept", *Proc. 10th Int. Display Workshop*, pp. 1553-1556, 2003.

- [22] R.V. Steel, “The story of a new light source”, *Nature Photonics Vol 1*, pp. 25-26, 2006.
- [23] <http://www.philipslumileds.com/>
- [24] http://www.osram-os.com/osram_os/EN/
- [25] <http://www.luminus.com/>
- [26] <http://www.novalux.com/>
- [27] G. Niven, A. Mooradian, “Invited paper: Low Cost Lasers and Laser Arrays for Projection Displays”, *SID Int Symp Digest of Technical Papers*, pp. 1904-1907, 2006.
- [28] http://www.microvision.com/pico_projector_displays/
- [29] L. Bogaert, Y. Meuret, B. Van Giel, H. Murat, H. De Smet, H. Thienpont, “Projection display for the generation of two orthogonal polarized images using liquid crystal on silicon panels and light emitting diodes”, *Applied Optics Vol 47*, pp. 1535-1542, 2008.
- [30] L. Bogaert, Y. Meuret, B. Van Giel, H. Murat, H. De Smet, H. Thienpont, “Demonstration of a polarization-based full-color stereoscopic projection display using liquid crystal on silicon panels and light emitting diodes”, *Proceedings of SPIE, Vol 7001*, 2008.
- [31] <http://www.ercservice.com/lamps/philips/PhilipsUHPLamps.html>
- [32] W. Troch, “Bouw van een LCD-projector met LEDs als lichtbron”, *Master’s thesis Faculteit Toegepaste Wetenschappen, Vrije Universiteit Brussel*, Promotor H. Thienpont, pp. 1-120, 2001.
- [33] R.E. Fischer, B. Tadic-Galeb and P.R. Yoder, “Optical System Design”, SPIE Press McGraw-Hill (2000).
- [34] A.V. Arcchi, T. Messadi and J. Koshel, “Field Guide to Illumination”, SPIE Vol. FG11, 2007.

Hoofdstuk 2

Belichtingssystemen met LED's

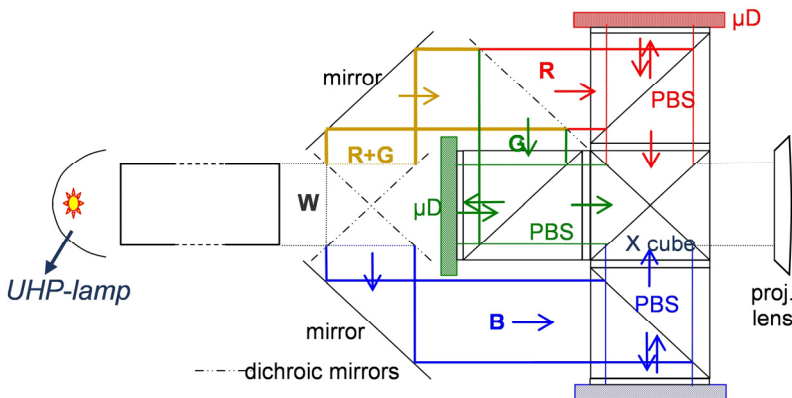
1. LED als lichtbron

In het vorige hoofdstuk werden LED's reeds geïntroduceerd als mogelijke alternatieve lichtbronnen voor projectiesystemen in plaats van klassieke booglampen zoals UHP-lampen. We gaan hier de voordelen van deze nieuwe lichtbron herhalen.

Een LED is een compacte, robuuste lichtbron met een smalbandig spectrum en een lage werkspanning. Vandaar dat een LED de ideale lichtbron is om een compact en goedkoop projectiesysteem te bouwen, dat zelfs op batterijen kan werken. LED's hebben nog andere interessante voordelen. Ze hebben een zeer grote levensduur (tot 100 kh), wat ruim voldoende is voor de levensduur van een projectiesysteem en dus zeer weinig onderhoud zal vergen. De lichtdegradatie is geleidelijk en plotse falings komt minder vaak voor. Dit verhoogt de betrouwbaarheid van het systeem. LED's zijn goedkoper en vooral duurzamer dan klassieke projectielampen. Door hun smalbandigheid, zal een groter kleurengamut bestreken worden. Dit verhoogt het gamma aan mogelijke kleuren en dus de beeldkwaliteit. Ze stralen geen ongewenste, gevaarlijke (UV, IR) golven uit. Ze zijn schokbestendig en ongevaarlijk, in tegenstelling tot UHP-lampen (ontploffingsgevaar, giftige kwikdampen). LED's hebben een ogenblikkelijke schakeltijd en hebben geen opwarmtijd nodig zoals de booglampen. Hierdoor kunnen ze ook gepulst worden, wat een belangrijke troef kan zijn voor zowel kleursequentiële systemen als drie-paneel-

systemen. Ze hebben bovendien een zeer grote verduisteringsratio, wat het dynamisch contrast van het systeem kan verhogen.

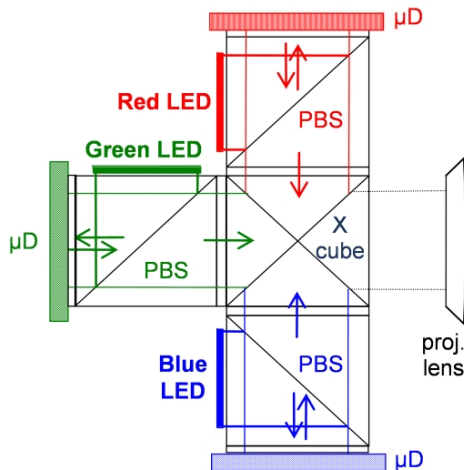
Er zijn verschillende bekende optische architecturen voor een projectiesysteem [1]. De basiskleuren rood, groen en blauw kunnen ofwel sequentieel gemoduleerd worden door één microdisplay (kleursequentiële projectiesystemen), ofwel kan elke kleur continu gemoduleerd worden door verschillende panelen. Afhankelijk van het systeem zal de architectuur anders zijn. We gaan hier een 3-paneel-systeem beschrijven. In figuur 2.1 wordt een klassieke projectorarchitectuur met LCOS-panels schematisch voorgesteld. Door middel van een reflector wordt het licht van de UHP-lamp gefocuseerd op de ingang van de integratorpijp. Voor de pijp worden de UV- en IR-stralen weggefilterd. Het licht propageert doorheen de lichtpijp. Deze kan ofwel een holle pijp zijn met reflecterende binnenwanden, ofwel een massieve pijp waar de propagatie gebaseerd is op totale interne reflectie (TIR). De sferische lichtdistributie aan de ingang van de pijp, zal door de pijp omgevormd worden tot een rechthoekige uniforme lichtverdeling na de pijp door veelvoudige reflecties in de pijp. Vervolgens wordt het witte licht opgesplitst in R-, G- en B-componenten en met behulp van lenzen wordt de uitgang afgebeeld op de lichtklep. De gemoduleerde R-, G- en B-kanalen worden vervolgens gerecombineerd door een X-kubus (een glazen kubus met dichroïsche coatings op de diagonaalvlakken) en ten slotte wordt het beeld geprojecteerd door middel van een projectielens.



Figuur 2.1: 3-paneel-LCOS-projector met UHP-lamp

Indien we in deze architectuur de UHP-lamp vervangen door LED's, dan hoeven we geen filtering van ongewenste stralen of kleurscheiding meer te

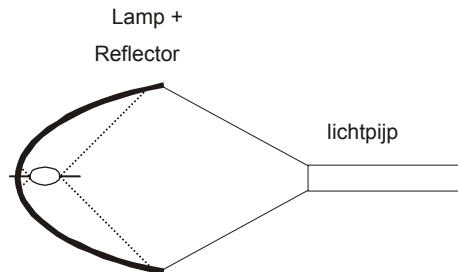
doen en kunnen we rechtsreeks de juiste kleur bij het juiste paneel plaatsen. Hierdoor kunnen de UV- en IR-filters en dichroïsche spiegels weggelaten worden. In figuur 2.2 is het aangepaste schema weergegeven. Hierin stelt bijvoorbeeld “Green LED” niet enkel de LED maar wel het volledige groene belichtingssysteem voor.



Figuur 2.2: 3-paneel-LCOS-projector met LED's

Het belichtingssysteem wordt hier gedefinieerd als de combinatie van lichtbron, collectie- (reflectoren) en homogenisatie- (lichtpijp) componenten. We gaan het belichtingssysteem van figuur 2.1 van naderbij bestuderen. De lichtbron is een booglamp, meer bepaald een UHP-lamp. In projectiesystemen wordt bijna uitsluitend dit type lamp gebruikt omwille van de hoge efficiëntie en hoge helderheid. Een UHP-lamp is een lamp waarin een elektrische stroom een zeer hete boog van licht genereert tussen de elektrodes. Het licht straalt centrosymmetrisch rond de as van de lamp onder een zekere stralingskegel die niet-lambertiaans is. Door middel van een elliptische reflector wordt het licht gefocuseerd op de ingang van de integratorpijp. Hierbij wordt de stralingspatroon van het licht eveneens aangepast aan het f-getal van het projectiesysteem. De reflector heeft dus als taak 'het collecteren van licht' en 'het aanpassen van de hoekverdeling'. De lichtpijp, met een doorsnede die dezelfde is als de vorm van het microdisplay, zorgt ervoor dat de sferische lichtverdeling aan de ingang omgevormd wordt tot een rechthoekige uniforme lichtverdeling die afgebeeld zal worden op de lichtklep om deze uniform te belichten. Hiervoor moet de lichtpijp een zekere lengte hebben die evenredig is met de diagonaal

van de doorsnede. Het beschreven belichtingssysteem is afgebeeld in figuur 2.3.



Figuur 2.3: Een belichtingssysteem met UHP-lamp

Is het nu mogelijk om de UHP-lamp zonder meer te vervangen door LED's? Het antwoord is natuurlijk neen. LED's zijn totaal verschillend van booglampen. Ze hebben een andere vorm, package, stralingspatroon, aansturing, fysische en thermische eigenschappen, etc. Hoewel er een 20-tal bekende optische architecturen bestaan voor reflectieve beeldschermen (met UHP-lamp als lichtbron), zijn ze niet geschikt voor LED-projectoren en moeten er nieuwe optische architecturen en een elektronische aansturing ontwikkeld worden. De voornaamste aanpassing is vereist in het belichtingsdeel. LED's zijn meestal, in tegenstelling tot UHP-lampen, lambertiaans en niet transparant. Een collectiecomponent (reflector) die ontworpen is voor een UHP-lamp zal niet efficiënt werken voor LED's. In het vervolg van dit hoofdstuk zullen bestaande en zelf ontworpen collectiecomponenten in combinatie met Luxeon [2] en OSTAR [3] LED's van respectievelijk Lumileds en OSRAM besproken worden. Eerst gaan we de beschikbare LED's en de eigenschappen ervan onder de loep nemen.

2. LED-merken

Eén van de belangrijke parameters van projectielichtbronnen is de helderheid (lichtopbrengst per étendue), ook wel de luminantie genoemd. De trend van steeds kleiner wordende microdisplays maakt dit des te belangrijker. LED's zijn in de meeste opzichten superieur aan klassieke booglampen, maar hebben een lage luminantie. In dit werk hebben we getracht om LED's te gebruiken met de hoogste luminanties [4]. Dit zijn de zogenaamde "High Brightness LED's". In de beginfase van het onderzoek bracht Lumileds interessante LED's op de markt. Vervolgens zijn deze overtroffen geweest door HBLED's van OSRAM. Studie en ontwerp van de collectiecomponenten zijn hierop gebaseerd. Daarom gaan we eerst deze LED's bespreken vooraleer we overgaan tot de collectiecomponenten.

2.1 Luxeon (Lumileds)

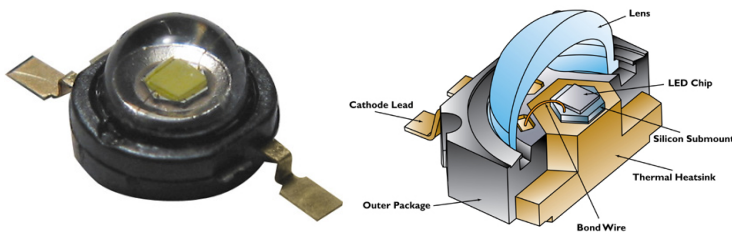
Lumileds is de eerste fabrikant die HBLED's voor projectietoepassingen op de markt heeft gebracht. Deze LED's hebben een vierkante chip die ingebed is in een epoxy hemisfeer met brekingsindex $n=1.5$ en een diameter van 5.6 mm. Het middelpunt van de hemisfeer valt samen met het middelpunt van de chip. Deze hemisfeer zorgt er weliswaar voor dat de lichtuitkoppeling vanuit de chip vergroot, maar de bronétendue zal eveneens toenemen. Het stralingspatroon van deze LED's is nagenoeg lambertiaans. Dit betekent dat de helderheid richtingsonafhankelijk is, wat erop neer komt dat de intensiteit de volgende wetmatigheid volgt met θ de hoek ten opzichte van de normaal op het LED-oppervlak:

$$I = I(0) \cos \theta \quad (2.1)$$

Er bestaan verschillende soorten LED's (kleuren, vermogens en chipafmetingen). In de onderstaande tabel zijn de bestudeerde typen weergegeven met hun belangrijkste parameters. Als referentie hebben we een groene LED genomen. In figuur 2.4 wordt er een foto van een Luxeon LED getoond.

| type | lichtopbrengst [lm] | oppervlakte [mm ²] | étendue [mm ² sr] | luminantie [lm/mm ² sr] | stralingspatroon |
|------------|---------------------|--------------------------------|------------------------------|------------------------------------|------------------|
| Luxeon I | 53 | 1x1 | 7.1 | 7.5 | lambertiaans |
| Luxeon III | 80 | 1x1 | 7.1 | 11.3 | lambertiaans |
| Luxeon V | 160 | 2x2 | 28.3 | 5.7 | lambertiaans |
| Luxeon K2 | 130 | 1x1 | 7.1 | 18.3 | lambertiaans |
| OSTAR 2x2 | 320 | 2.1x2.1 | 13.9 | 23.1 | lambertiaans |

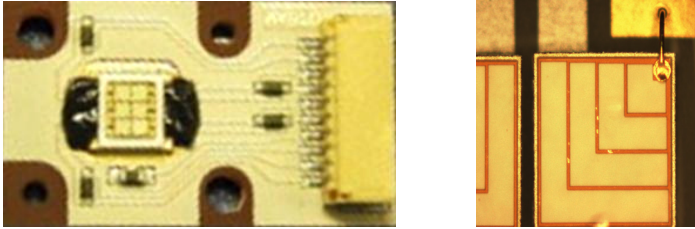
Tabel 2.1: Parameters van Luxeon LED's (groen)



Figuur 2.4: Luxeon LED: foto (links) en voorstelling interne structuur (rechts)

2.2 OSTAR (OSRAM)

OSRAM heeft in een latere fase van dit onderzoek ook HBLED's voor projectie geïntroduceerd, namelijk OSTAR LED's. Deze LED's zijn opgebouwd uit een array (2x2 of 2x3) van dies van 1x1 mm² op een afstand van 0.1 mm van elkaar. Het essentieel verschil met Luxeon LED's is dat we hier te maken hebben met chips die niet ingebed zijn in een hemisfeer. De uitkoppelingsefficiëntie zal hierdoor lager zijn, maar ook de bronétendue zal verlagen. OSTAR is een oppervlaktestraler en heeft een perfect lambertiaans stralingspatroon. Het ontbreken van een hemisfeer geeft ons meer vrijheid bij het ontwerpen van een collectiecomponent. In tabel 2.1 zijn de meest belangrijke parameters van een 2x2 OSTAR LED gegeven. Deze LED's zijn in de loop der tijd geëvolueerd en deze gegevens betreffen de meest recente groene OSTAR LED. We zien hier dat de OSTAR's de hoogste luminantie hebben en dus waarschijnlijk het meest geschikt zullen zijn voor projectie. Figuur 2.5 toont enkele afbeeldingen van OSTAR LED's. In de linkerfiguur wordt er een OSTAR-module (2x3 dies) getoond en de rechterfiguur is een microscoopfoto van een enkelvoudige chip (1x1 mm²).



Figuur 2.5: OSTAR LED: 2x3-module (links) en close-up van één chip (rechts)

3. Lichtcollectie en homogenisatie

LED's zijn lichtbronnen met een totaal verschillende geometrische vorm en stralingspatroon dan UHP-lampen. Bovendien hebben ze een lage helderheid. Het is dus zeer belangrijk dat de ontworpen collectoren uiterst efficiënt werken om geen verdere verlaging van helderheid te veroorzaken. Het doel moet dus zijn om zoveel mogelijk licht te collecteren binnen het gewenste f-getal (of étendue) [8]. Een vooropgestelde waarde voor efficiëntie is 80%. Eerst zijn we op zoek gegaan naar beschikbare collectiecomponenten, om vervolgens over te gaan tot eigen ontwerpen. In de literatuur zijn er belangrijke werken waarin dit onderwerp behandeld wordt [15][16].

3.1 Commerciële collectielenzen

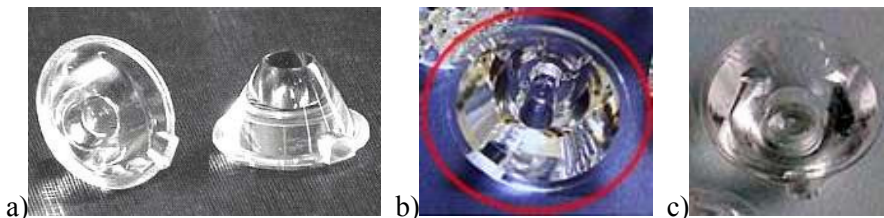
Voor Luxeon LED's is er een reeks collectielenzen beschikbaar. Hieruit hebben we er een aantal uitgekozen die mogelijk interessant kunnen zijn voor onze applicatie omwille van de geschikte omzetting van de hoeken. Deze lenzen hebben we aangeschaft en gekarakteriseerd. Deze zijn:

- Luxeon Collimator Lens (LXHL-NX05)
- Fraen lenzen:
 - Narrow **B**eam lens (FHS-HNB1-LL01-H)
 - Narrow **B**eam **L**ow **P**rofile lens (FLP-HNB3-LL01-0)

We gaan eerst deze lenzen kort beschrijven volgens de opgegeven specificaties [5].

Luxeon Collimator Lens

Deze lens is specifiek ontworpen voor Luxeon I, III en V LED's. Ze past juist op de hemisfeer van de LED en is opgebouwd uit een refractief en een reflectief deel. De uitgangsoppervlakte is cirkelvormig met een diameter van 17.1 mm. Deze lens zorgt voor een collimatie van de lichtbundel met een kijkhoek van 10° , wat overeenkomt met het gewenste f-getal van 2.88. De opgegeven efficiëntie is 90%, maar na metingen bleek dat dit niet de efficiëntie binnen de kijkhoek is, maar wel wat er in totaal doorkomt.



Figuur 2.6: Commerciële collectielenzen

a) collimator lens b) Narrow Beam lens c) Narrow Beam Low Profile lens

Narrow Beam lens (NB)

Deze lens is eveneens geschikt voor Luxeon I, III en V lambertiaanse LED's en focuseert de uitgang naar een stralenbundel van $8-10^\circ$ afhankelijk van de kleur. Ze is opgebouwd uit een refractief en een reflectief deel met een door software geoptimaliseerd asferisch profiel. De uitgangsoppervlakte is cirkelvormig met een diameter van 24 mm. De opgegeven efficiëntie is tot 85% met dezelfde opmerking als bij de collimatorlens.

Narrow Beam Low Profile lens (NBLP)

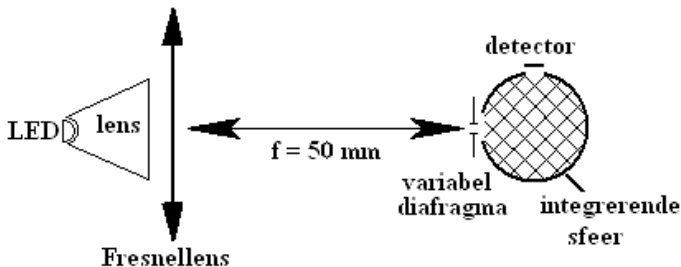
Deze lens is vergelijkbaar met de Narrow Beam lens, maar heeft een kleinere diameter (17.1 mm). De uittredende stralenbundel heeft een kijkhoek van $10-12^\circ$ afhankelijk van de kleur, en de efficiëntie is 85%.

Het f-getal van het projectiesysteem dat we willen realiseren is 2.88, wat overeenkomt met een hoek van maximaal 10° . Deze drie collectielenzen zijn geschikt volgens de opgegeven specificaties. We willen deze lenzen experimenteel karakteriseren en de angulaire distributie en 'lumen versus étendue'-karakteristieken opmeten. We hebben dit gedaan voor

verschillende Luxeon (I, III, V) LED's en gaan hier onze bevindingen bespreken.

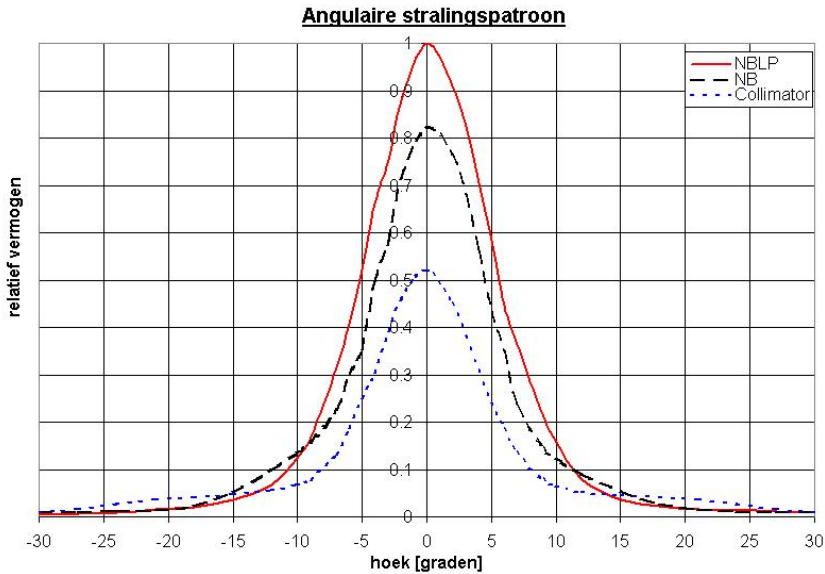
De experimentele opstelling waarmee we de metingen gedaan hebben, is gegeven in figuur 2.7. Hier wordt er een Fresnellens achter de collectielens geplaatst. Deze zorgt ervoor dat de angulaire distributie na de collectielens omgezet wordt in een ruimtelijke distributie in het focaalvlak van de Fresnellens. Deze omzetting wordt gegeven door formule 2.2. Hierin is r de afstand tot de optische as, f de brandpuntsafstand van de Fresnellens en θ de hoek na de collectielens. Door een regelbaar diafragma te plaatsen in het focaalvlak voor de integrerende bol, kunnen we de gewenste hoeken selecteren en de intensiteit opmeten met behulp van een integrerende bol en een detector. Hoewel de hoekverdeling niet perfect circulair symmetrisch is, meten we toch met een circulair diafragma omdat we enkel in die hoeken geïnteresseerd zijn. Door de LED rechtsreeks in de integrerende bol te plaatsen kunnen we een referentiemeting doen. Hierbij hebben we telkens rekening gehouden met een verlies van 10% van de Fresnellens. Deze metingen hebben we herhaald voor de verschillende LED's en collectielenzen.

$$r = f \cdot \text{tg}(\theta) \quad (2.2)$$



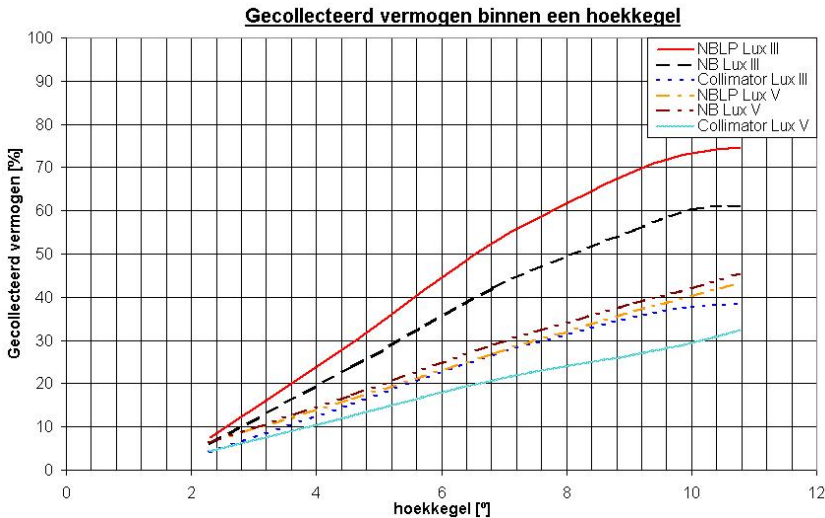
Figuur 2.7: Meetopstelling voor het bepalen van de hoekdistributie

Eerst hebben we de angulaire distributie opgesteld van de drie collectielenzen in combinatie met een Luxeon III groene LED. Dit wordt afgebeeld in figuur 2.8. Het optische vermogen is gerelateerd ten opzichte van de maximumwaarde.



Figuur 2.8: Angulaire distributie Luxeon III-collectielens combinatie

We zien dat de NBLP-lens de beste collimatie oplevert, gevolgd door de NB-lens. De performantie van de collimatorlens ligt een stuk lager. Deze grafiek geeft enkel een vergelijking tussen de verschillende collectielenzen en zegt niets over de absolute collectie-efficiëntie. Daarom gaan we in de volgende figuur de gecollecteerde absolute vermogens uitzetten (in %) in functie van de hoekkegel. We werken terug met groene LED's maar zowel Luxeon III als Luxeon V in combinatie met de drie collectielenzen.



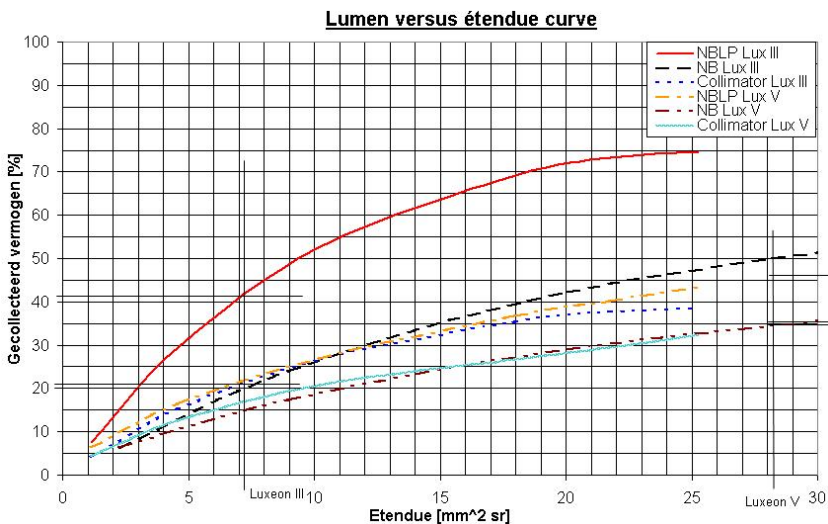
Figuur 2.9: Gecollecteerde lichtflux binnen een bepaalde hoekkegel

Het gecollecteerde vermogen binnen een kegel van 10° ($f^\#$ 2.88) is zoals verwacht het hoogst voor NBLP (73%) opgevolgd door NB (60%) en collimatorlens (38%) bij een Luxeon III LED. Voor Luxeon V liggen de waarden nog lager: NB (42%), NBLP (40%), collimatorlens (29%). De collimatie-eigenschappen van deze lenzen verslechteren naarmate we een grotere LED gebruiken omdat we vertrekken vanuit een grotere bronétendue. In principe moeten we “lumen versus étendue”-curves met elkaar vergelijken. De collectie-efficiëntie kunnen we dan ook best definiëren als de verhouding van de uitgangsluminantie ten opzichte van de ingangsluminantie. De bronétendues zijn gegeven in tabel 2.1. De uitgangsetendue kan berekend worden met formule 2.3. Hierbij is D de diameter van het uitgangsvlak van de lens en θ de tophoek van de bundel.

$$E_{uit} = \pi^2 \frac{D^2}{4} \sin^2(\theta) \quad (2.3)$$

In figuur 2.10 zetten we de gecollecteerde flux uit i.f.v. de uitgangsetendue voor de 6 gevallen (2 LED's en 3 lenzen). Als we nu op de x-as de bronétendues aanduiden van Luxeon III en Luxeon V, dan kunnen we op de y-as de collectie-efficiënties aflezen voor de verschillende lenzen. Voor Luxeon III zijn deze waarden als volgt: NBLP (41%), NB (20%) en Collimator (21%). Voor Luxeon V zijn deze waarden: NBLP (46%), NB (35%) en Collimator (35%). We zien dat de NBLP-lenzen de hoogste

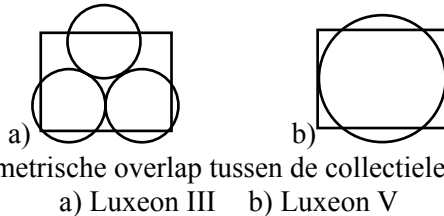
collectie-efficiënties hebben en de waarden zijn vergelijkbaar voor beide LED's. NB- en Collimatorlenzen scoren minder goed. Hoewel in de vorige grafieken de NB lens efficiënter leek dan de Collimatorlens, zien we hier dat dit niet het geval is, omdat de NB-lens een groter uitgangsoppervlak heeft en dus een grotere étendue bij een zelfde hoek. NB- en Collimatorlenzen hebben een betere efficiëntie bij de Luxeon V LED. In de grafieken zien we ook dat voor een bepaalde LED/lens-configuratie de efficiënties afnemen naarmate de gewenste étendue groter wordt. De curves beginnen steil en vlakken af tot saturatie bij stijgende étendues.



Figuur 2.10: Gecollecteerde lichtflux in functie van étendue

Indien we nu een systeemétendue van $21.3 \text{ mm}^2\text{sr}$ willen opvullen, dan kunnen we dit ofwel doen door drie Luxeon III's met een NBLP-lens te combineren ofwel door één Luxeon V met NBLP lens te gebruiken. In het eerste geval bekommen we een flux van 98.4 lm ($3 \times 80 \text{ lm} \times 41\%$ collectie-efficiëntie) en in het tweede geval 64 lm ($160 \text{ lm} \times 40\%$ efficiëntie bij de geselecteerde étendue). Hoewel de efficiëntie hoger was voor Luxeon V, is de gecollecteerde flux binnen de gewenste étendue lager omdat de luminantie ook lager was dan die van de Luxeon III (zie tabel 3.1). Het licht dat deze lenzen verlaat, moet verder ingekoppeld worden in een rechthoekige lichtpijp om homogenisatie van de bundel te realiseren. Bij de overgang van een cirkelvormige lens naar een rechthoekige pijp zal de overlap nooit 100% zijn en gaan we hier ook een bijkomend verlies

introduceren. Dit wordt voorgesteld in figuur 2.11 door de étendues geometrisch voor te stellen. De totale oppervlakte van de rechthoek komt exact overeen met de totale oppervlakte van de cirkels, maar de overlap is niet 100%.



Figuur 2.11: Geometrische overlap tussen de collectielenzen en de lichtpijp
a) Luxeon III b) Luxeon V

Uit experimentele waarnemingen kunnen we besluiten dat de NBLP lens de beste collectie-efficiëntie heeft in combinatie met de Luxeon V LED, maar door een te lage luminantie is het interessanter om met Luxeon III LED's te werken. De efficiëntie is hier iets lager, maar vergelijkbaar. In het beste geval echter liggen ze tussen 40% en 50%, wat vrij laag is. LED's hebben intrinsiek een lage helderheid, daarom willen we zo efficiënt mogelijk collecteren. Commercieel beschikbare collectoren voldoen niet aan deze eis en dus zijn we genoodzaakt om collectiecomponenten op maat te ontwerpen.

3.2 Ontwerp van collectiereflectoren

Naast collectielenzen zijn er ook reflectoren. Hierbij is de collectie enkel gebaseerd op reflectie aan de wanden. Er bestaan verschillende soorten reflectoren. Afhankelijk van het type zal het reflectieprofiel anders zijn. In dit werk gaan we parabolische reflectoren (PR) en elliptische reflectoren (ER) op maat ontwerpen en twee volledig eigen ontwerpen bespreken. Commercieel beschikbare PR's en ER's bleken na enkele simulaties inefficiënt te zijn (30 à 35%) en we zijn snel overgegaan tot ontwerpen op maat.

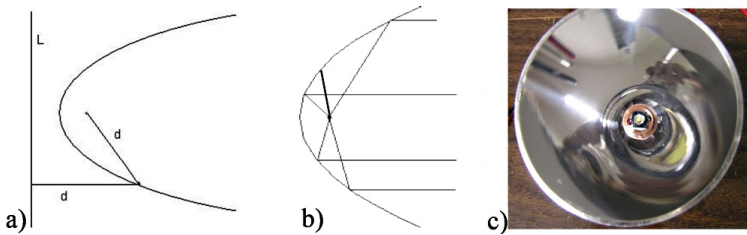
De gecollecteerde flux wordt opgevangen door een rechthoekige lichtpijp die de homogenisatie en de aanpassing van de ruimtelijke lichtdistributie gaat verwezenlijken. Daarom gaan we ze samen bespreken. Homogenisatie is nodig omdat de lichtklep moet belicht worden met een uniforme bundel. Als lichtpijp gaan we zowel holle pijpen met hoogreflectieve (95%) wanden gebruiken als massieve pijpen waarin de lichtstralen propageren door totale interne reflectie. Hoewel deze reflectiewaarde zeer hoog is, is het niet onrealistisch. Met bepaalde legeringen kan men zulke hoge reflecties verkrijgen.

De reflectoren gaan naast het collecteren van de lichtflux ook zorgen voor een aanpassing van de lambertiaanse hoekverdeling in een gewenste hoekverdeling. Voor onze applicatie hebben we gekozen voor een hoek van maximaal 10° , wat overeenkomt met een f-getal van 2.88. Deze beperking is nodig om een correcte en efficiënte werking van zowel de optische componenten (lenzen, polarizing beam splitters, polarizers, etc.) als van de microdisplay te garanderen. We wensen eveneens een telecentrische belichting [6]. Dit betekent dat op elke punt van de lichtbundel eenzelfde lichtkegel gevormd wordt. Dit is noodzakelijk omdat er in het projectiesysteem hoekafhankelijke optische componenten aanwezig zijn, die anders de homogenisatie van de bundel kunnen aantasten.

Vooraleer we een collectiesysteem ontwerpen, moeten we bepaalde systeemparameters definiëren. Deze zijn het te belichten oppervlak en het f-getal. Tezamen bepalen ze de systeemétendue. Zoals reeds vermeld willen we een f-getal van 2.88 oftewel een lichtkegel van 10° . De lichtklep heeft een diagonaal van 0.9" en een aspect ratio van 4:3. We voorzien nog een overfill van 10% en dus willen we een lichtbundel van $19.2 \times 14.4 \text{ mm}^2$. Dit zijn ook de afmetingen van de lichtpijpdoorsnede. Zo komen we aan een systeemétendue van $26.2 \text{ mm}^2\text{sr}$. De gebruikte lichtbronnen zullen nog enkel Luxeon III en OSTAR LED's zijn. Luxeon V heeft een te lage luminantie.

3.2.1 Parabolische reflector

Een parabool is de meetkundige plaats van alle punten waarvan de afstand d tot een gegeven lijn L en een gegeven punt (het brandpunt) gelijk is. Deze kegelsnede wordt gekarakteriseerd door één parameter, namelijk de afstand tussen de lijn L en het brandpunt en deze wordt de straal R van de parabool genoemd. Door de parabool te laten wentelen rond zijn optische as verkrijgt men een paraboloppervlak of omwentelingsparaboloïde. Maakt men de binnenkant van de parabool reflecterend door een spiegelen materiaal zoals aluminium erop aan te brengen, dan heeft men een parabolische reflector. Een belangrijk kenmerk van een dergelijk paraboloppervlak is dat alle stralen die vertrekken vanuit het brandpunt evenwijdig met de optische as gereflecteerd worden. Voor een puntbron in het brandpunt zullen de stralen perfect gecollimeerd zijn. Een LED is echter geen puntbron en daardoor zal er een zekere divergentie optreden omgekeerd evenredig met de parabooldoorsnede. In figuur 2.12 worden er enkele paraboloppervlakken getoond.



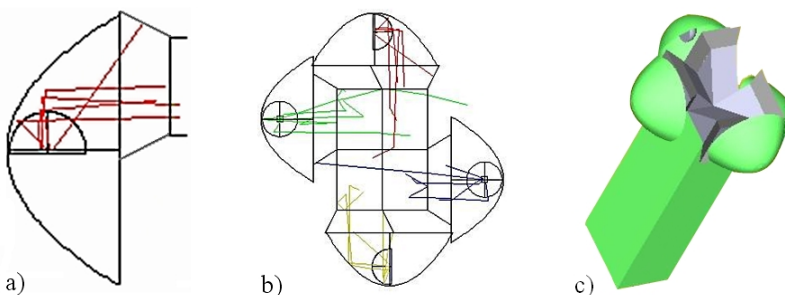
Figuur 2.12: a) een parabool b) het werkingsprincipe
c) parabolische reflector

We gaan een parabolische reflector ontwerpen voor een Luxeon III LED. Hierbij moeten we naast de optische efficiëntie ook rekening houden met mechanische aspecten. Zo heeft een Luxeon LED, ten gevolge van de lenskap, een diameter van 5.6 mm en een hoogte van 2.8 mm. De vorm en de afmetingen van de reflector moet er op aansluiten. Hierdoor zal de efficiëntie niet optimaal zijn.

De étendue van een Luxeon III LED is $7.1 \text{ mm}^2\text{sr}$. Dit is bijna vier keer kleiner dan de beoogde systeemétendue. Daarom gaan we het licht collecteren in een étendue die ook maar $\frac{1}{4}$ is, namelijk $6.55 \text{ mm}^2\text{sr}$. Het licht zal opgevangen worden door een oppervlak van $9.6 \times 7.2 \text{ mm}^2$ binnen een $f^\#$ van 2.88.

LED's stralen lambertiaans in één richting en zijn niet transparant. Daarom is het voordeliger om ze, loodrecht op de optische as te richten naar de reflector (figuur 2.13a). Zo kunnen er meer lichtstralen opgevangen worden. Deze configuratie hebben we gesimuleerd met behulp van optische "ray tracing" software (ZEMAX). Hoe kleiner we de straal kiezen, des te kleiner de parabooldoorsnede en de gevormde lichtspot zullen zijn, en dus des te meer lichtstralen gecollecteerd zullen worden binnen het gewenste oppervlak. Er is echter ook een ondergrens ten gevolge van de mechanische afmetingen van de LED. Hoewel de straal van de parabool in principe 5.6 mm kon zijn, hebben we deze 6 mm gekozen om een zekere speling op de hoogte van de lenskap te kunnen opvangen (afstand tussen oorsprong van de parabool en het brandpunt is dan 3 mm). Het effect hiervan op de efficiëntie is verwarloosbaar (0.1%). Het grootste deel van het licht wordt gereflecteerd en opgevangen door het ingangsvlak, een deel van het licht valt er rechtsreeks op en een deel komt buiten de systeemétendue terecht. Dit wordt opgevangen door middel van een absorber zodat er geen verdere propagatie is. De afstand tussen de parabool en het ingangsvlak is geoptimaliseerd tot maximale collectie binnen de gewenste étendue met behulp van de

simulator. Het ingangsvlak moet op 9 mm van het brandpunt staan. Deze LED/reflector-combinatie wordt in viervoud opgemaakt om de systeemétendue op te vullen. Hierbij wordt telkens maar de helft van de parabool gebruikt. Met behulp van halve kubussen, die de richting van het optische pad wijzigen, worden de vier delen ingekoppeld in de lichtpijp (19.2 x 14.4 mm²). De oriëntatie van deze LED/reflector sets zijn zo gekozen dat de combinatie van de halve kubussen een rechthoekige bundel met 4:3 aspect ratio vormt. De lichtpijp is een holle spiegelende pijp die 60 mm lang is. Zowel de lichtpijp als de reflector zijn 95% reflecterend verondersteld. De vuistregel voor een goede homogenisatie is dat de lengte vijf maal de diagonaal moet zijn. In hoofdstuk 1 werd het homogenisatieprincipe uitgelegd. Bij elke reflectie ontstaan er virtuele bronnen die gesuperponeerd worden aan de uitgang van de lichtpijp en zo wordt een homogene lichtverdeling verkregen. Aantal virtuele bronnen, die recht evenredig is met de lengte van de pijp en omgekeerd evenredig met de vierkantswortel van de oppervlakte ($L/\sqrt{A} = cte$), bepaalt dus de graad van uniformiteit. Meerdere bronnen aan de ingang zorgen voor creatie van meerdere virtuele bronnen zodat de lengte van de pijp kleiner mag zijn (oppervlakte van de pijp is schijnbaar verkleind). Omdat we hier vertrekken met vier lichtbronnen moet de pijp dus niet vijf keer de diagonaal van de grote rechthoek zijn, maar wel die van de kleine rechthoek (9.6x7.2 mm²) die overeenkomt met één lichtbron. De lengte moet dus juist 60 mm zijn. Op basis van simulaties hebben we dit principe nagegaan. We hebben een grote niet-uniforme bron met een lichtpijp met lengte 2*L vergeleken met 4 kleinere niet-uniforme bronnen (met dezelfde totale oppervlakte) met een lichtpijp met lengte L. De graad van uniformiteit was in beide gevallen dezelfde. In figuur 2.13b en 2.13c wordt respectievelijk een bovenaanzicht en een 3D-beeld getoond van het belichtingsdeel [7].



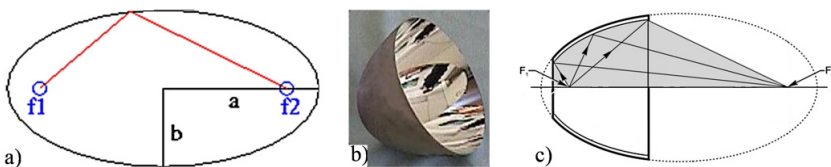
Figuur 2.13: Belichtingssysteem met vier Luxeon III LED's en parabolische reflectoren: a) LED/reflector-combinatie b) bovenaanzicht c) 3D-beeld

Na de lichtpijp bekomen we een uniform en telecentrisch belichte rechthoek die overeenkomt met de lichtklep. Als we ervan uitgaan dat één LED 80 lm levert, komt er na de lichtpijp 134.7 lm (4 LED's) of een helderheid van 5.14 lm/mm²sr uit. Rekening houdend met de helderheid van de LED, komt dit overeen met een collectie-efficiëntie van 45.5%. De optische efficiëntie bedraagt 8.6 lm/W. Het totale volume van dit belichtingssysteem is 40x45x75 mm³ (= 0.135 dm³).

Hoewel dit resultaat beter is dan de standaard lenzen en/of reflectoren, is het nog steeds niet voldoende efficiënt. Daarom zijn we niet overgegaan tot de productie van dit collectiesysteem.

3.2.2 Elliptische reflector

Een ellips is de meetkundige plaats van alle punten waarvoor de som van de afstanden (rode lijn in de figuur 2.14a) tot twee gekozen punten, de brandpunten (f_1 en f_2), een vaste waarde heeft. Een ellips heeft twee assen: de lange as ($2 \times a$) die door de brandpunten gaat en de korte as ($2 \times b$) die er loodrecht op staat. Deze kegelsnede wordt gekarakteriseerd door de halve assen a en b . Door de ellips te omwentelen rond zijn lange as bekomt men een elliptisch oppervlak (omwentelingsellipsoïde). De binnenkant van dit oppervlak wordt spiegelend gemaakt (aluminium coating) en enkel de ene helft wordt gebruikt (zie figuur 2.14b) als reflector. Een interessant kenmerk van een ellipsoïde is dat alle stralen die vertrekken vanuit het ene brandpunt, gereflecteerd worden naar het andere brandpunt (fig 2.14c). De reflectorwerking is op deze eigenschap gebaseerd. Dit geldt nogmaals enkel voor puntbronnen; voor LED's (uitgestrekte bron) zal de focus spot meer uitgesmeerd zijn.



Figuur 2.14: a) een ellips b) elliptische reflector c) het werkingsprincipe

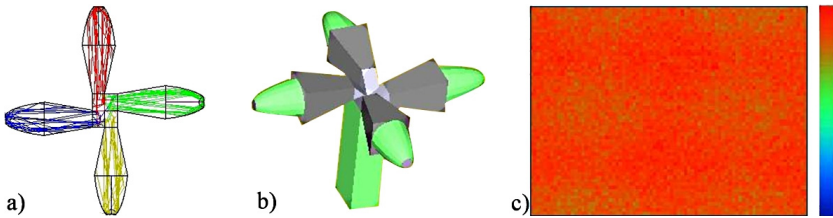
In dit deel van het onderzoek hebben we elliptische reflectoren ontworpen voor zowel Luxeon III als OSTAR LED's. OSTAR's hebben het voordeel dat ze in tegenstelling tot Luxeon LED's geen lenskap hebben en dus geen bijkomende mechanische moeilijkheden zullen introduceren, waardoor de

efficiëntie ook hoger zal zijn. De diameter van de ellips moet ter hoogte van het brandpunt voor de OSTAR LED 2.97 mm ($2.1 \text{ mm} \times \sqrt{2}$) zijn en voor de Luxeon LED 5.6 mm hoewel de chipoppervlakte kleiner is. Om de systeemétendue op te vullen, gaan we weer 4 Luxeon III-reflectorsets combineren. De bronétendue voor OSTAR LED's is $13.9 \text{ mm}^2\text{sr}$. Door 2 OSTAR-reflectorsets te combineren kunnen we de beschikbare étendue opvullen. We gaan echter zowel 2 OSTAR's als 4 OSTAR's combineren en de resultaten bespreken.

Er zijn twee parameters die de vorm van de ellips volledig bepalen, nl. de halve assen a en b . Deze lineair onafhankelijke parameters kunnen ook anders geformuleerd worden. In ZEMAX worden ze uitgedrukt als de straal R ter hoogte van het brandpunt (waar de LED's gaan geplaatst worden) en de coniciteit c (een maat voor de vorm van de ellips). Voor het ontwerp zijn we vertrokken vanuit een goed gekozen startwaarde voor deze parameters. De straal R is zó gekozen dat de LED's er net in passen, en de coniciteit zó dat de gereflecteerde stralen een hoek maken met de lange as van maximaal 10° . Dit wordt mede bepaald door de gebruikte lengte van de reflector. Met de simulator hebben we de vorm van de elliptische reflector geoptimaliseerd naar maximale inkoppeling in een gewenst oppervlak met een $f^\#$ van 2.88. De inkoppeling is verder geoptimaliseerd door de afstand van de reflector ten opzichte van het inkoppelvlak te variëren om zo de beste positie te bepalen.

Luxeon III

Zoals in de vorige paragraaf gaan we 4 Luxeon III LED's combineren om de systeemétendue ten volle te kunnen benutten. Elke LED/reflector-combinatie gaat opgevangen worden door een rechthoekige oppervlakte ($9.6 \times 7.2 \text{ mm}^2$) op een afstand van ongeveer 28 mm van de reflector. De elliptische reflector heeft als halve assen $a=37.1\text{mm}$ en $b=10.2$ ofwel $R=2.8\text{mm}$ en $c=-0.92453$. Het gebruikte deel van de reflector is 22 mm lang beginnend vanaf het brandpunt. Verschillende deelspotjes worden overgebracht naar een holle lichtpijp door middel van halve kubussen. Tussen de reflector en de kubus is een absorber voorzien om het strooilicht op te vangen. De lichtpijp is 60 mm (5 x diagonaal kleine rechthoek) lang. Zowel de reflector als de pijp is 95% reflecterend verondersteld. In figuur 2.15 worden zowel het ontwerp als de ruimtelijke lichtverdeling na de lichtpijp voorgesteld [7].



Figuur 2.15: Belichtingssysteem met vier Luxeon III LED's en elliptische reflectoren

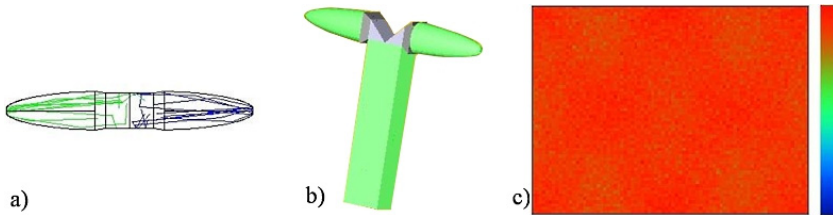
a) bovenaanzicht b) 3D-beeld c) ruimtelijke lichtverdeling na de pijp

Het uitgangsvlak van de lichtpijp wordt uniform en telecentrisch belicht. In de veronderstelling dat één LED 80 lm levert, bekommen we hier een lichtspot van 163 lm binnen het gewenste f-getal. Rekening houdend met de systeemétendue komt dit overeen met een helderheid van $6.22 \text{ lm/mm}^2\text{sr}$. De totale efficiëntie van het belichtingssysteem is dus 55%. Dit is beter dan het systeem met parabolische reflectoren, maar toch nog aan de lage kant. De optische efficiëntie bedraagt 10.5 lm/W . Het volume van dit belichtingssysteem is $120 \times 120 \times 75 \text{ mm}^3 (= 1.08 \text{ dm}^3)$.

OSTAR

OSTAR LED's hebben een grotere oppervlakte $2.1 \times 2.1 \text{ mm}^2$. Ze zijn niet ingebed in een epoxy hemisfeer en stralen rechtsreeks in de lucht. Hierdoor hebben ze een étendue dat bijna het dubbele is van die van de Luxeon III LED's (zie tabel 2.1). Om de systeemétendue op te vullen, kunnen we dus 2 OSTAR LED's combineren. Eén LED/reflector-set zal dus opgevangen worden door een oppervlakte $14.4 \times 9.6 \text{ mm}^2$ (aspect ratio 3:2) op een afstand van 4.4 mm van de reflector. Tussen de reflector en het ingangsvlak is er een absorber voorzien om het strooilicht op te vangen. De elliptische reflector heeft als halve assen $a=41.64\text{mm}$ en $b=7.86\text{mm}$. Uitgedrukt in eenheden waarmee ZEMAX werkt, is dat $R=1.485\text{mm}$ en $c=-0.96434$. Merk op dat de waarde van R overeenkomt met de straal van de omschreven cirkel rond de LED 'die'. De reflector is 36 mm lang (vanaf het brandpunt).

De twee LED/reflector-sets worden samengebracht door middel van halve kubussen waardoor de lichtstralen propageren naar de holle lichtpijp. Dit is te zien in figuur 2.16 a en b. De lichtpijp is nu 80 mm lang omdat we vertrekken vanuit twee lichtbronnen in plaats van vier. De reflectie is opnieuw 95% gekozen. In figuur 2.16c wordt de ruimtelijke lichtverdeling na de lichtpijp afgebeeld [7].



Figuur 2.16: Belichtingssysteem met twee OSTAR LED's en elliptische reflectoren

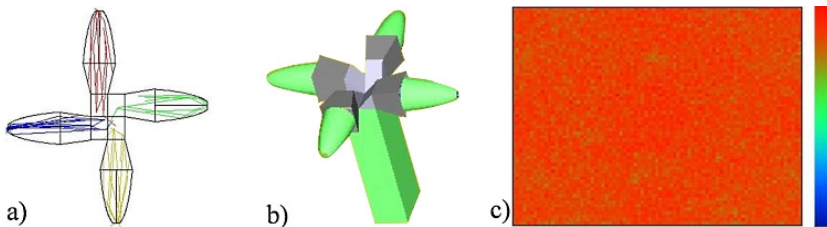
a) bovenaanzicht b) 3D-beeld c) ruimtelijke lichtverdeling na de pijp

De lichtverdeling in figuur 2.16c is uniform en telecentrisch. De hoeveelheid licht die binnen de systeemétendue gecollecteerd en gehomogeniseerd wordt, is 372.4 lm indien we ervan uitgaan dat de OSTAR LED's 320 lm leveren. We hebben dus een helderheid aan het uitgangsvlak van 14.22 lm/mm²sr. Rekening houdend met de luminantie van de LED betekent dit een efficiëntie van 61.6%. De optische efficiëntie bedraagt 11.6 lm/W. Het volume van dit belichtingssysteem is 16 x 100 x 95 mm³ (= 0.152 dm³).

Hoewel twee OSTAR LED's reeds de systeemétendue volledig opvullen, kan het toch nog interessant zijn om vier OSTAR/reflector-sets te combineren. Hierdoor zal de bronétendue minstens het dubbele zijn van de systeemétendue, waardoor er zelfs in het beste geval (100% collectie-efficiëntie) de helft van het optisch vermogen niet zal propageren doorheen het systeem en dus verloren zal gaan. Hoewel dit systeem energetisch gezien inefficiënt is, kan het nog steeds interessant zijn indien de collectie-efficiëntie hoog is. Dit betekent dat we een hogere luminantie zullen bekomen ten koste van een lagere vermogen-efficiëntie.

We zijn op dezelfde manier te werk gegaan als bij Luxeon III LED's. De ontworpen reflectoren hebben als halve assen $a=35.7\text{mm}$ en $b=7.3\text{mm}$, ofwel $R=1.485\text{mm}$ en $c=-0.9584$ en belichten elk een oppervlakte van $9.6 \times 7.2\text{mm}^2$. De reflectoren hebben een lengte van 22 mm en staan op 12.8 mm van het ingangsvlak van de halve kubussen die de stralen van de verschillende LED's propageren naar de lichtpijp om één grote rechthoekige spot te vormen. Aangezien we hier vanuit vier lichtbronnen vertrekken, zal de lichtpijp opnieuw 60 mm lang moeten zijn. Het totale volume van dit systeem is $85 \times 90 \times 75\text{mm}^3$ (= 0.574 dm³). Er zijn weer absorbers voorzien om het licht dat buiten de étendue valt, op te vangen. De reflectie (lichtpijp en reflectoren) wordt 95% verondersteld. Figuur 2.17 geeft het ontwerp en de lichtverdeling na de integratorpijp weer. De lichtverdeling is uniform en

telecentrisch. 465.6 lm aan lichtflux is terechtgekomen op de rechthoekige spot binnen de systeemétendue. Dit betekent dat de helderheid $17.8 \text{ lm/mm}^2\text{sr}$ en dus de collectie-efficiëntie 77.1% is. We zien duidelijk dat de collectie-efficiëntie toegenomen is tot een aanvaardbaar getal ten koste van vermogensefficiëntie. We moeten er dubbel zoveel energie insteken om er 25% winst uit te halen [7]. De optische efficiëntie bedraagt 7.3 lm/W.



Figuur 2.17: Belichtingssysteem met vier OSTAR LED's en elliptische reflectoren

a) bovenaanzicht b) 3D-beeld c) ruimtelijke lichtverdeling na de pijp

3.2.3 Resultaten reflectoren

We hebben parabolische en elliptische reflectoren op maat ontworpen en gesimuleerd in combinatie met Luxeon III en OSTAR LED's. De resultaten zijn beter dan de commercieel beschikbare reflectoren en collectielenzen. In tabel 2.2 worden ze nogmaals samengevat.

| | uitgangsflux [lm] | luminantie [$\text{lm/mm}^2\text{sr}$] | efficiëntie | | volume [mm^3] |
|------------------|-------------------|--|-------------|--------|--------------------------|
| | | | col. [%] | [lm/W] | |
| 4 Luxeon III+PR | 134.7 | 5.14 | 45.5 | 8.6 | 40x45x75 |
| 4 Luxeon III +ER | 163.0 | 6.22 | 55.0 | 10.5 | 120x120x75 |
| 2 OSTAR+ER | 372.4 | 14.22 | 61.6 | 11.6 | 16x100x95 |
| 4 OSTAR+ER | 465.6 | 17.80 | 77.1 | 7.3 | 85x90x75 |

Tabel 2.2: Simulatieresultaten van systemen met collectiereflectoren

De belichtingssystemen met parabolische reflectoren hebben een te lage efficiëntie, maar zijn compacter. Systemen met elliptische reflectoren zijn daarentegen efficiënter (minstens +20%) maar hebben een groter volume. Bij de vergelijking tussen Luxeon en OSTAR LED's zien we dat de systemen met OSTAR's efficiënter en compacter zijn. Dit is te wijten aan

het feit dat er bij Luxeon LED's een bijkomende hemisfeer aanwezig is, waardoor de R-parameter van de ellips niet voldoende klein kan gemaakt worden. In combinatie met de hogere luminantie van OSTAR's, zal er daardoor veel meer licht op het scherm terechtkomen. De vermogensefficiënties zijn vergelijkbaar voor beide (4 Lux III+ER en 2 OSTAR+ER) systemen. Deze laatste heeft een collectie efficiëntie van ongeveer 62% met een uniforme rechthoekige lichtverdeling die kan gebruikt worden om de microdisplay te belichten. Gebruiken we 4 OSTARs in combinatie met ER, de bronétendue is dan twee keer de systeemétendue, dan zal de collectie-efficiëntie stijgen tot bijna 80% ten koste van de vermogensefficiëntie. We moeten er dubbel zoveel energie inpompen om 25% meer licht op het scherm te krijgen. De collectie-efficiëntie is bevredigend, maar de vermogensefficiëntie is aan de lage kant. Er zal veel energie verloren gaan door de mismatch van de étendues. Het 2-OSTAR-systeem is dan energetisch in orde, maar de collectie is nog laag. Bovendien zijn deze systemen redelijk volumineus.

Hoewel uit het onderzoek rond reflectoren positieve resultaten geboekt zijn, zijn er ook bepaalde tekortkomingen. Om deze problemen aan te pakken en de belichtingssystemen verder te optimaliseren, gaan we op zoek naar alternatieve systemen die we in de volgende paragraaf gaan bespreken.

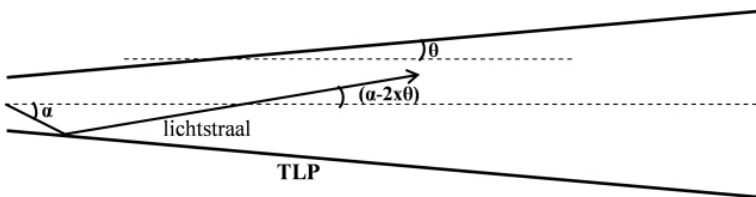
3.3 Alternatieve collectiecomponenten

Het illuminatiesysteem in een projector heeft als doel om de lichtstralen van de lichtbron op te vangen, deze om te zetten naar een gewenste angulaire en ruimtelijke distributie en voor de homogenisering van de gevormde rechthoekige spot te zorgen. In de hierboven beschreven systemen wordt dit gedaan met een collectielens/reflector (collectie en omzetting angulaire distributie) en een rechthoekige lichtpijp (homogenisatie en omzetting ruimtelijke distributie). Deze systemen zijn meestal niet heel compact en vereisen een perfecte uitlijning van de collectiecomponenten ten opzichte van de lichtpijp. Het zou dus ideaal zijn indien we beide delen van het belichtingssysteem konden combineren in één component. Hierdoor zal het systeem compacter, efficiënter en robuuster zijn en zal het ook minder gevoelig zijn voor aligneringsfouten.

3.3.1 'Tapered Light Pipe'-model

LED's zijn in goede benadering perfecte oppervlaktestralers. Het licht wordt gegenereerd in de pn-junctie en verlaat de chip aan een vierkant (of

rechthoekig) oppervlak. In principe kunnen de LED's rechte reeks aan de ingang van de lichtpijp geplaatst worden. Echter door het Lambertiaanse stralingspatroon zal een groot deel van het licht onbruikbaar zijn (te grote hoeken). Een klassieke lichtpijp kan dus drie van de vier taken van een belichtingssysteem bij LED's vervullen, nl. collectie, homogenisatie en aanpassing van de ruimtelijke lichtverdeling. De angulaire distributie moet echter nog aangepast worden. De lichtpijp moet dus gewijzigd worden zodat deze ook de stralingshoeken aanpast. Dit kan gerealiseerd worden door in plaats van een rechte lichtpijp een lichtpijp te gebruiken met breder wordende ("getaperde") wanden. Zo'n model wordt getoond in figuur 2.18 en wordt 'Tapered Light Pipe' (TLP) genoemd [9]. Door de LED aan het smalle vlak van de TLP te plaatsen, zal deze component het licht collecteren, de hoek en de ruimtelijke distributie aanpassen en eveneens homogeniseren door veelvoudige reflecties. Door de getaperde wanden zullen bij elke reflectie de stralingshoeken verkleinen. Dit wordt hieronder geïllustreerd.



Figuur 2.18: Reflectieprincipe aan de wand van een getaperde lichtpijp

Indien θ de taperinghoek (hoek die de wand vormt met de optische as) is, dan zal de stralingshoek α bij iedere reflectie op de wand verkleind worden met 2θ totdat de stralingshoek kleiner is dan de tapering hoek. Het aantal reflecties op de wanden is belangrijk voor de homogenisatie, die dus bepaald wordt door de lengte van de TLP, die op zijn beurt samen met de begin en einddoorsnede van de pijp de tapering hoek zal bepalen. De lengte mag echter ook niet te groot gekozen worden om het systeem compact te houden. We moeten een afweging doen tussen de lengte en de uniformiteit na de pijp.

De TLP kan zowel als een holle pijp met reflectieve wanden vervaardigd worden, of als een volle pijp waarbij het licht doorheen het glas propageert d.m.v. totale interne reflectie (TIR) aan glas-lucht-overgang. Bij een holle pijp zal er minstens 5% verlies per reflectie optreden. Daarentegen is een TIR-pijp verliesloos en zal er enkel een verwaarloosbare absorptie optreden en het verlies aan lichtstralen die niet voldoen aan de TIR voorwaarde ($\theta > \theta_c$). Het verlies bij een volle pijp is kleiner dan bij een holle pijp en deze

is ook gemakkelijker te vervaardigen. Daarom hebben we in onze ontwerp voor een volle pijp gekozen uit PMMA (plexiglas).

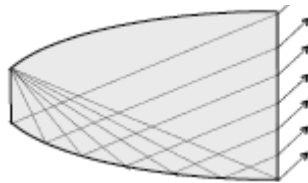
We hebben eerst een degelijke volle TLP gesimuleerd [9]. De voorkant van de pijp mag in principe exact even groot zijn als de LED-‘die’, maar uit praktische overwegingen hebben we deze iets groter gekozen (2.2 x 2.2 mm² i.p.v. 2.1 x 2.1 mm² voor OSTAR). De LED is optisch gekoppeld aan de voorzijde, waardoor de bronétendue met een factor 2.25 (n² met n brekingsindex van lichtpijp materiaal) vergroot. De bronétendue wordt gedefinieerd door formule 2.4. De lichtopbrengst zou in principe met 2.30 [10] moeten vergroten, maar in de praktijk is de toename hoogstens een factor 2. Dit komt waarschijnlijk doordat de LED-fabrikanten de chips opruwen om de extractie efficiëntie te verhogen, waardoor de toename niet meer maximaal kan zijn. Merk op dat we hier enkel LED's met naakte dies kunnen gebruiken en dus geen Luxeons waar een hemisfeer in de weg zit. De achterkant van de pijp heeft dezelfde afmetingen als de lichtklep (met overfill): 14.4x19.2 mm². De lengte moet 150 mm zijn om een goede uniformiteit te verkrijgen. Uit simulatie blijkt dat deze lichtpijp de angulaire distributie aangepast heeft aan het f-getal van 2.88. De collectie efficiëntie bedraagt 70% en de uniformiteit is goed. Om de homogenisatie na te gaan hebben we een deel van het LED-oppervlak afgedekt en kregen we toch een uniforme lichtverdeling op de achterzijde van de pijp. Echter er zijn nog twee problemen. De TLP is te lang, wat de compactheid van het systeem niet ten goede komt, en zou moeten ingekort worden zonder de uniformiteit te verminderen. Daarnaast is de rechthoekige spot achter de pijp niet telecentrisch. Dit zal als gevolg hebben dat hoewel de lichtspot na de pijp wel homogeen is, de lichtklep niet uniform zal belicht worden ten gevolge van optische componenten die hoekafhankelijk werken. Deze problemen hebben we opgelost in een aangepaste versie van TLP die in de volgende paragraaf besproken wordt.

$$E_{bron} = n^2 \cdot \pi \cdot A_{die} \cdot \sin^2(\theta) \quad (2.4)$$

3.3.2 Gradually Tapered Light Pipe

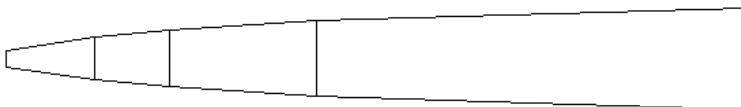
Het concept van een TLP is efficiënt, maar niet compact (150 mm), noch telecentrisch. De tapering hoek is te klein om de stralen met grote hoeken op een korte lengte te kunnen verkleinen naar een lichtkegel van 10 graden. De lengte kan dus niet zomaar verkleind worden, omdat anders de uniformiteit en de collectie efficiëntie zullen verminderen. Vergroot men de taperinghoek, dan zal het uitgangsoppervlak mee vergroten, wat ook niet gewenst is.

Daarentegen is een ‘Compound Parabolic Concentrator’ (CPC) [11][12] een soort lichtpijp met parabolische wanden (i.p.v. rechte wanden bij TLP) die gekanteld zijn ten opzichte van mekaar en waarbij de lichtbron in het vlak geplaatst wordt tussen de brandpunten van de paraboloppervlakken. In figuur 2.19 wordt een rechthoekige CPC afgebeeld met zijn randstralen. De CPC heeft als eigenschap dat hij elke lichtstraal na één reflectie uitkoppelt onder een hoek kleiner of gelijk aan de gewenste aanvaardingshoek. Dit komt door de vorm van het paraboloppervlak. Het heeft als het ware grotere taperingshoeken vooraan en deze worden kleiner naar achteren toe. De gecollecteerde lichtspot is telecentrisch. De collectie en aanpassing van hoekverdeling verloopt zeer efficiënt, maar omdat er slechts één reflectie optreedt, zal de homogenisatie slecht zijn.



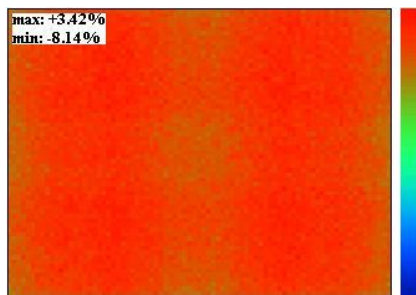
Figuur 2.19: CPC met randstralen

We hebben dus een component nodig die tussen de twee ligt: een lichtpijp die de hoeken efficiënt omzet bij een kleinere lengte (CPC) en meer dan één reflectie toelaat vooraleer het licht uitgekoppeld wordt (TLP). We hebben een dergelijk component ontworpen en deze ‘‘Gradually Tapered Light Pipe’’ (GTLP) genoemd [6]. Een GTLP is een TLP waarbij de tapering hoeken op een discontinue wijze verkleinen. We vertrekken vanuit een grote tapering hoek (wat goed is voor lichtstralen met grote hoeken), en verkleinen deze in stappen zodat de uitree oppervlakte terug de gewenste afmetingen heeft. Dit komt er op neer dat we als het ware verschillende TLP’s met kleiner wordende tapering hoeken en grotere lengten, achter elkaar plaatsen zonder er een luchtspleet tussen te laten waarbij het uitgangsvlak van een subblok overeen komt met het ingangsvlak van de volgende subblok. Deze subblokken vormen één geheel en zijn van een zelfde materiaal vervaardigd. Een dergelijke structuur is afgebeeld in figuur 2.20.



Figuur 2.20: Een GTLP-structuur

Het aantal subblokken is gelimiteerd op vier, omdat bijkomende blokken bijna geen bijdrage meer leveren en de component onnodig complex maken. Deze lichtpijp hebben we geoptimaliseerd naar maximum uniformiteit en maximum efficiëntie bij een zo klein mogelijke lengte. De parameters waren de lengte en de tapering hoek van verschillende subblokken. De optimalisatie is uitgevoerd door middel van ZEMAX simulaties. De totale lengte is nu 100 mm (cfr. 150 mm) met nog betere resultaten als bij de hierboven beschreven TLP. Het ingangsvlak is $2.2 \times 2.2 \text{ mm}^2$ en het uitgangsvlak $14.4 \times 19.2 \text{ mm}^2$. De LED (OSTAR) is optisch gekoppeld. De exacte design data van deze lichtpijp kan als volgt beschreven worden: de doorsnee-oppervlaktes van de subblokken zijn achtereenvolgens $2.2 \times 2.2 \text{ mm}^2$, $6.0 \times 8.0 \text{ mm}^2$, $8.0 \times 10.8 \text{ mm}^2$, $10.8 \times 14.4 \text{ mm}^2$ en $14.4 \times 19.2 \text{ mm}^2$; de lengtes van de subblokken zijn 12 mm, 10 mm, 20 mm en 58 mm. De angulaire en ruimtelijke distributie zijn aangepast aan de gewenste vorm ($f^\#$ van 2.88 en rechthoekig). De collectie efficiëntie is gestegen naar 76% en de uniformiteit is goed. Het afdekken van een deel van het LED-oppervlak vermindert de uniformiteit niet. Figuur 2.21 toont de belichting van het rechthoekige oppervlak na de GTLP. De uniformiteit wordt uitgedrukt (linksboven) volgens de ANSI 13-punsmethode [13]. Dit betekent kortweg dat het meest heldere punt +3.42% en het minst heldere punt -8.14% afwijkt van het gemiddelde. De lichtspot is quasi telecentrisch. Dit komt door de CPC benadering van de GTLP. Het totale volume van het belichtingssysteem is $15 \times 20 \times 100 \text{ mm}^3$ ($= 0.03 \text{ dm}^3$).

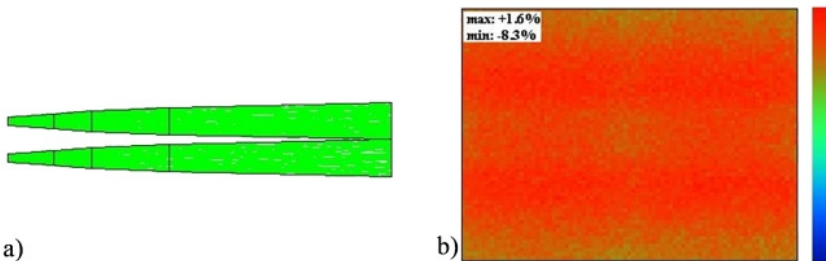


Figuur 2.21: Belichting rechthoekige uitgang GTLP

3.3.3 Multi-LED-systemen met GTLP

In de vorige paragraaf hebben we de LED optisch gekoppeld met de GTLP waardoor de étendue 2.25 keer groter werd. De lichtextractie vergroot echter niet evenveel als de étendue waardoor de luminantie van de bron vermindert.

Dit is geen gunstige uitgangspositie. Koppelen we de LED niet met de GTLP, maar plaatsen deze tegen het ingangsvlak met een luchtspleet ertussen, dan vertrekken we terug vanuit een hogere luminantie. De bronétendue is nu bijna de helft van de systeemétendue en er kunnen dus twee (OSTAR) LED's gecombineerd worden om de étendue op te vullen. Per LED wordt er een GTLP voorzien. Deze GTLP's bestaan terug uit vier deelblokken met ingangsoppervlak $2.2 \times 2.2 \text{ mm}^2$ en uitgangsoppervlak $14.4 \times 9.6 \text{ mm}^2$ (3:2 aspect ratio) en zijn perfect gealigneerd ten opzichte van elkaar. Samen vormen ze terug het gewenste oppervlak $14.4 \times 19.2 \text{ mm}^2$ om een 0.9" microdisplay te belichten. In figuur 2.22a en 2.21b worden respectievelijk het multi-LED-systeem met GTLP's en de lichtverdeling op het einde van de engine weergegeven [7]. De angulaire en de ruimtelijke lichtverdeling is aangepast aan de gewenste specificaties ($f^\#$ van 2.88, rechthoekig en telecentrisch). De rechthoekige lichtspot is zeer uniform (+1.6%/-8.3% volgens ANSI methode) en de collectie efficiëntie is 74.5%. Het totale volume van het systeem is $15 \times 20 \times 100 \text{ mm}^3$ ($= 0.03 \text{ dm}^3$).



Figuur 2.22: a) belichtingssysteem met twee OSTAR LED's en GTLP's
b) ruimtelijke lichtverdeling na GTLP's

Vergeleken met het optisch gekoppelde systeem met één LED-GTLP, is de efficiëntie hier maar 2% lager en de uniformiteit vergelijkbaar. Indien we rekening houden met de LED luminanties in beide gevallen, bekomen we met dit multi-LED-systeem een winst van tenminste 10% ten koste van een tweede LED en GTLP. In de praktijk zal er echter een bijkomend probleem zijn. Doordat de rand van het uitgangsvlak niet perfect kan nagemaakt worden en de GTLP's niet exact tegen elkaar kunnen geplaatst worden, zal er altijd een minder heldere lijn door het midden van de display gaan. Dit zal de uniformiteit zwaar aantasten en kan dus niet aanvaard worden.

3.4 Besluit belichtingssysteem

In de vorige paragrafen hebben we verschillende collectiesystemen bestudeerd om ze te kunnen gebruiken in een LED gebaseerd belichtingssysteem. We hebben deze onderverdeeld in drie soorten: collectielenzen, collectie reflectoren en alternatieve collectiecomponenten. Eens het licht gecollecteerd is, moet het nog gehomogeniseerd worden. Dit gebeurt meestal door middel van een rechthoekige lichtpijp.

De commercieel beschikbare collectielenzen en reflectoren hebben een te lage efficiëntie en zijn daardoor niet bruikbaar. Vervolgens zijn we reflectoren op maat beginnen te ontwerpen. Deze scoren beter, maar zijn nog steeds niet voldoende, met uitzondering van het vier OSTAR/elliptische reflector multi-LED-systeem. Hoewel dit systeem wel een hoge collectie efficiëntie en een goede uniformiteit heeft, is het echter niet compact en elektrisch inefficiënt. Tenslotte hebben we een alternatief collectiesysteem ontworpen, namelijk de GTLP. Deze component is zeer efficiënt (zowel energetisch [lm/W] als wat collectie [cd/mm^2] betreft), compact en de uniformiteit is zeer goed. Het grote voordeel van de GTLP is dat het een monolithisch component is die zowel het licht collecteert als de homogenisatie en de aanpassing van de lichtdistributie doet. Het is dus een collector en een lichtpijp in één component waardoor het ganse belichtingssysteem gemakkelijker kan vervaardigd worden.

Het illuminatiesysteem in dit onderzoek zal verder gebaseerd zijn op GTLP's. In de volgende paragraaf gaan we de GTLP bespreken die ook gefabriceerd is om het in de demonstrator opstelling te kunnen gebruiken.

4. LED gebaseerde illuminatiesysteem met GTLP's

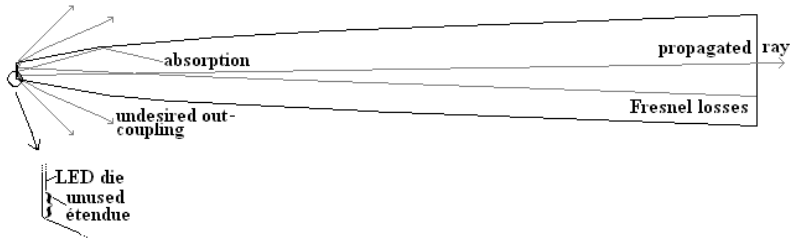
De illuminatiesystemen die besproken werden in punt 3, zijn ontworpen voor een lichtklep met 0.9" diagonaal en een aspect ratio van 3:4. Dit was de gangbare display afmeting op dat moment. Naarmate het onderzoek evolueerde zijn we op zoek gegaan naar display leveranciers. Een voor de hand liggende keuze waren de displays van Gemidis. We hadden reeds goede contacten met dit bedrijf waardoor we zowel op goede levering van displays als op hun ondersteuning konden rekenen. Gemidis ontwikkelt kwalitatieve, hoogresolutie LCOS-panelen met een diagonaal van 0.82" en 3:4 aspect ratio. Het illuminatiesysteem met GTLP moesten we dus aanpassen aan deze nieuwe afmetingen [6].

4.1 Simulatie GTLP voor 0.82" lichtklep

Een 0.82" lichtklep met 3:4 aspect ratio heeft een rechthoekige vorm met volgende afmetingen: $12.5 \times 16.67 \text{ mm}^2$. Om een betrouwbaar belichting te hebben, is het aangeraden om een zekere overfill te voorzien. Daarom hebben we het te belichten oppervlak 12% groter gekozen, namelijk $13.2 \times 17.6 \text{ mm}^2$. Het f-getal blijven we behouden op 2.88, wat dus overeenkomt met een lichtkegel van maximaal 10° . Dit betekent dat we een systeemétendue hebben van $22 \text{ mm}^2\text{sr}$. De bronétendue van een OSTAR ($2.1 \times 2.1 \text{ mm}^2$) is $13.85 \text{ mm}^2\text{sr}$. Door deze optisch te koppelen met de lichtpijp (plexiglas) bekommen we een étendue van $31.5 \text{ mm}^2\text{sr}$ die de systeemétendue dus volledig opvult.

Voor het ontwerp van GTLP hebben we dezelfde methodes gehanteerd als voordien. We hebben terug een gradueel getaperde pijp ontworpen dat bestaat uit vier verschillende taperingshoeken met een ingangsvlak van $2.2 \times 2.2 \text{ mm}^2$ en een uitgangsvlak van $13.2 \times 17.6 \text{ mm}^2$. Het uitgangsvlak komt overeen met de lichtklep met overfill. De totale lengte van de GTLP is 90 mm. De exacte design data van deze lichtpijp wordt op dezelfde manier beschreven. De doorsnee-oppervlaktes van de subblokken zijn achtereenvolgens $2.2 \times 2.2 \text{ mm}^2$, $5.6 \times 7.4 \text{ mm}^2$, $7.4 \times 9.8 \text{ mm}^2$, $9.8 \times 13.2 \text{ mm}^2$ en $13.2 \times 17.6 \text{ mm}^2$; de lengtes van de subblokken zijn 11 mm, 9 mm, 18 mm en 52 mm. Uit simulatie blijkt dat dit belichtingssysteem een collectie efficiëntie heeft van 81.1%, waarbij de lichtflux omgezet is naar een rechthoekige, zeer uniforme bundel met een telecentrische belichting met een lichtkegel van 10° . De uniformiteit kan volgens de ANSI methode uitgedrukt worden als maximale afwijkingen van het gemiddelde, deze zijnde +2.16% en -5.76%. Deze cijfers bevestigen de goede uniformiteit van de bundel.

De GTLP kan gezien worden als een optisch invariante component (een component die de étendue behoudt), zodat de collectie-efficiëntie, in het ideale geval, 100% zou moeten zijn. In de realiteit zijn er echter verschillende factoren die de theoretische efficiëntie beperken. Deze zijn: de ongewenste uitkoppeling van lichtstralen aan het begin van de pijp, materiaalafhankelijke verliezen (absorptie en Fresnel) en verliezen ten gevolge van het overgedimensioneerd zijn van het ingangsvlak (niet gebruikte étendue als het ware). In figuur 2.23 zijn deze verliezen weergegeven.



Figuur 2.23: Oorsprong van verliezen van de gesimuleerde GTLP

Het verlies door ongewenste uitkoppeling is te wijten aan het niet voldoen van bepaalde lichtstralen aan de TIR-voorwaarde. Deze is afhankelijk van de eerste tapering hoek en de brekingsindex van het materiaal van de pijp. Dit verlies bedraagt ongeveer 12%. Een tweede verliesfactor is te wijten aan de absorptie- en de Fresnelverliezen in de pijp. Door op het uitgangsvlak een antireflectie (AR)-coating aan te brengen, zijn de Fresnelverliezen geminimaliseerd en het absorptieverlies bedraagt ongeveer 1.5%. Het ingangsvlak van de GTLP is groter dan de LED oppervlakte (om praktische redenen). Dit leidt tot verspilling van de beschikbare étendue, waardoor de collectie efficiëntie lager zal zijn. De bijdrage van dit fenomeen tot het totale verlies is ongeveer 6.5%. In tabel 2.3 zijn deze simulatieresultaten samengevat.

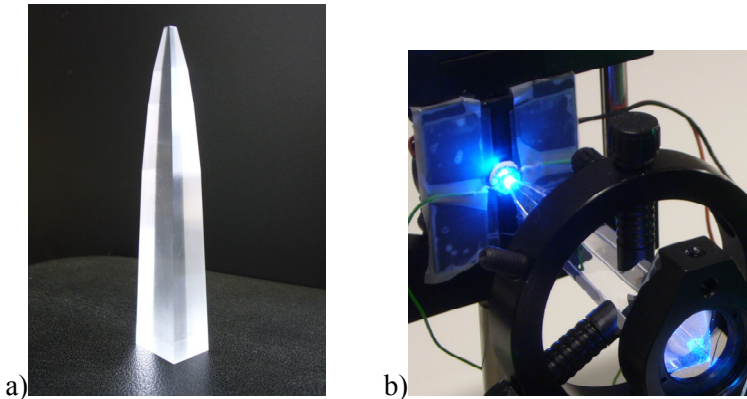
| | ideale efficiëntie [%] | uitkoppelingsverliezen [%] | absorptie [%] | oversize verliezen [%] | werkelijke efficiëntie [%] |
|-----------|------------------------|----------------------------|---------------|------------------------|----------------------------|
| GTLP+ LED | 100 | 11.96 | 1.46 | 6.5 | 81.1 |

Tabel 2.3: Simulatieresultaten GTLP

Het GTLP ontwerp voor een 0.82" display is efficiënt en compact. De homogenisatie en de telecentriciteit van de bundel zijn in orde. Omdat deze simulatieresultaten succesvol zijn, hebben we besloten om deze component te vervaardigen. Het fabricageproces wordt in de volgende paragraaf besproken.

4.2 Fabricage

De simulaties zijn op een realistische manier gedaan. We hebben getracht met alles rekening te houden om een waarheidsgetrouwe benadering weer te geven van de te fabriceren component. Echter kon er geen rekening gehouden worden met mechanische moeilijkheden die optreden bij de fabricage. De GTLP moet exact gereproduceerd worden omdat de vorm en de nauwkeurigheid bepalend zijn voor het evenaren van de gesimuleerde performantie. Dit is geen gemakkelijke taak. De tapering hoeken moeten zeer accuraat gefabriceerd worden om de gewenste transformatie van de angulaire distributie te verwezenlijken. Na een grondig marktonderzoek van "custom made product"-fabrikanten, hebben we besloten om de GTLP zelf te fabriceren. De vorm van de GTLP hebben we uitgesneden uit een blok plexiglas met een geautomatiseerde freesbank met een nauwkeurigheid van 50 μm . Omdat we in BK7 glas niet konden frezen, hebben we PMMA (plexiglas) gekozen als materiaal. Na het freeswerk was de vorm voldoende nauwkeurig nagemaakt, maar de optische kwaliteit van de lichtpijp was zeer slecht. Een radicaal polijstproces was vereist. Er waren diepe en oppervlakkige krassen op het oppervlak aanwezig. Het volledige GTLP oppervlak moest egaal gepolijst worden zonder de pijp te beschadigen of de vorm of de tapering hoeken te veranderen. We hebben een methode ontwikkeld waarbij we het oppervlak in verschillende stappen polijsten met behulp van vloeibare producten met diamantkorrels erin van verschillende afmetingen. Om te bepalen met welke korrelgrootte we moeten beginnen, hebben we eerst de initiële oppervlakteruwheid opgemeten met Wyko Profilometer. Deze bedroeg ongeveer 4 μm . We zijn dus begonnen met korrels van 3 μm en achtereenvolgens overgegaan naar 1 μm , 0.3 μm om tenslotte te finaliseren met 0.05 μm . Na elke polijststap hebben we de ruwheid terug opgemeten om te bepalen wanneer we mogen overgaan naar een kleinere korrelgrootte. Na de laatste stap was de pijp glashelder en hebben we optische kwaliteit bereikt. Echter de ultieme test zullen de kwantitatieve en de kwalitatieve metingen zijn van de collectie efficiëntie, aangepaste stralingspatroon (zowel angulair als spatiaal) en homogenisatie. Figuur 2.24 toont twee foto's van de gefabriceerde GTLP met een rechthoekig doorsnede. In de eerste foto is de pijp uitgefreesd, maar nog niet gepolijst. De tweede foto toont een gepolijste GTLP waarin een LED gekoppeld wordt.



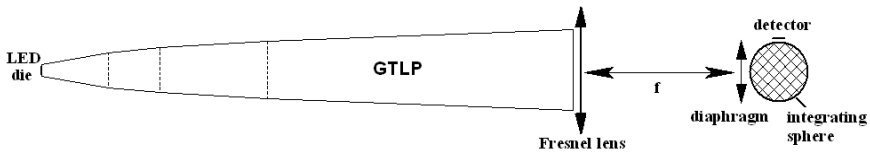
Figuur 2.24: a) Gefreesde GTLP b) gepolijste GTLP + LED-opstelling

4.3 Experimentele waarnemingen

In deze paragraaf zullen we de experimentele waarnemingen bespreken om de simulatieresultaten te bevestigen. We zullen eveneens twee recuperatiesystemen introduceren om de helderheid te verhogen en de resultaten ervan bespreken. Aangezien het uitgangsvlak van de gefabriceerde GTLP niet AR-gecoat is en de verhoging van de lichtflux door de LED optisch te koppelen niet gekend is, zullen we relatieve metingen moeten doen en ze vergelijken met analoge relatieve simulatieresultaten.

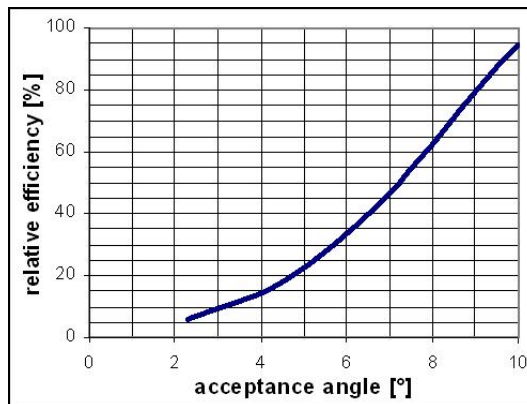
4.3.1 Collectie-efficiëntie binnen het gewenste f-getal

Hoewel de fabricage goed verlopen is, kunnen we geen besluit trekken zolang de simulatieresultaten experimenteel niet geverifieerd zijn. Dit hebben we gedaan met de meetopstelling afgebeeld in figuur 2.25. We meten de collectie-efficiëntie binnen de gewenste aanvaardingshoek (10° of $f^\#$ van 2.88). Om dit te verwezenlijken plaatsen we een Fresnellens na de GTLP en meten de lichtflux in het brandpunt van deze lens, waar de hoekdistributie van de bundel na de lichtpijp omgezet is naar een ruimtelijke distributie. Door middel van een regelbaar diafragma in het brandpunt selecteren we een bepaald f-getal. Elke diameter van de circulaire diafragma komt overeen met een zekere aanvaardingshoek. Na het diafragma wordt de lichtflux binnen het geselecteerde f-getal opgemeten met een integrerende sfeer. De LED is optisch gekoppeld met het ingangsvlak van de GTLP met behulp van 'index matching gel'.



Figuur 2.25: Meetopstelling voor het bepalen van collectie efficiëntie GTLP

We hebben eveneens een referentiemeting gedaan door de GTLP tegen de opening van de integrerende sfeer te plaatsen (met de Fresnellens ertussen om de verliezen van de lens te vereffenen) en dus al het licht op te meten dat de GTLP verlaat langs het uitgangsvlak. Vervolgens hebben we de verhoudingen berekend tussen de metingen met diafragma en de referentiemeting en hebben deze resultaten vergeleken met overeenkomstige simulaties (lichtflux binnen $f^{\#}$ 2.88 gedeeld door de totale lichtflux die de GTLP verlaat). De berekende resultaten zijn herschaald om ze te kunnen vergelijken met de gesimuleerde collectie-efficiëntie. De grafiek in figuur 2.26 toont de relatief opgemeten efficiënties in functie van de aanvaardingshoek. 100% van de y-as komt overeen met de gesimuleerde efficiëntie van 81.1%.



Figuur 2.26: Opgemeten efficiëntie gerelateerd naar gesimuleerde efficiëntie

Uit deze grafiek kunnen we afleiden dat de experimentele efficiëntie 5% lager is dan de gesimuleerde. Dat betekent dat de opgemeten collectie-efficiëntie 76.9% is. De gefabriceerde GTLP heeft dus bijna dezelfde performantie als de gesimuleerde. Dit laat ons toe om te besluiten dat het

fabricageproces geslaagd is. We hebben de metingen herhaald met een pijp die niet gepolijst is en de efficiëntie is in dat geval 40% (i.p.v. 5%) lager dan bij de simulaties, wat aantoont dat de polijststap zeer cruciaal is.

4.3.2 Polarisatie recuperatie systeem

De lichtklep in een projectiesysteem kan op verschillende principes werken. Zo is een LCOS-paneel gebaseerd op modulatie van de polarisatie van het licht. Deze panelen werken slechts met één polarisatietoestand en de andere polarisatie (50%) wordt gewoonweg weggefilterd. Om deze verspilling van licht te voorkomen en de helderheid van het systeem te vergroten, moeten we de verkeerde polarisatie recupereren door ze om te zetten naar de juiste polarisatietoestand. Dit kan gebeuren door de bronétendue te verdubbelen, maar dit heeft geen zin aangezien deze overeenkomt met de systeemétendue. Bovendien zal hierdoor de helderheid niet vergroten. We moeten de polarisatie recupereren zonder de étendue te doen toenemen. Een methode om dit te doen gaan we hier bespreken. Indien we een reflectieve polarisator vlak achter de lichtpijp plaatsen kunnen we dit verwezenlijken. Dit werkt als volgt: één polarisatietoestand wordt doorgelaten door de polarisator en de andere terug gereflecteerd naar de bron. De GTLP zal de gereflecteerde lichtstralen propageren naar de LED, die ze op zijn beurt gedeeltelijk terug zal reflecteren. Deze stralen lijken dan als het ware stralen die geïnitieerd zijn door de LED en propageren naar de uitgang van de GTLP. Elke reflectie (zowel op LED als op GTLP) zal het licht depolariseren, waardoor terug een deel van het licht doorgelaten zal worden door de polarisator onder dezelfde polarisatie als voorheen. Het gereflecteerde deel zal terug dezelfde procedure ondergaan. Dit proces blijft duren totdat al het licht geabsorbeerd wordt. De netto winst (polarisatierecuperatie zonder étendue toename) hangt af van verschillende factoren. Deze zijn voornamelijk de reflectiviteit van de LED oppervlak, de kwaliteit van de reflectieve polarisator en aantal reflecties (depolarisatiegraad). We hebben eerst het beschreven systeem gesimuleerd in ZEMAX waarbij we de LED reflectiviteit 50% verondersteld hebben en behaalden zo een recuperatie van 23%. We hebben deze winst ook experimenteel proberen waar te nemen door de meetopstelling in figuur 2.25 te gebruiken waarbij we een extra component, de reflectieve polarisator, geplaatst hebben tussen de GTLP en de lens. Om een referentiemeting te doen, hebben we de reflectieve polarisator vervangen door een gewone "sheet polarizer" die sowieso nodig is in een LCOS-projector om het contrast te verhogen (prepolarisator). Als reflectieve polarisator gebruiken we de "wire grid" van Moxtek [14] en de reflectiviteit van de LED was onbekend. Voor deze metingen hebben we Luxeon LED's gebruikt. Theoretisch zou de polarisator, in geval van ongepolariseerd licht, 50%

doorlaten en 50% absorberen (sheet polarizer). Echter er is ook altijd een bijkomende absorptie van de juiste polarisatietoestand. Na het opmeten van deze additionele absorptie voor beide polarisatoren, hebben we de fractie van het licht dat binnen de gewenste étendue (aanvaardingshoek) valt, opgemeten voor de situatie met (beide) en zonder polarisator. De resultaten zijn terug te vinden in tabel 2.4.

| | relatieve flux [%] | additionele absorptie [%] | polarisatie recuperatie [%] | totale winst [%] |
|---------------------------|--------------------|---------------------------|-----------------------------|------------------|
| LED+GTLP | 100 | | | |
| LED+GTLP+ sheet pol | 40 | 20 | | |
| LED+GTLP+ reflectieve pol | 55.8 | 6.32 | 19.1 | 39.5 |

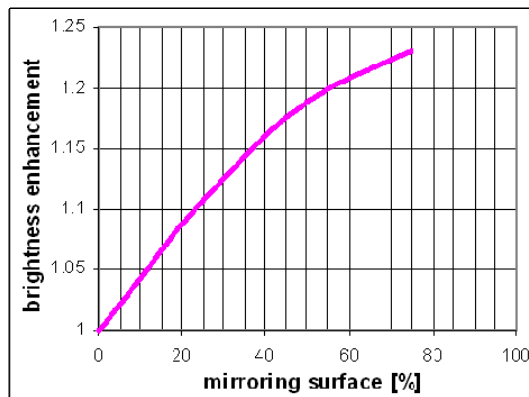
Tabel 2.4: Resultaten polarisatie recuperatie

De opgemeten polarisatie recuperatie bedraagt ongeveer 19%, wat lager is dan bij de simulaties. Dit kan te wijten zijn aan een lagere efficiëntie van GTLP en/of reflectieve polarisator, of aan een lagere reflectiviteit van de LED oppervlakte dan aangenomen in de simulaties. Het meest waarschijnlijke is een combinatie van beide effecten. De aangenomen reflectiviteit (50%) in de simulaties was waarschijnlijk te optimistisch en kan dus geschat (berekend) worden op 40 à 44% afhankelijk van de reflectiviteit van de polarisator (99.5-90%). Dit komt overeen met eerder gepubliceerde resultaten [12] ($R=0.4-0.5$). In een projectiesysteem is een pre polarisator steeds vereist. Indien we een systeem met klassieke absorberende polarisator vergelijken met een systeem met Moxtek polarisator, waar we eveneens recuperatie van de verkeerde polarisatie doen (19%), dan zien we dat de werkelijke winst bijna 40% is. Dit komt door de lagere absorptie coëfficiënt van Moxtek polarisatoren.

4.3.3 Étendue recuperatie systeem

De afmetingen van onze GTLP ontwerp komt perfect overeen met de gebruikte lichtklep. Echter indien we overgaan naar een kleinere lichtklep, dan zal het belichtingssysteem overgedimensioneerd zijn en zal een deel van het licht verloren gaan. Dit is normaal aangezien we dan de lichtklep belichten met een systeem met grotere étendue. In zo'n situatie kunnen we met bepaalde methodes toch meer licht krijgen in een kleiner oppervlak (étendue), anders gezegd de helderheid verhogen. Dit hebben we étendue recuperatie genoemd en wordt eveneens beschreven in de literatuur als licht

recuperatie [12]. Het principe is vrij eenvoudig. Door een deel van het uitgangsoppervlak van de GTLP, het deel dat niet overlapt met de lichtklep, te bedekken met een spiegel, verkleint men het oppervlak vanwaar de lichtstralen kunnen ontsnappen. Niet ontsnapte lichtstralen worden terug naar de LED gereflecteerd doorheen de GTLP zoals beschreven in de vorige paragraaf. Bij een volgende cyclus kunnen ze terecht komen in een niet spiegelende regio en kunnen zo ook ontsnappen of anders worden ze nogmaals gereflecteerd. Omwille van verliezen in de pijp, de spiegel en de LED zullen niet alle lichtstralen de GTLP kunnen verlaten waardoor de lumen-efficiëntie zal dalen, maar de gerecupereerde fotonen zullen de flux in de apertuur en dus de helderheid verhogen. Deze verhoging hangt voornamelijk af van de reflectiviteit van de spiegel en de LED die. Deze recuperatie methode is niet van toepassing voor ons ontwerp, maar we hebben toch experimenteel deze helderheidsverhoging opgemeten. We hebben dit terug gedaan met de meetopstelling in figuur 2.25 maar deze keer met een spiegel ($R_{\text{spiegel}} > 95\%$) achter de GTLP die gedeeltelijk het oppervlak bedekt. We hebben de flux opgemeten in de apertuur die overeenkomt met $f^{\#}$ van 2.88. In figuur 2.27 zijn de resultaten weergegeven als verhoging van helderheid als functie van de fractie bedekte oppervlakte.



Figuur 2.27: Opgemeten relatieve helderheidsverhoging i.f.v. fractie spiegelend oppervlak achter de GTLP

We hebben een verhoging van de helderheid opgemeten door een deel van het uigangsoppervlak te bedekken met een spiegel. Hoe groter het bedekte oppervlak des te groter de helderheid wordt. Bijvoorbeeld 50% bedekking geeft een helderheids-verhoging van 18.8%. Bij hogere bedekking zal de verhoging meer en meer satureren.

5. Besluit

Het belichtingssysteem bepaalt de helderheid en de uniformiteit van een projector. Het is belangrijk dat we een efficiënt belichtingssysteem ontwerpen, maar eveneens dat we vertrekken vanuit LED's met hoge luminanties. Na een marktonderzoek bleken de OSTAR LED's van OSRAM de meest geschikte componenten te zijn voor LED-projectie. In dit onderzoek hebben we deze LED's gebruikt om een projectiesysteem op te bouwen.

Het belichtingssysteem van klassieke projectoren is niet geschikt voor LED's en moet aangepast worden. Daarom zijn we op zoek gegaan naar nieuwe systemen om zo efficiënt mogelijk het licht te kunnen collecteren en om te zetten naar de gewenste spatiale en angulaire distributie. De commercieel beschikbare componenten zijn niet geschikt. Daarom hebben we nieuwe componenten moeten ontwerpen. Hiervoor hebben we zowel gebruik gemaakt van parabolische/elliptische reflectoren als van alternatieve ontwerpen. De reflector benadering was te omslachtig en niet efficiënt.

Een alternatief ontwerp is de Gradually Tapered Light Pipe (GTLP), die zeer geschikt is voor LED belichtingssystemen. De GTLP collecteert de lichtflux, zet het stralingspatroon (spatiaal en angulair) om naar de gewenste vorm en homogeniseert de lichtspot zodat deze rechtsreeks de lichtklep kan belichten. We hebben deze component ontworpen, gesimuleerd, gefabriceerd en experimenteel gekarakteriseerd. De gesimuleerde efficiëntie bedroeg 81.1% en de experimentele efficiëntie 76.9%. De performantie van de gefabriceerde component is dicht bij de simulatiewaarde, wat een geslaagde fabricage aantoont. Bijkomend hebben we twee recuperatiemethodes bestudeerd om de helderheid te verhogen en deze experimenteel uitgemeten.

Referenties

- [1] Chris Chinnock, "Microdisplay overview", *SID Seminar Lecture Notes Vol 1*, M-5, 2001.
- [2] <http://www.philipslumileds.com/>
- [3] http://www.osram-os.com/osram_os/EN/
- [4] S. Kudaev, "LED light sources for projection displays", *SID-ME Chapter*, Technical presentations, 2008.
- [5] <http://www.luxeonstar.com/luxeon-lenses-c-82.php>
- [6] H. Murat, A. Gielen, H. De Smet, "Gradually tapered light pipes for illumination of LED projectors", *JSID Vol. 15*, pp 519-526, 2007.
- [7] H. Murat, D. Cuypers, H. De Smet, "Design of new collection systems for multi LED light engines", *Proceedings of SPIE, Photonics in Multimedia. Vol. 6196*, pp 619604/1-619604/11, 2006.
- [8] B. Van Giel, Y. Meuret, L. Bogaert, H. Murat, H. De Smet, H. Thienpont, "Efficient and Compact Illumination in LED Projection Displays", *SID Int Symp Digest of Technical Papers Vol. 38*, pp. 947-950, 2007
- [9] H. Murat, H. De Smet, D. Cuypers, "Compact LED projector with tapered light pipes for moderate light output applications", *Displays (Elsevier) Vol. 27*, pp 117-123, 2006.
- [10] H. Zou, A. Schleicher, J. Dean, "Single-Panel LCOS Color Projector with LED light Sources", *SID Int Symp Digest of Technical Papers*, pp. 1698-1701, 2005.

-
- [11] Y. Zhen, Z. Ye, F. Yu, “Ultrahigh-performance lamp illumination system with compound parabolic retroreflector for a single liquid-crystal-on-silicon panel display”, *Optical Engineering. SPIE. Vol. 46*, pp. 054001:1-6, 2007.
- [12] M.P.C.M. Krijn, B.A. Salters, O.H. Willemsen, “LED-based mini-projectors”, *Photonics in Multimedia Proc. SPIE*, pp. 619602, 2006.
- [13] ANSI/PIMA IT7.227-1998, “American National Standard for Audiovisual Systems – Electronic Projection – Variable resolution projectors”, 1998.
- [14] http://www.moxtek.com/Optics/visible_light.html
- [15] R. Winston, J.C. Miñano and P. Benitez, “Nonimaging Optics”, Academic Press, 2005.
- [16] V.R. Mahajan, “Optical Imaging and Aberrations”, SPIE Press Monograph Vol. PM103, 2001.

Hoofdstuk 3

Intelligente methodes voor luminantieverhoging

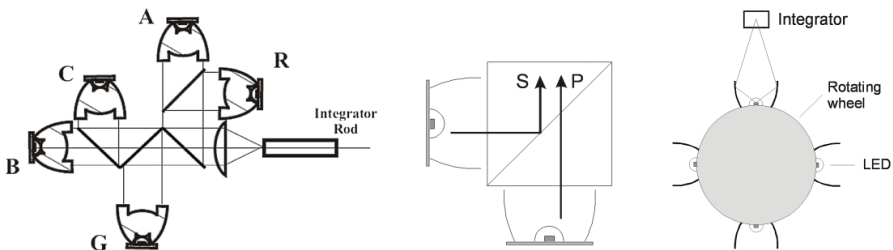
1. Introductie

UHP-lampen zijn lichtbronnen met een kleine étendue (kleine boog) en een hoge helderheid waardoor ze uiterst geschikt zijn voor lichtklepprojectoren omdat deze ook een kleine systeemétendue hebben door de kleine microdisplay-afmetingen. LED's hebben echter een lage helderheid (factor 10 kleiner) en daardoor is de lichtopbrengst van een LED gebaseerde projector eerder gering. In het vorige hoofdstuk hebben we getracht om deze geringe lichtopbrengst zo efficiënt mogelijk te collecteren, maar dit volstaat niet. We moeten de helderheid van de lichtbron opkrikken. Dit kan niet zomaar verholpen worden door bv. meerdere LED's naast elkaar te plaatsen of een grotere LED te gebruiken. Hierdoor zal de lichtopbrengst aan de bron wel vergroten, maar de étendue zal eveneens groter worden waardoor het geëmitteerde licht niet meer volledig binnen de systeemétendue zal passen. We moeten niet de lichtflux, maar de helderheid proberen te verhogen, m.a.w. het aantal lumens vermeerderen bij een zelfde étendue.

LED's hebben een aantal voordelen waarmee we dit kunnen realiseren, wat onmogelijk zou geweest zijn met klassieke UHP-lampen. LED's hebben smalle spectra, ze hebben een ogenblikkelijke schakeltijd waardoor ze snel kunnen gepulst worden en ze zijn compact. Hierdoor kunnen we toch meerdere LED's op een intelligente manier combineren om er binnen eenzelfde étendue meer lumens uit te halen.

84 Hoofdstuk 3: Intelligente methodes voor luminantieverhoging

Meerdere LED's kunnen op basis van drie principes binnen eenzelfde étendue gecombineerd worden. Aangezien ze zeer smalbandig zijn, kan men LED's met een verschillend, niet-overlappend spectrum combineren binnen eenzelfde étendue door middel van dichroïsche spiegels. Zo kan men bijvoorbeeld in plaats van met drie (R, G, B) basiskleuren te werken, met vijf basiskleuren werken (R, A, G, C, B) [1]. Deze spectra zullen elkaar niet overlappen en de lichtopbrengst en het kleurengamut van de projector zal groter worden. Een tweede principe is het combineren van verschillende polarisatietoestanden binnen eenzelfde étendue door middel van polariserende bundelsplitters (PBS). Dit principe is echter niet nuttig voor onze applicatie omwille van twee redenen. Ten eerste zijn LED's ongepolariseerde lichtbronnen en bevatten dus evenveel licht van beide polarisaties. Ten tweede werken LCOS-lichtkleppen met slechts één polarisatie en wordt de andere toch weggefilterd door de prepolarisator. Het laatste principe is gebaseerd op de ogenblikkelijke schakeltijden van LED's waardoor ze kunnen gepulst worden. Als we meerdere LED's afwisselend pulsen en de verhoogde piekfluxen in de tijd optellen, hebben we een verhoogde lichtopbrengst binnen eenzelfde étendue gerealiseerd. Deze drie principes, het combineren van verschillende spectra, polarisatie en het pulsen, worden getoond in figuur 3.1 a, b en c. In dit hoofdstuk gaan we methodes bespreken om de helderheid van LED's te verhogen volgens het derde principe [2].

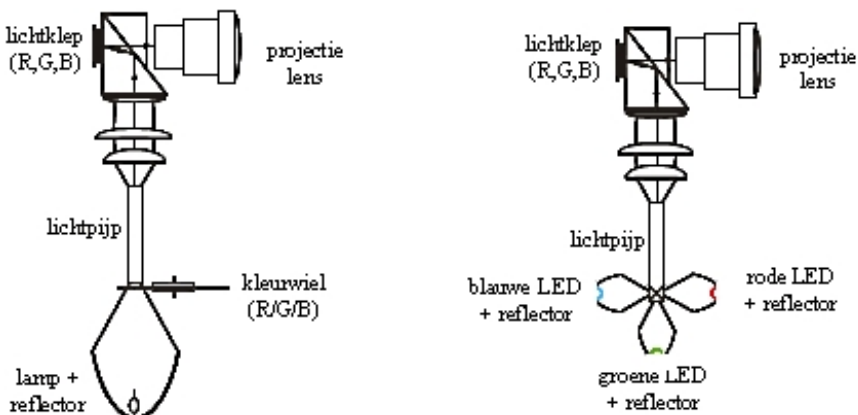


Figuur 3.1: Combinatieprincipes gebaseerd op:
a) de spectra b) de polarisatie c) het pulsen

2. Luminantieverhoging door afwisselend pulsen van meerdere LED's

2.1 Principe

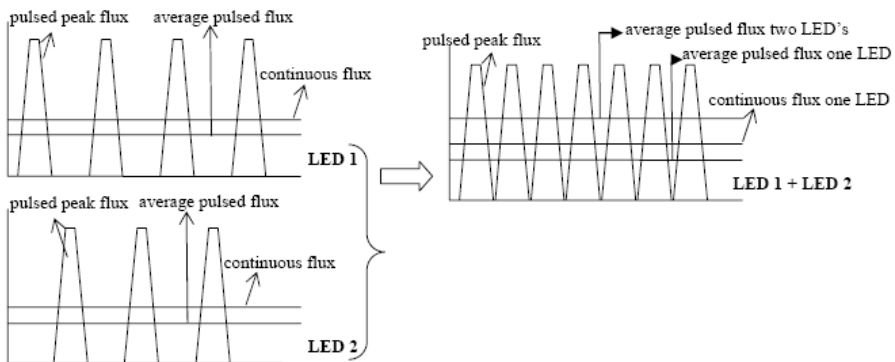
De mogelijkheid om LED's te pulsen is een zeer interessante eigenschap, die zowel kan gebruikt worden om de luminantie te verhogen in 3-paneel-systemen als kleursequentiële werking zonder kleurwiel mogelijk te maken in 1-paneel-systemen [3]. Bij een dergelijke 1-paneel-architectuur met UHP-lamp (figuur 3.2a) die continu brandt, wordt de kleurscheiding mogelijk gemaakt door een ronddraaiend kleurwiel, d.i. een dichroïsche component die afhankelijk van de positie op het wiel de rode, groene of blauwe kleurcomponent doorlaat (en de rest wegfiltert) die dan door de lichtklep gemoduleerd wordt. Vervangen we de lamp door (R, G, B) LED's (figuur 3.2b), die we combineren met dichroïsche spiegels (X-kubus), dan zal het kleurwiel overbodig zijn. De LED's worden nu afwisselend gepulst en gemoduleerd. Omdat ze niet continu branden mogen ze met een hogere ogenblikkelijke stroom aangestuurd worden, waardoor ze meer lumens produceren voor eenzelfde étendue en ze ook minder verbruiken omdat er geen licht weggefilterd wordt. Enkel het licht dat nodig is, wordt opgewekt. Dit is een methode om LED's efficiënt te gebruiken in kleursequentiële systemen waarmee we zelfs een verhoogde luminantie verkrijgen.



Figuur 3.2: Kleursequentiële architectuur met a) UHP-lamp b) LED's

86 Hoofdstuk 3: Intelligente methodes voor luminantieverhoging

Het principe van afwisselend pulsen kunnen we ook gebruiken in meer-paneel-systemen om de helderheid per kleur te verhogen door gepulste LED's van eenzelfde kleur samen te nemen. Pulsen we bijvoorbeeld twee groene LED's afwisselend, dan zal elke LED een duty cycle hebben van 50%. Dit betekent dat we ze dan in principe mogen aansturen met een piekstroom die dubbel zo groot is als de nominale stroom. De piekflux zal echter niet het dubbele zijn van de nominale flux omdat de flux-stroomkarakteristiek van een LED afneemt bij hogere stromen. Dus de piekflux zal wel hoger zijn dan de nominale flux, maar uitgemiddeld over één periode zal deze lager uitkomen. Tellen we nu de piekfluxen van beide LED's in de tijd op en brengen we de gepulste LED op een mechanische of optische manier in het optische pad, dan hebben we een verhoging van de luminantie gerealiseerd. De verhoging zal echter nooit 100% zijn en zal ten koste gaan van een tweede LED en vermogensefficiëntie. Dit principe wordt schematisch voorgesteld in figuur 3.3.



Figuur 3.3: Het principe van een gepulst systeem met twee LED's

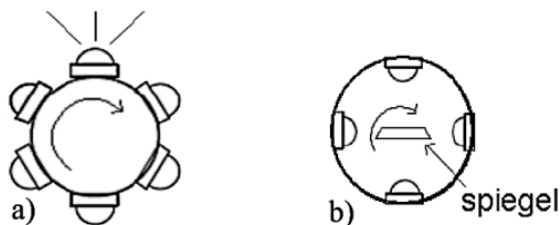
2.2 Configuraties

Het systeem dat hierboven beschreven is, kan uitgevoerd worden in verschillende configuraties. Hierbij maken we het verschil tussen systemen met en zonder bewegende onderdelen. Bij het eerste systeem wordt de LED die gepulst wordt, mechanisch in het optisch pad gebracht en bij het tweede systeem wordt dit optisch gedaan. We gaan hier twee systemen met en twee systemen zonder bewegende onderdelen bespreken.

2.2.1 Met bewegende onderdelen

a) LED carousel

We zetten een aantal LED's (bv. 6) op een carousel en laten deze draaien met een kleine motor waarbij telkens die LED oplicht die in het optische pad terecht komt (zie figuur 3.4a). De carousel mag gedurende de 'aan-tijd' van de LED niet draaien. De duty cycle moet in principe in dit geval $1/6$ zijn en de piekstroom 6 keer de nominale stroom. In de praktijk kunnen de HBLED's zulke hoge piekstromen niet aan en zullen we deze moeten beperken. De overgangstijd van de ene LED naar de andere moet infinitesimaal klein zijn, omdat deze voor dode tijd zorgt. Een te lange dode tijd zal de efficiëntie verminderen en flikkering introduceren. We hebben dus een stappenmotor nodig die oneindig snel kan roteren en, als de LED in de juiste positie gebracht is, die LED daar kan blijven gedurende de pulsduur. Elke motor heeft echter een zekere transitietijd nodig die we zo klein mogelijk moeten trachten te houden. Een bijkomend probleem is dat samen met de LED's, de bedrading en de aansturing zullen meedraaien wat niet echt comfortabel is. Dit kan verholpen worden door te werken met sleepcontacten, die op zijn beurt voor slijtage kunnen zorgen [4].



Figuur 3.4: LED-carroussel met a) roterende LED's b) roterende spiegel

Een elegantere oplossing voor dit probleem bestaat erin om een alternatieve opstelling te gebruiken waarbij niet de LED's ronddraaien, maar wel een spiegeltje, terwijl de LED's vast gemonteerd zijn op een LED-ring met de lichtbundel naar het midden gericht, daar waar de spiegel zich bevindt. Telkens als er een LED gepulst wordt, moet het spiegeltje zo staan dat het licht als één continue bundel naar boven straalt. Het bovenaanzicht in figuur 3.4b toont deze situatie duidelijker. Het licht komt dan in deze figuur naar boven toe (loodrecht op dit blad). Het grote voordeel van dit alternatief is dat de LED's, samen met de eventuele aansturing en bedrading stil staan en niet hoeven mee te draaien. Oplossingen met sleepcontacten, die voor slijtage kunnen zorgen, worden op die manier vermeden. De LED's worden op een

88 Hoofdstuk 3: Intelligente methodes voor luminantieverhoging

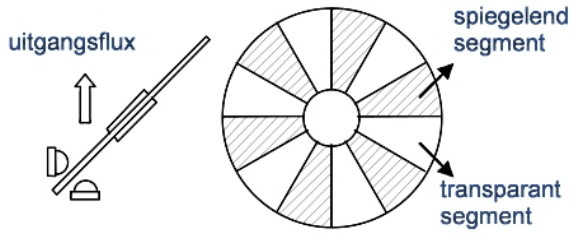
metalen ring gemonteerd waarmee de warmteafvoer kan gerealiseerd worden.

Om de dode tijd te beperken is het noodzakelijk dat het spiegeltje zo vlug mogelijk naar de volgende LED roteert, en daar even stil staat. Hiervoor is een zeer snelle stappenmotor vereist. In het algemeen zijn stappenmotoren gekend als motoren met een beperkte snelheid die bovendien afhangt van de mechanische belasting. Dit systeem werd bestudeerd in een afstudeerwerk [5] en daaruit bleek dat de stappenmotoren te traag werken om dit te realiseren. In een systeem met 6 LED's op een carrousel heeft de stappenmotor 10 ms nodig om te roteren van de ene LED naar de volgende. Indien we aan 60 Hz werken, betekent dit dat er maar 6.7 ms overblijft voor het pulsen van de LED. Dit zal de efficiëntie drastisch verminderen en bovendien storende flikkering introduceren. Om deze redenen zijn we afgestapt van de implementatie met de LED-ring en overgeschakeld naar een ander systeem dat geen last heeft van de trage motor. Deze oplossing wordt besproken in het volgende deel.

b) gepulste LED's met halfspiegelend schijf

Een andere methode bestaat erin om twee LED's afwisselend te pulsen die orthogonaal ten opzichte van elkaar staan. In het bissectricevlak bevindt zich een ronddraaiende glasplaat. Deze plaat bestaat uit een aantal afwisselend spiegelende en doorzichtige segmenten. De LED's hebben een duty cycle van 50%. Als het spiegelend segment tussen de LED's komt, zal de ene LED oplichten, waarbij de lichtstraal zal reflecteren. Bij het passeren van een doorzichtig segment zal de andere LED oplichten en de lichtbundel zal gewoon doorgelaten worden. Door de twee LED's op deze manier in anti-fase te laten pulsen, krijgen we opnieuw als resultaat een continue bundel met een verhoogde lichtintensiteit. Dit systeem wordt getoond in figuur 3.5.

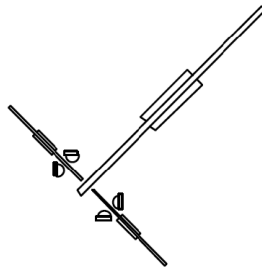
Om de glasplaat te roteren kan men hier een DC-motor gebruiken i.p.v. een stappenmotor. Deze mag continu ronddraaien en op de juiste momenten worden de juiste LED's aangestuurd. De snelheid van de motor is niet zo cruciaal als in het vorige geval en er is nauwelijks dode tijd (enkel een overgangsfase van een transparant naar een spiegelend segment en andersom).



Figuur 3.5: Oplossing met twee pulserende LED's in anti-fase

Dit systeem heeft een aantal voordelen. Zoals eerder vermeld, kan hier een DC-motor gebruikt worden en de snelheid van de motor hoeft niet zo groot te zijn. De dode tijd is zeer klein waardoor we geen last zullen ondervinden van flikkering en we een hogere efficiëntie zullen verkrijgen. De LED's kunnen nauwkeuriger gepositioneerd worden. Bij de LED-carroussel moesten we bijvoorbeeld zes LED's op een aantal graden nauwkeurig kunnen positioneren terwijl we hier een LED kunnen plaatsen, deze kunnen bekijken in het spiegelend stuk van het wiel en dan de andere LED kunnen plaatsen zodanig dat de twee LED's elkaar overlappen. In tegenstelling tot het systeem dat in de volgende paragraaf zal besproken worden, is de uitgangsflux ongepolariseerd. Hierdoor kan dit systeem een verhoogde helderheid opleveren zowel bij LCOS- als bij DMD-panels.

Nadeel van deze oplossing is dat we slechts een duty cycle kunnen halen van 50%, tenzij we zoals op figuur 3.6 kunnen uitbreiden naar vier LED's waarbij we twee keer de oplossing toepassen met twee LED's en dit verenigen met nog een extra glasplaat. Deze uitbreiding brengt wel de compactheid in gevaar, maar we kunnen nu een duty cycle van 25% invoeren, waardoor we LED's hoger kunnen pulsen.



Figuur 3.6: Uitbreiding naar vier LED's met 25% duty cycle

90 Hoofdstuk 3: Intelligente methodes voor luminantieverhoging

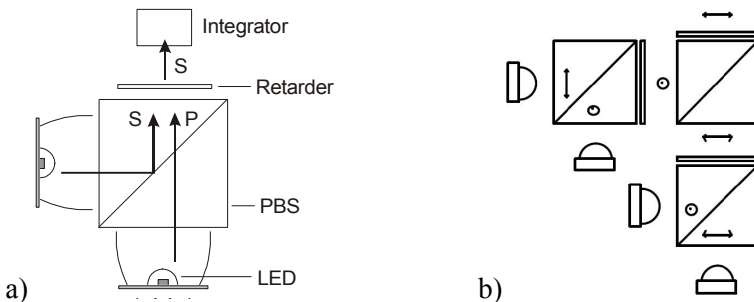
Het systeem met twee LED's is gerealiseerd in het kader van een afstudeerwerk [5] en de realisatie en de resultaten zullen later besproken worden.

2.2.2 Zonder bewegende onderdelen

In de vorige paragraaf werden er configuraties besproken waarbij de gepulste LED op een mechanische manier in het optische pad gebracht wordt. In een projectiesysteem verkiest men liever systemen zonder bewegende onderdelen. Deze zijn betrouwbaarder en minder onderhevig aan slijtage. In deze paragraaf gaan we twee configuraties voorstellen die verhoging van luminantie kunnen verwezenlijken zonder bewegende onderdelen. Hierbij wordt de gepulste LED op een optische manier in het juiste pad gebracht.

a) gepulste LED's met PBS

In deze configuratie worden twee afwisselend gepulste LED's orthogonaal aan weerszijden van een PBS geplaatst. De PBS combineert de s-polarisatie van de eerste LED met de p-polarisatie van de tweede LED. Dit is te zien in figuur 3.7a. De p-polarisatie van de eerste en de s-polarisatie van de tweede LED worden niet gebruikt. Na de PBS gaan de lichtstralen door een schakelbare, ferro-elektrische, halfgolfengteplaat (FLC) [6] die synchroon met de LED's aan- en uitgeschakeld wordt. De polarisatie afkomstig van de eerste LED zal bijvoorbeeld onveranderd doorgelaten worden (uit-toestand FLC) en de polarisatie afkomstig van de tweede LED zal omgewisseld worden (aan-toestand), zodat er een lichtbundel gegenereerd wordt met continu eenzelfde polarisatie.



Figuur 3.7: a) het gepulst systeem met twee LED's, PBS en FLC
b) uitbreiding van dit systeem naar 4 LED's

Op het eerste zicht lijkt dit systeem niet echt zinvol te zijn. Ook als we de PBS en de FLC als verliesloos beschouwen en de LED dubbel zoveel licht zou kunnen leveren gedurende 50% (duty cycle), dan nog hebben we geen netto winst omdat de helft van het licht (p-polarisatie van de ene en s-polarisatie van de andere LED) niet gebruikt wordt. In projectiesystemen met op polarisatie gebaseerde lichtkleppen (LCD, LCOS) wordt echter de ene polarisatie in ieder geval weggefilterd vóór de lichtklep en is dit dus eerder gebeurd. Deze configuratie zal dus toch de luminantie verhogen bij op LCOS gebaseerde systemen en kan, in tegenstelling tot andere configuraties, niet gebruikt worden bij DMD-projectoren.

Het grote voordeel van deze configuratie is dat we zonder bewegende onderdelen werken die voor slijtage kunnen zorgen. Hierdoor zullen we een robuuster systeem hebben. De configuratie in figuur 3.7a is een systeem met twee gepulste LED's met een duty cycle van 50%. De pulsfrequentie wordt hier niet meer gelimiteerd door een mechanisch systeem dat altijd een zekere traagheid zal hebben, maar wel door de schakelsnelheden van LED's en FLC. Deze zijn vele keren groter en dus zal er zeker geen flikkering optreden. We kunnen dit naar analogie met voorgaande methode eenvoudig uitbreiden naar vier LED's (zie figuur 3.7b) met een duty cycle van 25%, maar dit zal het volume kwadratisch vergroten.

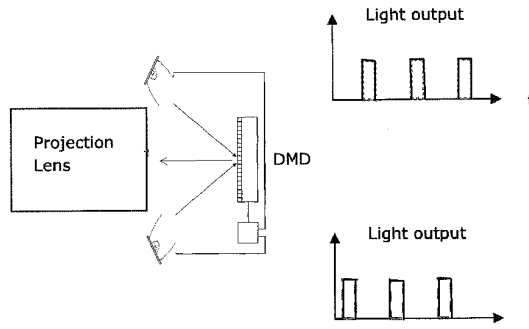
Het systeem met twee LED's is uitgewerkt en experimenteel geverifieerd [2]. Deze experimenten en de resultaten zullen in de volgende paragraaf besproken worden.

b) gepulste LED's met inverse DMD-modulatie

Een alternatieve methode voor luminantieverhoging zonder bewegende onderdelen, geschikt voor DMD-lichtkleppen [7], wordt schematisch voorgesteld in figuur 3.8. Hierbij worden twee LED's afwisselend gepulst (50% duty cycle) en worden pas in de lichtklep zelf gecombineerd. De ene LED belicht bijvoorbeeld bij even frames en de andere bij oneven frames. De polariteit van de beeldinformatie bij oneven frames wordt geïnverteerd, zodat de DMD langs beide kanten kan belicht worden. Dit betekent dat de stand van de uit-toestand van de DMD voor de onderste LED ook de stand is van de aan-toestand voor de bovenste LED. Aangezien er geen mechanische beweging vereist is, zal er ook geen dode tijd geïntroduceerd worden. LED's kunnen nu afwisselend gepulst worden en leveren daardoor hogere ogenblikkelijke piekfluxen. Hierdoor zal de luminantie van het systeem stijgen. Aangezien de combinatie niet op polarisatie gebaseerd is, wordt de

92 Hoofdstuk 3: Intelligente methodes voor luminantieverhoging

volledige lichtopbrengst benut. Dit principe is geschikt voor DMD-lichtkleppen terwijl het vorige geschikt was voor LCOS-panelen.



Figuur 3.8: Een methode voor luminantieverhoging bij DMD's

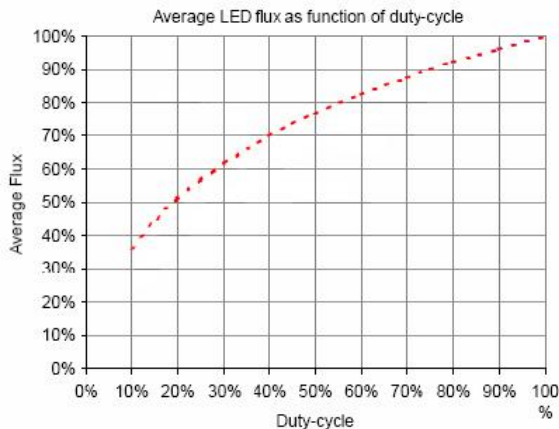
2.3 Realisaties

In paragraaf 2.2 werden vier configuraties besproken die kunnen gebruikt worden om de helderheid van een projectiesysteem te verhogen door meerdere LED's afwisselend te pulsen en de piekfluxen in de tijd op te tellen. De gepulste LED werd telkens op een mechanische of optische manier in het optische pad gebracht. We hebben twee van deze configuraties uitgewerkt en experimenteel de behaalde winst (helderheidsverhoging) opgemeten. De configuraties die we uitgewerkt hebben, zijn: twee afwisselend gepulste LED's met halfspiegelende schijf en twee afwisselend gepulste LED's met PBS.

Voor beide configuraties is de duty cycle van elke LED 50%. Dit betekent dat we ze in principe mogen pulsen met een piekstroom van 200%. We willen echter eenzelfde gemiddeld verbruik hebben als bij de nominaal aangestuurde situatie om een eerlijke vergelijking te kunnen maken. We zouden 2 keer mogen overpulsen indien de diodespanning constant bleef; als we echter de stroom-spanning-karakteristiek van een LED bekijken, stijgt de spanning mee met stijgende stroom. Om een constant vermogen te handhaven, moet de piekstroom kleiner zijn dan 2 keer de nominale stroom. De piekstroom wordt bepaald door de volgende vergelijking.

$$U_{no\ min\ aal} \cdot I_{no\ min\ aal} = \frac{1}{2} \cdot U_{piek} \cdot I_{piek} \quad (3.1)$$

OSRAM LED's waren in deze fase van het onderzoek niet beschikbaar en dus hebben we voor deze realisaties Luxeon LED's gebruikt. De pulsefficiëntie van een LED wordt gedefinieerd als de verhouding van de gemiddelde lichtopbrengst bij gepulst regime ten opzichte van de lichtopbrengst bij nominaal regime bij eenzelfde gemiddeld elektrisch vermogen. In figuur 3.9 (grafiek uit datasheets) wordt deze efficiëntie uitgezet in functie van de duty cycle voor een Luxeon LED. Deze curve kan verschillend zijn bij een andere LED (sample, kleur, merk, etc.). Bij dalende duty cycle zal ook de lichtopbrengst en de efficiëntie verminderen, maar doordat we meerdere LED's combineren in de tijd zal er netto een winst zijn. We zien dat voor 50% duty cycle de pulsefficiëntie 77% is. Dit betekent dat we een piekflux hebben die 1.54 keer hoger is dan de nominale lichtopbrengst, maar gedurende 50% van de tijd. De pulsefficiëntie bij 50% duty cycle is ook experimenteel bepaald en bedraagt 79.5%. Dit komt goed overeen met de onderstaande grafiek.



Figuur 3.9: Pulsefficiëntie in functie van duty cycle

2.3.1 Twee gepulste LED's met halfspiegelende schijf

Het principe werd al in een vorige paragraaf uitgelegd. Het betreft een systeem waarbij afwisselend twee LED's gepulst worden met tussenin een draaiend wiel met daarop afwisselend spiegelende en transparante segmenten (zie figuur 3.5). We hebben een substraat nodig dat verdeeld is in afwisselend transparante en spiegelende segmenten. Dit substraat moet stevig genoeg zijn zodat het niet vervormt tijdens het draaien. Glas bleek het beste materiaal omdat het stevig genoeg is en geschikt is om aluminium op

94 Hoofdstuk 3: Intelligente methodes voor luminantieverhoging

aan te brengen. Glas is bovendien uit zichzelf al doorzichtig en kan dus gebruikt worden in combinatie met de aluminium segmenten die als spiegel kunnen dienen.

Het aluminium op het glas aanbrengen werd gedaan met behulp van de sputtertechniek, waarvan de technologie intern beschikbaar was. Als substraat werd een 2 mm dikke, cirkelvormige glasplaat genomen die net in de substraathouder van ons sputtertoestel past (4" diameter). De circulaire vorm van de plaat heeft bijkomende voordelen: het vermijden van de turbulenties, het minder gevaarlijk zijn door afwezigheid van scherpe hoeken. Het sputteren verloopt als volgt. Het substraat wordt omgekeerd opgehangen in het sputterapparaat. Vervolgens wordt een proces gestart waarbij zware, hoogenergetische deeltjes op het aluminium (de target) botsen, zodat dit aluminium zich afzet op het nabijgelegen substraat. Eens het volledige plaatje met aluminium bedekt is, wordt er een fotolak aangebracht. De lak wordt belicht door een masker dat op voorhand aangemaakt is en de segmenten die doorzichtig moeten zijn komen bloot te liggen. Het aluminium wordt dan op die plaatsen weggeëtst en zo ontstaat het gewenste patroon.

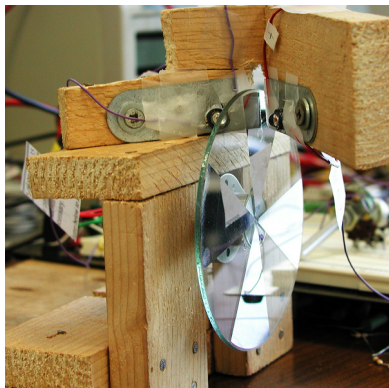
De keuze van het aantal segmenten is ook een belangrijke parameter in het ontwerp. Meer segmenten zorgen ervoor dat de motor minder snel moet draaien (snelheid van een stappenmotor is beperkt), maar hebben als nadeel dat er meer spiegelende/transparante overgangen zijn in verhouding tot de totale periode. Elke overgang brengt een zekere dode tijd (waar we niet mogen belichten) met zich mee. De beperking heeft niet met de LED's te maken (ze worden gepulst aan een constante frequentie van 50 Hz), maar wordt veroorzaakt door de mechanische beweging (niet ogenblikkelijke rotatie doorheen de dode zone). We hebben geopteerd om acht segmenten te gebruiken (vier transparante en vier spiegelende), zodat de motor niet te snel moet draaien (750 rpm), maar toch snel genoeg is om de dode tijd te beperken. De afgewerkte glasplaat is te zien in figuur 3.10. Om de transparantie van de glassegmenten te verhogen, kan er nog antireflectie coating aangebracht worden.



Figuur 3.10: Het gesegmenteerde wiel

De glasplaat wordt met behulp van een hulpstuk gemonteerd op de motoras. Hoewel we een DC-motor zouden kunnen gebruiken, omdat de motor enkel een eenparige beweging moet uitvoeren, gaan we toch met een stappenmotor werken om geen optische terugkoppeling te moeten voorzien. Bij een stappenmotor kunnen we zonder terugkoppeling exact de rotatie van het wiel bepalen. Zo kan het wiel synchroon met de LED's werken. De volgende LED moet oplichten als een segment volledig is gepasseerd of dus na een bepaald aantal stappen van de motor. De synchronisatieaspecten worden geregeld met behulp van een microcontroller.

De motor moet ergens op gemonteerd worden om het wiel vrij te kunnen laten draaien. Bovendien moeten de LED's beide onder 45° komen te staan ten opzichte van het wiel. De LED's staan dan onderling loodrecht op elkaar. De lichtstralen van verschillende LED's moeten eenzelfde optische weglengte afleggen. Aangezien de glasplaat een zekere dikte heeft, moet in principe ook daarmee rekening worden gehouden. De warmte moet kunnen afgevoerd worden en er moet plaats voorzien zijn om een lichtmeting te kunnen doen. Om een prototype te bouwen, hebben we een houten constructie opgezet die te zien is in figuur 3.11.



Figuur 3.11: Demonstratoropstelling

We hebben vervolgens de 2 LED's afwisselend en synchroon met het wiel gepulst (50% duty cycle, eenzelfde gemiddeld vermogen als bij nominale aansturing) en de lichtflux met behulp van een fotodiodeschakeling opgemeten. We hebben eveneens de lichtflux van één LED die nominaal aangestuurd wordt, opgemeten met en zonder het glasplaatje ertussen. De resultaten zijn samengevat in tabel 3.1.

96 Hoofdstuk 3: Intelligente methodes voor luminantieverbodiging

| | spanning fotodiode [V] | verlies glasplaat | puls efficiëntie | systeem winst |
|-----------------------|---------------------------|----------------------|---------------------|------------------|
| nominaal zonder plaat | 5.2 | 11.5 % | 79.5 % | 48% |
| nominaal met plaat | 4.6 | | | |
| gepulst systeem | 7.7 | | | |

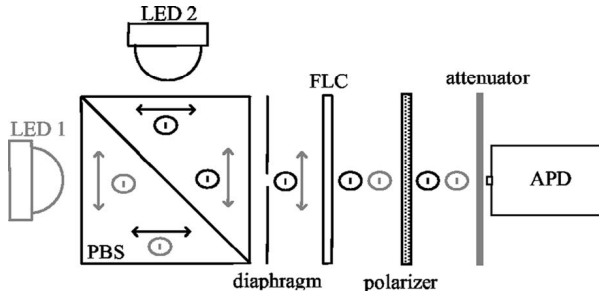
Tabel 3.1: Experimentele resultaten van in anti-fase gepulste LED's met draaiwiel

Theoretisch zouden we een luminantieverbodiging van 59% moeten verkrijgen. Het wiel houdt echter een deel van het licht tegen. Zowel de reflectieve maar vooral de transparante segmenten hebben een groot verlies. Zo is het opgemeten verlies van het transparante glassegment meer dan 10%. Dit kan gedeeltelijk verholpen worden door het aanbrengen van AR-coatings op het glas. De opgemeten winst bedraagt 48% en er is nauwelijks flikkering waar te nemen. Deze flikkering is afkomstig van het verschil in lichtintensiteit. Dit kan zowel liggen aan het verschil in lichtopbrengst van verschillende LED-samples als aan de verschillende verliezen in de twee optische paden. Dit kan verholpen worden door de LED in het intensere lichtpad te dimmen totdat de uitgangsflux homogeen is. Dit zal ten koste gaan van de helderheid. Merk op dat de lichtflux nog steeds ongepolariseerd is en dit systeem kan dus evengoed bij DMD-spiegeltjes als bij LCOS-panels gebruikt worden.

Het doel was om een systeem te ontwerpen dat meer licht geeft dan een DC-aangestuurde LED. We kunnen stellen dat we in die opzet geslaagd zijn en hebben dit met een demonstrator aangetoond waarbij we een helderheidswinst van bijna 50% hebben opgemeten.

2.3.2 Twee gepulste LED's met PBS

Het werkingsprincipe van dit systeem werd al besproken en kan kort als volgt samengevat worden: twee afwisselend gepulste LED's worden gecombineerd met een PBS waarna de polarisatie van het licht, afkomstig van de ene LED, omgewisseld wordt zodat de uitgaande verhoogde lichtflux continu eenzelfde polarisatie heeft om de LCOS-lichtklep te kunnen belichten. In deze paragraaf gaan we de experimentele uitvoering en de resultaten bespreken. Eerst bespreken we de opstelling en de gebruikte componenten alvorens we overgaan naar de metingen. De meetopstelling wordt weergegeven in figuur 3.12.



Figuur 3.12: De meetopstelling

Twee groene Luxeon LED's, LED 1 en LED 2, worden afwisselend gepulst met een duty cycle van 50% en eenzelfde gemiddeld elektrisch vermogen als bij de nominale werking van één LED. Indien de nominale stroom 700 mA is, bedragen de piekstromen hier dus 1260 mA. Dit werd experimenteel bepaald. Omwille van het hoge vermogenverbruik, worden de LED's gekoeld met een actief koelelement. De lichtfluxen worden vervolgens gecombineerd door een AR-gecoate PBS met een zijde van 40 mm. Deze laat de p-polarisatie van LED 1 door en reflecteert de s-polarisatie van LED 2. Na de PBS hebben we dus een verhoogde piekflux die afwisselend p- en s-polarisatie heeft. Met behulp van een diafragma worden enkel de lichtstralen doorgelaten die op de detector zullen terechtkomen. Na het diafragma bevindt zich een elektro-optische component die afhankelijk van de aangelegde spanning werkt als een halfgolflengteplaat of als een 'window'. Dit betekent dat het licht dat erdoor passeert ofwel van polarisatietoestand verandert, ofwel gewoon doorgelaten wordt. De schakeltijd van de ene toestand naar de andere moet bijna ogenblikkelijk zijn om geen licht te verliezen. Daarom hebben we een bistabiel, ferro-elektrisch vloeibaar kristal (FLC) gebruikt van het bedrijf Displaytech [12]. Deze FLC heeft twee stabiele toestanden, aan en uit, en wordt geschakeld met een symmetrische blokgolf van +/- 5 V. Er mag geen DC-veld opgebouwd worden die de component kan beschadigen. De schakeltijd is in de orde van 0.1 ms wat voldoende snel is. De FLC is breedbandig (zichtbaar gebied) en aan beide zijden anti reflectie gecoat. Door deze component synchronoos met de LED's aan te sturen wordt er voor gezorgd dat het licht afkomstig van LED 1 van polarisatie verandert en dat van LED 2 ongewijzigd doorgelaten wordt. Na de FLC hebben we dus een continue lichtflux met een constante polarisatietoestand. Vervolgens gaat het licht door een prepolarisator die sowieso aanwezig is in een LCOS-projector. Deze dient om de residuele verkeerde polarisatie weg te filteren. Tenslotte wordt het licht opgemeten met een avalanche-fotodiode van Hamamatsu (c5460-01). Deze fotodiode

98 Hoofdstuk 3: Intelligente methodes voor luminantieverhoging

heeft een zeer grote gevoeligheid en om ze niet te satureren, worden er nog attenuatoren voor geplaatst.

Voor de aansturing van de LED's en de FLC hebben we een schakeling opgebouwd die zulke hoge stromen aankan. Het is een driekanaals-mosfetschakeling (2 voor de LED's en 1 voor de FLC) waarbij de transistor als schakelaar gebruikt wordt. De gates worden aangestuurd met signalen die gegenereerd worden vanuit een microcontroller. De tijdsgerelateerde zaken zoals duty cycle, frequentie, synchronisatiesignalen, etc. worden geregeld met de microcontroller. Deze firmware-aanpak is zeer accuraat en flexibel. De duty cycle en de tijdssequenties kunnen vrij eenvoudig aangepast worden.

In dit experiment zijn we geïnteresseerd in de winst en niet zozeer in absolute vermogens. Daarom gaan we enkel relatieve metingen doen en deze met elkaar vergelijken. Het is daarom belangrijk dat de LED's eenzelfde optische weglengte hebben tot de detector om ze met elkaar te kunnen vergelijken.

Er werden twee reeksen metingen gedaan, namelijk met een 50% en 33% duty cycle bij een puls-frequentie van 100 Hz. Aan deze frequentie was er helemaal geen flikkering meer waar te nemen. We gaan hier de metingen met 50% duty cycle bespreken die met 33% duty cycle, met 1750 mA pulsstroom, zijn analoog.

Eerst werden de PBS en de FLC verwijderd uit de opstelling (figuur 3.12) en de optische vermogens opgemeten van de continu aangestuurde LED (700 mA) en de gepulste LED (50% DC, 1260 mA). Dit werd gedaan voor beide LED's. Uit deze resultaten werden de pulsefficiënties berekend. Vervolgens werd de PBS in de opstelling gebracht. Aangezien de optische weglengte hierdoor wijzigt (brekingsindex PBS > lucht), moet men de LED's op een grotere afstand zetten om deze metingen niet te bevoordelen. Dit afstandsverschil kan voor kleine invalshoeken berekend worden met formule 3.2 (zijde van de PBS d , brekingsindex n) en bedraagt hier 17 mm. De vorige metingen werden herhaald en de pulsefficiënties en PBS-verliezen berekend. Tenslotte werd ook de FLC opgenomen in de opstelling en synchroon met de LED's gepulst (± 5 V met 50% duty cycle en aan 100 Hz). De FLC is transparant voor de lichtbundel afkomstig van LED 2 en treedt op als half-golflengteplaat voor LED 1. De polarisator moet volgens de polarisatie van de bundel afkomstig van LED 2 gepositioneerd worden. De verhoogde helderheid werd opgemeten met de detector. We kunnen nu de totale winst (verhoging luminantie) en de FLC-verliezen berekenen. De schakeltijd van

de FLC is groter dan die van de LED's en dat geeft aanleiding tot bijkomend verlies. Om dit te voorkomen en dit extra verlies te berekenen, kunnen we de LED's met 33% en de FLC met 50% duty cycle pulsen en ervoor zorgen dat de pulsduur van de LED's mooi in het midden valt van de FLC-pulsen zodat de transitietijd geen rol meer speelt. Aangezien er 33% van de tijd geen licht aanwezig is, zal de winst lager liggen. De vorige metingen hebben we hiervoor herhaald en de efficiënties, verliezen en de netto winst berekend.

$$\Delta s = d \left(\frac{n-1}{n} \right) \quad (3.2)$$

Hoewel we geïnteresseerd zijn in de netto winst, is het ook interessant om de belangrijkste verliesposten te achterhalen en te onderzoeken waar en waarom deze optreden zodat we het systeem eventueel kunnen optimaliseren. Op basis van de hierboven beschreven metingen, hebben we enkele berekeningen gedaan. De pulsefficiëntie η_{pulse} is de verhouding tussen de gemiddelde lichtopbrengst van de gepulste LED ten opzichte van lichtopbrengst van de nominaal aangestuurde LED. Deze is onafhankelijk van de aanwezigheid van de PBS in de meetopstelling. De PBS-verliezen (loss_{PBS}) kunnen berekend worden door de lichtopbrengst van een continu aangestuurde LED met en zonder PBS met elkaar te vergelijken. Deze parameters hebben we voor elke LED afzonderlijk berekend aangezien de verliezen voor getransmitteerde en gereflecteerde bundels niet dezelfde zijn. Om de totale winst te berekenen, moeten we beide LED's in rekening brengen. De winst g_{total} is de verhouding tussen de gemiddelde flux van beide gepulste LED's samen (met PBS en FLC) en de gemiddelde flux van beide nominaal aangestuurde LED's (zonder PBS en FLC). De FLC-verliezen (loss_{FLC}) kunnen bepaald worden door de flux van de afwisselend gepulste LED's met en zonder FLC op te meten. Hiervoor moet de polarisator weggelaten worden. De η_{pulse} en loss_{PBS} zijn voor beide LED's afzonderlijk, en de g_{total} en loss_{FLC} tezamen, berekend. In tabel 3.2 worden deze formules weergegeven.

100 Hoofdstuk 3: Intelligente methodes voor luminantieverhoging

$$\eta_{\text{pulse}} = \frac{\text{average flux pulsed LED}}{\text{flux continuous LED}}$$

$$\text{loss}_{\text{PBS}} = 1 - \frac{\text{flux continuous LED with PBS}}{\text{flux continuous LED without PBS}}$$

$$g_{\text{total}} = \frac{\text{average flux pulsed LED's together with PBS/FLC}}{(1/2) \times (\text{flux continuous LED 1} + \text{flux continuous LED 2}) \text{ without PBS/FLC}}$$

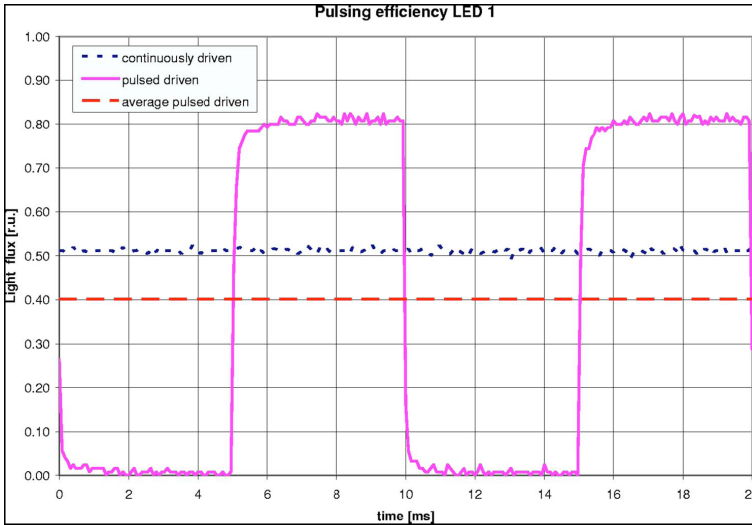
$$\text{loss}_{\text{FLC}} = 1 - \frac{\text{average flux pulsed LEDs together with PBS/FLC}}{\text{average flux pulsed LEDs together with PBS, without FLC}}$$

Tabel 3.2: Samenvatting formules efficiëntie, winst en verliezen

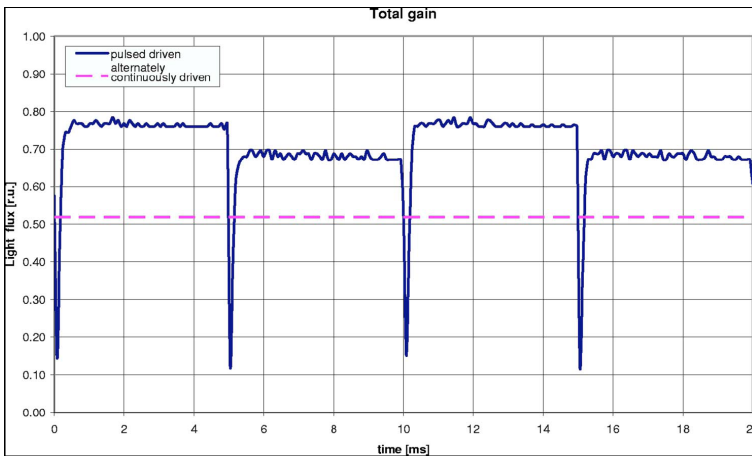
| | η_{pulse} [%] | loss_{PBS} [%] | g_{total} [%] | loss_{FLC} [%] |
|-------|---------------------------|--------------------------------|------------------------|--------------------------------|
| LED 1 | 79.8 | 13.5 | 135.8 | 7.8 |
| LED 2 | 79.4 | 1.5 | | |

Tabel 3.3: Resultaten voor 50% duty cycle (Luxeon LED)

De resultaten worden samengevat in tabel 3.3. Als gevolg van de niet-ideale karakteristiek van de LED's (zie paragraaf 2.3), zal de pulsefficiëntie niet 100% zijn. Hierdoor verliezen we een deel (20% per LED) van het licht, wat te zien is in figuur 3.13. Hierin is de flux van een nominaal aangestuurde LED, en de ogenblikkelijke en uitgemiddelde flux van een gepulste LED uitgezet. Het PBS-verlies zal door zijn asymmetrische werking niet zelfde zijn voor beide polarisaties, waardoor de bijdrage van LED 2 hoger zal zijn. Dit zal leiden tot een niet constante, fluctuerende lichtflux, (zie figuur 3.14), wat eventueel flikkering kan doen optreden. Dit kan verholpen worden door LED 2 te pulsen met een lagere stroom of duty cycle. Een andere verliespost is de FLC. In deze opstelling hebben we een verlies van bijna 8% opgemeten. We hebben geen rekening gehouden met de verliezen van de polarisator aangezien deze in ieder geval aanwezig is in een LCOS systeem. Rekening houdend met al deze verliezen, hebben we een netto winst van 36% gerealiseerd binnen eenzelfde étendue, dat wil zeggen dat de helderheid met 36% is toegenomen. In figuur 3.14 is de lichtflux van zowel het gepulste systeem als het nominaal aangestuurde systeem uitgezet in functie van de tijd. We merken op dat de lichtopbrengst niet uniform is ten gevolge van het asymmetrische PBS-verlies.



Figuur 3.13: Lichtopbrengst van nominale en gepulste LED



Figuur 3.14: Lichtopbrengst van gepulst systeem ten opzichte van nominaal aangestuurd systeem

Hoewel de FLC een zeer snel vloeibaar-kristaltype is, zijn de schakeltijden niet oneindig klein. Om de bijdrage van deze eindige schakeltijden tot het FLC-verlies te kunnen berekenen, hebben we bijkomende metingen gedaan waarbij de LED's met 33% en de FLC met 50% duty cycle gepulst worden. De LED-pulsen (1750 mA) vallen zoals het hoort in het midden van de FLC-pulsen. De resultaten van deze reeks metingen zijn weergegeven in tabel 3.4.

102 Hoofdstuk 3: Intelligente methodes voor luminantieverhoging

De pulsefficiënties zijn hier lager; het verlies t.g.v. het pulsen bedraagt bijna 35% per LED. De reden is weer dezelfde maar het effect is hier meer uitgesproken omwille van de hogere piekstromen. Het PBS-verlies is logischerwijs terug hetzelfde en het FLC-verlies is lager. De totale winst is gehalveerd aangezien 1/3 van de tijd niet benut wordt. In dit experiment zijn we vooral geïnteresseerd in het FLC-verlies aangezien we de problematiek van schakeltijden willen bestuderen. Dit verlies bedraagt hier 5.3%, dit is 2.5% minder dan in het vorige geval en kan enkel te maken hebben met niet-ogenblikkelijke schakeltijden. Dit kan gedeeltelijk verholpen worden door de FLC te pulsen met een aangepaste golfvorm waarbij het signaal kortstondig hogere spanningen kan aannemen [12].

| | $\eta_{\text{pulse}} [\%]$ | $\text{loss}_{\text{PBS}} [\%]$ | $g_{\text{total}} [\%]$ | $\text{loss}_{\text{FLC}} [\%]$ |
|-------|----------------------------|---------------------------------|-------------------------|---------------------------------|
| LED 1 | 66.5 | 13.5 | 117.7 | 5.3 |
| LED 2 | 67.8 | 1.5 | | |

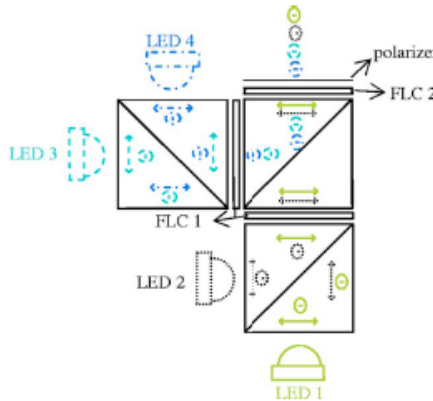
Tabel 3.4: Resultaten voor 33% duty cycle

Het verschil in verlies, namelijk 2.5%, gaan we hier eveneens numeriek berekenen. Hiervoor hebben we de stijg- en daaltijden opgemeten van de LED's, FLC en detector. LED 1 en 2 hebben stijgtijden van respectievelijk 120 μs en 110 μs . De daaltijden zijn verwaarloosbaar. De stijg/daaltijden van de detector zijn eveneens verwaarloosbaar. De FLC heeft een totale stijg/daaltijd (elektronisch + optisch) van 260/210 μs . Bij 33% duty cycle heeft de FLC traagheid geen belang. Het verschil in verlies wordt berekend met formule 3.3. We zien dat de experimenteel opgemeten waarde zeer goed overeenkomt met de berekende waarde.

$$\begin{aligned}
 \Delta \text{loss}_{\text{FLC}} &= \frac{(FLC_{\text{rise}} - LED1_{\text{rise}}) + (FLC_{\text{fall}} - LED2_{\text{rise}})}{\text{totale pulsduur}} \cdot 100\% \\
 &= \frac{(260 \mu\text{s} - 120 \mu\text{s}) + (210 \mu\text{s} - 110 \mu\text{s})}{(10 \text{ms} - 120 \mu\text{s} - 110 \mu\text{s})} \cdot 100\% = 2.5\% \quad (3.3)
 \end{aligned}$$

Dit systeem kan uitgebreid worden om de winst verder te verhogen. Een mogelijke uitbreiding wordt voorgesteld in figuur 3.15, waarbij de LED's gepulst worden aan 25% duty cycle. De pulsefficiëntie is hier lager (zie figuur 3.9), maar doordat er vier LED's gecombineerd worden, zal de totale winst toch nog hoger zijn. Er zullen bijkomende verliezen optreden; er is

namelijk één PBS en één FLC extra bijgekomen per optisch pad. De FLC's in de eerste etappe moeten dubbel zo snel kunnen schakelen als de FLC in de tweede fase. Bij eenzelfde schakelsnelheid zal er in de eerste-fase-FLC meer verlies optreden.



Figuur 3.15: Systeem met vier altemerende gepulste LED's (25%)

Met de volgende berekening kunnen we de winst schatten op 69% (bijna dubbel zoveel als voorheen), ten koste van een grotere, meer ingewikkelde en duurdere architectuur. De pulsefficiëntie bij 25% duty cycle kan geschat worden op 60%. De verliezen van de eerste-fase-FLC schatten we op 10.5% en die van de tweede-fase-FLC 8%. We kunnen drie keer hetzelfde type PBS gebruiken als in onze opstelling met verlies van 13.5% voor de p-polarisatie en 1.5% voor de s-polarisatie. De winst wordt dan berekend met formule 3.4.

$$g_{total} = \sum_i g_i = \sum_i [(\eta_{pulse})(loss_{PBS1})(loss_{FLC1})(loss_{PBS2})(loss_{FLC2})]_i = 1.69 \quad (3.4)$$

104Hoofdstuk 3: Intelligente methodes voor luminantieverhoging

2.4 Besluiten

Op LED gebaseerde projectoren hebben vele voordelen vergeleken met klassieke systemen, maar LED's hebben een veel lagere helderheid, d.i. lichtopbrengst per étendue. In de vorige paragrafen hebben we aangetoond dat dit probleem deels kan opgelost worden door meerdere LED's afwisselend te pulsen en de piekfluxen te combineren in de tijd. We hebben twee systemen uitgewerkt waarbij we telkens twee LED's afwisselend pulsen.

In het eerste systeem worden de orthogonaal gepositioneerde LED's gecombineerd met een ronddraaiend, transparant/spiegelend gesegmenteerde glasplaat in het bissectricevlak dat aangedreven wordt door een DC-motor. Hiermee hebben we een winstpercentage opgemeten van bijna 50% en dit systeem kan gebruikt worden bij eender welk type lichtklep. Het grote nadeel is dat er bewegende onderdelen in voorkomen, wat eerder ongewenst is in een projectiesysteem.

Bij het tweede systeem worden de gepulste LED's gecombineerd met een PBS en de uitgangsflux wordt op eenzelfde polarisatie gebracht door middel van een schakelbare halfgolflengteplaat dat op het ritme van de LED's gepulst wordt. Hiermee hebben we een winst van 36% gerealiseerd. Dit systeem is echter enkel zinvol voor op polarisatie gebaseerde lichtkleppen en kan bijvoorbeeld bij DMD's niet gebruikt worden. Het grote voordeel in vergelijking met het eerste systeem, is dat er hier geen bewegende onderdelen in voorkomen.

3. Levensduurmeting van gepulste LED's

Eén van de belangrijkste redenen waarom men LED's wil gebruiken in projectoren, is dat ze een zeer lange levensduur hebben. Daar waar klassieke booglampen een levensduur hebben van circa 5 kh, kunnen LED's tot 100 kh meegaan [8][9]. Gewoonlijk is er voor een consumer product een levensduur van minstens 25kh vereist en LED's voldoen dus ruim aan deze voorwaarde. Levensduur van een LED wordt gedefinieerd als de duur waarna de lichtflux gehalveerd is. 100 kh is de waarde die opgegeven wordt in de datasheets bij ideale omstandigheden (nominale stroom, voldoende afkoeling, etc). Aangezien HBLED's nog vrij nieuw zijn, zullen deze metingen eerder een interpolatie zijn die geldt bij nominale aansturing met voldoende koeling.

In paragraaf twee hebben we systemen bestudeerd die de mogelijkheid bieden om de helderheid te verhogen door LED's te pulsen. Ook als we trachten om het gemiddelde verbruik bij het pulsen constant te houden, zal er een zeker effect zijn op het verloop van de levensduur. Vermoedelijk zal hij afnemen, maar de vraag is "in welke mate?" Als deze zakt tot 50 kh (dus halveert), is dat nog steeds veel beter dan bij de UHP-lampen. In deze paragraaf gaan we het verloop van de levensduur van gepulste LED's opmeten en bestuderen. Gezien de beperking van middelen, hebben we slechts één testsample gebruikt, wat dus zeker geen statistische waarde zal hebben. Toch zullen we een eerste benaderend verloop kunnen waarnemen. Het zou interessant geweest zijn indien we deze metingen konden vergelijken met de metingen van de fabrikant, maar de meetmethodes zijn te verschillend om ze te kunnen vergelijken. Zij geven de degradatie bij een constante stroom en een bepaalde junctietemperatuur weer. Wij hebben ervoor gezorgd dat de LED's voldoende gekoeld worden maar hebben de junctietemperatuur niet gemonitord. Bovendien zijn we geïnteresseerd in versnelde degradatie onder gepulst regime met hogere piekstromen. Vergelijkbare metingen werden niet gepubliceerd door de fabrikant.

3.1 Testopstelling

Om het degradatieverloop van de gepulste LED en nominaal aangestuurde LED te kunnen opmeten, hebben we een testopstelling gemaakt waarbij we drie Luxeon III (blauw) LED's gebruiken. De eerste LED is een referentie-LED die enkel nominaal (700 mA) aangestuurd wordt wanneer er een meting op gebeurt en de rest van de tijd niet brandt. Dit doen we om te voorkomen dat ze degradeert in de tijd. De tweede LED is een DC-aangestuurde LED (eveneens 700 mA) die continu brandt en waarvan we op

106Hoofdstuk 3: Intelligente methodes voor luminantieverhoging

geregelde tijdstippen de lichtflux opmeten. De derde LED is de gepulste LED die continu aangestuurd wordt met een piekstroom van 2 A, frequentie van 100 Hz en duty cycle van 50%. Hiervan meten we ook op geregelde tijdstippen de lichtflux.

Deze drie LED's worden op een wand van een gesloten aluminium metalen doos vast gemonteerd, zodat ze de hele tijd op dezelfde plaats blijven staan. Dit is belangrijk aangezien we relatieve metingen gaan doen en we dus anders geen vergelijking kunnen maken tussen metingen op verschillende tijdstippen. De gesloten doos is nodig om de opstelling af te schermen van externe optische signalen zoals omgevingslicht. Bovendien moeten de LED's gekoeld worden om een correcte werking (lichtopbrengst en levensduur) te kunnen garanderen. Een slecht thermisch onderhoud zorgt voor een verhoogde junctietemperatuur. Dit zal leiden tot degradatie van de lichtopbrengst en de levensduur van de LED. Een stuk metaal als koelvin en thermisch geleidende pasta tussen de LED en de koelvin zorgen ervoor dat de overvloedige warmte afgevoerd wordt. Aangezien aluminium zeer goed warmte geleidt, zal de doos dus eveneens dienen als koelplaat.

De detectie van het licht gebeurt door middel van een fotodiode die recht tegenover de LED's vast gemonteerd is op de wand van de doos. Deze fotodiode genereert een fotostroom, evenredig met het invallend licht, die dan met een transimpedantieverstrekker omgezet wordt naar een spanning die eveneens rechtevenredig is met het invallend optisch vermogen. De fotodiode werkt in zero-biasmode zodat we geen last ondervinden van donkerstroom. De detector zal niet dezelfde hoeveelheid licht opvangen van elke LED, maar per LED zal de opgevangen straling steeds dezelfde zijn, zodat we een verloop in de tijd kunnen opmeten. Hiervoor moeten de LED's en de fotodiode onderling een vaste positie hebben.

Vooraleer we de test opstarten, doen we de initiële metingen waarbij we slechts één LED aansturen en de lichtflux opmeten met de detectieschakeling. Dit doen we voor de referentie, DC- en de gepulste LED. We doen eveneens een donkere meting (alle LED's uit). Hoewel er geen donkerstroom aanwezig is, kunnen we toch nog uitgangsspanning detecteren die afkomstig is van de offset aan de ingang van de opamp en (in mindere mate) van het omgevingslicht dat toch nog de afgesloten doos kan binnendringen. We meten eveneens het elektrisch vermogen dat verbruikt wordt door de LED's. Vervolgens laten we de DC- en de gepulste LED zo lang mogelijk branden en herhalen geregeld deze metingen. Het aantal uren dat de LED brandde bij het opmeten van de flux wordt eveneens

bijgehouden. We vergelijken bij iedere meting de lichtintensiteit van de twee andere LED's met deze van de referentie-LED.

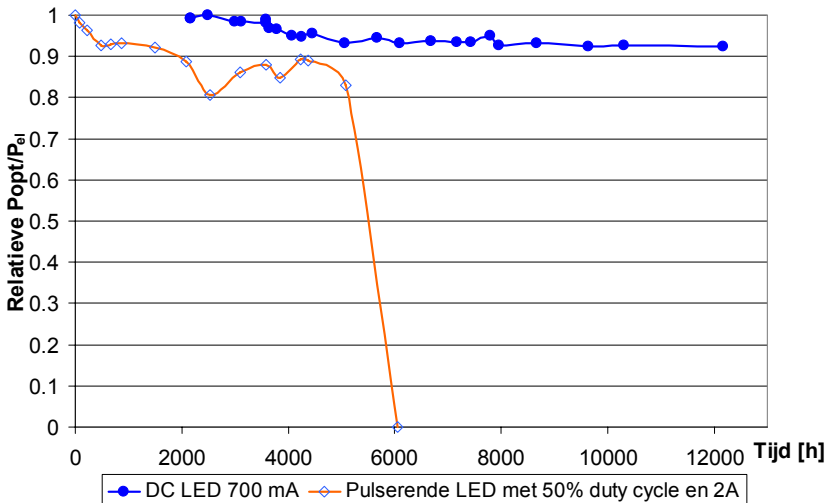
3.2 Resultaten

Deze levensduurtest is gedurende 12kh opgevolgd. De meetresultaten worden eerst verwerkt vooraleer we ze uitzetten in een grafiek. De offsetloze spanningen (lichtmeting - donkermeting) van DC- en gepulste LED worden gedeeld door de offsetloze spanning van de referentie-LED. Op die manier krijgen we twee genormaliseerde curven waarin de uitwendige factoren zoals omgevingstemperatuur weggewerkt zijn. Bij elke meting trachten we de stuurstroom dezelfde te houden. Er kunnen echter variaties optreden in het verbruikte vermogen, wat ook de lichtoutput zal beïnvloeden. Daarom delen we de genormaliseerde curven telkens door het verbruikte vermogen. De uiteindelijke resultaten hebben we genormaliseerd naar 1 en uitgezet in een grafiek die getoond wordt in figuur 3.16.

We zien dat de nominaal aangestuurde LED na 12 kh nog 92.5% van zijn initiële lichtoutput levert. Als deze trend zich lineair voortzet, zal de initiële lichtflux halveren (definitie levensduur) na 80 kh. Dit komt in de buurt van wat er in de datasheets opgegeven wordt en we kunnen dus stellen dat we de lange levensduur geverifieerd hebben. Dit is echter een test op één sample en heeft dus geen statistische waarde.

De degradatie van de gepulste LED verloopt anders. Na 5.1 kh was de intensiteit al gezakt tot 83% van de beginwaarde. Doen we dezelfde linearisatie als bij de DC-LED, dan bekomen we een levensduur (50%) van 15 kh. We zien dat de levensduur drastisch verminderd is. We moeten er wel bij zeggen dat het gemiddeld vermogen hoger is dan dat van de DC-LED. Indien we verder kijken, zien we dat de situatie nog veel erger is; na 6 kh is de LED namelijk volledig kapot gegaan. De reden hiervoor is niet echt duidelijk. Bij nadere microscopische studie van de LED zagen we dat ze losgekomen is van de chip en gebarsten is. Na het loskomen was het thermische contact waarschijnlijk grotendeels verbroken waardoor de overtollige warmte niet kon afgevoerd worden. Hierdoor is de junctietemperatuur buiten de toegelaten waarden gekomen en de LED kapotgegaan.

108 Hoofdstuk 3: Intelligente methodes voor luminantieverhoging



Figuur 3.16: Relatieve lichtoutput in functie van de tijd

Uit dit experiment kunnen we weer niet veel besluiten aangezien we maar één sample uitgemeten hebben. Beschouwen we het fatale einde van de LED als ongedaan en bekijken we enkel de degradatie, dan zien we na linearisatie dat de levensduur van de gepulste LED 15 kh is. Dit is wel veel hoger als die van een UHP-lamp, maar niet voldoende voor de levensduur van een consumer product. Zoals eerder vermeld kunnen we uit dit summiere experiment moeilijk statistische besluiten formuleren.

4. Colorimetrische verschijnselen onder gestreste toestand

We hebben al het effect van het pulsen op de levensduur opgemeten. Naast vroegtijdige degradatie, zal het pulsen (of het stressen) bijkomende consequenties hebben. Zo zal het spectrum van de LED verschuiven. Dit kan aanleiding geven tot het verlopen van de kleurbalans in een projector. Deze aspecten en andere colorimetrische verschijnselen gaan we bestuderen in deze paragraaf.

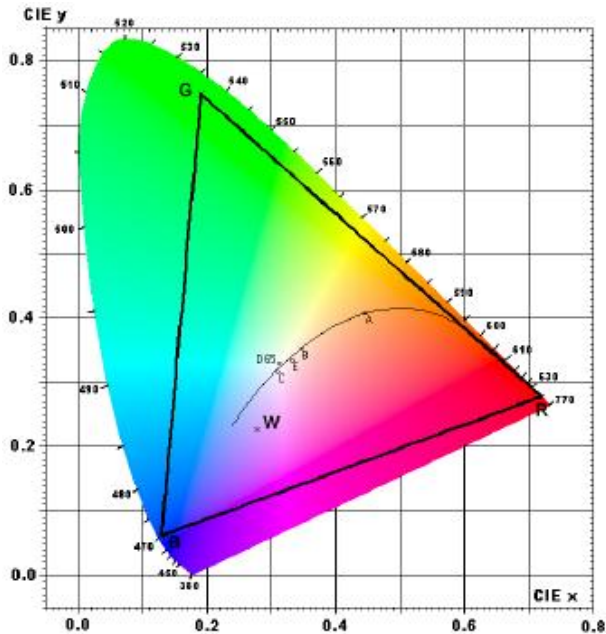
De lichtflux is meestal evenredig met de stroom die door de LED gaat. Vanaf een bepaalde stroomwaarde zal deze satureren en zelfs dalen. Willen we de LED's pulsen met piekstromen, dan mogen deze niet groter zijn dan deze saturatiestroom. Deze waarde is sterk afhankelijk van de duty cycle. Daarbij gaan we eveneens de waarden bepalen voor verschillende (interessante) duty cycles en gaan we de flux-stroom-karakteristieken opmeten.

Ten slotte gaan we ook de wall-plug-efficiënties opmeten en het effect van epoxy hemisfeer op de uitkoppeling van Luxeon LED's nagaan.

4.1 Kleurverschuivingen gepulste LED's

Elke lichtbron heeft een bepaald spectrum dat de intensiteit en de kleureigenschappen bepaalt. Zo kan een bron voorgesteld worden door een punt op het CIE-1931-kleurendiagram in overeenstemming met hun kleurcoördinaten die op basis van het spectrum berekend worden. De LED's hebben een smalbandig spectrum waardoor ze meer tegen de gesatureerde bronnen (lasers) op het CIE-1931-kleurendiagram liggen. Door de drie basiskleuren in een projector te mengen, kan men kleurcombinaties verkrijgen. Op basis van de intensiteiten en kleurcoördinaten van (R, G, B)-LED's kan men de gewenste witbalans verkrijgen door de intensiteiten onderling juist af te regelen. De projector kan in principe elke kleur weergeven die binnen in de driehoek ligt die gevormd wordt door de coördinaten van de drie basiskleuren. Dit wordt voorgesteld in figuur 3.17.

110 Hoofdstuk 3: Intelligente methodes voor luminantieverhoging



Figuur 3.17: CIE-1931-kleurendiagram met de gevormde kleurendriehoek

4.1.1 Het experiment

Door de LED's te pulsen treden er wijzigingen op in de spectrale eigenschappen waardoor de kleurcoördinaten kunnen veranderen en de kleurbalans kan dus verlopen. Deze wijzigingen kunnen van elektrische of thermische aard zijn en zijn afhankelijk van het type (kleur) LED. Om dit na te gaan, hebben we een experiment opgestart waarbij we drie Luxeon III LED's (rood, groen, blauw) constant pulsen over een lange periode met een duty cycle van 33%, frequentie 200 Hz en piekstroom van 3 A of meer. Op regelmatige tijdstippen worden verscheidene LED-parameters opgemeten. Deze zijn de flux, het spectrum, Full Width Half Maximum (FWHM) (spectrumbreedte), kleurcoördinaten (x,y), dominante golflengte (λ_D), piekgolflengte (λ_p), etc. Ze worden zowel onder gepulste (gestresste) toestand als onder nominaal aangestuurde toestand (1 A) opgemeten en het verloop van deze parameters gemonitord in functie van de tijd.

We hebben een rode, een groene en een blauwe LED gepulst met respectievelijk 3.2 A, 3.3 A en 3 A piekstromen. Na 750 h konden we al een bepaalde tendens zien. De waarnemingen voor de nominale metingen kunnen als volgt samengevat worden:

4. Colorimetrische verschijnselen onder gestreste toestand 111

- er treedt een blijvende geringe (ca. 1 nm na 750 h) verschuiving van het spectrum naar hogere golflengten voor de drie kleuren
- de verschuiving is groter bij grotere pulsstromen
- de dominante golflengte en de kleurcoördinaten wijzigen lichtjes
- toename van FWHM
- de flux neemt af met de tijd

We zien dat de blijvende verschuivingen beperkt zijn en het effect op de kleurbalans zal weinig significant zijn. Deze verschuivingen werden opgemeten met een spectrometer met 0.4 nm resolutie.

De waarnemingen voor de gepulste meting zijn eveneens interessant. Ten opzichte van de nominale aansturing heeft de gepulste toestand een grotere ogenblikkelijke kleurverschuiving (spectrum) die weliswaar wegvalt als we terug nominaal aansturen. De rode LED schuift op naar een hogere golflengte en de groene en de blauwe LED naar een lagere golflengte. Hierdoor verschuift de dominante golflengte en wijzigen de kleurcoördinaten. De FWHM neemt ook toe, maar deze verbreding valt eveneens weg als we terug nominaal aansturen. We zien wel dat er een verband is tussen de aanstuurstroom (en ook het vermogen) en de verschuiving van de spectra en de verbreding van FWHM. Hoe hoger we de LED's pulsen, hoe breder het spectrum wordt. In tabel 3.5 hebben we de verhoging van de FWHM en het opschuiven van de golflengte voor de drie kleuren samengevat:

| | $\Delta\lambda$ [nm] | verbreding FWHM [nm] |
|-------|----------------------|----------------------|
| rood | 1 | +3 (+16%) |
| groen | -5 | +4.3 (+11.4%) |
| blauw | -2.4 | +3 (+12%) |

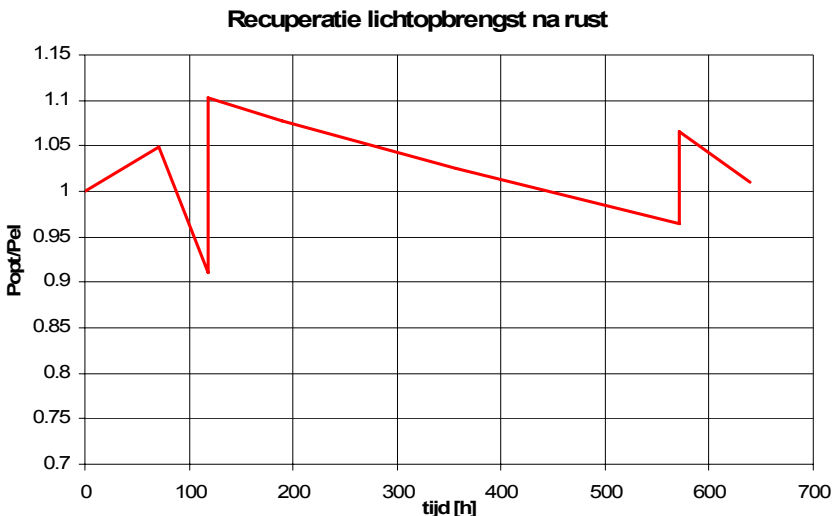
Tabel 3.5: Resultaten colorimetrische verschuivingen t.g.v. het overpulsen

De wijzigingen bij gepulste metingen zijn ogenblikkelijk en van elektrische aard. Door de stroom weg te nemen of te verminderen wordt het effect ook teniet gedaan of verminderd. De geringe verschuivingen die we waargenomen hebben bij nominale metingen zijn echter van thermische aard en zijn blijvend. Dit is een soort verouderingsverschijnsel dat permanente schade berokkent.

112 Hoofdstuk 3: Intelligente methodes voor luminantieverhoging

We merken dus twee effecten op: een blijvende thermische effect en een ogenblikkelijke elektrisch effect ten gevolge van het overpulsen. Het blijvende effect is zeer gering (qua verschijving) en zal de kleurbalans weinig beïnvloeden. De versnelde veroudering is echter een feit. Het ogenblikkelijke elektrisch effect is belangrijker. De verbreding van FWHM bedraagt immers 15%. Daarom moeten de kleurcoördinaten in gepulste toestand opgemeten worden om de kleurbalans af te regelen. Dit moet men doen om te voorkomen dat de kleurbalans onder gepulste toestand wegdriift.

Verder hebben we hier nog een bijkomend effect waargenomen. Als de LED een tijdje niet brandt, recupereert ze en gaan de parameters terug naar hun initiële toestand. De lichtoutput verhoogt, de FWHM wordt kleiner en het spectrum verschuift terug naar lagere golflengte. Dit effect is ook duidelijk zichtbaar in de volgende grafiek (figuur 3.18), waar we de lichtopbrengst uitzetten in functie van aantal gebrande uren. De discontinuïteiten zijn de momenten dat de LED een tijdje niet aangestuurd is geweest. We zien dat de lichtopbrengst van de LED na 120 h al 8% gezakt was. Na een tijdje rust stijgt de flux terug. Dit wordt nogmaals herhaald na 570 h. De minimale tijdsduur van rust kennen we niet omdat we dit effect secundair ontdekt hebben bij het verwerken van de resultaten. De metingen waren stilgelegd door een stroompanne en we hervatten ze na een bepaalde tijd (2 dagen). Evengoed was er misschien recuperatie opgetreden na tientallen minuten. Achteraf hebben we dit niet meer nagegaan.



Figuur 3.18: Recuperatie effect na een tijdje inactiviteit LED

4.1.2 Besluit

Met de resultaten van deze summiere testen kunnen we al een tendens vaststellen. Om eensluidende besluiten te kunnen formuleren, zouden we deze testen veel langer moeten laten lopen en liefst met honderden LED's van elke kleur.

Bij het pulsen van LED's hebben we een grote ogenblikkelijk, elektrisch en een geringe blijvend, thermisch effect. Het ogenblikkelijke effect is de verschuiving van het spectrum naar een lagere golflengte voor de groene en blauwe LED en naar hogere voor de rode LED. Deze verschuiving is evenredig met de pulsstroom. De FWHM wordt ook verbreed evenredig met de pulsstroom (en het vermogen). Aangezien het spectrum verschuift, zal ook de dominante golflengte (kleur) en de coördinaten mee opschuiven. Daarom moeten de kleurcoördinaten opgemeten worden onder gepulste toestand en moet men met deze waarden de kleurbalans afregelen. Als we terug overgaan van gepulste naar nominale aansturing, zien we dat dit effect wegvalt, maar er is wel een ander blijvend effect opgetreden, namelijk het optische vermogen dat verlaagt met de tijd. Deze verlaging treedt veel sneller op dan indien we LED's niet zouden pulsen, of de piekstroom beperken. Verder is er ook een blijvende, maar eerder geringe verschuiving naar hogere golflengte en zal de FWHM ook permanent vergroten (ook gering). Dit effect is groter voor een rode LED dan voor blauw en groen.

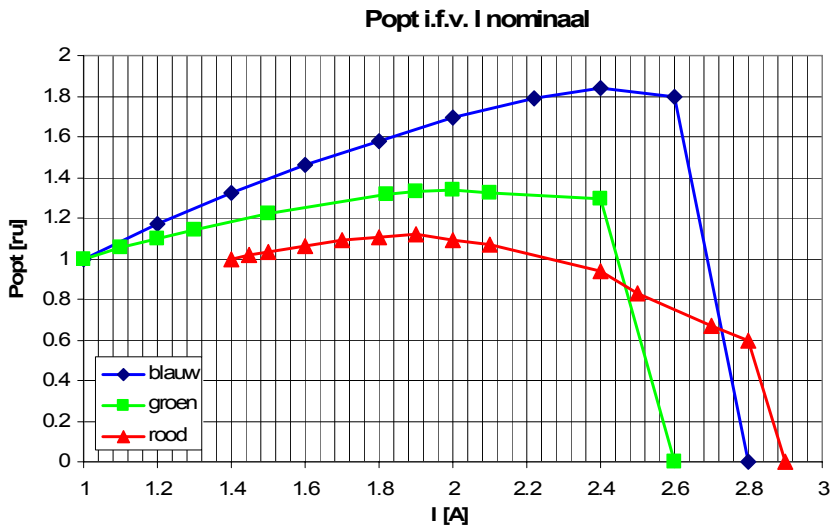
Er is ook nog een recuperatie effect op langere termijn. Als men de LED's een tijdje laat rusten, wordt ook het blijvende effect van fluxverlaging, FWHM-verbreding en golflengteverschuiving, terug hersteld. Deze recuperatie is afhankelijk van LED tot LED en hangt waarschijnlijk ook af van de hoeveelheid overstuurstroom. Zo zien we bijvoorbeeld bij de rode LED, die we minder dan 3x oversturen, een volledige recuperatie (P_{opt} , FWHM, etc.). Daarentegen is het effect voor de blauwe LED, die we 4x overstuurden, eerder gering.

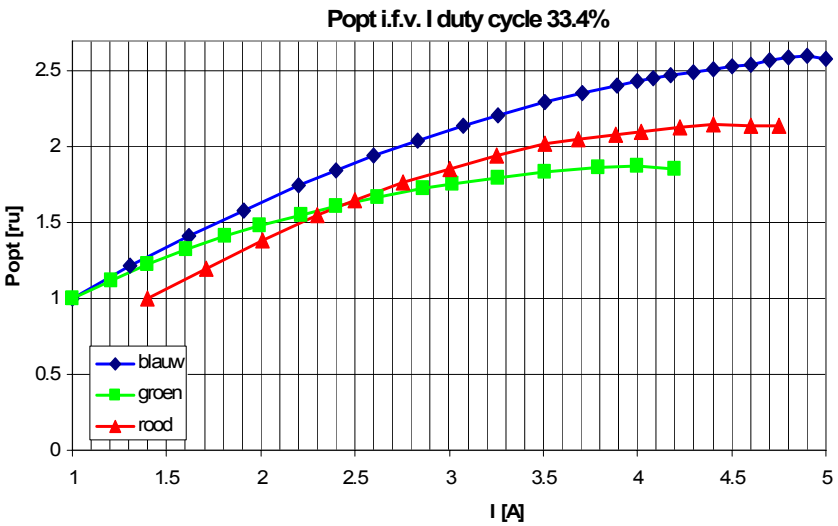
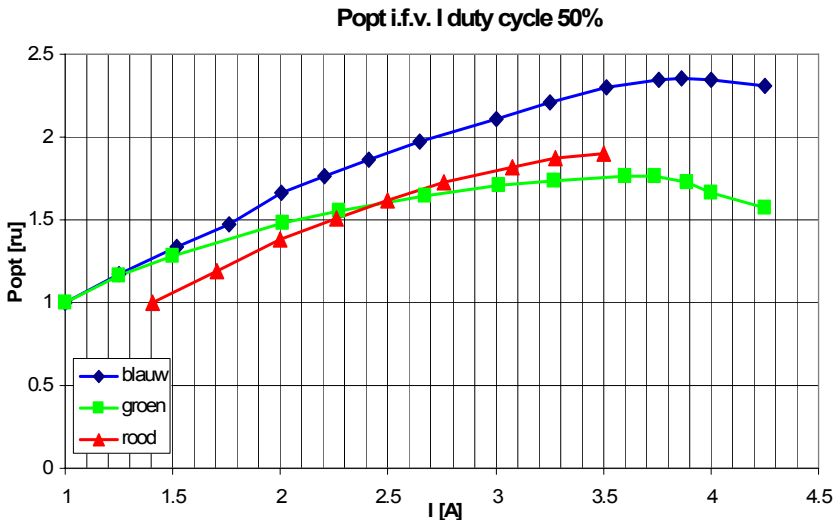
4.2 Saturatiestromen bij verschillende duty cycles

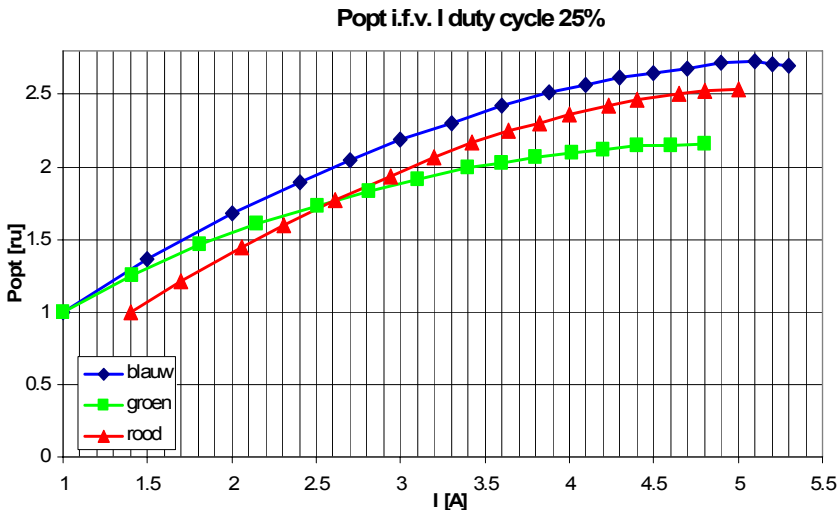
De lichtopbrengst van een LED stijgt evenredig met de stroom die erdoor vloeit tot een bepaald kantelpunt waarna de flux zelfs begint te dalen. Dit punt noemen we de saturatiestroom. Dit komt door een overmaat aan elektron-gat-paren die door interne botsingen niet-radiatief recombineren en dus enkel warmte produceren. Het heeft dan ook geen zin om LED's aan te sturen met stromen boven deze saturatiewaarde aangezien dit niet meer licht

114 Hoofdstuk 3: Intelligente methodes voor luminantieverhoging

gaat genereren en door het thermisch effect de LED alleen maar gaat degraderen. De nominale aanstroom opgegeven in de datasheets ligt vanzelfsprekend onder deze waarde en men mag in principe dus hoger gaan in stroom ten koste van levensduur. Voor gepulste LED's moet men er ook zeker van zijn dat de pulsstroom onder de saturatiegrens ligt. Deze laatste is sterk afhankelijk van de duty cycle. In deze paragraaf gaan we de resultaten bespreken van experimenten die we gedaan hebben om deze saturatiestroom te bepalen bij verschillende duty cycles. Hiervoor hebben we terug een rode, een groene en een blauwe Luxeon III LED gebruikt. We hebben de fluxstroom-karakteristiek opgemeten voor verschillende duty cycles (100%, 50%, 33,4% en 25%) bij een frequentie van 200 Hz. Voor DC-aangestuurde LED's zijn we verdergegaan dan de saturatiestroom om de catastrofale stroom, bij dewelke de LED het begeeft, te bepalen. De opgemeten karakteristieken worden weergegeven in figuur 3.19 voor de vier gevallen. Zoals we voorspelden, zien we dat het optische vermogen na een bepaalde stroom niet meer toeneemt en zelfs begint af te nemen. Blijven we de stroom verder verhogen, dan gaat bij een bepaalde stroom de LED kapot. Bij nadere studie van de gesneuvelde LED blijkt dat het de bondwire is die de hoge stromen niet aankon en niet de chip zelf. De bondwire fungeert dus als zekering.







Figuur 3.19: Flux-stroom-karakteristiek bij verschillende duty cycles

De nominale stuurstromen voor rode, groene en blauwe LED's zijn respectievelijk 1.4 A, 1 A en 1 A. In de niet gepulste of DC-mode zien we dat de optische piekvermogens bereikt worden bij de saturatiestromen 1.9 A, 2 A en 2.4 A (R, G, B) en deze vermogens 1.12, 1.34 en 1.84 keer hoger zijn dan bij de nominale stromen. Het verbruikte elektrisch vermogen is echter 1.5, 2.4 en 3.0 keer groter. Hieruit kunnen we afleiden dat de LED bij hogere stromen minder efficiënt werkt en ook sneller zal degraderen. De bondwires sneuvelen bij 2.9 A, 2.6 A en 2.8 A (I_{cat}) voor (R, G, B) LED's. Dit is boven de saturatiestroom. Het punt waarbij P_{opt} maximaal wordt is niet het meest vermogensefficiënte punt, maar levert wel de meeste lichtopbrengst.

Dezelfde experimenten werden herhaald voor de gepulste LED's. De stromen in figuur 3.19 zijn de ogenblikkelijke piekwaarden en beginnen vanaf de nominale aanstuurstroom. Bij 50% duty cycle bekomen we als saturatiestromen (voor R, G, B) 3.5 A, 3.6 A en 3.86 A. Bij deze stromen zijn de optische vermogens 1.9, 1.76 en 2.35 keer groter en verbruiken hiervoor 4, 5.4 en 5.7 keer meer elektrisch vermogen. De piekstromen bij dewelke het gemiddeld verbruikte vermogen overeenkomt met het vermogen van nominaal aangestuurde DC-LED wordt I_{pnom} genoemd en bedraagt respectievelijk 2.21 A, 1.75 A en 1.70 A voor R, G, B. $I_{pnom} < I_{sat}$, wat betekent dat de piekstromen die we gebruikt hebben in paragraaf 2.3 niet in het saturatiegebied liggen.

4. Colorimetrische verschijnselen onder gestreste toestand 117

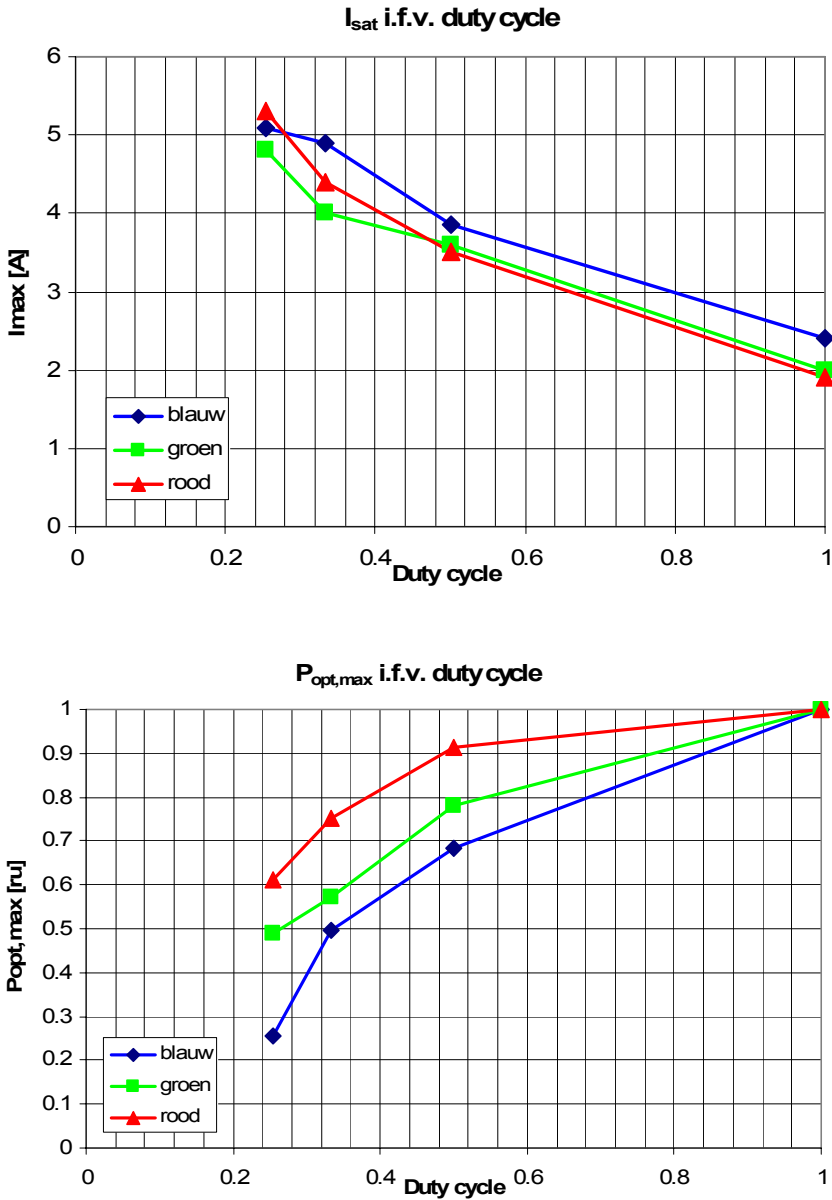
Bij 33.4% duty cycle bekomen we als saturatiestromen voor (R, G, B) 4.4 A, 4 A en 4.9 A. Hierbij zijn de optische vermogens 2.15, 1.88 en 2.6 keer groter en verbruiken 5.7, 6.4 en 8 keer meer elektrisch vermogen. De I_{pnom} zijn respectievelijk 3 A, 2.22 A en 2.25 A en liggen dus ver onder I_{sat} .

Voor 25% duty cycle tenslotte zijn de saturatiestromen voor (B,G,R) 5.1 A, 4.8 A en 5.3 A. Hierbij zijn de optische vermogens 2.73, 2.16 en 2.55 keer groter en verbruiken 8.4, 8.5 en 7.9 keer meer elektrisch vermogen. De I_{pnom} zijn respectievelijk 2.83 A, 2.73 A en 3.57 A en liggen alweer ver onder I_{sat} . Al deze resultaten hebben we samengevat in tabel 3.6.

| duty cycle | LED | I_{sat} [A] | $P_{\text{opt,max}}$ | $P_{\text{el,max}}$ | I_{pnom} [A] | I_{cat} [A] |
|------------|-------|----------------------|----------------------|---------------------|-----------------------|----------------------|
| 100 % | rood | 1.9 | 1.12x | 1.5x | | 2.9 |
| | groen | 2 | 1.34x | 2.4x | | 2.6 |
| | blauw | 2.4 | 1.84x | 3.0x | | 2.8 |
| 50 % | rood | 3.5 | 1.9x | 4x | 2.21 | |
| | groen | 3.6 | 1.76x | 5.4x | 1.75 | |
| | blauw | 3.86 | 2.35x | 5.7x | 1.7 | |
| 33.4 % | rood | 4.4 | 2.15x | 5.7x | 3 | |
| | groen | 4 | 1.88x | 6.4x | 2.22 | |
| | blauw | 4.9 | 2.6x | 8x | 2.25 | |
| 25 % | rood | 5.3 | 2.55x | 7.9x | 3.57 | |
| | groen | 4.8 | 2.16x | 8.5x | 2.73 | |
| | blauw | 5.1 | 2.73x | 8.4x | 2.83 | |

Tabel 3.6: Samenvatting resultaten saturatiestroom metingen

We zien dat de saturatiestromen ($I @ P_{\text{opt,max}}$) hoger worden en de elektrische efficiënties dalen bij dalende duty cycles. I_{sat} is steeds kleiner dan I_{cat} en groter dan I_{pnom} . Is de elektrische efficiëntie (lm/W) minder belangrijk, dan lijkt het interessant om te pulsen met saturatiestromen i.p.v. I_{pnom} . De LED zal hierdoor echter veel sneller degraderen. Bij dalende duty cycles zal eveneens de $P_{\text{opt,max}}$ dalen. Dit is te zien in figuur 3.20 samen met de saturatiestroom in functie van duty cycle.



Figuur 3.20: Saturatiestroom en optisch vermogen bij I_{sat} in functie van duty cycle

4.3 Wall-plug-efficiëntie en uitkoppeling bij Luxeon LED's

De LED is in feite een speciale soort diode waarin fotonen opgewekt worden in de pn-junctie bij stroomdoorgang. Deze fotonen worden ofwel uitgestraald als licht ofwel opgesloten in de chip en geabsorbeerd, waardoor ze warmte creëren en de junctie opwarmen. De LED zet dus elektrische energie om naar optische energie (licht). Dit gebeurt niet aan 100% efficiëntie aangezien niet alle fotonen uitgekoppeld worden. De verhouding tussen uitgestraald optisch vermogen en ingepompt elektrisch vermogen wordt de wall-plug-efficiëntie genoemd [10].

Met behulp van een spectrometer hebben we voor Luxeon III en OSTAR LED's het optisch vermogen opgemeten bij nominale aanstuurstroom. We hebben eveneens het toegevoerde elektrisch vermogen bijgehouden en zo de wall-plug-efficiënties berekend voor deze LED's. De resultaten zijn terug te vinden in tabel 3.7. Deze waarden kunnen van sample tot sample verschillend zijn.

| kleur | wall-plug-efficiëntie [%] | |
|-------|---------------------------|-------|
| | Luxeon III | OSTAR |
| rood | 18.2 | 13.5 |
| groen | 4.6 | 4.8 |
| blauw | 9.9 | 9.8 |

Tabel 3.7: Wall-plug-efficiënties Luxeon III en OSTAR LED's

We zien dat het merendeel van deze energie gedissipeerd wordt in de LED als warmte en dus verloren gaat. Slechts een klein deel wordt omgezet in licht. Deze omzetting is het meest doeltreffend voor achtereenvolgens rode, blauwe en groene LED's met een verhouding van ongeveer 4-2-1. Zowel de Luxeon als OSTAR LED's hebben vergelijkbare resultaten, hoewel de efficiëntie voor Luxeon LED's hoger had moeten zijn omwille van verhoogde uitkoppeling door aanwezigheid van een hemisfeer (ten koste van verhoogde étendue). Dit betekent dat OSTAR LED's potentieel een grotere efficiëntie in zich hebben en dit kan gerealiseerd worden door ze optisch te koppelen met de lichtpijp om de uitkoppeling, samen met de étendue, te verhogen. In de projectoropstelling hebben we omwille van betere potentiële wall-plug-efficiëntie, OSTAR LED's gebruikt (zie hoofdstuk 4).

120Hoofdstuk 3: Intelligente methodes voor luminantieverhoging

Verwijderen we nu de hemisfeer af van de Luxeon LED, dan zou de uitkoppeling in principe moeten verminderen met ongeveer n^2 ($=2.26$) [11], met n de brekingsindex van het hemisfeermateriaal, en dus ook de wall-plug-efficiëntie. De étendue vermindert eveneens met n^2 . In de praktijk is de vermindering van de flux beperkter (tussen 1.5 en 2.0) omdat de uitkoppeling eveneens bevordert wordt door opruwing van het LED-oppervlak. Met andere woorden door OSTAR LED's optisch te koppelen met de lichtpijp gaat de lichtoutput (en dus de wall-plug-efficiëntie) niet vermeerderen met factor n^2 , maar slechts met 1.5 tot 2 in het beste geval. Dit betekent ook dat LED's met naakte chips een hogere helderheid hebben dan LED's met een hemisfeer of met een optische gekoppelde lichtpijp.

Tenslotte hebben we de wall-plug-efficiënties opgemeten voor Luxeon LED's zonder de hemisfeer. De flux voor rode, groene en blauwe LED's wordt verminderd met respectievelijk een factor 2.0, 1.50 en 1.67.

Een extra uitleg willen we geven in verband met de rode LED. In tabel 3.7 zien we dat de efficiëntie van deze LED verschillend is voor beide merken. We zien eveneens dat de vermindering van flux zonder hemisfeer veel groter is voor rood dan voor andere kleuren. Dit komt waarschijnlijk door de structuur van deze LED. Zowel de OSTAR LED's als de blauwe en groene Luxeon LED's zijn quasi vlak (geen hoogte). Daarentegen heeft de rode Luxeon een afgeknotte piramidestructuur die op zijn kop staat. Hierdoor zal de uitkoppeling en de wall-plug-efficiëntie bevordert worden.

5. Enkele conclusies

In dit hoofdstuk hebben we intelligente methodes ontwikkeld om de geringe helderheid van de LED's te verhogen. Hiervoor werd gebruik gemaakt van de mogelijkheid om LED's te kunnen pulsen. Door meerdere LED's afwisselend te pulsen met hogere piekstromen om hogere piekfluxen te verkrijgen en deze in de tijd te combineren, verkrijgen we een hogere helderheid. De gepulste LED moet telkens in het optische pad gebracht worden (mechanisch of optisch). We hebben twee systemen uitgewerkt waarbij we telkens twee LED's afwisselend pulsen. Het eerste systeem (mechanisch) leverde ons 50% winst en met het tweede systeem (optisch) werd 36% winst gerealiseerd. De LED's moeten echter aangestuurd worden met piekstromen die bijna het dubbele zijn van de normale werkingsstroom. Dit heeft nadelige gevolgen voor de levensduur en beïnvloedt de spectrale eigenschappen van de LED. Uit metingen blijkt dat de levensduur sterk gereduceerd wordt. Na 5 kh was de flux van de gepulste LED met 17% afgenomen. Dit zou een halvering van het lichtvermogen opleveren na 15 kh (cfr. 80 kh nominaal aangestuurde LED), maar de LED is zelfs na 6 kh gefaald. Door het pulsen met hogere piekstromen degradeert de LED veel sneller en moet het voordeel van langere levensduur prijsgeven. Hogere piekstromen veranderen eveneens de spectrale eigenschappen van de LED. Het spectrum wordt opgeschoven naar hogere of lagere golflengten. Er zijn twee verschillende effecten die we waargenomen hebben. Een ogenblikkelijk effect (verschuiving) die groot is, maar wegvalt indien de piekstromen wegvallen, en een geringe blijvende effect die zelfs bij nominale aansturing (na piekstromen) nog steeds voor een verschuiving zorgt. Het blijvende effect is zeer klein en kan genegeerd worden. Het ogenblikkelijke effect is echter belangrijker en zal voor een verschuiving van het witpunt van de projector zorgen. Daarom moet het witpunt ingesteld worden bij de piekstromen waarmee de LED's zullen aangestuurd worden bij de werking van de projector.

Referenties

- [1] G. Harbers, M. Keuper, S. Paolini, "Performance of high power LED illuminators in color sequential projection displays", *Proc. 10th Int. Display Workshop*, pp. 1585-1588, 2003.
- [2] H. Murat, H. De Smet, D. Cuypers, Y. Meuret, H. Thienpont, M. Vervaeke, L. Desmet, "Increased lumens per étendue by combining pulsed light-emitting diodes", *Optical Engineering Vol. 45*, pp. 034002:1-8, 2006.
- [3] X.-J. Yu, Y.L. Ho, L. Tan, H.-C. Huang, H.-S. Kwok, "LED-Based Projection Systems", *Journal of Display Technology Vol 3*, pp. 1551:1-9, 2007.
- [4] W. Vandeveld, H. Murat, "Ontwerp en realisatie van een efficiënt belichtingssysteem voor microdisplays", *Master's thesis Faculteit Toegepaste Wetenschappen, Universiteit Gent*, Promotor H. De Smet, pp. 1-85, 2004.
- [5] T. Vanlaeken, H. Murat, "Het bouwen van een LED belichtings-engine voor projectoren", *Master's thesis Faculteit Toegepaste Wetenschappen, Universiteit Gent*, Promotor H. De Smet, pp. 1-87, 2005.
- [6] V. Presnyakov, Z. Lui, V.G. Chigrinov, "Fast optical retarder using deformed-helical ferroelectric liquid crystals", *Proceedings of the SPIE Vol 5970*, pp. 426-435, 2005.
- [7] D. Maes, "Dual TIR prism, a way to boost the performance of a DLP projector" *SID-ME Chapter spring meeting*, Technical presentations, 2008.
- [8] PIER Lighting Research Program, "LED Evaluation Report", pp. 1-12, 2003.

- [9] E. Hong, N. Narendran, “A method for projecting useful life of LED lighting systems”, *Third International Conference on Solid State Lighting Vol 5187*, pp. 93-99, 2004.
- [10] R. Windisch, C. Rومان, B. Dutta, A. Knobloch, G. Borghs, G.H. Döhler, P. Heremans, “Light-Extraction mechanisms in high-efficiency surface-textured light-emitting diodes”, *Selected topics in quantum electronics Vol 8*, number 2, 2002.
- [11] H. Zou, A.Schleicher, J. Dean, “Single-Panel LCOS Color Projector with LED light Sources”, *SID Int Symp Digest of Technical Papers*, pp. 1698-1701, 2005.
- [12] http://www.displaytech.com/pdf/photronics_rotator_ds.pdf

Hoofdstuk 4

Projectie-architecturen

1. Inleiding

In dit doctoraatswerk hebben we onderzoek gedaan rond het gebruik van “High Brightness LED’s” in op LCOS gebaseerde projectoren [1]. De reden hiervan, de voordelen en de beperkingen van LED’s werden al in hoofdstuk 1 besproken. De grote troeven zijn lange levensduur, compactheid, robuustheid en kleurzuiverheid. Het belangrijkste nadeel is de geringe helderheid. Het gebruik van LED’s kan revolutionair zijn in sommige projectie applicaties. Zo zijn voor sommige toepassingen, bijvoorbeeld in de vliegtuigcockpits, het gebruik van klassieke lichtbronnen (UHP-lampen) onmogelijk. LED’s kunnen hier door hun robuustheid, betrouwbaarheid en afwezigheid van ontploffingsgevaar een oplossing voor bieden.

LED’s zijn lichtbronnen met een totaal verschillend fysische, geometrische, optische en elektrische eigenschappen als UHP-lampen. Daarom voldeed het belichtingssysteem van klassieke projectoren niet en moest het opnieuw ontworpen worden. Dit hebben we gerealiseerd en besproken in hoofdstuk 2.

De geringe helderheid van LED’s vormt nog de bottleneck. Dit hebben we gedeeltelijk proberen op te vangen door meerdere LED’s op een intelligente manier te combineren binnen eenzelfde étendue. Dit wordt besproken in hoofdstuk 3. We hebben er eveneens de levensduur- en de optische respons metingen, die we gedaan hebben voor gepulste LED’s, besproken.

Wat we tot nu toe besproken hebben, was eigenlijk voorbereidend werk dat we gaan gebruiken in de projectie opstelling. In dit hoofdstuk gaan we twee architecturen met LCOS-panelen bespreken die gebaseerd zijn op LED’s als

lichtbron. Het belichtingssysteem zal in beide gevallen bestaan uit ‘Gradually Tapered Light Pipes’ (GTLP) die voor de homogenisatie en de omzetting van de lichtspot zorgen. Eerst gaan we een 3-LCOS-architectuur [2] bespreken. Deze hebben we enkel gesimuleerd en niet effectief opgebouwd. Vervolgens bespreken we een 2-LCOS-architectuur [3]. Deze hebben we zowel gesimuleerd, opgebouwd als experimenteel gekarakteriseerd.

2. 3-LCOS-architectuur

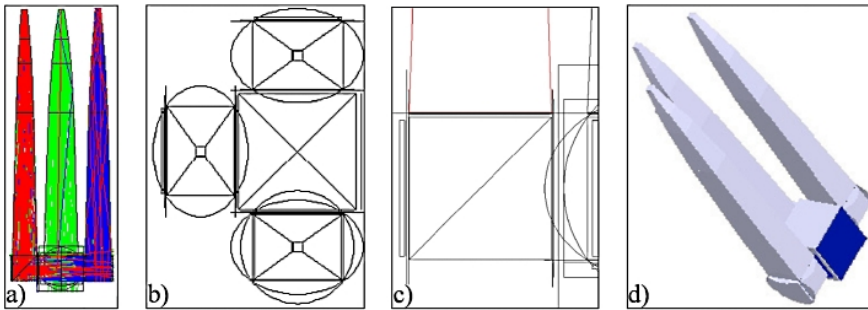
Een projectiesysteem met drie lichtkleppen is de meest voor de hand liggende optische architectuur. Hierbij wordt elke basiskleur (R, G, B) gemoduleerd door één lichtklep en worden vervolgens de drie kanalen gecombineerd met dichroïsche spiegels. Elke kleur kan continu gemoduleerd worden en hoeft niet in de tijd opgesplitst te worden zoals in een 1-paneelkleursequentieel-systeem [4]. Dit verhoogt de optische throughput van het systeem en zal het probleem van colour-breakup voorkomen. Colour-breakup [5] is het fenomeen dat optreedt bij kleursequentiële systemen, waarbij een getraind oog de kleurovergangen in de tijd kan waarnemen, ook al hebben de overgangen een grote frequentie. Dit is een storend effect dat men liefst wil vermijden. De nadelen van een 3-paneel-systeem zijn de hoge kostprijs en het volume. Microdisplays zijn geen goedkope componenten en men wil het aantal liefst zo klein mogelijk houden. De meeste consumer projectoren zijn dan ook kleursequentiële systemen waarbij er maar één paneel gebruikt wordt. Het gebruik van drie panelen maakt bovendien het totale volume groter en deze lichtkleppen moeten perfect ten opzichte van elkaar gepositioneerd worden om geen kleuruitsmering te krijgen. Dit is geen gemakkelijke opdracht bij hoogresolutie LCOS-panelen.

Voor deze 3-LCOS-architectuur hebben we als belichtingssysteem één rode, één groene en één blauwe LED gebruikt met telkens een GTLP als collector-homogenisator. Zo hebben we een compacte en efficiënte LED-projector gesimuleerd. Vooraleer we overgaan naar de bespreking van de resultaten, zullen we eerst het ontworpen systeem en de vooropgestelde veronderstellingen beschrijven.

2.1 Beschrijving simulatiemodel en veronderstellingen

We hebben een op LED gebaseerd projectiesysteem gesimuleerd met het niet-sequentieel stralengang softwarepakket ZEMAX [6]. De architectuur

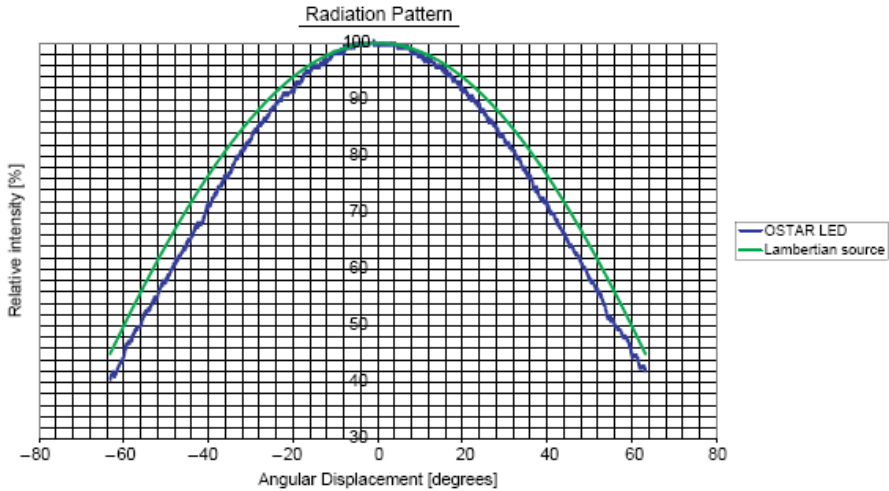
van dit systeem wordt weergegeven in figuur 4.1. Het bestaat uit één LED per hoofdkleur die ingekoppeld wordt in een GTLP (4.1 a). Deze lichtpijp gaat de bundel homogeniseren en aanpassen aan de gewenste vorm: f-getal (angulair) en rechthoekige lichtspot (ruimtelijk). Elke basiskleur wordt vervolgens continu gemoduleerd door één LCOS-paneel in combinatie met een PBS (4.1 b). De drie kanalen worden vervolgens gerecombineerd door middel van een dichroïsche component, namelijk een X-kubus (4.1 c). Dit is een glazen kubus met op de diagonaalvlakken dichroïsche coatings waarmee de recombinitie gerealiseerd wordt. Langs de drie vlakken komen de rode, groene en blauwe kanalen binnen en langs het vierde vlak verlaat het gerecombineerde wit licht de kubus. Dit is het blauwe vlak in figuur 4.1 d. Daarachter komt de projectielens die hier niet opgenomen is in de simulaties.



Figuur 4.1: 3-LCOS-architectuur:

- a) het vooraanzicht b) het bovenaanzicht
c) een close-up van PBS en LCOS-paneel d) het 3D zicht van de projector

Als lichtbron gebruiken we OSTAR Projectie LED's [7] van OSRAM. Het voordeel van deze LED's ten opzichte van Luxeons is dat ze een hogere helderheid bieden, geen hemisfeer hebben zodat ze rechtsreeks tegen de lichtpijp kunnen geplaatst worden en ze perfecte oppervlakte stralers zijn (geen stralende zijwanden). Deze LED's hebben een stralend oppervlak van 2.1 mm x 2.1 mm en een lambertiaans stralingspatroon (zie datasheets). We hebben eveneens deze angulaire distributie opgemeten. In figuur 4.2 wordt de opgemeten distributie vergeleken met een perfecte Lambertiaanse straler. We zien dat ze zeer goed overeenkomen en hebben daarom de LED's lambertiaans verondersteld in de simulaties. De LED's worden niet optisch gekoppeld met de lichtpijpen, maar worden er oneindig dicht tegen geplaatst. De étendue van deze lichtbronnen is dan 13.85 mm²sr.



Figuur 4.2: Stralingspatroon OSTAR LED en een perfecte Lambertiaanse straler

Om een compacte 3-LCOS-projector te ontwerpen kiezen we rechthoekige LCOS-panelen met 4:3 aspect ratio en 0.64" diagonaal. Dit betekent dat alle andere componenten ook zo klein mogen zijn. De exacte afmetingen zijn 13 mm x 9.75 mm en de display oppervlakte is dus 126.75 mm². Het f-getal van het projectiesysteem stellen we op 2.88. Dit komt overeen met een maximale invalshoek van 10°. De invalshoek, en dus het f-getal, beperken we om de werking van de optische componenten zoals PBS, dichroïsche spiegels, LCOS-panelen, etc. niet te degraderen omdat het contrast anders sterk zou verminderen. Bovendien vereisen grotere invalshoeken ook grotere en duurdere optische componenten bv. een grotere projectielens. Het f-getal en de oppervlakte van de display bepalen tesamen de systeemétendue. Voor dit systeem bedraagt E_{sys} 12 mm²sr.

Belichten we het paneel met een lichtspot die er exact mee overeenkomt, dan kan het voorkomen dat de display niet volledig (uniform) belicht wordt. Dit kan te wijten zijn aan alignatiefouten, het niet perfect afbeelden ten gevolge van niet-ideale lenzen en/of het niet uniform zijn van de spot naar de randen toe. Om dit te voorkomen kiest men de lichtspot iets groter dan de te belichten display. Een goede vuistregel hiervoor is het voorzien van 10% overfill. Dit betekent dat de lichtspot terug een rechthoekige geometrie zal hebben met afmetingen 13.6 mm x 10.2 mm (4:3 aspect ratio). De GTLP's moeten dus zo ontworpen worden dat het uitgangsvlak deze afmetingen heeft. Berekenen we nu de systeemétendue met overfill, dan komen we uit

op $13.14 \text{ mm}^2\text{sr}$, wat nog steeds iets kleiner is dan de bronétendue. Dit betekent dat we weliswaar een beetje lichtflux zullen verliezen, maar de systeemétendue wordt door de lichtbron ten volle benut.

Bij de simulaties hebben we getracht om zo waarheidsgetrouw mogelijk te werken. Alle componenten die we gebruikt hebben, zijn realistisch en er werd rekening gehouden met de verliezen. De GTLP heeft een ingangsvlak van $2.2 \text{ mm} \times 2.2 \text{ mm}$, een uitgangsvlak van $13.6 \text{ mm} \times 10.2 \text{ mm}$ (4:3) en een lengte van 100 mm . Om een efficiënte totale interne reflectie te bewerkstelligen, moeten we een materiaal kiezen met een brekingsindex n hoger dan $\sqrt{2}$ en een lage absorptie in het zichtbaar gebied zoals PMMA, BK7, etc. We hebben de simulaties uitgevoerd met BK7 ($n=1.517$) materiaal.

Aan beide vlakken (ingang en uitgang) van de drie lichtpijpen zijn er anti reflectie (AR)-coatings aangebracht om de Fresnelverliezen te minimaliseren. Deze coating is een zelf ontworpen drie lagen coating met respectievelijk de volgende lagen: MgF_2 ($1/4@525 \text{ nm}$), ZrO_2 ($1/2@525 \text{ nm}$) and Al_2O_3 ($1/4 @ 525 \text{ nm}$). Het is een breedbandige coating rond groen (525 nm) met een vlakke transmissie karakteristiek. De transmissie van de coating op BK7-glas bedraagt respectievelijk 99.4%, 99.9% en 99.5% voor rood, groen en blauw voor een lichtbundel met $f^\#$ van 2.88. Voor lichtstralen die een hoek maken van 80° met de optische as zijn deze waarden gezakt tot 64.1 %, 64.6 % en 68.3%, maar is de golflengte afhankelijkheid niet zo significant. De transmissie versus invalshoek karakteristiek is tot 65° vlak voor de drie kleuren. Hogere invalshoeken hebben enkel betrekking tot het ingangsvlak van de lichtpijp en de transmissie is nog steeds dezelfde voor de verschillende golflengten.

Na het doorlopen van de GTLP komen de lichtstralen terecht in de PBS (figuur 4.1 b). Dit is een kubus met een coating op één van de diagonaalvlakken waarmee het invallend ongepolariseerd licht opgesplitst wordt in een getransmitteerde p- en een gereflecteerde s-polarisatie. Het bulkmateriaal van deze component is SF8-glas en ze heeft dezelfde doorsnede als het uitgangsvlak van de lichtpijp. Dit zal de lichtstralen verder propageren naar de display toe. Om de verliezen te minimaliseren hebben we hier ook AR-coatings aangebracht aan de vier vlakken. De PBS coating is eveneens een zelf ontworpen 19-lagen coating. Tussen de GTLP en de PBS selecteren we met een pre polarisator welke polarisatie we willen doorlaten, zodat de PBS in principe enkel licht reflecteert of doorlaat. De transmissie en reflectie (T_p , R_s) parameters zijn meestal zowel golflengte als invalshoek afhankelijk. Deze waarden bij de dominante golflengte van de gebruikte

LED's en voor een lichtbundel met f-getal van 2.88 zijn gesimuleerd en worden gegeven in tabel 4.1. In deze T_p en R_s waarden is de absorptie van het bulkmateriaal ingecalculleerd. De som $(T_p+R_p) = (R_s+T_s) = 1$. Hieruit kunnen we eveneens R_p en T_s berekenen. Voor de drie lichtkleppen (R, G, B), hebben we met de prepolarisator de s-polarisatie geselecteerd. De LCOS-panelen moduleren (wijzigen van de polarisatietoestand) dus invallend s-gepolariseerd licht. Deze combinatie geeft ons het beste contrast, zoals men kan afleiden uit formule 4.1 en tabel 4.1. Dit hebben we eveneens waargenomen met simulaties. Deze formule geeft een eerste benadering van het contrast bij de modulatie van s- en p-gepolariseerd licht.

$$C_s = \frac{T_p}{T_s} \quad C_p = \frac{R_s}{R_p} \quad (4.1)$$

| | R_s [%] | T_p [%] |
|-------|-----------|-----------|
| rood | 99.00 | 98.13 |
| groen | 99.46 | 96.33 |
| blauw | 99.20 | 81.84 |

Tabel 4.1: Parameters gesimuleerde PBS

Na elke PBS (voor de X-kubus) is er een opruimanalysator geplaatst om het residuele ongewenste licht tegen te houden. De prepolarisator en de analysator verhogen het contrast van het projectiesysteem. De LCOS-panelen hebben we gemodelleerd als een kwartgolflengteplaat met een spiegel erachter. In de aan-toestand wordt de kwartgolflengte 45° geroteerd ten opzichte van zijn optische as en bij uit-toestand 0° . We hebben een additioneel verlies van 10% verondersteld per paneel en dit verwezenlijkt door de spiegels slechts 90% reflectief te kiezen. Tussen de PBS en LCOS plaatsen we een kwartgolflengteplaat volgens zijn kristal-as om het depolarisatie effect van schuin invallende stralen op de PBS-coating ongedaan te maken [8][9].

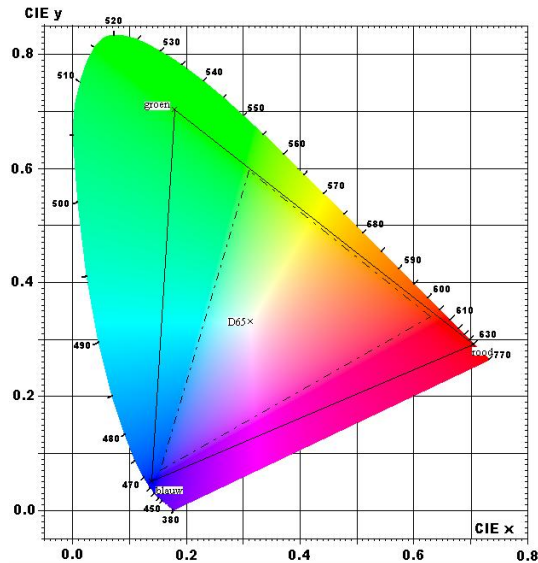
Zowel de kwartgolflengteplaten als de polarisatoren/analysatoren worden gemodelleerd door Jones-Matrices [10]. Een Jones Matrix is een vlak oppervlak dat gebruikt wordt om een willekeurig polariserende component te definiëren. De Jones-Matrix wijzigt een Jones-vector (welke het elektrische veld beschrijft) volgens de formule 4.2, waar A, B, C, D, E_x en E_y complexe getallen zijn. Dit is maar een benaderende functie, in de realiteit is het gedrag van deze componenten veel complexer.

$$\begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

Tenslotte worden de drie kanalen samengebracht met een X-kubus. Het bulkmateriaal van de kubus is SF57 en de vier vlakken zijn gecoat met dezelfde AR-coating. De verliezen van de X-kubus zijn respectievelijk 2.19%, 2.73% en 3.22% voor het rode, groene en blauwe kanaal. In principe moet hierna nog een projectielens en een projectiescherm geplaatst worden, maar we hebben dit niet gedaan bij deze simulaties. Echter bij de resultaten houden we er wel rekening mee. De projectielens is 80% transmissief verondersteld en het scherm heeft een verlies 7.5%.

2.2 Simulaties en resultaten

In deze opstelling wordt er een blauwe, een groene en een rode OSTAR LED gebruikt. Ze hebben alledrie een stralend oppervlak van 2.1 x 2.1 mm² en de angulaire distributie is Lambertiaans. De belangrijke parameters van deze LED's, zoals dominante golflengte, 'Full Width Half Maximum' (FWHM), lichtflux en de kleurcoördinaten, worden weergegeven in tabel 4.2. Deze parameters hebben we nodig om de juiste kleurbalans te berekenen om de projector op een bepaald witpunt in te stellen. Een veel gebruikt witpunt is het D65-punt. Dit komt overeen met wit licht met een kleurtemperatuur van 6500K. In bijlage B wordt er meer uitleg gegeven omtrent de kleurentheorie. In figuur 4.3 worden de LED's en het D65-witpunt op het CIE-1931-kleurdiagramma uitgezet. De driehoek die gevormd wordt door de posities van de LED's te verbinden, wordt de kleurengamut genoemd. Alle kleuren die binnen deze driehoek vallen, kunnen gerealiseerd worden met deze set van LED's. De binnenste driehoek (stippellijn) in figuur 4.3 is de moderne NTSC-standaard [11]. We zien dus dat met deze LED-projector veel meer kleuren (+72%) kunnen gereproduceerd worden dan bij een klassiek televisiesysteem zoals NTSC, PAL, SECAM of HDTV.



Figuur 4.3: CIE-kleurendiagram met de gevormde kleurendriehoek

| | λ_D [nm] | FWHM [nm] | lichtflux [lm] | kleurcoördinaten | |
|---------|---------------------|--------------|-------------------|------------------|-------|
| | | | | x | y |
| rood | 617 | 26 | 320 | 0.693 | 0.307 |
| groen | 520 | 44 | 320 | 0.152 | 0.702 |
| blauw | 464 | 30 | 82 | 0.145 | 0.035 |
| D65-wit | | | | 0.313 | 0.329 |

Tabel 4.2: Parameters gesimuleerde LED's

Op basis van de kleurcoördinaten en de intensiteiten van de verschillende LED's kunnen de fluxverhoudingen berekend worden die nodig zijn om D65-wit licht te vormen. Dit geeft ons als resultaat dat we 25.4% rood, 68.35% groen en 6.25% blauw geprojecteerd licht nodig hebben op het scherm (uitgedrukt in lumens) om het gewenste witpunt te verkrijgen. De propagatie van elk kleurkanaal doorheen het systeem zal een verschillend verlies vertonen afhankelijk van de golflengte (kleur). Om de verhoudingen aan de bron te bepalen, moeten we dus deze verliezen in rekening brengen. De efficiënties doorheen het volledige systeem (met inbegrip van projectielens en scherm) voor de rode, groene en blauwe component bedragen respectievelijk 18.8%, 18.0% en 14.3%. Om een gebalanceerd D65-witpunt op het scherm te verkrijgen, moeten dus de fluxverhoudingen aan de lichtbron 24.19%, 67.98% en 7.83% zijn voor respectievelijk de rode,

groene en blauwe LED's. Op basis van de gegevens (lichtflux) uit tabel 4.2 en de berekende fluxverhoudingen aan de bron zien we dat de groene LED de beperkende lichtbron is en dus moet aangestuurd worden met de maximale (nominale) stroomsterkte, terwijl de rode en de blauwe LED's ofwel aan minder dan de helft van de nominale stroom (stroommodulatie) ofwel met een duty cycle die kleiner is dan 50% (pulsbreedtemodulatie) moeten aangestuurd worden [12]. D65-licht op het scherm betekent voor de LED's dat ze dus respectievelijk 114 lm, 320 lm en 37 lm (R, G, B) leveren. De totale lichtopbrengst op het scherm zal dan bestaan uit 21.4 lm rood, 57.6 lm groen en 5.3 lm blauw licht. Tesaamen bekomen we dus 84.3 lm D65-witlicht. Over de methodes om de rode en de blauwe LED gedimd te laten werken kunnen we nog vermelden dat werken met een duty cycle nauwkeuriger is en gemakkelijker onder controle kan gehouden worden dan werken met stroommodulatie.

Het totale optische vermogen dat we aangelegd hebben aan de projector is 471 lm en we bekomen hiermee slechts 84.3 lm D65-licht. Dat betekent dat de totale efficiëntie 17.9% is. Meer dan 80% van het licht gaat op verschillende plaatsen verloren. Deze verliezen hebben we samengevat in tabel 4.3. Het elektrische vermogen dat nodig is om de LED's aan te sturen bedraagt 27W (7W+16W+4W). Indien de LCOS-panelen en de LED drivers niet veel dissiperen, bekomen we dus een projector die slechts 30W verbruikt.

| | rood | groen | blauw | D65 |
|---------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| GTLP | 0.754 | 0.755 | 0.742 | 0.754 |
| polarisatie | 0.495 | 0.497 | 0.493 | 0.496 |
| overfill spot + R_s | 0.842 | 0.871 | 0.866 | 0.864 |
| LCOS-verlies + T_p | 0.840 | 0.778 | 0.639 | 0.782 |
| analysator | 0.984 | 0.984 | 0.984 | 0.984 |
| X-cube | 0.978 | 0.973 | 0.968 | 0.974 |
| projectielens | 0.800 | 0.800 | 0.800 | 0.800 |
| projectiescherm | 0.925 | 0.925 | 0.925 | 0.925 |
| Totale efficiëntie | 0.188 | 0.180 | 0.143 | 0.179 |
| ingangflux [lm] | 114 | 320 | 37 | 471 |
| uitgangflux [lm] | 21.4 | 57.6 | 5.3 | 84.3 |

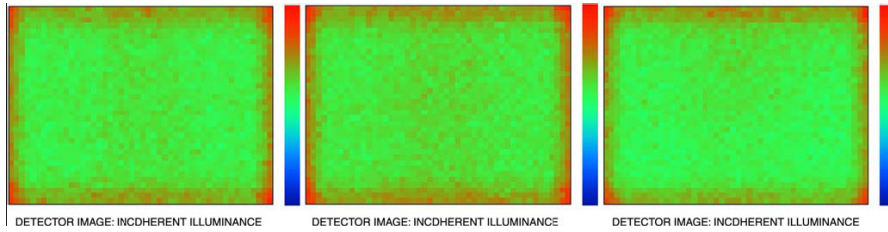
Tabel 4.3: Samenvatting van de verliezen doorheen het systeem

Naast de systeemefficiëntie zijn er nog andere kenmerken in een projector die belangrijk zijn en eveneens dienen gesimuleerd te worden. Deze zijn het aan/uit-contrast en de beelduniformiteit. Het contrast wordt gedefinieerd als

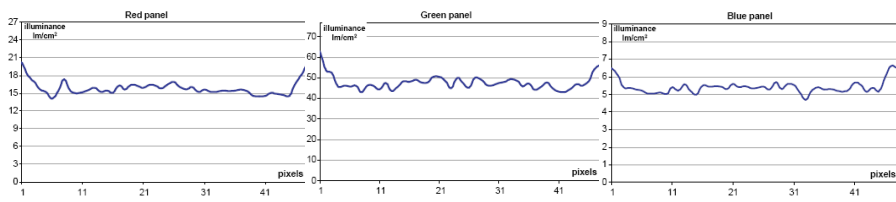
de verhouding van de lichtfluxen op het scherm tussen de volledige aan-toestand (een wit beeld) en de volledige uit-toestand (een zwart beeld) van de panelen. Hoe hoger deze waarde is, des te meer kleurtinten er te onderscheiden zijn tussen zwart en wit. Dit zou in principe oneindig moeten zijn, maar door niet-ideale werking van de PBS en de LCOS-panelen degradeert deze waarde enorm. Door gebruik te maken van prepolarisatoren en opruimanalysatoren kan het contrast opgekrikt worden. We hebben de aan- en de uit-toestand gesimuleerd en het contrast berekend. Dit bedraagt ongeveer 400:1. Deze waarde is niet extreem hoog, maar ook niet laag. De beeldkwaliteit zal voldoende goed zijn.

In een projector is het uiterst belangrijk dat het geprojecteerde beeld uniform is. Projecteren we een wit beeld, dan is het bijvoorbeeld niet aanvaardbaar dat de intensiteit in het midden dubbel zo groot is als aan de randen. Om dit te voorkomen moeten we de lichtkleppen belichten met een uniforme en een telecentrische lichtspot. Aangezien er zich in het optische pad na het LCOS-paneel componenten bevinden wiens gedrag hoekafhankelijk is, dient de lichtbundel telecentrisch te zijn om de uniformiteit niet te verliezen. Dit wordt gerealiseerd door de GTLP (zie hoofdstuk 2). In figuur 4.4 wordt de ruimtelijke lichtverdeling op respectievelijk het rode, groene en blauwe LCOS-paneel weergegeven. Een horizontale doorsnede door het midden van elk paneel wordt gegeven in figuur 4.5. We zien dat de belichting uniform is over het volledige paneel behalve aan de omtrek. Daar is de belichting sterker. Dit komt doordat het uitgangsvlak van de GTLP niet afgebeeld wordt op de lichtklep. Er zit immers een PBS tussen (een recht stuk) die de lichtstralen totaal intern reflecteert, waardoor de homogenisatie gedeeltelijk verloren gaat. Tussen de GTLP en de PBS en de PBS en de X-kubus zit er een luchtspleet.

Het effect van de intensere rand zal na de modulatie gecompenseerd worden. De lichtstralen vertrekkend aan de rand van de display die propageren naar de projectielens, zullen meer verlies leiden dan de stralen in het midden van de display. Dit komt doordat deze stralen een TIR zullen ondergaan in de PBS, waardoor ze als het ware vanuit een punt buiten de display afkomstig zijn voor de projectielens en zullen dus afgebeeld worden buiten het scherm. Hierdoor zal dit probleem verholpen worden. In principe zouden we het verlies door TIR na modulatie ook moeten meerekenen in de totale optische efficiëntie, maar hebben dit niet gedaan. Laten we nu de uiterste pixels weg, dan bekomen we een zeer goede uniformiteit. De heldere rand die we weggelaten hebben, vertegenwoordigt echter 22% van de schermoppervlakte. Dit zal weer de totale optische efficiëntie verminderen, wat niet vervat zit in de resultaten.



Figuur 4.4: Ruimtelijke lichtverdeling op rode, groene en blauwe LCOS-paneel



Figuur 4.5: Ruimtelijke lichtverdeling op rode, groene en blauwe LCOS-paneel (grafiek van een doorsnede)

Om de goede uniformiteit te bevestigen, hebben we deze numeriek berekend door middel van de 13-puntsmethode van ANSI [13]. Door nu de helderste en de donkerste locatie uit deze 13 punten te vergelijken met de hierboven berekende gemiddelde lichtsterkte, kan de uniformiteit numeriek uitgedrukt worden. Dit hebben we gedaan voor zowel de volledige display als voor de display zonder de uiterste pixels. De resultaten voor de drie panelen zijn samengevat in tabel 4.4. Het helderste punt wordt aangeduid met +x % en de donkerste met +y % ten opzichte van de gemiddelde lichtsterkte. We zien effectief dat indien we de uiterste pixels weglaten, de uniformiteit zeer goed is. Deze getallen bevestigen ook de resultaten die te zien zijn in de figuren 4.4 en 4.5.

| | | rode paneel [%] | groene paneel [%] | blauwe paneel [%] |
|-----------------------------------|----------------------|--------------------|----------------------|----------------------|
| volledige display | helderste locatie | +33.5 | +32.1 | +34.4 |
| | donkerste locatie | -4.8 | -4.2 | -3.2 |
| display zonder uiterste pixels | helderste locatie | +9.6 | +9.8 | +7.7 |
| | donkerste locatie | -7.3 | -7.3 | -5.0 |

Tabel 4.4: Samenvatting uniformiteiten belichting lichtkleppen

We hebben hier een efficiënte, compacte, draagbare 3-LCOS-projector gesimuleerd [2] die slechts 30W verbruikt en dus zelfs op batterijen kan werken. Door drie panelen te gebruiken (1 per hoofdkleur), zal de lichtopbrengst hoog zijn en zal er geen color-breakup optreden. De afmetingen van deze architectuur zijn 42x32x115 mm (zonder de projectielens). De geprojecteerde lichtflux is bijna 85 lm (D65) en het aan/uit contrast is 400:1. De beelduniformiteit is redelijk goed (uitgezonderd de buitenste rand) en de kleurkwaliteit is zeer hoog. Met deze projector kunnen er 70% meer kleuren getoond worden dan bij een gewoon televisietoestel.

2.3 Besluit en kanttekeningen

Op LED gebaseerde projectoren hebben vele voordelen vergeleken met klassieke projectoren, maar hebben een beduidend lagere lichtopbrengst per étendue (helderheid). Met deze 3-LCOS-architectuur hebben we gedemonstreerd hoe deze geringe helderheid op een efficiënte manier kan gebruikt worden om een projector te bouwen met een matige lichtopbrengst. We hebben een compacte, draagbare LED projector met GTLP's gesimuleerd die 85 lm D65-licht oplevert met een redelijke uniformiteit, contrast en kleurzuiverheid.

Deze projector heeft ook twee belangrijke nadelen. Het uitgangsvlak van de lichtpijp wordt niet op het LCOS-paneel afgebeeld waardoor de uniformiteit in zekere mate verloren gaat. Bovendien, door het feit dat het licht opgesloten zit in de PBS na de modulatie, kunnen er spookbeelden ontstaan naast het scherm. Om de kleurbalans juist in te stellen moet de groene (limiterende) LED maximaal aangestuurd worden. Daarentegen moeten de blauwe en rode LED's minder dan de helft van hun nominale flux leveren. Ze mogen dus aangestuurd worden met een duty cycle kleiner dan 50%. Dit betekent dat deze displays niet optimaal benut worden en men kan in principe de modulatie van rode en blauwe informatie door één lichtklep laten gebeuren. Aangezien de duty cycle kleiner moet zijn dan 50% voor deze LED's om de kleurbalans in orde te krijgen, kan men zowel de LED's als één LCOS-paneel altemnerend pulsen/moduleren voor achtereenvolgens blauwe en rode beeldinhoud. Hierdoor besparen we één LCOS-paneel zodat het systeem goedkoper en eventueel compacter kan zijn. Het is eveneens gemakkelijker om twee displays op elkaar af te regelen dan drie, zodat er minder problemen zullen optreden met de convergentie van de kleuren op het scherm. Daarentegen zal dit echter een beetje color-breakup introduceren, aangezien we voor blauw en rood dan kleursequentieel werken.

3. 2-LCOS-architectuur

In de vorige paragraaf werd er al geïntroduceerd dat bij een 3-LCOS-architectuur, de panelen niet optimaal benut worden. De benodigde kleurverhoudingen om de witbalans in orde te krijgen zijn zo dat de blauwe en de rode LED's minder dan de helft van de tijd moeten aanstaan. Hierdoor kan men één van deze panelen weglaten en blauwe en rode informatie afwisselend moduleren met één paneel [3][14]. Hiervoor is er een nieuw ontwerp gemaakt dat we hier gaan bespreken. Dit is een 2-LCOS-architectuur, waarbij, naast het aantal panelen, nog andere wijzigingen zijn aangebracht. Zo zal bijvoorbeeld de uitgang van de lichtpijp perfect afgebeeld worden met een lenzensysteem op de lichtklep zodat de uniformiteit beter zal zijn dan in de vorige architectuur. Hierdoor zal het systeem minder compact zijn.

We hebben dit 2-LCOS-systeem gesimuleerd met behulp van de ZEMAX simulator. Na een grondige analyse van de verschillende delen van het ontwerp en de verkregen simulatieresultaten hebben we besloten om over te gaan tot het bouwen van deze projectorarchitectuur. Dit was niet vanzelfsprekend. Er is eerst heel wat voorbereidend mechanisch werk geweest vooraleer we de opstelling konden bouwen. Vervolgens hebben we een eerste reeks metingen gedaan. Deze bleken niet bevredigend te zijn en we hebben de opstelling verder geoptimaliseerd. In de experimentele opstelling zijn er problemen opgetreden die we niet ingeschat hadden bij de simulaties. We hebben deze problemen zo goed mogelijk proberen aan te pakken. In het vervolg van dit hoofdstuk gaan we de simulaties, de experimentele opstellingen met de resultaten en de tegengekomen problemen en de bedachte oplossingen bespreken. We gaan de bespreking beginnen met een beschrijving van de parameters van het ontworpen systeem en de veronderstellingen die we gedaan hebben bij de simulaties.

3.1 Systeembeschrijving en veronderstellingen

De systeemparemeters zijn hier verschillend dan in de vorige architectuur. Daarom gaan we deze wijzigingen hier even herhalen. De LCOS-panelen hebben een diagonaal van 0.82" met 4:3 aspect ratio. Dit betekent dat de afmetingen 16.67 mm x 12.50 mm zijn en dus de display oppervlakte 208.33 mm² bedraagt. We wensen terug een lichtkegel van maximum 10° ($f^{\#}$ van 2.88) om de display te belichten. Op basis van deze parameters berekenen we de systeemétendue, d.i. 19.73 mm²sr. De te belichten oppervlakte werd weer iets groter gekozen om het LCOS-paneel, ook aan de randen, uniform

te kunnen belichten. We hebben een overfill voorzien van 11.6%. De herschaalde lichtspot zal dan 17.6 mm x 13.2 mm (4:3) zijn en de systeemétendue zal 22.01 mm²sr bedragen. Het simulatiemodel van het LCOS-paneel wordt terug op dezelfde manier gerealiseerd, d.i. een kwartgolflengteplaat met een spiegel erachter. De efficiëntie van LCOS wordt 65% verondersteld en daarom hebben we de reflectiviteit van de spiegel op 0.65 ingesteld. Deze efficiëntie wordt verkregen door het product van de vulfactor LCOS (90%), absorptieverlies (4%) en reflectie spiegel (75%).

We hebben hier terug OSTAR LED's [7] gebruikt, de 'LE XH3A'-reeks (X staat hier voor de kleur). We zullen in deze architectuur twee groene, één blauwe en één rode LED gebruiken. Deze LED's bestaan uit 6 dies (2x3) met elk 1x1 mm² met een onderlinge afstand van 0.1 mm. Wij gebruiken slechts 4 'dies' en hebben dus een totale oppervlakte van 2.1 mm x 2.1 mm. Deze LED's zijn perfecte oppervlaktestralers en hebben een Lambertiaans stralingspatroon. In tegenstelling tot 3-LCOS-systeem, hebben we deze keer de LED's optisch gekoppeld met de lichtpijpen. Hierdoor zal de bronétendue vermenigvuldigd worden met n^2 (2.3) en zal dus 31.88 mm²sr zijn. Dit is bijna 50% meer dan de systeemétendue, d.w.z. dat zelfs in het ideale geval een deel van de lichtflux zal verloren gaan. De uitgekoppelde lichtflux zal in principe ook met ongeveer n^2 toenemen [15]. We hebben deze toename 100% verondersteld en zal dus de gesimuleerde lichtflux van de LED's het dubbele zijn van wat er in de datasheets staat.

Bij de simulaties hebben we getracht om de componenten zo realistisch mogelijk te modelleren. Geometrisch zijn ze ideaal verondersteld (vorm, afmetingen); we hebben geen tolerantie analyse gedaan. Het fysisch gedrag is zo realistisch mogelijk nagebootst. Zo wordt er rekening gehouden met absorptie, reflectie, polarisatie, etc. Op alle componenten worden er AR-coatings aangebracht. Deze coatings hebben we in de vorige paragraaf besproken. De PBS heeft een 18-lagen coating en het bulkmateriaal is SF2. De reflectie- en transmissieparameters van deze PBS is lichtjes anders dan de vorige. Deze parameters worden gegeven in tabel 4.5 bij de dominante golflengte gebruikte LED's en bij een lichtbundel met $f^\#$ van 2.88.

| | R_s [%] | T_p [%] |
|-------|-----------|-----------|
| rood | 85.00 | 97.25 |
| groen | 98.92 | 92.42 |
| blauw | 99.71 | 86.84 |

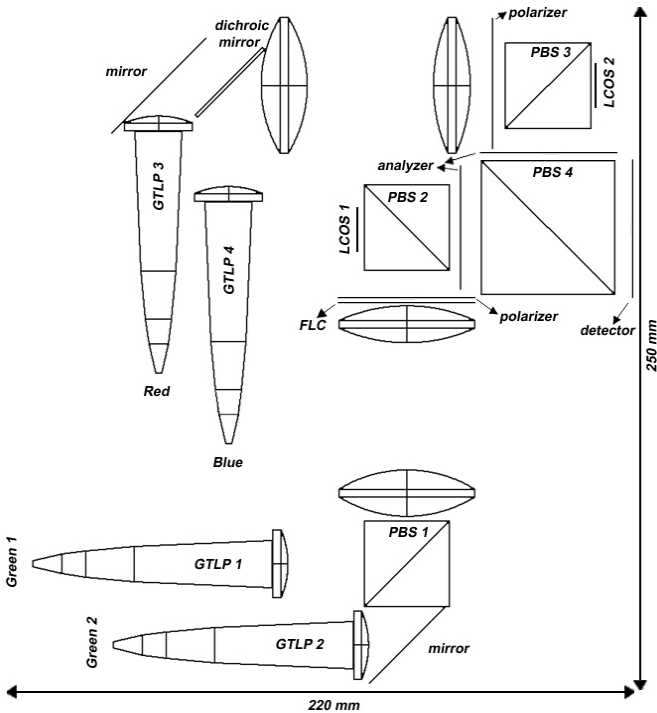
Tabel 4.5: Parameters gesimuleerde PBS

De polarisatoren, analysatoren en de kwart- en halfgolflengteplaten worden terug voorgesteld door Jones-matrices [10] in de simulator (ZEMAX). De koude spiegels (2x) in de architectuur worden 99% reflecterend verondersteld en de dichroïsche spiegel die rood en blauw mengt, is 99.7% reflectief voor blauw en 99.9% transmissief voor rood. In het groene kanaal werken we met een schakelbare halfgolflengte plaat die ook voorgesteld wordt door een Jones-matrix.

De projectielens en het scherm zijn weer niet opgenomen in de simulaties, maar bij de resultaten houden we er wel rekening mee. De lens is terug 80% transmissief beschouwd en het scherm 92.5% reflectief.

3.2 Architectuur

De optische architectuur van deze LED projector wordt getoond in figuur 4.6 (zonder de projectielens) [3]. Het is een twee-LCOS-systeem, waarbij de ene lichtklep (LCOS1) continu gereserveerd is voor de modulatie van de groene informatie en de andere (LCOS2) afwisselend voor rode en blauwe informatie. Deze twee paden zijn volledig gescheiden van elkaar zodat er geen crosstalk kan optreden. De recombinitie van deze kanalen gebeurt door middel van een grotere PBS (zijde 50 mm). Deze PBS is eveneens AR-gecoat. We zullen de verschillende delen van deze architectuur in detail bespreken, namelijk het belichtingssysteem, het groen kanaal, het rood/blauw kanaal en de globale architectuur.



Figuur 4.6: Architectuur 2-LCOS-projector

3.2.1 Belichtingssysteem voor LED's met GTLP

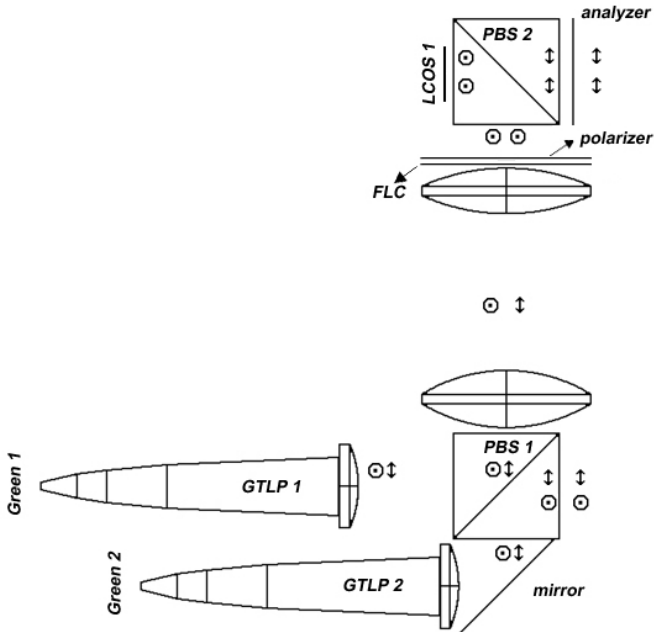
Het belichtingssysteem van een klassieke projector moet aangepast worden aan de noden van de LED's. In het hoofdstuk 3 werden op GTLP gebaseerde systemen reeds besproken. Bij deze 2-LCOS-architectuur gebruiken we de GTLP's om het LED-licht te collecteren, homogeniseren en de ruimtelijke en angulaire verdeling te transformeren naar de gewenste vorm [16]. Het ingangsvlak van de GTLP's is 2.2 mm x 2.2 mm en het uitgangsvlak 17.6 mm x 13.2 mm (4:3 aspect ratio). De doorsnede van de lichtpijp vergroot gradueel over een lengte van 90 mm. De LED 'die' is 2.1 x 2.1 mm² en valt dus volledig in het ingangsvlak. De LED is optisch gekoppeld met de pijp. Dit betekent dat voor de simulaties de LED in de GTLP gesimuleerd wordt en bij de experimentele opstelling plaatsen we de LED tegen het ingangsvlak van de lichtpijp. Om zeker te zijn dat het optische contact in orde is, doen we er 'index matching gel' tussen. Dit is een soort visceuse, doorzichtige vloeistof met een brekingsindex vergelijkbaar met die van de GTLP.

De gecollecteerde lichtstralen propageren doorheen de massieve (BK7-glas) lichtpijp door totale interne reflectie. Het aantal reflecties in de pijp bepaalt de uniformiteit van de lichtspot. Op het einde van de pijp is de ruimtelijke en de angulaire distributie van de lichtspot aangepast aan de noden van het systeem, d.i. een uniforme belichte rechthoek (4:3) met als grootte de oppervlakte van het LCOS-paneel (inclusief overfill) en een hoekverdeling binnen het toegelaten f-getal van 2.88. De lichtspot na de pijp is telecentrisch en zou, in het geval van een transmissieve lichtklep die tegen de pijp wordt aangedrukt, deze onmiddellijk kunnen belichten. In onze opstelling hebben we, als gevolg van het reflectieve karakter van onze lichtklep, nood aan een één-op-één afbeelding en deze wordt gerealiseerd door een telecentrisch 3-lenzensysteem. Het uitgangsvlak van de pijp bevindt zich in de objectruimte en het LCOS-paneel in de beeldruimte van het lenzensysteem. Deze lenzen zijn standaard commercieel verkrijgbare componenten met AR-coating. De helderheid, uniformiteit en de efficiëntie van de GTLP zullen verder nog besproken worden.

3.2.2 Groene kanaal

In tegenstelling tot projectiesystemen met UHP-lampen waarbij rood de beperkende kleur is, vormt bij LED gebaseerde projectoren het groene licht de limitatie. Om een kleurgebalanceerde projector te ontwerpen, moet het groen kanaal dus een verhoogde lichtflux leveren ten opzichte van de andere kanalen. Ruwweg hebben we 2 groene LED's nodig voor 1 blauwe en 1 rode LED om de kleurbalans in orde te krijgen. Daarom hebben we een 2-LCOS-systeem ontworpen waarbij één paneel constant belicht wordt met een groene LED en het andere afwisselend met blauw en rood. Hier gaan we het groen kanaal nader bestuderen.

LCOS1 zou continu kunnen belicht worden door één groene LED, maar we hebben geopteerd voor een alternatieve oplossing. Dit wordt voorgesteld in figuur 4.7. In plaats van één LED continu aan te sturen aan nominale stroom, gaan we twee LED's afwisselend pulsen aan hogere pulsstromen. De helderheid van elke gepulste LED is hoger dan bij nominale aansturing, maar werkt slechts gedurende 50% van de tijd. Door nu de verhoogde helderheden in de tijd op te tellen, bekomen we een constant verhoogde helderheid. Door deze methode [17] toe te passen, hadden we een winst van 36% gerealiseerd. Dit werd al besproken in hoofdstuk 3.



Figuur 4.7: Het groene kanaal

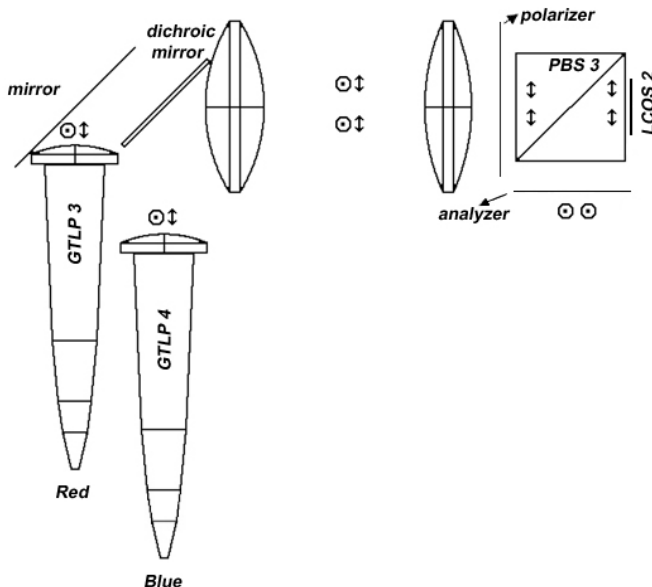
We gaan nu de werking van het groene kanaal stap per stap beschrijven (figuur 4.7). Eerst wordt bv. ‘groen 1’ gepulst. PBS1 reflecteert de s-polarisatie (voorgesteld door een cirkel) afkomstig van ‘Groen1/GTLP1’ in de richting van de lichtklep. De p-polarisatie (vertikale pijl) wordt doorgelaten en zal verloren gaan. Achter de laatste lens is er een zeer snelle schakelbare vertrager geplaatst, namelijk een ferro electric liquid crystal (FLC) [18]. Deze optische component heeft twee toestanden die afhankelijk zijn van het aangelegde elektrisch veld. In de ene toestand, de uit-toestand, wordt het licht gewoon doorgelaten, en in de andere toestand, de aan-toestand, werkt hij als halfgolfengteplaat en verandert hij de polarisatietoestand van het inkomende licht. Tijdens de pulsduur van ‘groen 1’ wordt de FLC in ‘uit-toestand’ gezet en de polarisatie van het licht zal dus niet veranderd worden. De prepolarisator achter de FLC filtert de ongewenste p-polarisatie weg. PBS2 zal vervolgens de lichtstralen reflecteren naar ‘LCOS1’, welke het licht zal moduleren volgens de groene informatie. Tussen de PBS en de lichtklep is er bovendien een kwartgolfengteplaat geplaatst (niet zichtbaar op de figuur) die het probleem van depolarisatie van schuine stralen [8] zal oplossen. Bij doorgang van schuine stralen door de PBS-coating wordt het gepolariseerd licht

gedeeltelijk gedepolariseerd. Het gedepolariseerde licht zou dus ongewenst door de analysator kunnen glippen waardoor het contrast enorm vermindert. De analysator achter PBS2 zal deze keer de ongewenste s-polarisatie wegfilteren. De combinatie van pre polarisator, analysator en kwartgolfplaat zal het contrast drastisch verhogen.

Daarna zal 'groen 2' gepulst worden. PBS1 zal nu de p-polarisatie propageren naar het optische pad en de s-polarisatie wegfilteren. De FLC zal geschakeld worden in de 'aan-toestand' en zal dus de polarisatie van het licht veranderen van p naar s. Hierna verloopt de propagatie op dezelfde manier als voor 'groen 1'. 'LCOS1' moduleert terug volgens dezelfde beeldinformatie. Gedurende één frame worden beide LED's eenmaal afwisselend gepulst.

3.2.3 Rode/blauwe kanaal

De tweede lichtklep wordt gebruikt om afwisselend blauwe en rode informatie te moduleren. Deze LED's worden, zoals in het groene kanaal, afwisselend gepulst met een hogere piekstroom dan de nominale om hogere piekhelderheden te bekomen. Zoals te zien is in figuur 4.8 worden de blauwe en rode paden gecombineerd met een dichroïsche spiegel na de eerste lens (achter de lichtpijp).



Figuur 4.8: Het blauwe/rode kanaal

In tegenstelling tot het groene kanaal, wordt het licht hier pas gepolariseerd na de prepolarisator (achter de derde lens). De s-polarisatie wordt weggefilterd en de p-polarisatie wordt doorgelaten. PBS3 laat het licht door dat gemoduleerd wordt door 'LCOS2'. We hebben terug een kwartgolflengteplaat tussen de lichtklep en de PBS geplaatst om het contrast te verhogen. Na de PBS wordt de ongewenste p-polarisatie uit het gemoduleerde beeld weggefilterd door de analysator. Dit paneel zal afwisselend blauwe en rode informatie moduleren per frame.

3.2.4 Volledige architectuur

In de vorige paragrafen werden de groene en de rood/blauwe kanalen afzonderlijk beschreven. Bij de volledige architectuur, figuur 4.6, worden deze kanalen gecombineerd door een grotere PBS. Na de analysatoren is de gemoduleerde lichtflux in het groene kanaal p-gepolariseerd en in het rood/blauwe kanaal s-gepolariseerd zodat ze gemakkelijk kunnen gecombineerd worden met een PBS. Bovendien dient de PBS als een bijkomende analysator zodat het contrast verder verhoogd wordt. Na deze component komt er een projectielens. Deze lens moet een werkafstand hebben van minstens 65 mm. De PBS'en hebben zijdes van 32 mm en 50 mm en een brekingsindex van 1.65. Dit betekent dat de optische weglengte doorheen de PBS'en 50 mm is. De nodige spaciëring tussen de componenten (om bijvoorbeeld de analysatoren en de panelen te plaatsen) bedraagt minstens 15 mm.

Met deze 2-LCOS-architectuur bekomen we een totale lichtopbrengst die vergelijkbaar is met die van een 3-LCOS-systeem. Dit komt door de sterke beperking van groene LED's waardoor de rode en blauwe LED's minder dan de helft van hun nominale lichtflux moeten leveren. Uitsparing van één paneel maakt het systeem compacter en vooral goedkoper. Vergeleken met een 1-paneel-kleursequentieel systeem, bekomen we hier een hogere lichtopbrengst en een sterk verminderde colour-breakup. Groen is de meest belangrijke kleur bij beeldschermen. Door nu één LCOS-paneel te reserveren voor enkel groene informatie, verwachten we dat de zichtbaarheid van colour-breakup in deze 2-LCOS-architectuur sterk zal onderdrukt worden.

In deze opstelling zijn de optische paden (groen en rood/blauw) volledig gescheiden (vergelijk met [14]). Het resultaat is dat we hierdoor een hoogkwalitatieve projector verkrijgen met zuivere kleuren omdat er geen overspraak zal optreden tussen de groene kleur, welke de meeste informatie bevat, en de andere kleuren.

3.3 Simulaties en resultaten

Deze architectuur werd gesimuleerd met behulp van de niet-sequentiële stralengangsoftware ZEMAX om de performanties van dit systeem te evalueren. We hebben de volgende eigenschappen onderzocht: de systeemefficiëntie, uniformiteit en het aan/uit-contrast. Deze resultaten worden besproken in het volgende deel. Vervolgens zullen we de kleurbalancerings voor D65-licht berekenen en de uiteindelijke resultaten geven. Deze subparagraaf wordt afgesloten met een besluit van deze simulaties.

Vooraleer we overgaan naar de bespreking, zullen we hier de systeemparemeters en de veronderstellingen kort herhalen. We gebruiken 0.82" LCOS-panelen met een 4:3 aspect ratio. Het f-getal is 2.88 en komt overeen met een lichtkegel van 10°. De systeemétendue is 19.73 mm²sr en de bronétendue 31.88 mm²sr. De GTLP voorziet een overfill van het belichtingsoppervlak van 12%, die afgebeeld wordt op het LCOS-paneel (met behulp van een lenzensysteem) waar deze gemoduleerd wordt. Verder hebben we de volgende veronderstellingen gedaan: de efficiëntie van het LCOS-paneel is slechts 65% (90% vulfactor, 4% absorptie vloeibaar kristal, 75% reflectiviteit spiegel), die van de projectielens 80%, en de lenzen en de PBS'en zijn allemaal AR-gecoat.

3.3.1 Optische efficiëntie, uniformiteit en contrast

De 2-LCOS-architectuur, zoals die voorgesteld is in figuur 4.6, werd gesimuleerd met de veronderstellingen die we hierboven herhaald hebben. Hierbij moet er op gelet worden dat er voldoende aantal stralen gesimuleerd worden. Dit is noodzakelijk voor een correcte weergave en wordt nog belangrijker als we uniformiteits- en contrastsimulaties doen. Daarnaast moet er een filter ingesteld worden om enkel de lichtstralen, die binnen het gewenste f-getal vallen, op te meten. Rond de optische paden worden absorberende oppervlakken geplaatst om te voorkomen dat verstrooide lichtstralen in de projectielens terechtkomen. Dit zou het contrast kunnen verminderen.

We hebben de verschillende kanalen afzonderlijk gesimuleerd door telkens maar 1 kanaal (1 LED) aan, en de rest af te zetten. De resultaten zijn, zoals verwacht, verschillend voor elk kanaal (verschil in verliezen afhankelijk van de golflengte). Ze worden samengevat in tabel 4.6. Hierin worden zowel de afzonderlijke efficiënties als de totale systeemefficiëntie weergegeven. De étendue-efficiëntie is de verhouding tussen de systeem- en de bronétendue.

Verder zijn de efficiënties (verliezen) opgedeeld in GTLP, LCOS, projectielens, projectiescherm en andere verliezen. Deze laatste omvat geometrische en polarisatie verliezen (polarisatietoestand, PBS, polarisator, analysator, etc.). In deze tabel wordt ook het aan/uit-contrast gegeven per kanaal.

| efficiënties | rood | groen 1 | groen 2 | blauw |
|-------------------|-------|---------|---------|-------|
| étendue [%] | 61.9 | 61.9 | 61.9 | 61.9 |
| GTLP [%] | 81.1 | 81.1 | 81.1 | 81.1 |
| LCOS [%] | 65 | 65 | 65 | 65 |
| projectielens [%] | 80 | 80 | 80 | 80 |
| scherm [%] | 92.7 | 92 | 92 | 92.7 |
| andere [%] | 30.50 | 39.10 | 37.24 | 37.60 |
| totaal [%] | 7.38 | 9.39 | 8.95 | 9.10 |
| contrast | >2000 | >8000 | >8500 | >3000 |

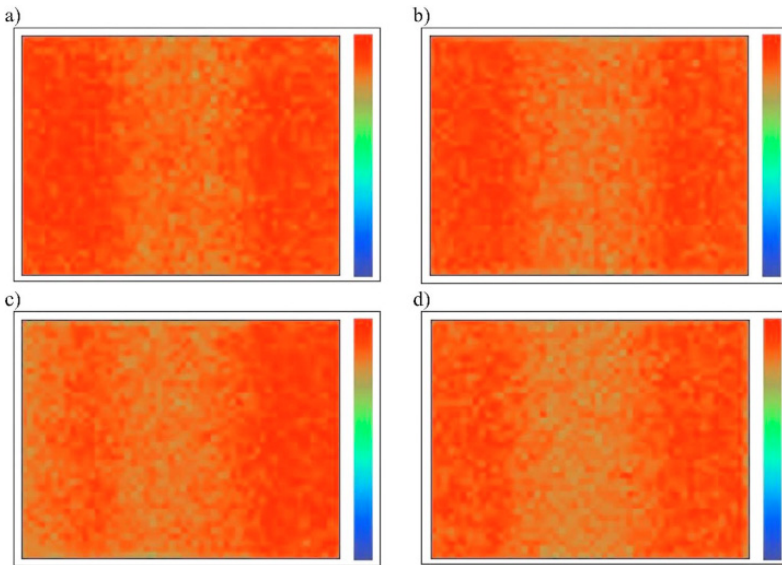
Tabel 4.6: Simulatiesresultaten systeemefficiëntie en contrast

We zien dus dat de totale efficiënties lichtjes verschillend zijn voor de verschillende kanalen. Voor de groene en blauwe kanalen liggen deze rond de 9% en voor het rode kanaal rond de 7.4%. De lage performantie van het rode kanaal is vooral te wijten aan de slechte werking van de PBS bij deze golflengten. We zullen later zien dat deze kleur de limiterende kleur zal zijn voor dit 2-LCOS-systeem.

Voor de contrastsimulaties hebben we voor de projectielens de lichtflux opgemeten bij aan- en uit-toestand van de lichtklep. Die werd verwezenlijkt door al dan niet een kwartgolflengteplaat (voorstelling vloeibaar kristal in aan-toestand) te plaatsen voor de spiegel van het LCOS-paneel. De verhouding tussen deze lichtfluxen geeft het contrast weer. In tabel 4.6 zien we dat het contrast voor het groen kanaal groter is dan 8000:1, wat een uitstekend resultaat is. Het contrast van de blauwe en rode kanalen zijn groter dan respectievelijk 3000:1 en 2000:1, wat ook wel zeer goed is. We zien dus dat het rode kanaal weer het slechtste contrast heeft. Dit heeft te maken met de slechte PBS werking bij grotere golflengten. Het lek van de PBS is veel groter voor de rode kleur. Het groene kanaal heeft een veel beter contrast. Dit komt door de aanwezigheid van een extra PBS die dus als polarisator fungeert.

Een andere belangrijke parameter van de projector is de uniformiteit van de lichtbundel die de lichtklep zal belichten. Die zal zich weerspiegelen in de uniformiteit van het beeld op het scherm. De GTLP levert een uniforme bundel die afgebeeld wordt op het LCOS-paneel. In figuur 4.9 worden de

lichtdistributies ter hoogte van de panelen afgebeeld. We zien hier, in tegenstelling tot de vorige architectuur, dat de lichtflux mooi, uniform verdeeld is over het ganze lichtkleppoppervlak. De grid, die bij deze simulaties gebruikt werd, was 52x39 en het aantal stralen 5 miljoen. Dit is nodig om een juiste weergave te hebben.



Figuur 4.9: Lichtdistributies op de LCOS-panelen:
a) groen 1 b) groen 2 c) rood d) blauw

Om deze goede uniformiteit te bevestigen, hebben we ze terug numeriek berekend volgens de ANSI 13-puntsmethode [13]. Deze methode hadden we reeds besproken bij de vorige architectuur. We drukken het helderste en het donkerste punt uit ten opzichte van de gemiddelde helderheid. In tabel 4.7 worden de resultaten gegeven per kanaal. De grootste afwijking is slechts 8.2%. Op basis van deze getallen kunnen we stellen dat de uniformiteit op de display zeer goed zal zijn. De uniformiteit op het scherm zal iets minder zijn ten gevolge van de niet-idealiteit van de projectielens.

| | rood | groen 1 | groen 2 | blauw |
|-----------------------|------|---------|---------|-------|
| helderste locatie [%] | +4.6 | +4.9 | +7.0 | +5.5 |
| donkerste locatie [%] | -6.9 | -8.2 | -7.9 | -5.7 |

Tabel 4.7: Resultaten ANSI-uniformiteit LCOS-panelen

3.3.2 OSTAR LED's en kleurbalancerings

OSTAR LED's zijn niet ingebed in een epoxy hemisfeer zoals Luxeon LED's en stralen rechte lijnen in de lucht. Hierdoor is hun extractie efficiëntie niet hoog. Door nu de LED's optisch te koppelen met de lichtpijp (GTLP), zal zowel de bronérendue als de extractie efficiëntie evenveel verhogen, namelijk met ongeveer een factor n^2 (≈ 2.3) [15]. In de praktijk zal de extractieverhoging niet meer zijn dan een factor twee. Bij de simulaties hebben we rekening gehouden met deze verhoging.

In deze architectuur worden blauwe en rode LED's alsook twee groene LED's afwisselend gepulst met een duty cycle van 50% en op een hogere piekstroom. Het gemiddeld verbruikt elektrisch vermogen wordt constant gehouden zoals bij de nominale aansturing. Deze methode kwam reeds aan bod in hoofdstuk 3. De pulsefficiëntie, welke gedefinieerd wordt als de piekflux gedeeld door twee keer de gemiddelde flux, zou in principe 100% moeten zijn, maar door niet-idealiteiten van de LED's (stijgende spanningen en dalende efficiënties bij stijgende stromen), is dit slechts 78.4% voor groene en blauwe LED's en 74.5% voor de rode LED. In tabel 4.8 worden de lichtopbrengsten van deze gepulste en optisch gekoppelde LED's gegeven. We vertrekken van de lichtfluxen die opgegeven zijn in de datasheets.

| | rood | groen 1 | groen 2 | blauw |
|---------------------------|-------|---------|---------|-------|
| lichtopbrengst [lm] | 321 | 321 | 321 | 83 |
| optische koppeling | x2 | x2 | x2 | x2 |
| pulsefficiëntie | 0.745 | 0.784 | 0.784 | 0.784 |
| totaal [lm] | 478.3 | 503.3 | 503.3 | 130.1 |
| lumen ratios voor D65 [%] | 31.91 | 30.35 | 31.84 | 5.90 |

Tabel 4.8: Samenvatting beschikbare lichtopbrengst LED's en kleurbalancerings

Op basis van de kleurcoördinaten van de LED's, kunnen de lumenverhoudingen berekend worden om een gebalanceerd D65-wit licht te verkrijgen. We hebben de kleurcoördinaten opgemeten met een spectrometer en deze verschillen lichtjes van die uit tabel 4.2. Dit komt omdat we nu de metingen gedaan hebben onder gepulst regime. Dit veroorzaakt een zekere verschuiving in golflengtes (zie hoofdstuk 3). De vereiste lumenverhoudingen zijn voor deze LED's 66.34% groen, 27.41% rood en

6.25% blauw licht. Groen 1 en groen 2 moeten eenzelfde bijdrage leveren namelijk 33.17%, om geen flickering te veroorzaken. De geprojecteerde flux moet dus deze kleurverhoudingen vertonen om D65-licht op het scherm te verkrijgen. Aangezien de systeemefficiënties van de kanalen verschillend zijn (zie tabel 4.6), moeten we dit in rekening brengen. De lumenverhoudingen aan de bron zullen dan ook anders zijn. Zo zal er bijvoorbeeld meer rood licht nodig zijn aan de bron, omdat de efficiëntie van het rode kanaal lager is dan die van de andere kanalen. De verrekende lumenverhoudingen zijn respectievelijk 30.26%, 31.75%, 32.0% en 5.93% voor groen 1, groen 2, rode en blauwe LED's om D65-licht op het scherm te krijgen. Merk op dat de bijdrage van beide groene LED's verschillend zijn omdat deze kanalen ook een verschillende efficiëntie hebben. Deze resultaten zijn eveneens gegevens in tabel 4.8.

3.3.3 Resultaten

In de vorige paragrafen hebben we de efficiënties van de verschillende kanalen, de lichtopbrengsten van de LED's en de vereiste lumenverhoudingen voor D65-licht berekend. Door nu deze gegevens (tabellen 4.6 en 4.8) te combineren kunnen we de uiteindelijke lichtopbrengst van de 2-LCOS-projector bepalen. De resultaten zijn terug te vinden in tabel 4.9. Hierin hebben we de nodige lichtfluxen per LED, de efficiënties, de verhoudingen en de geprojecteerde flux opgenomen. Deze projectorarchitectuur levert bijna 130 lm D65-licht en heeft een globale efficiëntie van 9.3%.

| | rood | groen 1 | groen 2 | blauw |
|--------------------------|-------|---------|---------|-------|
| ingangflux [lm] | 478.3 | 455.0 | 477.3 | 88.5 |
| stelsel efficiëntie [%] | 7.38 | 9.39 | 8.95 | 9.10 |
| geprojecteerde flux [lm] | 35.30 | 42.72 | 42.72 | 8.05 |
| | | 85.44 | | |
| lumen ratios [%] | 27.41 | 66.34 | | 6.25 |
| D65 wit licht [lm] | 128.8 | | | |

Tabel 4.9: Gebalanceerde lichtopbrengst 2-LCOS-projector

Bij een LED projector is gewoonlijk de groene LED de beperkende lichtbron, maar bij deze 2-LCOS-architectuur is het de rode LED die limiteert. Daarom wordt deze laatste maximaal aangestuurd. De groene LED

moet ook bijna maximum (>90%) vermogen leveren en de blauwe LED heeft slechts een uitsturing van 68% nodig.

In tabel 4.6 werden de contrasten van de optische kanalen individueel berekend. We zijn echter ook geïnteresseerd in het contrast van het systeem in een kleurgebalanceerde situatie. Daarom hebben we de simulaties herhaald met de ingangsfuxen zoals die gegeven zijn in tabel 4.9. We hebben zowel de aan- als de uit-toestand gesimuleerd. Het aan/uit-contrast in deze situatie bedraagt 2500:1. Dit is een hoge contrastwaarde, wat een maat is voor de beeldkwaliteit. We zullen hiermee zowel in de donkere als in de lichte delen van het beeld nog details kunnen waarnemen. Vergeleken met de 3-LCOS-architectuur, verkrijgen we hier een veel hogere contrastwaarde. Dit komt onder andere door de aanwezigheid van bijkomende PBS'en om de verschillende kanalen samen te voegen. Deze componenten fungeren eveneens als prepolarisator en opruimanalysator.

Analoog aan het 3-LCOS-systeem zullen we hier ook een veel groter kleurengamut bestrijken. Hierdoor zullen de beelden meer gesatureerd en realistischer overkomen. Vergeleken met de gamut van de moderne NTSC-standaard die gebruikt wordt bij een klassiek televisiesysteem zoals NTSC, PAL, SECAM of HDTV, kunnen we met deze LED projector veel meer kleuren (+70%) reproduceren (opgemeten bij CIE(x,y)-1931-stelsel). Dit zal de beeldkwaliteit eveneens verhogen.

3.3.4 Besluit

We hebben een compacte en efficiënte LED projector met twee LCOS-lichtkleppen gesimuleerd. Eén van deze lichtkleppen moduleert afwisselend blauwe en rode informatie, terwijl de andere continu groene informatie moduleert. Dit was nodig om een gebalanceerd witlicht (D65) te realiseren. Deze projector produceert bijna 130 lm D65-licht en heeft een zeer hoog contrast (2500:1) en een goede uniformiteit. De totale systeemétendue is slechts 20 mm²sr. Ondanks de semi-kleursequentiële werking, zullen de color-breakup en kleuroverspraak zeer beperkt zijn. Dankzij het gebruik van LED's als lichtbron, zal de projector een grotere (+70%) kleurengamut bereiken vergeleken met de klassieke systemen. Hierdoor zal de beeldkwaliteit vergroten en zullen we veel meer kleuren kunnen reproduceren.

Op basis van deze positieve simulatieresultaten hebben we besloten om over te gaan tot de opbouw van dit projectiesysteem. De rest van dit hoofdstuk zal handelen over deze experimentele opstelling.

3.4 Experimentele opstelling

De gedane studies en de simulatieresultaten toonden reeds aan dat het mogelijk is om met LED's kwalitatieve projectoren te ontwerpen die voldoende lichtopbrengst leveren. Simulaties zonder experimentele verificatie hebben echter niet veel bewijskracht. Daarom gaan we hier een demonstratoropstelling (van de hierboven besproken 2-LCOS-architectuur) opbouwen en deze bespreken. Bij het bouwen van de experimentele opstelling zijn we een aantal problemen tegengekomen die er niet waren bij de simulaties. Eerst gaan we deze problemen bestuderen en de voorgestelde oplossingen bespreken. In bijlage C zijn er enkele beelden van de demonstratoropstelling en de elektronica errond afgebeeld.

3.4.1 Mechanisch ontwerp

De realisatie van een optische opstelling is niet zo vanzelfsprekend. In de simulator kunnen de componenten met een zeer grote nauwkeurigheid op eender welke positie en hoogte geplaatst worden zonder rekening te houden met de zwaartekracht. In de praktijk is dit veel moeilijker en komt er veel mechanisch werk aan te pas. We hebben voor elke component een aluminium houder op maat gefabriceerd. Hierbij werd er rekening gehouden met het feit dat de optische assen van alle componenten moeten samenvallen. Daarom hebben deze houders verschillende hoogtes. Hierdoor zullen alle componenten in de opstelling automatisch gealigneerd zijn (in de hoogte).

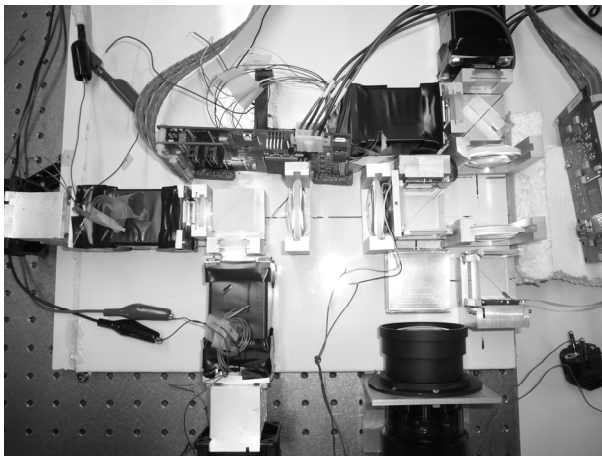
Voor het belichtingssysteem (LED + GTLP) is er een houder ontworpen die de LED juist in het ingangsvlak van de GTLP positioneert en deze laatste door inklemming vasthoudt. Met behulp van regelbare moeren wordt de positie van de LED in de z-richting nauwkeurig bijgesteld totdat ze optisch contact maakt met de lichtpijp. Om dit contact te bevorderen wordt er index matching gel gebruikt. Rondom de houder van de lichtpijp wordt er zwarte tape geplakt om te voorkomen dat er strooilicht in het systeem terecht komt.

De basisplaat waar de opstelling op gebouwd wordt is een metalen plaat. We hebben magneetstrips voorzien onder de houders, zodat deze blijven plakken (magnetisch) op de basisplaat. Dit geeft een zekere robuustheid aan de opstelling. Bovendien is het ook gemakkelijk om de componenten te positioneren en indien nodig de positie lichtjes aan te passen. Dankzij deze magneetstrips hebben we een flexibel positioneringsmechanisme (handmatig) ontworpen dat stevig blijft door de magnetische aantrekkingskracht. De LCOS-panelen worden eveneens aangebracht op een

aluminium houder met magneetstrips. Hierdoor kunnen de drie translatie- en twee rotatiebewegingen gemakkelijk uitgevoerd worden.

Door de fysische afmetingen van deze houders, die doorgaans groter zijn dan de componenten zelf, kunnen ze elkaar in de weg staan. Dit hebben we zoveel mogelijk trachten te verhelpen door ze niet te groot te maken en door aan de architectuur te tunen waar het nodig was. Dit was echter niet altijd mogelijk. In de architectuur (zie figuur 4.6) worden de lichtengines (G1/G2 en R/B) evenwijdig naast elkaar geplaatst en door middel van spiegels worden ze in de juiste optische paden afgebogen. Dit doet men om het systeem compact te maken. Echter door de logge houders van het belichtingssysteem, is dit fysisch niet meer mogelijk. Daarom hebben we de koude spiegels in de opstelling weggelaten en de lichtpijpen orthogonaal opgesteld waardoor ze meer plaats innemen.

In figuur 4.10 wordt de opstelling getoond. De afgeplakte (zwarte) delen zijn de belichtingssystemen (LED + GTLP). Groen 1 en groen 2 (links onder) worden gecombineerd met een PBS. Blauwe en rode kanalen (rechts boven) worden gecombineerd met een dichroïsche spiegel. Vervolgens worden de uitgangsvlakken van de GTLP's afgebeeld op de LCOS-panels door middel van lenzen. De modulerende PBS'en en de recombinerende PBS moeten nog geplaatst worden op hun houders. De LCOS-panels zijn eveneens gepositioneerd op hun houder.



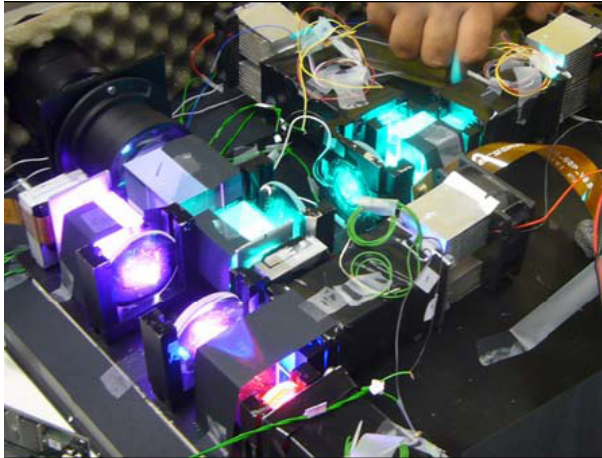
Figuur 4.10: Opstelling 2-LCOS-projector

De kwartgolflengteplaten, of de skew-ray depolarisatie platen, worden geplaatst tussen de PBS en de LCOS-panelen. Voor deze circulaire platen zijn er eveneens smalle houders gemaakt waarin ze gemakkelijk geroteerd kunnen worden. Deze platen moeten exact volgens hun optische as (parallel of orthogonaal aan de polarisatierichting) geplaatst worden om een hoog contrast te verkrijgen. Daarom is het cruciaal dat de rotatiebeweging zeer nauwkeurig kan uitgevoerd worden. Om de Fresnel verliezen tussen het LCOS-paneel en de $\lambda/4$ -plaat te minimaliseren, worden deze optisch gekoppeld met index matching gel. Hierdoor verminderen we het aantal glas-lucht overgangen van 6 naar 2. Dit komt overeen met een winst van bijna 18% (0.96^4).

In het groene kanaal bevindt zich een FLC om de polarisatietoestand van groen 2 te wijzigen. Deze component wordt vastgeklemd in een houder met een circulaire opening. Het is eveneens mogelijk om de FLC te roteren om de ideale hoekpositie te bepalen. Integenstelling tot de simulaties (figuur 4.6) wordt de FLC hier vlak achter de middelste lens geplaatst in plaats van de laatste lens. Dit hebben we gedaan om drie redenen: 1) tussen de derde lens en de PBS houder is er niet veel ruimte meer over, 2) de 'clear aperture' van de FLC is te klein om daar de lichtspot volledig te kunnen opvangen en 3) achter de middelste lens, in het focaalvlak van de eerste lens, fungeert de FLC eveneens als diafragma dat de ongewenste (grote) hoeken wegfiltert.

Ten slotte plaatsen we nog een projectielens achter de combinerende PBS. Deze projectielens (een zoom lens) heeft een 'front focal length' (FFL) van 80 mm en een $f^\#$ van 3.0. Het systeem f-getal is 2.88 en dus zal de projectielens zeker een deel van het licht tegenhouden.

Om de ongewenste reflecties en strooilicht te voorkomen, hebben we de basisplaat en de houders zwart geverfd. Daarnaast hebben we de optische paden afgeschermd met zwart karton zodat het strooilicht tegengehouden wordt. In figuur 4.11 wordt de demonstratoropstelling afgebeeld. Tijdens de metingen werd er nog een zwart karton over de volledige opstelling geplaatst. Dit is vooral belangrijk voor de contrastmetingen.



Figuur 4.11: 2-LCOS-demonstrator

3.4.2 QXGA LCOS-paneel

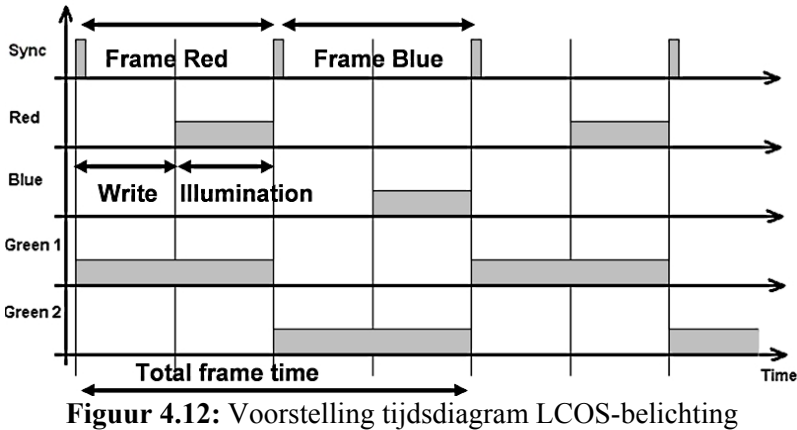
In de simulator werden de LCOS-panelen gemodelleerd als kwartgoflengteplaten (Jones Matrices) met een spiegel erachter. Dit is in principe een juiste, maar een zeer simplistische benadering. Hierbij wordt er geen rekening gehouden met het exacte gedrag van het vloeibaar kristal, de aansturing, reactiesnelheid, etc. In de praktijk is een LCOS-paneel veel complexer, waardoor er afwijkingen van de simulatieresultaten zullen zijn.

Voor onze opstelling hebben we gekozen voor QXGA LCOS-panelen van het bedrijf Gemidis. Deze zijn hoogresolutie panelen, 2048x1536 (= 3 megapixel), die gebaseerd zijn op ‘vertically aligned nematic’ (VAN) vloeibaar-kristaltechnologie [19]. Deze technologie werd al besproken in hoofdstuk 1. Door homeotropische alignering kunnen er met VAN LCOS-panelen intrinsiek zeer hoge contrasten bekomen worden. Door de aanwezigheid van een kleine pretilthoek zal de reactietijd van het kristal, bv. van uit- naar aan-toestand, klein zijn. Voor deze panelen is dit ongeveer 2.3 ms.

Samen met de LCOS-panelen werd ook de aanstuurelektronica geleverd. Deze bestaat uit één ‘balder’-bord en één ‘modi’-bord per paneel (zie bijlage C). Het balder-bord haalt de beeldinformatie binnen via een digitale (DVI) ingang aan 60 fps. Per frame wordt er een synchronisatie signaal gegenereerd. Deze informatie wordt verdubbeld met een ‘frame doubler’. Vervolgens wordt het beeld opgeplitst in zijn (R, G, B) componenten die voorgesteld worden door een 10-bit waarde. De (R, G, B)-uitgangen van de

balder worden elk verbonden met een modi-bord, waar ook een LCOS-paneel aan hangt. Deze modi-borden zorgen voor de juiste elektrische spanningen die op de panelen moeten aangelegd worden afhankelijk van de binnenkomende beeldinformatie. Hierin gebeurt ook de nodige gammacorrectie (zie later). De informatietransfer tussen de balder en de modi gebeurt aan 120 Hz. Door de frameverdobbeling zal er dus om de 60 Hz een nieuw frame geschreven worden. Met andere woorden, elke frame wordt twee keer geschreven aan 120 Hz. Dit gebeurt sequentieel (lijn per lijn), waardoor de eerste keer dat een nieuw frame geschreven wordt, het vorige frame nog gedeeltelijk op het paneel staat. Voor een drie paneel systeem is dit geen probleem aangezien de panelen voortdurend met dezelfde kleur belicht worden. Bij een kleursequentieel systeem is dit echter een groot probleem. Op geen enkele moment kan de display in principe met de juiste kleur belicht worden aangezien er bijna altijd beeldinformatie van twee basiskleuren tegelijk op verschillende delen van de display staat. Dit kan men oplossen door gebruik te maken van een 'scrolling color' [20] projectiesysteem. Dit is een systeem waarbij het licht met de juiste kleur mee scrollt over de display samen met de beeldinformatie.

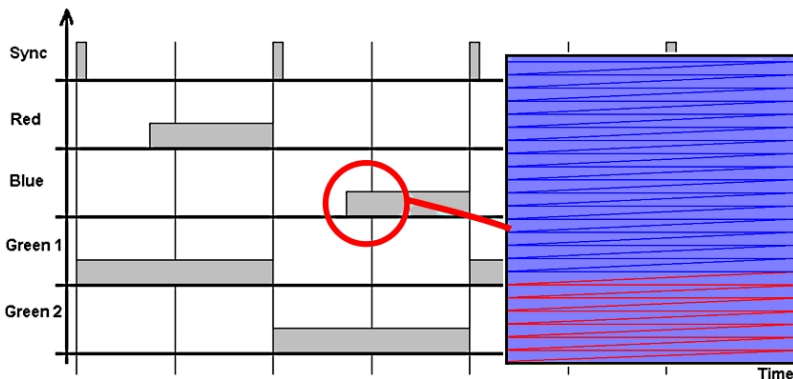
In onze 2-LCOS-systeem hebben we dit probleem anders aangepakt. Voor het groene kanaal is er in ieder geval geen probleem omdat één paneel continu gereserveerd is voor groene informatie en er dus geen sprake is van kleursequentieel werking. De groene LCOS wordt continu belicht. Het tweede paneel moet afwisselend rode en blauwe informatie moduleren en is dus kleursequentieel. In principe staat er op elk moment informatie van beide kleuren op het paneel en kunnen we nooit met de juiste kleur belichten. Doen we dit toch, dan zullen we een mengkleur (tussen rood en blauw) krijgen voor rode en blauwe pixels. Echter een groot voordeel van deze QXGA Gemidis panelen is dat elke beeld twee keer geschreven wordt aan dubbele beeldfrequentie (120 Hz). Dit betekent dat na de eerste schrijfcyclus op de display enkel informatie staat van één kleur en dus gedurende de tweede schrijfcyclus de display kan belicht worden met de juiste kleur. Hierdoor zal de belichtingstijd per kleur hoogstens een duty cycle van 25% mogen hebben in plaats van 50%. Gedurende de helft van de beschikbare tijd wordt er dus niet belicht. Dit wordt schematisch voorgesteld in figuur 4.12.



Figuur 4.12: Voorstelling tijdsdiagram LCOS-belichting

In principe moet er nog 2.3 ms (reactietijd vloeibaar kristal) extra gewacht worden zodat ook de laatste rijen pixels de juiste toestand kunnen aannemen. Hiermee zullen we zuivere kleurweergave verkrijgen en zal er op geen enkele positie ‘color bleeding’ [21] optreden. ‘Color bleeding’ is het proces waarbij, bijvoorbeeld, rode informatie met blauw licht zal belicht worden. Met andere woorden, de informatie voor een bepaalde kleur wordt in een verkeerde kleur weergegeven.

In figuur 4.13 wordt er een geval geschetst waarbij er ‘color bleeding’ optreedt. Zo zien we dat blauwe informatie nog niet volledig geschreven is, terwijl er met blauw belicht wordt, met andere woorden een deel van het scherm is nog beschreven met rode informatie van het vorige frame die blauw zal weergegeven worden.



Figuur 4.13: Tijdsdiagram van een geval met ‘color bleeding’

Bij de simulaties hadden we verondersteld dat de framedata ogenblikkelijk op het paneel geschreven werd en we dus de beschikbare belichtingstijd ten volle kunnen benutten. Hierdoor zal de lichtopbrengst van de experimentele opstelling minstens halveren. Indien we nog rekening houden met de reactietijd van het kristal, zal het verlies nog groter zijn.

3.4.3 Aanpassing balder-bord voor kleursequentieel werking

In de vorige paragraaf werd het principe van het schrijven van informatie naar en het belichten van het LCOS-paneel schematisch beschreven. Dit moet nog echter geïmplementeerd worden. Het balder-bord splitst het frame informatie in (R, G, B)-signalen en zet deze 10-bit waardes op de gelijknamige uitgangen. Omdat deze borden voor een drie paneel systeem ontworpen zijn, komt er op elke uitgang de informatie van maar één kleur terecht.

In onze systeem werken we met 2 panelen (en dus 2 modi-borden) waarbij de rode en de blauwe informatie afwisselend aangeboden moeten worden aan één LCOS-paneel. Echter de elektronica was er oorspronkelijk niet voor voorzien. Dit kon op twee manieren verholpen worden.

De eerste methode is gebaseerd op een softwarematige behandeling van de beeldinformatie. Hierbij wordt de film bewerkt vooraleer hij naar het balder-bord gestuurd wordt. Deze bewerking houdt in dat elke frame ontduubeld wordt en vervolgens de blauwe en rode informatie van de oneven (gekopieerde) frames omgewisseld wordt. Het groene kanaal laten we ongemoeid. De bewerkte versie van de film levert dan 30 nieuwe frames per seconde en in de twee opeenvolgende subframes zit er afwisselend rode en blauwe informatie van eenzelfde frame. Deze versie wordt aangeboden aan het balder-bord, die de informatie gaat ontrafelen in (R, G, B) kanalen. We verbinden één modi-bord (+ LCOS) met het groene kanaal en één modi-bord met de rode of blauwe kanaal. De beeldinformatie verandert nu om de 30 Hz, waardoor er flikkering zal waarneembaar zijn voornamelijk bij rode en blauwe beelden. De tijdsdiagramma van dit systeem wordt gegeven in figuur 4.12. Hierin is de totale frametijd (1/30) seconde en de rode en/of blauwe frame tijd (1/60) seconde. De eerste schrijftijd (write) en de belichtingstijd zijn elk (1/120) seconde. De belichtingstijd moet in principe nog 2.3 ms kleiner zijn (zie vorige paragraaf). De groene LCOS wordt continu belicht. De sync-puls komt om de (1/60) seconde, dus per subframe, maar niet per se in het begin van een frame zoals voorgesteld in figuur 4.12. In een volgende paragraaf gaan we hier dieper op ingaan.

Deze aanpak werkt wel degelijk, maar moeten we telkens een film prepareren, wat nogal omslachtig is. Schrijven we een script dat dit realtime doet, dan krijgen we soms problemen omdat de pc een zekere verwerkingstijd nodig heeft en de datastroom niet kan volgen.

De tweede methode bestaat erin om wat we softwarematig deden, te implementeren in het balder-bord. De video data komt via de DVI ingang binnen aan 60 fps. De oneven frames worden ontrafeld in (R, G, B)-componenten en naar de overeenkomstige uitgangen gestuurd. Bij de even frames daarentegen, wordt de inhoud van R- en B-component omgewisseld en zo naar de uitgangen gestuurd. De R-uitgang heeft dan afwisselend R, B, R, B, etc. en de B-uitgang B, R, B, R, etc. De G-uitgang heeft continu groene informatie. Het modi-bord en het LCOS-paneel voor R/B-kanaal wordt dan op de R- of B-uitgang aangesloten. De werkelijke framesnelheid is nu terug 30 nieuwe fps. Het tijdschema in figuur 4.12 blijft hier ook geldig. Deze implementatie vereiste een firmware aanpassing in het balder-bord. Dit werd gerealiseerd door de fabrikant van de panelen (Gemidis).

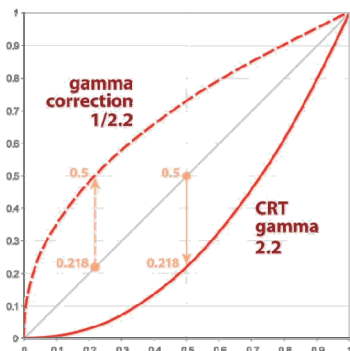
Het gebruik van één paneel voor twee basiskleuren brengt een ander probleem met zich mee. Om een juist grijsniveau weergave te realiseren, wordt er in het modi-bord een gammacorrectie toegepast. Deze correctie is sterk afhankelijk van de kleur (golflengte), omdat het elektro-optisch gedrag van het vloeibaar kristal golflengteafhankelijk is. Aangezien we rode en blauwe informatie moduleren door eenzelfde paneel, kan de correctie onmogelijk voor beide kleuren goed zijn. In principe kan dit opgelost worden door een tweede “look-up-table” (LUT) te voorzien in het modi-bord. In elke van de LUT's zullen de correctieparameters voor respectievelijk rode en blauwe informatie gestockeerd worden en afhankelijk van het subframe (even-oneven) zal de juiste LUT aangesproken worden bij de weergave op het LCOS-paneel. Echter deze modi-borden waren er niet voor voorzien. We hebben dit probleem softwarematig aangepakt. In het modi-bord werden de parameters voor rood gestockeerd, omdat deze kleur meer kleurinformatie bevat dan de blauwe. De gammacorrectie voor blauw werd dan manueel via de videokaart gerealiseerd. Deze correctie is dan een superpositie van de standaard correctie voor blauw + inverse gammacorrectie voor rood. De blauwe informatie van het videokanaal wordt dan pre gecorrigeerd aangeboden aan het modi-bord, dat de inverse correctie voor rood eruit haalt en, zoals gewenst, enkel een gecorrigeerde blauwe informatie op het LCOS-paneel zet.

3.4.4 Gammacorrectie

Gammacorrectie, gamma encoding/decoding of simpelweg gamma is de naam van een niet-lineaire operatie om de intensiteiten in de videosignalen en/of afbeeldingen te encoderen of te decoderen [22]. Een vereenvoudigde formule voor deze correctie wordt gegeven door formule 4.3, waarbij V_{IN} en V_{OUT} reële getallen zijn tussen 0 en 1. Een gamma waarde kleiner dan 1 wordt vaak encoding gamma genoemd en het proces gamma compressie. Gamma groter dan 1 wordt decoding gamma en het proces gamma expansie genoemd.

$$V_{OUT} = V_{IN}^{\gamma} \quad (4.3)$$

Een CRT televisie heeft ten gevolge van fosforescentie een niet lineair gedrag en zet de videosignalen om naar licht op een niet-lineaire manier. De lichtintensiteit (V_{out}) staat in verhouding met de bronspanning (V_{in}) volgens formule 4.3 met een γ -waarde van 2.2. Een CRT toestel is dus een natuurlijke decoder. Willen we nu een juiste weergave bekomen, dan moet het videosignaal geëncodeerd zijn met de omgekeerde γ -waarde en dan pas naar de CRT gestuurd worden. Deze gamma curven worden gegeven in figuur 4.14. Hierin is de onderste (exponentiële) curve de gamma van de CRT-toestel en de bovenste (logaritmische) curve de nodige encodingcurve. Tussenin is er een lineaire omzettingcurve van input naar output. Nemen we nu bijvoorbeeld een input waarde van 0.5. Deze komt overeen met output van 0.5 (halve maximum intensiteit) volgens de lineaire curve. Echter de CRT volgt deze curve niet en zet de output op 0.22 (donkergrijs). Om een juiste weergave te kunnen realiseren, moet er dus een encoding van de datasignalen voorafgegaan worden. Dit gebeurt door de bovenste curve (gammacorrectie). Een donkergrijs beeld ($x=y=0.22$) wordt eerst gemapt naar $y=0.5$ volgens deze curve. Vervolgens zet de CRT gamma bij weergave deze om naar 0.22. De opname van de beelden moeten dus gebeuren volgens de correctie curve met gamma (1/2.2).

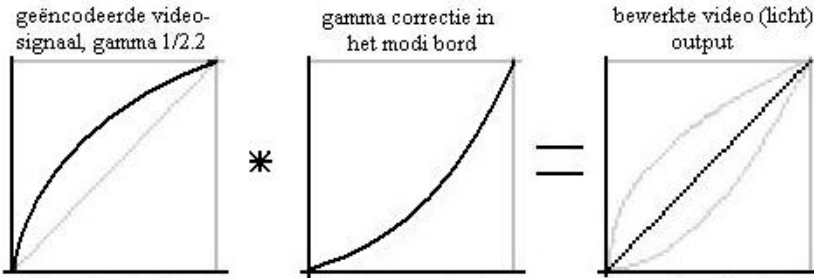


Figuur 4.14: Gamma curven voor een CRT

De gamma encoding is historisch ontstaan om een juiste weergave op de CRT's te verwezenlijken. De camera opnamen en de beeldinformaties worden steeds geëncodeerd zodat deze geschikt zijn voor weergave via een CRT-toestel. Alle videobeelden worden in dit formaat opgeslagen. Bij weergave op een ander type beeldscherm, moet de gamma decoding van de CRT als het ware nagebootst worden. Zo wordt bijvoorbeeld bij een LCD-scherm de gamma op 2.2 gezet en de correctieparameters berekend om een juiste mapping te kunnen doen.

In ons projectiesysteem moeten we hier eveneens rekening mee houden. De binnenkomende videosignalen zijn gamma geëncodeerd. Aangezien de LCOS-panelen niet hetzelfde niet-lineair gedrag vertonen als een CRT, moeten de videosignalen gedecodeerd worden. Dit gebeurt in de modi-borden met de parameters die opgeslagen worden in de daarvoor voorziene LUT's. Voor het opmeten van deze decoderingsparameters is er een standaard calibratieprocedure die de fabrikant uitvoert op de panelen. Zo hebben we een calibratie laten uitvoeren voor beide panelen met respectievelijk groene en rode beeldinformatie. Deze calibratie-parameters doen naast de gamma decoding eveneens een correctie op de niet-lineariteiten van de optische responscurve van de LCOS-panelen. Aangezien de rood/blauwe LCOS-paneel (via zijn modi-bord) geconfigureerd is voor de rode gamma-decoding, zal de blauwe informatie verkeerd weergegeven worden. Hiervoor moeten we een softwarematige precorrectie doen in het blauwe videokanaal. Dit is een functionaliteit van de videokaart waarin een zekere conversiecurve per kleurcomponent kan ingesteld worden. Dit hebben we gedaan en besproken in de vorige paragraaf. In figuur 4.15 wordt een mogelijke gammacorrectie weergegeven. Hierin wordt het videosignaal geëncodeerd aangeboden aan het modi-bord waar de correctie (degamma)

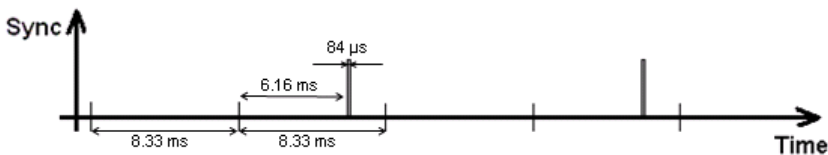
gerealiseerd wordt. Het resultaat is een weergave waar geen gamma meer in zit.



Figuur 4.15: Gamma behandeling van het videosignaal

3.4.5 De sync-puls

Het sync-sig-naal is een korte ($84 \mu\text{s}$), positieve puls die gegenereerd wordt in het balder-bord synchroon met de binnenkomende beeldinformatie. Per frame wordt er een nieuwe puls gegenereerd, maar niet in het begin van het frame. De positie van dit sig-naal hebben we experimenteel bepaald en wordt gegeven in figuur 4.16. De sync-puls komt tijdens de tweede schrijfcyclus (na 6.16 ms), m.a.w. na 14.5 ms na de initialisatie van het nieuwe frame.



Figuur 4.16: Positie van de sync-puls

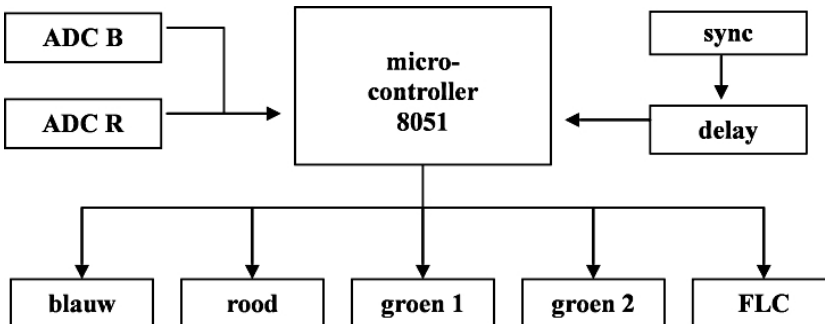
Aangezien het sync-sig-naal gegenereerd wordt op het ritme van het frame, zullen de computer, die de inhoud aanbiedt, en het balder-bord onderling synchroon werken. Nu moeten we nog de belichting (LED's) synchroon laten verlopen met de panelen. Hiervoor gaan we dit synchronisatiesig-naal gebruiken. Op onze vraag heeft Gemidis dit sig-naal (op het balder-bord) naar buiten gebracht. Omdat deze puls niet op het gewenste moment komt (schrijftijd 8.33 ms + reactietijd 2.3 ms = 10.63 ms), gaan we deze elektronisch vertragen en vervolgens als trigger sig-naal gebruiken om de LED's aan te sturen. De manier waarop dit gebeurt wordt in de volgende paragraaf besproken.

3.5 Elektronische aansturing

Een deel van de elektronica, betreffende aansturing van de LCOS-panelen, werd reeds besproken. Hiervoor wordt er gebruik gemaakt van de drivers (balder- en modi-borden) die bij de panelen geleverd zijn. De aansturing van de LED's en de FLC moet nog gerealiseerd worden. Daarvoor hebben we aantal schakelingen ontworpen die we in deze paragraaf gaan bespreken.

LED's worden aangestuurd met MOSFET-schakelingen waarin de transistoren gebruikt worden als schakelaar. Voor de FLC gebruiken we eveneens twee transistorschakelingen. De aansturing en de synchronisatie van deze circuits gebeurt met een microcontroller die de sync-puls van het balder-bord als input gebruikt en zelf de nodige uitgangssignalen genereert om de versterkerschakelingen te triggeren. De sync-puls wordt vertraagd aangeboden aan de microcontroller. Hiervoor hebben we een circuit (delay) opgebouwd waarbij de vertraging manueel kan bijgesteld worden. Om de pulsduur van de gepulste (rode/blauwe) LED's te bepalen en deze 'on-the-fly' bij te regelen, hebben we twee bijkomende schakelingen opgebouwd (ADC's) rondom de controller.

De microcontroller is dus het hart van de aansturing die de juiste wisselwerking van de LED's organiseert, de synchronisatie met de panelen realiseert en de juiste golfvormen genereert. Figuur 4.17 toont een blokdiagram van het aanstuurschema. Elk deelblok gaan we in de volgende subparagrafen in detail bespreken. Het totaal elektrisch vermogen dat deze 2-LCOS-projector verbruikt is ongeveer 80W.



Figuur 4.17: Blokdiagram elektronische aansturing

3.5.1 LED-schakelingen

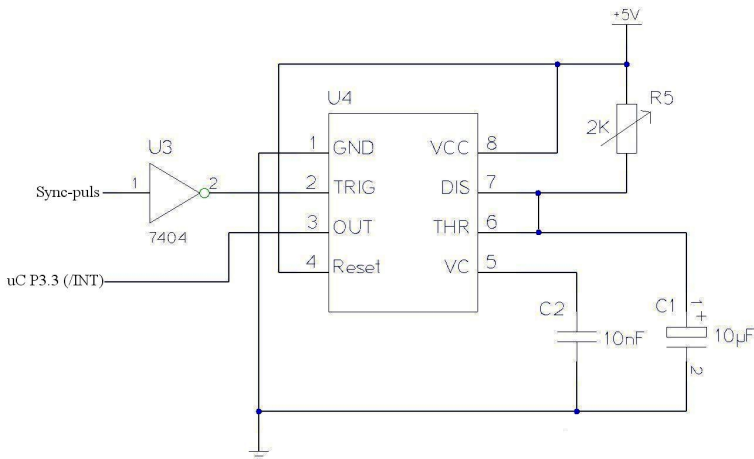
LED's worden in een transistorschakeling opgenomen waarin de transistor als schakelaar fungeert. Deze schakelt op basis van het gatesignaal dat aangestuurd wordt door de microcontroller. In figuur 4.18 wordt er een schematische voorstelling van de schakeling gegeven.

De LED zit in de drain tak van een n-kanaals vermogen MOSFET (met een lage R_{DSon}) in serie met een monitor weerstand van 1Ω . Deze weerstand dient om de stroomregeling te monitoren. De LED is eveneens verbonden met een stroombron, waarvan de stroom kan geregeld worden tussen 250 mA en 3A met een potentiometer. Dit is ruim voldoende aangezien de maximale stroom 2A mag zijn voor de OSTAR LED's. De voedingsspanning ($V_{CC} = 26V$) wordt ontkoppeld met een elektrolyet condensator om de rimpel op te vangen. De transistor wordt ingesteld in het lineaire gebied, zodat de vermogendissipatie minimaal wordt. De gewenste stroom door de LED is 2A. Om dit te verwezenlijken binnen het lineaire gebied, moeten we op een hogere uitgangskarakteristiek (hogere V_{GS}) werken. Daarom wordt de logische uitgang van de microcontroller versterkt met 3.25 om de V_{GS} te verhogen. Eerst wordt de microcontroller uitgang geïnverteerd omdat deze intrinsiek een actief laag niveau heeft. Dit betekent dat de transistor geschakeld zou worden in de uit-toestand, wat een zeker veiligheidsrisico met zich meebrengt. De signaolvormen op de controlleruitgang bepalen de pulsduur van de LED's. Aangezien de I_{DS} groot is, worden er eveneens vermogenweerstand gebruikt. Zowel de transistor als de weerstanden worden passief gekoeld.

is uit protectie overwegingen van de FLC. Indien de controller om één of andere reden zou uitvallen, zal over de FLC geen spanning blijven staan, wat wel het geval zou zijn zonder de transistorschakeling.

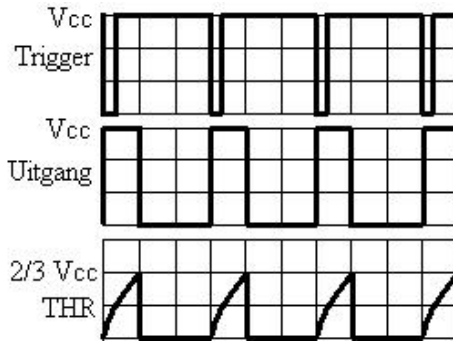
3.5.3 Vertragingsschakeling

De sync-puls vanuit het balder-bord wordt gebruikt om de beeldinformatie en de microdisplays synchroon te laten verlopen met de LED's. Dit signaal zal dan alsingangssignaal voor de microcontroller gebruikt worden om van daaruit alle aanstuursignalen te genereren. Echter in paragraaf 3.4.4 werd al aangehaald dat deze puls niet op het gewenste moment komt, en dient vertraagd te worden. Dit hebben we verwezenlijkt met de onderstaande schakeling.



Figuur 4.20: Schema vertragingsschakeling sync-puls

Dit is een timerschakeling gebaseerd op een “555” timer-IC die ingesteld is in de monostabiele operatie mode. Een dalende trigger (pin 2) flank (stijgende sync-puls) zet de uitgang (pin 3) hoog. De condensator C1 begint exponentieel opgeladen te worden over de weerstand R5 tot $2/3 V_{cc}$ (5V) waarde in een tijdsduur $t = 1.1 \cdot R5 \cdot C1$. Wanneer de condensator deze spanningswaarde bereikt, zal de interne comparator de flip-flop resetten, die op zijn beurt de condensator onmiddellijk ontladend en de uitgang op laag niveau zet. Dit wordt voorgesteld in figuur 4.21.



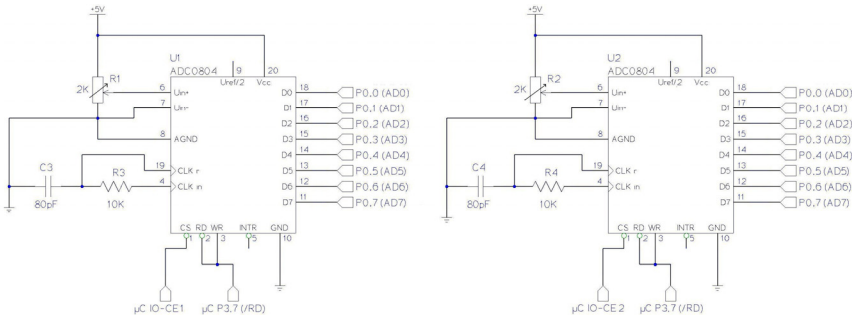
Figuur 4.21: Werking monostabiele operatie mode 555

De dalende flank op de trigger ingang wordt over een tijdsduur t vertraagd aan de uitgang. Door nu de weerstand $R5$ variabel te kiezen (een trimweerstand), kan de vertraging ingesteld worden. Deze uitgang, de vertraagde sync-puls, wordt aangeboden aan de microcontroller die getriggerd wordt op een dalende flank. Tijdens de operatie van de projector kan deze vertraging manueel bijgesteld worden.

3.5.4 Pulsduurbepaling (ADC)

In dit projectiesysteem worden de groene LED's afwisselend gepulst met een constante duty cycle van 50%. Deze afwisseling wordt in de microcontroller geprogrammeerd. De blauwe en rode LED's worden ook afgewisseld, maar de duty cycle mag hier hoogstens 25% bedragen om geen kleuroverspraak te veroorzaken. Dit kan eveneens geprogrammeerd worden in de controller, maar dan zitten we vast aan deze waarden. In de experimentele fase willen we deze duty cycles gemakkelijk en 'on-the-fly' kunnen regelen om een optimale instelling te kunnen vinden. Daarom hebben we twee (één per kleur) analoog-digitaal-omvormer (ADC) schakelingen ontworpen (figuur 4.22) die een regelbaar analoog signaal tussen 0 en 5V (V_{cc}) omzetten naar een 8-bit digitale waarde. Op basis van deze 8-bit waarden kan de pulsduur bepaald worden in de microcontroller. Deze kan variëren van 64 μs tot 16.384 ms in stappen van 64 μs . De analoge spanningen kunnen eenvoudig gewijzigd worden met regelbare weerstanden ($R1$, $R2$). De digitale uitgangen van beide ADCs worden op dezelfde adres/databus van de controller gezet (P0.0 tot P0.7). Dit geeft geen probleem aangezien de uitgangen een hoge impedantie hebben, wanneer de ADCs niet geactiveerd zijn. Deze schakelingen worden nooit gelijktijdig geactiveerd door de controller. Twee 'chip enable' uitgangen van de controller zijn verbonden met de 'CS' van deze ADCs en ze worden

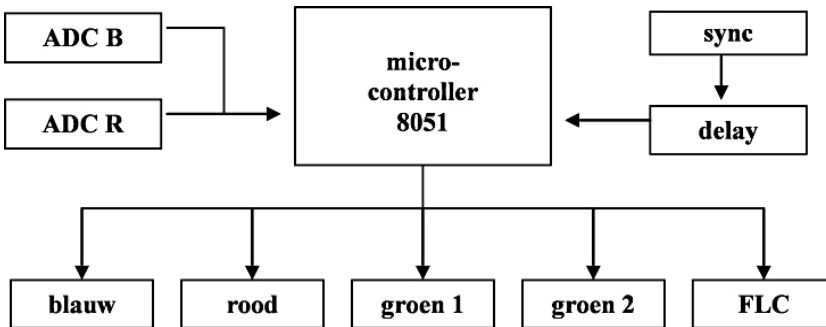
afwisselend gezet. De ‘RD’ en ‘WR’ van de ADCs worden beiden met P3.7 (/RD) van de microcontroller verbonden. Hiermee wordt aangegeven wanneer een nieuwe 8-bit waarde op de uitgangsbuffer (ADC) mag gezet worden en een nieuwe conversie mag beginnen. In de volgende paragraaf wordt het inlezen en de verwerking van deze binaire waarden besproken.



Figuur 4.22: ADCs voor bepaling pulsduur blauwe en rode LED

3.5.5 Microcontroller: coördinatie van subsystemen

De verschillende deelschakelingen hebben we in de vorige paragrafen besproken. Al deze subsystemen zijn verbonden met een centrale verwerkingseenheid, namelijk een microcontroller. Deze controller zorgt voor de synchronisatie tussen de verschillende delen en behandelt de tijdsgerelateerde aspecten van het projectiesysteem. Een algemeen blokdiagram rondom de controller wordt voorgesteld in figuur 4.23.



Figuur 4.23: Blokdiagram elektronische aansturing

De controller is zo geprogrammeerd (in assembler) dat het interrupt gebaseerd werkt. Na de initialisatie van de nodige timers en de externe interrupt wacht het programma op een interrupt signaal. We initialiseren eerst 3 timers en 1 externe interrupt. De timers worden als 16-bit timers ingesteld die de interne klok gebruiken om te tellen. In dit systeem komt één tel overeen met 1 μ s en kan dus een volledige timercyclus maximaal 65 ms duren. De externe interrupt wordt zo ingesteld dat de microcontroller reageert op dalende flanken. Het vervolg van het programma wordt gegeven in figuur 4.24. Dit gaan we stap per stap beschrijven.

| | |
|--|---|
| <pre> START: JNB tel,START CLR tel CLR P1.4 MOV DPTR,#0000H MOVX A,@DPTR RR A RR A MOV R1,A ANL A,#11000000B MOV TLO,A MOV A,R1 ORL A,#11000000B MOV TH0,A MOV DPTR,#2000H MOVX A,@DPTR RR A RR A MOV R1,A ANL A,#11000000B MOV TLL,A MOV A,R1 ORL A,#11000000B MOV TH1,A CLR TR2 MOV TL2,#01000000B ; na 25 ms MOV TH2,#10011100B ; resetprocedure DJNZ R0,GB MOV R0,#2 MOV P1,#11101000B ;x x B FLC G2 R G1 FLC JMP stop GB: MOV P1,#11000111B ;x x B FLC G2 R G1 FLC stop: SETB TRO SETB TR1 SETB TR2 JMP START </pre> | <pre> TO_ISR: CLR TRO ORL P1,#11100000B ;x x B FLC G2 R G1 FLC RETI EXT1_ISR: SETB tel RETI T1_ISR: CLR TR1 ORL P1,#11000100B ;x x B FLC G2 R G1 FLC RETI T2_ISR: MOV P1,#11111111B CLR TF2 RETI END </pre> |
|--|---|

Figuur 4.24: Assembler programma die de coördinatie realiseert in de microcontroller

Het wachten (eerste regel) wordt onderbroken door een binnenkomende interrupt signaal. Dit is het uitgangssignaal van de vertragingsschakeling (delay), dat in feite de sync-puls (van het balder-bord) is die vertraagd wordt. Hierdoor zal de belichting synchroon verlopen met de beeldinformatie en de LCOS-panelen. De interrupt service routine (ISR) (code rechterkolom EXT1_ISR) zet de 'tel' bit op 1 zodat het programma uit de wachtlus kan komen. Vervolgens wordt de 'tel' bit terug op 0 gezet ter voorbereiding van een volgende cyclus. P1.4 wordt op 0 gezet waardoor er -5V over de FLC komt te staan en deze in werking treedt (aan-toestand).

In de volgende twee subblokken wordt de ingestelde 8-bit waarde van de ADCs sequentieel ingelezen. Uit deze waarden wordt de pulsduur bepaald voor de blauwe en de rode LED. Deze kunnen variëren van 64 μ s tot 16.384 ms afhankelijk van de analoge spanning aan de ingang van de ADC. Hiervoor wordt gebruik gemaakt van timers 0 en 1. De pulsduur komt overeen met de ingestelde tellengte van deze timers.

Vervolgens wordt er een resetprocedure geïnitieerd. Hiervoor wordt timer 2 gebruikt. De tellengte van deze timer wordt zo ingesteld dat de LED's (groen) en de FLC sowieso na 25 ms afgezet worden. Dit is een veiligheidsmaatregel die nuttig kan zijn indien de sync-puls wegvalt, waardoor de LED en de FLC continu onder spanning zouden komen te staan. Hiermee beperken we deze tijd tot maximum 25 ms.

Het programmaverloop bedraagt tot hertoe enkele tientallen microseconden. Vanaf nu beginnen we de LED's aan te sturen. We controleren eerst of het programma even of oneven keren doorlopen wordt. Indien even, worden rood, groen 1 en FLC (+5V, uit-toestand) gepulst en anders blauw, groen2 en FLC (-5V, aan-toestand). Vervolgens worden de drie timers gestart en het programma keert terug naar het begin en wacht daar op een nieuwe sync-puls. Ondertussen tellen de timers voort en geven een timer interrupt na de ingestelde pulsduur (blauw, rood en beveiliging). Indien er een timer interrupt komt wordt de timer ISR opgestart. De ISR voor timer 0 zet de blauwe LED af, die voor timer 1 de rode LED en die voor timer 2 zet alles af. Dankzij deze timers worden de gepulste blauwe of rode LED's na de ingestelde pulsduur afgezet. De groene LED wordt pas afgezet wanneer het programma opnieuw doorlopen wordt en de andere groene LED aangestuurd wordt (50% duty cycle). De FLC wordt eveneens dan pas opnieuw geschakeld.

Dit programmaverloop wordt telkens bij een nieuwe sync-puls herhaald en zo werkt het systeem correct. Indien er geen sync-puls komt gedurende 25

ms wordt alles afgezet. Regelen we de vertraging of de pulsduur van rode en/of blauwe LED bij terwijl het programma loopt, zien we realtime de verandering op het geprojecteerde beeld. Het volledige programma is terug te vinden in bijlage C.

3.6 Experimentele resultaten

De optische opstelling en de elektronica er rond zijn nu afgewerkt en de projector is klaar om er beelden mee af te spelen. We moeten nog wel de kleurbalans in orde brengen door de LED's onderling af te regelen. Vervolgens gaan we de experimentele performanties nagaan en deze vergelijken met de simulatieresultaten. Alvorens we hiermee beginnen, gaan we eerst de optische componenten afzonderlijk uitmeten [23][24].

3.6.1 Karakterisatie optische componenten

Bij de simulaties hebben we een aantal veronderstellingen gedaan in verband met de efficiënties van de optische componenten. Deze waren beredeneerde waarden en/of gesimuleerde resultaten. In de praktijk blijkt dat deze waarden ofwel te optimistisch gekozen te zijn ofwel zijn er bijkomende verliezen opgetreden te wijten aan het fabricageproces (bijvoorbeeld bij GTLP). In deze paragraaf gaan we deze verschillen in kaart brengen.

De gesimuleerde lichtpijp was uit BK7-glas ($n=1.5168$) ontworpen. We hebben ze echter vervaardigd uit plexiglas ($n=1.4878$). Deze materialen hebben een andere brekingsindex waardoor de bronétendue (LED wordt optisch gekoppeld) verschillend zal zijn. Hierdoor bekomen we een hogere étendue efficiëntie ($E_{\text{sys}}/E_{\text{bron}}$). De gesimuleerde efficiëntie was 61.9% en de experimentele is 64.34%. Verder was de GTLP-efficiëntie 81.1%. Door het niet optimale fabricageproces (zie hoofdstuk 2) is deze waarde in de praktijk iets lager. We hebben voor (R, G1, G2, B) kanalen respectievelijk [79.65%, 76.34%, 76.86%, 73.73%] opgemeten.

De throughput van de LCOS-panelen in het gesimuleerde model is 65% (90% vulfactor, 4% absorptie en 75% reflectie). De panelen die we in de opstelling gebruiken, QXGA Gemidis panelen, hebben een betere reflectie (80%), maar omdat ze niet gecoat zijn, komt er nog 2 x 4% Fresnel verlies bij. Zo komen we op 63.7% throughput.

Een noodzakelijke component in de opstelling is de projectielens. Dit systeem heeft een lens nodig met f-getal van 2.88 (of lager) en werkafstand

van minstens 65 mm. Bij de simulaties werd er geen projectielens gebruikt, maar wel rekening gehouden met een verlies van 20%. Een lens met de exacte specificaties was niet te verkrijgen. Wat we voorhanden hadden, is een zoom lens met f-getal tussen 3.0 en 4.0 en een voldoende grote werkafstand. Het f-getal is groter dan die van het systeem en zal hierdoor niet alle stralen propageren. Bovendien is het een donker lensstelsel door de aanwezigheid van meerdere lenzengroepen. In de zoomstand waarin we de lens gebruiken, is de transmissie voor de (R, G, B)-kanalen respectievelijk [63%, 57.2%, 56.3%]. Dit is aanzienlijk lager dan de vooropgestelde waarde. Het projectiescherm heeft een opgemeten reflectiviteit van [92.7%, 92%, 92.7%] voor (R, G, B) licht. Dit was al zo verondersteld bij de simulaties.

Een ander belangrijk verschil tussen de simulatie en de experimentele opstelling ligt in het type van de gebruikte PBS. De parameters van de gesimuleerde PBS zijn terug te vinden in tabel 4.5. Deze PBS was geoptimaliseerd voor dit 2-LCOS-systeem. De parameters van de gebruikte PBS (HEL^F™ van Oerlikon [25]) voor het gewenste f-getal wordt gegeven in tabel 4.10. De transmissie van het p gepolariseerd licht is hier veel lager dan bij de gesimuleerde PBS. Rekening houdend met deze waarden kan de throughput berekend worden (bv voor blauw $T_p \cdot R_s \cdot R_s$). Doen we dit voor de vier kanalen, dan bekomen we 79.76%, 61.5%, 48.32% en 66.9% voor respectievelijk (R, G1, G2, B). De performantie van de gesimuleerde PBS was echter 70.3%, 83.6%, 78.1% en 86.34%. We zien dat we hier een 20 tot 40% lagere throughput hebben, behalve voor rood. Aangezien rood de beperkende kleur was, is dit een meevaller.

| | R_s [%] | T_p [%] |
|-------|-----------|-----------|
| rood | 99.85 | 80.00 |
| groen | 99.88 | 78.50 |
| blauw | 99.90 | 67.00 |

Tabel 4.10: Parameters HELF PBS voor $f^\#$ van 2.88

Polarisatoren en analysatoren werden voorgesteld als Jones Matrices in het simulatiemodel met een verlies van 2.4% per overgang. In de opstelling wordt er gebruik gemaakt van ProFlux polarisatoren van Moxtek [26]. Deze bestaan in drie uitvoeringen (algemene gebruik, hoog contrast en hoge transmissie type). We gebruiken het hoog contrast type om het systeem contrast op te krikken. Deze polarisatoren/analysatoren hebben een opgemeten transmissie van 87.2%, 88.85% en 83.7% voor (R, G, B) voor

een bundel met $f^\#$ van 2.88. We zien hier weer een afname van 10% of meer in vergelijking met het gesimuleerde systeem.

De rest van de verliezen gaan we niet in detail bespreken. Deze zijn de geometrische verliezen, polarisatie (+/-50%), FLC/dichroïsche spiegel en Fresnel verliezen aan de optische componenten. In de simulatie waren alle lenzen en PBS'en AR-gecoat. In de opstelling zijn de lenzen en de kleine PBS'en volledig gecoat, maar de grote PBS is maar aan 1 zijde gecoat. Hier is er ook weer een verschil tussen de gesimuleerde en experimenteel opgemeten efficiënties. Voor de simulaties bekomen we 45.55%, 49.10%, 50.06% en 45.72% en voor de experimentele opstelling 41.03%, 41.44%, 42.50% en 43.72% voor respectievelijk (R, G1, G2, B)-kanalen.

Al deze efficiënties hebben we samengevat in tabel 4.11. Hierin worden de simulatieresultaten vergeleken met de experimentele opstelling. We zien dat de totale efficiënties voor alle kanalen gedaald zijn. Voor sommige kanalen is dit meer uitgesproken dan voor andere (zie laatste rij). Zo zien we dat de afname voor het rode kanaal bijna de helft is van die van groene en blauwe kanaal. Uit de simulaties bleek dat het rode kanaal het minst efficiënte was, waardoor de projector rood gelimiteerd zou zijn. Echter uit experimentele waarden blijkt dat deze beperking hoogst waarschijnlijk zal opgeheven worden. Afhankelijk van de LED performantie, zal het een andere kleur zijn die het systeem zal limiteren. In de volgende paragraaf zullen we zien dat dit de blauwe kleur zal zijn.

| efficiënties | simulatie | | | | experiment | | | |
|-------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| | R | G1 | G2 | B | R | G1 | G2 | B |
| étendue [%] | 61.9 | | | | 64.34 | | | |
| GTLP [%] | 81.1 | | | | 79.65 | 76.34 | 76.86 | 73.73 |
| LCOS [%] | 65 | | | | 63.7 | | | |
| proj. lens [%] | 80 | | | | 63 | 57.2 | 57.2 | 56.3 |
| scherm [%] | 92.7 | 92 | 92 | 92.7 | 92.7 | 92 | 92 | 92.7 |
| PBS [%] | 70.3 | 83.6 | 78.1 | 86.34 | 79.76 | 61.5 | 48.32 | 66.9 |
| Pol/an(2x)[%] | 97.6 | | | | 87.2 | 88.85 | 88.85 | 83.7 |
| overige [%] | 45.55 | 49.10 | 50.06 | 45.72 | 41.05 | 41.44 | 42.50 | 43.72 |
| totaal [%] | 7.38 | 9.39 | 8.95 | 9.10 | 4.75 | 3.31 | 2.69 | 3.23 |
| vergelijking | 1 | 1 | 1 | 1 | 0.64 | 0.35 | 0.30 | 0.36 |

Tabel 4.11: Vergelijking tussen simulatie- en experimentele efficiënties

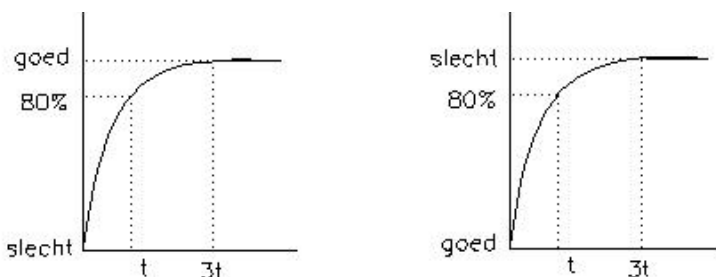
3.6.2 Afregeling kleurbalans en opmeten van experimentele performanties

We hebben in de vorige paragraaf de throughput van elke kanaal experimenteel bepaald, zodat we de kleurbalans juist kunnen afregelen. Hiervoor hebben we ook de lichtopbrengst van elke LED nodig. Deze waarden zijn gegeven in de datasheets maar zijn slechts richtwaarden en de werkelijke lichtopbrengsten kunnen verschillen van sample tot sample. Daarom hebben we eveneens een karakterisatie gedaan van deze OSTAR LED's.

In de simulaties hadden we volgende veronderstellingen gedaan (zie tabel 4.8). De (R, G, B) LED's produceren respectievelijk [321, 321, 83] lumen licht (volgens de datasheets). Door ze optisch te koppelen met de lichtpijp (étendue wordt $x \cdot n^2$) wordt deze lichtopbrengst verdubbeld. Bovendien worden de LED's gepulst met 50% duty cycle en een pulsefficiëntie van 78.4% voor de blauwe en groene LED's en 74.4% voor de rode LED (volgens de datasheets). De totale, gesimuleerde, lichtopbrengst voor respectievelijk (R, G, B) LED's is dus [478.3, 503.3, 130.1] lumen.

We hebben deze OSTAR LED's ook opgemeten. De lichtopbrengst van de gebruikte (R, G1, G2, B) samples is [319, 319, 332, 66.2] lumen. Hiervoor hebben we een spectrometer (USB2000) [27] gebruikt waarmee er absolute metingen kunnen gedaan worden. We zien dat vooral de blauwe LED zwak presteert. Vervolgens hebben we de LED's optisch gekoppeld met de lichtpijpen en de flux toenames opgemeten. Deze bedragen [83.4%, 76.4%, 87.7%, 19.0%] voor (R, G1, G2, B). De reden van deze lagere toename is waarschijnlijk de oppervlaktestructuur van de LED's. We zien hier terug dat vooral de blauwe LED ondermaats presteert. Hierbij speelt de niet-ideale vlakheid van het inkoppeloppervlak van deze GTLP een belangrijke rol. De groene LED's worden afwisselend gepulst met duty cycle (dc) 50% en pulsstroom 2A. We hebben de pulsefficiëntie per LED opgemeten en deze bedraagt slechts 69.9%. Dit is lager dan de waarde die we in de simulaties gebruikt hebben. Voor de rode en blauwe LED's is de situatie nog erger. In punt 3.4.2 en 3.4.3 werd al verteld dat de duty cycle hoogstens 25% mocht zijn om geen kleuroverspraak te verkrijgen. Dit heeft te maken met de werking van de LCOS-panelen. Eigenlijk moet er nog de reactietijd van het vloeibaar kristal (2.33 ms) afgetrokken worden van de pulsduur opdat alle pixels de juiste toestand zouden aannemen (duty cycle 18%). Dit gaan we niet doen om de lichtopbrengst van de projector niet verder te reduceren en houden we de duty cycle op 25%. Hierdoor introduceren we een beetje kleuroverspraak (op 28% van het beeld), maar experimenteel werd

vastgesteld dat dit niet als storend waargenomen wordt. Hierbij is het wel belangrijk in welke tijdslot we belichten. De belichting kan ofwel onmiddellijk na de eerste schrijfcyclus beginnen en duren tot het nieuwe frame begint (duty cycle 25%) ofwel beginnen we te belichten nadat alle pixels de juiste toestand aangenomen hebben (2.33 ms na de eerste schrijfcyclus) en loopt de belichting over in de volgende frame (verkeerde kleurframe). Dit kan ingesteld worden door de vertraging van de sync-puls bij te regelen. Indien de respons van het vloeibaar kristal lineair zou zijn, zou er bijna geen verschil zijn tussen deze situaties. Het enige verschil zou zijn dat in het eerste geval de kleuroverspraak onderaan het beeld zou optreden en in het tweede geval bovenaan. De respons is echter niet lineair maar ‘benaderend exponentieel’ (zie figuur 4.25). In figuur 4.25 zien dat de pixels een tijdstip t nadat ze geschreven zijn, 80% van hun eindniveau bereiken en $3t$ duurt totdat ze 100% bereikt hebben. In figuur links noemen we dit het goede niveau (begin tweede schrijfcyclus) met de belichtingskleur als referentie en figuur rechts het slechte niveau (begin volgende frame). De overspraak in het eerste geval zal veel minder scherp zijn en dus minder storend waargenomen worden dan in het tweede geval. Dit komt doordat het vloeibaar kristal na een tijdstip t , in geval 1, dichterbij de juiste toestand komt (bv. 80%) door de steile helling. De verkeerde informatie (0-80%) wordt slechts tijdstip t belicht. In geval 2 is dit net andersom. Het vloeibaar kristal vertrekt van de juiste toestand (voor belichte kleur) en gaat zeer snel naar de slechte toestand. De verkeerde informatie wordt hier gedurende $2t$ belicht (80-100%). Dit wordt geïllustreerd in figuur 4.25.



Figuur 4.25: Reactieverloop LCOS: geval 1 (links), geval 2 (rechts)

De responscurve in figuur 4.25 is niet echt volledig. In de realiteit is er nog een zekere dode tijd voor de steile helling. De duur van deze tijd is omgekeerd evenredig met de pretilt hoek van het LCOS-paneel. Deze panelen hebben een pretilt van 3° , waardoor de dode tijd beperkt zal zijn. Deze dode tijd zouden we in principe kunnen afregelen door de

belichtingspuls te laten overlopen naar het volgende subframe (een situatie tussen geval 1 en 2), waardoor we de kleuroverspraak zouden kunnen verminderen. Echter dit is enkel waar voor pixels die overgaan van uit- naar aan-toestand en niet andersom. De dode tijd treedt niet op bij overgang van aan- naar uit-toestand en dus mogen we de afregeling niet verwezenlijken.

De pulsstroom voor rode LED is 1.8A en de pulsefficiëntie 39.9% (dc 25%). De stroom is hier beperkt tot deze waarde (in plaats van 2A) omdat daarboven de lichtflux niet meer steeg en zelfs begon af te nemen. Voor de blauwe LED is de pulsstroom 2A en de efficiëntie 45.8% (zelfde duty cycle). Combineren we nu dit met de bovenstaande gegevens dan bekomen we respectievelijk voor voor (R, G1, G2, B) LED's een flux van [233.4, 393.4, 435.5, 36.1] lumen. De juiste lumenverhoudingen om D65-licht te verkrijgen, zijn opnieuw berekend op basis van de opgemeten spectra. We hebben reeds aangehaald dat de spectra (en dus de kleurcoördinaten) wijzigen bij gepulste regime. Bovendien moeten deze spectra worden opgemeten op het scherm en niet aan de bron. Dit doen we omdat het optische systeem een deel van het spectrum zal tegenhouden waardoor de kleurcoördinaten van het geprojecteerde licht niet exact zal overeenkomen met die van de bron. In tabel 4.12 worden deze resultaten samengevat.

| | simulatie | | | | experiment | | | |
|--------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|-------------|
| | R | G1 | G2 | B | R | G1 | G2 | B |
| flux [lm] | 321 | 321 | 321 | 83 | 319 | 319 | 332 | 66.2 |
| Opt. koppeling | x 2 | | | | x1.83 | x1.76 | x1.88 | x1.19 |
| pulseff. [%] | 74.5 | 78.4 | 78.4 | 78.4 | 39.9 | 69.9 | 69.9 | 45.8 |
| totaal [lm] | 478.3 | 503.3 | 503.3 | 130.1 | 233.4 | 393.4 | 435.5 | 36.1 |
| vergelijking | 1 | 1 | 1 | 1 | 0.49 | 0.78 | 0.87 | 0.28 |
| D65-ratio [%] | 27.41 | 66.34 | | 6.25 | 29.71 | 66.34 | | 3.96 |

Tabel 4.12: Vergelijking tussen gesimuleerde en opgemeten LED fluxen

We merken opnieuw op dat de opgemeten lichtopbrengsten lager zijn. Voor de groene LED's valt dat nog best mee, maar bij rode en blauwe LED is deze daling meer uitgesproken. Dit komt onder andere omdat deze LED's gepulst worden met slechts 25% duty cycle. Vooral de blauwe LED geeft veel minder licht dan verwacht (28%). Als we dit gegeven combineren met tabel 4.11, dan wordt het duidelijk dat blauw de beperkende kleur zal zijn in deze projector. We zien ook dat de veronderstelde lumenverhoudingen lichtjes anders zijn dan de experimenteel bepaalde verhoudingen. Dit komt omdat we de kleurcoördinaten op het scherm meten en niet meer aan de

bron. Dit werd besproken in de vorige alinea. We merken op dat we in werkelijkheid minder blauw nodig hebben, dan dat we verondersteld hadden. Dit is dan een positief punt bij deze mindere experimentele resultaten.

Combineren we nu tabel 4.11 en 4.12, dan zien we dat de blauwe kleur het systeem limiteert en de totale lichtopbrengst 29.45 lm (D65) is. Bovendien is er nog een overschot aan rode en groene lichtflux. Om de totale flux te verhogen, hebben we dus meer blauw licht nodig. Dit kan verwezenlijkt worden door de duty cycle van blauw te verhogen. Hierdoor zullen we nog meer kleuroverspraak veroorzaken van blauw naar rood. Visueel hebben we waargenomen dat dit niet zo storend is en kan geoptimaliseerd worden door de sync-puls vertraging optimaal in te stellen. Daarentegen is een overspraak van rood naar blauw wel zeer storend. Dit komt omdat het menselijke oog minder (een factor 5) gevoelig is voor blauw dan voor rood licht. Dit representeert zich ook in aantal lumens. Hierrond is er meer uitleg en experimentele resultaten terug te vinden in de master's thesis "*Kleurzuiverheid versus lichtopbrengst van een LED-projector*" [21].

Om een juiste kleurbalans te verkrijgen moet de blauwe LED met 35.9% duty cycle en 2A gepulst worden. De pulsefficiëntie is 57.8% en de totale blauwe LED flux zal dan 45.7 lm bedragen. Tabel 4.13 geeft de juiste kleurafregeling van de projector weer en maakt een vergelijking tussen de simulatie- en experimentele resultaten. We zien dat er nu geen overschot is bij geen enkele LED en de lichtopbrengst met 27% gestegen is. Deze toename is ten koste van een beetje blauwe overspraak in de rode informatie, maar dit valt nauwelijks op. Vergeleken met de simulaties, hebben we een lagere (slechts 29%) lichtopbrengst, namelijk 37.3 lm. De reden hiervoor werd in de vorige 2 paragrafen besproken. De bijdrage van de twee groene LED's die afwisselend gepulst worden, is niet dezelfde. Het verschil is echter niet zo groot (10%) dat er een intensiteitsverschil waargenomen wordt.

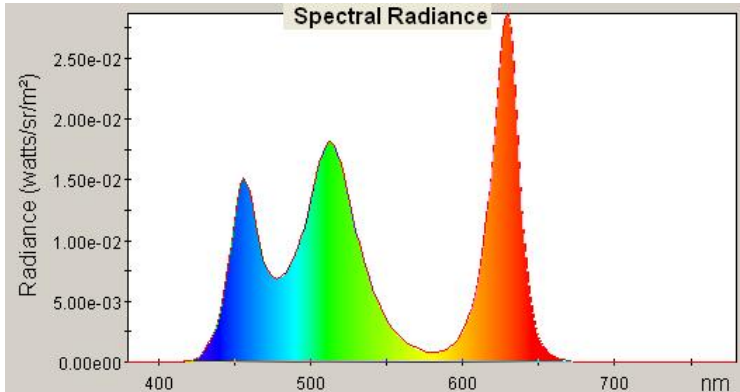
| | simulatie | | | | experiment | | | |
|-----------------------|--------------|-------|-------|------|-------------|-------|-------|-------|
| | R | G1 | G2 | B | R | G1 | G2 | B |
| input [lm] | 478.3 | 455 | 477.3 | 88.5 | 233.4 | 393.4 | 435.5 | 45.7 |
| duty cycle [%] | 50 | 50 | 50 | 50 | 25 | 50 | 50 | 35.9 |
| throughput [%] | 7.38 | 9.39 | 8.95 | 9.10 | 4.75 | 3.31 | 2.69 | 3.23 |
| output [lm] | 35.30 | 42.72 | 42.72 | 8.05 | 11.09 | 13.03 | 11.72 | 1.476 |
| D65-ratio [%] | 27.41 | 66.34 | | 6.25 | 29.71 | 66.34 | | 3.96 |
| D65-licht [lm] | 128.8 | | | | 37.3 | | | |

Tabel 4.13: Simulatie versus experimentele projector performanties

Om de geprojecteerde flux op te meten, gebruiken we een spectrometer van de fabrikant Photo Research [28]. Het toestel is van het type PR-670 SpectraScan Colorimeter, waarmee er luminanties, spectra, tristimulus waarden, kleurcoördinaten, kleurtemperatuur (CCT), etc. kunnen opgemeten worden. Het is een draagbaar toestel dat men, zoals een videocamera, moet richten naar het op te meten sample en het meet gedurende de ingestelde belichtingstijd de lichtstroom afkomstig van dat oppervlak. Deze tijd kan ook automatisch ingesteld worden afhankelijk van de lichtsterkte.

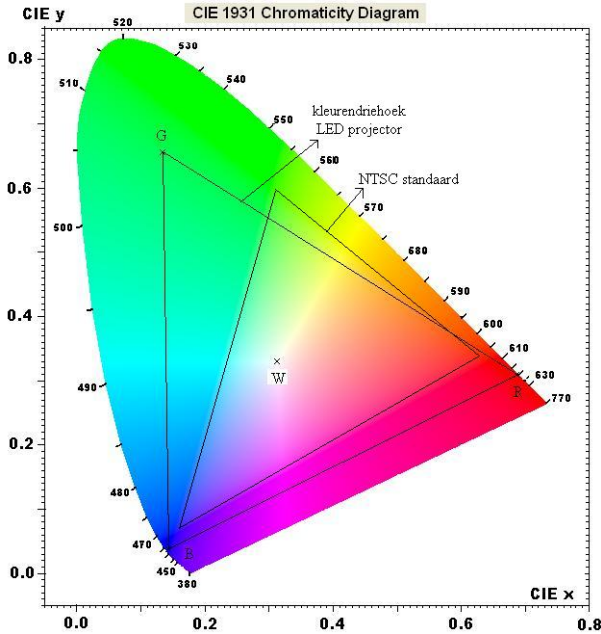
We projecteren een gesatureerd groen vlak op het scherm en meten de lichtsterkte. Aangezien het beeld niet volledig uniform is, kunnen er plaatsafhankelijke verschillen zijn in luminanties (cd/m^2). Daarom herhalen we deze meting op verschillende plaatsen van het vlak en middelen ze uit. Het geprojecteerde beeld heeft een bepaalde oppervlakte en het projectiescherm is lambertiaans. Door nu de uitgemiddelde luminantie te vermenigvuldigen met de oppervlakte (omzetting naar cd) en π kunnen we het aantal lumens berekenen. We meten eveneens de kleurcoördinaten en de tristimulus waarden om de lumen verhouding voor D65-licht te kunnen berekenen.

Deze meting herhalen we voor een blauw, een rood en een wit vlak. Voor het bereiken van de juiste kleurbalans moeten de kleurcoördinaten van het opgemeten wit beeld gelijk zijn aan deze van het D65-witpunt in de CIE(x,y)-kleurruimte ($x=0.3127$, $y=0.3296$, CCT=6500K). Bij de ingestelde stromen en duty cycles (zie tabel 4.13) voor rode, groene en blauwe LED's, bekomen we ongeveer dit instelpunt. De kleurcoördinaten van dit punt is $x=0.3126$, $y=0.3299$ en de kleurtemperatuur is 6499K. Figuur 4.26 toont het absolute spectrum van het opgemeten witpunt uitgedrukt in W/sr m^2 . We zien dat de rode component de grootste radiantie heeft, gevolgd door groen en blauw. Echter de ooggevoeligheid zorgt ervoor dat de groene component het sterkst waargenomen wordt, gevolgd door rood en blauw. Vandaar dat de lumen verhoudingen voor dit witpunt anders is dan de radiantie verhoudingen in figuur 4.26. De totale flux die deze 2-LCOS-projector kan leveren, is, omgerekend, 37.3 lm gebalanceerd D65-licht.



Figuur 4.26: Het spectrum van het ingestelde witpunt

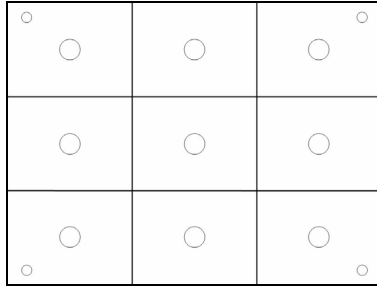
In figuur 4.27 wordt de CIE-kleurruimte weergegeven met de opgemeten geprojecteerde (R, G, B)-kleuren en het gevormde instelpunt (W). We zien dat het witpunt op het D65-punt ligt. We verbinden de (R, G, B)-punten om de kleurendriehoek te vormen. Alle kleuren die binnen deze driehoek vallen, kunnen gevormd worden met dit projectiesysteem. De kleinere driehoek in figuur 4.27 is de moderne NTSC-standaard. We zien dus dat met deze LED projector veel meer kleuren (+65%) kunnen gereproduceerd worden dan bij een klassiek televisiesysteem zoals NTSC, PAL, SECAM of HDTV. Dit betekent dat de beelden meer waarheidsgetrouw en levendiger zullen afgebeeld worden. Door de breedbandigheid van de groene LED, bevinden deze coördinaten zich niet op de rand van het diagram, waardoor een groot deel van de groen tinten (bovenaan) niet kunnen gerealiseerd worden.



Figuur 4.27: CIE-kleurendiagramma met gevormde kleurendriehoek

3.6.3 Beelduniformiteit

In een display applicatie is de uniformiteit van het beeld van primordiaal belang. Bij dit projectiesysteem wordt dit gerealiseerd door de GTLP's. Deze zorgen voor een uniforme belichting van de LCOS-panelen. Bij de simulaties hadden we de uniformiteit aan de panelen berekend. Echter wat echt van belang is, is de uniformiteit van het geprojecteerde beeld. Deze kan verschillend zijn doordat de optische componenten na de display, zoals de projectielens, deze kunnen degraderen. De beelduniformiteit van dit systeem hebben we op het scherm opgemeten volgens de 13-puntsmethode van ANSI [13]. Hiervoor hebben we een testbeeld, figuur 4.28, geprepareerd waarbij de op te meten punten (13) voorgesteld worden door een cirkel. Dit beeld wordt geprojecteerd op het scherm. De spectrometer (het actieve gebied ervan) richten we naar één van deze punten, zodat de lichtstroom, afkomstig van deze circulaire plaats, kan opgemeten worden. Vervolgens vervangen we het testbeeld door een blanco (volledig gesatureerd) beeld, zodat de storing door de cirkelrand vermeden wordt. We voeren deze meting uit, waarbij de opname drie keer herhaald en dan uitgemiddeld wordt. Dit herhalen we voor de dertien punten en berekenen het gemiddelde en de maximum en minimum afwijking.



Figuur 4.28: Testbeeld voor uniformiteitsmeting (13-puntsmethode)

Dit experiment voeren we uit voor een gesatureerd rood, groen en blauw beeld en ook voor een gebalanceerd wit beeld. De resultaten worden gegeven in tabel 4.14. We zien dat de uniformiteit goed is en de afwijkingen van het gemiddelde beperkt zijn. De resultaten zijn vergelijkbaar met de simulaties (zie tabel 4.7), doch iets lager. Dit was ook te verwachten aangezien de uniformiteit bij de simulaties op de panelen opgemeten werd. De projectielens kan nog voor enige perturbatie zorgen. Bovendien kan de uniformiteit van de gefabriceerde lichtpijpen ook lichtjes anders zijn.

| | rood | groen | blauw | D65-wit |
|-----------------------|------|-------|-------|---------|
| helderste locatie [%] | +8.6 | +6.5 | +12.6 | +6.3 |
| donkerste locatie [%] | -4.5 | -14.0 | -8.3 | -10.1 |

Tabel 4.14: Resultaten ANSI-uniformiteit geprojecteerd beeld

3.6.4 Contrastproblematiek

Een ander belangrijk kenmerk van een projectiesysteem is het contrast. Dit wordt gedefinieerd als de verhouding van de lichtflux op het scherm in de aan-toestand (LCOS-paneel) ten opzichte van de flux in de uit-toestand. Het is een maat voor hoe goed men details nog kan waarnemen in zowel donkere als lichte deeltjes van het beeld. In een systeem met laag contrast kunnen de verschillen niet goed waargenomen worden. Het contrast zou in principe oneindig kunnen zijn, maar door niet-ideale werking van de PBS en de LCOS-panelen degradeert deze waarde enorm. Het systeemcontrast is een parallel schakeling van het PBS- en LCOS-contrast.

Het contrast kan op verschillende manieren gedefinieerd en opgemeten worden. De meest voorkomende definities zijn het aan/uit-contrast en het ANSI-contrast. Bij aan/uit-contrast wordt de verhouding van de lichtfluxen berekend tussen een volledig wit beeld en een volledig zwart beeld. Daarentegen wordt het ANSI-contrast opgemeten op een dambord patroon en is de fluxverhouding tussen de witte en zwarte vierkanten. Doorgaans is het ANSI-contrast lager (+/- 10 keer) dan het aan/uit-contrast. Dit komt door de imperfectie van het optische systeem, vooral de projectielens, waardoor er lichtstralen van witte vierkanten terechtkomen in zwarte vierkanten. We hebben zowel het aan/uit- als ANSI-contrast opgemeten.

De LCOS-panelen zijn van het 'Vertical Aligned Nematic'-type (VAN) (zie hoofdstuk 1). Hierbij kunnen de vloeibaar kristalmolekulen in de rusttoestand perfect vertikaal gericht zijn. Deze toestand komt overeen met de uit-toestand van het paneel en dus is het beeld nagenoeg volledig donker. Bij de aan-toestand richten de molekulen zich volgens het elektisch veld. De molekulen die aan de aligeringslagen gehecht zijn, zijn statisch waardoor de helderheid van de aan-toestand een beetje zal verminderen. Echter voor het contrast is de donkerte van de zwarte toestand veel belangrijker dan de helderheid van de witte toestand. De VAN LCOS heeft dus hiervoor een ideale werking. Vergeleken met een ander type, bijvoorbeeld 'twisted nematic' (TN), waar de molekulen in rust in de aan-toestand zijn en onder elektrisch veld in de uit-toestand, zal VAN LCOS een veel hogere contrast hebben. Om de reactiesnelheid van het vloeibaar kristal te verhogen wordt er bij VAN een zekere pretilt hoek van enkele graden ingevoerd in de rusttoestand waardoor het contrast van het paneel vermindert. De LCOS-panelen in onze opstelling hebben een contrast van ongeveer 3500:1 bij $f^\#$ van 2.88. De PBS zal hier dus de contrastlimiterende component zijn [29].

Een PBS zou in principe een polarisatie volledig moeten reflecteren en de andere volledig doorlaten. In de praktijk is het zo dat ze ook de verkeerde polarisatie doorlaat en/of reflecteert. De mate waarin dat gebeurt, is bovendien afhankelijk van de golflengte (kleur). Hierdoor daalt de throughput, maar nog erger, het contrast wordt enorm omlaag getrokken. Het contrast van een PBS wordt benaderend gegeven door de 'extinction ratio' (R_s/R_p). Het werkelijke contrast is afhankelijk van de gebruikte configuratie en wordt gegeven door formule 4.4 voor het G-kanaal en 4.5 voor het R/B-kanaal. Voor de berekening wordt er gebruik gemaakt van gegevens uit tabel 4.10. We zien dus dat er zowel in de noemer als in de teller termen zijn die verwaarloosbaar klein zijn. Laten we deze termen weg, dan bekomen we de 'extinction ratio'. Deze zijn zeer laag, namelijk 4.99, 4.65 en 3.03 voor respectievelijk R, G, B.

$$C_{PBS} = \frac{R_s T_p + R_p T_s}{R_s T_s + R_p T_p} = \frac{0.784 + 0.00026}{0.0012 + 0.169} \quad (G) \quad (4.4)$$

$$C_{PBS} = \frac{T_p R_s + T_s R_p}{T_p R_p + T_s R_s} = \frac{0.80 + 0.0003}{0.16 + 0.0015} \quad (R) \quad (4.5)$$

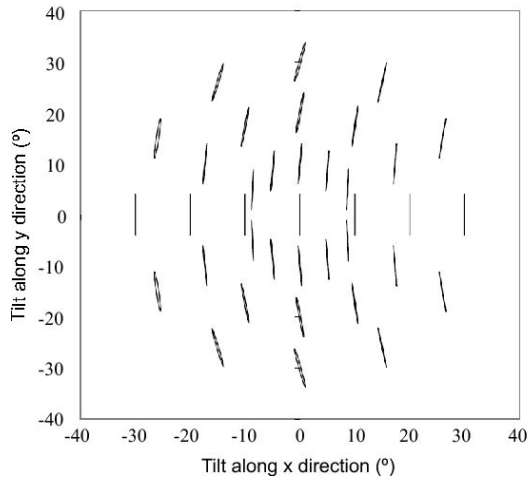
$$= \frac{0.67 + 0.00033}{0.22 + 0.001} \quad (B)$$

Zo'n systeem is niet bruikbaar door zijn lage contrasten. Deze laatste moeten dus opgekrikt worden. Hiervoor kunnen we de formules 4.4 en 4.5 analyseren en de grote termen in de noemers weghalen. Voor het groene kanaal is dat de tweede term en die kan verwijderd worden door een polarisator te plaatsen voor de PBS die de p-polarisatie wegfiltert. We zetten eveneens een gekruiste analysator achter de PBS, maar de bijdrage van deze component is gering. Bij de R/B-kanaal is de eerste term veel groter en zal weggehaald worden door een analysator achter de PBS die de p-polarisatie wegfiltert. We zetten eveneens een gekruiste polarisator voor de PBS, maar deze bijdrage zal weerom gering zijn. Door gebruik te maken van pre polarisatoren en opruimanalysatoren kan het contrast dus sterk verbeterd worden. Hiervoor gebruiken we 'high contrast'(HCN) Proflux polarisatoren van Moxtek [26]. Deze componenten hebben in gekruiste toestand (zonder iets ertussen) een contrast van 1200, 1000 en 850 op 1 voor respectievelijk rood, groen en blauw licht.

Bij elke lucht-glas overgang (en omgekeerd) treden er Fresnel reflecties op. In de modulatie zone zorgen deze reflecties voor het ontstaan van spookbeelden en verminderen ze het contrast. Daarom is het uiterst belangrijk dat de PBS'en AR-gecoat zijn.

Een ander fenomeen dat gerelateerd is met de PBS en het contrast vermindert, is de 'schuine-straal-depolarisatie' (skew ray depolarisation) [9][29]. De meerlagen coating van een PBS is geoptimaliseerd voor loodrechte inval. Elke andere lichtstraal, die niet evenwijdig loopt met de optische as, wordt gedeeltelijk gedepolariseerd (s wordt s + een beetje p) bij de PBS-overgang. Het gedepolariseerd licht kan niet meer verwijderd worden uit het systeem en vermindert het contrast. De graad van depolarisatie en dus die van degradatie is evenredig met de invalshoek. In figuur 4.29 wordt een plot gegeven die de depolarisatie weergeeft i.f.v.

invalshoek volgens de x- en y-richting. We zien dus dat lichtstralen lichtjes elliptisch gepolariseerd worden en van polarisatie toestand veranderen.



Figuur 4.29: Depolarisatiegraad bij PBS-overgang in functie van invalshoek

Dit probleem lost men grotendeels op door een extra component in de opstelling op te nemen. Een kwart golflengte plaat, ook wel depolarisatie plaat genoemd, wordt geplaatst tussen de PBS en het LCOS-paneel. De optische as van de plaat moet parallel zijn aan een zijde van de PBS. De dubbele overgang van het licht door deze plaat zorgt ervoor dat de depolarisaties van de heengaande en terugkerende stralen elkaar opheffen [8]. Hiebij is de rotatie positie van de plaat cruciaal. Deze moet exact volgens zijn optische as geplaatst worden.

In dit projectiesysteem wordt het contrast nog vergroot door gebruik te maken van bijkomende polariserende componenten. In het groene kanaal wordt er een PBS gebruikt om beide LED's binnen eenzelfde étendue te combineren. Hoewel dit niet het opzet was, zorgt deze PBS voor een extra bijdrage in het contrast ($> \times 5$) voor de groene kleur. De R/B- en groene kanalen worden gerecombineerd door een grotere PBS voor de projectielens. Hiervoor kon ook een bandpass filter gebruikt worden, maar de overlap tussen groen en blauw vermoedelijk dit. De combinerende PBS fungeert eveneens als een bijkomende polarisator die het contrast verhoogt. Dit zal vooral een effect hebben voor R/B-kanaal. In formule 4.5 zien we dat de eerste term in de noemer superieur is. Hoewel deze term tegengehouden wordt door de analyser, blijft hij superieur aangezien de tweede term ook

evenredig tegengehouden wordt door de polarisator. Deze term wordt nu door de grote PBS (R_p) gedeeld door 3 (blauw) of 5 (rood), terwijl de teller bijna onveranderd blijft ($\times R_s$). Hierdoor zal het contrast toenemen. Bestuderen we formule 4.4, dan zien we dat de storende term (2°) in de noemer slechts vermenigvuldigd wordt met T_p (0.785). De teller wordt eveneens vermenigvuldigd met T_p , wat op een nuloperatie neerkomt voor het contrast.

Een laatste methode die we hier gaan bespreken om het systeemcontrast te verhogen, is het invoeren van een diafragma [30]. Lichtstralen met grote hoeken degraderen de werking van de optische componenten en laten meer ongewenst licht door. Daarom hebben we het systeem f-getal beperkt. Hoe kleiner de invalshoeken des te groter het contrast zal zijn. Dit moet echter opwegen tegenover het verlies van gewenste lichtflux. Door in het focaal vlak van het belichtingssysteem een circulaire diafragma te plaatsen, zullen de invalshoeken verkleinen. Hierdoor zal de lichtopbrengst ook gevoelig verminderen. Echter niet alle hoeken binnen het f-getal zorgen voor evenveel contrast vermindering. Door nu de hoeken (lichtstralen) eruit te halen die voor ongewenst licht zorgen, maar geen al te grote bijdrage leveren in de gewenste lichtopbrengst, kan het contrast verstandig verhoogd worden. Hiervoor moeten we een gepaste diafragma voorzien in het focaal vlak, waar dat de hoekverdeling ruimtelijk weergegeven wordt.

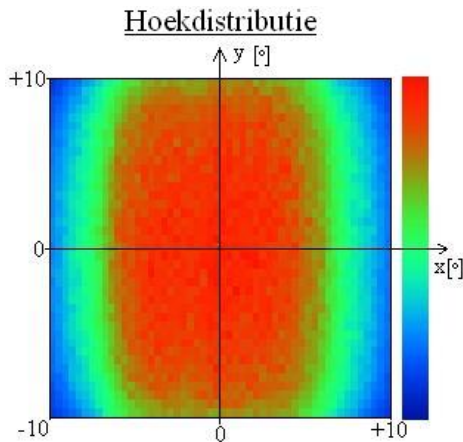
Tot hier toe hebben we het contrast gedefinieerd, de factoren die dit verminderen besproken en de mogelijke oplossingen voorgesteld. Nu gaan we dit effectief ook opmeten in de opstelling en maximaliseren met de voorgestelde methodes. Bij deze metingen gaan we de opstelling volledig afschermen met zwart karton en de meetruimte verduisteren. Dan pas kunnen er betrouwbare contrastmetingen gebeuren. De lichtflux meten we met de spectrometer PR-670 SpectraScan. We gaan de metingen en de resultaten stap per stap bespreken.

Eerst hebben we het contrast opgemeten van twee gekruiste HCN-polarisatoren bij groen licht. Het licht is afkomstig van de lichtpijp en heeft een $f^\#$ van 2.88. Het opgemeten contrast bedraagt 1060:1. Dit resultaat is bevredigend en komt overeen met wat in de datasheets staat. Vervolgens hebben we het systeemcontrast op het scherm opgemeten. Bij deze meetopstelling zijn de PBS'en niet AR-gecoat en er worden geen $\lambda/4$ -platen gebruikt. Elk kanaal is wel voorzien van een polarisator en een analysator. De contrastwaarde voor het groene kanaal bedraagt 50:1 en er ontstaan spookbeelden. Deze waarde is veel te laag en moet zeker verbeterd worden. Bovendien is het ontstaan van spookbeelden onaanvaardbaar.

Om deze problemen te verhelpen hebben we de PBS'en (uitgezonderd de recombinerende PBS) vervangen door gecoate varianten en deze metingen herhaald voor de drie kleuren. De contrasten zijn nu respectievelijk 97.6:1, 80:1 en 52.8:1 voor (R, G, B)-kanalen en we hebben geen last meer van spookbeelden. Het coaten van de PBS heeft in zekere mate geholpen, maar is nog niet voldoende. Het contrast moet nog verder opgetrokken worden om een werkbaar projectiesysteem te realiseren.

Het ontstaan van schuine-straal-depolarisatie aan de PBS coating zorgt voor een groot contrastverlies. De ongewenste polarisatie kan niet meer gefilterd worden door de analysator en vermindert het contrast sterk. Zoals al besproken, lossen we dit probleem op door het toevoegen van $\lambda/4$ -platen tussen het paneel en de PBS. Deze configuratie hebben we eerst gesimuleerd vooraleer we ze in de opstelling implementeren. De $\lambda/4$ -platen worden voorgesteld door Jones Matrices. De contrasttoename bedraagt respectievelijk een factor 46, 115, 49 voor (R, G, B)-kanalen. We zien dus dat het zeer nuttig is om dit in de opstelling te implementeren. Er zijn echter bijkomende consequenties waar we rekening mee moeten houden. Door het toevoegen van deze platen introduceren we 4 extra glas-lucht overgangen (2 heen + 2 terug), waardoor er meer reflecties en 15% extra Fresnel verliezen zullen optreden. Dit lossen we op door de platen optisch te koppelen met de LCOS-panels. Hiervoor gebruiken we terug 'index matching gel'. We zeiden reeds dat de hoek waaronder deze platen geplaatst moeten worden, zeer cruciaal is. Hiervoor hebben we een circulaire houder gemaakt waarin deze platen (eveneens circulair) eenvoudig kunnen geroteerd worden. De exacte hoekpositie vinden we experimenteel door een zwart beeld te projecteren en de plaat te roteren totdat het beeld het donkerst is. Bij de afregeling van het groene kanaal blokkeren we het R/B-kanaal en omgekeerd. De afregeling van het R/B-kanaal gebeurt met het rode licht (blauw blokkeren), omdat deze kleur belangrijker is en dus op maximum contrast moet afgeregeld worden. Na deze afregeling meten we terug de contrasttoename. Deze bedraagt een factor 5.25 voor rood, 5.78 voor groen en 6.63 voor blauw. We zien hier ook dat de $\lambda/4$ -plaat duidelijk zijn nut heeft. De toename is niet zo uitgesproken als bij de simulatie, maar toch vrij sterk. Bij de simulatie gebruiken we Jones Matrices als model voor $\lambda/4$ -platen en LCOS-panels. Dit is slechts een eerste orde benadering en zeker geen exacte beschrijving met dezelfde fysische eigenschappen als in werkelijkheid. Bovendien is een Jones Matrix geen glasplaat waardoor er ook geen reflecties kunnen optreden. Dit verlaagt het contrast ook sterk. Vermits een Jones Matrix een geïdealiseerd model is, is het ook begrijpelijk dat de toename in de simulaties veel hoger is.

De laatste methode om het contrast te verhogen die we getest hebben, is het beperken van de stralingshoeken door middel van een diafragma te plaatsen in het angulair vlak. Een groter f-getal (kleinere hoeken) weerspiegelt zich in een groter contrast. We hebben het systeem f-getal 2.88 (tophoek 10°) gekozen en het belichtingssysteem zo ontworpen dat dit hieraan voldoet. De gesimuleerde hoekverdeling, die het LCOS-paneel belicht, is min of meer ellipsvormig en grotendeels homogeen. Dit wordt getoond in figuur 4.30.

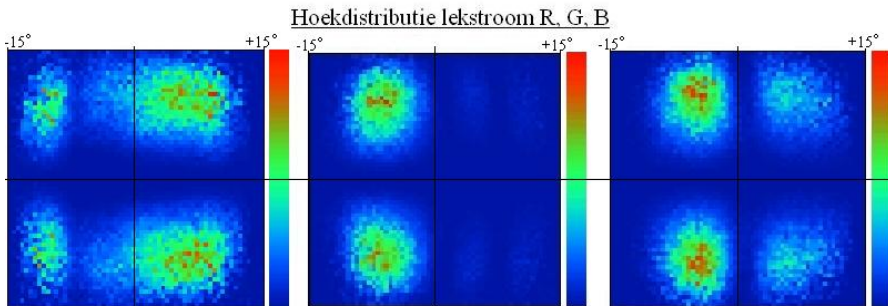


Figuur 4.30: Hoekverdeling belichting

In de projector opstelling zijn er op twee plaatsen natuurlijke diafragma's ingebouwd. Het eerste is de FLC die vlak achter het angulair vlak geplaatst is. Deze component heeft een 'clear aperture'(CA) die hoeken tot maximaal 11° doorlaat. Hoeken boven deze waarde worden tegengehouden door de behuizing. Het tweede diafragma is de projectielens. Deze heeft een f-getal tussen 3.0 en 4.0 en limiteert in het beste geval de maximale hoek die kan propageren op 9° . Er zullen dus zeker geen lichtstralen op het scherm terechtkomen onder het gekozen $f^\#$. We beperken de maximale stralingshoek nog verder (8°) door een circulaire diafragma (met gepaste diameter) te plaatsen in het angulair vlak en meten het contrast en de lichtflux op het scherm. Het contrast stijgt ongeveer met 4% ten koste van een daling van de lichtopbrengst met 3%. Deze toename weegt niet op op het veroorzaakte lichtverlies en nemen we het diafragma terug uit de opstelling.

Een circulaire verkleining van het diafragma is dus niet efficiënt. We moeten de hoeken opsporen die het contrast verminderen en enkele deze wegnemen. Deze hoeven niet per se op een circulaire schil te liggen. Om deze hoeken te

bepalen, hebben we opnieuw simulaties gedaan waarbij we enkel de uit-toestand simuleren. We zetten een detector voor de projectielens en tonen de hoekdistributie van de gelekte lichtstromen. Deze worden voor de drie kleuren getoond in figuur 4.31.



Figuur 4.31: Hoekdistributie gelekte lichtstromen voor respectievelijk R, G, B

Op basis van deze distributies maken we diafragma's die juist deze hoeken tegenhouden. Deze diafragma's plaatsen we in het angular vlak (na 2^e lens). Figuur 4.32 toont de vormen van deze diafragma's. We simuleren zowel de aan- als de uit-toestanden opnieuw en komen tot de volgende conclusies: voor het rode kanaal is de contrasttoename 66% ten koste van 28% minder lichtflux, voor het groene kanaal 78% toename voor 32% verlies en voor het blauwe kanaal 90% toename voor 37% lichtverlies. We zien dus hier op basis van simulaties dat het loont om zulke diafragma's te gebruiken.



Figuur 4.32: Diafragma's voor (R,G,B)-kanalen voor contrastverhoging

Een vergelijkbare meting van de lekstromen hebben we gedaan voor de experimentele opstelling. Hiervoor hebben we met behulp van een lens

(zonder projectielens) na de recombinerende PBS, de hoekdistributie omgezet naar angulaire distributie (door in het focaalvlak van de lens kijken). Dit beeld is analoog aan het beeld in het eerste angulair vlak (achter de middelste lens in het belichtingssysteem). Door een zwart beeld te projecteren hebben we de posities, en dus de hoeken, van de lekstromen bepaald. We hebben opnieuw een diafragma geconstrueerd waarmee deze stralen tegengehouden worden. Deze hebben we in het angulair vlak geplaatst. We hebben een aan- en een uit-toestand geprojecteerd met de projectielens en deze opgemeten. De contrasttoename bedraagt voor rode en blauwe kleur 16.7% en 16.3% voor een afname van de lichtopbrengst van respectievelijk 14% en 12.8%. Op basis van deze experimentele resultaten kunnen we besluiten dat het gebruik van een diafragma niet de moeite waard is. Daarom hebben we ook deze diafragma's uit het systeem verwijderd.

In de uiteindelijke opstelling gebruiken we dus AR gecoate PBS'en, hoog contrast polarisatoren/analysatoren en $\lambda/4$ -platen die we optisch koppelen met de LCOS-panelen. Bij deze configuratie hebben we opnieuw het aan/uit-contrast en het ANSI-contrast opgemeten. Dit hebben we gedaan voor elke LED afzonderlijk en ook nog voor een gebalanceerde D65-witpunt. Deze resultaten hebben we samengevat in tabel 4.15.

| contrast | simulatie | | | | experiment | | | | |
|----------|-----------|-------|-------|-------|------------|---------|------|-----|-------------|
| | R | G1 | G2 | B | R | G1/G2 | G | B | D65 |
| A/U | >2000 | >8000 | >8500 | >3000 | 512 | 474/477 | 462 | 350 | 477 |
| ANSI | n.v.t. | | | | 57.2 | 61.6/64 | 61.9 | 37 | 61.6 |

Tabel 4.15: Resultaten contrastmeting projector opstelling

We zien dat het contrast het hoogst is voor het rode kanaal en het laagst voor het blauwe kanaal (grootste lek PBS). De verhoudingen komen min of meer overeen met de verhoudingen van de 'extinction ratios'. Dit hadden we ook verwacht aangezien de bijdrage van contrast verhogende methodes voor elke kanaal gelijkaardig is. Het contrast van het ingestelde witpunt is 477. Dit is tamelijk goed en hiemee kunnen de meeste verschillen goed waargenomen worden. De individuele contrasten wijken niet veel af van deze waarde, uitgezonderd die van het blauwe licht. Dit is niet zo storend omdat de bijdrage van de blauwe kleur in het beeld minimaal is. Dit komt door de ongevoeligheid van het oog voor deze golflengten. We zien ook dat de contrasten veel lager zijn dan die bij de simulaties. Dit is ook logisch omdat we hier een slechtere PBS (lagere extinction ratio) gebruiken, de polarisatie componenten niet ideale modellen zijn en niet alle vlakken AR gecoat zijn.

De gesimuleerde waarden zijn sowieso onwaarschijnlijk aangezien het LCOS-contrast slechts 3500:1 is en dus het systeem contrast zeker lager moet zijn. Het ANSI-contrast is 7.5 à 9.5 keer kleiner dan het A/U-contrast. Dit komt doordat de flux van de witte vierkanten (dambord patroon) lekt naar de zwarte vierkanten in de projectielens. Een lek 1.5% is reeds voldoende om het contrast met bijna een factor 10 te verkleinen. Het ANSI-contrast werd niet gesimuleerd.

3.6.5 Bespreking resultaten 2-LCOS-projector

We hebben de 2-LCOS-projector opgebouwd met 0.82" QXGA panelen en de verschillende aspecten ervan besproken [23][24]. In deze paragraaf gaan we deze resultaten nog eens op een rijtje zetten en een aantal geprojecteerde beelden bespreken.

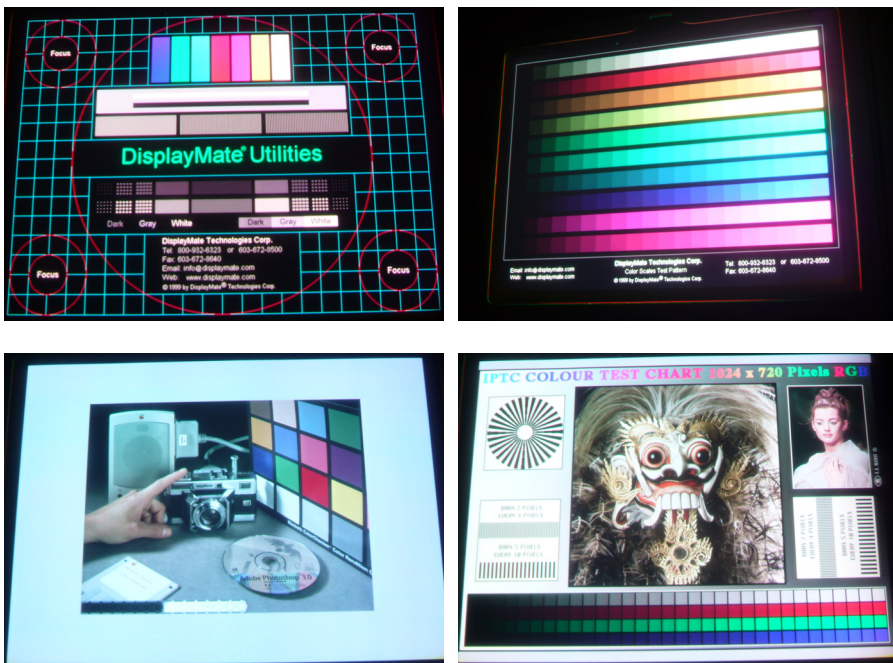
De simulatie van deze architectuur leverde ons 128.8 lm wit licht (D65) op. In de praktijk bekomen we door samenloop van de besproken factoren slechts 29.5 lm. Dit hebben we verder opgetrokken tot 37.3 lm ten koste van de kleurzuiverheid. We hebben blauw licht toegelaten in het rode kanaal. Visueel nemen we waar dat dit niet te storend is, en dus wel loont om de lichtopbrengst te doen stijgen (+27%). De rode pixels zullen hierdoor aan de boven- en onderkant van het beeld gedesatureerd zijn. Verder zijn de optische paden (R/B en G) volledig gescheiden waardoor er geen kleuroverspraak kan optreden tussen beiden. In de groene informatie is er geen rode en/of blauwe kleurmenging en ook andersom. Dankzij de semi-kleursequentieel (2 panelen) werking is de color-breakup sterk gereduceerd.

Het systeemcontrast was in het begin zeer laag. Door de factoren te bestuderen die dat veroorzaken en deze te elimineren (verminderen) hebben we dit verbeterd. Het opgemeten contrast in de demonstrator opstelling bedraagt 477:1 (voor A/U) en 61.6:1 (voor ANSI). Dit is een goede waarde voor het projecteren van kwalitatieve beelden. De beelduniformiteit is zeer goed en ligt volgens de ANSI standaard binnen de volgende grenzen: [-10.1%, +6.3%]. Dit is te danken aan de ontworpen lichtpijpen. Het gebruik van LED's resulteert ook in een verhoogde kleurendriehoek (+65%) vergeleken met klassieke televisiesystemen zoals NTSC, PAL, etc. Hierdoor kunnen er veel meer kleuren gerealiseerd worden waardoor de beelden meer waarheidsgetrouw en levendiger zullen zijn.

We hebben echter nog last van flikkering [31]. Dit komt doordat de operationele beeldfrequentie slechts 30 Hz is. We gebruiken één LCOS-paneel voor de rode en blauwe informatie afwisselend te moduleren en

moeten daarom de oorspronkelijke beeldfrequentie (60 Hz) halveren. Het groene kanaal blijft a.h.w. op 60 Hz werken, omdat we twee groene LED's afwisselend pulsen aan 30 Hz, en er zal dus geen flikkering waargenomen worden. Vooral beelden waarin grote vlakken met een rode kleurcomponent voorkomen, flikkeren sterk. Het flikkeren van de blauwe component valt veel minder op omdat de intensiteit hier veel kleiner is.

Met deze demonstratoropstelling hebben we videobeelden en foto's geprojecteerd op een 9" scherm. Deze zijn zowel in een verduisterde als verlichte ruimte zeer goed waarneembaar (helderheid +/- 475 nit). In het donker is het beeld meer comfortabel. Deze luminantie komt overeen met die van een televisietoestel maar de schermdiagonaal is echter kleiner [32][33]. We hebben foto's en films gemaakt van de geprojecteerde beelden. In figuur 4.33 en 4.34 worden er enkele foto's getoond. In bijlage D zijn er meer foto's terug te vinden.



Figuur 4.33: Foto's van geprojecteerde testbeelden

In figuur 4.33 worden enkele testbeelden getoond. Hierin zien we het kleurengamma en de grijsniveaus. De foto linksboven toont een gamma aan kleuren en verschillende grijsniveaus van wit. In het blauwe blokje

linksboven zien we een beetje kleuroverspraak van rood naar blauw. De foto rechtsboven toont de basiskleuren en enkele mengkleuren. Van al deze kleuren worden grijsniveaus gegeven van 100% tot 0%. De foto rechtsonder toont enkel de basiskleuren en wit met respectievelijke grijsniveaus. In de tekst bovenaan zijn de kleurovergangen goed waarneembaar. Tenslotte op foto linksonder worden nogmaals verschillende kleuren getoond (basis- en mengkleuren). Aan de hand van deze foto's kunnen we concluderen dat de kleurweergave en kleurdifferentiatie zeer goed zijn.

Tenslotte bekijken we de foto's in figuur 4.34. Hierin zien we de verschillende kleuren op realistische beelden. Bovenaan zien we drie kinderen met een verschillende haar, oog en huidskleur. De kleuren zijn waarheidsgetrouw en zeer helder. Onderaan zien we een reeks voorwerpen met hun natuurlijke kleuren. De details zijn goed zichtbaar en het contrast is vrij hoog.



Figuur 4.34: Foto's van realistische beelden (geprojecteerd)

3.7 Toekomstperspectieven: verdere optimalisatie

Vergeleken met de simulatieresultaten, is de experimentele performantie van de projector te laag (29%). Er zijn additionele verliezen opgetreden die we in paragrafen 3.6.1 en 3.6.2 besproken hebben. De vraag die we ons nu stellen is of dat deze verliezen niet kunnen vermeden worden. In deze paragraaf gaan we trachten een antwoord te vinden op deze vraag. De suggesties die we hier zullen doen, kunnen eventueel in de toekomst toegepast worden.

De nodige verbeteringen splitsen we in twee delen: 1) optimalisaties die vandaag de dag technologisch mogelijk zijn, 2) optimalisaties die door

technologische vooruitgang pas in de toekomst mogelijk zullen zijn. We gaan de bespreking beginnen met het eerste type.

De meeste componenten zijn antireflectief gecoat, wat noodzakelijk is voor een hoog contrast en een hoge throughput. Evenwel zijn er componenten die dat niet zijn. Deze zijn de recombinerende PBS, de $\lambda/4$ -platen, het uitgangsvlak van de GTLP's, de polarisatoren/analysatoren en de dichroïsche spiegel. Per glas-lucht overgang veroorzaakt dit een verlies van 4%. Door alle componenten te coaten kan de performantie en het contrast verhoogd worden. De projectielens die we gebruiken (voorhanden hadden) is een donkere lens die veel licht tegenhoudt. In principe moet het mogelijk zijn om een lens te ontwerpen of aan te schaffen die 80% van het licht propageert, wat een verbetering van 50% zou betekenen. Hoewel de productie van de lichtpijpen goed geslaagd is, zijn er hier en daar nog defecten die moeten verbeterd worden. Zo is bijvoorbeeld het ingangsvlak van de GTLP voor de blauwe LED niet mooi vlak, waardoor de optische koppeling niet zeer goed is. Dit veroorzaakt veel lichtverlies in het blauwe kanaal. Bovendien heeft de blauwe LED 25% minder lichtopbrengst dat wat er in de datasheets staat. Het is dus sterk aangeraden om bij het aanschaffen de types te selecteren met een hoge binning (hoge lichtopbrengst). Een laatste optimalisatie van type 1 is het vervangen van de PBS door een variant met betere performanties. De PBS die we ontworpen hebben in de simulator is beter dan degene die we in de opstelling gebruiken. Door nu de PBS coating te optimaliseren via coating programma's en deze te laten vervaardigen kan de performantie van de projector verbeterd worden. De cumulatief te verwachten winst van al deze maatregelen is een factor 1.9 en zouden we dus een lumenoutput van boven de 70 lm kunnen verkrijgen.

Optimalisaties die momenteel technologisch niet mogelijk zijn, maar waar er onderzoek rond gebeuren, zijn de vooruitgangen in de LED- en LCOS-technologieën. De helderheid van LED's stijgt nog steeds waardoor de lichtopbrengst van de projector ook zal stijgen. Bovendien wordt er ook onderzoek verricht rond gepolariseerde LED's [34]. Dit zal de gepolariseerde luminantie doen toenemen.

De LCOS-panelen die we gebruiken, hebben een lange schrijftijd nodig in vergelijking met bijvoorbeeld DMD-panelen. Hierdoor kunnen we maximaal de helft van de tijd belichten in het kleursequentiële kanaal. Dit betekent dat we slechts 50% van de mogelijke lichtflux genereren en dus 50% opportuniteitsverlies leiden. Dit probleem zou men kunnen verhelpen indien de panelen veel sneller dan een frametijd kunnen geschreven worden. Een andere oplossing is het voorzien van een framegeheugen zoals bij DMD's

[30]. Het frame wordt dan eerst naar het geheugen geschreven en dan pas ogenblikkelijk op het paneel gezet. Dit zal een vertraging van 1 frame teweegbrengen, maar de frametijd kan ten volle benut worden om te belichten. Rond dit onderwerp wordt er momenteel onderzoek gedaan [35][36]. De grootste uitdaging is hier het maken van een buffergeheugen aangezien LCOS, in tegenstelling tot DMD, analoog is. Als dit geheugen geschreven wordt aan 120 Hz (schrijfsnelheid LCOS-paneel) en moeten de rode en de blauwe informatie op één paneel afwisselend gemoduleerd worden, dan zal de feitelijke frame snelheid 60 Hz zijn, waardoor er geen flikkering meer waarneembaar zal zijn. Tevens zal de duty cycle voor beide kleuren verdubbeld zijn, wat zich zal weerspiegelen in hogere lichtopbrengst van de projector.

Zoals aangehaald hebben we deze optimalisaties niet kunnen doorvoeren en hopen dat dit in de toekomst wel zal gebeuren. Hiermee zal de lichtopbrengst van de projector gevoelig verbeteren (met een factor 3.3 zonder rekening te houden met LED evolutie).

3.8 Besluit: 2-LCOS-projector

We hebben hier een LED projector met twee LCOS-lichtkleppen ontworpen. Hierbij moduleert de ene lichtklep afwisselend rode en blauwe informatie, terwijl de andere continu groene informatie moduleert. Dit is noodzakelijk om een gebalanceerd witpunt te verkrijgen met de huidige generatie LED's. De systeemétendue van dit ontwerp bedraagt slechts $19.73 \text{ mm}^2\text{sr}$.

Eerst hebben we dit systeem grondig geanalyseerd en geoptimaliseerd met behulp van het simulatiepakket ZEMAX. Hiermee verkregen we een geprojecteerde flux van 128.8 lm (D65-licht) met een systeemcontrast boven 2500:1. De beelduniformiteit was zeer goed. De resultaten waren veelbelovend en we zijn daarom overgegaan tot het implementeren van deze architectuur. We hebben een demonstrator opstelling opgebouwd. Hierbij zijn er bijkomende problemen opgetreden die we grotendeels opgelost hebben. Voor de aansturing van de LED's en de synchronisatie met de LCOS-panelen en de videobron hebben we specifieke elektronische schakelingen ontwikkeld. De opgemeten lichtopbrengst van deze 2-LCOS-projector bedraagt 37.3 lm en het contrast 477:1. De uniformiteit is nog steeds zeer goed. Het verschil in deze resultaten is te wijten aan de gebruikte, niet-ideale, componenten. De bijkomende verliezen zijn in dit hoofdstuk besproken. Het gebruik van LED's resulteert in een veel grotere kleurengamut, waardoor de kleuren meer waarheidsgetrouw en levendiger overkomen. Dankzij de semi-kleursequentiële werking hebben we een gereduceerde color-breakup en geen kleuroverspraak tussen de R/B en groene kanalen. De lichte overspraak die we toelaten van de blauwe kleur in het rode frame wordt niet storend waargenomen. We hebben echter nog last van flikkering omdat we slechts op 30 Hz werken. Ten laatste hebben we ook nog voorstellen gedaan om de performantie van deze projector op korte en op lange termijn te verbeteren.

We hebben hier dus een LED projector ontworpen met goede beeldkwaliteit en een matige lichtopbrengst. Deze laatste zal in de toekomst snel toenemen met de evoluties in LED- en LCOS-technologieën. Door twee panelen te gebruiken in plaats van drie, hebben we een optimale kostprijs-performantie afweging gerealiseerd. Dit semi-kleursequentieel systeem reduceert bovendien sterk de tekortkomingen van een klassiek kleursequentieel systeem, zoals color-breakup.

4. Algemeen besluit

LED gebaseerde projectoren hebben vele voordelen vergeleken met klassieke projectoren. Ze zijn compacter, hebben een grotere kleurengamut en een langere levensduur, ze hebben een hogere dimmingsratio, de voedingsspanningen zijn lager en ze kunnen zelfs op batterijen werken. Echter LED's hebben een lage luminantie, flux per étendue, hoewel deze ook nog steeds toeneemt. Met behulp van een efficiënt ontwerp kunnen we LED projectoren bouwen met een matige lichtopbrengst en superieure eigenschappen, bv. de beeldkwaliteit.

In dit werk hebben we twee verschillende architecturen ontworpen. De eerste architectuur is een compact 3-LCOS-systeem, waarbij elk paneel (0.64" diagonaal) belicht wordt met één kleur (1 LED). De drie kanalen worden vervolgens gerecombineerd met een dichroïsche kubus (X-kubus). Deze 3-LCOS-architectuur hebben we gesimuleerd en ze levert 85 lm D65-licht op bij een systeemétendue van 12 mm²sr. Het contrast is slechts 400:1 en de uniformiteit is matig (heldere randen). De kleurengamut is veel groter (+72%) dan die van een klassiek televisietoestel (NTSC standaard), waardoor de beelden levendiger zullen zijn. We hebben een grote kleurzuiverheid. Bovendien ondervinden we geen last van colour-breakup en kleuroverspraak. Er zijn echter ook nadelen aan dit systeem. Doordat de lichtstralen na de modulatie propageren doorheen de PBS door totale interne reflectie, zullen er spookbeelden ontstaan naast het scherm. Een tweede minpunt merken we op als we de kleurbalans bestuderen. We zien hier dat de groene LED het systeem limiteert en de rode en blauwe LED's en de bijhorende panelen niet ten volle benut worden. Ze werken op minder dan half vermogen. Dit betekent dat we in principe de modulatie van rode en blauwe informatie door één LCOS-paneel kunnen laten verlopen om zo een paneel uit te sparen. Dit maakt het systeem goedkoper en de alignatie gemakkelijker.

Hoewel de lichtopbrengst van dit systeem redelijk goed is, hebben we deze architectuur niet verder (experimenteel) uitgewerkt. De reden hiervoor is de matige beelduniformiteit en contrast, ontstaan van spookbeelden en niet ten volle kunnen benutten van rode en blauwe kanalen (LED + LCOS). Om deze redenen zijn we overgegaan naar een 2-LCOS-systeem.

Bij deze 2-LCOS-architectuur worden de blauwe en de rode informatie afwisselend gemoduleerd door eenzelfde paneel. Het tweede paneel moduleert continu de groene informatie. De panelen hebben een diagonaal van 0.82" en de systeemétendue is 19.73 mm²sr. Deze architectuur hebben

we eerst gesimuleerd met simulatiepakket ZEMAX. We bekomen een lichtopbrengst van 128.8 lm, een contrast van 2500:1 en een zeer goede beelduniformiteit. De panelen en de LED's worden nu ten volle benut. Het systeem is echter minder compact. Vervolgens hebben we een demonstrator opstelling opgebouwd en deze experimenteel gekarakteriseerd. Deze demonstrator produceert 37.3 lm wit licht met een contrast van 477:1. Het verschil in deze performanties (in vergelijking met de simulaties) werden besproken. De uniformiteit is nog steeds zeer goed. We hebben terug een grote kleurengamut waardoor er veel meer en zuiverdere kleuren kunnen gevormd worden. Hoewel dit een kleursequentieel systeem is, is de colour-breakup en de kleuroverspraak sterk gereduceerd.

In dit werk hebben we aangetoond dat met de huidige generatie LED's een projector kan ontworpen worden met een matige lichtopbrengst en een zeer goede beeldkwaliteit. Deze projector biedt veel meer perspectieven dan een klassieke projector. De lichtopbrengst zal door technologische vooruitgang in de toekomst sterk kunnen stijgen. Bovendien opent LED-projectie nieuwe domeinen die pas toegankelijk worden door de opkomst van LED's als lichtbron, zoals bv. cockpit projectiedisplays.

Referenties

- [1] H. Murat, H. De Smet, “Novel optical architectures for LED-based LCOS projectors”, *8ste FirW Doctoraatssymposium UGent*, pp. 90,2007.
- [2] H. Murat, H. De Smet, D. Cuypers, “Compact LED projector with tapered light pipes for moderate light output applications”, *Displays (Elsevier) Vol. 27*, pp. 117-123, 2006.
- [3] H. Murat, D. Cuypers, H. De Smet, Y. Meuret, B. Van Giel, L. Bogaert, H. Thienpont, “Two liquid crystal on silicon panel projector with efficient light-emitting diode illumination engine”, *Optical Engineering Vol 46*, pp. 124002/1-124002/6, 2007.
- [4] X.-J. Yu, Y.L. Ho, L. Tan, H.-C. Huang, H.-S. Kwok, “LED-Based Projection Systems”, *Journal of Display Technology Vol 3*, pp. 1551:1-9, 2007.
- [5] X. Zhang, J.E. Farrell, “Sequential color breakup measured with induced saccades”, *Proceedings of SPIE Vol 5007*, pp. 210-217, 2003.
- [6] <http://www.zemax.com/>
- [7] http://www.osram-os.com/osram_os/EN/
- [8] A. Rosenbluth, M. Lu, K.-H. Yang, K. Ho, R.N. Singh, T. Nakasogi, “Correction of contrast in projection systems by means of phase-controlled prism coatings and band-shifted twist compensators”, *Projection Displays 2000: Sixth in a Series Vol 3954*, pages 63-90, 2000.

- [9] A. Rosenbluth, D. Dove, F. Doany, R. Singh, K. Yang, M. Lu, "Contrast properties of reflective liquid crystal light valves in projection displays", *IBM J. Res. Dev.* 42, pp. 359–386, 1998.
- [10] Optical Design Program User's Guide, 2006.
- [11] <http://en.wikipedia.org/wiki/NTSC/>
- [12] L. Bogaert, Y. Meuret, B. Van Giel, H. Murat, H. De Smet, H. Thienpont, "Comparison of the light output of LCOS projection architectures using LEDs", *Displays (Elsevier)* Vol. 29, pp 1-9, 2008.
- [13] ANSI/PIMA IT7.227-1998: "American National Standard for Audiovisual Systems - Electronic Projection – Variable resolution projectors", 1998.
- [14] B. Van Giel, Y. Meuret, L. Bogaert, H. Murat, H. De Smet, H. Thienpont, "LED projector with two liquid crystal on silicon light valves and a fly's eye integrator", *Displays (Elsevier)*, 2008 (geaccepteerd).
- [15] H. Zou, A. Schleicher, J. Dean, "Single-Panel LCOS Color Projector with LED light Sources", *SID Int Symp Digest of Technical Papers*, pp. 1698-1701, 2005.
- [16] H. Murat, A. Gielen, H. De Smet, "Gradually tapered light pipes for illumination of LED projectors", *JSID Vol. 15*, pp 519-526, 2007.
- [17] H. Murat, H. De Smet, D. Cuypers, Y. Meuret, H. Thienpont, M. Vervaeke, L. Desmet, "Increased lumens per étendue by combining pulsed light-emitting diodes", *Optical Engineering Vol. 45*, pp. 034002:1-8, 2006.
- [18] V. Presnyakov, Z. Lui, V.G. Chigrinov, "Fast optical retarder using deformed-helical ferroelectric liquid crystals", *Proceedings of the SPIE Vol 5970*, pp. 426-435, 2005.
- [19] D. Cuypers, "Vertically Aligned Nematic Liquid Crystal Microdisplays for Projection Applications", *Doctoraatsproefschrift Faculteit Toegepaste Wetenschappen, Universiteit Gent*, Promotor: H. De Smet, pp. 1-320, 2005.

- [20] P. Janssen, "Scrolling color projector and a scanner phase control therefor", *EP 1380176*, Philips NV, 2004-01-14.
- [21] W. Somers, H. Murat, "Kleurzuiverheid versus lichtopbrengst van een LED-projector", *Master's thesis Faculteit Toegepaste Wetenschappen, Universiteit Gent*, Promotor H. De Smet, pp. 1-95, 2008.
- [22] http://en.wikipedia.org/wiki/Gamma_correction/
- [23] H. Murat, H. De Smet, D. Cuypers, L. Bogaert, B. Van Giel, Y. Meuret, "Two LCOS full color projector with efficient LED illumination engine", *SID-ME Chapter spring meeting*, Technical presentations, 2008.
- [24] H. Murat, A. Avci, R. Beernaert, K. Dhaenens, H. De Smet, L. Bogaert, B. Van Giel, Y. Meuret, "Two LCOS full color projector with efficient LED illumination engine. JSID", *special issue "Best of Jena 2008"*, ingediend.
- [25] http://www.oerlikon.com/ecomaXL/index.php?site=OPTICS_EN_helif_pbs/
- [26] http://www.moxtek.com/optics/visible_light.html/
- [27] <http://www.oceanoptics.com/products/usb2000+.asp>
- [28] <http://www.photoresearch.com/current/pr670.asp>
- [29] J. Chen, M.G. Robinson, G.D. Sharp, "Invited: High contrast MacNeille PBS based LCOS projection systems", *Proceedings of SPIE Vol 5740*, pp. 76-87, 2005
- [30] Y. Meuret, "De contrast- en kleurenproblematiek van digitale projectoren met een grote helderheid", *Doctoraatsproefschrift Faculteit Toegepaste Wetenschappen, Universiteit Gent*, Promotor: P. De Visschere, pp. 1-225, 2004.
- [31] <http://webvision.med.utah.edu/temporal.html#flicker>

- [32] E.H. Stupp, M.S. Brennessoltz, "Projection Displays", SID Series in Display Technology, Wiley, 1999.
- [33] A.V. Arecchi, T. Messadi, R.J. Kosheh, "Field Guide to Illumination", SPIE Vol FGII, 2007.
- [34] J. Wheatley, C. Leatherdale, A. Ouderkirk, "POLARIZED LED", *EP 20050801187*, 3M Center, 2007-11-07.
- [35] H. De Smet, J. Van Den Steen, G. Van Doorselaer, A. Van Calster, "Refresh pixel circuit for active matrix", *EP 1516314 (A1)*, Gemidis NV, 2005-03-23.
- [36] IWT O&O project, "NeGenPix: Development of a next generation pixel LCOS microdisplay device", 1/11/2006-30/4/2009.

Hoofdstuk 5

Besluiten en toekomstperspectieven

1. Besluiten

LED's zijn zeer interessante lichtbronnen voor gebruik in projectieapplicaties. Ze hebben vele voordelen vergeleken met de klassieke projectorlichtbronnen zoals UHP-lampen. LED's zijn compact en robuust, hebben een veel langere levensduur en door hun smalbandigheid beschrijven ze een groter kleurengamut. Ze vereisen lagere werkspanningen en kunnen zelfs op batterijen werken; ze hebben een zeer hoge verduisteringsratio doordat ze gepulst kunnen worden. Het ontbreken van ontploffingsgevaar en giftige stoffen (cfr. kwik bij UHP-lampen) is een bijkomende troef. Ze hebben momenteel een te lage helderheid (lichtflux per étendue) waardoor ze enkel geschikt zijn voor projectoren met matige lichtopbrengst. LED's hebben echter een totaal verschillende elektrische, fysische, thermische en geometrische eigenschappen dan de klassieke lichtbronnen. Daarom moet het systeem volledig opnieuw ontworpen worden conform met de eigenschappen en de vereisten van LED's. In deze doctoraatsstudie hebben we verschillende delen van een projectoropstelling hieraan aangepast en vervolgens twee nieuwe LCOS-projectorarchitecturen ontworpen. Daarvan hebben we ene ook effectief geïmplementeerd en hebben een demonstratoropstelling opgebouwd.

Het belichtingsdeel, dat de helderheid en de uniformiteit van een projector bepaalt, vereist de voornaamste aanpassingen. Dit deel omvat de lichtbron, het collectie- en het homogenisatiesysteem. Het is belangrijk dat we een efficiënt belichtingssysteem ontwerpen, maar eveneens dat we vertrekken

vanuit LED's met een hoge helderheid. OSTAR LED's (met 2 x 2 chips) zijn daarom zeer geschikt en hebben een goede étendue-overeenkomst met het ontworpen systeem. Daarom hebben we deze LED's als lichtbron gebruikt in de projectoropstelling. Het belichtingssysteem van klassieke projectoren is niet geschikt voor LED's en moet aangepast worden. We hebben nieuwe systemen onderzocht om zo efficiënt mogelijk het licht te kunnen collecteren binnen de systeemétendue en om te zetten naar de gewenste spatiale (vorm lichtklep) en angulaire (met f-getal van 2.88) distributie. De commercieel beschikbare componenten hebben een zeer lage collectie-efficiëntie (helderheidsefficiëntie). Bovendien moet het gecollecteerde licht nog gehomogeniseerd worden met een rechthoekige lichtpijp wat het totale systeem te volumineus maakt. Daarom hebben we nieuwe componenten moeten ontwerpen. Hiervoor hebben we zowel gebruik gemaakt van parabolische/elliptische reflectoren in combinatie met een rechthoekige lichtpijp als van alternatieve ontwerpen. De reflector benadering is echter te omslachtig en niet efficiënt genoeg. Een alternatief ontwerp is de Gradually Tapered Light Pipe (GTLP), die zeer geschikt is voor op LED gebaseerde belichtingssystemen. De GTLP collecteert de lichtflux door LED optisch te koppelen met het ingangsvlak, zet het stralingspatroon (spatiaal en angulaair) om naar de gewenste vorm en homogeniseert de lichtspot zodat deze rechtsreeks de lichtklep kan belichten. LED + GTLP vormen dus een compact (lengte 90 mm), monolithisch geheel dat het volledige belichtingssysteem vormt. We hebben deze component ontworpen, gesimuleerd, gefabriceerd en experimenteel gekarakteriseerd. De gesimuleerde collectie-efficiëntie bedraagt 81.1% en de experimentele collectie-efficiëntie 76.9%. De performantie van de gefabriceerde component is dicht bij de simulatiewaarde, wat een geslaagde fabricage aantoont.

Het belangrijkste nadeel van LED's is de te lage helderheid (lumen per étendue). Een onderzoeksonderwerp in deze studie is dan ook het ontwikkelen van intelligente methodes om deze geringe helderheid te verhogen. Hiervoor hebben we gebruik gemaakt van de mogelijkheid om LED's te kunnen pulsen. Door meerdere LED's afwisselend te pulsen met hogere piekstromen om hogere piekfluxen te verkrijgen en deze in de tijd te combineren, verkrijgen we een hogere helderheid. De gepulste LED moet telkens in het optische pad gebracht worden (mechanisch of optisch). We hebben twee systemen uitgewerkt waarbij we telkens twee LED's afwisselend pulsen. In het eerste systeem worden de orthogonaal gepositioneerde LED's gecombineerd met een ronddraaiend, transparant/spiegelend gesegmenteerde glasplaat in het bissectricevlak dat aangedreven wordt door een stappenmotor. Hiermee hebben we een

winstpercentage (in helderheid) opgemeten van bijna 50% en dit systeem kan gebruikt worden bij eender welk type lichtklep. Het grote nadeel is dat er bewegende onderdelen in voorkomen, wat eerder ongewenst is in een projectiesysteem. Bij het tweede systeem worden de gepulste LED's gecombineerd met een PBS en de uitgangsflux wordt op eenzelfde polarisatie gebracht d.m.v. een schakelbare halfgolflengteplaat dat op het ritme van de LED's gepulst wordt. Hiermee hebben we een winst van 36% gerealiseerd. Dit systeem is echter enkel zinvol voor op polarisatie gebaseerde lichtkleppen zoals LCOS en kan bijvoorbeeld bij DMD's niet gebruikt worden. Het grote voordeel in vergelijking met het eerste systeem, is dat er hier geen bewegende onderdelen in voorkomen. Dit systeem hebben we in een latere fase gebruikt in de ontworpen 2-LCOS-architectuur.

We hebben eveneens enkele optische metingen gedaan bij LED's onder gepulste toestand om de respons op verhoogde piekstromen te kunnen karakteriseren. We hebben een levensduurmeting uitgevoerd waarbij de lichtflux van de gepulste LED na 5 kh afnam met 17%. Een lineaire extrapolatie geeft aan dat na 15 kh de lichtopbrengst zou halveren. Vergelijken met de 80 kh bij de nominaal aangestuurde LED is de levensduur dus drastisch verminderd, maar nog steeds beter dan die van een UHP-lamp. Na 6 kh is de LED echter gefaald. Aangezien we slechts één sample getest hebben, heeft deze test niet echt een statistische waarde. Verder hebben we colorimetrische verschijnselen onder gestresse toestand geanalyseerd. Bij het pulsen van LED's hebben we een ogenblikkelijk, elektrisch en een blijvend, thermisch effect waargenomen. Het ogenblikkelijke effect is de verschuiving van het spectrum naar een lagere golflengte voor de groene en blauwe LED en naar hogere voor de rode LED. Deze verschuiving is evenredig met de pulsstroom. De FWHM wordt ook verbreed evenredig met de pulsstroom (en het vermogen). Aangezien het spectrum verschuift, zal ook de dominante golflengte (kleur) en de kleurcoördinaten mee opschuiven. Als we terug overgaan van gepulste naar nominale aansturing, zien we dat dit effect wegvalt, maar er is wel een ander blijvend effect opgetreden, namelijk het optische vermogen dat verlaagt met de tijd. Deze verlaging treedt veel sneller op dan indien we LED's niet zouden pulsen, of de piekstroom beperken. Verder is er ook een blijvende, maar eerder geringe verschuiving naar hogere golflengte en zal de FWHM ook permanent vergroten (ook gering). Dit effect is groter voor een rode LED dan voor blauw en groen. Ten slotte hebben we ook nog de uitkoppelingsefficiënties, wall-plug-efficiënties en de saturatiestromen bij verschillende duty cycles opgemeten van deze LED's. De saturatiestromen waren steeds groter dan de gebruikte piekstromen.

In het tweede deel van dit onderzoek hebben we twee volledige projectiesystemen ontworpen. De eerste architectuur is een compact 3-LCOS-systeem, waarbij elk paneel belicht wordt met één kleur (1 LED). Deze 3-LCOS-architectuur hebben we gesimuleerd en ze levert 85 lm D65-licht op bij een systeemétendue van $12 \text{ mm}^2\text{sr}$. Het contrast is slechts 400:1 en de uniformiteit is matig (heldere randen). De kleurengamut is veel groter dan die van een klassiek televisietoestel (NTSC-standaard), waardoor de beelden levendiger zullen zijn. We hebben een grote kleurzuiverheid. Bovendien ondervinden we geen last van colour-breakup en kleuroverspraak. Er zijn echter ook nadelen aan dit systeem. Het uitgangsvlak van de lichtpijp wordt niet op het LCOS-paneel afgebeeld waardoor de uniformiteit in zekere mate verloren gaat. Bovendien, door het feit dat het licht opgesloten zit in de PBS na de modulatie, kunnen er spookbeelden ontstaan naast het scherm. Een tweede minpunt merken we op als we de kleurbalans bestuderen. We zien hier dat de groene LED het systeem limiteert en de rode en blauwe LED's en de bijhorende panelen niet ten volle benut worden. Ze werken op minder dan half vermogen. Dit betekent dat we in principe de modulatie van rode en blauwe informatie door één LCOS-paneel kunnen laten verlopen om zo een paneel uit te sparen. Dit maakt het systeem goedkoper en de alignatie gemakkelijker. Om deze redenen hebben we de 3-LCOS-architectuur niet verder uitgewerkt en is het enkel bij simulaties gebleven.

De tweede architectuur is een 2-LCOS-systeem, waarbij de blauwe en de rode informatie afwisselend gemoduleerd worden door eenzelfde paneel. Het tweede paneel moduleert continu de groene informatie. De systeemétendue van dit ontwerp bedraagt $19.73 \text{ mm}^2\text{sr}$. Deze architectuur hebben we eerst gesimuleerd. We bekomen een lichtopbrengst van 128.8 lm D65-licht, een contrast van 2500:1 en een zeer goede beelduniformiteit. De panelen en de LED's worden nu ten volle benut. Het systeem is echter minder compact. De resultaten waren veelbelovend en daarom zijn we overgegaan tot het implementeren van deze architectuur. We hebben een demonstratoropstelling opgebouwd en deze experimenteel gekarakteriseerd. Voor de aansturing van de LED's en de synchronisatie met de LCOS-panelen en de videobron hebben we specifieke elektronische schakelingen ontwikkeld. Deze demonstrator produceert 37.3 lm D65-licht met een contrast van 477:1. Het verschil in deze performanties (in vergelijking met de simulaties) worden in dit werk besproken. De uniformiteit is nog steeds zeer goed. We hebben terug een grote kleurengamut waardoor er veel meer en zuiverdere kleuren kunnen gevormd worden. Hoewel dit een kleursequentieel systeem is, is de colour-breakup en de kleuroverspraak sterk gereduceerd, doordat het groene kanaal, die de meeste informatie

bevat, niet kleursequentieel werkt. We hebben echter nog last van flikkering omdat we slechts op 30 Hz werken.

We hebben hier dus een LED-projector ontworpen met goede beeldkwaliteit en een matige lichtopbrengst. Door twee panelen te gebruiken in plaats van drie, hebben we een optimale kostprijs-performantie afweging gerealiseerd. Dit semi-kleursequentieel-systeem reduceert bovendien sterk de tekortkomingen van een klassiek kleursequentieel systeem, zoals colour-breakup.

2. Verdere optimalisaties

De matige lichtopbrengst van deze LED-projector kan nog sterk verbeterd worden. Hiervoor zijn er bepaalde optimalisaties nodig. Deze optimalisaties kunnen we opsplitsen in wat vandaag de dag technologisch mogelijk is en wat er in de toekomst mogelijk zal zijn door nieuwe technologische ontwikkelingen.

De optische componenten die in de opstelling gebruikt worden, zijn niet altijd de meest geschikte componenten, waardoor de throughput niet maximaal is. De lichtopbrengst kan gemakkelijk verhoogd worden door o.a. op alle componenten AR-coatings aan te brengen, een meer geschikte PBS en projectielens te gebruiken, het fabricageproces van de lichtpijp te optimaliseren en de LED-samples aan te schaffen met de hoogste binning (lichtopbrengst). De cumulatief te verwachten winst van al deze maatregelen is een factor 1.9 en we zouden dus een lumenoutput van boven de 70 lm kunnen verkrijgen.

Optimalisaties die momenteel technologisch niet mogelijk zijn, maar waar er onderzoek rond gebeurt, zijn de vooruitgangen in de LED- en LCOS-technologieën. De helderheid van LED's stijgt nog steeds waardoor de lichtopbrengst van de projector ook zal stijgen. Bovendien wordt er ook onderzoek verricht rond gepolariseerde LED's. Dit zal de helderheid van het juist gepolariseerd licht doen toenemen. De LCOS-panelen die we gebruiken, hebben een lange schrijftijd nodig waardoor de belichtingstijd in kleursequentiële werking gereduceerd wordt. Dit probleem zou men kunnen verhelpen indien de panelen veel sneller dan een frametijd kunnen geschreven worden. Een andere oplossing is het voorzien van een framegeheugen. Het frame wordt dan eerst naar het geheugen geschreven en dan pas ogenblikkelijk op het paneel gezet. Hierdoor kan de frametijd ten

volle benut worden om te belichten. Bovendien kan er dan ook op hogere beeldfrequenties gewerkt worden waardoor de flikkering zal verdwijnen. Rond dit onderwerp wordt er momenteel ook onderzoek gedaan.

Deze optimalisaties hebben we niet kunnen doorvoeren en we hopen dat dit in de toekomst wel zal gebeuren. Hiermee zal de lichtopbrengst van de projector gevoelig verbeteren (met een factor 3.3 zonder rekening te houden met de LED-evolutie).

3. Algemeen besluit

In dit werk hebben we aangetoond dat met de huidige generatie LED's een projector kan ontworpen worden met een matige lichtopbrengst en een zeer goede beeldkwaliteit. Deze projector biedt veel meer perspectieven dan een klassieke projector. De lichtopbrengst zal door technologische vooruitgang in de toekomst sterk kunnen stijgen. Bovendien opent LED-projectie nieuwe domeinen die pas toegankelijk worden door de opkomst van LED's als lichtbron, zoals bv. cockpit projectiedisplays.

Publicatielijst

Wetenschappelijke publicaties:

1. H. Murat, A. Avci, R. Beernaert, K. Dhaenens, H. De Smet, L. Bogaert, B. Van Giel, Y. Meuret, "Two LCOS full color projector with efficient LED illumination engine", Displays (ingediend).
2. L. Bogaert, B. Van Giel, Y. Meuret, H. Murat, H. De Smet, "Stereoscopic projection display with LCOS panels and LED light sources", JSID special issue "Best of Jena 2008" (geaccepteerd).
3. B. Van Giel, Y. Meuret, L. Bogaert, H. Murat, H. De Smet, H. Thienpont, "LED projector with two liquid crystal on silicon light valves and a fly's eye integrator", Displays, Vol 29(5), pp. 464-470, 2008.
4. L. Bogaert, Y. Meuret, B. Van Giel, H. Murat, H. De Smet, H. Thienpont, "Demonstration of a polarization-based full-color stereoscopic projection display using liquid crystal on silicon panels and light emitting diodes", Proceedings of SPIE, Vol 7001, 2008.
5. L. Bogaert, Y. Meuret, B. Van Giel, H. Murat, H. De Smet, H. Thienpont, "Projection display for the generation of two orthogonal polarized images using liquid crystal on silicon panels and light emitting diodes", Applied Optics Vol 47, pp. 1535-1542, 2008.
6. H. Murat, H. De Smet, D. Cuypers, L. Bogaert, B. Van Giel, Y. Meuret, "Two LCOS full color projector with efficient LED illumination engine", SID-ME Chapter spring meeting 2008, Technical presentations, 2008.

7. L. Bogaert, Y. Meuret, B. Van Giel, H. Murat, H. Thienpont, "Stereoscopic projection display with LCOS panels and LED light sources", SID-ME Chapter spring meeting 2008, Technical presentations, 2008.
8. L. Bogaert, Y. Meuret, B. Van Giel, H. Murat, H. De Smet, H. Thienpont, "Comparison of the light output of LCOS projection architectures using LEDs", Displays, Vol 29, pp. 1-9, 2008.
9. H. Murat, H. De Smet, "Novel optical architectures for LED-based LCOS projectors", 8ste FirW Doctoraatssymposium, UGent, pp. 90, 2007.
10. H. Murat, D. Cuypers, H. De Smet, Y. Meuret, B. Van Giel, L. Bogaert, H. Thienpont, "Two liquid crystal on silicon panel projector with efficient light-emitting diode illumination engine", Optical Engineering, Vol. 46, pp. 124002/1-124002/6, 2007.
11. B. Van Giel, Y. Meuret, L. Bogaert, H. Murat, H. De Smet, H. Thienpont, "Efficient and Compact Illumination in LED Projection Displays", Proceedings of the SID International Symposium, Digest of Technical Papers, Vol. 38, pp. 947-950, 2007.
12. H. Murat, A. Gielen, H. De Smet, "Gradually tapered light pipes for illumination of LED projectors", JSID, Vol. 15, pp. 519-526, 2007.
13. H. Murat, D. Cuypers, H. De Smet, "Design of new collection systems for multi LED light engines", Proceedings of SPIE, Photonics in Multimedia, Vol. 6196, pp. 619604/1-619604/11, 2006.
14. H. Murat, H. De Smet, D. Cuypers, "Compact LED projector with tapered light pipes for moderate light output applications", Displays, Vol 27, pp. 117-123, 2006.
15. H. Murat, H. De Smet, D. Cuypers, Y. Meuret, H. Thienpont, M. Vervaeke L. Desmet, "Increased lumens per étendue by combining pulsed light-emitting diodes", Optical Engineering, Vol 45, pp. 034002:1-8, 2006.

16. H. Murat, H. De Smet, D. Cuypers, “Time sharing of pulsed LEDs increases lumen output within the same étendue”, SID-ME Chapter & Le Club Visu, joint Spring meeting 2005, Technical presentations, 2005.
17. H. Murat, H. De Smet, D. Cuypers, Y. Meuret, H. Thienpont, M. Vervaeke and L. Desmet, “Increased lumens per étendue by combining pulsed LED’s”, Proceedings of SPIE, Projection Displays XI. Vol. 5740, pp. 1-12, 2005.

Begeleide master’s thesissen:

1. W. Somers, H. Murat, “Kleurzuiverheid versus lichtopbrengst van een LED-projector”, Master’s thesis Faculteit Toegepaste Wetenschappen, Universiteit Gent, Promotor H. De Smet, pp. 1-95, 2008.
2. T. Vanlaeken, H. Murat, “Het bouwen van een LED belichtings-engine voor projectoren”, Master’s thesis Faculteit Toegepaste Wetenschappen, Universiteit Gent, Promotor H. De Smet, pp. 1-87, 2005.
3. W. Vandevelde, H. Murat, “Ontwerp en realisatie van een efficiënt belichtingssysteem voor microdisplays”, Master’s thesis Faculteit Toegepaste Wetenschappen, Universiteit Gent, Promotor H. De Smet, pp. 1-85, 2004.

Bijlage A

Fundamentele begrippen en grootheden

1. Grootheden en eenheden

1.1 Radiometrische (energetische) grootheden

In de radiometrie worden de grootheden opgemeten in de overeenkomstige SI-eenheden (Joule, Watt, etc.). Aangezien licht een bijzondere soort elektromagnetische straling is, kan men gebruik maken van deze energetische grootheden om het licht op te meten. Het vermogen dat door een bron wordt uitgestraald noemen we de stralingsflux Φ_e . Deze grootheid wordt opgemeten in Watt (W). Het vermogen dat wordt uitgestraald door een puntbron in een bepaalde richting noemen we de stralingsintensiteit I_e , opgemeten in Watt per steradiaal (W/sr). Steradiaal is de eenheid van ruimtehoek. Voor een uitgestrekte bron definiëren we het vermogen per eenheid van oppervlakte: de stralingsemittantie M_e in W/m^2 . Langs de kant van de ontvanger spreekt men van bestralingssterkte E_e . Het vermogen dat wordt uitgestraald door een uitgestrekte bron in een bepaalde richting per eenheid van schijnbare oppervlakte noemen we radiantie L_e , gemeten in W/m^2sr . Deze grootheden worden samengevat in tabel A.1. Het is ook mogelijk om spectrale dichtheden in te voeren voor deze grootheden. We spreken dan van de spectrale stralingsfluxdichtheid $\Phi_{e,\lambda}$, gemeten in W/nm .

| Radiometrisch | | | Fotometrisch | | |
|-----------------------|----------|---------------------|---------------------|----------|--|
| Grootheid | Symbool | Eenheid | Grootheid | Symbool | Eenheid |
| Stralingsflux | Φ_e | W | Lichtflux | Φ_v | lumen (lm) |
| Stralings-emittantie | M_e | W/m ² | Licht-emittantie | M_v | lux (lx) = lm/m ² |
| Bestralings-sterkte | E_e | | Belichtings-sterkte | E_v | |
| Stralings-intensiteit | I_e | W/sr | Licht-intensiteit | I_v | Candela (cd) = lm/sr |
| Radiantie | L_e | W/m ² sr | Luminantie | L_v | nit (nt) = cd/m ² = lx/sr |

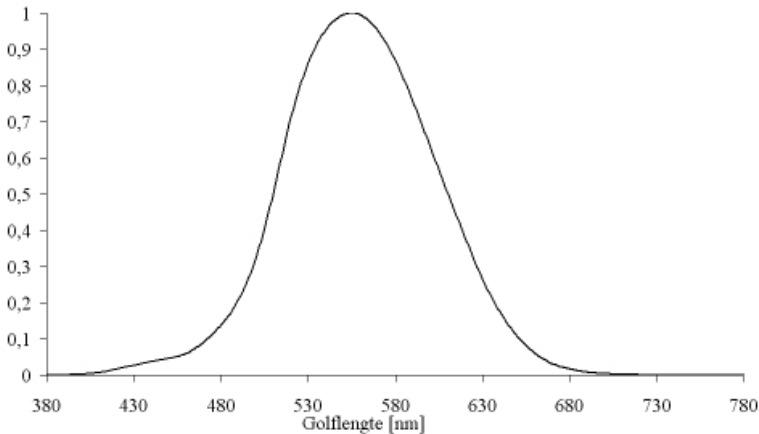
Tabel A1: Overzicht van de belangrijkste radiometrische en fotometrische grootheden

1.2 Fotometrische grootheden

Om rekening te houden met de spectrale gevoeligheid van het menselijk oog bij het meten van licht voerde men de fotometrische grootheden in. Hierbij maakt men gebruik van ooggevoeligheidsfunctie $V(\lambda)$ (zie figuur A.1). Men voert een gewogen integratie uit van de spectrale dichtheid van een energetische grootheid om de overeenkomstige fotometrische grootheid te vinden:

$$X_v = K_m \int_{380}^{780} V(\lambda) X_{e,\lambda} d\lambda \quad \text{met } K_m = 683 \text{ lm/W} \quad (\text{A.1})$$

Lumen (lm) is dus de fotometrische eenheid van de lichtflux, de fotometrische grootheid die overeenstemt met de stralingsflux. De andere grootheden vinden we op analoge manier. De symbolen en eenheden voor de lichtemittantie, de belichtingssterkte, de lichtintensiteit en de luminantie vinden we terug in tabel A.1. Een lumen per steradiaal wordt een candela (cd), een lumen per oppervlakte-eenheid wordt een lux (lx) en een candela per vierkante meter (of lux per steradiaal) wordt een nit (nt) genoemd.



Figuur A.1: Standaard spectrale ooggevoeligheidsfunctie $V(\lambda)$ voor fotonisch zicht

2. Termen en begrippen

Étendue: zie hoofdstuk 1

f-getal ($f^\#$): zie hoofdstuk 1

Lambertiaanse straler: Een lichtbron waarvan de intensiteit een cosinusoidaal verloop heeft, (formule A.2) wordt een lambertiaanse straler genoemd. Hierbij is θ de hoek die de lichtstraal vormt met de normaal op het lichtbronoppervlak. Een lambertiaanse straler heeft als eigenschap dat de helderheid (luminantie) richtingsonafhankelijk is. Deze is gelijk aan $I(0)/S$ met S de oppervlakte van de lichtbron. De lichtemittantie van een lambertiaanse oppervlak is gelijk aan $\pi \cdot L_v$.

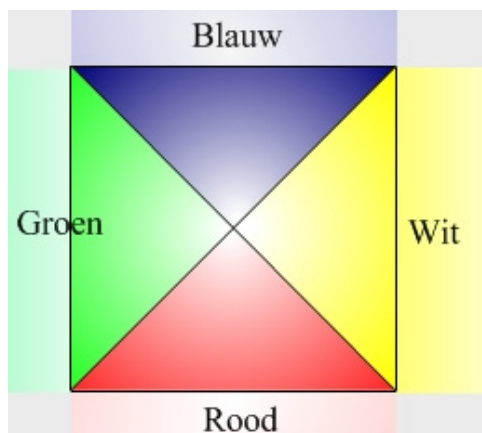
$$I = I(0) \cos \theta \quad (\text{A.2})$$

Polarisator/analysator: Een polarisator is een optische component die slechts één polarisatietoestand doorlaat en de andere polarisatietoestand reflecteert of absorbeert. Deze component wordt gebruikt in projectiesystemen met lichtkleppen die op polarisatie gebaseerd zijn.

Polarizing Beam Splitter (PBS): Een PBS is glazen kubus met op één van de diagonaalvlakken een meerlagencoating die ervoor zorgt dat het s-gepolariseerde licht gereflecteerd wordt en het p-gepolariseerde licht

doorgelaten wordt. Een klassieke PBS (MacNeille) maakt gebruik van de Brewster-conditie. Deze conditie geeft aan dat de reflectie van p-gepolariseerd licht aan het grensvlak tussen twee materialen met een verschillende brekingsindex, volledig verdwijnt voor een bepaalde invalshoek (de Brewster-hoek) aan dit grensvlak. Het s-gepolariseerde licht wordt deels doorgelaten en deels gereflecteerd. Om de reflectie van het s-gepolariseerde licht te verhogen wordt er een kwartgolflengte coating geconstrueerd zodat er een hoogreflectieve zone ontstaat voor het s-gepolariseerde licht, terwijl p-gepolariseerde licht nog steeds wordt doorgelaten door de Brewster-conditie.

X-kubus: Dit is een optische component in de vorm van een kubus waarbij op de diagonaalvlakken bepaalde dichroïsche coatings aangebracht worden die de combinatie (en/of scheiding) van de basiskleuren mogelijk maken. De drie zijvlakken worden gebruikt voor de drie basiskleuren als ingangsvlakken en het vierde vlak als uitgangsvlak van het gerecombineerde licht. In figuur A.2 wordt de werking van een X-kubus gedemonstreerd. Deze component wordt gebruikt in kleurenprojectoren met drie lichtkleppen om na de modulatie de verschillende kleurkanalen te recombineren alvorens het licht de projectielens bereikt.

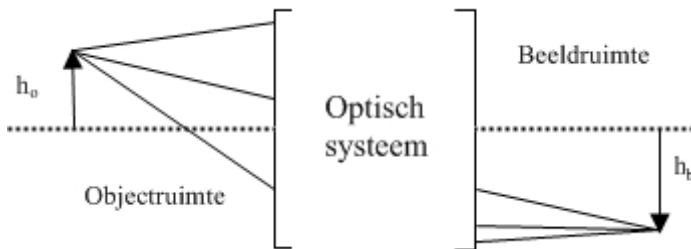


Figuur A.2: Werking van een X-kubus

Vulfactor: Het gedeelte van de lichtklep waarvan de oppervlakte gebruikt wordt voor de modulatie van het licht. Wordt ook vaak apertuurratio of geometrische apertuur genoemd.

Vergrotingsfactor: De verhouding van de laterale grootte van het beeld h_b tot de laterale grootte van het object h_o .

$$m = \frac{h_b}{h_o} \quad (\text{A.3})$$



Figuur A.3: Begrippen van een optisch systeem

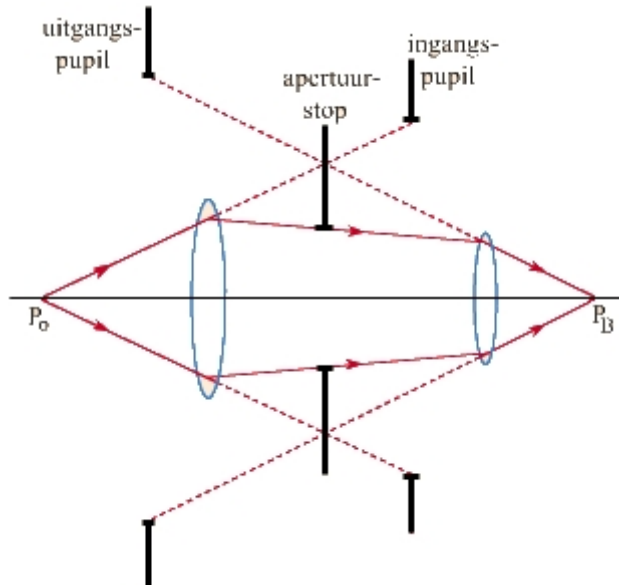
Werkafstand: De afstand van het ingangsvlak van het optische systeem tot het object. De ‘front focal length’ (FFL) is de afstand van het ingangsvlak tot het eerste (object) brandpunt. Bij een projectielens is het object gelegen in het eerste brandpuntsvlak aangezien men het object op grote afstand wil afbeelden. Vandaar dat de werkafstand en de FFL van een projectielens ongeveer gelijk zijn.

In de literatuur wordt het begrip ‘back focal length’ (BFL) soms gebruikt in plaats van FFL. Eigenlijk is dit niet correct aangezien de BFL de afstand is van het uitgangsvlak van het optische systeem tot het tweede brandpunt.

Apertuurstop: De apertuurstop van een optisch systeem is de apertuur die de maximale openingshoek van de lichtkegel bepaalt die vertrekt vanop de optische as van het systeem (figuur A.4).

Ingangs- en uitgangspupil: De ingangspupil is het beeld van de apertuurstop dat wordt gevormd door de lenzen van het optische systeem die voor de apertuurstop liggen. Als het verlengde van een lichtstraal die binnenkomt in het optische systeem door de ingangspupil gaat, dan gaat de lichtstraal zelf door de apertuurstop. De uitgangspupil is het beeld van de apertuurstop dat wordt gevormd door de lenzen van het optische systeem die na de apertuurstop liggen. Het verlengde van een lichtstraal die uit het optische systeem komt en dus door de apertuurstop is gegaan, gaat dus zeker

door de uitgangspupil. De apertuurstop, de ingangs- en de uitgangspupil van een optisch systeem worden afgebeeld in figuur A.4.

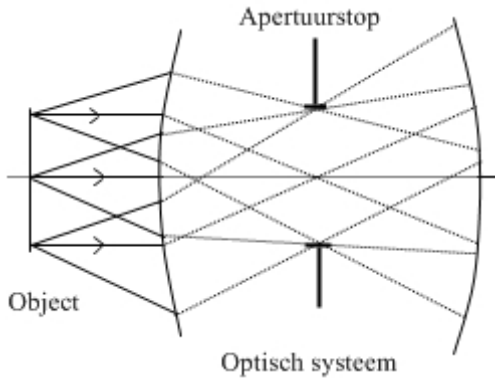


Figuur A.4: De apertuurstop, de ingangs- en uitgangspupil van een optisch systeem

Telecentriciteit: Een hoofdstraal is een lichtstraal die door het centrum van de apertuurstop van het optische systeem gaat. Telecentriciteit aan de kant van het object wil zeggen dat alle hoofdstralen aan die zijde van het optische systeem evenwijdig zijn met de optische as en dus ook met elkaar. Om dit te verkrijgen moet de apertuurstop gelegen zijn in het tweede brandpuntsvlak. De ingangspupil ligt dan op oneindig. Alle lichtkegels die vertrekken vanuit de objectruimte en worden doorgelaten door de apertuurstop zullen dezelfde openingshoek en richting hebben in deze situatie (zie figuur A.5). Bij telecentriciteit aan de kant van het beeld moet de apertuurstop gelegen zijn in het eerste brandpuntsvlak. In dit geval zullen alle lichtkegels die aankomen aan het beeldvlak dezelfde openingshoek en richting hebben.

Het voordeel van een telecentriciteit is dat alle lichtkegels dezelfde hoekverdeling hebben aan de optische coatings. Bij een projectiesysteem waarbij er verschillende schuine coatings aanwezig zijn tussen het belichtingssysteem en de lichtklep of tussen de projectielens en de lichtklep,

is het best om telecentriciteit te hebben aan de kant van de lichtklep om een uniforme lichtverdeling op het beeldscherm te krijgen.



Figuur A.5: Telecentriciteit aan de kant van het object

Bijlage B

Kleurentheorie

1. De kleurwaarneming

Het waarnemen van kleuren door de mens is een psychofysisch fenomeen. Een bepaalde kleur is geassocieerd aan een welbepaald spectrum van elektromagnetische straling dat op het netvlies valt. Het menselijk oog bevat receptoren, de kegeltjes genoemd, die gevoelig zijn voor slechts bepaalde golflengtes en kan dus niet elke component van dat spectrum onderscheiden. Bovendien is de respons bij verschillende golflengtes niet dezelfde. Het kan ook voorkomen dat twee stimuli met verschillende spectrale distributies toch als eenzelfde kleur worden waargenomen. Het oog kan eigenlijk drie zaken waarnemen: tint, helderheid en saturatie. Tint is de dominante golflengte die aanwezig is in een bepaald spectrum. De helderheid van een lichtbron heeft te maken met de lichtflux die uitgezonden wordt door deze bron. Saturatie is een maat voor de zuiverheid van een kleur. Bij een gesatureerde kleur is de lichtenergie verdeeld over een klein spectraal interval. Zo is de saturatie van een monochromatisch licht '1' en die van een wit licht '0'.

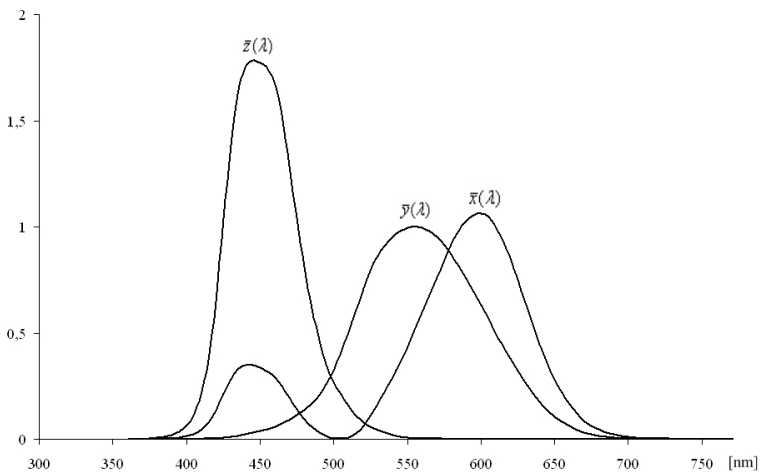
Wanneer men drie lichtbronnen gebruikt met een verschillende spectrale verdeling, kan men een gamma aan kleuren reconstrueren door de helderheid van elke lichtbron afzonderlijk te laten variëren. Afhankelijk van de spectrale verdeling van de lichtbron kan men een groter of kleiner gamma aan kleuren weergeven. De meest vanzelfsprekende keuze voor deze drie lichtbronnen is rood, groen en blauw. Deze kleuren worden de basiskleuren of de primaire kleuren genoemd.

De perceptie van licht steunt op het bestaan van drie sets receptoren, de kegeltjes, in het netvlies, één voor elke primaire kleur. Wit licht gaat al deze

receptoren stimuleren, terwijl cyaan licht de receptoren voor groen en blauw gaat stimuleren. Wanneer men bijvoorbeeld een scherm gaat belichten met verschillende intensiteiten van rood, groen en blauw licht, worden deze intensiteiten gesuperponeerd. Dit noemt men additieve kleurenmenging. Het oog kan deze primaire kleuren niet afzonderlijk detecteren. Wijzigt men één of meer van deze primaire kleuren in intensiteit, dan gaat het gesuperponeerde spectrum en dus de kleurwaarneming ook wijzigen.

2. CIE-1931-kleurfuncties

De methode om kleur te kwantificeren werd in 1931 vastgelegd door de 'Commission International de l'Eclairage' (CIE). Door vele psychofysische experimenten heeft men drie basisfuncties kunnen tabelleren, namelijk de drie dimensieloze functies $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$ en $\bar{z}(\lambda)$. Deze functies noemt men de kleurmatchingfuncties en het verloop ervan wordt getoond in figuur B.1. De curve $\bar{y}(\lambda)$ is dezelfde als de relatieve ooggevoeligheidscurve. De maximale waarde van deze curve wordt als referentie gebruikt en wordt gelijk aan '1' gekozen. Deze maximale waarde van de wordt bereikt bij 555 nm en wordt daarom ook de groene stimuluscurve genoemd. De curven $\bar{x}(\lambda)$ en $\bar{z}(\lambda)$ worden respectievelijk de rode en de blauwe stimuluscurven genoemd. Deze drie functies zijn zodanig dat de oppervlaktes onder de curven (integralen) even groot zijn.



Figuur B.1: De standaard CIE (1931) 2° kleurmatchingfuncties

Alhoewel deze functies aangepast werden in 1964 blijft men in de beeldschermindustrie hoofdzakelijk gebruik maken van de oorspronkelijke CIE (1931) 2° functies. Bij het opstellen van deze functies werd gebruik gemaakt van een 2° stimulus.

3. De kleurberekening

Wanneer een lichtstimulus met een bepaald spectrum $\Phi(\lambda)$ op het oog invalt, wordt een bepaalde kleur ervaren. Om deze kleur uniek vast te leggen heeft men tristimuluswaarden X , Y en Z gedefinieerd. Hierbij is K_m een constante met als waarde 683 lm/W.

$$\begin{aligned} X &= K_m \cdot \int_{380}^{780} \bar{x}(\lambda) \Phi(\lambda) d\lambda \\ Y &= K_m \cdot \int_{380}^{780} \bar{y}(\lambda) \Phi(\lambda) d\lambda \\ Z &= K_m \cdot \int_{380}^{780} \bar{z}(\lambda) \Phi(\lambda) d\lambda \end{aligned} \quad (\text{B.1})$$

Deze waarden komen overeen met de afzonderlijke hoeveelheden vermogen in het spectrum $\Phi(\lambda)$ die vervat is in elk van de drie kleurmatingfuncties $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$ en $\bar{z}(\lambda)$. De eenheid van de spectrale distributie $\Phi(\lambda)$ is watt per nm (W/nm) en de eenheden van de tristimuluswaarden X , Y en Z zijn lumen (lm). Deze uitdrukkingen kunnen ook numeriek berekend worden door de integraal te vervangen door een eindige som van producten.

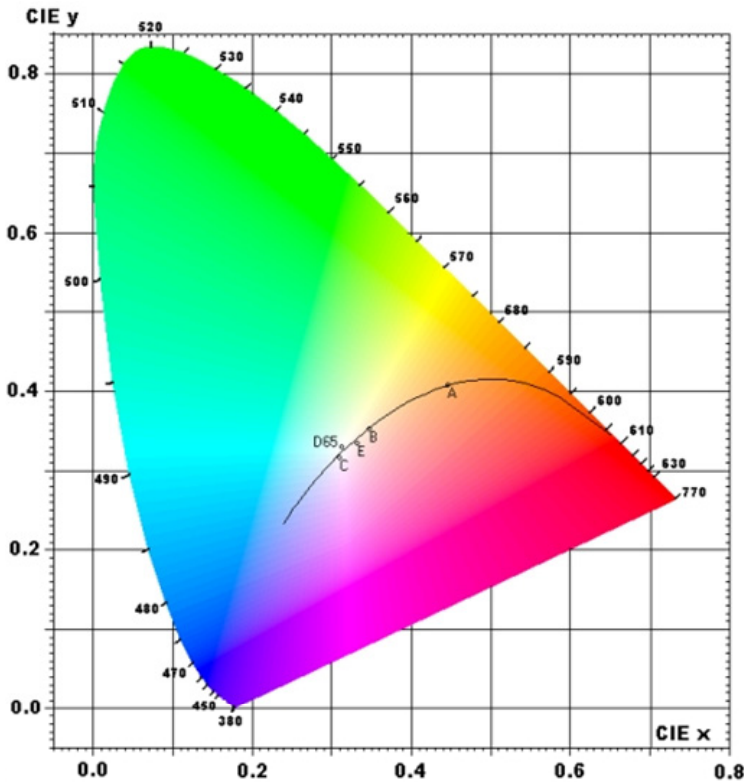
De tristimuluswaarden zijn absolute grootheden en ze zijn proportioneel met het optisch vermogen. Wanneer de lichtbron twee maal meer flux uitstraalt, zullen de tristimuluswaarden met dezelfde factor twee toenemen. Om een kleurwaarneming uniek vast te leggen heeft men in principe geen informatie nodig over het totale vermogen van het invallend licht en is enkel de verhouding tussen de tristimuluswaarden van belang. Daarom definieert men de kleurcoördinaten x , y en z als de genormaliseerde tristimuluswaarden ten opzichte van de som van de tristimuluswaarden (formule B.2). Door deze definitie zijn er maar twee kleurcoördinaten meer nodig om een kleur

volledig te kunnen karakteriseren. De derde coördinaat, ligt dan ook vast ($x + y + z = 1$). Meestal werkt men enkel met de x- en y-coördinaten.

$$\begin{aligned}x &= \frac{X}{X + Y + Z} \\y &= \frac{Y}{X + Y + Z} \\z &= \frac{Z}{X + Y + Z}\end{aligned}\tag{B.2}$$

4. Het kleurendiagram

De kleurcoördinaten (x,y) kunnen uitgezet worden in een tweedimensionale grafiek die men het kleurendiagram noemt (figuur B.2). De kleuren die zichtbaar zijn voor het menselijke oog vormen een gebied dat de vorm heeft van een hoefijzer. De bovenste rand van dit zichtbare kleureng gebied zijn de monochromatische kleuren die gaan van de kortste golflengte (380 nm) tot de langste golflengte (780 nm) die het menselijk oog kan waarnemen. Op de onderste rand (rechte lijn) van dit kleureng gebied liggen de kleuren die men bekomt door het mengen van deze uiterste monochromatische kleuren. Hoe dichter een punt tegen de hoefijzervormige rand komt te liggen, hoe zuiverder het overeenstemmende spectrum is (saturatie is '1' op de rand). Alle punten die binnen de hoefijzervormige kromme liggen, worden bekomen door spectra die een bepaalde verdeling hebben, maar zoals eerder vermeld, zijn deze spectra niet uniek. Dezelfde kleurcoördinaten kunnen verkregen worden door verschillende spectrale distributies.



Figuur B.2: Het CIE-1931-kleurendiagram

De spectra van het licht dat van de drie kanalen (lichtkleppen) komt, vormen de drie primaire kleuren van een projectiesysteem. Door het mengen van deze drie primaire kleuren op het scherm is het mogelijk om de verschillende kleuren te realiseren. Het is duidelijk dat deze drie primaire kleuren enkel additief kunnen gemengd worden in een projectiesysteem. De tristimuluswaarden van de verschillende kleuren worden dan opgeteld. De kleurcoördinaten van de afzonderlijke kleuren mogen echter niet zomaar opgeteld worden om de kleurcoördinaten van de mengkleur te berekenen.

De drie primaire kleuren van een projectiesysteem (R, G, B) spannen een driehoek op in het CIE-kleurendiagram. Door de verhouding van de afzonderlijke vermogens van elke primaire kleur te variëren, zal men een bepaalde distributie vormen, waarvan de kleurcoördinaten zodanig zijn dat het overeenstemmende punt in het CIE-kleurendiagram binnen de driehoek gelegen is. Hieruit volgt dat men met behulp van drie afzonderlijke lichtbronnen elke kleur kan reproduceren die binnen de kleurendriehoek gelegen is. Deze driehoek wordt het kleurenbereik van het projectiesysteem genoemd. Hoe groter deze driehoek is, hoe groter het gamma aan reproduceerbare kleuren zal zijn. Het is echter duidelijk dat men nooit alle mogelijke zichtbare kleuren kan vormen met een projectiesysteem. Het kleurenbereik zal grootst zijn als men monochromatische kleuren zou gebruiken voor de primaire kleuren. Dit is mogelijk door gebruik te maken van lasers als lichtbron. Door hun smalbandigheid zullen LED's ook een aanzienlijk grotere kleurendriehoek (en dus het gamma aan reproduceerbare kleuren) kunnen realiseren in vergelijking met het klassieke systeem gebaseerd op booglampen en dichroïsche spiegels.

In tegenstelling tot de helderheid, kunnen tint en saturatie teruggevonden worden op het kleurendiagram. Hiervoor definiëren we eerst een standaard illuminant C (zie figuur B.2). Illuminant C is een zonlicht simulator die overeenkomt met een gemiddeld daglicht met een kleurtemperatuur van 6774 K en kleurcoördinaten (x,y) van $(0.310, 0.316)$. Door het punt C van illuminant C in het kleurendiagram te verbinden met het punt P van de beschouwde lichtbron vormt men een rechte. Het snijpunt van deze rechte met de hoefijzervormige rand, punt S, geeft de tint of dominante golflengte weer. De lengteverhouding van het lijnstuk CP ten opzichte van het lijnstuk CS geeft de saturatie weer. De saturatiewaarde van illuminant C (wit licht) is 0% en die van een monochromatische bron is 100%.

5. De kleurtemperatuur

Het menselijk oog kan een geheel gamma aan ‘witte’ kleuren onderscheiden. Deze witte kleuren hebben kleurcoördinaten die gelegen zijn op of in de buurt van de zwarte-lichaam-curve in het CIE-kleurendiagram. Deze wordt ook wel de Planckse-locus genoemd en kan teruggevonden worden in het midden van figuur B.2. Elke punt van deze curve komt overeen met de straling die wordt uitgezonden door een zwart lichaam op een bepaalde temperatuur T . Deze punten hebben dus een spectrum dat een functie is van de temperatuur T volgens de verschuivingswet van Wien (formule B.3). Deze wet zegt dat de golflengte van de maximale emissie (λ_{\max}) van een zwart lichaam omgekeerd evenredig is met de temperatuur van dat zwarte lichaam. Daarom associeert men deze punten met een bepaalde temperatuur en noemt men deze de kleurtemperatuur.

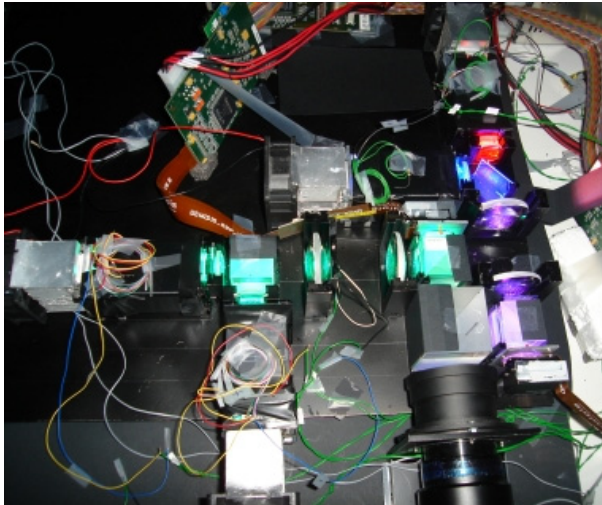
$$\lambda_{\max} \cdot T = C^{te} \quad \text{Wet van Wien} \quad (\text{B.3})$$

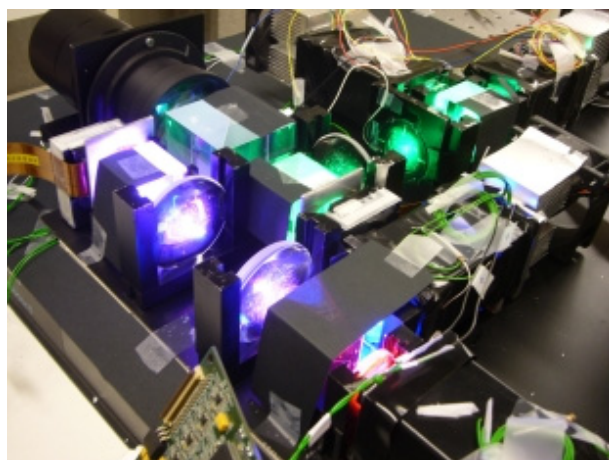
Een gewone gloeilamp bijvoorbeeld heeft een kleurtemperatuur van 2800K, wat eerder aan de geelrode kant van de Planckse-curve gelegen is. Zonlicht heeft een kleurtemperatuur van ongeveer 6550K en ligt in het midden van de ‘witte kleuren’. Een typische instelpunt voor projectiesystemen is het D65-punt dat overeenkomt met een kleurtemperatuur van 6500K.

Bijlage C

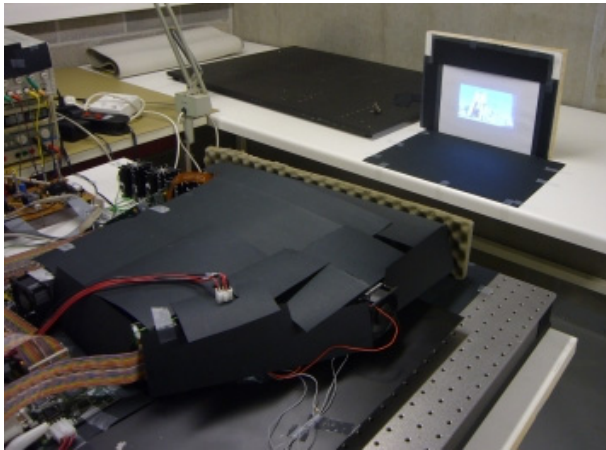
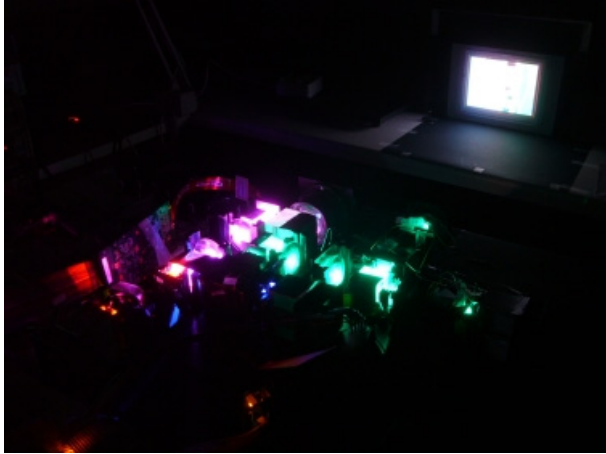
Demonstratoropstelling met aanstuurelektronica

1. Foto's van de demonstratoropstelling

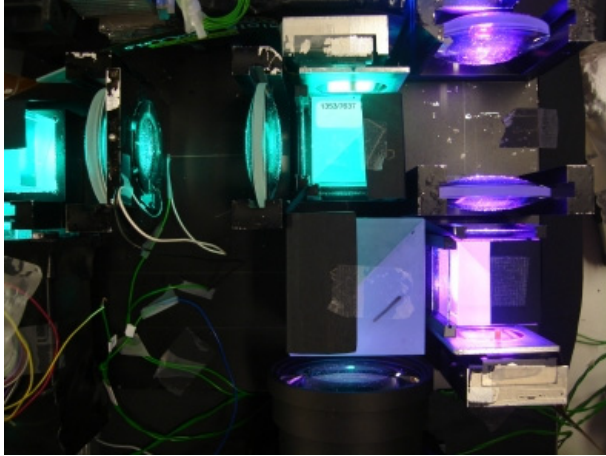




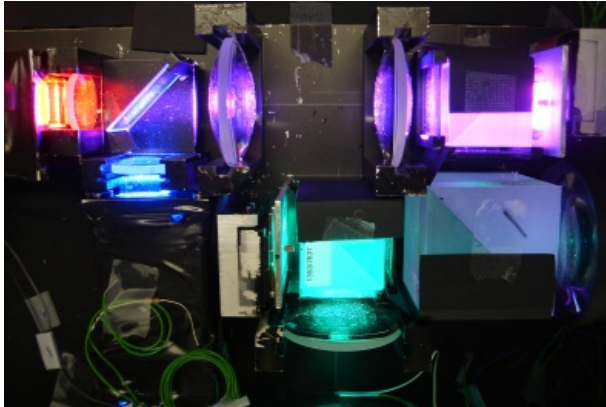
Figuur C.1: 2-LCOS-demonstrator



Figuur C.2: Demonstrator in werking

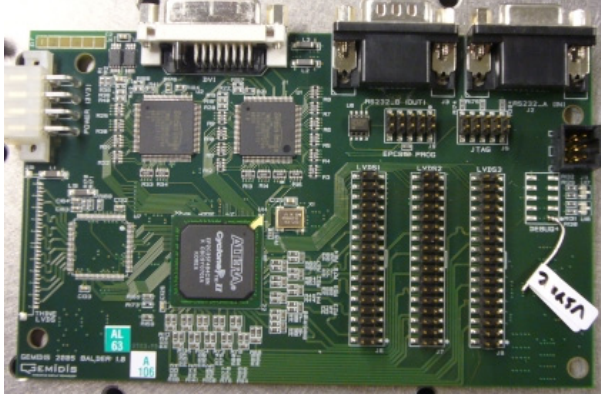


Figuur C.3: Het groene kanaal



Figuur C.4: Het rode/blauwe kanaal

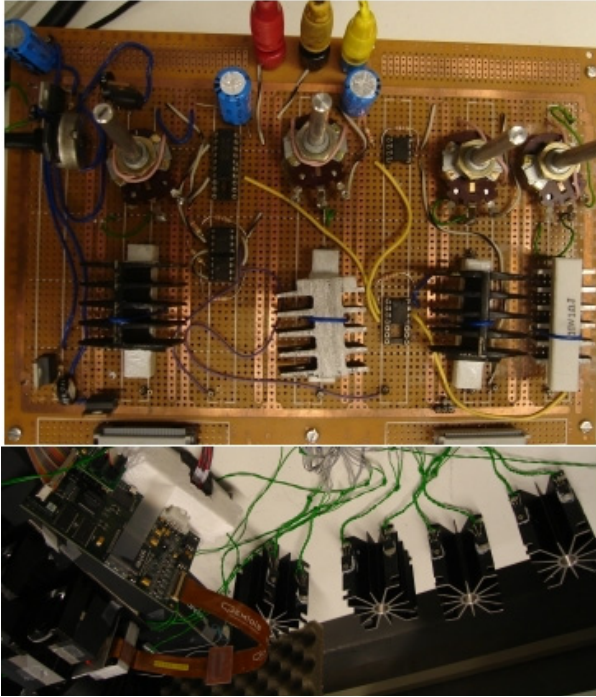
2. Foto's van de aanstuurelektronica



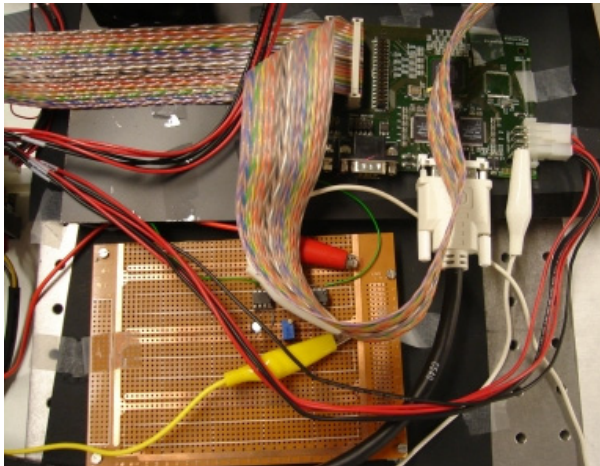
Figuur C.5: Het balder-bord met sync-pin



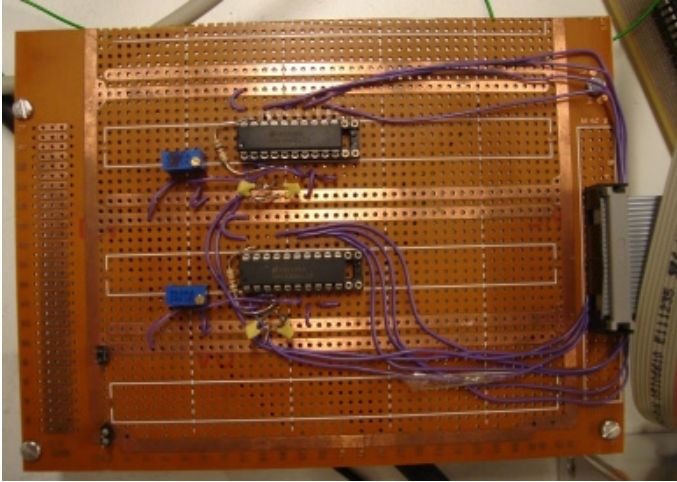
Figuur C.6: De modi-borden met LCOS panelen



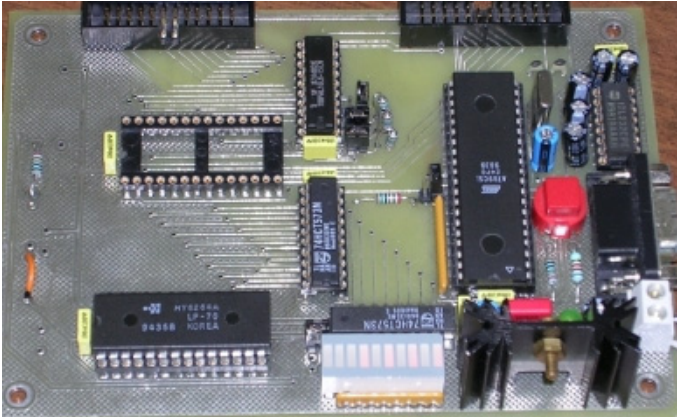
Figuur C.7: LED- en FLC-aanstuurborden



Figuur C.8: Vertragingsschakeling voor sync-puls (555-schakeling)



Figuur C.9: ADC-circuits voor de rode en blauwe kanalen



Figuur C.10: 8051-microcontrollerbord

3. Broncode van de microcontroller

Voor het synchroon aansturen van de FLC- en de LED-schakelingen wordt de onderstaande code gebruikt. Hierin kan men drie delen onderscheiden. In het eerste deel worden de nodige initialisaties gedaan en de tellers en de externe interrupt ingesteld. Na de instelling wacht het programma op een sync-puls. In het tweede deel wordt de pulsduur van de rode en de blauwe LED ingelezen. Hier wordt eveneens een veiligheidsprocedure geïnitieerd dat ervoor zorgt dat bij het wegvallen van de sync-puls de LED's en de FLC niet beschadigd wordt. Tenslotte wordt er in het derde deel de aanstuursignalen voor de FLC- en de LED-schakelingen gegenereerd.

238 Bijlage C: Demonstratoropstelling met aanstuurelektronica

| | |
|--|--|
| <pre> T2CON EQU 0C8H ET2 EQU IE.5 TL2 EQU 0CCH TH2 EQU 0CDH TF2 EQU T2CON.7 TR2 EQU T2CON.2 BSEG AT 78H tel: DBIT 1 CSEG AT 0000H JMP MAIN CSEG AT 000BH JMP T0_ISR CSEG AT 0013H JMP EXT1_ISR CSEG AT 001BH JMP T1_ISR CSEG AT 002BH JMP T2_ISR MAIN: MOV R0,#2 SETB EX1 SETB IT1 SETB ET0 SETB ET1 MOV TMOD,#00010001B SETB ET2 SETB T2CON.0 MOV IP,#00101010B SETB EA START: JNB tel,START CLR tel CLR P1.4 </pre> <p>a)</p> | <pre> MOV DPTR,#0000H MOVX A,@DPTR RR A RR A MOV R1,A ANL A,#11000000B MOV TL0,A MOV A,R1 ORL A,#11000000B MOV TH0,A MOV DPTR,#2000H MOVX A,@DPTR RR A RR A MOV R1,A ANL A,#11000000B MOV TL1,A MOV A,R1 ORL A,#11000000B MOV TH1,A CLR TR2 MOV TL2,#01000000B ; na 25 ms MOV TH2,#10011100B ; resetprocedure </pre> <p>b)</p> |
|--|--|


```

DJNZ R0,GB
MOV R0,#2

MOV P1,#11101000B ; x x B FLC G2 R G1 FLC
JMP stop
GB: MOV P1,#11000111B ; x x B FLC G2 R G1 FLC

stop: SETB TR0
SETB TR1
SETB TR2

JMP START

T0_ISR:
CLR TR0
ORL P1,#11100000B ; x x B FLC G2 R G1 FLC
RETI

EXT1_ISR:
SETB tel
RETI

T1_ISR:
CLR TR1
ORL P1,#11000100B ; x x B FLC G2 R G1 FLC
RETI

T2_ISR:
MOV P1,#11111111B
CLR TF2

RETI

END

```

c)

Figuur C.12: De broncode voor synchronisatie van de aanstuurschakelingen
a) initialisatie deel b) pulsduur bepaling R en B c) genereren van aanstuursignalen

Bijlage D

Foto's geprojecteerde beelden

1. Beelden zonder omgevingslicht

1.1 Foto's bewegende beelden







Figuur D.1: Foto's bewegende beelden (zonder omgevingslicht)

1.2 Foto's stilstaande beelden

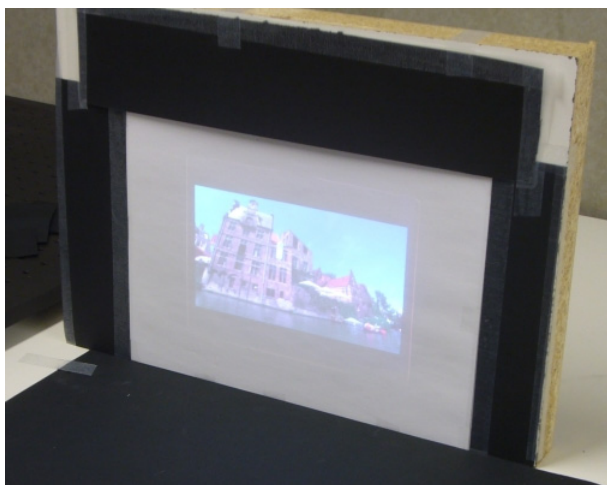




Figuur D.2: Foto's stilstaande beelden (zonder omgevingslicht)

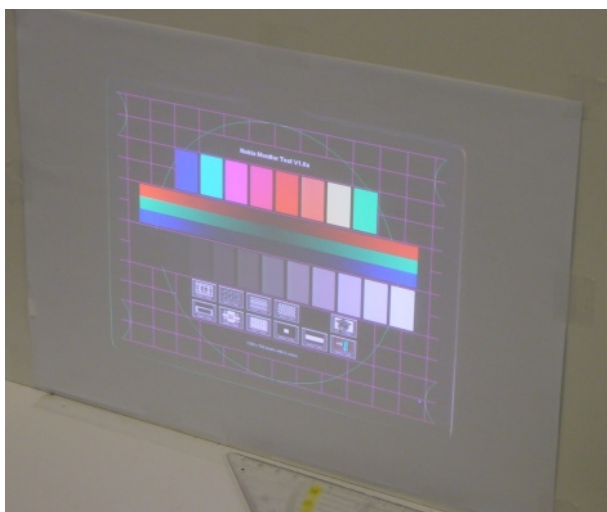
2. Beelden met omgevingslicht

2.1 Foto's bewegende beelden



Figuur D.3: Foto's bewegende beelden (met omgevingslicht)

2.2 Foto's stilstaande beelden



Figuur D.4: Foto's stilstaande beelden (met omgevingslicht)

