

# Implementatie van een hyperspectrale 3D-scanner

**Michiel GARDEYN**

Promotor: prof. dr. Frédéric Leloup

Co-promotor: Nathan Slembrouck

Masterproef ingediend tot het behalen van  
de graad van master of Science in de  
industriële wetenschappen: Industriële  
ingenieurswetenschappen Energie

Academiejaar 2024 - 2025



©Copyright KU Leuven

Deze masterproef is een examendocument dat niet werd gecorrigeerd voor eventuele vastgestelde fouten.

Zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van zowel de promotor(en) als de auteur(s) is overnemen, kopiëren, gebruiken of realiseren van deze uitgave of gedeelten ervan verboden. Voor aanvragen i.v.m. het overnemen en/of gebruik en/of realisatie van gedeelten uit deze publicatie, kan u zich richten tot KU Leuven Technologicampus Gent, Gebroeders De Smetstraat 1, B-9000 Gent, +32 92 65 86 10 of via e-mail [iiw.gent@kuleuven.be](mailto:iiw.gent@kuleuven.be).

Voorafgaande schriftelijke toestemming van de promotor(en) is eveneens vereist voor het aanwenden van de in deze masterproef beschreven (originele) methoden, producten, schakelingen en programma's voor industrieel of commercieel nut en voor de inzending van deze publicatie ter deelname aan wetenschappelijke prijzen of wedstrijden.

# Voorwoord

Deze masterproef vormt het sluitstuk van mijn opleiding in de industriële ingenieurswetenschappen. Tijdens dit traject heb ik niet alleen technische kennis verworven, maar ben ik ook persoonlijk gegroeid — een waardevolle basis voor mijn verdere carrière.

Graag bedank ik iedereen die heeft bijgedragen aan deze masterproef. In het bijzonder mijn promotor, de heer Leloup, voor zijn deskundige begeleiding, heldere communicatie en waardevolle feedback gedurende het hele proces. Ook mijn co-promotor, de heer Slembrouck, ben ik dankbaar voor zijn bereidheid om steeds te helpen, zijn duidelijke antwoorden op vragen en zijn expertise op zowel software- als hardwarevlak.

Een bijzondere dank gaat uit naar mijn broer Jeroen, bij wie ik steeds terecht kon met allerhande vragen, niet alleen tijdens deze masterproef maar doorheen mijn hele opleiding. Tot slot wil ik mijn ouders bedanken voor hun onvoorwaardelijke steun, hun blijvende geloof in mij en hun voortdurende aanmoediging, zowel op academisch als persoonlijk vlak.

# Samenvatting

Hyperspectrale beeldvorming legt voor elk punt in een scène een continu spectrum vast, wat rijkere informatie oplevert dan conventionele kleurbeelden. In deze masterproef wordt een snapshot hyperspectrale camera gebruikt die, naast spectrale gegevens, ook diepte-informatie genereert. De verkregen dieptemetingen vormen de basis voor de ontwikkeling van een hyperspectrale 3D-scanner.

De camera maakt gebruik van een lenslet-filterarray, waarbij elk spectraal kanaal een beeld op een licht verschoven locatie op de sensor projecteert. De grootte van deze verschuiving is afhankelijk van de afstand tot het object, waardoor diepte kan worden berekend. Om het contrast van het oppervlak te verhogen en de nauwkeurigheid van de dieptemetingen te verbeteren, wordt een dambordpatroon op het object geprojecteerd. Deze aanpak wijkt af van klassieke 3D-scanners die gebruikmaken van meerdere camera's voor dieptebepaling of Time-of-Flight-technologie.

Het doel van dit onderzoek is om deze unieke vorm van dieptebepaling te benutten voor de realisatie van een werkende 3D-scanner met spectrale integratie. De methode bestaat uit het vastleggen van meerdere opnames van een roterend object, terwijl de camera stationair blijft. De beelden worden verwerkt tot een 3D-model via puntwolkfusie en meshgeneratie in MeshLab. Vervolgens wordt de spectrale informatie aan het model toegevoegd met behulp van Mitsuba.

De resultaten tonen aan dat deze aanpak effectief is: voor een cilindrisch testobject werd een vrijwel perfecte geometrische reconstructie verkregen, met integratie van de hyperspectrale data. Experimenten tonen aan dat een korte afstand tussen camera en lens de nauwkeurigheid bevordert en dat een beamer als lichtbron goed werkt voor projectie. Het systeem levert betrouwbare resultaten, ongeacht de kleur van het object.

Hoewel de verwerking van de grote hoeveelheid gegevens veel rekenkracht vereist en gevoelig is voor glans of schaduwen, levert het eindresultaat een robuuste en reproduceerbare workflow voor hyperspectrale 3D-scanning op. De combinatie van geometrie en spectrale informatie opent perspectieven in verschillende toepassingsgebieden.

Aanbevelingen voor toekomstig onderzoek zijn onder meer het gebruik van polarisatiefilters bij glanzende oppervlakken en het toekennen van unieke spectrale waarden op pixelniveau, wat de nauwkeurigheid verder kan verbeteren.

Trefwoorden: Hyperspectrale beeldvorming, 3D-scanner, dieptemeting, snapshotcamera, reconstructie.

# Abstract

Hyperspectral imaging captures a continuous spectrum for each point in a scene, providing richer information than conventional color images. In this master's thesis, a snapshot hyperspectral camera is used, which, in addition to spectral data, also generates depth information. The obtained depth measurements form the basis for the development of a hyperspectral 3D scanner.

The camera utilizes a lenslet-filter array, with each spectral channel projecting an image onto a slightly shifted location on the sensor. The size of this shift depends on the distance to the object, enabling depth calculation. To enhance the surface contrast and improve the accuracy of the depth measurements, a checkerboard pattern is projected onto the object. This approach differs from classical 3D scanners, which use multiple cameras for depth determination or Time-of-Flight technology.

The goal of this research is to leverage this unique form of depth determination to realize a functioning 3D scanner with spectral integration. The method involves capturing multiple images of a rotating object while the camera remains stationary. These images are processed into a 3D model through point cloud fusion and mesh generation in MeshLab. Subsequently, the spectral information is added to the model using Mitsuba.

The results show that this approach is effective: for a cylindrical test object, a near-perfect geometric reconstruction was achieved, with integration of the hyperspectral data. Experiments demonstrate that a short distance between the camera and lens enhances accuracy and that a projector works well as a light source for projection. The system delivers reliable results regardless of the object's color.

Although processing the large amount of data requires significant computational power and is sensitive to gloss or shadows, the final result provides a robust and reproducible workflow for hyperspectral 3D scanning. The combination of geometry and spectral information opens up new perspectives across various application domains.

Recommendations for future research include the use of polarizing filters for glossy surfaces and the assignment of unique spectral values at the pixel level, which could further improve accuracy.

Keywords: Hyperspectral imaging, 3D scanner, depth measurement, snapshot camera, reconstruction.

# Inhoudsopgave

<b>Voorwoord</b>	<b>iii</b>
<b>Samenvatting</b>	<b>iv</b>
<b>Abstract</b>	<b>v</b>
<b>Lijst van figuren</b>	<b>viii</b>
<b>Lijst van tabellen</b>	<b>x</b>
<b>Lijst van symbolen en afkortingen</b>	<b>xii</b>
<b>1 Inleiding</b>	<b>1</b>
1.1 Situering . . . . .	1
1.2 Doelstellingen . . . . .	1
1.3 Overzicht . . . . .	2
<b>2 Theoretisch kader</b>	<b>4</b>
2.1 Basisconcepten . . . . .	4
2.1.1 Hyperspectral Imaging . . . . .	4
2.1.2 Datacube . . . . .	5
2.1.3 Spectrum . . . . .	6
2.1.4 Snapshotcamera - Line-scanning camera . . . . .	7
2.1.5 Goniometrië en BSDF . . . . .	8
2.1.6 Dunne-lensvergelijking . . . . .	8
2.1.7 Camera kalibratie . . . . .	9
2.2 Dieptemetingen met hyperspectrale beelden . . . . .	11
2.3 Bestaande systemen . . . . .	13
2.3.1 3D-scantechnieken . . . . .	13

---

2.3.2	Voorbeeldtoepassingen van een hyperspectrale 3D-scanner . . . . .	14
<b>3</b>	<b>Hardware</b>	<b>16</b>
3.1	Cubert Ultris X50 . . . . .	17
3.2	Lens . . . . .	18
3.3	Lichtbron . . . . .	20
3.3.1	Halogeenlamp . . . . .	20
3.3.2	Beamer . . . . .	20
3.4	Meetopstelling . . . . .	21
3.4.1	Meetopstelling met geprint dambordpatroon . . . . .	21
3.4.2	Meetopstelling met geprojecteerd dambordpatroon . . . . .	22
<b>4</b>	<b>Software</b>	<b>23</b>
4.1	Basisalgoritme . . . . .	25
4.1.1	Cubert Utils Touch . . . . .	25
4.1.2	Dieptebepaling . . . . .	25
4.2	RGB- en diepteafbeelding . . . . .	27
4.3	Realiseren van een RGB-3D-scanner . . . . .	28
4.3.1	Achtergrond verwijderen . . . . .	29
4.3.2	Omzetting naar RGBD en puntwolk . . . . .	31
4.3.3	Constructie 3D-mesh . . . . .	35
4.3.4	Toevoegen van hyperspectrale informatie . . . . .	36
<b>5</b>	<b>Resultaten</b>	<b>38</b>
5.1	Metten van diepte . . . . .	38
5.2	Evaluatie dieptenauwkeurigheid . . . . .	40
5.3	Verkleinen afstand camera-lens . . . . .	43
5.4	Uitsluiten golflengtebanden . . . . .	44
5.5	Vergelijking geprint en geprojecteerd dambordpatroon . . . . .	47
5.5.1	Impact van spectrale filtering en projectietechniek op meetfout . . . . .	47
5.5.2	Grenzen meetbereik . . . . .	49
5.6	Realiseren van een RGB-3D-scanner . . . . .	51
5.6.1	Gekozen object . . . . .	51
5.6.2	Analyse van algoritme voor achtergrondverwijdering . . . . .	52
5.6.3	3D-mesh . . . . .	56
5.6.4	Invloed aantal genomen foto's . . . . .	57

---

5.7	Realiseren van een hyperspectrale 3D-scanner . . . . .	60
5.7.1	Reflectiespectra genereren . . . . .	61
5.7.2	Toevoegen van hyperspectrale informatie . . . . .	64
5.7.3	Vershil tussen RGB- en spectraal renderen . . . . .	64
<b>6</b>	<b>Conclusies en toekomstig onderzoek</b>	<b>68</b>
6.1	Conclusies . . . . .	68
6.2	Toekomstig onderzoek . . . . .	69

## Lijst van figuren

2.1	Hyperspectrale datacube [2]	6
2.2	Spectrum bij MSI en HSI [3]	7
2.3	Relevante afstanden dunne-lens vergelijking [6]	9
2.4	Lenslet-array [2]	12
3.1	Cubert Ultris X50 [16]	18
3.2	Obstructiehoek	18
3.3	Meetopstelling met geprint dambordpatroon	21
3.4	Meetopstelling 3D-Scanner	22
4.1	Overzicht 3D-reconstructie	24
4.2	Verdeling exportafstanden	27
4.3	Diepteafbeelding in grijstinten	28
4.4	Gedetailleerd overzicht van de realisatie van de hyperspectrale 3D-scanner	29
4.5	Omzetting 2D naar 3D [19]	34
5.1	Dieptemap bij vierkant dambordpatroon - $d_o$ 157 mm ( $45^\circ$ )	39
5.2	Scherpgesteld beeld bij vierkant dambordpatroon - $d_o$ 157 mm ( $45^\circ$ )	39
5.3	Verloop objectafstand bij constante y-coördinaat	40
5.4	Dieptemap bij vierkant dambordpatroon - $d_o$ 162 mm	41
5.5	Scherpgesteld beeld bij vierkant dambordpatroon - $d_o$ 162 mm	42
5.6	Dieptemap bij cirkelvormig dambordpatroon - $d_o$ 162 mm	42
5.7	Dieptemap bij vierkant dambordpatroon - camera dicht bij lens - $d_o$ 162 mm	43
5.8	Scherpgesteld beeld bij vierkant dambordpatroon - camera dicht bij lens - $d_o$ 162 mm	44
5.9	Verdeling golflengtebanden per spectrale filter	45
5.10	Dieptemap 6x11 - 162 mm	47
5.11	Dieptemap 6x6 - 162 mm	47

5.12	Afwijking per meetmethode en objectafstand . . . . .	48
5.13	Dieptemap en scherpgesteld beeld bij geprint dambordpatroon - $d_o$ 177 mm (0°) . . . . .	50
5.14	Dieptemap bij geprojecteerd dambordpatroon - $d_o$ 177 mm . . . . .	50
5.15	Aanzichten object . . . . .	52
5.16	Achtergrondverwijdering met REMBG-pakket . . . . .	53
5.17	Dieptemap met en zonder object . . . . .	53
5.18	Achtergrondverwijdering op basis van helderheid . . . . .	54
5.19	Scherpstellen bij glanzend object . . . . .	55
5.20	Gecombineerde puntwolk . . . . .	56
5.21	Gecombineerde puntwolk - grotere overlapstraal . . . . .	57
5.22	Verfijnde 3D-mesh . . . . .	57
5.23	Scherpgestelde foto perfecte cilinder met schaduwvorming . . . . .	58
5.24	Reconstructie op basis van zes foto's . . . . .	59
5.25	Reconstructie op basis van vier foto's . . . . .	59
5.26	Reconstructie op basis van twaalf foto's . . . . .	60
5.27	Uiterlijk van de groene cilinder . . . . .	61
5.28	Spectrum groene cilinder (RAW) . . . . .	62
5.29	Spectrum beamer (RAW) . . . . .	62
5.30	Reflectiespectrum groene cilinder . . . . .	63
5.31	Render groene cilinder - D65 . . . . .	64
5.32	RGB- en spectrale render magenta cilinder - Groene LED-lamp . . . . .	66
5.33	Reflectiespectrum magenta cilinder en genormaliseerd LED-spectrum . . . . .	66
5.34	RGB- en spectrale render magenta cilinder - D65 . . . . .	67

## Lijst van tabellen

5.1 Absolute en standaardafwijking voor verschillende golflengtebanden en objectafstanden . . . . .	46
---	----

## Lijst van symbolen en afkortingen

$c_x, c_y$	Optisch middelpunt
$d_i$	Beeldafstand
$d_o$	Objectafstand
$f$	Brandpuntsafstand
$I$	Lichtintensiteit
$K$	Intrinsieke cameramatrix
$R$	Spectrale reflectie
$p_x$	Ruimtelijke resolutie
$t$	Integratietijd
$x, y$	Pixelcoördinaten
$z$	Gemeten diepte
$X, Y, Z$	3D-coördinaten
$\lambda$	Golflengte

---

BRDF	Bidirectional Reflectance Distribution Function
BSDF	Bidirectional Scattering Distribution Function
BTDF	Bidirectional Transmittance Distribution Function
HSI	Hyperspectral Imaging
HSV	Hue-Saturation-Value
LED	Light Emitting Diode
LiDAR	Light Detection and Ranging
MSI	Multispectral Imaging
NIR	Near Infrared
PLY	Polygon File Format
REMBG	Remove Background
RGB	Rood, Groen, Blauw
SNR	Signal-to-Noise-Ratio
SOAP	Simple Object Access Protocol
SPD	Spectral Power Distribution
UHP	Ultra High Performance
UV	Ultraviolet

# 1

## Inleiding

### 1.1 Situering

Deze thesis richt zich op het ontwikkelen van een hyperspectrale 3D-scanner. Een dergelijke camera legt een breed spectrum van golflengten vast per pixel, waardoor het mogelijk wordt om veel verder te gaan dan traditionele RGB- of multispectrale beeldvorming, die slechts een beperkt aantal golflengten vastlegt. Op deze manier kan deze camera een gedetailleerde kleurbepaling en oppervlakanalyse uitvoeren.

Het doel van deze masterproef is de ontwikkeling van een prototype dat gebruik maakt van een snapshot hyperspectrale camera om spectrale 3D-scans te creëren. Er wordt onderzocht of deze technologie voldoende nauwkeurig is in het meten van diepte en het registreren van reflectiespectra. De resultaten moeten inzicht bieden in hoeverre de camera een bruikbare en efficiënte oplossing vormt voor hyperspectrale 3D-scanning. Daarnaast zullen ook de beperkingen van deze technologie worden besproken.

### 1.2 Doelstellingen

Het hoofddoel van deze masterproef is het ontwikkelen van een workflow om spectrale informatie te integreren in een 3D-model met behulp van hyperspectrale beeldvorming. De centrale onderzoeksvraag luidt dan ook: *"Kan een snapshot hyperspectrale camera gebruikt worden als nauwkeurige spectrale 3D-scanner?"*

De focus ligt allereerst op het ontwikkelen en optimaliseren van een algoritme voor 3D-modellering op basis van dieptemetingen. Het algoritme zal hiervoor de spectrale informatie moeten verwerken. Door een object op een platform te draaien en beelden vanuit verschillende kijkhoeken vast te leggen, kan de verzamelde data worden samengevoegd tot een 3D-model. De basis van dit algoritme wordt ter beschikking gesteld door Dhr. Slembrouck. De nadruk ligt dus op het uitbreiden en toepassen van het algoritme door middel van verschillende metingen.

Het grootste nadeel van het huidige algoritme voor diepteberekening is de verwerkingstijd. Het berekenen van de diepte per foto neemt momenteel ongeveer 5 minuten in beslag, wat resulteert in aanzienlijke vertragingen bij het verwerken van meerdere beelden. Deze vertraging wordt veroorzaakt door de grote hoeveelheden data die moeten worden verwerkt en de complexiteit van het dieptebepalingsproces.

Gezien deze lange verwerkingstijd is het belangrijk dat het verdere algoritme voor de 3D-reconstructie deze tijd niet significant verlengt. Het doel is om de totale scan-en reconstructietijd zo kort mogelijk te houden, zonder afbreuk te doen aan de nauwkeurigheid of kwaliteit van de 3D-weergave.

Daarnaast is het vinden van een geschikte meetopstelling, zowel wat betreft de fysieke configuratie als de bijbehorende meetprocedure, een belangrijk aspect van het onderzoek. Er wordt onderzocht hoe verschillende factoren - zoals de afstand tussen de camera en de lens, en het wegfilteren van specifieke golflengtebanden - de metingen beïnvloeden.

In de laatste fase van het onderzoek zal hyperspectrale informatie toegevoegd worden aan het gereconstrueerde object. Dit object zal gegenereerd worden aan de hand van het ontwikkelde algoritme. De te gebruiken objecten zijn relatief klein, aangezien de camera een beperkt dieptebereik heeft. In de praktijk betekent dit dat het object maximaal een diepte van 5 cm mag hebben en in de hoogte kleiner moet zijn dan 6 cm.

Om na te gaan of de gerealiseerde hyperspectrale 3D-scanner betrouwbare resultaten oplevert, zal het gereconstrueerde 3D-model worden vergeleken met het fysieke object. Door beide naast elkaar te plaatsen, kan beoordeeld worden in hoeverre de reconstructie overeenkomt met de werkelijkheid.

### 1.3 Overzicht

Deze masterproef bestaat uit zes hoofdstukken.

In Hoofdstuk 2 worden de basisconcepten toegelicht die essentieel zijn voor een goed begrip van de verdere bespreking van deze masterproef. Daarnaast worden relevante publicaties besproken waarin hyperspectrale beeldvorming wordt toegepast, om de veelzijdigheid van deze technologie te illustreren.

Hoofdstuk 3 bespreekt de gebruikte meetopstelling, met bijzondere aandacht voor het type camera dat wordt gebruikt.

In Hoofdstuk 4 komt het algoritme aan bod dat instaat voor het genereren van een 3D-model. Er wordt toegelicht hoe dieptemetingen worden omgezet in een 3D-reconstructie verrijkt met hyperspectrale informatie.

Hoofdstuk 5 behandelt de praktische meetresultaten. Het biedt een overzicht van de uitgevoerde metingen en de bijbehorende resultaten, waarbij telkens de essentie van elke meting wordt toegelicht. Dit hoofdstuk vormt het belangrijkste onderdeel van deze masterproef, aangezien hierin het volledige proces kan worden gevolgd: van het beoordelen van de nauwkeurigheid van de camera tot de analyse van de bekomen 3D-reconstructie.

Tot slot wordt in Hoofdstuk 6 een algemene conclusie geformuleerd, gevolgd door aanbevelingen voor toekomstig onderzoek.

# 2

## Theoretisch kader

### 2.1 Basisconcepten

In deze sectie worden enkele basisconcepten besproken die centraal staan in deze masterproef. Het vormt een basis voor de volgende hoofdstukken.

#### 2.1.1 Hyperspectral Imaging

Hyperspectrale beeldvorming, in het Engels hyperspectral imaging (HSI), staat centraal in deze masterproef. Het houdt in dat zowel ruimtelijke als spectrale gegevens in één beeld worden samengebracht. Meer bepaald wordt voor elke pixel in een beeld een gedetailleerd spectrum vastgelegd, dat de lichtintensiteit over een breed scala aan golflengten weergeeft [1]. In tegenstelling tot conventionele kleurbeelden, die vaak beperkt zijn tot drie brede banden (RGB), legt HSI het volledige zichtbare spectrum vast met hoge spectrale resolutie, en kan het bovendien ook golflengten buiten het zichtbare spectrum registreren, zoals in het nabij-infrarood (NIR). Dit maakt het mogelijk om subtiele verschillen in materiaaleigenschappen zichtbaar te maken.

De hoge spectrale resolutie van hyperspectrale systemen maakt het mogelijk om unieke spectrale "handtekeningen" van objecten of oppervlakken vast te leggen. Dit is bijzonder waardevol in toepassingen waar gedetailleerde informatie over materiaal en oppervlak vereist is, zoals remote sensing, gewasgezondheid en medische beeldvorming.

Een belangrijk voordeel van HSI voor deze masterproef is de mogelijkheid om kleureigenschappen veel nauwkeuriger te karakteriseren dan met traditionele RGB-camera's. Zo kunnen bijvoorbeeld metameren - kleuren die er voor het menselijk oog identiek uitzien maar spectraal verschillend zijn - onderscheiden worden. Daarnaast laat HSI toe om nauwkeurig te analyseren hoe het spectrum van een oppervlak verandert onder verschillende verlichtingsomstandigheden, wat waardevolle inzichten kan bieden in kleurwaarneming en materiaaldetectie. Dergelijke spectrale informatie is essentieel bij het bestuderen van visuele verschijnselen waarbij kleurperceptie afhankelijk is van zowel het object als de lichtbron [1].

### 2.1.2 Datacube

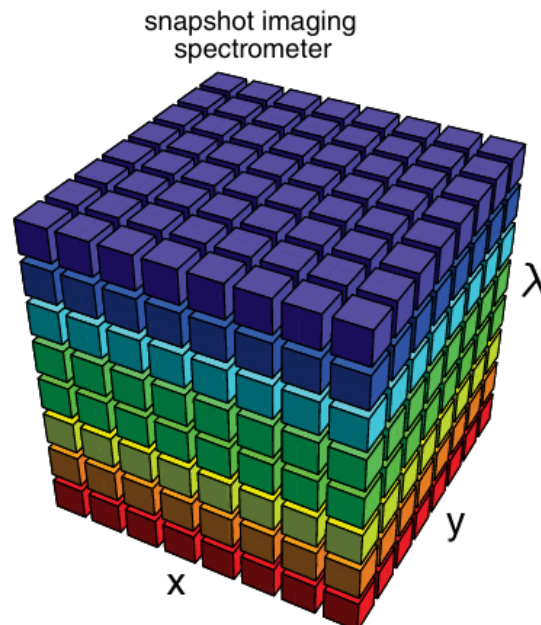
Hyperspectrale camera's zijn in staat om honderden golflengten per pixel te meten. Dit betekent dat er voor elke pixel een uitgebreide set gegevens bestaat. Deze gegevens worden vastgelegd in een driedimensionale dataset, ook wel een datacube genoemd. Deze datacube combineert de ruimtelijke coördinaten ( $x$ ,  $y$ ) en een spectrale dimensie ( $\lambda$ ), waarbij  $\lambda$  de golflengte vertegenwoordigt. Dit is te zien op Figuur 2.1, overgenomen uit [2]. Dit maakt het mogelijk om niet alleen te bepalen waar in het beeld iets zich bevindt, maar ook wat het is op basis van de spectrale informatie. Dit maakt de datacube onmisbaar voor toepassingen die diepgaande kleuranalyse vereisen [2].

Het vastleggen van een datacube gebeurt aan de hand van een beeldsensor die licht omzet in elektrische signalen. Een datacube bevat informatie in drie dimensies: twee ruimtelijke dimensies (de breedte en hoogte van het beeld) en één spectrale dimensie (de golflengten van het licht). Omdat detectorarrays meestal tweedimensionaal (2D) zijn, moeten ze deze driedimensionale datacube op een specifieke manier opbouwen.

Een veelgebruikte methode hiervoor is de scanmethode, waarbij de datacube geleidelijk wordt opgebouwd door opeenvolgende 2D-beelden vast te leggen. Elk 2D-beeld (of "slice") stelt een momentopname voor van een specifiek golflengtebereik of een bepaalde positie, en deze worden vervolgens gecombineerd tot een volledige datacube.

Een andere benadering is de snapshot-techniek, waarbij de volledige datacube in één keer wordt vastgelegd. Dit wordt gedaan door het beeld direct op te splitsen in meerdere 2D-componenten die verschillende spectrale of ruimtelijke informatie bevatten. Deze componenten worden vervolgens samengevoegd tot een complete datacube [2].

In deze masterproef wordt er gebruik gemaakt van een snapshotcamera, die in staat is om de volledige datacube in één enkele opname vast te leggen. Dankzij deze methode kan de datacube snel worden vastgelegd, wat niet alleen tijdswinst oplevert, maar ook de kans op vervormingen door beweging aanzienlijk verkleint.



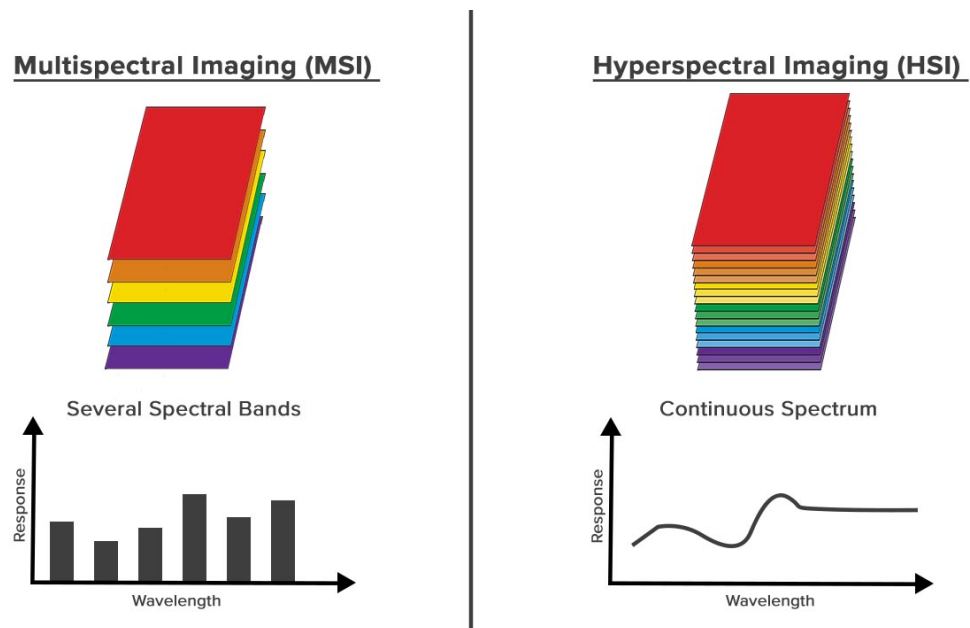
**Figuur 2.1:** Hyperspectrale datacube [2]

### 2.1.3 Spectrum

Zoals eerder vermeld, bevat de datacube hyperspectrale informatie voor elke pixel in het beeld. Elke pixel is gekoppeld aan een spectraal profiel dat de lichtintensiteit over verschillende golflengten weergeeft. Dit profiel wordt ook wel de spectrale handtekening of het spectrum genoemd.

HSI verzamelt beelden waarbij elke afzonderlijke pixel is gekoppeld aan een volledig spectrum binnen een bepaald golflengtebereik (de *spectral range* van de camera). Een HSI-camera biedt een hogere spectrale resolutie, waardoor gebruikers veel fijnere details kunnen onderscheiden. In tegenstelling tot Multispectral Imaging (MSI), die gegevens registreert over een beperkt aantal discrete golflengtebanden, meet HSI het licht over een groot aantal smalle spectrale banden. Het belangrijkste verschil tussen MSI en HSI is dus de spectrale resolutie: HSI biedt een veel fijnere spectrale verdeling en bijgevolg een continu spectrum. Dit verschil is weergegeven in Figuur 2.2.

Het bereik waarbinnen dat spectrum gemeten wordt, hangt af van de gevoeligheid van de camera. Sommige systemen werken enkel binnen het zichtbare golflengtegebied, terwijl andere ook gevoelig zijn voor golflengten buiten dat bereik. Zo ligt ultraviolet (UV) aan de blauwe kant van het spectrum, met golflengten korter dan 350 nm. Nabij-infrarood (NIR) ligt net aan de andere kant, voorbij het rood, en heeft golflengten langer dan 750 nm. In deze masterproef wordt gebruikgemaakt van de Cubert Ultris X50, die licht detecteert van 350 tot 1002 nm. De camera bestrijkt dus het zichtbare spectrum en het nabij-infrarood.



**Figuur 2.2:** Spectrum bij MSI en HSI [3]

#### 2.1.4 Snapshotcamera - Line-scanning camera

Voor HSI kunnen verschillende soorten camera's gebruikt worden, elk met hun eigen unieke kenmerken en toepassingsdomeinen. Drie prominente technieken zijn de snapshotcamera, de line-scanning camera en de spectrale scanmethode.

Een snapshotcamera legt in één opname een volledig hyperspectraal beeld van een scène vast. Dit maakt de techniek bijzonder geschikt voor dynamische situaties waarin beweging aanwezig is. Bovendien biedt deze camera de mogelijkheid om diepte-informatie vast te leggen, wat essentieel is voor verschillende toepassingen [4]. Dit verklaart het gebruik van dit type camera in deze masterproef.

Een line-scanning camera werkt anders: deze legt het beeld lijn per lijn vast. Dit gebeurt door continu licht op te vangen via een smalle spleet, terwijl de sensor of het object beweegt. Voor elke gescande lijn kan de volledige beeldsensor worden benut, wat resulteert in een hogere resolutie. Deze techniek levert gedetailleerde spectrale data per pixel, maar vereist een gestage en gecontroleerde beweging om het volledige beeld te kunnen reconstrueren. Line-scanning camera's zijn daarom vooral geschikt voor het vastleggen van statische scènes, en minder voor bewegende objecten. Ze maken gebruik van het zogenoemde *pushbroom scanning*-principe, waarbij per lijn spectrale informatie wordt verzameld.

Een derde benadering is de spectrale scanmethode, waarbij het beeld van de volledige scène herhaaldelijk wordt vastgelegd, telkens met een andere spectrale band. Dit gebeurt doorgaans met behulp van een optisch bandpassfilter dat steeds licht uit een specifiek golflengtebereik doorlaat. In plaats van het volledige spectrum tegelijk vast te leggen, wordt voor elke opname slechts één nauwe golflengteband geregistreerd. Na het doorlopen van alle gewenste

golflengtebanden worden de afzonderlijke beelden samengevoegd tot één hyperspectrale datacube. Het voordeel van deze methode is dat ze relatief eenvoudig kan worden geïntegreerd in bestaande beeldvormingsapparatuur, zoals microscopen, door het gebruik van geschikte filters. Een beperking is wel dat deze methode gevoelig is voor beweging, aangezien meerdere opeenvolgende beelden nodig zijn om het volledige spectrum te reconstrueren.

### 2.1.5 Gonioradiometrie en BSDF

Gonioradiometrie en de Bidirectionele Verstrooiingsverdelingsfunctie, in het Engels de Bidirectional Scatter Distribution Function (BSDF), zijn complementaire technieken voor het beschrijven van de interactie tussen licht en materialen.

Gonioradiometrie onderzoekt hoe licht onder verschillende invalshoeken door een materiaal wordt verstrooid en gereflecteerd. Met een gonioradiometer, die licht uit diverse richtingen systematisch analyseert, kunnen de visuele eigenschappen van materialen worden vastgelegd. Deze methode wordt toegepast in kwaliteitscontrole en industriële metingen, waar een gedetailleerde karakterisering van het uiterlijk van producten van groot belang is.

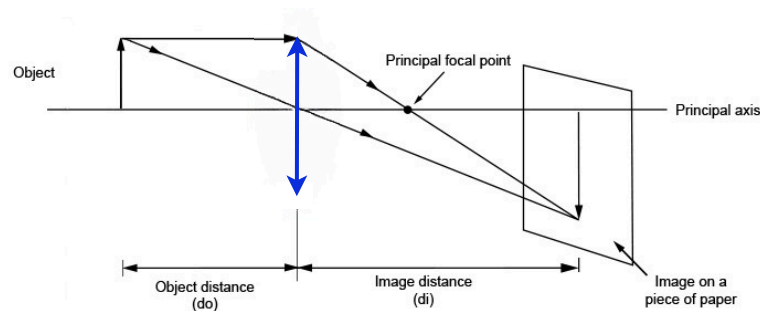
De BSDF biedt een wiskundige beschrijving van hoe licht door een oppervlak wordt gereflecteerd of doorgelaten. Het model koppelt de invalshoek aan de verstrooiingshoek en omvat zowel reflectie (BRDF) als transmissie (BTDF) [5]. Hierdoor kunnen materiaaleigenschappen nauwkeurig worden gemodelleerd onder verschillende lichtomstandigheden, wat essentieel is voor simulaties en materiaalanalyse.

### 2.1.6 Dunne-lensvergelijking

De dunne-lensvergelijking, die terug te vinden is in vergelijking (2.1), zal frequent worden gebruikt in deze masterproef. De ontworpen meetopstelling maakt gebruik van een bolle vergrotingslens voor de camera, met een gekende brandpuntsafstand van 188 mm. De brandpuntsafstand is de afstand tussen het midden van de lens en het punt waar parallelle invallende lichtstralen samenkomen (het brandpunt).

Als de brandpuntsafstand bekend is, kan met behulp van de dunne-lensvergelijking de objectafstand worden berekend uit de beeldafstand, of omgekeerd. De objectafstand  $d_o$  is de afstand tussen het midden van de lens en het object waarvan een beeld wordt gevormd. De beeldafstand  $d_i$  is de afstand tussen het midden van de lens en het punt waar de gebroken lichtstralen, afkomstig van één specifieke plek op het object, samenkomen. Omdat dit samenkomen gebeurt aan de andere kant van de lens dan waar het object zich bevindt, is de beeldafstand in dit geval positief.

Deze relevante afstanden zijn weergegeven in Figuur 2.3. Op deze afbeelding is de lens voorgesteld als een dunne (blauwe) streep, wat een gebruikelijke manier is om een dunne lens weer te geven. De pijlen aan de uiteinden van de streep geven aan dat het om een bolle lens gaat.



**Figuur 2.3:** Relevante afstanden dunne-lens vergelijking [6]

Met deze informatie kan de dunne-lensvergelijking eenvoudig geïnterpreteerd worden. De vergelijking gaat als volgt:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{d_o} + \frac{1}{d_i} \quad (2.1)$$

Wanneer deze vergelijking gebruikt wordt, zal er geen rekening gehouden worden met de dikte van de vergrotingslens. Het is belangrijk om te vermelden dat dit in werkelijkheid wel degelijk een invloed heeft. De eerste metingen die uitgevoerd worden, gaan na in welke mate de objectafstand correct gemeten kan worden.

### 2.1.7 Camera kalibratie

Bij het meten van de spectrale reflectie van een oppervlak (de verhouding van de hoeveelheid gereflecteerd licht van een oppervlak tot de hoeveelheid invallend licht) moeten verschillende factoren worden gecorrigeerd om nauwkeurige resultaten te verkrijgen. Een correcte verwerking van donkerstroom en het gebruik van een witte referentietegel zijn hierbij essentieel.

#### Donkerstroom

De donkerstroom is de elektrische stroom die in de detectorarrays vloeit, zelfs zonder licht-inval. Deze stroom wordt veroorzaakt door thermisch geïnduceerde elektronen-gatparen die in de detector plaatsvinden. Detectorarrays bestaan uit een netwerk van kleine detectoren die licht omzetten in elektrische signalen. Zelfs zonder licht ontstaat een achtergrondstroom die de nauwkeurigheid van de metingen kan beïnvloeden.

- **Correctie voor achtergrondruis:** Om een nauwkeurige reflectiewaarde te berekenen, moeten de gemeten signalen gecorrigeerd worden voor de donkerstroom.
- **Afhankelijkheid van temperatuur en integratietijd:** De donkerstroom is afhankelijk van de temperatuur van de detector en de integratietijd. Sensoren worden daarom vaak gekoeld om deze stroom te minimaliseren.

Veel hyperspectrale camera's beschikken over ingebouwde donkerstroomcorrectie. Hierbij wordt een deel van de sensor afgedekt en dus permanent in het donker gehouden. De gemeten donkerwaarden worden vervolgens gebruikt om de rest van de sensor correct te kalibreren.

### Witte Referentie

Een witte referentie biedt een standaard reflectie-oppervlak dat idealiter een uniforme reflectie vertoont over een breed golflengtebereik. Het gebruik ervan maakt het mogelijk om uit ruwe beelddata het procentuele reflectiespectrum van een object af te leiden.

De keuze voor een kwalitatieve witte referentie is belangrijk omwille van de consistentie en nauwkeurigheid die ze biedt: materialen zoals Spectralon hebben een zeer hoge diffuse reflectie ( $> 99\%$ ) over een breed spectrum, waardoor ze een betrouwbare en reproduceerbare basis vormen voor spectrale kalibratie. Tijdens een meting wordt doorgaans één referentiebeeld van de witte standaard opgenomen. Dit wordt vervolgens gebruikt om alle andere beelden binnen diezelfde sessie te corrigeren. Het is daarom van cruciaal belang dat de belichting stabiel blijft gedurende de hele opname. Indien dat niet het geval is, kunnen foutieve of misleidende reflectiewaarden ontstaan, wat de betrouwbaarheid van de resultaten ondermijnt.

### Bepaling van de spectrale reflectie

De meetprocedure voor het bepalen van de spectrale reflectie ( $R$ ) bestaat uit het nemen van drie hyperspectrale beelden:

- $I_{\text{sample}}(x, y; \lambda)$ : de sample-intensiteit,
- $I_{\text{ref}}(x, y; \lambda)$ : de referentie-intensiteit,
- $I_{\text{dark, sample}}(x, y; \lambda)$ : de donkerstroom bij  $t_{\text{sample}}$ ,
- $I_{\text{dark, ref}}(x, y; \lambda)$ : de donkerstroom bij  $t_{\text{ref}}$ .

De spectrale reflectie wordt vervolgens berekend met de volgende formule:

$$R(x, y; \lambda) = \frac{I_{\text{sample}}(x, y; \lambda) - I_{\text{dark, sample}}(x, y; \lambda)}{I_{\text{ref}}(x, y; \lambda) - I_{\text{dark, ref}}(x, y; \lambda)} \cdot \frac{t_{\text{ref}}}{t_{\text{sample}}} \cdot r_0 [\%] \quad (2.2)$$

Hierbij zijn:

- $x, y$ : de ruimtelijke coördinaten van een pixel,
- $\lambda$ : de golflengte,
- $t_{\text{ref}}$  en  $t_{\text{sample}}$ : de respectievelijke integratietijden,
- $r_0$ : de gekende,  $\lambda$ -afhankelijke spectrale reflectie van de witte referentie.

De correctie met  $I_{\text{dark}}$  garandeert dat de bijdrage van achtergrondruis wordt geëlimineerd, terwijl de aanpassing voor integratietijdverschillen en het gebruik van een witte referentie ervoor zorgt dat de gemeten reflectie betrouwbaar en reproduceerbaar is [5].

De combinatie van donkerstroomcorrectie en witte referentiekalibratie is noodzakelijk voor het verkrijgen van nauwkeurige en gestandaardiseerde reflectiewaarden in HSI. Een zorgvuldige toepassing van deze stappen maakt consistente spectrale analyses mogelijk, zelfs onder variabele meetomstandigheden.

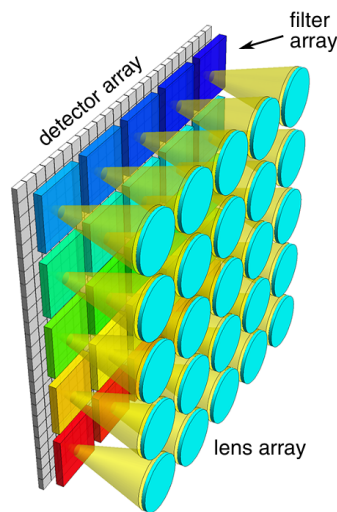
## 2.2 Dieptemetingen met hyperspectrale beelden

Het meten van diepte is essentieel voor het creëren van nauwkeurige 3D-modellen van objecten en oppervlakken, en speelt een belangrijke rol in deze masterproef. Diepte-informatie verkrijgen met traditionele camera's is echter vaak moeilijk, vooral bij complexe objecten of objecten op verschillende afstanden. Dit deel van de masterproef legt uit hoe de hyperspectrale camera in staat is om diepte te meten, wat ook de keuze voor de gebruikte camera verklaart, aangezien diepte-informatie noodzakelijk is voor het vormen van een 3D-model.

De Cubert Ultris X50 hyperspectrale camera maakt gebruik van een lenslet-filterarray, zoals vereenvoudigd weergegeven in Figuur 2.4. Dit is een matrix van kleine lenzen, die elk een afbeelding op hun eigen locatie van de beeldsensor maken, voor een specifieke golflengteband. Deze matrix is georganiseerd in 6 rijen van 11 filters. De camera heeft dus 66 spectrale filters. De hyperspectrale camera maakt gebruik van integrale beeldvorming om diepte te meten [7]. In tegenstelling tot traditionele camera's, die fysieke lenzen gebruiken om scherp te stellen, analyseert de hyperspectrale camera de verschuiving tussen spectrale beelden die op verschillende afstanden zijn vastgelegd. Deze verschuivingen zijn het gevolg van de lenslet-filterarray: elke golflengteband wordt op een andere locatie op de camerasensor afgebeeld, wat betekent dat elke golflengteband onder een iets andere hoek naar het beeld kijkt.

Door deze verschillen in kijkhoek is de spatiale verschuiving tussen de golflengtebanden verschillend voor elke afstand. Hoe dichters een object bij de camera staat, hoe groter de verschuiving.

Door deze verschuivingen te analyseren, kan de camera diepte-informatie extraheren zonder extra lenzen of dieptecamera's. Het proces lijkt op dat van een lichtveldcamera, die meerdere beelden vanuit verschillende hoeken vastlegt. Bij de hyperspectrale camera wordt de diepte-informatie echter pas achteraf softwarematig berekend door de spectrale beelden uit te lijnen op basis van de verschuivingen.



**Figuur 2.4:** Lenslet-array [2]

Een belangrijk voordeel van deze techniek is dat het scherpstellen achteraf in de software kan plaatsvinden. Aangezien de camera beelden bij verschillende golflengten vastlegt, kan de focus achteraf worden aangepast door de verschuivingen tussen deze beelden te analyseren. Dit maakt het mogelijk om objecten op verschillende afstanden scherp te stellen. Hierdoor kan de camera gedetailleerde en nauwkeurige 3D-informatie van complexe objecten vastleggen, wat het geschikt maakt voor toepassingen zoals 3D-modellering.

De combinatie van spectrale beelden en de verschuiving tussen deze beelden biedt een krachtig hulpmiddel voor het verkrijgen van zowel diepte-informatie als spectrale gegevens. In deze masterproef wordt deze techniek toegepast om een 3D-model van een object te creëren, waarbij zowel de geometrie als de kleurbepaling nauwkeurig wordt vastgelegd.

## 2.3 Bestaande systemen

### 2.3.1 3D-scantechnieken

De technologie achter 3D-scanners zorgt voor het digitaal vastleggen van de geometrie van objecten of omgevingen. Dit wordt gerealiseerd door het meten van het oppervlak via technieken zoals laserscanning (LiDAR), structured light, Time-of-Flight of stereofotogrammetrie [8]. Deze technieken genereren een puntwolk: een verzameling van duizenden tot miljoenen meetpunten die samen een digitale representatie vormen van de driedimensionale vorm van het object. De gegenereerde puntwolk kan vervolgens worden omgezet in een 3D-model dat gedetailleerde informatie geeft over de vorm, afmetingen en ruimtelijke verhoudingen.

De precisie van 3D-scanners hangt af van de gebruikte technologie.

- **Lasertriangulatie** projecteert een laserpunt of -lijn op het oppervlak van een object. Een camera kijkt vanuit een andere hoek naar datzelfde oppervlak. Omdat de camera en de laser zich op verschillende posities bevinden, lijkt de positie van het laserpunt in het camerabeeld te verschuiven, afhankelijk van hoe ver het oppervlak zich bevindt. Door deze verschuiving te meten en te vergelijken met de bekende afstand en hoek tussen de camera en de laser, kan de afstand tot elk punt op het object worden berekend met behulp van triangulatie. Deze methode levert zeer nauwkeurige 3D-modellen op, maar kan problemen geven bij glanzende of doorzichtige oppervlakken, omdat de reflectie van de laser dan niet goed zichtbaar is. Een voorbeeld is de SOL PRO 3D-scanner van Scan Dimension, met een nauwkeurigheid tot 0,05 mm [9].
- **Structured light** projecteert patronen op het object. De vervorming van deze patronen onthult diepte-informatie. Deze methode is snel en geschikt voor medische toepassingen, zoals bij de Artec Eva-scanner met een nauwkeurigheid tot 0,1 mm [10].
- **Time-of-Flight** meet de tijd die een lichtpuls nodig heeft om het object te raken en terug te keren. Deze methode is geschikt voor het scannen van grote omgevingen, zoals gebouwen, maar is minder nauwkeurig (1 mm tot 1 cm), zoals bij de Texas Instruments OPT8241 [11].

Traditionele 3D-scanners bieden echter uitsluitend geometrische informatie en geven geen inzicht in de materiaaleigenschappen van het oppervlak. Hyperspectrale 3D-scanners combineren daarentegen geometrie met spectrale data, waardoor niet alleen de vorm maar ook eigenschappen zoals kleur, textuur en chemische samenstelling zichtbaar worden. Dit maakt ze bijzonder geschikt voor toepassingen in sectoren waar de materiaalsamenstelling even belangrijk is als de vorm, zoals in de landbouw, geneeskunde, conservering van erfgoed of de voedingsindustrie.

De integratie van spectrale en ruimtelijke gegevens verhoogt de informatiedichtheid en bruikbaarheid van het gegenereerde 3D-model. Deze combinatie maakt hyperspectrale 3D-scanners krachtige tools voor toepassingen waar klassieke 3D-scanners tekortschieten.

### 2.3.2 Voorbeeldtoepassingen van een hyperspectrale 3D-scanner

Het doel van deze masterproef is om een digital twin te maken van een fysiek object om zo het oppervlak van een object nauwkeurig te kunnen renderen. De combinatie van HSI en digital twin-technologie biedt een krachtig hulpmiddel voor het verzamelen, analyseren en interpreteren van rijke spectrale en ruimtelijke gegevens.

Een veelbelovende toepassing is te vinden in de voedingsindustrie, specifiek bij de kwaliteitsbeoordeling van vleesproducten [12]. Digital twins maken het mogelijk om een digitale voorstelling van fysieke vleesproducten op te bouwen, waarbij HSI zorgt voor de koppeling van spectrale data aan 3D-modellen. Deze systemen worden ingezet voor real-time monitoring van fysische en chemische eigenschappen tijdens productie en opslag. Hierdoor kunnen afwijkingen of kwaliteitsveranderingen snel worden opgespoord.

De meerwaarde van de digital twin ligt in de dynamische koppeling van meetdata aan een virtueel model, waardoor de toestand van het product niet alleen op één moment, maar continu kan worden opgevolgd. In tegenstelling tot louter beeldvorming, laat een digital twin toe om veranderingen in kwaliteit te simuleren, trends te analyseren en voorspellingen te doen op basis van historische en actuele data. Dit maakt het mogelijk om proactief in te grijpen tijdens het productieproces en verhoogt zo de efficiëntie van kwaliteitscontrole.

Door gebruik te maken van datagestuurde algoritmes zijn deze systemen niet alleen in staat om de huidige conditie van het product te analyseren, maar ook om voorspellingen te doen over toekomstige kwaliteitsveranderingen. Zo kan men op tijd ingrijpen om bederf of afwijkingen te voorkomen. Dit leidt tot een efficiëntere kwaliteitscontrole, die veel van de nadelen van de traditionele methoden, zoals destructieve testen en lange analysetijden, weet te omzeilen. In een tijd waarin voedselverspilling een groeiend probleem vormt, is deze aanpak bijzonder relevant. Jaarlijks gaan miljoenen tonnen vlees verloren door inefficiënte kwaliteitscontroleprocessen, wat naast economische schade ook een grote impact op het milieu heeft [12]. Door HSI en digital twin-technologie te implementeren, kunnen producenten verspilling beperken en productkwaliteit garanderen. Hoewel deze technologieën nog volop in ontwikkeling zijn, toont deze toepassing een groot potentieel om kwaliteitsnormen in de voedingsindustrie aanzienlijk te verbeteren.

Naast de voedingsindustrie kent HSI talrijke andere toepassingen. In de precisielandbouw wordt HSI gebruikt om gewasgezondheid te monitoren, bodemtypes te analyseren en ziekten of stressfactoren vroegtijdig te detecteren [13]. Dankzij de gevoeligheid voor subtiele spectrale verschillen kunnen boeren sneller en gericht reageren op bedreigingen, wat leidt tot hogere opbrengsten en minder gebruik van bestrijdingsmiddelen.

Het werk van Billy G. Ram et al. [13] benadrukt de rol van HSI bij de detectie en classificatie van onkruid. Omdat onkruid vaak moeilijk visueel te onderscheiden is van gewassen, biedt HSI een grote meerwaarde voor een vroegtijdige en doelgerichte bestrijding. Ook voor het beoordelen van plantgezondheid in verschillende stadia van aantasting – zelfs nog vóór zichtbare symptomen optreden – is HSI een waardevol hulpmiddel. Deze toepassingen onder-

steunen de doelstellingen van precisielandbouw: efficiënter en duurzamer telen, wat cruciaal is in het licht van een groeiende wereldbevolking en druk op natuurlijke hulpbronnen.

Ook in de archeologie en het behoud van cultureel erfgoed biedt HSI unieke voordelen voor de analyse van oppervlakken en het zichtbaar maken van vervaagde teksten of pigmenten. Zo toont het onderzoek van Costanza Cucci et al. [14] aan dat hyperspectrale data kunnen bijdragen aan het detecteren van gipsvorming, een indicatie van degradatie in muurschilderingen. De technologie maakt het mogelijk om op een niet-destructieve manier materiaalverspreiding in kaart te brengen en zo kwetsbare delen te identificeren voor verdere conservatie. Deze toepassing benadrukt het potentieel van HSI als analysemethode voor waardevolle en gevoelige kunstobjecten.

Tot slot biedt HSI ook in de medische beeldvorming veelbelovende perspectieven. Het onderzoek van Zhang et al. [15] toont aan dat HSI ingezet kan worden voor het opsporen en onderscheiden van tumorweefsel. Door gebruik te maken van hyperspectrale data kunnen chirurgen tijdens ingrepen real-time informatie verkrijgen over de grenzen van tumoren, wat chirurgen helpt om tumoren nauwkeuriger te verwijderen, met als resultaat een hogere overlevingskans en minder kans op herval voor de patiënt. De ontwikkeling van draagbare HSI-apparaten vergroot bovendien de toegankelijkheid van deze technologie, zowel in klinische als mobiele toepassingen.

Samenvattend toont HSI, zeker in combinatie met 3D-technieken zoals digital twins, een brede waaier aan toepassingen met een sterke maatschappelijke en industriële relevantie. Van voedselveiligheid en duurzame landbouw tot erfgoedbehoud en gezondheidszorg: de kracht van HSI ligt in het vermogen om materiaal- en oppervlaktespecifieke informatie op een snelle, niet-destructieve en nauwkeurige manier vast te leggen en te interpreteren.

# 3

## Hardware

Dit hoofdstuk behandelt de hardwarecomponenten die werden gebruikt binnen het kader van deze masterproef. Centraal staat uiteraard de hyperspectrale camera, waarvan de technische eigenschappen en rol binnen het systeem worden toegelicht. Aansluitend wordt de gebruikte vergrotingslens besproken, die essentieel is voor het verkrijgen van een voldoende hoge optische resolutie. Daarnaast wordt de lichtbron besproken die werd gebruikt voor de eerste metingen, evenals de alternatieve lichtbron die later in het project werd geïntroduceerd.

Na de bespreking van de afzonderlijke componenten, wordt de volledige meetopstelling uiteengezet. Eerst wordt de initiële opstelling besproken die werd gebruikt voor de eerste metingen en validatie van het systeem. Vervolgens wordt dieper ingegaan op de finale opstelling waarin de camera gebruikt kan worden als een 3D-scanner.

Deze hardwarematige basis vormt de fundering voor de verdere softwarematige verwerking en analyse, zoals uitgewerkt in het volgende hoofdstuk.

### 3.1 Cubert Ultris X50

De gekozen HSI-camera is de Cubert Ultris X50, voorgesteld in Figuur 3.1. Dit is een snapshot hyperspectrale camera. De Ultris X50 maakt gebruik van een set van 66 spectrale filters, die elk een bandbreedte van 14 nanometer hebben. De camera kan alle informatie in één enkele integratieperiode vastleggen, wat de tijd verkort die nodig is om een opname te maken. Het golflengtebereik van de camera ligt tussen de 350 nm en 1002 nm, waardoor deze in staat is een breed spectrum van licht vast te leggen, inclusief zichtbaar licht en het eerste deel van het infraroodspectrum, namelijk het nabij-infrarood (NIR) [5].

De sensor van de camera is verdeeld in 66 verschillende zones, elk uitgerust met een eigen filter. Deze filters zijn strategisch verspreid over het oppervlak van de sensor, zodat licht vanuit meerdere richtingen en hoeken wordt opgevangen. Hierdoor kijkt de camera als het ware vanuit verschillende perspectieven naar het object.

Doordat elk filter licht opvangt onder een iets andere hoek, wordt hetzelfde object meerdere keren vastgelegd met een lichte ruimtelijke verschuiving tussen de verschillende beelden. Deze spatiale verschuiving is het gevolg van het feit dat elke filterzone een ander kijkperspectief heeft. Door deze verschuivingen te analyseren, kan de diepte-informatie van het object worden afgeleid, wat cruciaal is voor het reconstrueren van een driedimensionale structuur.

Een grote uitdaging is het scherpstellen op afstanden kleiner dan 0,5 meter. Dit scherpstellen is nodig om de ruimtelijke resolutie te verbeteren. De ruimtelijke resolutie geeft aan hoeveel detail een beeld kan vastleggen en wordt hier uitgedrukt als de breedte op het object die overeenkomt met één pixel in het hyperspectrale beeld. Bij een afstand van 0,5 meter is de ruimtelijke resolutie  $553 \mu\text{m}$ , wat veelal voldoende is voor algemene toepassingen. Echter, voor het vastleggen van fijne details van het monster, zoals het analyseren van oppervlakken met sterke schitteringen (*sparkle*) of het in kaart brengen van microstructuren, is deze resolutie ontoereikend.

Om deze uitdaging aan te pakken, is een convexe lens met een brandpuntsafstand van 18,8 cm voor de camera geplaatst. Hierdoor kunnen objecten op 18,8 cm afstand parallelle lichtstralen naar de camera sturen. Dit maakt het mogelijk om de camera scherp in te stellen op oneindig, wat resulteert in een scherpere afbeelding met een resolutie van  $208 \mu\text{m}$ . Met behulp van de dunne-lensvergelijking is de minimale afstand tot een object berekend op 13,6 cm, wat de ruimtelijke resolutie nog verder verbetert tot  $143 \mu\text{m}$ . Deze aanpassingen zijn van belang om nauwkeurige en gedetailleerde beelden te verkrijgen [5].

Wanneer foto's echter worden genomen van verder weg gelegen objecten, wordt de hoek tussen de verschillende opnames kleiner, waardoor de spatiale verschuiving tussen de beelden verwaarloosbaar wordt.

Dit principe is essentieel en verklaart het gebruik van een snapshotcamera: op korte afstanden zorgt de meervoudige waarneming vanuit verschillende hoeken voor detecteerbare verschuivingen en dus voor betrouwbare dieptemetingen.

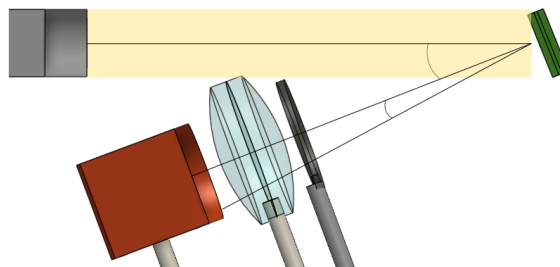


**Figuur 3.1:** Cubert Ultris X50 [16]

## 3.2 Lens

Bij de lenskeuze is het belangrijk dat de lensdiameter groter is dan de filterarray om scherpe beelden te verkrijgen voor elke golflengte. Daarom is er gekozen voor een lens met een diameter van 8,7 cm.

Als de camera en lens te dicht bij het monster geplaatst worden, kan de lichtbundel geblokkeerd worden door de camera zelf. Dit creëert een obstructiehoek, waarbij de behuizing van de camera of lens het lichtpad van de lichtbron naar het monster (of de reflectie van het monster naar de camera) gedeeltelijk kan blokkeren. Het is bijgevolg belangrijk om een afweging te maken tussen de afstand tot het monster en de positionering van de lens om optimale belichting en beeldkwaliteit te garanderen. Figuur 3.2 toont schematisch deze obstructiehoek.



**Figuur 3.2:** Obstructiehoek

De lens heeft een brandpuntsafstand van 18,8 cm. Dit wil zeggen dat de lens in staat is om licht van objecten op een afstand van 18,8 cm te focussen. In de context van HSI is deze afstand belangrijk, omdat ze bepaalt hoe dicht je bij het object kunt komen terwijl je toch scherpe beelden verkrijgt.

Een langere brandpuntsafstand resulteert in een scherper beeld over grotere afstanden. Dit heeft invloed op het scherptegebied van de camera: hoe verder de camera van het object af is, hoe groter de kans dat het beeld scherp blijft.

### Dunne-lensvergelijking:

Zoals eerder vermeld, heeft de lens een brandpuntsafstand of "focal length" van 18,8 cm. Als het object op een afstand van 50 cm van de lens wordt geplaatst, kan met de dunne-lensvergelijking de beeldafstand berekend worden:

$$\begin{aligned} \frac{1}{f} &= \frac{1}{d_o} + \frac{1}{d_i} & (3.1) \\ \frac{1}{18.8} &= \frac{1}{50} + \frac{1}{d_i} \\ 0.05319 &= 0.02 + \frac{1}{d_i} \\ 0.05319 - 0.02 &= \frac{1}{d_i} \\ 0.03319 &= \frac{1}{d_i} \\ d_i &\approx \frac{1}{0.03319} \approx 30.1 \text{ cm} \end{aligned}$$

De beeldafstand  $d_i$  is positief en bedraagt ongeveer 30,1 cm. Dit betekent dat het beeld zich aan de tegenovergestelde kant van de lens bevindt ten opzichte van het object, en dat het dus een reëel beeld betreft.

In sommige situaties, zoals bij deze camera, kan de beeldafstand echter negatief zijn. Een negatieve beeldafstand betekent dat het gevormde beeld zich aan dezelfde kant van de lens bevindt als het object. Dit soort beelden worden virtuele beelden genoemd en kunnen niet op een scherm worden geprojecteerd, maar wel direct door een oog of sensor worden waargenomen.

De camera kan scherpstellen op beeldafstanden tussen -50 cm en  $-\infty$ , wat inhoudt dat hij virtuele beelden opvangt die zich aan de objectzijde van de lens bevinden [5]. Als in de dunne-lensvergelijking een beeldafstand van -50 cm wordt ingevuld, resulteert dit in een objectafstand van 13,6 cm. Bij een beeldafstand van  $-\infty$  komt de objectafstand overeen met de brandpuntsafstand van 18,8 cm. Dit betekent dat het object zich tussen 13,6 cm en 18,8 cm van de lens moet bevinden om scherp te worden waargenomen. Op deze manier kan het scherpstelbereik, oftewel het bereik van afstanden (dieptes) waarbij de camera scherpe beelden kan maken, worden bepaald met behulp van de dunne-lensvergelijking.

## 3.3 Lichtbron

### 3.3.1 Halogeenlamp

Bij de eerste metingen in het kader van deze masterproef werd gebruikgemaakt van een Experiment Lamp van Frederiksen als lichtbron [17]. Deze lamp bevat een halogeenlamp van 12V / 50W, en genereert een stabiele en krachtige bundel wit licht, geschikt voor spectrale metingen in het zichtbare en nabij-infrarode bereik. De lamp beschikt over een actieve koeling via een ingebouwde ventilator, waardoor de temperatuur van de behuizing onder de 50°C blijft. Voor de initiële dieptemetingen werd een vlak oppervlak gebruikt, waarop een blad papier was bevestigd. Op dit papier is een dambordpatroon geprint, bestaande uit zwarte vierkantjes op een witte achtergrond. De halogeenlamp zorgt ervoor dat het patroon wordt belicht, waardoor de camera in staat is diepte-informatie te meten. Het sterke contrast tussen de zwarte vierkantjes en de witte achtergrond stelt de camera in staat om nauwkeurige dieptemetingen uit te voeren, wat in het volgende hoofdstuk verder wordt toegelicht. Deze opstelling dient als basis voor de eerste kalibratie en validatie van het meetsysteem.

### 3.3.2 Beamer

Wanneer een willekeurig object gereconstrueerd moet worden, is het onmogelijk om het object in te pakken met bedrukt papier om diepte te meten. Daarom wordt er naar een alternatieve manier gezocht die deze beperkingen verhelpt.

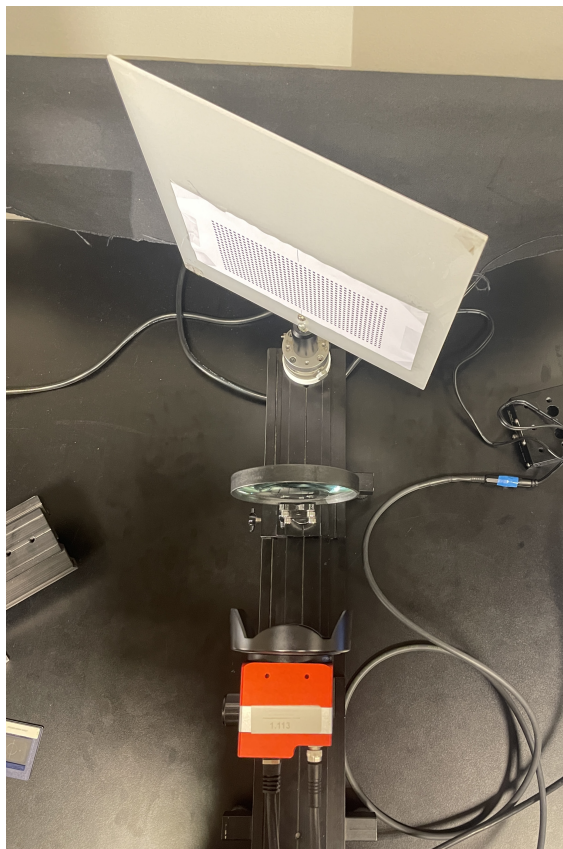
Een beamer lijkt een uitstekend alternatief omdat het twee functies combineert: het fungeert als lichtbron en projecteert een dambordpatroon op het object. Hierdoor kan het patroon dynamisch worden aangebracht, zonder dat er fysieke aanpassingen aan het object nodig zijn. Dit is dan ook de reden waarom de NEC M420X beamer met een NP17LP-lamp gebruikt wordt. Deze UHP (Ultra High Performance) lamp wordt vaak in projectoren toegepast vanwege zijn hoge helderheid, lange levensduur en efficiëntie.

Hoewel dit veelbelovend klinkt, moet worden gecontroleerd of het gebruik van een beamer de nauwkeurigheid van de metingen beïnvloedt. In paragraaf 5.5 wordt onderzocht of deze alternatieve lichtbron daadwerkelijk geschikt is.

## 3.4 Meetopstelling

### 3.4.1 Meetopstelling met geprint dambordpatroon

Deze meetopstelling wordt gebruikt om na te gaan welke nauwkeurigheid bereikt kan worden bij dieptemetingen. Hiervoor wordt een halogeenlamp gebruikt die een geprint dambordpatroon belicht. De camera en lens zijn uitgelijnd in de richting van het oppervlak. In Figuur 3.3 is de opstelling weergegeven: de lichtinvalshoek ten opzichte van de normaal van het oppervlak bedraagt  $0^\circ$ , terwijl de kijkhoek  $45^\circ$  bedraagt. Tijdens de metingen wordt het oppervlak echter verdraaid, waardoor beide hoeken variëren.



**Figuur 3.3:** Meetopstelling met geprint dambordpatroon

De metingen die hiermee uitgevoerd zijn, worden besproken in de secties 5.1, 5.2 en 5.3. Hierin wordt onderzocht wat het effect is van een vierkant of cirkelvormig dambordpatroon, maar ook wat het verkleinen van de afstand tussen de camera en de lens voor effect heeft. Bij het vergelijken van de nauwkeurigheid die bereikt wordt bij metingen met een halogeenlamp en metingen met een beamer in sectie 5.5, wordt deze opstelling ook gebruikt. Voor de metingen met een beamer wordt de beamer op de plaats gezet waar de halogeenlamp stond. Vervolgens projecteert deze het dambordpatroon op onbedrukt wit papier.

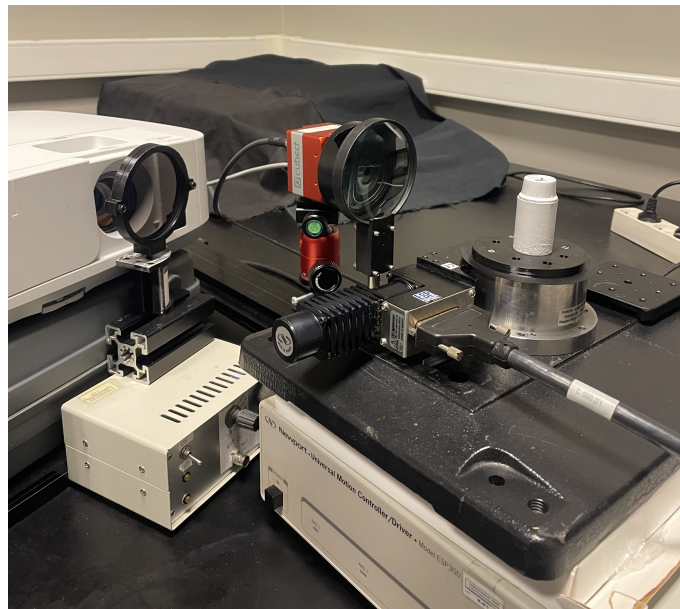
### 3.4.2 Meetopstelling met geprojecteerd dambordpatroon

Voor het 3D-scannen van een object moeten foto's vanuit verschillende kijkhoeken worden genomen. De hoeken tussen elke foto moeten nauwkeurig worden ingesteld. Daarom is gekozen voor een gemotoriseerde draaitafel die via een algoritme wordt aangestuurd. Hierdoor kan de draaitafel automatisch over een specifieke hoek draaien, zodat er meerdere foto's kunnen worden genomen, met telkens een hoekverschil van  $360^\circ$  gedeeld door het aantal foto's dat genomen wordt. Dit stelt ons in staat om een volledige 3D-reconstructie van het object te maken.

Figuur 3.4 toont de volledige meetopstelling. Naast de vergrotingslens voor de camera is er ook een filter voor de beamer toegevoegd om overbelichting te voorkomen. De opstelling is zo geconfigureerd dat het midden van de draaitafel zich op een afstand van 162 mm van het midden van de vergrotingslens bevindt. Door het object in het midden van de tafel te plaatsen, wordt het dieptebereik van de camera optimaal benut, aangezien de middenpositie overeenkomt met de helft van het totale dieptebereik.

Het dieptebereik van de camera is ongeveer 5 cm, dus het is belangrijk om objecten te kiezen die binnen dit bereik blijven vanuit elke hoek. Het witte object dat in de test wordt gebruikt, is cilindervormig met een maximale diameter van 25 mm.

Tot slot is het van belang te vermelden dat de beamer het object schuin belicht. Dit veroorzaakt een lichte schaduw aan de andere kant van het object op de camera-opname. Er wordt geprobeerd deze schaduw zoveel mogelijk te minimaliseren. Daarom is er gekozen voor een lichtinvalshoek van  $25^\circ$  en een kijkhoek van  $0^\circ$  ten opzichte van de normaal.



**Figuur 3.4:** Meetopstelling 3D-Scanner

# 4

## Software

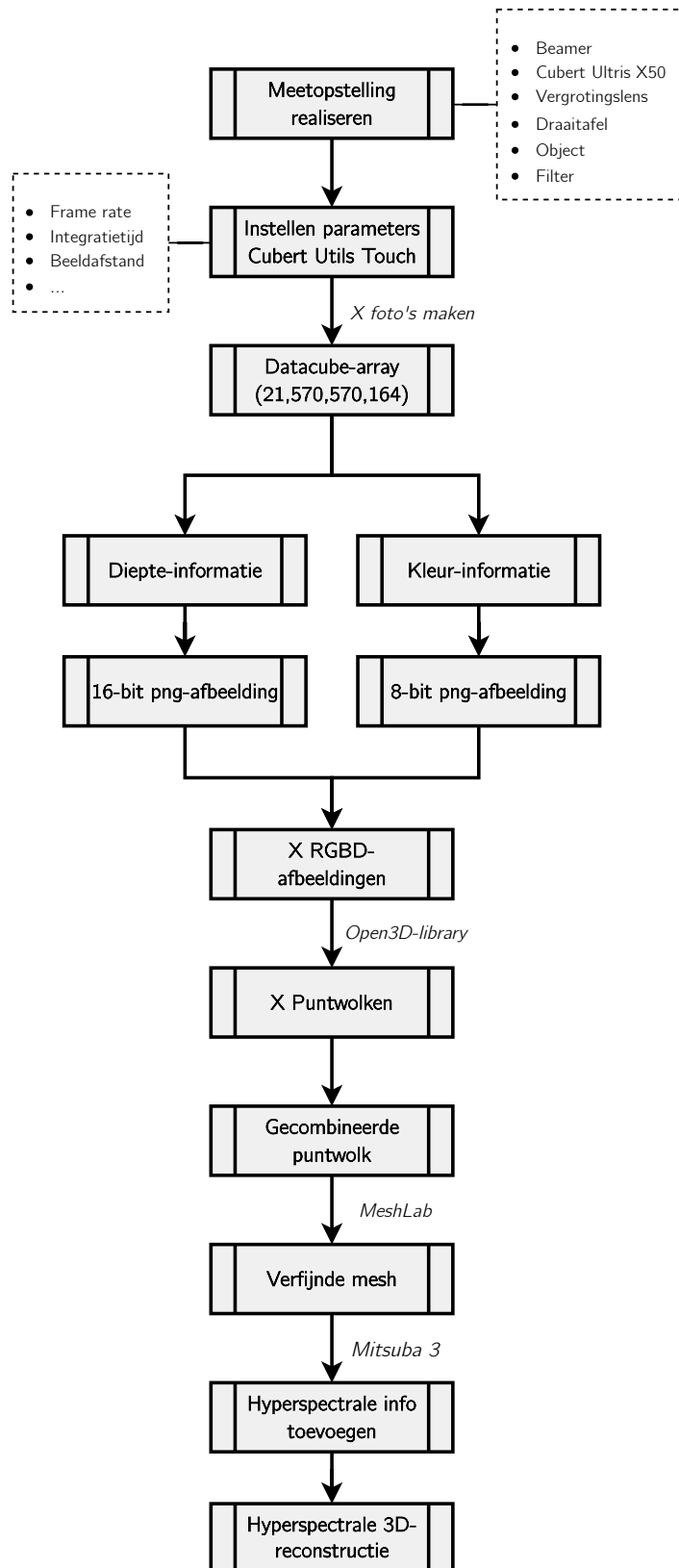
In deze masterproef speelt Python een centrale rol bij het uitvoeren van metingen en het verwerken van de verzamelde data.

Voor de eerste dieptemetingen wordt een programma ontwikkeld om de afstanden te berekenen en te vergelijken met de werkelijke waarden, waarmee de nauwkeurigheid van de metingen geëvalueerd kan worden. Daarnaast wordt een programma geschreven om specifieke golflengtebanden uit de hyperspectrale data te filteren. Dit stelt ons in staat om het effect van deze golflengten te onderzoeken en de nauwkeurigheid van de dieptebepaling in de x- en y-richting meer in overeenstemming te brengen.

Het belangrijkste aspect van deze masterproef is de omzetting van dieptemetingen, verzameld vanuit verschillende kijkhoeken, naar een 3D-weergave van een object. Hiervoor wordt een Python-algoritme ontwikkeld dat de dieptemetingen omzet naar een 3D-omgeving en de verkregen 3D-puntwolken combineert tot één geheel. Gezien de omvang van de dataset is het essentieel om efficiënt om te gaan met de data, waarbij irrelevante gegevens gefilterd worden om de nauwkeurigheid van de 3D-modellering te verbeteren.

De gecombineerde puntwolk wordt geëxporteerd naar een geschikt bestandstype en verder verwerkt in gespecialiseerde software. In MeshLab wordt een verfijnde 3D-mesh gegenereerd om de geometrie van het object nauwkeurig te reconstrueren. Daarna wordt met Mitsuba 3 de hyperspectrale informatie toegevoegd, zodat het model niet alleen geometrisch maar ook spectraal representatief is.

Om een overzicht te geven van de verschillende stappen die genomen worden om van een aantal 2D-opnames naar een 3D-reconstructie te gaan, wordt in Figuur 4.1 een procesdiagram weergegeven. Dit diagram biedt een duidelijk overzicht van de doorlopen stappen.



**Figuur 4.1:** Overzicht 3D-reconstructie

## 4.1 Basisalgoritme

In deze sectie wordt het eerste deel van het algoritme besproken, samen met extra toelichting in chronologische volgorde. Naast de Python-code speelt de software van de camera, Cubert Utils Touch, een belangrijke rol. Deze software omvat verschillende instellingen die correct geconfigureerd moeten worden om optimale resultaten te behalen. De kalibratie van de camera is dan ook een essentieel aspect, naast de code.

### 4.1.1 Cubert Utils Touch

Bij het instellen van de camera via de Cubert Utils Touch-software is het belangrijk om enkele parameters aan te passen ten opzichte van de standaardinstellingen, om zo optimale opnames te garanderen.

Een van de belangrijkste parameters is de integratietijd - dit is de tijd waarin de camera licht opvangt. De juiste waarde hiervoor hangt af van het aantal gemeten RAW counts, oftewel de ruwe meetwaarden per pixel.

Het aantal counts moet onder de 4096 blijven. Als dit maximum wordt overschreden, raakt het signaal verzadigd, wat leidt tot verlies van informatie en onnauwkeurige metingen in de heldere delen van het beeld. Als er dus te veel counts gemeten worden, moet de integratietijd worden verkort om overbelichting te vermijden.

Omgekeerd, als er te weinig counts zijn ( $\leq 100$ ), moet de integratietijd worden verhoogd, zodat voldoende licht wordt opgevangen en de signaal-ruisverhouding verbetert. Standaard is de integratietijd ingesteld op 100 ms, maar als de counts te hoog zijn, wordt deze typisch teruggebracht naar 50 ms of lager.

Een andere belangrijke parameter is de beeldafstand. Een foto wordt als scherp beschouwd wanneer de overgangen tussen de zwarte en witte vlakken van het kalibratie-dambord goed zichtbaar zijn. In hyperspectrale data komt dit overeen met een maximale gradiënt in de intensiteitswaarden op de randen van het dambordpatroon. Een correcte beeldafstand - afgeleid uit de werkelijke objectafstand via de dunne-lensvergelijking - resulteert in duidelijke randen en een goed gefocust beeld. Is de afstand verkeerd ingesteld, dan ontstaan wazige overgangen, contrastverlies en een onscherpe opname.

Ten slotte wordt de frame rate verlaagd van de standaardwaarde van 1 Hz naar 0,1 Hz, waardoor de camera één beeld per 10 seconden vastlegt. Deze wijziging vermindert de belasting van de data-overdracht.

### 4.1.2 Dieptebeoordeling

Het algoritme begint met het importeren van verschillende bibliotheken zoals `numpy` (voor numerieke berekeningen), `matplotlib.pyplot` (voor visualisaties) en `zeep` (voor communicatie via SOAP-protocollen). SOAP-protocollen worden gebruikt omdat ze via Python de

camera-software kunnen aansturen, wat essentieel is voor de communicatie tussen de software en de hardware. Daarnaast wordt gebruikgemaakt van enkele hulpfuncties uit een privé Python-pakket, beschikbaar gesteld door de co-promotor.

Vooraleer de verwerking van hyperspectrale data kan beginnen, controleert het algoritme of er een correcte verbinding bestaat tussen de software en de hyperspectrale camera. Dit is essentieel voor een vlotte en foutloze overdracht van data. Daarna geeft de gebruiker het bestandspad mee waar de hyperspectrale data is opgeslagen, zodat het algoritme de benodigde bestanden kan inlezen. De ingelezen data wordt vervolgens omgezet in een datacube  $(x, y, \lambda)$ , een driedimensionale dataset die zowel ruimtelijke  $(x, y)$  als spectrale  $(\lambda)$  informatie bevat. Door de grote hoeveelheid gegevens vereist deze verwerking aanzienlijke reken capaciteit, wat een uitdaging vormt bij hyperspectrale technologie.

Een belangrijk onderdeel van het algoritme is het definiëren van een reeks van 21 exportafstanden  $(d_i)$ , variërend van 500 tot 6000 mm. Deze exportafstanden vertegenwoordigen de beeldafstanden tussen de camera en het object, en ze zijn essentieel voor het nauwkeurig modelleren van de diepte in de scène. Het algoritme berekent per pixel de diepte in beeldafstand, en koppelt vervolgens deze waarde aan de dichtstbijzijnde exportafstand.

De keuze voor deze 21 afstanden is niet willekeurig; ze zijn zorgvuldig geselecteerd om een verband te leggen tussen de beeldafstand en de werkelijke objectafstand. Dit verband zorgt voor een correcte dieptebepaling. Bovendien is de keuze voor 21 exportafstanden zo gemaakt dat de berekening van de diepte per foto door het algoritme niet langer dan 5 minuten duurt, wat zorgt voor een goede balans tussen nauwkeurigheid en verwerkingssnelheid.

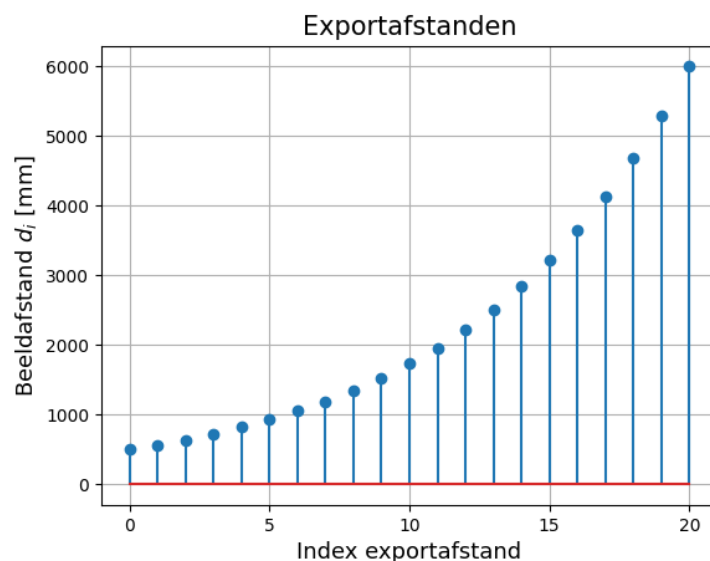
Voor elke exportafstand wordt een aparte datacube gegenereerd. Deze worden samen opgeslagen in een array met dimensies  $(21, x, y, \lambda)$ . Het totaal aantal datacubes is dus gelijk aan het aantal exportafstanden, wat de geheugenvereisten sterk verhoogt naarmate het aantal exportafstanden toeneemt. De gekozen afstanden zijn exponentieel verdeeld volgens de formule:

$$d_i = 500 \cdot e^{b \cdot i}, \quad \text{waarbij } b = \frac{\ln(12)}{20}. \quad (4.1)$$

Hiermee wordt een niet-lineaire spreiding gecreëerd, waarbij kleinere tussenafstanden gedefinieerd worden voor kortere beeldafstanden. Dit is bewust zo gekozen: bij kortere beeldafstanden leiden kleine veranderingen in de beeldafstand  $(d_i)$  tot grotere veranderingen in de bijhorende objectafstand  $(d_o)$ , zoals voorspeld door de dunne-lensvergelijking. Bij langere beeldafstanden heeft een wijziging in  $d_i$  een veel kleinere impact op  $d_o$ , waardoor minder meetpunten volstaan om voldoende diepte-informatie te verkrijgen [7].

Figuur 4.2 toont grafisch de verdeling van de gekozen exportafstanden.

Een beperking van dit systeem is dat het slechts met een eindig aantal exportafstanden werkt. Hierdoor veranderen de berekende dieptes per pixel in discrete stappen. Dit leidt tot minder vloeiende overgangen, met name bij objecten met gebogen oppervlakken. Hoewel een perfecte reconstructie theoretisch mogelijk is met een oneindig aantal afstanden, is dit in de praktijk niet haalbaar door de grote hoeveelheid geheugen die daarvoor nodig is. De datacube-array zou namelijk oneindig groot worden.



**Figuur 4.2:** Verdeling exportafstanden

Het algoritme bepaalt vervolgens voor elke pixel in de datacube welke van deze exportafstanden tot het scherpste beeld leidt. Iedere pixel krijgt vervolgens een index  $i$  toegewezen die correspondeert met een specifieke beeldafstand. Index 0 komt bijvoorbeeld overeen met beeldafstand 500 mm. Op basis van deze index genereert het algoritme een dieptemap, waarbij elke pixel wordt gekleurd op basis van de bijbehorende beeldafstand (index  $i$ ). Deze kleurcodering maakt de diepteverdeling eenvoudig te interpreteren.

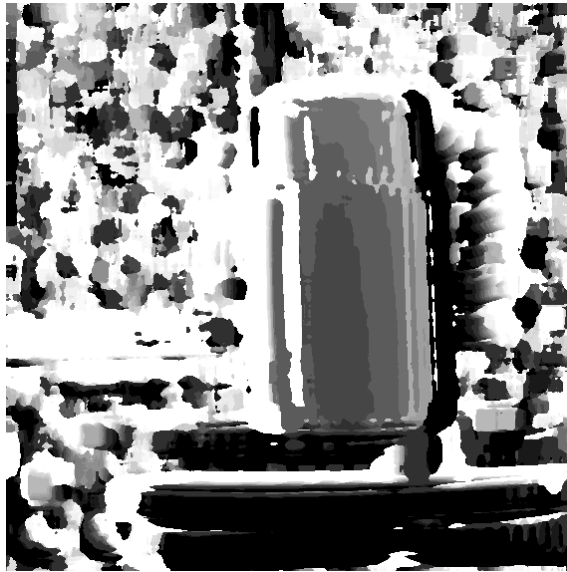
## 4.2 RGB- en diepteafbeelding

Elke opname bevat zowel kleur- als diepte-informatie. Om in een latere stap een RGBD-afbeelding te kunnen construeren, zijn afzonderlijke RGB- en diepte-beelden vereist. In eerste instantie wordt gewerkt met een RGB-afbeelding die de hyperspectrale informatie niet bevat. Deze informatie wordt in een later stadium van de masterproef toegevoegd.

De kleurafbeelding wordt opgeslagen als een 8-bit .png-bestand en de diepteafbeelding als een 16-bit .png-bestand.

De diepteafbeelding geeft per pixel de afstand weer in grijs tinten (zie Figuur 4.3), waarbij de waarden genormaliseerd zijn op een schaal van 0 tot 65535 ( $2^{16}$ ). Om deze genormaliseerde waarden om te zetten naar reële afstandswaarden, is een wiskundige omzetting nodig.

Het resultaat is een gecorrigeerde 16-bit diepteafbeelding, waarbij de grijswaarden daadwerkelijk overeenkomen met de gemeten afstanden, uitgedrukt in meter. Deze correctie is essentieel om de diepte-informatie op een betrouwbare manier te kunnen gebruiken in de verdere verwerking.



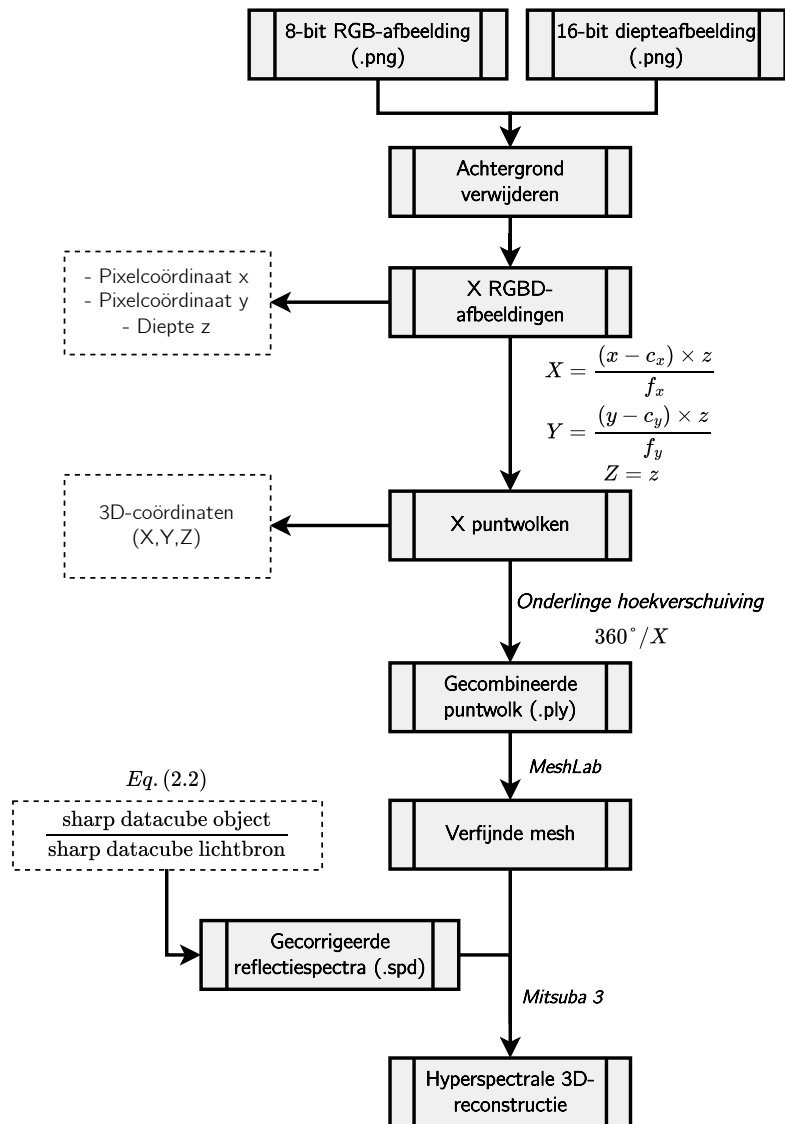
**Figuur 4.3:** Diepteafbeelding in grijs tinten

### 4.3 Realiseren van een RGB-3D-scanner

Het doel van deze masterproef is het ontwikkelen van een 3D-scanner die zowel de geometrie van een object reconstrueert als hyperspectrale informatie bevat. In deze eerste fase is er echter voor gekozen om te starten met het ontwikkelen van een RGB-3D-scanner. De reden hiervoor is dat er voor RGB-3D-scanners reeds bestaande methoden beschikbaar zijn waarvan gebruik kan gemaakt worden. Zodra dit algoritme goed functioneert, kan het verder worden uitgebreid om ook hyperspectrale informatie toe te voegen.

Bij het realiseren van de algoritmes die in het vervolg van deze masterproef worden besproken, werd gebruik gemaakt van generatieve AI-ondersteuning, waaronder ChatGPT (openAI) en MS Copilot. Deze tools werden ingezet ter ondersteuning bij het schrijven van de code. Het gebruik van GenAI werd op transparante wijze verantwoord in de verplichte *KU Leuven Code of Conduct m.b.t. het gebruik van Generatieve AI*.

Om het vervolg van deze sectie overzichtelijk te houden, is in Figuur 4.4 opnieuw een overzicht weergegeven die de verschillende stappen schematisch weergeeft. Dit overzicht gaat dieper in op het overzicht van Figuur 4.1.



**Figuur 4.4:** Gedetailleerd overzicht van de realisatie van de hyperspectrale 3D-scanner

### 4.3.1 Achtergrond verwijderen

De foto's die genomen worden voor de reconstructie bevatten uiteraard niet alleen het object zelf. In de opgeslagen .png-bestanden moeten alle pixels die niet tot het object behoren, verwijderd worden. Dit kan worden gedaan door te bepalen welke pixels tot de achtergrond behoren en deze vervolgens te negeren. Er zijn verschillende methoden uitgetest om dit te realiseren.

### 4.3.1.1 REMBG-package

De REMBG-package (waarbij REMBG staat voor Remove Background) is als eerste optie gebruikt om de achtergrond van de foto's te verwijderen. Dit pakket bevat een `remove`-functie, die het mogelijk maakt om snel de achtergrond te verwijderen.

Deze functie verwijdert automatisch de achtergrond van een afbeelding. Dit gebeurt met behulp van een deep learning-model dat geleerd heeft om de voorgrond (zoals een object of persoon) te onderscheiden van de achtergrond.

Het model dat hiervoor gebruikt wordt, heet U<sup>2</sup>-Net. Dit is een speciaal neurale netwerk dat getraind is op duizenden voorbeelden van afbeeldingen mét bijhorend achtergrondmasker [18]. Tijdens die training leert het model op basis van visuele eigenschappen zoals:

- **Vorm:** Objecten hebben meestal duidelijke contouren of randen.
- **Kleur en contrast:** Er is vaak een kleurverschil tussen voorgrond en achtergrond.
- **Textuur:** Achtergronden zijn vaak egaal of onscherp, terwijl voorwerpen gedetailleerder zijn.
- **Diepte en positionering:** Centraal geplaatste of scherpere elementen worden vaker als voorgrond beschouwd.

Op basis van deze eigenschappen maakt het model bij elke nieuwe afbeelding een binair masker: een zwart-witlaag waarbij wit aanduidt wat behouden moet worden (het object) en zwart wat moet worden weggehaald (de achtergrond).

In deze toepassing wordt deze binaire informatie gebruikt om de achtergrond van de kleurafbeelding transparant te maken via het alfa kanaal, zodat alleen het object overblijft. Het alfa kanaal bevat voor elke pixel een zogenaamde alfawaarde, die aangeeft hoe transparant die pixel is. Een waarde van 255 betekent volledig zichtbaar, terwijl 0 volledig transparant is. Daarnaast wordt hetzelfde masker toegepast op het bijbehorende dieptebeeld: pixels die tot de achtergrond behoren krijgen hier de waarde nul, waardoor enkel de diepte van het object behouden blijft.

Deze aanpak zorgt ervoor dat zowel de kleur- als diepte-informatie netjes overeenkomen en dat alleen het relevante deel van de scène, het object, wordt gebruikt voor verdere verwerking. Dit helpt ook om de hoeveelheid data die verder verwerkt moet worden te beperken.

### 4.3.1.2 Foto met en zonder object

Gezien de problemen die de REMBG-package in de praktijk heeft opgeleverd (zie 5.6.2), zijn alternatieve methoden ter verwijdering van de achtergrond onderzocht. Het eerste alternatief bestaat uit het nemen van één foto met en één foto zonder het object. Door de verschillen tussen deze twee afbeeldingen te analyseren, kunnen de pixels die niet veranderen in diepte

worden geïdentificeerd als de achtergrond. Dit is een eenvoudige en lichtgewicht methode die weinig rekenkracht vereist. Deze methode veronderstelt hierbij dat de camera zeer consistent is in het meten van diepte.

#### 4.3.1.3 Op basis van helderheid

Een tweede alternatief voor de REMBG-methode is het verwijderen van de achtergrond op basis van helderheid. Deze methode maakt gebruik van het feit dat het verlichte object een duidelijk contrast vertoont met de donkere achtergrond. Om dit contrast effectief te detecteren, wordt de originele RGB-afbeelding omgezet naar het HSV-kleurmodel (Hue, Saturation, Value). In tegenstelling tot het RGB-model laat HSV toe om visuele kenmerken zoals helderheid eenvoudiger te isoleren.

Na omzetting naar HSV wordt, via drempelwaarden, een binair masker gegenereerd waarin enkel pixels binnen het ingestelde bereik worden gemarkeerd. Dit masker is echter niet perfect en kan gaten vertonen, bijvoorbeeld door donkere zones zoals het zwarte dambordpatroon. Om het masker te verbeteren, wordt een bewerking genaamd dilatie toegepast: hierbij worden bij dit object de gemarkeerde (witte) gebieden iets uitgebreid, waardoor kleine gaten worden opgevuld en objectranden worden verfijnd.

Vervolgens worden contouren in het masker opgespoord, waarna enkel de grootste (en dus meest relevante) contouren behouden blijven. Het aldus verkregen masker wordt gecombineerd met een masker op basis van dieptegegevens. Zo blijven enkel pixels behouden die zowel binnen het HSV-bereik vallen als zich binnen een verwacht dieptebereik bevinden. Dit verhoogt de nauwkeurigheid, aangezien enkel pixels die logisch gezien tot het object kunnen behoren, worden meegenomen. Uiteindelijk resteert enkel het object in de afbeelding, terwijl de achtergrond nagenoeg volledig is verwijderd.

#### 4.3.2 Omzetting naar RGBD en puntwolk

De twee .png-afbeeldingen, die respectievelijk kleur- en diepte-informatie bevatten, zijn inmiddels gecorrigeerd en bevatten geen achtergrond meer. Ze kunnen nu gecombineerd worden tot één geheel: een zogenaamde RGBD-afbeelding. De achtergrond wordt vooraf verwijderd om de hoeveelheid data te beperken waarmee verder gewerkt moet worden. Deze RGBD-afbeelding bevat per pixel zowel kleur- als diepte-informatie en dient als invoer voor het genereren van een puntwolk aan de hand van de `Open3D`-bibliotheek.

Tijdens dit proces wordt elke pixel uit de afbeelding omgezet naar een driedimensionaal punt in de ruimte. De omzetting maakt gebruik van de pixelpositie  $(x, y)$  en de bijbehorende dieptewaarde  $z$ , die de afstand van de het midden van de lens tot het object in de ruimte aangeeft.

De conversie van 2D-pixels naar 3D-punten gebeurt met de volgende formules:

$$\begin{aligned} X &= \frac{(x - c_x) \times z}{f_x}, \\ Y &= \frac{(y - c_y) \times z}{f_y}, \\ Z &= z \end{aligned} \tag{4.2}$$

Hierbij zijn:

- $x, y$  de pixelcoördinaten van de afbeelding,
- $X, Y, Z$  de 3D-coördinaten van de pixel in de ruimte,
- $z$  de gemeten diepte op die pixel,
- $f_x, f_y$  de brandpuntsafstanden (in pixels),
- $c_x, c_y$  de coördinaten van het optische middelpunt.

De formules gebruiken de 2D-pixelcoördinaten  $(x, y)$  en de dieptewaarde  $z$  om de werkelijke 3D-coördinaten  $(X, Y, Z)$  van die pixel in de ruimte te berekenen. Om de relatieve positie van de pixel ten opzichte van het optische middelpunt van de camera te bepalen, wordt  $x - c_x$  en  $y - c_y$  genomen. Dit corrigeert de projectie op basis van de positie van de camera, zodat de werkelijke verplaatsing van de pixel in de ruimte kan worden berekend.

De brandpuntsafstand ( $f_x$  en  $f_y$ ) bepaalt hoeveel ruimte een object op de sensor inneemt en speelt een sleutelrol in de schaal van de projectie. Dit beïnvloedt hoe ver of dichtbij objecten in de afbeelding lijken. De brandpuntsafstand geeft aan hoeveel pixels een object beslaat op de beeldsensor voor elke eenheid van afstand in de echte wereld.

Hoe groter de brandpuntsafstand, hoe dichter de camera bij een object lijkt, wat het object groter maakt op de afbeelding. Omgekeerd, hoe kleiner de brandpuntsafstand, hoe verder de camera lijkt te staan en wordt het object kleiner afgebeeld. De berekening van deze brandpuntsafstand wordt besproken in vergelijking 4.3.

Zoals beschreven in de studie van Ortiz et al. [19], is het optische middelpunt  $(c_x, c_y)$  het punt in de afbeelding waar de camera precies op gericht is. Dit centrale punt bevindt zich in het midden van de afbeelding, op pixel  $(285, 285)$ , aangezien de resolutie  $570 \times 570$  pixels bedraagt.

Wat betreft de  $Z$ -coördinaat: deze is gelijk aan de dieptewaarde  $z$ , die de werkelijke afstand van het midden van de lens tot het object aangeeft. Aangezien deze waarde al de werkelijke afstand vertegenwoordigt, hoeft de  $Z$ -coördinaat niet verder omgezet te worden.

### Intrinsieke Cameramatrix

De intrinsieke cameramatrix, aangeduid als  $K$ , beschrijft de interne parameters van de camera en is noodzakelijk voor het omzetten van 2D-pixelcoördinaten naar 3D-punten, op basis van

gekende diepte-informatie. Deze matrix maakt het mogelijk om punten die op de beeldsensor geregistreerd worden, te reconstrueren in de driedimensionale ruimte van de camera, en ziet er als volgt uit:

$$K = \begin{bmatrix} f_x & 0 & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Waarbij:

- $f_x$  en  $f_y$  de brandpuntsafstanden zijn in de horizontale en verticale richting, respectievelijk, uitgedrukt in pixels.
- $c_x$  en  $c_y$  de coördinaten zijn van het optische middelpunt van de camera, vaak het midden van de afbeelding.

In dit geval is de intrinsieke cameramatrix als volgt ingevuld:

$$K = \begin{bmatrix} 904 & 0.0 & 285 \\ 0.0 & 904 & 285 \\ 0.0 & 0.0 & 1.0 \end{bmatrix}$$

### Verklaring van de waarden in de matrix

De waarde van  $f_x$  en  $f_y$  is 904 pixels. Deze waarde is afgeleid van de fysieke brandpuntsafstand van de camera, die 188 mm is, en de gemiddelde ruimtelijke resolutie van 208  $\mu\text{m}/\text{pixel}$ . De ruimtelijke resolutie van 208  $\mu\text{m}/\text{pixel}$  betekent dat elke pixel in de afbeelding overeenkomt met 0.208 mm.

De berekening van de brandpuntsafstand in pixels wordt als volgt uitgevoerd:

$$f_x = f_y = f \cdot p_x \tag{4.3}$$

waarbij:

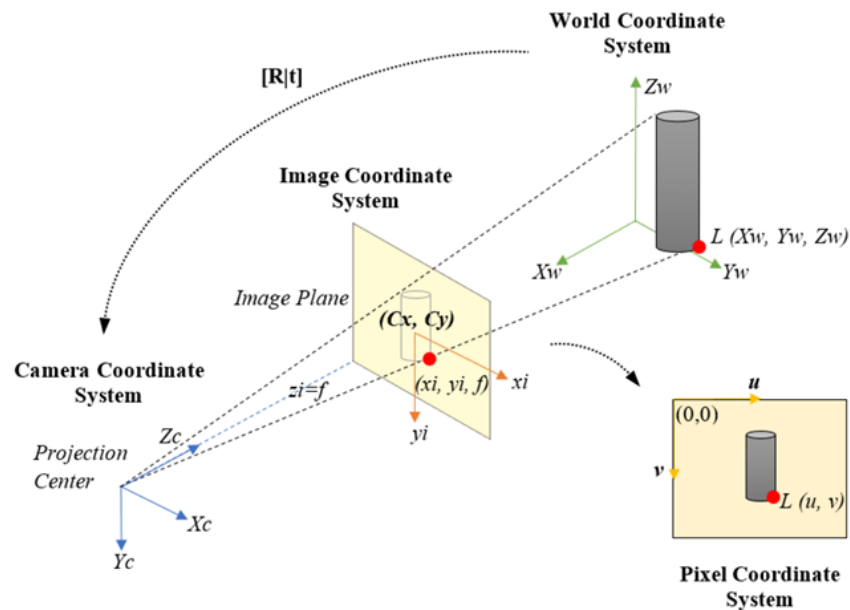
- $f$  de brandpuntsafstand van de vergrotingslens is, gegeven als 188 mm,
- $p_x$  de ruimtelijke resolutie in pixels per millimeter, welke gelijk is aan  $\frac{1}{0.208} \approx 4.81$  pixels/mm.

Het invullen van deze waarden geeft de brandpuntsafstand in pixels voor zowel de horizontale als verticale richting:

$$f_x = f_y = 188 \text{ mm} \times 4.81 \text{ pixels/mm} \approx 904 \text{ pixels}$$

Het optische middelpunt ligt in het midden van de afbeelding. Aangezien de resolutie van de afbeelding  $570 \times 570$  pixels bedraagt, liggen de waarden van  $c_x$  en  $c_y$  op  $(285, 285)$  pixels. Dit betekent dat de camera zich richt op het midden van het beeld, en dit centrale punt wordt gebruikt om de coördinaten van andere punten in de afbeelding te berekenen.

Om de voorgaande zaken te visualiseren en beter te kunnen interpreteren, is de zojuist besproken theorie weergegeven in Figuur 4.5.



**Figuur 4.5:** Omzetting 2D naar 3D [19]

Op deze figuur, waarin de namen van de coördinatensystemen zijn aangegeven, komt het punt  $(u, v)$  overeen met de pixelcoördinaten  $(x, y)$  van een specifiek punt in de afbeelding. Het coördinaat  $Z_c$  staat voor de dieptemetingen, die de afstand van het midden van de lens tot het object aangeven. De waarden  $c_x$  en  $c_y$  stellen de coördinaten van het optisch middelpunt van de camera voor.

De coördinaten  $X_c$  en  $Y_c$  zijn de brandpuntsafstanden  $f_x$  en  $f_y$  die eerder zijn behandeld. Tenslotte zijn  $X_w$ ,  $Y_w$  en  $Z_w$  de uiteindelijke 3D-coördinaten van het objectpunt. In deze masterproef worden deze coördinaten simpelweg aangeduid als  $(X, Y, Z)$ .

Met de 2D-informatie van elke pixel in het *Pixel Coordinate System* wordt eerst overgegaan naar het *Image Coordinate System*, op basis van het optisch middelpunt, de gemeten diepte en de brandpuntsafstanden. Vervolgens maken de formules uit vergelijking 4.2 de overstap naar het *World Coordinate System*. Op die manier wordt elke pixel correct voorgesteld in een 3D-ruimte.

Met deze instellingen kan de `Open3D`-bibliotheek voor elke pixel de juiste 3D-positie  $(X, Y, Z)$  berekenen. Vervolgens wordt de kleurinformatie van iedere pixel gekoppeld aan het overeenkomstige 3D-punt, wat resulteert in een gekleurde puntwolk die een realistische recon-

structie van de originele scène vormt. Een puntwolk bestaat uit een verzameling punten in de 3D-ruimte, waarbij elk punt een positie en een kleurwaarde heeft. Deze punten samen vertegenwoordigen de vorm en structuur van het object dat in de afbeelding zichtbaar is.

In een latere stap worden de afzonderlijke puntwolken, die per opname worden gegenereerd, samengevoegd tot één enkele puntwolk. Dit vormt uiteindelijk de reconstructie van het volledige object.

### 4.3.3 Constructie 3D-mesh

Dit is de laatste stap in het realiseren van een RGB-3D-scanner. In deze fase wordt de 3D-vorm van het object gereconstrueerd door de verschillende puntwolken op een juiste manier ten opzichte van elkaar uit te lijnen. Het uiteindelijke doel is om een naadloze integratie van de puntwolken te bereiken, zodat ze samen de volledige geometrie van het object in de 3D-ruimte weergeven.

De puntwolken worden verdeeld over een cirkel, waarbij ze worden gepositioneerd op basis van het aantal gemaakte beelden. Als er bijvoorbeeld zes beelden worden genomen, worden de puntwolken telkens  $60^\circ$  verder op de cirkel geplaatst. Daarna wordt een radiale correctie toegepast, waarbij de puntwolken zo gepositioneerd worden dat de diepte-informatie radiaal wegstrekt van het rotatiecentrum. Op deze manier komt de gemeten diepte-informatie aan de buitenkant van het object, zoals in de werkelijkheid. Dit maakt het mogelijk om de puntwolken op de juiste manier te positioneren in de 3D-ruimte.

Wanneer de puntwolken zijn gecorrigeerd en geroteerd, worden ze samengevoegd tot één gecombineerde puntwolk. Omdat er veel overlappende punten zijn tussen de verschillende puntwolken, wordt een *voxel-downsampling* techniek toegepast. Deze methode deelt de 3D-ruimte op in een raster van kleine kubusvormige cellen, zogenaamde *voxels* (vergelijkbaar met pixels, maar dan in drie dimensies). Binnen elke voxel worden alle punten die daarin vallen vervangen door één representatief punt - bijvoorbeeld het gemiddelde van hun coördinaten. Op die manier wordt de puntwolk vereenvoudigd: het totale aantal punten wordt verminderd, zonder dat de globale vorm van het object significant verandert.

De mate waarin de reconstructie nauwkeurig is, hangt af van zowel de precisie van de dieptemetingen als van de gekozen voxelgrootte. Te kleine voxels verminderen de overlap van punten nauwelijks, waardoor er weinig voordeel wordt behaald in de efficiëntie van de puntwolkrepresentatie. Te grote voxels kunnen daarentegen leiden tot verlies van detail.

De via *voxel-downsampling* verkregen puntwolk wordt doorgaans opgeslagen in het `.ply`-formaat, een veelgebruikt bestandsformaat voor 3D-data. Dit formaat is compatibel met verschillende softwarepakketten, zoals Mitsuba 3 en MeshLab, en maakt verdere verwerking of visualisatie mogelijk.

Op basis van deze puntwolk kan een verfijnde 3D-mesh worden bekomen: een gesloten 3D-oppervlak dat bestaat uit met elkaar verbonden driehoeken. Zo'n mesh wordt gevormd door de punten in de puntwolk onderling te verbinden tot een netwerk van driehoeken dat

het oppervlak van het object beschrijft. De stappen om dit te realiseren in MeshLab - een veelgebruikte open-source software voor 3D-modellering - zijn eenvoudig en kunnen snel worden uitgevoerd.

Eerst worden de normaalvectoren voor de puntwolk berekend. Deze normaalvectoren zijn cruciaal voor de meshconstructie, omdat ze aangeven hoe het oppervlak zich oriënteert op elk punt. Vervolgens worden vertici geselecteerd waarvan de normaalvectoren nul zijn, wat vaak duidt op onjuiste of overbodige punten. Deze punten worden verwijderd om de data schoon te maken.

Na het verwijderen van onjuiste punten, wordt de puntwolk omgezet naar een waterdicht oppervlak door middel van een *Surface Reconstruction*-techniek, specifiek de Screened Poisson-methode. Deze methode zorgt ervoor dat de puntwolk een gesloten mesh vormt, terwijl tegelijkertijd ruis wordt verwijderd.

Verder wordt er gezocht naar geïsoleerde stukken die geen onderdeel vormen van het object, bijvoorbeeld kleine fragmenten ruis aan de rand van de dataset. Deze fragmenten kunnen verwijderd worden met de functie *Remove Isolated Pieces* om de mesh verder te verfijnen. Ruis die zich aan de randen van het object bevindt, oftewel ruis die aan het oppervlak van het object vastzit, kan ook worden geïdentificeerd en verwijderd door het selecteren van specifieke *faces* die ongewenst zijn. Dit kan worden gedaan met de functie *Conditional Face Selection*, waarmee specifieke *faces* op basis van vooraf bepaalde voorwaarden kunnen worden geselecteerd en vervolgens verwijderd met de functie *Delete Selected Faces*.

Tot slot kunnen gaten in de mesh, die vaak ontstaan door ontbrekende gegevens of onzichtbare oppervlakken in de puntwolk, worden opgevuld met de functie *Close Holes*. Dit zorgt ervoor dat het object een volledig, gesloten 3D-oppervlak heeft. In het geval van deze meetopstelling zal het doorgaans het boven- en ondervlak moeten worden opgevuld met deze functie.

Door deze stappen in MeshLab te volgen, wordt de oorspronkelijke puntwolk omgezet naar een verfijnde 3D-mesh die het object nauwkeurig weergeeft. Het resultaat is een schone, complete mesh, die klaar is voor verdere verwerking en het toevoegen van hyperspectrale informatie.

#### 4.3.4 Toevoegen van hyperspectrale informatie

Om de overgang te maken van een RGB-3D-scanner naar een hyperspectrale 3D-scanner, is het noodzakelijk om hyperspectrale informatie toe te voegen. Het reflectiespectrum van het object is opgenomen in de scherpgestelde datacube. Zoals eerder vermeld in vergelijking 2.2, moet dit spectrum nog gecorrigeerd worden met het spectrum van de lichtbron. Op die manier wordt een natuurgetrouw reflectiespectrum verkregen dat onafhankelijk is van de gebruikte lichtbron.

In deze masterproef wordt een vereenvoudiging toegepast waarbij aangenomen wordt dat het object uniform is. Dit is een eerste versie van de hyperspectrale 3D-scanner. Daarom wordt

slechts één pixel van het object geselecteerd, op voorwaarde dat deze goed belicht is en zich niet op een zwart vierkant van het geprojecteerde dambordpatroon bevindt. Hetzelfde principe geldt voor de witte referentie: de beamer projecteert op een witte referentietegel, en uit deze projectie wordt het spectrum van één geschikte pixel geëxtraheerd.

Het is echter veiliger om het spectrum over meerdere pixels uit te middelen in plaats van slechts één pixel te gebruiken, om zo ruis en meetfouten te verminderen en een betrouwbaardere representatie van het object te verkrijgen.

Door het gemeten reflectiespectrum van het object te delen door dat van de witte referentie, wordt een genormaliseerd reflectiespectrum verkregen. Dit spectrum kan vervolgens aan het 3D-model worden toegewezen in Mitsuba 3.

# 5

## Resultaten

Nu de benodigde hardware en software voor de hyperspectrale 3D-scanner zijn toegelicht, worden in dit hoofdstuk de uitgevoerde metingen en bijbehorende resultaten besproken. Per meting wordt uitgelegd waarom deze uitgevoerd wordt, wat de verwachte resultaten zijn en in hoeverre de verwachtingen worden ingelost.

### 5.1 Meten van diepte

Eerst en vooral is het van belang dat het meten van diepte nauwkeurig verloopt. Daarom is het belangrijk om het resultaat, een dieptemap, correct te kunnen interpreteren.

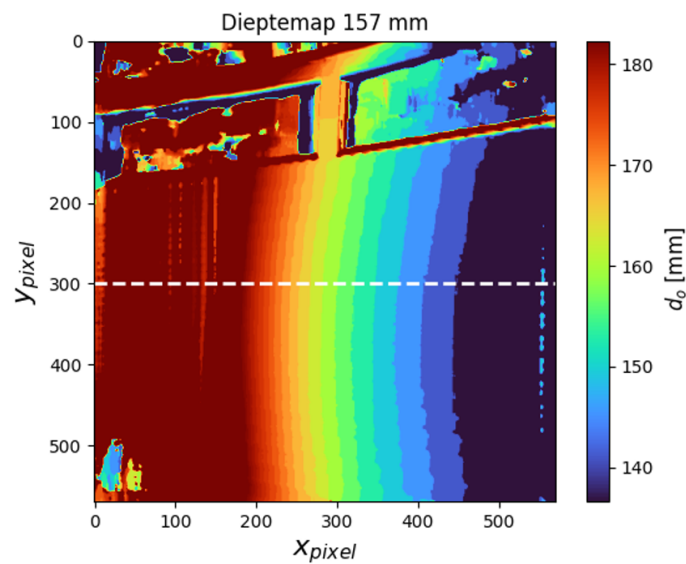
Zoals reeds eerder vermeld wordt op een dieptemap de gemeten diepte per pixel weergegeven aan de hand van een kleur. Deze kleur is gelinkt aan de exportafstand die het dichtst bij de gemeten beeldafstand ligt. Afhankelijk van welke exportafstand dit is, krijgt de pixel een index en deze index is gelinkt aan een bepaalde kleur.

In de dieptemap, te zien in Figuur 5.1, krijgen pixels met een kleinere diepte een blauwe kleur, terwijl pixels met een grotere diepte een kleurverloop van groen over geel en oranje naar rood vertonen. Deze dieptemap is gebaseerd op een foto van een vlak met een kijkhoek van  $45^\circ$  ten opzichte van de normaal van dat vlak, met daarop een vierkant dambordpatroon. De kleurcodering maakt de diepteverdeling eenvoudig te interpreteren.

Normaal gesproken zouden de kleurvlakken op de dieptemap rechthoekig moeten zijn, maar er is telkens een gebogen lijn te zien. Dit is een terugkerend fenomeen. De witte stippellijn geeft de pixels weer waarop Figuur 5.3 is gebaseerd.

Verder duidt het linkse, donkerrode gebied op de dieptemap erop dat de camera daar buiten zijn meetbereik komt. Dit zijn onbruikbare meetgegevens, omdat de camera buiten deze grenzen onbetrouwbaar is. Het onscherpe dambordpatroon op Figuur 5.2 is een aanwijzing van dit probleem.

Aan de rechterkant, bij grote x-waarden, is een donkerblauw gebied te zien. Dit wijst op afstanden die te klein zijn om gemeten te worden. In deze opstelling betreft dit objectafstanden korter dan 136 mm.

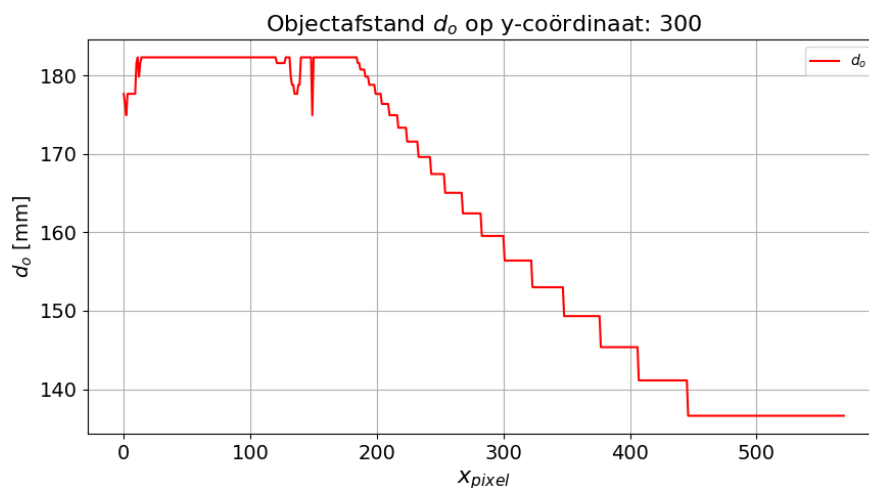


**Figuur 5.1:** Dieptemap bij vierkant dambordpatroon -  $d_o$  157 mm ( $45^\circ$ )



**Figuur 5.2:** Scherpgesteld beeld bij vierkant dambordpatroon -  $d_o$  157 mm ( $45^\circ$ )

Het algoritme genereert vervolgens afstandsprofielen door de beeldafstand voor een specifieke  $y$ -coördinaat over alle  $x$ -coördinaten te plotten. Dit profiel kan daarna worden omgezet naar objectafstanden met behulp van de dunne-lensvergelijking, wat inzicht biedt in de diepte-informatie en het reliëf van het gemeten oppervlak. Dit verloop is te zien in Figuur 5.3, waar de objectafstand wordt weergegeven voor een constante  $y$ -coördinaat van 300. Hieruit blijkt dat de objectafstand stapsgewijs wijzigt, als gevolg van het beperkte aantal exportafstanden. Verder is het opmerkelijk dat bij grotere objectafstanden de afstandstappen frequenter voorkomen. Dit komt doordat bij grotere  $d_o$  het deel van de plaat dat door één pixel wordt beslagen, ook groter is. Hierdoor resulteert een kleine pixelverschuiving (een kleine verandering in de  $x$ -waarde) in een relatief grote verandering in de gemeten diepte. Dit verklaart waarom er sneller een sprong naar een volgende exportafstand optreedt. Samenvattend kan men stellen dat bij een grotere  $d_o$  elke pixelstap een groter diepteverschil meet.



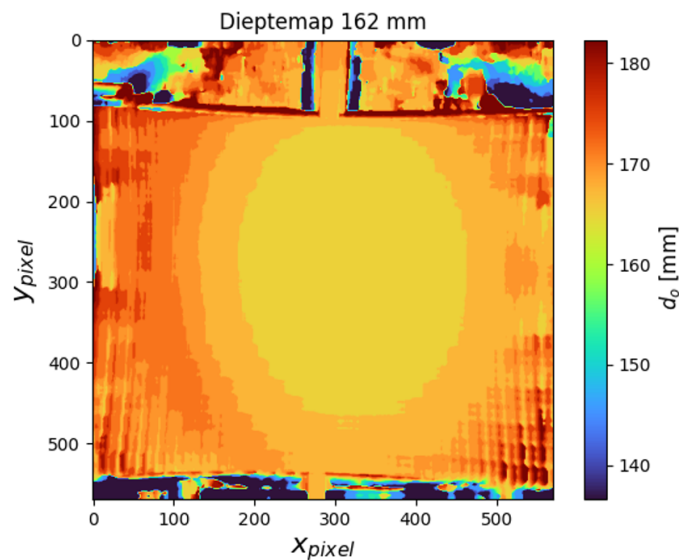
**Figuur 5.3:** Verloop objectafstand bij constante  $y$ -coördinaat

## 5.2 Evaluatie dieptenauwkeurigheid

Nu duidelijk is hoe de verkregen diepte-informatie geïnterpreteerd moet worden, kan worden overgegaan tot de eerste "echte" meting. Met deze metingen wordt gepoogd een eerste inzicht te verkrijgen in de nauwkeurigheid van de dieptemetingen. Daarnaast wordt ook onderzocht of er een verschil is tussen de gemeten diepte bij een cirkelvormig en een vierkant dambordpatroon. Het patroon wordt geprint op papier en vervolgens bevestigd op een plaat die op een zekere afstand van de camera wordt geplaatst. Dit dambordpatroon is cruciaal voor de dieptemetingen, omdat het zorgt voor voldoende contrast tussen de verschillende pixels.

Het algoritme is ontworpen om deze contrastinformatie te extraheren en te analyseren. Bij deze metingen wordt de camera op een afstand van 10 cm van de lens geplaatst.

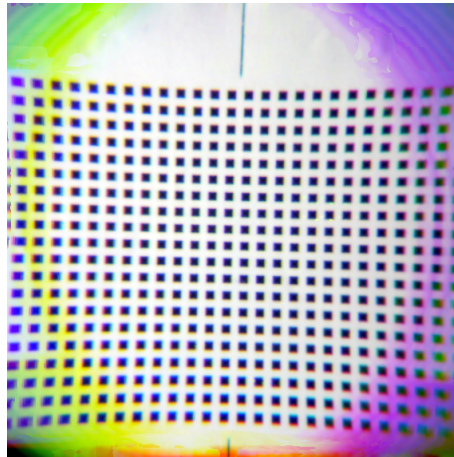
Daarnaast wordt deze meting uitgevoerd om een inzicht te krijgen in de grootte van het bruikbare gebied van de afbeelding. Bij een meting op een objectafstand van 162 mm en een kijkhoek van  $0^\circ$ , is te zien dat een gelijke diepte gemeten wordt in een ellipsvormig gebied (Figuur 5.4). Uit deze ellipsvorm kan geconcludeerd worden dat de dieptenauwkeurigheid in de x- en y-richting niet gelijk is.



**Figuur 5.4:** Dieptemap bij vierkant dambordpatroon -  $d_o$  162 mm

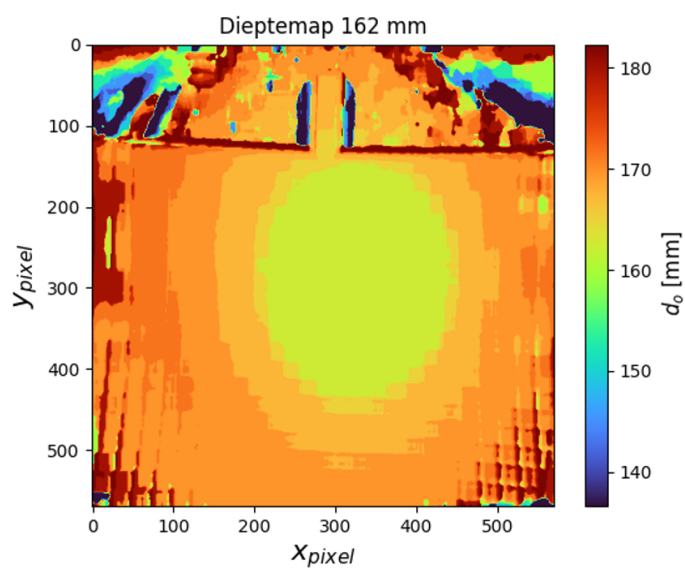
De objectafstand van 162 mm is manueel ingesteld, terwijl de gemeten objectafstand een theoretische waarde is die wordt afgeleid uit de dunne-lensvergelijking. Deze vergelijking biedt een theoretische benadering van de werkelijkheid. De gemeten objectafstand in het midden van het beeld is 165,03 mm. Dit betekent een afwijking van 3 mm ten opzichte van de ingestelde waarde van 162 mm.

Op de scherpgestelde afbeelding, waarop de dieptemap is gebaseerd, valt iets opmerkelijks op. In Figuur 5.5 zijn aan de randen van de afbeelding opvallende kleurvervormingen te zien. Dit verschijnsel is het gevolg van de relatief grote afstand tussen camera en lens, waardoor de camera de buitenste randen van de lens gebruikt. Dit veroorzaakt *lens distortion*, waarbij de lichtstralen die door de buitenste delen van de lens gaan minder nauwkeurig worden gefocust. Als gevolg hiervan zal bij een volgende meting de afstand tussen de camera en de lens worden verkleind. Daarnaast is op de afbeelding ook *pincushion distortion* zichtbaar: rechte lijnen worden naar binnen gekromd weergegeven, waardoor ze op de foto niet volledig recht lopen.



**Figuur 5.5:** Schergesteld beeld bij vierkant dambordpatroon -  $d_o$  162 mm

De dieptemap bij een cirkelvormig dambordpatroon met een objectafstand van 162 mm is weergegeven op Figuur 5.6. Vergelijken met de dieptemap van een vierkant patroon vertoont het cirkelvormige patroon een grilliger verloop. Daarnaast valt op dat het centrale gebied met een gelijke diepte kleiner is dan bij het vierkante patroon. In het midden meten we met het cirkelvormig patroon echter wel een diepte van 162.77 mm, met het vierkant patroon is dit 165.03 mm. Het cirkelvormig patroon lijkt hier een hogere nauwkeurigheid te behalen, maar de kleine afwijking tussen beide patronen is voor andere objectafstanden in het voordeel van het vierkant patroon. Daarom wordt er in de verdere uitwerking van de masterproef verder gewerkt met het vierkant patroon. Wat wel belangrijk is, is dat er gewerkt zal worden met een gebied van ongeveer 200x200 pixels in het midden van het beeld. Dit middenste gebied vertoont namelijk de kleinste meetfouten.



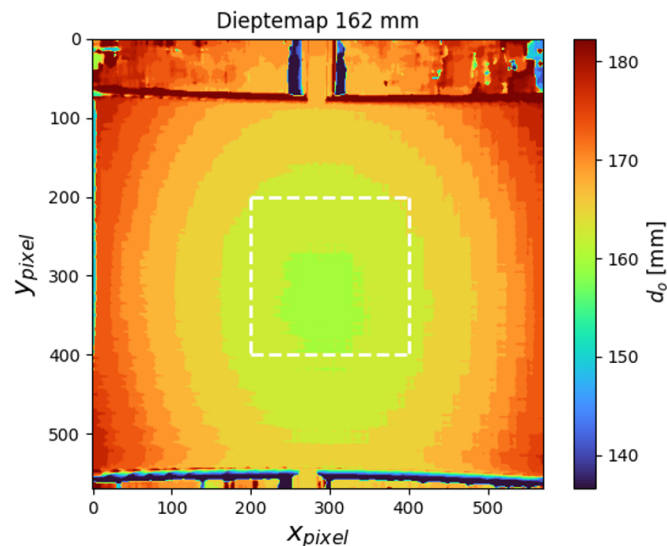
**Figuur 5.6:** Dieptemap bij cirkelvormig dambordpatroon -  $d_o$  162 mm

### 5.3 Verkleinen afstand camera-lens

Bij deze meting wordt onderzocht hoe de afstand tussen de vergrotingslens en de camera de nauwkeurigheid van dieptemetingen beïnvloedt. De oorspronkelijke afstand van ongeveer 10 cm wordt verkleind tot 1 cm. Er wordt gekozen voor 1 cm, omdat dit de minimale afstand is waarbij de camera net niet tegen de lens zit.

De hypothese is dat de meetnauwkeurigheid van de diepte zal toenemen, aangezien de randen van de lens minder gebruikt worden. Dit komt doordat beelddistortie voornamelijk het gevolg is van afwijkingen in de bolvorm van de lens aan de randen: hoe dichterbij het optisch centrum van de lens, hoe kleiner deze afwijkingen en dus hoe nauwkeuriger de beeldvorming. Om na te gaan of deze hypothese klopt, worden de resultaten van de huidige meting vergeleken met die van de vorige. De dieptemap van deze meting is te zien in Figuur 5.7. Uit de vergelijking blijkt dat de gemeten diepte in het midden van het beeld nu 162,41 mm bedraagt, terwijl dit bij de vorige meting 165,03 mm was. De gemiddelde gemeten diepte in het centrale gebied (witte stippellijn) is 161,41 mm, tegenover 165,04 mm in de vorige meting.

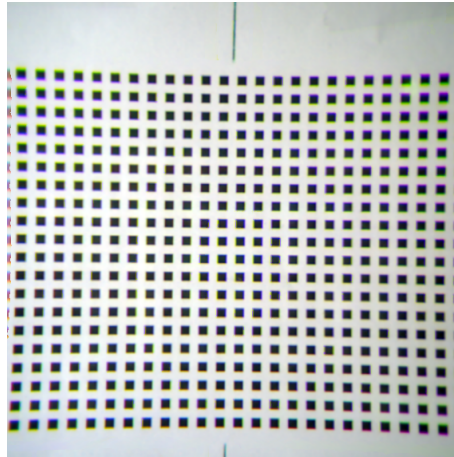
Naast de verbeterde nauwkeurigheid valt op dat de verdeling van de diepte-informatie over het beeld nu uniformer is. Deze uniforme kleurverdeling op de dieptemap betekent dat de gemeten diepte symmetrisch verdeeld is ten opzichte van een verticale as door het midden van de afbeelding. Dit houdt in dat het linker- en rechterdeel van de dieptemap nagenoeg elkaars spiegelbeeld vormen. Deze symmetrie wijst op een consistente en evenwichtige dieptemeting over het volledige beeldvlak. Daarnaast zijn de overgangen tussen verschillende dieptes veel minder grillig, wat bijdraagt aan een betrouwbaarder resultaat.



**Figuur 5.7:** Dieptemap bij vierkant dambordpatroon - camera dichterbij lens -  $d_o$  162 mm

Ondanks dat de camera dichterbij de lens werd geplaatst, blijft de ellipsvorm van het dieptebereik zichtbaar. Toch wegen de voordelen van de uniforme verdeling van de gemeten dieptes en de verhoogde nauwkeurigheid zwaarder door, waardoor deze configuratie de voorkeur krijgt.

In Figuur 5.8 is te zien dat de vreemde kleuren aan de randen van het beeld verdwenen zijn.



**Figuur 5.8:** Scherpgesteld beeld bij vierkant dambordpatroon - camera dichterbij lens -  $d_o$  162 mm

## 5.4 Uitsluiten golflengtebanden

Om de ellipsvorm die zichtbaar is op de dieptemap te verwijderen, wordt er een poging ondernomen om de meetresultaten te optimaliseren. De dieptemetingen tonen namelijk aan dat er slechts een beperkt aantal pixels nauwkeurige meetresultaten oplevert. Om dit nuttige oppervlak te vergroten, is besloten om een aantal golflengtebanden uit te sluiten. Dit wordt gedaan met als doel de dieptemap te vervormen van een ellipsvorm naar een meer rechthoekige of vierkante vorm. De resultaten in deze sectie zijn gebaseerd op het gebruik van een papieren dambordpatroon.

De ellipsvorm toont namelijk aan dat de nauwkeurigheid in de  $x$ - en  $y$ -richting verschillend is. Een mogelijke verklaring hiervoor is de opbouw van de camera, die 6 rijen van 11 filters bevat, wat resulteert in een rechthoekige verdeling van 66 filters. Door het uitsluiten van bepaalde golflengtebanden ontstaat er een meer gebalanceerde verdeling, waarbij we een vierkant van 6 rijen en 6 kolommen verkrijgen.

De verdeling van de golflengtebanden per filter is te zien op Figuur 5.9, waarbij het vierkant van  $6 \times 6$  in het rood is gemarkeerd. Men kan nog verder gaan, zoals naar een vierkant van  $5 \times 5$  (groen) of  $4 \times 4$  (blauw), maar het is belangrijk om een correcte afweging te maken tussen het verwijderen van (mogelijk) waardevolle informatie en het proberen verkrijgen van gelijke nauwkeurigheid in beide dimensies.

÷	0 ÷	1 ÷	2 ÷	3 ÷	4 ÷	5 ÷	6 ÷	7 ÷	8 ÷	9 ÷	10 ÷
0	351	359	370	381	390	401	410	420	431	440	450
1	461	470	479	491	501	509	520	530	540	550	559
2	570	581	590	600	611	621	630	638	649	661	671
3	681	691	699	711	722	732	741	749	759	769	780
4	791	801	812	819	829	841	849	860	869	880	888
5	898	912	920	930	938	951	960	969	981	989	1001

**Figuur 5.9:** Verdeling golflengtebanden per spectrale filter

Het uitsluiten van golflengtebanden in de software gebeurt op een eenvoudige manier door specifieke golflengtebereiken in de datacube gelijk te stellen aan nul. Dit wordt gedaan door een functie die door een lijst van golflengtebereiken itereert en de gekozen waarden uitsluit. Hierdoor wordt de informatie binnen deze golflengtebanden genegeerd.

Het algoritme levert een datacube-array op met de dimensies (21,570,570,164). Hierin staat 21 voor het aantal exportafstanden, 570x570 voor de afmetingen van de afbeelding en 164 voor het aantal golflengtebanden. Elke datacube in deze array bevat een hyperspectraal beeld voor een specifieke afstand.

Dit houdt in dat per afbeelding de golflengten in 21 datacubes moeten worden uitgesloten. De datacubes binnen deze array hebben dus de volgende dimensies:

$$(x, y, \lambda) = (570, 570, 164)$$

Aangezien de camera zelf 66 filters heeft, moet er rekening worden gehouden met de conversie van 66 naar 164 golflengtebanden. Bijvoorbeeld, wanneer de 9de (index 8) tot en met de 13de (index 12) golflengteband moeten worden verwijderd, worden de linker- en rechtergrens van het te verwijderen bereik als volgt berekend:

$$\frac{\text{index} \times 164}{66}$$

In dit geval geldt:

$$\frac{8 \times 164}{66} = 19,87 \approx 20 \quad \text{en} \quad \frac{12 \times 164}{66} = 29,81 \approx 30$$

Het is echter belangrijk om gehele getallen te specificeren, aangezien het hier om indices gaat. Daarom wordt er afgerond, waardoor de golflengtebanden 20 tot en met 30 worden toegevoegd aan de lijst van "uit te sluiten golflengtebanden". Deze afronding zorgt ervoor dat het resultaat niet exact overeenkomt met de vierkanten die in Figuur 5.9 zijn aangeduid. Door metingen uit te voeren bij verschillende objectafstanden en uitgesloten golflengtebanden, zijn de resultaten uit Tabel 5.1 verkregen.

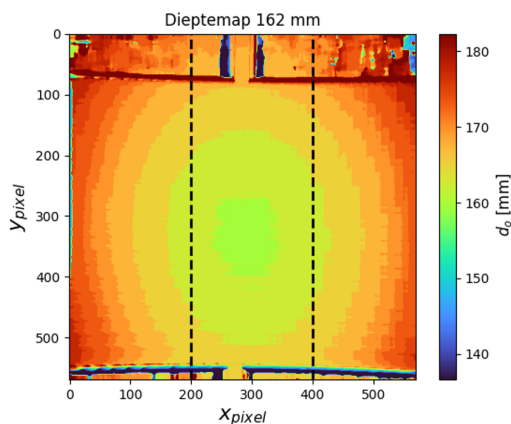
**Tabel 5.1** Absolute en standaardafwijking voor verschillende golflengtebanden en objectafstanden

$d_o$ [mm]	Filterselectie	Absolute afwijking [mm]	Standaardafwijking [mm]
167	6x11	3,39	1,01
	6x6	2,59	0,73
	5x5	2,27	0,98
	4x4	2,49	0,82
162	6x11	0,78	1,71
	6x6	0,25	1,51
	5x5	0,18	1,37
	4x4	0,19	1,38
157	6x11	5,48	0,41
	6x6	3,92	1,44
	5x5	4,12	1,43
	4x4	4,30	1,40

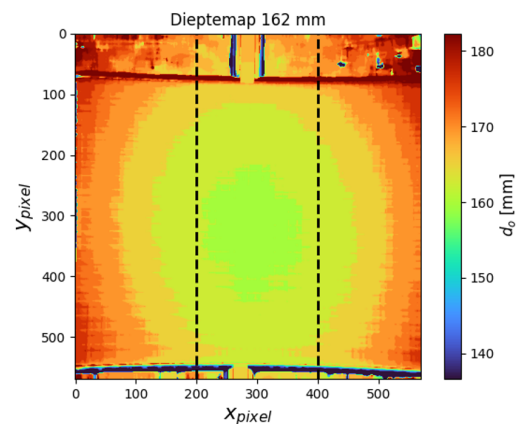
Op basis van deze resultaten kan men concluderen dat het uitsluiten van bepaalde golflengtebanden een gunstig effect kan hebben op de nauwkeurigheid van de dieptemeting. Voor alle drie de objectafstanden leidt het beperken van het volledige 6x11-bereik naar kleinere vierkante selecties (zoals 6x6, 5x5 en 4x4) tot een afname van de absolute afwijking ten opzichte van de ingestelde objectafstand. Deze waarde is dus de absolute waarde van het verschil tussen de gemiddeld gemeten diepte binnen het bereik  $x, y \in [200, 400]$  en de ingestelde objectafstand. Ook de standaardafwijking, die de spreiding van de dieptemetingen binnen dat gebied weergeeft, daalt in de meeste gevallen bij kleinere selecties. Dit wijst op een meer uniforme diepte-schatting.

Bij een vergelijking van de dieptemap is er een (beperkte) verbreding van het "nuttig" oppervlak zichtbaar wanneer golflengtebanden worden uitgesloten, zoals te zien is op Figuur 5.10 en 5.11. De zwarte stippellijnen bij x-coördinaat 200 en 400 maken het eenvoudiger om in te zien of er een verbreding plaatsvindt. Deze verbreding zorgt er echter niet voor dat de nauwkeurigheid in x- en y-richting gelijk wordt. Desondanks zorgt het wel voor betere resultaten.

Het is belangrijk om hier voorzichtig mee om te gaan: afhankelijk van welke golflengtebanden worden uitgesloten en van de aard van het object, kan waardevolle informatie verloren gaan. Toch biedt deze aanpak een interessant inzicht en vormt ze een eenvoudige manier om golflengten die mogelijk irrelevant zijn voor bepaalde metingen te elimineren. Bovendien is dit ook een manier om overbodige data uit te sluiten, waardoor de benodigde verwerkingstijd voor volgende stappen wordt gereduceerd.



**Figuur 5.10:** Dieptemap 6x11 - 162 mm



**Figuur 5.11:** Dieptemap 6x6 - 162 mm

In het vervolg van de masterproef zal het uitsluiten van golflengtebanden niet meer worden toegepast om spectrale informatie niet onbedoeld te verliezen. Wanneer er echter voldoende inzicht is in de relevante golflengten van het object en de lichtbron, kan deze werkwijze wel gericht worden toegepast.

## 5.5 Vergelijking geprint en geprojecteerd dambordpatroon

In de vorige metingen werd steeds gebruikgemaakt van een halogeenlamp als lichtbron, en werd de diepte gemeten van een vlak waarop een stuk papier met een geprint dambordpatroon was aangebracht. Om dit patroon ook op willekeurige objecten te kunnen aanbrengen, moet een alternatief gezocht worden voor het fysieke patroon op papier. Daarom wordt overwogen om een beamer te gebruiken. Deze kan het dambordpatroon op elk object projecteren en dient tegelijkertijd als lichtbron.

Om na te gaan of dit een goed alternatief is, wordt het gebruik van een beamer vergeleken met het gebruik van een geprint dambordpatroon. Bij verschillende objectafstanden wordt onderzocht in welke mate de gemiddeld gemeten diepte afwijkt van de werkelijke objectafstand, en wat de bijbehorende standaardafwijking is.

Alle metingen worden uitgevoerd bij een kijkhoek van  $0^\circ$ . In een ideale situatie zouden de gemeten dieptes overal overeenkomen met de ingestelde objectafstand en zou de standaardafwijking nul zijn.

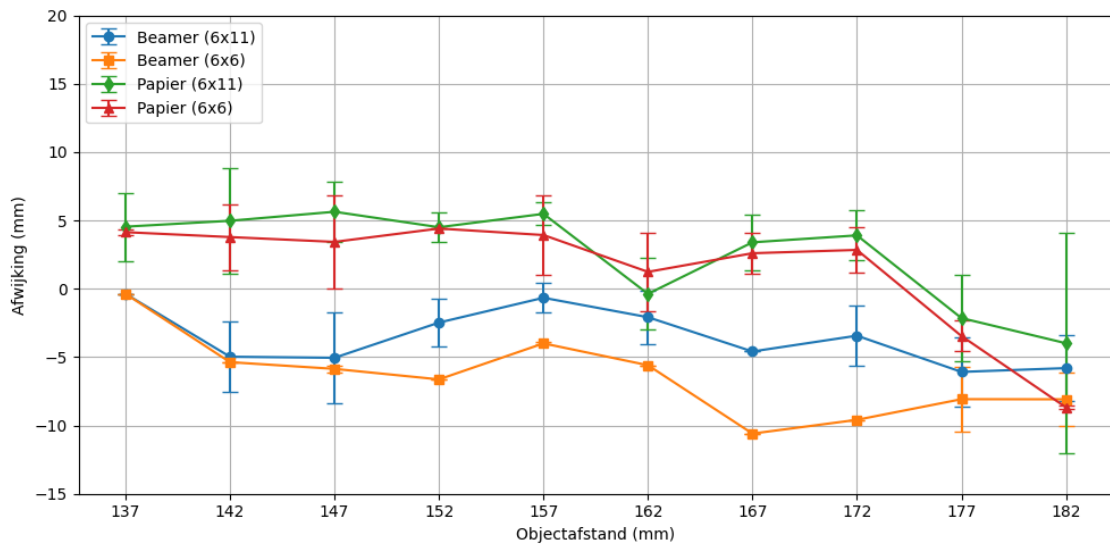
### 5.5.1 Impact van spectrale filtering en projectietechniek op meetfout

Om de nauwkeurigheid en precisie van beide methoden te evalueren, zijn metingen verricht bij verschillende objectafstanden. De resultaten zijn gebaseerd op een centraal meetgebied van  $200 \times 200$  pixels binnen een beeld van  $570 \times 570$  pixels. Dit gebied is zorgvuldig gekozen, aangezien het object dat in deze masterproef wordt gebruikt de uiterste y-coördinaten niet

inneemt. Bovendien is uit eerder besproken metingen gebleken dat betrouwbare meetresultaten zich in het midden van het beeld bevinden. Naarmate de x- en y-coördinaat verder van het midden afwijken, neemt de meetfout toe.

Voor een grondige evaluatie is nagenoeg het volledige meetbereik in de diepte gebruikt. Metingen zijn uitgevoerd bij objectafstanden van 137 mm tot 182 mm, met telkens een stap van 5 mm. Tevens is er onderscheid gemaakt tussen het al dan niet uitsluiten van bepaalde golflengtebanden. De uitgesloten golflengten, die samen een 6x6 vierkant van spectrale filters vormen, zijn deze die vermeld zijn in Figuur 5.9. Wanneer geen golflengten worden uitgesloten, worden alle 66 (6x11) spectrale filters gebruikt.

De resultaten zijn weergegeven in Figuur 5.12. Deze figuur toont de afwijking van de gemiddeld gemeten diepte ten opzichte van de theoretische objectafstand voor verschillende meetmethoden en objectafstanden. De afwijkingen kunnen zowel positief als negatief zijn, wat de mate en richting van de meetfout aangeeft.



**Figuur 5.12:** Afwijking per meetmethode en objectafstand

Bij elk meetpunt is ook de standaardafwijking weergegeven in de vorm van foutbalken. Deze foutbalken tonen het interval van twee keer de standaardafwijking naar boven en naar beneden, wat - onder de aanname van een normale verdeling - overeenkomt met een betrouwbaarheidsinterval van ongeveer 95%. Met andere woorden: de kans is ongeveer 95% dat een individuele meting binnen dit bereik valt. Dit geeft een visuele indicatie van zowel de nauwkeurigheid (hoe dicht de metingen bij de werkelijke waarde liggen) als de betrouwbaarheid (hoe consistent de metingen zijn). Aan de hand van de legende kan men aflezen welke curve overeenkomt met welke combinatie van projectiemethode en filterselectie.

Uit de analyse van Figuur 5.12 blijkt een opvallend patroon: bij gebruik van een beamer wordt typisch een te korte objectafstand gemeten, wat resulteert in negatieve afwijkingen. Daarentegen wordt bij gebruik van een geprint dambordpatroon op papier meestal een te grote

objectafstand gemeten, met positieve afwijkingen tot gevolg. Het uitsluiten van golflengtebanden bij het gebruik van een beamer heeft een negatieve invloed op de nauwkeurigheid van de metingen. Hierdoor krijgt het uitsluiten van golflengtebanden niet de voorkeur boven de 6x11-methode bij de beamer.

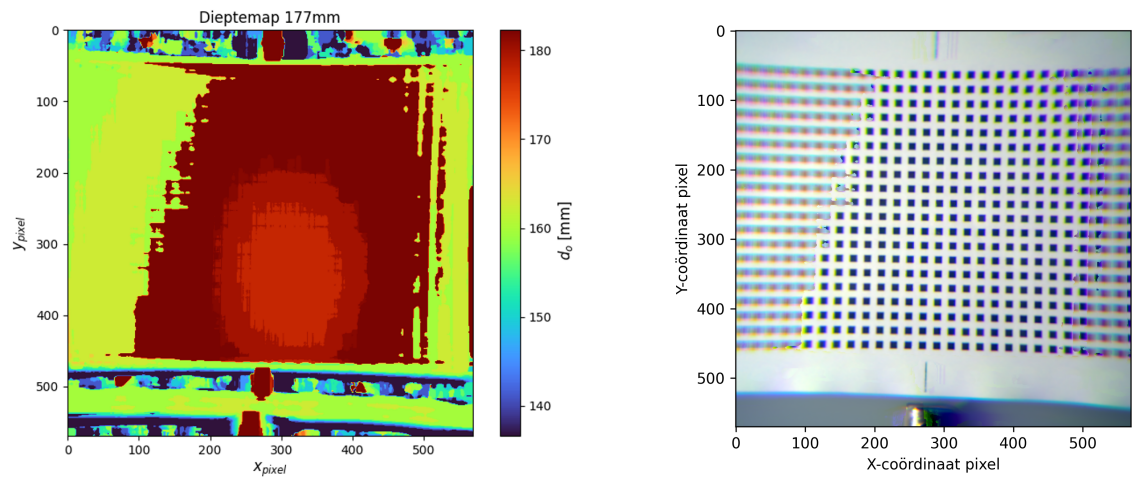
De standaardafwijking is een maat voor de spreiding van de metingen en geeft aan hoe consistent de meetresultaten zijn. Aangezien het testoppervlak loodrecht op de kijkrichting van de camera staat (kijkhoek van  $0^\circ$ ), zou de standaardafwijking idealiter 0 mm moeten zijn. In de praktijk worden echter variaties waargenomen. Opvallend is dat de standaardafwijking bij de 6x6-methode, bij gebruik van een beamer, uitzonderlijk laag is.

Hoewel een geprint dambord op papier nog steeds de voorkeur heeft voor maximale nauwkeurigheid, tonen de resultaten aan dat de beamer een praktisch en bruikbaar alternatief kan zijn. Dit geldt vooral wanneer een flexibele en dynamische projectiemethode gewenst is. Het gebruik van de beamer biedt aanzienlijke voordelen bij het inzetten van de camera als 3D-scanner, doordat het mogelijk wordt om het dambordpatroon direct op het object te projecteren. Ondanks dat bij de beamer de afwijkingen voornamelijk negatief zijn (te korte objectafstand), zijn deze afwijkingen wel consistent. Evenzo zijn de afwijkingen bij het geprinte dambordpatroon zo goed als altijd positief (te grote objectafstand). Gezien deze consistentie en de praktische voordelen kan de beamer dan ook beschouwd worden als een goed alternatief voor het geprinte dambordpatroon.

### 5.5.2 Grenzen meetbereik

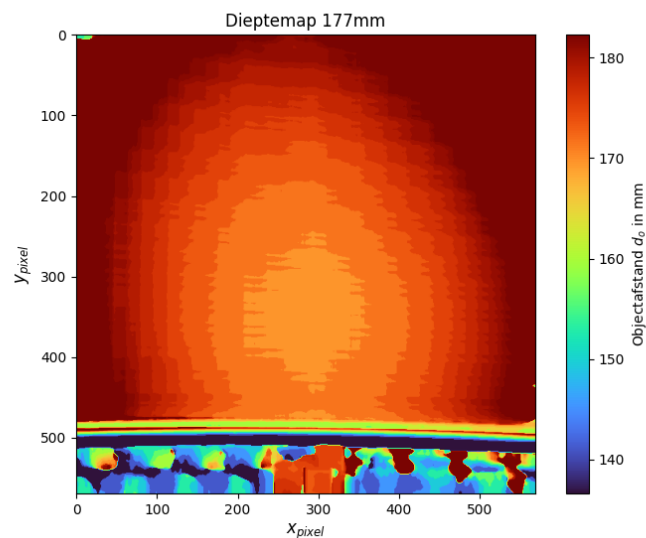
Een bijkomende reden om op zoek te gaan naar een alternatief voor het geprinte dambordpatroon op papier, komt voort uit de analyse van dieptemetingen bij objectafstanden die zich dicht bij de grenzen van het meetbereik bevinden. Bij metingen op afstanden van bijvoorbeeld 177 mm wordt duidelijk dat de camera de limieten van haar meetbereik nadert. Dit heeft als gevolg dat de nauwkeurigheid en betrouwbaarheid van de metingen afnemen. In Figuur 5.13 is de dieptemap weergegeven bij een objectafstand van 177 mm, wat dit fenomeen illustreert. Normaal gezien zou de dieptemap geen grote sprongen in diepte mogen vertonen, aangezien de kijkhoek  $0^\circ$  is. In een ideale situatie zou de gemeten diepte over het hele vlak dus ongeveer gelijk moeten zijn, met waarden rond de ingestelde objectafstand van 177 mm. In de praktijk blijkt echter dat bepaalde pixels aan de linker- en rechterkant van de dieptemap veel kleinere afstanden weergeven, wat duidelijk onrealistisch is. Op het scherpgesteld beeld van Figuur 5.13 komt dit overeen met de zones waar het dambordpatroon onscherp wordt weergegeven. Een gelijkaardig fenomeen wordt waargenomen bij objectafstanden die zich dicht bij de ondergrens van het meetbereik bevinden.

Deze observaties onderstrepen het belang van het gebruik van een centraal meetgebied en het afstemmen van de analyseparameters op dit gebied. Op die manier kunnen de verschillende meetresultaten op een consistente manier met elkaar vergeleken worden. Bijgevolg is het ook belangrijk dat het object dat gereconstrueerd moet worden, ongeveer dit binnenste gebied zal innemen.



**Figuur 5.13:** Dieptemap en scherpgesteld beeld bij geprint dambordpatroon -  $d_o$  177 mm ( $0^\circ$ )

Bij het gebruik van een beamer doen deze problemen zich niet voor. Het meetbereik van de camera gaat namelijk tot 188 mm diepte en het vlak bevindt zich in werkelijkheid op geen enkel punt verder dan deze afstand. Theoretisch zou de camera dan ook geen moeite mogen hebben om deze diepte correct te meten.



**Figuur 5.14:** Dieptemap bij geprojecteerd dambordpatroon -  $d_o$  177 mm

In tegenstelling tot de metingen met het geprinte dambordpatroon, vertonen de metingen met de beamer geen abrupte dieptesprongen of onrealistisch kleine waarden. Op de dieptemap, zoals weergegeven in Figuur 5.14, zijn deze onnauwkeurigheden niet langer aanwezig. De meting levert een veel consistentere en realistischere dieptebeeld op, zonder onnatuurlijke afwijkingen aan de randen.

De waargenomen verschillen tussen het gebruik van een geprint dambordpatroon en een geprojecteerd dambordpatroon kunnen vermoedelijk verklaard worden door het verschil in belichtingsuniformiteit. Bij gebruik van een halogeenlamp is de belichting namelijk het sterkst in het centrum van het vlak, terwijl de randen merkbaar minder verlicht worden. Dit resulteert in een minder helder en vaak onscherp dambordpatroon aan de randen van het papier, wat de nauwkeurigheid van dieptemetingstechnieken beïnvloedt, aangezien deze sterk afhankelijk zijn van helderheid en contrast.

Dit effect wordt versterkt wanneer de objectafstand zich dicht bij de grenzen van het meetbereik bevindt, waar de nauwkeurigheid van de camera sowieso al afneemt. Bijkomende factoren, zoals suboptimale belichting of wazige texturen, kunnen dan sneller leiden tot foutieve metingen.

Bij gebruik van een beamer treedt dit probleem niet op, aangezien het geprojecteerde patroon met een veel gelijkmatigere lichtintensiteit over het gehele vlak wordt weergegeven. Hierdoor blijven de details van het patroon overal goed zichtbaar, wat de camera in staat stelt om op consistente wijze diepte-informatie te extraheren, zelfs aan de randen van het beeld.

Dit vormt dan ook een belangrijke motivatie om over te stappen op het gebruik van een beamer als projectiemethode in plaats van een geprint patroon op papier.

## **5.6 Realiseren van een RGB-3D-scanner**

### **5.6.1 Gekozen object**

De keuze van het te reconstrueren object speelt een belangrijke rol. Er is gekozen voor een wit, symmetrisch object met een relatief matte afwerking. Om binnen deze masterproef de volledige workflow richting een hyperspectrale 3D-scanner uit te werken, worden alle volgende stappen telkens uitgevoerd op ditzelfde object.

Het object moet zo gepositioneerd worden dat het voornamelijk de middelste pixels van het beeld inneemt. Zoals eerder aangetoond, leveren deze pixels de meest betrouwbare metingen op, omdat ze minder gevoelig zijn voor onnauwkeurigheden dan de pixels aan de randen van het beeld. De keuze voor een mat object is vrij logisch. Het gebruik van een glanzend object zou de resultaten negatief beïnvloeden, omdat het bereik van de lichtintensiteit dan te groot zou zijn, waardoor niet alle pixels een voldoende hoge signaal-ruisverhouding (SNR) krijgen. Dit wordt verder besproken in paragraaf 5.6.2.2. Een afbeelding van het gekozen object is te zien in Figuur 5.15. Het betreft een cilindrisch object met een maximale diameter van 50 mm.

Daarnaast is het belangrijk te vermelden dat de grootte van de objecten die met deze 3D-scanner gereconstrueerd kunnen worden, beperkt wordt door het dieptebereik van de camera. Dit bereik ligt tussen de 136 mm en 188 mm, wat betekent dat er slechts een diepte van maximaal 5 cm gemeten kan worden. Deze beperking beïnvloedt de keuze van het object, aangezien grotere objecten buiten dit bereik vallen. Het object in kwestie, met een maximale

diameter van 50 mm, valt echter binnen het bereik en veroorzaakt geen problemen voor de metingen.



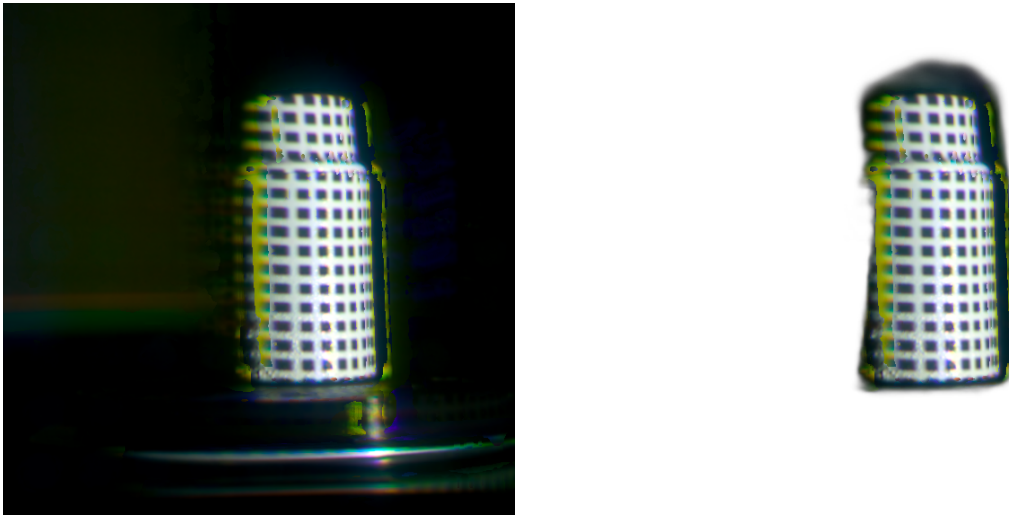
**Figuur 5.15:** Aanzichten object

De reconstructie zal worden uitgevoerd aan de hand van een variabel aantal foto's. Afhankelijk van de resultaten wordt bepaald hoeveel foto's nodig zijn voor een goede reconstructie van dit object.

### 5.6.2 Analyse van algoritme voor achtergrondverwijdering

De in sectie 4.3.1 besproken methoden voor het verwijderen van de achtergrond lijken op het eerste gezicht alle drie goede methoden te zijn. Er zijn echter problemen ondervonden met de implementatie van de eerste methode, namelijk de REMBG-methode. Er deden zich problemen voor met de *dependencies* van het pakket, met name door incompatibiliteit van de Python-versie. Het REMBG-pakket vereist Python 3.13 of hoger, terwijl de rest van de code is geschreven voor Python 3.9. Deze versie-incompatibiliteit leidde tot technische moeilijkheden. Om dit probleem op te lossen, werd een *virtual environment* aangemaakt met Python 3.13, zodat het pakket alsnog binnen de bestaande projectstructuur kon functioneren. Ondanks de voordelen van het pakket kunnen deze technische problemen ervoor zorgen dat het niet altijd de meest ideale oplossing is, vooral voor projecten zoals deze die met oudere Python-versies werken. De onderstaande resultaten tonen aan dat er nog steeds enige ruis aanwezig is, maar dat de resultaten veelbelovend zijn. Figuur 5.16 toont de foto voor en na de achtergrondverwijdering.

Hoewel het REMBG-pakket eenvoudig te gebruiken is en nuttige resultaten kan opleveren, is voorzichtigheid geboden vanwege de ondervonden technische problemen en compatibiliteitskwesties, in het bijzonder bij gebruik van Python-versies ouder dan 3.13.

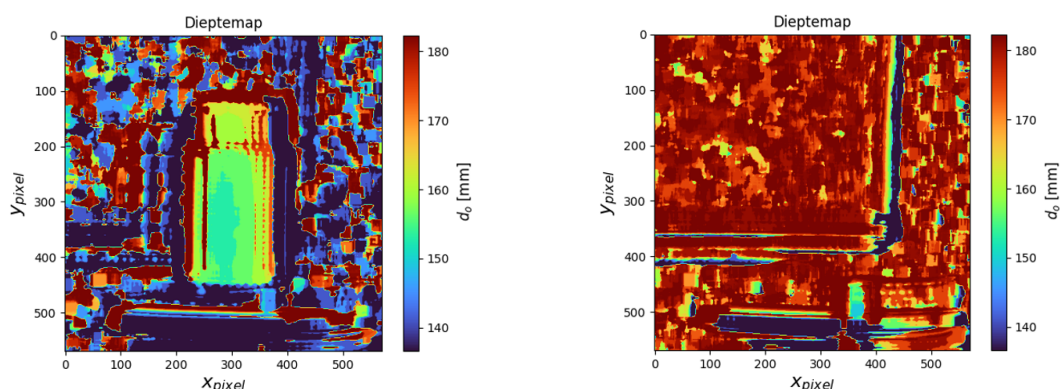


**Figuur 5.16:** Achtergrondverwijdering met REMBG-pakket

Gezien de nog aanwezige ruis bij de REMBG-methode en de technische moeilijkheden, wordt een alternatieve benadering onderzocht. Deze tweede methode maakt gebruik van één foto met het object en één foto zonder het object.

Deze methode veronderstelt dat de camera in staat is om de achtergrond consistent vast te leggen, zowel wanneer het object aanwezig is als wanneer het object afwezig is. Dit blijkt echter niet het geval. De camera heeft moeite om de diepte van de achtergrond nauwkeurig te meten, onder andere omdat de achtergrond zich verder dan 188 mm bevindt. Een tweede reden is dat de achtergrond meer belicht wordt wanneer het object niet aanwezig is. Figuur 5.17, waarop de dieptemap van de foto's met en zonder object wordt getoond, illustreert de inconsistentie van de dieptemeting.

Kortom, hoewel deze methode eenvoudig is, blijkt het niet de juiste oplossing voor het verwijderen van de achtergrond.

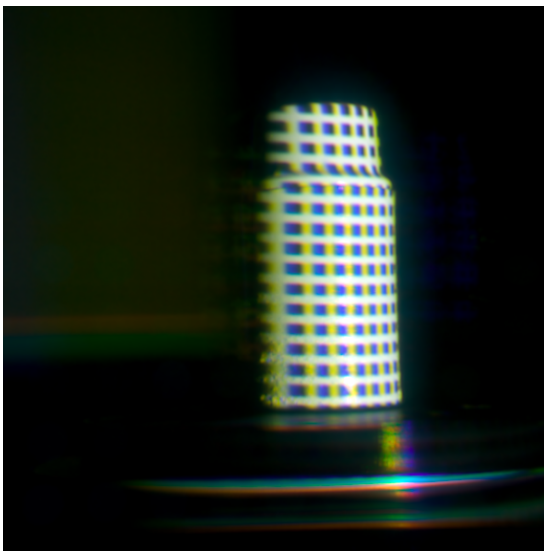


**Figuur 5.17:** Dieptemap met en zonder object

Aangezien de vorige methoden voor achtergrondverwijdering niet het gewenste resultaat

opleverden — door technische beperkingen of inconsistente dieptemetingen — werd een derde aanpak onderzocht: het scheiden van object en achtergrond op basis van het HSV-kleurmodel. Deze methode maakt gebruik van het feit dat het verlichte object een duidelijk contrast vertoont met de donkere achtergrond. Het resultaat wordt weergegeven in Figuur 5.18. Deze aanpak is snel en efficiënt voor objecten die voldoende en gelijkmatig licht reflecteren.

De grote meerwaarde van deze methode ligt in de afwezigheid van ruis, de lage complexiteit en de eenvoudige implementatie. In het vervolg van deze masterproef wordt daarom verder gewerkt met deze methode, aangezien zij de meest robuuste resultaten oplevert.



**Figuur 5.18:** Achtergrondverwijdering op basis van helderheid

### 5.6.2.1 Robuustheid bij verschillende kleuren

Aangezien de laatstgenoemde methode verder gebruikt zal worden, is het belangrijk om de robuustheid ervan te evalueren bij objecten met een andere kleur dan wit. Witte oppervlakken reflecteren veel licht, waardoor het onderscheid tussen object en achtergrond in helderheid duidelijk zichtbaar is. Bij tests met andersgekleurde objecten bleek de methode eveneens goed te werken.

Hoewel het algoritme drempelwaarden hanteert voor alle drie de HSV-componenten, gebeurt de segmentatie in de praktijk vrijwel uitsluitend op basis van helderheidsverschillen (Value-component). Dit werd bevestigd doordat dezelfde instellingen goede resultaten opleverden bij objecten met uiteenlopende kleuren.

Omdat de metingen plaatsvinden in een donkere ruimte en het object helder wordt verlicht door een beamer, blijft de achtergrond relatief donker. Daardoor is het mogelijk om het object te isoleren zonder rekening te hoeven houden met kleurinformatie (tint en verzadiging). Donkere objecten vormen hierop een uitzondering: omdat zij minder licht reflecteren,

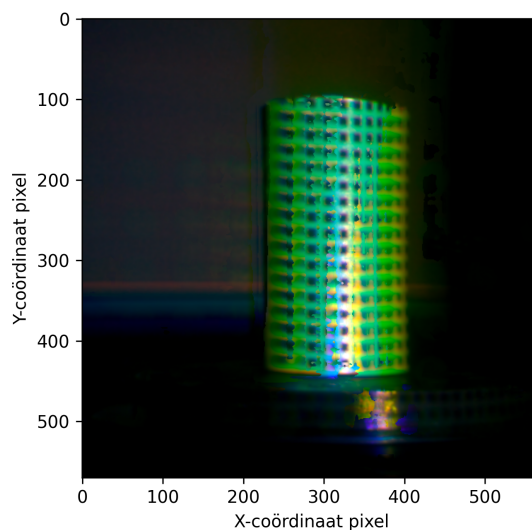
vermindert het contrast met de achtergrond, wat de nauwkeurigheid van de segmentatie negatief beïnvloedt.

Het succes van deze methode is te danken aan het feit dat helderheid een directe weerspiegeling is van de mate van verlichting. In de gecontroleerde omstandigheden van dit experiment wijst een hoge helderheidswaarde zo goed als altijd op de aanwezigheid van het object, terwijl de achtergrond consistent lagere waarden vertoont.

### 5.6.2.2 Beperking tot matte objecten

Bij het nagaan van de robuustheid van het algoritme bij objecten met verschillende kleuren, bleek het systeem moeite te hebben met glanzende oppervlakken. In dit experiment werd een witte cilinder gebruikt die bedekt was met groen bedrukt papier. De inktlaag veroorzaakte een sterke glans, wat leidde tot verzadiging in bepaalde zones van het object, met piekwaarden tot 4096 RAW counts. Op die plaatsen was de lichtinval zo intens dat de camera geen betrouwbare meetgegevens meer kon registreren.

Om verzadiging te voorkomen, moest de integratietijd van de camera aanzienlijk worden verlaagd. Hierdoor ontvingen andere delen van het object - waar geen glans optrad - veel minder licht, wat resulteerde in lage counts en een beperkte informatiedichtheid. Als gevolg daarvan werd enkel het glanzende oppervlak correct scherpgesteld, terwijl andere delen wazig of onbruikbaar bleven in de dieptedata.



**Figuur 5.19:** Scherpstellen bij glanzend object

Figuur 5.19 toont het resultaat van deze meting. De meetresultaten zijn duidelijk verstoord, wat aantoont dat het systeem niet geschikt is voor objecten met glanzende oppervlakken.

Hieruit kan worden geconcludeerd dat het algoritme enkel betrouwbare resultaten oplevert

bij matte objecten zonder glans. Matte oppervlakken zorgen voor een diffuse reflectie van het licht, wat leidt tot gelijkmatigere belichting en stabielere dieptemetingen.

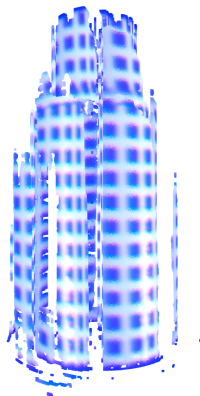
Een mogelijke oplossing voor dit probleem is het gebruik van een polarisatiefilter. Zo'n filter kan de intensiteit van gepolariseerd licht reduceren, waardoor glans wordt geminimaliseerd en de reflectie van het object gelijkmatiger wordt. Dit biedt een veelbelovende piste voor toekomstig onderzoek, aangezien het de betrouwbaarheid van zowel de segmentatie als de dieptemeting aanzienlijk kan verbeteren bij objecten met glanzende oppervlakken.

De implementatie van een dergelijk filter zou een waardevolle stap zijn in de verdere ontwikkeling van het systeem, met als doel de meetnauwkeurigheid te verhogen bij uiteenlopende reflectie-eigenschappen van het objectoppervlak.

### 5.6.3 3D-mesh

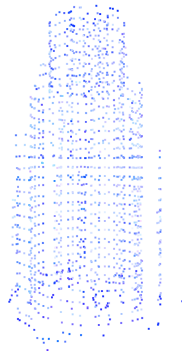
De cruciale stap in het reconstrueren van een object is het correct uitlijnen van de individuele puntwolken die per foto worden gegenereerd. Voor deze meting werd er arbitrair gekozen om zes foto's te gebruiken voor de reconstructie van het object. Tussen elke opname roteert de draaitafel telkens  $60^\circ$ .

Figuur 5.20 toont de samengestelde puntwolk, bekomen via de methode beschreven in 4.3.3. Daaruit blijkt dat het algoritme moeite heeft met het correct reconstrueren van het gebogen oppervlak van de cilinder. Dit is te wijten aan het beperkte aantal exportafstanden. Bij beschikbaarheid van meer rekenkracht zou de puntwolk verfijnd kunnen worden door extra exportafstanden toe te voegen.



**Figuur 5.20:** Gecombineerde puntwolk

Door de straal waarmee overlappende punten gecombineerd worden te vergroten, worden deze grillige vormen gedeeltelijk weggefilterd. Dit resulteert in de puntwolk weergegeven in Figuur 5.21.



**Figuur 5.21:** Gecombineerde puntwolk - grotere overlapstraal

Deze puntwolk kan vervolgens verder verwerkt worden, bijvoorbeeld tot een 3D-mesh. Dit kan uitgevoerd worden in MeshLab, met behulp van de stappen die eerder in 4.3.3 besproken werden. Op die manier wordt het ruwe resultaat van de puntwolk omgezet in een verfijnde 3D-mesh, zoals te zien in Figuur 5.22.



**Figuur 5.22:** Verfijnde 3D-mesh

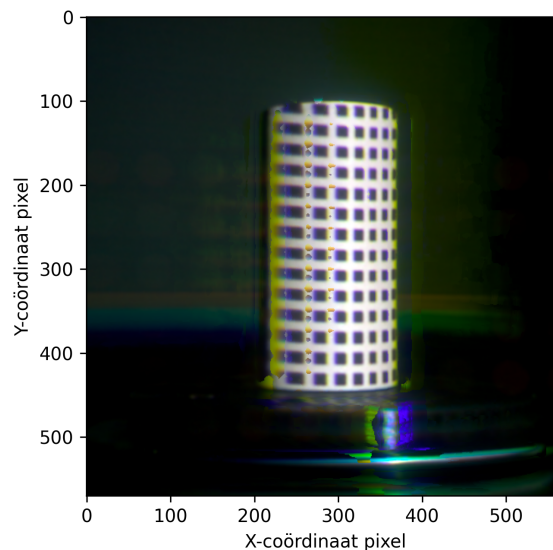
#### 5.6.4 Invloed aantal genomen foto's

Tot nu toe werd telkens een arbitrair gekozen aantal van zes foto's per 3D-reconstructie gebruikt. In de volgende metingen zal bovendien gebruikgemaakt worden van een perfect cilindervormig object (groen van kleur). Deze keuze is gebaseerd op de eenvoudige geometrie van de cilinder, waardoor een beter reconstrueerbaar 3D-model bekomen kan worden dan bij het eerder gebruikte witte object met een iets complexere vorm. Het is echter belangrijk om na te gaan in welke mate het aantal gebruikte foto's invloed heeft op de uiteindelijke kwaliteit van de reconstructie. Meer foto's leveren extra informatie vanuit verschillende kijkhoeken, wat doorgaans leidt tot een nauwkeuriger 3D-model. Tegelijkertijd resulteert dit in een grotere hoeveelheid te verwerken data, wat het reconstructieproces merkbaar vertraagt door de toegenomen verwerkingstijd.

Bij het gebruik van minder dan zes foto's bestaat het risico dat onvoldoende gegevens be-

schikbaar zijn om een coherente 3D-reconstructie te bekomen. Minder beelden betekenen minder informatie en vergroten de kans op fouten in het eindresultaat. Er moet dus een afweging worden gemaakt tussen informatiedichtheid en verwerkingssnelheid.

Tijdens de beeldverwerking valt op dat bepaalde delen van het object niet scherp worden vastgelegd. Bij een voldoende aantal foto's vormt dit geen probleem, aangezien ontbrekende informatie doorgaans in andere opnames aanwezig is. De zones die systematisch minder scherp zijn, bevinden zich aan de linkerzijde van het object. Dit wordt veroorzaakt door schaduwvorming als gevolg van de positionering van de beamer, die zich rechts van de camera bevindt. Hierdoor is de linkerzijde onvoldoende belicht, wat leidt tot een lage signaalrespons (lage RAW counts) in die regio's. In Figuur 5.23 is te zien dat het scherpstellen aan die zijde inderdaad moeizaam verloopt. Ook het algoritme voor achtergrondverwijdering ondervindt hierdoor problemen, aangezien de lage helderheid ertoe leidt dat die pixels niet als onderdeel van het object worden herkend.



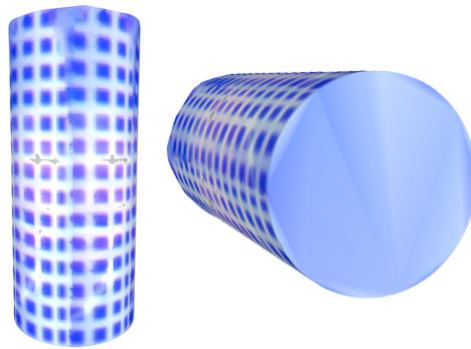
**Figuur 5.23:** Scherpgestelde foto perfecte cilinder met schaduwvorming

Bij gebruik van zes foto's resulteert dit in een 3D-model zoals weergegeven in Figuur 5.24. Hoewel het model wit lijkt, betreft het hier enkel een geometrische reconstructie; kleurinformatie wordt pas in een latere stap toegevoegd. Tijdens de verwerking werd telkens hetzelfde deel van elke puntwolk verwijderd. Zoals eerder vermeld, leidt de schaduw aan de linkerzijde tot onnauwkeurige dieptedata, waardoor het zinvol is die zones te negeren. Dankzij de beschikbaarheid van zes opnames is er voldoende redundantie om deze gebrekkige data zonder detailverlies uit te sluiten.

De gebogen vorm van de cilinder wordt, zoals te zien is in Figuur 5.24, zeer nauwkeurig gereconstrueerd, ondanks het beperkte aantal exportafstanden. Dit is te danken aan het gebruik van enkel de scherpst vastgelegde delen, die de meest betrouwbare diepte-informatie bevatten, én aan de nabewerking en *smoothing* van het oppervlak in MeshLab. Het is

dus belangrijk dat dezelfde punten van het object in meerdere opnames voorkomen, zodat onnauwkeurige gegevens kunnen worden genegeerd.

Daarnaast speelt de nabewerking van de mesh in MeshLab nog een belangrijke rol. Hierbij worden de gaten aan de boven- en onderzijde van de cilinder opgevuld, aangezien deze zones niet zichtbaar zijn voor de camera.



**Figuur 5.24:** Reconstructie op basis van zes foto's

Wanneer de reconstructie gebaseerd is op slechts vier opnames, zoals weergegeven in Figuur 5.25, blijken er doorgaans onvoldoende scherpe en nauwkeurige pixels beschikbaar te zijn om een kwalitatieve 3D-reconstructie te verkrijgen. De mesh vertoont in dat geval minder samenhang en volledigheid. Door het gebrek aan informatie tracht MeshLab automatisch de ontstane gaten in het model op te vullen. Dit is in de figuur herkenbaar aan de zones waar het dambordpatroon ontbreekt - een visuele indicatie dat deze delen niet gebaseerd zijn op werkelijke meetgegevens.

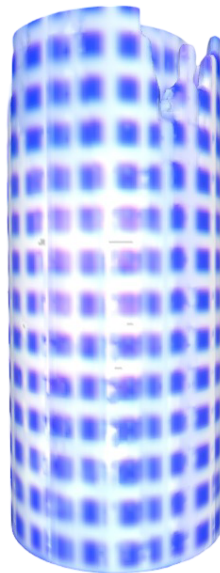


**Figuur 5.25:** Reconstructie op basis van vier foto's

Wanneer de reconstructie gebaseerd is op twaalf foto's, zoals weergegeven in Figuur 5.26,

ontstaat er een zekere overmaat aan informatie. Enerzijds maakt dit het mogelijk om onscherp zones aan te vullen met gegevens vanuit andere kijkhoeken, maar anderzijds leidt het tot meer overlap tussen de beelden. In sommige gevallen kan dit de nauwkeurigheid van de reconstructie zelfs nadelig beïnvloeden, zoals te zien is aan de bovenzijde van het object, waar een grillig oppervlak ontstaat.

Tijdens de metingen werd bovendien vastgesteld dat de camera soms inconsistent presteerde: bij identieke instellingen leverde de ene opname een scherpe meting op, terwijl een andere aanzienlijk minder nauwkeurig was. Bij het gebruik van twaalf foto's vergroot de kans dat één of meerdere beelden minder betrouwbaar zijn, en net die minder goede opnames kunnen dan een grotere invloed uitoefenen op het eindresultaat. Het grillige oppervlak in de reconstructie lijkt hier een rechtstreeks gevolg van te zijn, en illustreert hoe een overvloed aan data niet automatisch tot een beter 3D-model leidt wanneer de kwaliteit van individuele opnames niet gegarandeerd is.



**Figuur 5.26:** Reconstructie op basis van twaalf foto's

Hieruit kan worden geconcludeerd dat zes foto's doorgaans voldoende zijn voor het maken van een nauwkeurige 3D-reconstructie.

## 5.7 Realiseren van een hyperspectrale 3D-scanner

In deze sectie wordt besproken hoe de bestaande RGB-3D-scanner wordt uitgebreid tot een hyperspectrale 3D-scanner. De 3D-reconstructie moet hiervoor worden verrijkt met hyperspectrale informatie. Er wordt toegelicht hoe reflectiespectra op correcte wijze kunnen worden geëxtraheerd van het object. Tot slot wordt de meerwaarde van hyperspectrale informatie ten opzichte van conventionele RGB-gegevens visueel aangetoond.

### 5.7.1 Reflectiespectra genereren

Om het probleem van glans te vermijden, zoals besproken in paragraaf 5.6.2.2, wordt gekozen voor papier dat van zichzelf groen is en niet bedrukt. Op die manier is er geen inkt die glans veroorzaakt, wat leidt tot betere resultaten. Het papier werd zodanig aangebracht dat het object een vrijwel perfecte (groene) cilinder vormt, zoals te zien is in Figuur 5.27.

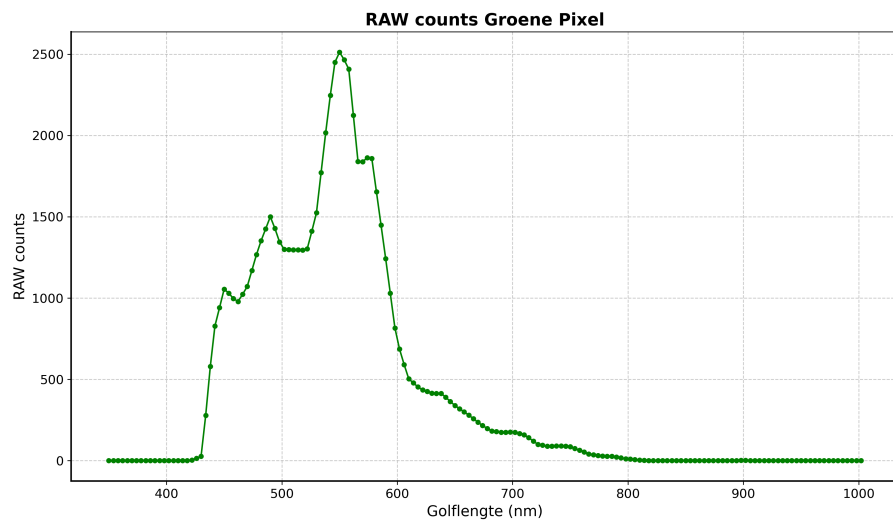
Op deze cilinder wordt opnieuw een dambordpatroon geprojecteerd. Vervolgens worden er zes foto's genomen om een reconstructie te maken. Het bekomen resultaat werd reeds weergegeven in Figuur 5.24.



**Figuur 5.27:** Uiterlijk van de groene cilinder

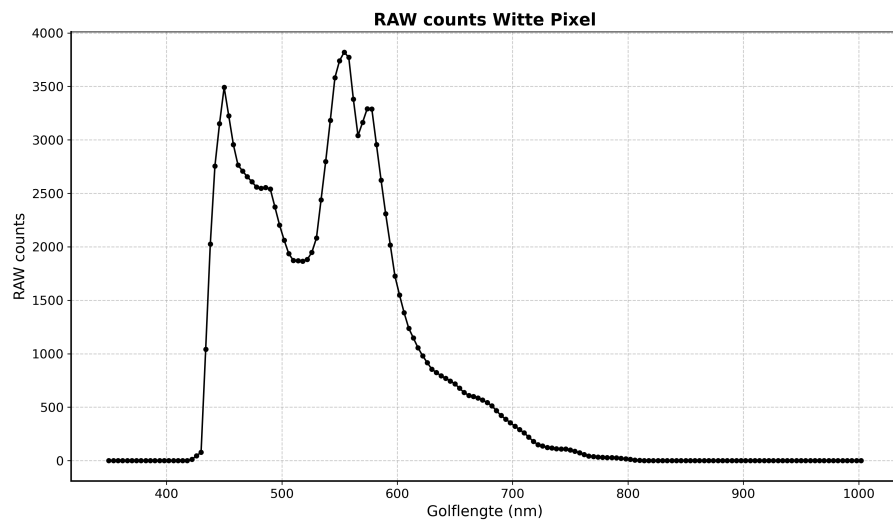
Zoals vermeld in vergelijking 2.2, moet de invloed van de lichtbron worden verwijderd uit de spectrale informatie die de camera registreert. Dit gebeurt door de scherpgestelde datacube van het object te delen door een datacube van wit gereflecteerd licht, die de lichtbron karakteriseert. Deze witte datacube wordt bekomen door wit licht van de beamer op een wit oppervlak te projecteren en hiervan een opname te maken.

De deling levert het reflectiespectrum op. In Figuur 5.28 is het "ruwe" reflectiespectrum van de groene cilinder weergegeven. Figuur 5.29 toont het spectrum van de lichtbron. Op de y-as staan de gemeten RAW counts per golflengteband. Het spectrum in beide figuren, bestaande uit 164 spectrale banden, wordt uitgezet over het spectraal bereik van de camera, namelijk van 350 tot 1002 nm.



**Figuur 5.28:** Spectrum groene cilinder (RAW)

Aangezien beide opnames zijn gemaakt met dezelfde integratietijd (100 ms), is het logisch dat het aantal RAW counts voor de witte referentie hoger ligt dan dat voor de groene cilinder. Hierdoor zal het gecorrigeerde reflectiespectrum waarden tussen 0 en 1 aannemen.



**Figuur 5.29:** Spectrum beamer (RAW)

Om de werkelijke spectrale eigenschappen van het object te bepalen, wordt het gemeten spectrum gedeeld door dat van de witte referentie. Eerst worden de hyperspectrale datacubes van zowel het object als de lichtbron ingeladen. Daaruit worden spectra gehaald voor specifieke pixels, waarmee bedoeld wordt: pixels die zich buiten de zwarte vierkanten van het aanwezige dambordpatroon bevinden. Pixels binnen deze donkere vlakken mogen niet worden geselecteerd, aangezien hun lage reflectie kan leiden tot een vertekend reflectiespectrum.

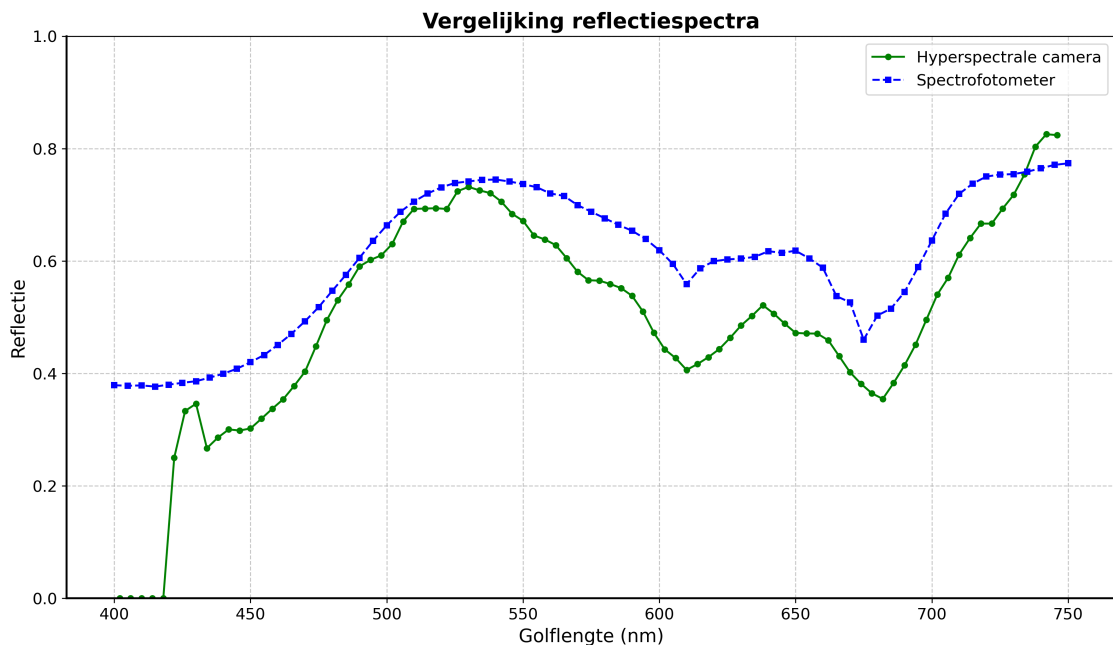
Het resulterende reflectiespectrum van de groene cilinder wordt tweemaal weergegeven in Figuur 5.30. Enerzijds het spectrum gemeten met de hyperspectrale camera, anderzijds het reflectiespectrum gemeten met een spectrofotometer. Dit dient ter controle van de nauwkeurigheid van de metingen met de hyperspectrale camera.

De gebruikte spectrofotometer is de HunterLab UltraScan PRO. De meting werd uitgevoerd in een zogenaamde d:8°-opstelling, waarbij het object diffuus wordt verlicht en het gereflecteerde licht onder een hoek van 8° wordt gemeten. Glansreflecties (spiegelingen) werden uitgesloten, zodat de spectrofotometer vooral de kleur van het materiaal zelf meet, zonder storende reflecties.

De UltraScan PRO is een referentie-instrument voor kleurmetingen, geschikt voor zowel reflectie- als transmissiemetingen (waarbij respectievelijk het gereflecteerde licht of het doorgelaten licht wordt gemeten). Dankzij zijn optische resolutie van 5 nm, nauwkeurige meetcapaciteiten en geavanceerde kalibratie is het toestel geschikt voor toepassingen in zowel onderzoek als kwaliteitscontrole.

Bij beide reflectiespectra in Figuur 5.30 is een piek zichtbaar bij  $\approx 530$  nm, wat duidt op een groen object. Daarnaast is een piek aanwezig rond 745 nm, wat binnen het nabij-infraroodgebied valt.

Er kan worden geconcludeerd dat de metingen met de hyperspectrale camera een relatief goede overeenkomst vertonen met die van de spectrofotometer, met uitzondering van de lagere respons tussen 400 en 420 nm.



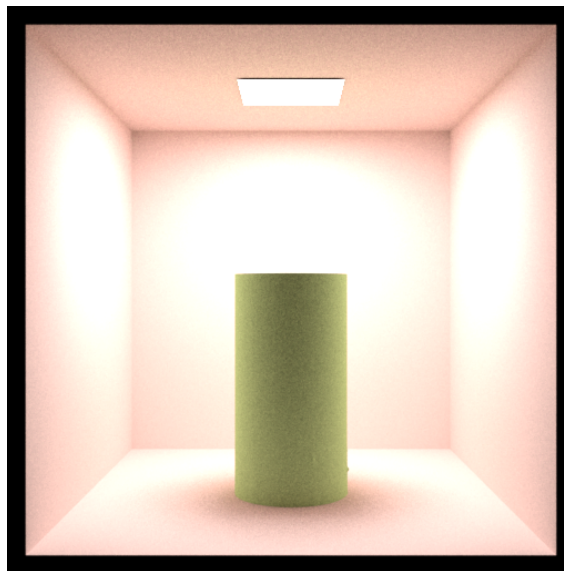
**Figuur 5.30:** Reflectiespectrum groene cilinder

### 5.7.2 Toevoegen van hyperspectrale informatie

Om na de RGB-3D-scanner ook een hyperspectrale 3D-scanner te realiseren, moet er nog hyperspectrale informatie worden toegevoegd aan het 3D-model. In de rendersoftware Mitsuba 3 wordt enerzijds het reflectiespectrum van het object meegegeven - gecorrigeerd voor de gebruikte lichtbron - in het .spd-bestandsformaat. Anderzijds wordt de 3D-reconstructie van het object toegevoegd in het .ply-formaat.

Vervolgens kan in Mitsuba een specifieke lichtbron gekozen worden. Een veelgebruikte optie is de D65-lichtbron, die daglicht nabootst. Zodra zowel het reflectiespectrum, het 3D-model als de lichtbron correct zijn ingesteld, kan het geheel worden gerenderd. Dit resulteert in een realistische weergave van het object, waarin de spectrale eigenschappen zijn meegenomen. Hierbij wordt vereenvoudigd aangenomen dat elke pixel hetzelfde reflectiespectrum heeft.

Zoals te zien is in Figuur 5.31, wordt het object bij het renderen doorgaans geplaatst in een witte doos, met bovenaan de lichtbron. Deze opstelling is een veelgebruikte scène binnen Mitsuba 3 voor gecontroleerde visuele simulaties.



**Figuur 5.31:** Render groene cilinder - D65

De figuur toont het eindresultaat van de hyperspectrale 3D-scanner: een object uit de echte wereld wordt driedimensionaal gereconstrueerd met behulp van een hyperspectrale camera, waarbij tegelijkertijd de spectrale informatie aan het model wordt toegevoegd.

### 5.7.3 Verschil tussen RGB- en spectraal renderen

Om de waarde van spectrale informatie aan te tonen, wordt gebruikgemaakt van een magenta cilinder. Magenta is een kleur die ontstaat door een combinatie van rood en blauw licht, zonder een groencomponent. Het object heeft een uitgesproken reflectiespectrum,

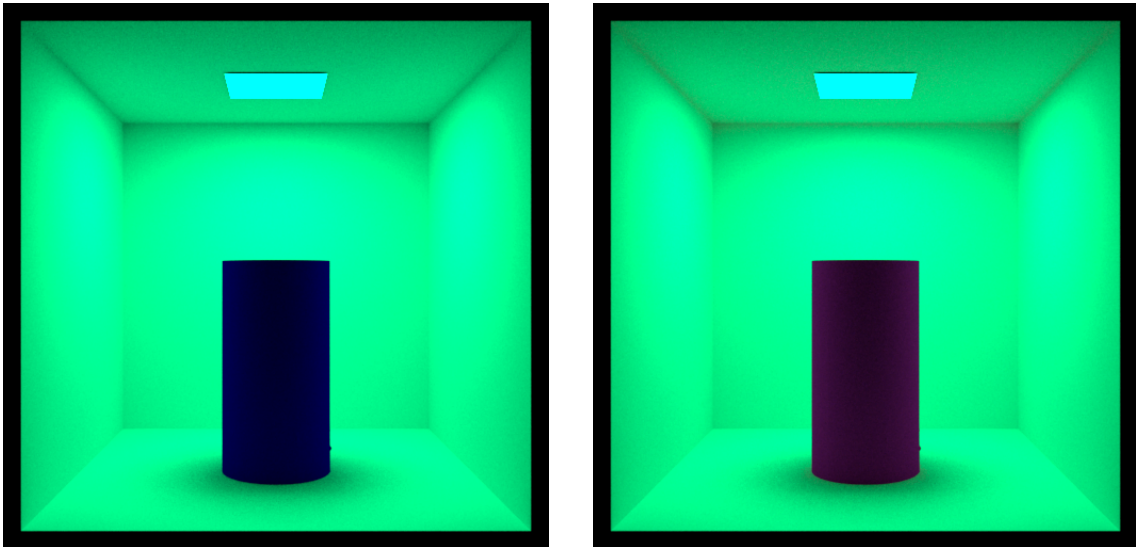
met duidelijke pieken bij de golflengten voor blauw en rood. Dit maakt het mogelijk om het verschil tussen RGB-renderen en spectraal renderen visueel weer te geven.

Bij RGB-renderen wordt de kleur gesimuleerd door middel van een menging van drie kleurkanalen (rood, groen, blauw), zonder rekening te houden met het volledige lichtspectrum. In dit experiment wordt een groene LED-lamp gebruikt als lichtbron, met een scherpe piek rond 500 nm (groen licht). Deze LED voegt een sterke groene component toe aan de scène, terwijl de magenta cilinder vrijwel geen groen licht reflecteert. Dit resulteert in een lage intensiteit in het groene kanaal en een verschuiving naar een blauwere kleurindruk in de RGB-rendering. Blauw licht (435 nm) wordt deels gereflecteerd, omdat de LED een kleine hoeveelheid blauw bevat, zoals te zien is in Figuur 5.33, en de cilinder goed reflecteert bij deze golflengte. Rood licht (645 nm) is echter vrijwel afwezig in het spectrum van de LED, waardoor, ondanks de goede reflectie-eigenschappen van het object, weinig rood wordt weergegeven. Het resultaat is dat de cilinder in de RGB-rendering een blauwe tint krijgt, terwijl het fysieke object in werkelijkheid magenta is.

Het gebruik van deze groene LED is bewust gekozen om het verschil tussen RGB- en spectraal renderen zo duidelijk mogelijk te maken. Bij een meer realistische witte lichtbron met een smalle piek in blauw en een bredere, kleinere piek in rood zijn de verschillen tussen RGB en spectraal renderen ook aanwezig, maar veel kleiner en subtieler. Daarom wordt hier voor dit extreme geval gekozen, zodat het verschil tussen beide methoden goed zichtbaar is.

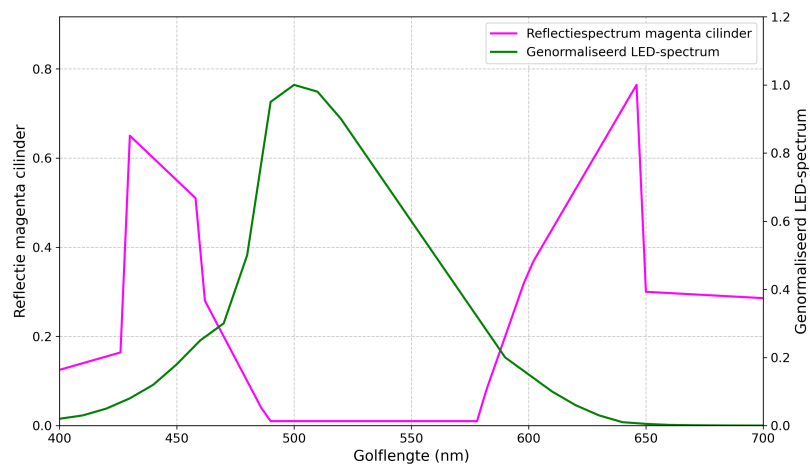
Bij spectraal renderen wordt het volledige lichtspectrum per golflengte berekend, waardoor de interactie tussen lichtbron en object nauwkeuriger wordt gemodelleerd. Hoewel de groene LED een dominante piek heeft rond 500 nm, bevat ze ook kleine hoeveelheden blauw en rood licht. Deze subtiele spectrale componenten worden in spectrale rendering correct gekoppeld aan het reflectiespectrum van de cilinder. Hierdoor ontstaat een realistischere weergave, waarin de magentatint behouden blijft dankzij de combinatie van blauw en rood licht.

Het verschil tussen beide methoden is duidelijk zichtbaar in Figuur 5.32, waar links de RGB-render en rechts de spectrale render van de magenta cilinder te zien zijn, beide verlicht met de groene LED.



**Figuur 5.32:** RGB- en spectrale render magenta cilinder - Groene LED-lamp

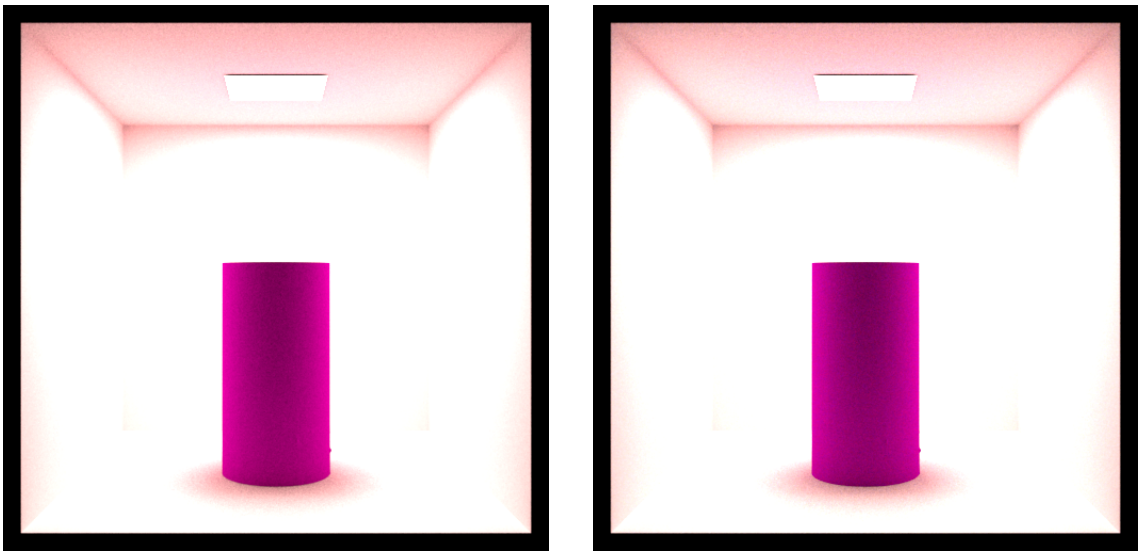
Het spectrum van de LED-lamp is weergegeven in Figuur 5.33, samen met het reflectiespectrum van de magenta cilinder. Het LED-spectrum is genormaliseerd om beide curves op één grafiek weer te kunnen geven. De piek rond 500 nm is kenmerkend voor een groene LED: dit licht is sterk geconcentreerd in een smal golflengtegebied en aanzienlijk minder breed gespreid dan het spectrum van bijvoorbeeld daglicht.



**Figuur 5.33:** Reflectiespectrum magenta cilinder en genormaliseerd LED-spectrum

Wanneer daarentegen een D65-lichtbron wordt gebruikt, is er nauwelijks verschil te zien tussen de RGB- en spectrale render. D65 simuleert natuurlijk daglicht en heeft een breed spectrum zonder uitgesproken pieken. Omdat RGB-rendering is afgestemd op de menselijke kleurwaarneming onder zulke evenwichtige lichtomstandigheden, levert dit een kleurweergave op die sterk overeenkomt met die van een spectrale rendering. De kleurweergave blijft dus

consistent tussen beide methoden, zoals geïllustreerd in Figuur 5.34.



**Figuur 5.34:** RGB- en spectrale render magenta cilinder - D65

# 6

## Conclusies en toekomstig onderzoek

### 6.1 Conclusies

De centrale onderzoeksvraag van deze masterproef luidde: *"Kan een snapshot hyperspectrale camera gebruikt worden als nauwkeurige spectrale 3D-scanner?"*. Het antwoord op deze vraag is bevestigend: de integratie van een hyperspectrale snapshotcamera, zoals de Cubert Ultris X50, in een 3D-scanneropstelling is technisch haalbaar en maakt het mogelijk om een nauwkeurige spectrale 3D-scanner te realiseren.

Gedurende dit onderzoek werd een werkbare en efficiënte workflow ontwikkeld, waarbij beelden vanuit verschillende hoeken worden verzameld en omgezet in een coherent 3D-model, waaraan vervolgens hyperspectrale informatie wordt toegevoegd. De integratie van de Cubert Ultris X50 in deze opstelling bleek haalbaar, ondanks dat de camera oorspronkelijk niet ontworpen was voor gebruik in een 3D-scanner. De eenvoud van de opstelling — met een stationaire camera en een object dat roteert op een vooraf gekalibreerde afstand — zorgt ervoor dat de metingen zowel gebruiksvriendelijk als reproduceerbaar zijn.

Een belangrijk aspect van de 3D-reconstructie is de afweging tussen informatiedichtheid en verwerkingssnelheid. Na evaluatie bleek dat zes beelden per object een goede balans bieden tussen de detailgraad van de reconstructie en de benodigde verwerkingstijd. Het volledige proces — van opname tot visualisatie, inclusief de toevoeging van hyperspectrale informatie — neemt met zes foto's ongeveer 36 minuten in beslag. Daarbij gaat het merendeel van de tijd (ongeveer 30 minuten) naar de bepaling van diepte, wat erop wijst dat in toekomstige optimalisaties vooral daar aanzienlijke tijdsinstaat te boeken valt.

De resultaten tonen aan dat het systeem goed werkt voor het scannen van kleine, matte

objecten, die maximaal 6 cm hoog mogen zijn en waarbij het diepteverschil niet meer dan 5 cm bedraagt. De combinatie van geometrische en hyperspectrale data maakt het systeem potentieel waardevol voor toepassingen in kwaliteitscontrole, productontwikkeling en precisie-landbouw. Er werden echter ook enkele beperkingen vastgesteld, zoals de gevoeligheid voor schaduwen door de eenzijdige belichting, verminderde prestaties bij glanzende oppervlakken en verlies van nauwkeurigheid aan de randen van het beeld.

Deze bevindingen bieden waardevolle aanknopingspunten voor toekomstig onderzoek. Het gebruik van polarisatiefilters, alternatieve lichtbronnen of een camera met groter dieptebereik kan de veelzijdigheid van het systeem verder verbeteren. Daarnaast zou een verfijning van de verwerking van hyperspectrale data, waarbij spectrale informatie op pixelniveau wordt gekoppeld aan de 3D-structuur, de nauwkeurigheid van het model aanzienlijk verbeteren.

In deze masterproef werd voorlopig gewerkt met een vereenvoudigde aanpak, waarbij één uniform reflectiespectrum aan het volledige object werd toegekend. Om tot meer realistische representaties te komen, is het toekennen van unieke spectrale waarden aan individuele punten een essentiële vervolgstap.

Samenvattend toont deze masterproef aan dat de integratie van een hyperspectrale snapshotcamera in een 3D-scanner mogelijk is, en dat hiermee een nauwkeurige hyperspectrale 3D-scanner gerealiseerd kan worden. Door hyperspectrale informatie te combineren met geometrische data binnen een relatief eenvoudige hardwareconfiguratie, wordt een gedetailleerde en visueel coherente reconstructie bereikt. Verdere ontwikkelingen kunnen de toepasbaarheid van het systeem uitbreiden en de huidige beperkingen verkleinen, waardoor het systeem inzetbaar wordt in een breder scala aan industriële toepassingen.

## 6.2 Toekomstig onderzoek

Op basis van de bevindingen van deze masterproef zijn er verschillende mogelijkheden voor toekomstig onderzoek die gericht kunnen zijn op het verder verfijnen van de ontwikkelde hyperspectrale 3D-scanner.

Ten eerste is het aangewezen om het systeem te testen met een breder scala aan objecten. Door verschillende vormen, materialen en texturen te gebruiken, kunnen de sterktes en zwaktes van de scanner beter in kaart worden gebracht. Dit zou ook toelaten om de prestaties van het systeem in meer complexe en realistische scenario's te evalueren.

Een andere belangrijke uitbreiding betreft het toevoegen van een polarisatiefilter aan de opstelling. Dit zou met name de prestaties bij het scannen van glanzende oppervlakken kunnen verbeteren. De huidige configuratie werkt goed bij matte objecten, maar glans vormt een uitdaging. Een polarisatiefilter kan hinderlijke reflecties reduceren, waardoor dieptemetingen consistent worden en de scanner beter inzetbaar wordt in industriële toepassingen waar glanzende materialen vaak voorkomen.

De Cubert Ultris X50 heeft een beperkt dieptemeteerbereik van ongeveer 5 cm. Dat maakt het

moelijk om grotere objecten of objecten die niet exact op de juiste afstand staan, nauwkeurig te reconstrueren. Een camera met een ruimer meetbereik zou de flexibiliteit en bruikbaarheid van het systeem aanzienlijk vergroten, al gaat dit vermoedelijk gepaard met een hoge kost.

Een andere piste is het aanpakken van schaduwvorming door de huidige positionering van de beamer. Momenteel bevindt de beamer zich rechts van de camera, wat leidt tot schaduwzones aan de linkerkant van het object. Het herpositioneren van de beamer, het gebruik van meerdere lichtbronnen of het inzetten van alternatieve belichtingstechnieken kunnen bijdragen aan een gelijkmatigere verlichting en hogere beeldkwaliteit.

Daarnaast zijn er ook verwerkingsgerichte optimalisaties mogelijk. Zo kan een meer verfijnde aanpak waarbij elk pixel een individueel spectraal profiel krijgt — in plaats van één globaal reflectiespectrum voor het hele object — de nauwkeurigheid van het hyperspectrale aspect van de reconstructie aanzienlijk verhogen. Ook automatische detectie van onscherpe zones zou onderzocht kunnen worden, aangezien de beste resultaten werden verkregen door uitsluitend scherpgestelde zones te gebruiken voor de 3D-reconstructie.

Deze uitbreidingen vormen mogelijke richtingen voor toekomstig onderzoek, en zouden bijdragen aan een robuustere, flexibelere en nauwkeurigere hyperspectrale 3D-scanner die inzetbaar is voor een breder gamma aan objecten en toepassingen.

## Bibliografie

- [1] D. H. Foster en K. Amano, "Hyperspectral imaging in color vision research: tutorial", *Journal of the Optical Society of America A*, jrg. 36, nr. 4, apr 2019.
- [2] N. Hagen en M. W. Kudenov, "Review of snapshot spectral imaging technologies", *Optical Engineering*, jrg. 52, nr. 9, p. 23, sep 2013.
- [3] Konica Minolta. "Understanding Hyperspectral Imaging (HSI)". Geraadpleegd op 20 april 2025, Konica Minolta Sensing. (2021), adres: <https://sensing.konicaminolta.asia/blog/understanding-hyperspectral-imaging-hsi/>.
- [4] Specim, *How Specim Line Scan Hyperspectral Cameras Work*, Geraadpleegd op: 12 oktober 2024, 2024. adres: <https://www.specim.com/technology/how-specim-line-scan-hyperspectral-cameras-work/>.
- [5] N. Slembrouck, J. Audenaert en F. B. Leloup, "Design of a Snapshot Hyperspectral Gonioradiometer for Appearance Characterization", *Light & Lighting Laboratory, KU Leuven (ESAT)*, 2024, Preprint or Unpublished Work.
- [6] M. Memory. "Convex Lenses: Object Distance and Image Distance". Accessed: 2024-12-05. (2024), adres: <https://mammothmemory.net/physics/lenses/convex-lenses/object-distance-and-image-distance.html>.
- [7] N. Slembrouck, "Focussing", Paper in process, 2024.
- [8] M. Daneshmand, A. Helmi, E. Avots, F. Noroozi, F. Alisinanoglu, H. S. Arslan, J. Gorbova, R. E. Haamer, C. Ozcinar en G. Anbarjafari, "3D Scanning: A Comprehensive Survey", *arXiv*, 2018, Accessed: 2024-11-23. adres: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1801.08863>.
- [9] Scan Dimension, *SOL PRO 3D Scanner*, Geraadpleegd op 12 april 2025, 2025. adres: <https://scandimension.com/products/sol-pro-3d-scanner>.
- [10] Artec 3D, *Artec Eva - Fast Hand-held 3D Scanner for Professionals*, Geraadpleegd op 12 april 2025, 2025. adres: <https://www.artec3d.com/portable-3d-scanners/artec-eva>.
- [11] Texas Instruments, *OPT8241 Time-of-Flight Sensor*, Geraadpleegd op 12 april 2025, 2025. adres: <https://www.ti.com/product/OPT8241>.
- [12] C. Kucha en E. O. Olaniyi, "Applications of hyperspectral imaging in meat tenderness detection: Current research and potential for digital twin technology", *Food Bioscience*, jrg. 58, p. 103754, 2024, issn: 2212-4292. doi: 10.1016/j.fbio.2024.103754.
- [13] B. G. Ram, P. Oduor, C. Igathinathane, K. Howatt en X. Sun, "A systematic review of hyperspectral imaging in precision agriculture: Analysis of its current state and future prospects", *Computers and Electronics in Agriculture*, jrg. 222, p. 109037, jul 2024. doi: 10.1016/j.compag.2024.109037. adres: <https://www.sciencedirect.com/kuleuven.e-bronnen.be/science/article/pii/S0168169924004289>.

- [14] C. Cucci, M. Picollo, L. Chiarantini, G. Uda, L. Fiori, B. D. Nigris en M. Osanna, "Remote-sensing hyperspectral imaging for applications in archaeological areas: Non-invasive investigations on wall paintings and on mural inscriptions in the Pompeii site", *Microchemical Journal*, jrg. 158, p. 105 082, nov 2020, Received 13 September 2019, Revised 25 May 2020, Accepted 25 May 2020, Available online 3 June 2020, Version of Record 16 June 2020. doi: 10.1016/j.microc.2020.105082. adres: <https://www-sciencedirect-com.kuleuven.e-bronnen.be/science/article/pii/S0026265X19325755>.
- [15] Y. Zhang, X. Wu, L. He, C. Meng, S. Du, J. Bao en Y. Zheng, "Applications of hyperspectral imaging in the detection and diagnosis of solid tumors", *Translational Cancer Research*, jrg. 9, nr. 2, 2020, issn: 2219-6803. adres: <https://tcr.amegroups.org/article/view/34678>.
- [16] IATecPS, *Cubert*, Geraadpleegd op: 2 November 2024, 2024. adres: <https://www.iatecps.com/cubert>.
- [17] A. S. Frederiksen, *Manual for Experiment Lamp*, 2800.50 AC, Description and operating instructions for the Experiment Lamp with halogen bulb., Ølgod, Denmark, dec 2013. adres: <https://www.sorenfrederiksen.dk/>.
- [18] X. Qin, Z. Zhang, C. Huang, M. Dehghan, O. R. Zaiane en M. Jagersand, "U2-Net: Going Deeper with Nested U-Structure for Salient Object Detection", *Pattern Recognition*, jrg. 106, p. 107 404, 2020. doi: 10.1016/j.patcog.2020.107404.
- [19] L. E. Ortiz, E. V. Cabrera en L. M. G. Gonçalves, *A Generic Approach for Error Estimation of Depth Data from (Stereo and RGB-D) 3D Sensors*, Preprint, mei 2017. doi: 10.20944/preprints201705.0170.v1. adres: [https://www.researchgate.net/publication/326518096\\_A\\_Generic\\_Approach\\_for\\_Error\\_Estimation\\_of\\_Depth\\_Data\\_from\\_Stereo\\_and\\_RGB-D\\_3D\\_Sensors](https://www.researchgate.net/publication/326518096_A_Generic_Approach_for_Error_Estimation_of_Depth_Data_from_Stereo_and_RGB-D_3D_Sensors).

**KU LEUVEN - GENT**  
Faculteit Industriële Ingenieurswetenschappen  
Campus Rabot, Gebroeders De Smetstraat 1  
9000 Gent, België  
tel: + 32 9 265 86 10  
iiw.gent@kuleuven.be  
[www.iw.kuleuven.be](http://www.iw.kuleuven.be)

