



# Deskstudie van bestaande meetapparatuur voor het monitoren van groei, groenheid en paarsverkleuring van tomatenkoppen

Henk Jalink







# Deskstudie van bestaande meetapparatuur voor het monitoren van groei, groenheid en paarsverkleuring van tomatenkoppen

Henk Jalink

© 2009 Wageningen, Wageningen UR Glastuinbouw

Alle rechten voorbehouden. Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevensbestand, of openbaar gemaakt, in enige vorm of op enige wijze, hetzij elektronisch, mechanisch, door fotokopieën, opnamen of enige andere manier zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van Wageningen UR Glastuinbouw



## **Wageningen UR Glastuinbouw**

Adres : Droevendaalsesteeg 1, 6708 PB Wageningen  
: Postbus 16, 6700 AA Wageningen  
Tel. : 0317 - 48 60 01  
Fax : 0317 - 41 80 94  
E-mail : [glastuinbouw@wur.nl](mailto:glastuinbouw@wur.nl)  
Internet : [www.glastuinbouw.wur.nl](http://www.glastuinbouw.wur.nl)

# Inhoudsopgave

	pagina
1 Samenvatting	1
2 Inleiding	3
2.1 Aanleiding	3
2.2 Probleem	3
2.3 Mogelijke oplossingen	3
2.3.1 Camera met groter dynamisch bereik	3
2.3.2 Spectrale informatie	4
2.3.3 Diepte informatie, 3D	4
3 Overzicht van camerasystemen	5
3.1 Camerasystemen naar meetprincipe	5
3.1.1 Multispectraal	5
3.1.2 Hyperspectraal	9
4 Evaluatie van de beschikbare meetapparatuur	17
4.1 Meetprincipes en parameters voor plantkwaliteit	17
4.1.1 Multispectraal	17
4.1.2 Hyperspectraal	17
4.1.3 Fluorescentie	17
4.1.4 3D	18
4.1.5 Multispectrale reflectie fluorescentie camera WUR Glastuinbouw	18
4.1.6 Conclusie	19
5 Combineren van meetapparatuur tot één camerasysteem	21
5.1 Eenvoudigste ontwerp	21
5.1.1 Camera	21
5.1.2 Dedicated camera met filters	21
5.1.3 Belichting	21
5.1.4 Stereo vision	22
5.1.5 Meer dan 3 spectraalbanden: Liquid crystal tunable filter of filterwiel	22
5.1.6 Betere herkenning van de plant met fluorescentie technologie	22
5.2 State of the art: 'Echte' 3D-beelden	24
Bijlage I.	1 p



# 1 Samenvatting

Deze deskstudie is gemaakt als voorstudie van een projectvoorstel die als doel heeft het geautomatiseerd in kaart brengen van plantfysiologische parameters die de teler nu op het oog scoort: de groei, groenheid en paarsverkleuring van de kop van planten, de Croptopviewer. Als modelgewas wordt tomaat gekozen, maar de Croptopviewer moet met enkele aanpassingen ook geschikt zijn voor andere gewassen zoals paprika, komkommer en aubergine. Concreet wordt gevraagd om een monitoringssysteem voor het geautomatiseerd en objectief meten van eigenschappen van het bovenste groeipunt, ofwel de kop van de tomatenplant. Het rapport bestaat uit een literatuuronderzoek in de vorm van een inventarisatie van bestaande meetapparatuur die geschikt is om de groei, groenheid en paarsverkleuring van de kop van planten te monitoren. Voor het literatuuronderzoek zijn o.a. websites van techniekontwikkelaars en producenten van direct beschikbare technologieën geraadpleegd. De uitkomsten van het rapport zullen in de ontwikkeling van de Croptopviewer worden meegenomen. Dit betekent dat wanneer bestaande meetapparatuur wordt gevonden deze wordt gebruikt en eventueel als dat noodzakelijk is, aangepast zal worden. Directe aanleiding van het Croptopviewer projectvoorstel is dat er een grote behoefte is aan een monitoringssysteem. Dit om de productie van het tomatengewas en het rendement van teeltmaatregelen en middelen geautomatiseerd en objectief te kunnen meten. De huidige stand van zaken is dat op basis van subjectieve waarnemingen en ervaring het teeltproces wordt gestuurd.

Uit de deskstudie volgt dat een compleet meetsysteem nog niet bestaat. Wel zijn losse onderdelen commercieel beschikbaar waaruit een dergelijk meetapparaat kan worden opgebouwd. Een camera die gelijktijdig in meerdere golflengtegebieden meet om de groenheid en paarsverkleuring te bepalen kan gecombineerd worden met een 3D-technologie als stereo vision om de groei te berekenen. Voor deze combinatie moet naast het samenstellen van de hardware nog software worden ontwikkeld om de gevraagde parameters te kunnen berekenen.

Het camerasysteem is de duurste component van het gehele meetapparaat om groenheid, paarsverkleuring en met 3D-informatie de groei te berekenen. Dit komt door het technische ontwerp dat het camerasysteem bij meerdere golflengtegebieden opnames moet kunnen maken. Om de kosten zo laag mogelijk te houden heeft een ontwerp met één camera daarom de voorkeur.

De technisch en softwarematig eenvoudigste technologie voor het berekenen van de groei van de tomatenkoppen is stereo vision. Door het meetsysteem over een kleine afstand te verplaatsen kan met software uit de twee beelden (stereo vision) de lengte en dikte van de stengel van het bovenste groeipunt worden berekend.

Het meetsysteem moet middels de software in staat zijn om de plant te kunnen herkennen uit een gemaakte opname. De technologie die gebruikt maakt van fluorescentie lijkt de beste methode. Alleen plantaardig materiaal dat chlorofyl bevat zal op de opname te zien zijn. Dus een fluorescentie opname van de tomatenkop laat alleen de plant zelf zien en geen klimdraad of achtergrond van ander materiaal dan plantaardig. Verschillende fabrikanten leveren fluorescentie camera's, maar deze systemen zijn ontworpen voor metingen aan parameters van de fotosynthese. Een bijkomend probleem is de software. Deze zal moeten worden herschreven, maar fabrikanten geven vaak geen toestemming om hun software aan te passen.

De multispectraal technologie kan gecombineerd worden met een fluorescentie camera. Wel moet dan bij vier golflengtegebieden opnames worden gemaakt, drie voor de groenheid en paarsverkleuring en dan nog een extra spectraalband voor de fluorescentie. Dit kan worden opgelost door een filterwiel tussen de lens en de camera te plaatsen.





## 2 Inleiding

Deze deskstudie is gemaakt als voorstudie van een projectvoorstel die als doel heeft het geautomatiseerd in kaart brengen van plantfysiologische parameters die de teler nu op het oog scoort: de groei, groenheid en paarsverkleuring van de kop van planten, de Croptopviewer. Als modelgewas wordt tomaat gekozen, maar de Croptopviewer moet met enkele aanpassingen ook geschikt zijn voor andere gewassen zoals paprika, komkommer en aubergine. Concreet wordt gevraagd om een monitoringssysteem voor het geautomatiseerd en objectief meten van eigenschappen van het bovenste groeipunt, ofwel de kop van de tomatenplant. Belangrijke parameters die een maat zijn voor het verloop van het teeltproces zijn terug te vinden in deze kop van de plant:

- 1) Groei (lengte/dikte van het bovenste stengeldeel),
- 2) Groenheid (donkerder of bleker worden),
- 3) Paarsverkleuring (anthocyaan vorming).

Dit rapport bestaat uit een deskstudie waarin een literatuuronderzoek is gedaan van een inventarisatie van bestaande meetapparatuur die geschikt is om de omschreven doelstellingen te halen. Voor het literatuuronderzoek zijn o.a. websites van techniekontwikkelaars en producenten van direct beschikbare technologieën geraadpleegd. De uitkomsten van het rapport zullen in de ontwikkeling van de Croptopviewer worden meegenomen. Dit betekent dat wanneer bestaande meetapparatuur wordt gevonden deze wordt gebruikt en eventueel als dat noodzakelijk is, aangepast zal worden.

### 2.1 Aanleiding

Directe aanleiding van het Croptopviewer projectvoorstel is dat er een grote behoefte is aan een monitoringssysteem. Dit om de productie van het tomatengewas en het rendement van teeltmaatregelen en middelen geautomatiseerd en objectief te kunnen meten. De huidige stand van zaken is dat op basis van subjectieve waarnemingen en ervaring het teeltproces wordt gestuurd. Deze waarnemingen bestaan o.a. uit het volgen van de groei, het donkerder of bleker worden en paarsverkleuring van het groeipunt.

### 2.2 Probleem

Uit voorgaand onderzoek is gebleken dat het grootste en eerste probleem dat moet worden opgelost, is de herkenning van de kop van de plant door de software. Is dit niet mogelijk dan kunnen er geen berekeningen worden uitgevoerd. Omgevingsfactoren zoals het felle licht verstoort de herkenning van de tomatenkop, omdat door reflecties van fel licht op bepaalde plantendelen het camerabeeld wordt overbelicht. Door deze overbelichting verdwijnt de kleurinformatie voor deze plekken en is het niet mogelijk om softwarematig de plant te herkennen.

### 2.3 Mogelijke oplossingen

#### 2.3.1 Camera met groter dynamisch bereik

Voor het opnemen van spectrale beelden wordt in het algemeen camera's genomen met een dynamisch bereik van 10- á 12-bit. Hierdoor is het bereik van de camera vaak te klein om fel verlichte delen en donkere delen voldoende goed te kunnen onderscheiden van de achtergrond. Overbelichting kan worden voorkomen door kortere belichtingstijden te gebruiken, maar dan zijn de donkere delen van de plant moeilijk te herkennen. Een oplossing voor dit probleem kan gevonden worden door een camera te gebruiken met een groot dynamisch bereik. Dit betekent dat de camera in staat moet zijn om zwakke en sterke signalen goed weer te geven. Dit kan worden bereikt door een camera van 14-bit of meer te nemen. Een 14-bit camera heeft per pixel  $2^{14} = 16384$  grijswaarden. Door dit grote bereik in grijswaarden zijn donkere delen van de plant nog met voldoende nauwkeurigheid te meten in combinatie

met de fel verlichte delen. Een tweede mogelijkheid om donkere delen van de plant betrouwbaarder te kunnen meten is door bij te belichten.

### 2.3.2 Spectrale informatie

Planten vertonen in verschillende spectrale banden grote verschillen in absorptie. Niet-plantmateriaal vertoont dit in mindere mate of zelfs niet. Van deze eigenschap kan gebruik worden gemaakt om planten te onderscheiden van de achtergrond in een beeldopname van het reflecterende licht. Een tweede mogelijkheid is gebruik te maken van de eigenschap van chlorofyl dat fluoresceert. Wordt het chlorofyl met een geschikte kleur bestraald, bijv. rood licht, dan wordt een gedeelte van het geabsorbeerde licht op een andere, nog rodere kleur uitgestraald. Door nu deze fluorescentie af te beelden met een camera zal in het beeld alleen plantaardig materiaal te zien zijn die chlorofyl bevat. Ander niet-plantaardig materiaal vertoont geen fluorescentie op de gekozen golflengten van aanstralen en fluorescentie meten (respectievelijk de excitatie- en emissieovergang). Deze methode kan zeer goed werken om plantaardig materiaal te herkennen van dood plantaardig materiaal en niet-plantaardig materiaal. Nadeel van deze methode is de lage intensiteit van het fluorescentie licht. Om dit te kunnen onderscheiden van omgevingslicht moeten de planten met hoge intensiteit rood licht worden aangestraald.

Voordelen van reflectiemeting bij zonlicht:

- Zonlicht is meestal aanwezig
- Breed spectrum van golflengten is aanwezig
- Op korte termijn is het licht niveau constant

Nadelen van reflectiemeting bij zonlicht:

- Er moet zonlicht aanwezig zijn
- Groot dynamisch bereik van de camera nodig
- Bijbelichting is complex

### 2.3.3 Diepte informatie, 3D

Een plant die rond een specifieke klimdraad groeit kan worden onderscheiden van de achtergrond, waarin zich ook planten kunnen bevinden, door alleen plantmateriaal in de berekening mee te nemen die zich binnen bepaalde grenzen van de camera bevinden. Met verschillende technieken kan deze diepte informatie worden verkregen, zoals stereo vision, gestructureerd licht of een time of flight camera. Bij het monitoren van de tomatenkoppen beweegt het camerasysteem van plant naar plant. Omdat deze beweging in het pad toch al moet worden gemaakt, is stereo vision de eenvoudigst toepasbare technologie om 3D-beelden te realiseren, door ter plekke van een plant twee opnames te maken. Per plant positie wordt het camerasysteem enkele centimeters in de richting van het pad verplaatst. Uit twee opnames kan diepte informatie worden berekend en vervolgens de dikte en lengte van de stengel.

In hoofdstuk 3 zal dieper worden ingegaan op commercieel verkrijgbare systemen die gebaseerd zijn op de hierboven genoemde technologieën.

## 3 Overzicht van camerasystemen

In dit hoofdstuk wordt een overzicht gegeven van camerasystemen die werken volgens verschillende meetprincipes. Als eerste zullen camera's worden behandeld waarmee inhoudstoffen spectraal kunnen worden gemeten. Vervolgens komt de technologie waarmee ruimtelijke informatie uit het beeld kan worden onttrokken, 3D-technologieën. Niet alle meetprincipes zullen aan bod komen, want er is een selectie gemaakt die gebaseerd is op de criteria van 1) toepassingsmogelijkheden in de glastuinbouw, 2) 'bewezen' technologie in bestaande commerciële meetapparatuur. Hierbij wordt met bewezen technologie bedoeld dat het een meetprincipe moet zijn die zich in de literatuur bewezen heeft. Er is gekozen voor camerasystemen, omdat de kwaliteitsparameters die gemeten moeten worden, zoals groenheid en paarsverkleuring, niet homogeen over de tomatenkop verdeeld zijn en groeiparameters het beste kunnen worden bepaald uit een beeld.

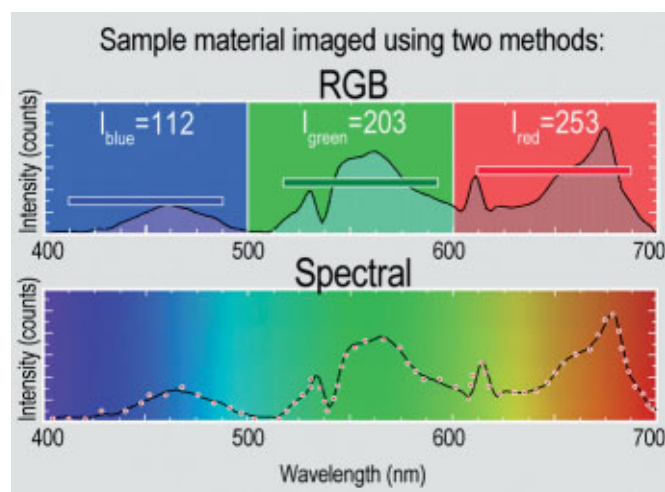
### 3.1 Camerasystemen naar meetprincipe

Camera's kunnen worden onderverdeeld naar het meetprincipe, met als resultaat specifieke beelden, waarbij ieder beeld is gekoppeld aan de gevolgde meetmethode. Voor het Cromptoviewer project is een verdeling van de verschillende camera's gemaakt in de volgende meetprincipes:

1. Multispectrale reflectie
2. Hyperspectrale reflectie
3. Fluorescentie
4. 3D (driedimensionaal) ruimtelijke informatie

#### 3.1.1 Multispectraal

Een multispectrale camera maakt beelden in verschillende spectrale gebieden van het elektromagnetische spectrum. In de praktijk is dit het gebied tussen 300-2500 nm. Het meetprincipe is er op gebaseerd dat een beeld wordt gemaakt van een voorwerp die een maat is voor de reflectie van het opvallende licht. Er zijn twee uitvoeringsvormen te onderscheiden: 1) een lichtbron die een breed spectrum aanbiedt op het voorwerp en met een optisch filter voor de camera een beeld maakt in een bepaald golflengtegebied, 2) er wordt licht aangeboden van een bepaald golflengtegebied en de camera maakt een beeld van het gereflecteerde licht.



*Figuur 1. In het bovenste gedeelte van de figuur de filterkarakteristieken van een RGB-camera. Dit geeft drie afzonderlijke beelden. Onder, bij spectraal worden tientallen beelden ieder opgenomen bij een ander golflengte (<http://www.cri-inc.com>).*

Een bekende uitvoering van een spectrale camera is de conventionele kleurencamera. Er worden drie beelden gemaakt met een rood- groen- en blauw filter (Figuur 1). Dit levert drie afzonderlijke beelden op die ieder in grijs-waarde, de intensiteit van de afzonderlijke kleuren weergeeft. Menging van deze drie beelden geeft een kleurenbeeld. Een spectrale camera kan in één of vele spectrale gebieden een beeld maken. De keuze van de spectrale gebieden en het aantal hangt o.a. af van de toepassing en de ruimte die beschikbaar is voor het aantal optische filters. Een veel gebruikte technologie bij spectrale camera's is het gebruik van een schijf met optische filters die ieder afzonderlijk voor de camera wordt gepositioneerd. Door de schijf te roteren kan bij verschillende golflengtegebieden opnamen worden gemaakt.



*Figuur 2. Een multispectraalcamera van de firma ForthPhotonics met een acht-positie filterwiel voor even zoveel spectrale banden met een 8-bit camerasensor (<http://musis.forth-photonics.com>).*

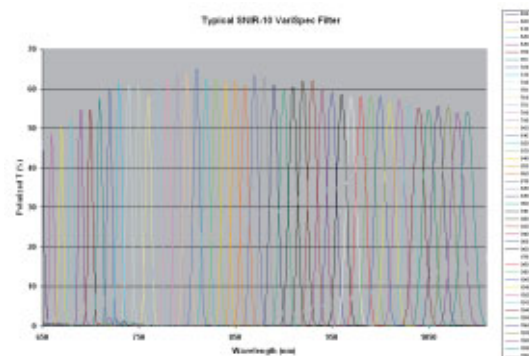
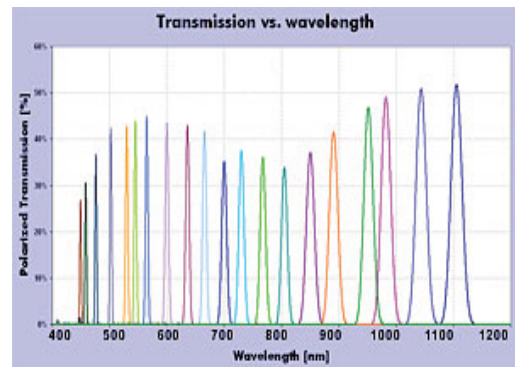
Een nieuwe ontwikkeling is een elektronisch optisch filter: liquid crystal tunable filter (LCT). Met een dergelijk filter kan in een zeker golflengtegebied, bijv. in het zichtbaar of nabij-infrarood, de centrale golflengte van het filter willekeurig worden gekozen via elektronische aansturing door een computer. Voordeel van deze werkwijze is dat er geen mechanische bewegingen zijn van een roterende schijf, dat een filtergolflengte binnen circa 10-500 ms kan worden ingesteld afhankelijk van de golflengtescan die gemaakt moet worden en vrije keuze van spectrale banden binnen het spectrale gebied. Nadeel is de hoge aanschafprijs van circa k€40 (incl. BTW) en dat een liquid crystal tunable filter voor een bepaald golflengtegebied geschikt is. Echter, er zijn nu filters op de markt met een voldoende groot golflengte bereik voor bepaling van groenheid en paarsverkleuring (Filter LCTF-1 in Tabel 1).

Tabel 1. Overzicht van commercieel verkrijgbare liquid crystal tunable filters van Meadowlark Optics, (<http://www.meadowlark.com>).

SPECIFICATIONS & ORDERING INFORMATION				
	LCTF-1	LCTF-2	LCTF-3	Design Parameter Space
Wavelength Range:	420-1000 nm	1071-1078 nm	900-1700 nm	350-2500 nm
Full Width at Half Max (FWHM)	5 nm @ 550 nm	0.2 nm @ 1075 nm	6 nm @ 1300 nm	0.1 to 100 nm
Polarized Peak Transmission:	5% to 30%	56%	10% to 40%	80% max (based on design)
Tuning Resolution:	0.1 nm	0.001 nm	0.1 nm	~ 2% FWHM
Field of View (Half Cone Angle):	7°	3°	3°	Based on design
Switching Speed:	< 100 msec	< 100 msec	< 100 msec	10 to 500 msec
Temperature Range:	10° C - 35° C	10° C - 35° C	10° C - 35° C	10° C - 35° C

KEY BENEFITS	
•	Broad spectral range
•	High peak transmission
•	Uniform clear aperture
•	Temperature control
•	Replace thousands of filters
•	No spacer balls in the clear aperture
•	Calibration which does not vary with ambient temperature
•	Wide field of view



Figuur 3. Liquid crystal tunable optical filter met transmissie eigenschappen boven van Meadowlark Optics (<http://www.meadowlark.com>) en onder van Cambridge Research Instrumentation (<http://www.cri-inc.com>).

Een andere benadering om meerdere spectrale beelden te genereren is een ontwerp met meerdere beeldsensoren, waarbij iedere beeldsensor zijn eigen optische vaste filter heeft. Na de lens wordt de lichtbundel via optische splitters naar de verschillende beeldsensoren geleid (Figuur 4). Voordeel van dit ontwerp is dat de metingen in de verschillende spectrale gebieden simultaan kunnen worden gedaan. Hierdoor kan met hogere nauwkeurigheid worden gecorrigeerd voor omgevingslicht. Nadeel is dat het aantal spectrale gebieden gelimiteerd is tot circa vijf, omdat het technisch complex is en duur wordt om een camerasysteem te bouwen met meer dan vijf spectrale gebieden.



*Figuur 4. 3CCD camera (14-bit=16384 grijswaarden) van de firma FluxData waarmee simultaan met drie beeldsensoren in drie afzonderlijke spectraalgebieden naar klant specificaties beelden kunnen worden opgenomen. Tevens heeft dit model een ruime keuze aan beeldsensoren van 1.4, 2.0 of 5.0 Megapixel (<http://www.fluxdata.com>).*



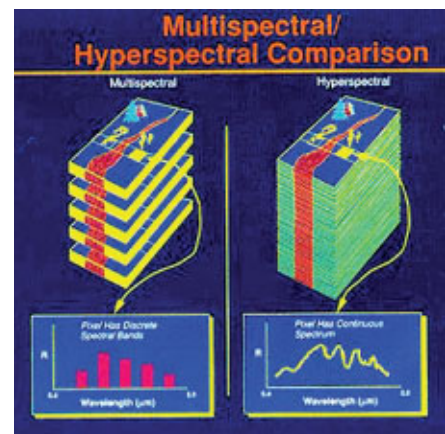
*Figuur 5. Camerasysteem van de firma Quest innovations bestaande uit vijf individuele CMOS-beeldsensoren (10-bit=1024 grijswaarden) voor het gelijktijdig opnemen van vijf spectrale beelden. Rechts een beeld van het inwendige (<http://www.quest-innovations.com>).*



### 3.1.2 Hyperspectraal

Het verschil tussen multi- en hyperspectraal is het aantal spectrale gebieden. Van multispectraal is sprake als het aantal spectrale gebieden varieert van een paar tot enkele honderden banden. Vaak zijn deze banden dusdanig gekozen zodat specifieke optische karakteristieken kunnen worden berekend. Van hyperspectraal wordt gesproken als het aantal spectrale gebieden zich uitstrekt over duizenden banden en het golflengteverloop van deze banden continue is. Met het elektronisch verstelbare liquid crystal filter kan zowel multi- als hyperspectraal worden gemeten. In geval van multi worden meerdere discrete golflengte gebieden uitgekozen. Bij hyper wordt het filter met zeer kleine stapjes in golflengte verstemd, zodat een bijna continu verloop in de golflengte van de spectrale beelden wordt gemaakt. Bij hyperspectraal wordt zeer gedetailleerd gemeten en levert zeer grote bestanden ( vele Gb) die veel computertijd kosten om door te rekenen. Een andere methodiek om hyperspectraal beelden te maken is met behulp van de lmspector technologie ([http://www.spectralcameras.com/files/downloads/TN6\\_lmS\\_with%20fiber%20optic%20lighline.pdf](http://www.spectralcameras.com/files/downloads/TN6_lmS_with%20fiber%20optic%20lighline.pdf) . Om spectrale beelden te kunnen opnemen, moet de camera over het voorwerp worden gescand. Bij deze technologie wordt bij een stilstaande camera spectrale informatie gemeten van één beeldlijn van het beeld. Op de x-as een specifieke beeldlijn uitgedrukt in het beeldlijnummer met op de y-as de individuele pixels van de desbetreffende beeldlijn en op de z-as de reflectie per golflengte. Door de camera te scannen over het voorwerp ontstaat op de x-as iedere keer een nieuwe beeldlijn. Op deze wijze ontstaat per golflengte een spectraal 2D-beeld. Deze methode is zeer geschikt om in te bouwen in een vliegtuig of satelliet voor remote sensing, omdat voor het opbouwen van een beeld de scannende beweging wordt gemaakt tijdens het overvliegen. Deze methode is minder geschikt voor praktijktoepassing op planten in de kas, omdat de opnamen veel tijd kosten en een scannende beweging moet worden gemaakt, waardoor de belichting op de plant niet constant blijft. Tevens is deze methode moeilijk met 3D-technologie te combineren.

*Figuur 6. Multispectraal resulteert in spectrale informatie over discrete en vaak beperkt aantal golflengten. Hyperspectraal geeft spectrale informatie met een continu verloop in de golflengte. (<http://en.wikipedia.org/wiki/File:MultispectralComparedToHyperspectral.jpg>).*



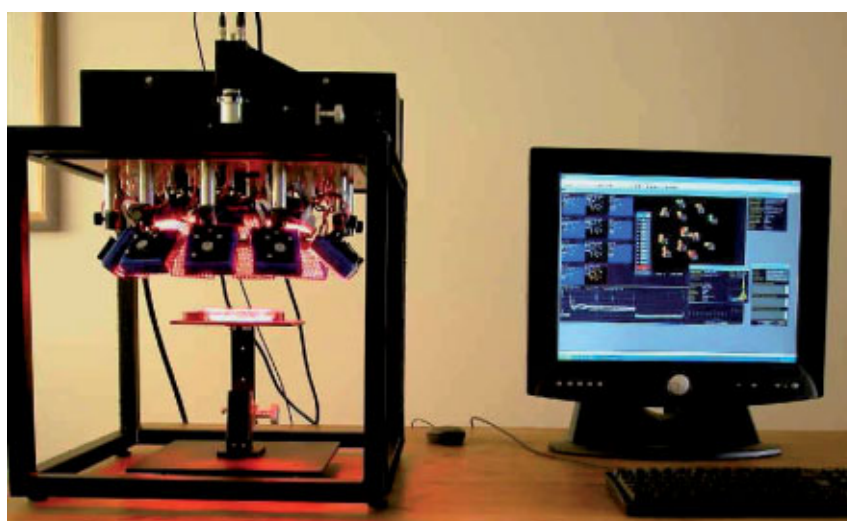
*Figuur 7. Links een hyperspectrale camera van de firma Surface Optics Corporation (<http://www.surfaceoptics.com>), rechts een hyperspectrale camera van de firma Spectral Imaging Ltd., beide met de lmspector technologie (<http://www.specim.fi>).*

## Fluorescentie

Een fluorescentie camera is op een heel ander principe gebaseerd dan een reflectie spectraal camera. Stoffen die fluoresceren hebben de eigenschap dat aangestraald licht wordt geabsorbeerd en een fractie van dat licht weer wordt uitgezonden met een andere golflengte die groter is dan van het aangestraalde licht. Door dit effect kunnen stoffen die deze eigenschap hebben heel specifiek en gevoelig worden gemeten. Dit is tegenstelling tot een spectrale reflectie meting, omdat dit signaal is opgebouwd uit de reflectie signalen van vele stoffen die tegelijk worden aangestraald en het licht reflecteren. Met fluorescentie kunnen dus stoffen selectief worden gemeten, omdat een stof deze eigenschap vertoont als deze met de juiste golflengte wordt aangestraald en de fluorescentie bij de juiste golflengte wordt gemeten. Bij een bepaalde stof hoort dus een combinatie van aangestraalde – en uitgezonden golflengten (excitatie-emissie spectra). Voor planten is chlorofyl (bladgroen) een stof met sterk fluorescerende eigenschappen. Deze fluorescerende eigenschappen kunnen voor praktijktoepassingen goed worden ingezet om plantaardig materiaal van ander vreemd materiaal te onderscheiden. Verschillende fabrikanten leveren fluorescentie camera's, maar meestal voor opnames van gedeelten van planten en bladeren op korte afstand. Deze camera-systemen bestaan uit een digitale camera met optisch filter, lens en een lichtbron in de vorm van LED's.



*Figuur 8. Links een chlorofyl fluorescentie camera, Fluorcam, voor het screenen op fotosynthese activiteit en groei van Photon Systems Instruments (<http://www.psi.cz>). Standaard kan een oppervlak van 20x20 cm<sup>2</sup> worden opgenomen. Rechts een Imaging PAM van de firma Waltz voor het opnemen van chlorofyl fluorescentie beelden van een oppervlakte van maximaal 10x13 cm<sup>2</sup> (<http://www.walz.com>).*



*Figuur 9. CF Imager van de firma Technologica met een meetoppervlak van 12x17 cm<sup>2</sup> (<http://www.technologica.co.uk>).*



## Diepte informatie

Voor het genereren van 3-dimensionale opnames van planten moeten meerdere beelden worden gemaakt. De eenvoudigste methode om diepte informatie te verkrijgen is het opnemen van twee beelden waarbij de opname van het tweede beeld de camera over een kleine afstand, die loodrecht op de kijkrichting staat, wordt verplaatst. Een andere methode is dat er meerdere opnames onder verschillende hoeken worden gemaakt. Met geavanceerde software kan een 3D-beeld worden berekend. Een derde methode is het projecteren van gestructureerd licht op het voorwerp en opname van verschillende beelden met één camera. Hieruit kan weer een 3D-beeld worden gereconstrueerd. Een recente ontwikkeling is de time of flight camera. Deze berekent de diepte informatie uit het tijdsverschil van de reflecties van de verschillende oppervlaktes.

### 3.1.2.1 Stereo vision

Deze methode is eigenlijk afgekeken van de natuur en gebaseerd op de wijze waarmee de mens ook diepte informatie verkrijgt. Door met twee ogen eenzelfde beeld, maar iets verschoven, naar de hersenen te sturen, kunnen de hersenen diepte informatie 'berekenen'. Dit is technisch de eenvoudigste methode om diepte informatie te verkrijgen. Bij camera's worden twee identieke camera's gebruikt, of wanneer het kostbare camera's betreft wordt het tweede beeld opgenomen, door de camera over een kleine afstand, die loodrecht op de kijkrichting staat, te verplaatsen.



Figuur 10. Stereo vision camera Bumblebee 2 van de firma PointGrey Research (<http://www.ptgrey.com>).

### 3.1.2.2 Meerdere camera's

Voor het produceren van 3D-beelden met conventionele camera's moet uit meerdere hoeken t.o.v. de plant opnames worden gemaakt. Dit kan door de camera rond te plant te laten roteren en uit circa 6 á 8 verschillende hoeken opnames te maken. Een tweede optie is om met meerdere camera's onder verschillende hoeken tegelijkertijd opnames te maken. Met software kan uit de gemaakte opnames een 3D-beeld worden gereconstrueerd. Nadeel is dat deze methode bij de toepassing van één camera veel tijd kost of in het geval van meerdere camera's kostbaar kan zijn door het aantal camera's.



Figuur 11. Multi camera systeem EFG400 van de firma Ellips voor het meten van kleur en dimensies van agrarische producten (<http://www.ellips.nl>).

### Gestructureerd licht

Een andere technologie werkt met gestructureerd licht in de vorm van een laserlijn of beamer en één of twee camera's onder een verschillende hoek met de lichtbron. Een laserscanner projecteert een scannende laserlijn over het voorwerp. Tijdens de scan worden door de camera beelden opgenomen. Uit het profiel van de laserlijn kan met software uit de gemaakte opnamen een 3D-beeld worden gereconstrueerd. Deze scannende laserlijn is een veel gebruikte technologie in de industrie om 3D-gegevens van producten digitaal in de computer op te slaan, bijvoorbeeld bij het digitaliseren van kleimodellen van een nieuw auto-ontwerp. Een eerste toepassing van het volgen van de groei van planten werd gerealiseerd door een Canadese onderzoeksgroep (zie Bijlage 1). Zij gebruikten een laserscanner (Laser Camera System, LCS) van de firma Neptec Design Group (<http://www.neptec.com>). Deze firma heeft een laserscanner ontwikkeld in opdracht van NASA voor het in de ruimte inspecteren op beschadigingen van de hittetegels van de Spaceshuttle.



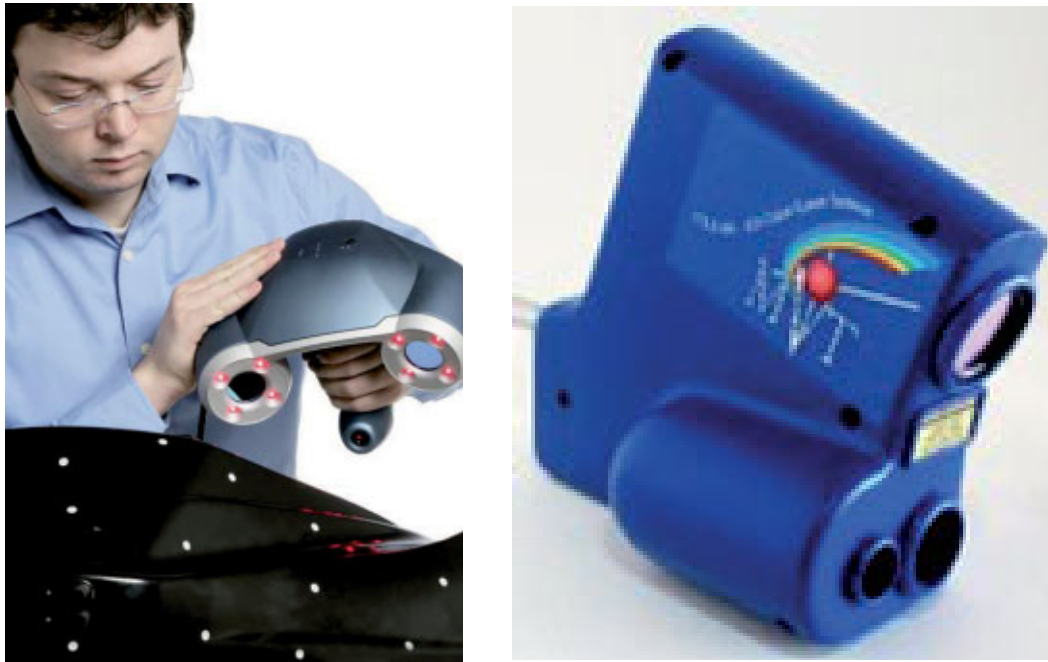
*Figuur 12. De laser camera system, LCS, van de firma Neptec Design Group gemonteerd op de arm van de Spaceshuttle voor het inspecteren van de hittetegels (<http://www.neptec.com>).*



*Figuur 13. Laserscanner van Automation Technology (<http://www.automationtechnology.de/cms/3d-camera.html>).*



*Figuur 14. Drie voorbeelden van industriële laserscanners met links het 3DLS systeem van het Fraunhofer Institute (<http://www.3d-scanner.net>), midden de T-scan 3 van de firma Steinbichler Optotechnik GmbH (<http://www.steinbichler.de>) en rechts de Bioscanner van de firma BioSculptor (<http://biosculptor.com/bioscanner>).*



*Figuur 15. Links een laserscanner, de REVscan, van de firma Creafom die zichzelf automatisch kalibreert (<http://www.creaform3d.com>); rechts een CLS Series Real Time Color 3D Laser Sensor voor 3D kleuren beelden van Micrometric Vision technologies (<http://www.micrometric-vision.com/Products.html>).*

Een recent ontwikkelde technologie analoog aan de laserscanner gebruikt een beamer i.p.v. een laser. De beamer projecteert een reeks van verschillende patronen van lijnen op het voorwerp en via opnames met een camera die correspondeert met de verschillende patronen kan een 3D-beeld worden gereconstrueerd.



Figuur 16. Comet 5 van de firma Steinbichler Optotechnik GmbH (<http://www.steinbichler.de>).

**MEPHISTO EXTREME V1.5**

Mephisto Extreme 3D scanning system was designed by professionals for professionals with very strict requirements in mind - reliable, precise and very flexible scanning solution at affordable price. Mephisto Extreme is one of the most flexible and adaptable 3d scanners on the market with the quality that beats most expensive competition. While Mephisto software provides extensive options for the skilled professionals to do the job in the most challenging conditions, it is still easy to use even for a novice. This High Definition scanner was designed without compromise for outstanding quality and performance.

**Scanning Principle**

Mephisto family scanners use the combination of the Gray code and the digital fringe shifting technology. Binary patterns of the Gray code are used to index projector and camera image pixels, while phase shifting produces high precision sub-pixel accuracy without ambiguity.

This combination is one of the most robust and reliable structured light methods. Our technology pushed Gray code/digital fringe shifting method to its limits to achieve quality and flexibility needed by professionals.

Mephisto interface allows users to choose wide variety of combinations of binary bit words and fringe images. Mephisto users can find the way optimal combination to scan most difficult objects and surfaces - like fur or black materials. It is possible to choose high pattern frequencies for unbelievable precision and quality or low frequencies for speed of scan/scan/scan and for.

Fringe and binary code processing algorithms are designed to correct hardware-related, projector imperfections, digital and analog system noise and other factors affecting 3D scanning quality.

**Hardware and Components**

We designed Mephisto family scanners using consumer electronics and mass produced machine vision components. These components are higher quality, more reliable and more cost effective than custom-made components.

Standard components helps to develop and upgrade our solutions faster using much more mature technologies. This approach helps to provide high-end quality products with minimum maintenance issues or delays.

Standard connectivity using FireWire, USB and VGA formats gives Mephisto system flexibility in choosing "middleware" system and gives unparalleled opportunity to grow and improve systems with every new component development on the market.

Mephisto 3D scanner is mounted on rigid adjustable base to give maximum flexibility in choosing mounting surface and distance. All components are designed and used by best suppliers in the industry.

And although initial set that comes with Mephisto Extreme could be used in all imaginable conditions, Mephisto users are free to expand and modify mounting gear using standard photography, video and machine vision components to fit even most specific needs.

Gray code and fringe patterns

Figuur 17. Software pakket Mephisto Extreme V1.5 van de firma 4D Dynamics Bvba kan met een beamer en camera naar eigen keuze worden gewerkt (<http://www.4ddynamics.com>). Prijs indicatie software k€14.



Figuur 18. Een 3D scanner die flexibel in gebruik van camera en beamer is. Prijzen variëren van k\$4 tot k\$6 afhankelijk van de kwaliteit van de beelden. <http://www.3d3solutions.com/products/hardware/features.php>

### 3.1.2.3 Time of flight (TOF) camera

Met één tof-camera kunnen 3D-beelden worden opgenomen in real time. De diepte informatie in het beeld wordt per pixel berekend uit het tijdsverschil dat een lichtbundel er over doet om van een gemoduleerde lichtbron via een reflectie van het voorwerp op de CCD van de camera te komen. Deze recent ontwikkelde camera's zijn speciaal geschikt voor snel veranderende situaties, omdat deze camera circa 30 beelden per seconde kan verwerken. Na-deel is de lage resolutie, circa 176x144 pixels <http://www.mesa-imaging.ch>, en de diepte resolutie van circa 1 cm.



*Figuur 19. Time of flight camera van de firma Mesa Imaging pixels (<http://www.mesa-imaging.ch>).*



## 4 Evaluatie van de beschikbare meetapparatuur

In dit hoofdstuk worden de verschillende meetsystemen die de industrie kan leveren geëvalueerd waarbij speciaal gelet wordt op de mogelijkheid tot bepaling van de groenheid, paarsverkleuring en groei van de tomatenkop.

### 4.1 Meetprincipes en parameters voor plantkwaliteit

Om de verschillende parameters, die een maat zijn voor de teler van de voortgang van het teeltproces, vast te stellen worden ze opgedeeld in twee klassen, te weten kleurveranderingen in groenheid en paarsverkleuring, veroorzaakt door een verandering in concentraties van inhoudsstoffen en morfologische kenmerken zoals in dit geval groei. Aan de hand van de boven beschreven vier meetprincipes, multi-, hyperspectraal, fluorescentie en 3D, zal worden nagegaan welke meetsystemen het beste geschikt zijn voor het bepalen van de gestelde eisen.

#### 4.1.1 Multispectraal

Met multispectraal worden in specifieke golflengtegebieden beelden gemaakt die correleren met bepaalde inhoudsstoffen. Eén daarvan is chlorofyl. Deze inhoudstof kan worden gebruikt om in het beeld de plant te lokaliseren. Hiervoor zullen minimaal twee metingen moeten worden uitgevoerd, één op een absorptie band van chlorofyl en één in een gebied waar het chlorofyl goed reflecteert. Uit het verschilbeeld kan de plant worden geïdentificeerd. Tevens worden deze metingen gebruikt om de groenheid te berekenen. Een tweede inhoudsstof die op deze wijze gemeten kan worden is anthocyaan die verantwoordelijk is voor de paarsverkleuring. Door nu twee beelden op te nemen bij twee andere golflengten kan een beeld worden berekend die een maat is voor het aanwezige anthocyaan.

Voor de groenheid en paarsverkleuring kan hetzelfde referentiebeeld gebruikt worden. Er moet dus minimaal in drie spectraalbanden worden gemeten. De beste optie lijkt hier de 3CCD camera van Fluxdata. Deze camera voldoet aan de eis van drie spectraalgebieden en tevens heeft deze camera een groot dynamisch bereik omdat hij 14-bit is. Een LCT-filter zou ook kunnen worden toegepast, maar dit is een dure oplossing. Wel komt de LCT technologie in beeld wanneer er meer inhoudsstoffen zouden moeten worden gemeten.

#### 4.1.2 Hyperspectraal

Bij hyperspectraal metingen met een camerasysteem met de lmspector technologie wordt de camera over de tomatenkop gescand en worden er continue opnames gemaakt. Deze technologie is niet eenvoudig te combineren met een 3D-technologie. De technologie die overblijft om hyperspectraalbeelden te maken is het LCT-filter. Deze is wel te combineren met een 3D-technologie. De hyperspectraaltechnologie is voor het bepalen van de groenheid en paarsverkleuring van een tomatenkop niet nodig. Voor de bepaling van de groenheid en paarsheid zijn geen beelden nodig met een continu verloop in de golflengte. Drie beelden in verschillende spectraal banden zouden voldoende moeten zijn, zodat multispectraal de voorkeur heeft boven hyperspectraal.

#### 4.1.3 Fluorescentie

Met een fluorescentie meting kan nog beter dan bij een multispectraal meting de plant worden gelokaliseerd. Deze meetmethode geeft alleen voor plantmateriaal een signaal. Ander materiaal in de opname zal geen signaal geven en is dus als zwart te zien in de opname. Hierdoor is het zeer eenvoudig voor de software om berekeningen aan de plant uit te voeren. De groenheid van de tomatenkop is ook te meten met fluorescentie door bij twee spectraal-



banden licht aan te bieden en fluorescentie opnames te maken. Uit deze twee opnames kan een nieuw beeld worden berekend die een maat is voor de groenheid. Voor de paarsverkleuring geldt eenzelfde protocol, maar nu bij andere golflengten van het aangeboden licht. Deze twee golflengten worden dusdanig gekozen dat de ene goed en de andere slecht door anthocyaan wordt geabsorbeerd. Deze fluorescentie camera's zijn niet commercieel beschikbaar. Wel bestaan fluorescentie camera's die chlorofylfluorescentie meten, maar het af te beelden oppervlak is te klein om een tomatenkop volledig in beeld te krijgen. Combinatie van fluorescentie met multispectraal is goed mogelijk in een camerasysteem. Dergelijke systemen zijn commercieel niet beschikbaar voor het meten van de tomatenkoppen, maar wel in laboratoria ontwikkeld (o.a. WUR Glastuinbouw).

#### 4.1.4 3D

Een 3D-technologie meet ruimtelijke informatie en kan dus geen groenheid en paarsverkleuring meten. Wel moet het mogelijk zijn om 3D-technologie met multispectraal of fluorescentie te combineren. 3D-technologieën zijn bij uitstek geschikt om morfologische parameters uit het beeld te berekenen. De technologie die voldoet aan de gestelde eisen van lengte en dikte van de steel te berekenen is stereo vision. Deze technologie is de meest eenvoudige uitvoering om tot het gewenste resultaat te komen. Commerciële systemen die multi-, hyperspectraal of fluorescentie combineren met stereo vision bestaan niet. De beste optie is om de 3CCD Fluxdata camera te gebruiken in drie spectraalbanden en op twee posities deze beelden te maken. Stereo vision software moet dan worden geschreven om de groeiparameters te kunnen berekenen.

#### 4.1.5 Multispectrale reflectie fluorescentie camera WUR Glastuinbouw

Bij Wageningen UR Glastuinbouw is een camerasysteem ontwikkeld waarmee in acht spectraalbanden reflectie beelden kunnen worden opgenomen in combinatie met fluorescentie opnamen in drie spectraal banden. Dit camerasysteem werkt met een filterwiel en 16-bit camera met 65536 grijswaarden per pixel. Actieve belichting met witte LED's wordt gebruikt voor de reflectie spectrale beelden. Drie fluorescentie beelden worden gemaakt door de planten aan te stralen met drie verschillende kleuren LED's. Met deze camera kunnen dus 11 verschillende spectraal beelden worden gemaakt. Met dit camerasysteem kan worden uitgetest welke methode, multispectraal of fluorescentie, het beste geschikt is om de plant te herkennen, groei, groenheid en paarsverkleuring te meten.



*Figuur 20. Links een kleuren opname van een anthurium plant. De donker groene kleur is voor software moeilijk te onderscheiden van de achtergrond. Rechts de chlorofyl fluorescentie opname van dezelfde plant. Met deze opname kan de software veel eenvoudiger de plant herkennen.*



#### 4.1.6 Conclusie

Als eerste moet de software in staat zijn om de plant te herkennen uit een gemaakte opname. De technologie die gebruik maakt van fluorescentie lijkt de beste methode (Tabel 2). Zoals al eerder opgemerkt, is in een opname alleen plantaardig materiaal te zien die chlorofyl bevat. Dus een fluorescentie opname van de tomatenkop laat alleen de plant zelf zien en geen klimdraad of achtergrond van ander materiaal dan plantaardig (Fig. 21). Verschillende fabrikanten leveren fluorescentie camera's, maar deze systemen zijn ontworpen voor metingen aan parameters van de fotosynthese. Verder moet de belichting worden uitgebreid met andere kleuren LED's om de groenheid en paarsverkleuring te kunnen bepalen. Een ander probleem is de software. Deze zal moeten worden herschreven, maar fabrikanten geven vaak geen toestemming om hun software aan te passen. Combineren van de fluorescentie - met een 3D-technologie moet goed mogelijk zijn. De beste optie is hier stereo vision. Ook voor deze uitbreiding met diepte informatie zal de software moeten worden herschreven. Op dit gebied zijn al veel algoritmen beschikbaar.

Complete beeldvormende multispectraal systemen worden niet door de fabrikanten geleverd. Wel zijn camerasystemen beschikbaar die in meerdere spectraalbanden opnames kunnen maken. Deze spectraalbanden kunnen op klantspecificaties worden besteld. Het camerasysteem dat het beste voldoet aan de gestelde eisen van dynamisch bereik en minimaal drie spectraalbanden is de FD-1665 van de firma Fluxdata. Tevens heeft dit model een ruime keuze aan beeldsensoren van 1.4, 2.0 of 5.0 Megapixel. Deze multispectrale camera is goed te combineren met één van de 3D-technologieën (Tabel 3).

De technologie die hyperspectraal beelden genereert en gecombineerd kan worden met 3D is de toepassing van het LCT-filter. Dit filter kan ook multispectraal worden gebruikt. Dit filter is mogelijk een goed alternatief als de methodiek met meerdere beeldsensoren van Fluxdata niet voldoet.

De technisch en softwarematig eenvoudigste technologie voor het verkrijgen van 3D-informatie is stereo vision. Deze technologie kan uitstekend gecombineerd worden met multispectraal of fluorescentie. De andere 3D-technologieën die werken met gestructureerd licht in de vorm van een laser of beamer zijn mogelijk ook goed te combineren met multispectraal of fluorescentie, maar technisch complexer en niet nodig voor het bepalen van de lengte en dikte van de stengel.

Een alternatief camerasysteem om de verschillende reflectie- en fluorescentie spectraal banden te testen, is het camerasysteem van WUR Glastuinbouw. Deze camera voldoet aan de technische eisen van voldoende dynamisch bereik (16-bit) en voldoende spectraal gebieden om groenheid en paarsverkleuring te kunnen meten (8 spectraal - en 3 fluorescentie banden). Tevens heeft deze camera een actieve belichting om donkere delen van de plant te kunnen bijbelichten.

*Tabel 2. Overzicht van de verwachting dat de software de plant kan herkennen uit de opname en plantparameters kan berekenen met één van de opgesomde technologieën, (++) zeer positief, + = positief, o = neutraal, - = negatief).*

Meetprincipe	Plant herkenning	Plant parameters		
		Morfologische	Groenheid	Paarsverkleuring
Multispectraal	+	-	+	+
Hyperspectraal	+	-	+	+
Fluorescentie	++	-	+	+
Stereo vision	o	+	-	-
3D	o	++	-	-

Tabel 3. *Overzicht van de verwachting dat een spectrale technologie gecombineerd kan worden met een 3D-technologie (++ zeer positief, + = positief, 0 = neutraal, - = negatief).*

Spectrale technologie	3D-technologie				
	Stereo	Bewegende camera	Meerdere vaste camera's	Gestructureerd licht van laser	Gestructureerd licht van beamer
Multispectraal	++	++	0	+	+
Hyperspectraal	0	-	-	-	-
Fluorescentie	++	++	0	+	+

## 5 Combineren van meetapparatuur tot één camerasysteem

Uit Tabel 2 kan worden afgeleid dat een 3D-technologie niet mag ontbreken. Alleen met een dergelijke meetmethode kunnen plantparameters als groei betrouwbaar worden berekend. Een 3D-technologie moet dan kunnen worden gecombineerd met één van de drie overgebleven meetprincipes om als eerste plantaardig materiaal te kunnen onderscheiden van de achtergrond om vervolgens de groenheid en paarsverkleuring te kunnen kwantificeren (Tabel 3).

### 5.1 Eenvoudigste ontwerp

Het camerasysteem is de duurste component van het gehele systeem om groenheid, paarsverkleuring en met 3D-informatie de groei te berekenen. Vandaar dat een ontwerp dat met één camera kan worden uitgevoerd de voorkeur heeft. De eenvoudigste uitvoering van een dergelijk meetsysteem is een camerasysteem bestaande uit een camera met meerdere beeldsensoren waarbij iedere beeldsensor een filter voor een speciaal spectraal gebied heeft en actieve belichting. Voor stereo vision moet het camerasysteem over een kleine afstand kunnen worden verplaatst. Voor het meten van een rij van planten moet het kunnen worden bewogen van plant naar plant (Fig. 22).

#### 5.1.1 Camera

Met de camera worden natuurlijk de beelden opgenomen. Deze camera kan niet van een eenvoudige uitvoering zijn met 256 grijswaarden per pixel, een zgn. 8-bit camera. De camera moet voldoende grijswaarden hebben, zgn. dynamisch bereik, om uit berekeningen van meerdere spectrale beelden bij verschillende golflengten een nauwkeurige uitslag van de groenheid of paarsverkleuring te kunnen berekenen. Meestal worden in deze berekeningen het verschil van twee spectrale beelden berekend en vervolgens gedeeld door een derde beeld voor de calibratie. Wordt een camera gekozen met te weinig grijswaarden, dan wordt de uitslag door de berekening erg onbetrouwbaar. Bij voorkeur moet de camera een dynamisch bereik hebben van 14-bit, dit zijn 16384 grijswaarden per pixel.

#### 5.1.2 Dedicated camera met filters

De firma Fluxdata levert een camerasysteem met 3 ingebouwde beeldsensoren met klant gespecificeerde optische filters (Fig. 4). Dit is de enige camera die drie beelden opneemt met een dynamisch bereik van 14-bit. Voordeel van dit camerasysteem is dat in maximaal drie spectraalbanden simultaan drie opnamen kunnen worden gemaakt. Hierdoor zullen intensiteitsvariëaties in het omgevingslicht zo weinig mogelijk invloed hebben op de uiteindelijke berekening van de groenheid en paarsverkleuring.

#### 5.1.3 Belichting

Actieve belichting in de vorm van een stabiele lamp of LED-array belicht de tomatenkop met licht van een breed spectraalgebied met in ieder geval spectrale golflengten die door de camera worden gemeten. Verder kan het omgevingslicht afkomstig van de zon als lichtbron worden benut. Het onderdrukken van het licht van de zon is in principe mogelijk, maar dit zou impliceren dat de actieve lichtbron een intensiteit zou moeten hebben vergelijkbaar met die van de zon. Hiervoor zou dus een zware lichtbron gebruikt moeten worden. Een betere oplossing is om het zonlicht te benutten en de actieve lichtbron te gebruiken om schaduw effecten te voorkomen, daar waar het zonlicht niet in voldoende mate komt.

### 5.1.4 Stereo vision

Voor diepte informatie worden met dezelfde camera twee opnames gemaakt. Eén op een gekozen positie zodat de tomatenkop goed in beeld is en een tweede door de camera over een kleine afstand, die loodrecht op de kijkrichting van de camera staat, te verplaatsen. Dit levert dus twee beelden waarvan de beelden iets van elkaar verschoven zijn. Door met software een onderdeel uit het beeld te kiezen, bijv. de stengel en deze op elkaar te matchen kan de afstand t.o.v. de camera worden berekend en vervolgens de lengte en dikte van de stengel.

### 5.1.5 Meer dan 3 spectraalbanden: Liquid crystal tunable filter of filterwiel

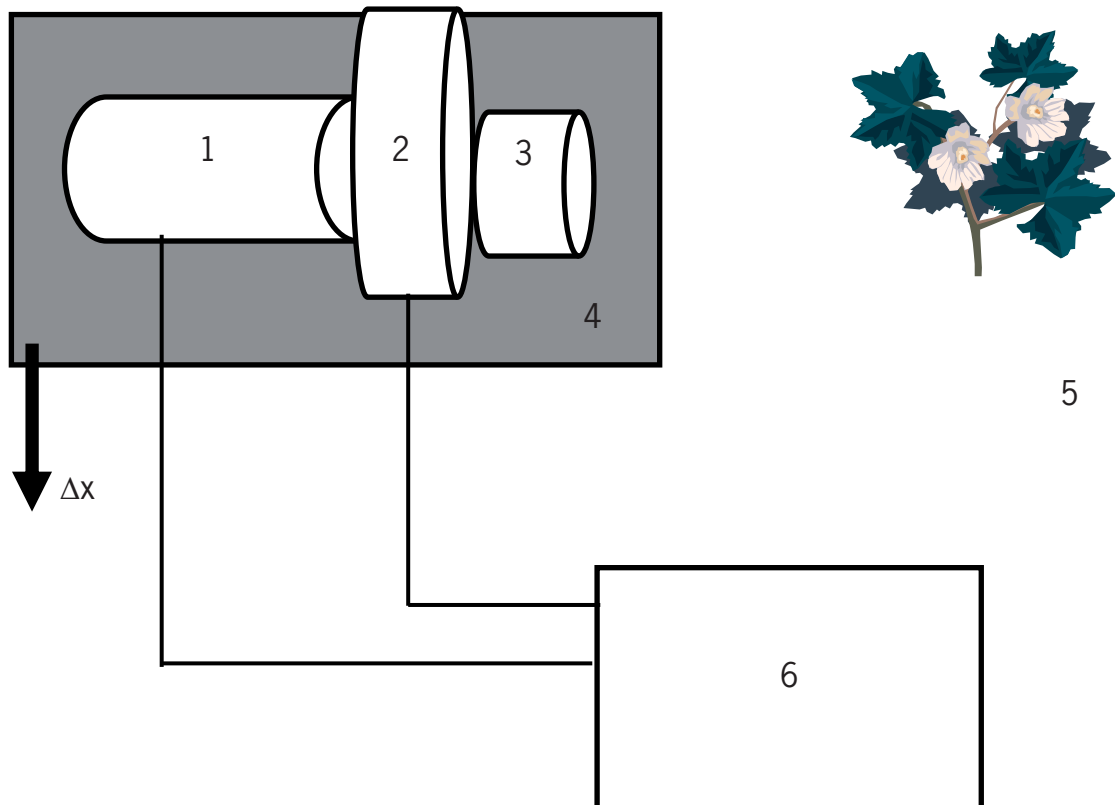
Moeten er meer inhoudsstoffen gemeten worden, dan is het noodzakelijk om in meer spectrale banden te meten. Bij een camerasysteem als Fluxdata is het aantal spectrale gebieden gelimiteerd tot drie, omdat het technisch complex is en duur wordt om een camerasysteem te bouwen met meer dan drie spectrale gebieden. Een liquid crystal tunable filter maakt het mogelijk om in principe in een oneindig aantal spectrale banden een meting te doen. Het liquid crystal tunable filter wordt door een computer aangestuurd om snel tussen spectrale banden te kunnen schakelen (<100 ms, Tabel 1) om zodoende tussen de benodigde spectrale beelden snel te kunnen meten met zo min mogelijk last van veranderingen in het omgevingslicht. Voordeel van het laatste systeem t.o.v. de hierboven beschreven dedicated camera met 3 beeldsensoren is dat dit een vrije keuze geeft van de spectrale banden binnen een bepaald spectraal gebied (Tabel 1). Nadeel is de hoge prijs (vanaf circa k€40) voor een liquid crystal tunable filter en het niet volledig simultaan opnemen van de beelden. Door deze laatste eigenschap kunnen snelle intensiteitveranderingen van het omgevingslicht de meting verstoren.

### 5.1.6 Betere herkenning van de plant met fluorescentie technologie

Mocht de multispectrale technologie niet goed werken in combinatie met software om de plant te herkennen, dan kan een fluorescentie camera worden toegevoegd. Wel moet dan bij vier spectraalbanden opnames worden gemaakt, drie voor de groenheid en paarsverkleuring en dan nog een extra spectraalband voor de fluorescentie. Dit kan worden opgelost door een LCT-filter te gebruiken voor selectie van de spectraalbanden. Dit is een kostbare oplossing. Een goedkoper alternatief is een filterwiel tussen de lens en de camera (circa k€2).

*Figuur 21. Opname van een tomatenkop in de kas bij daglicht met de fluorescentie camera die ontwikkeld is bij Wageningen UR Glastuinbouw. In dit plaatje is alleen plantaardig materiaal zichtbaar. Ander materiaal dat niet plantaardig is geeft een zwarte waarde. Voor software is het eenvoudig om de plant te herkennen.*

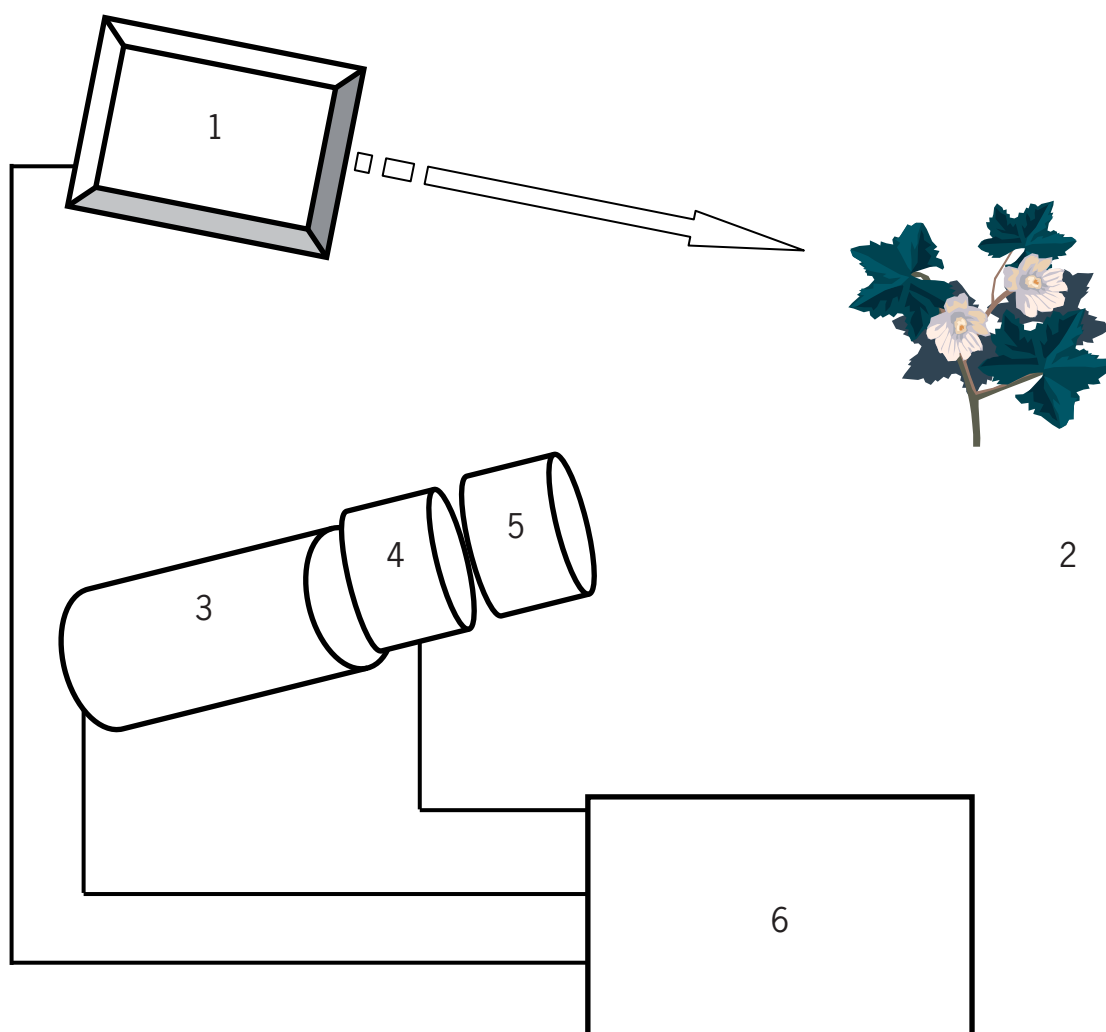




*Figuur 22. Stereo vision camera opstelling met een CCD-camera met 3 beeldsensoren met ieder een eigen bandpass filter. Voor diepte informatie worden twee beelden op genomen bij een verplaatsing van het camerasysteem over een bekende afstand  $\Delta x$ . Met dit meetsysteem wordt de plant uit de achtergrond herkend, stengeldikte en -lengte berekend en de groenheid en paarsverkleuring bepaald; 1: 3-CCD camera, 2: lichtbron, 3: lens, 4: verplaatsbare rail, 5: plant, 6: computer.*

## 5.2 State of the art: 'Echte' 3D-beelden

Een alternatief voor stereo vision is het opnemen van echte 3D-beelden door een laserscanner te combineren met een multispectraal meting. Door een rode laser te gebruiken wordt het chlorofyl in de plant aangeslagen en zal fluorescentie uit gaan zenden. Een camera met fluorescentie filter maakt opnames. Uit deze gegevens kunnen 3D-beelden worden berekend die alleen de tomatenplant in beeld brengt zonder enige achtergrond. Na het scannen met de laser worden de benodigde spectrale beelden opgenomen om de groenheid en paarsverkleuring te kunnen bepalen. Dit kan met één en dezelfde camera door een filterwiel of liquid crystal tunable filter te gebruiken om verschillende filters te selecteren voor fluorescentie - en spectrale metingen. Door deze beelden te combineren kunnen zowel morfologische parameters alsmede de groenheid en de paarsverkleuring in 3D worden gekwantificeerd.



*Figuur 23. 3D-camera opstelling met een scannende laserlijn voor 3D-informatie, filterwiel of liquid crystal tunable filter voor selectie van golflengten voor opname van 3D-fluorescentie - en spectrale beelden voor respectievelijk herkenning van de plant uit de achtergrond, berekening morfologische parameters en bepaling groenheid en paarsverkleuring; 1: laserlijn scanner, 2: plant, 3: camera, 4: filterwiel of liquid crystal tunable filter, 5: lens, 6: computer.*

## Bijlage I.

# 3D-scanning met laser technologie

### SPACE-AGE TECHNOLOGY'S SNAPSHOT OF CROP HEALTH

Of crop health

Written by **Heather Filby**

Laser camera system can accelerate the search for healthy, energy-efficient plants. "Growers could realize substantial cost-savings by choosing cultivars that perform well under less heat and light."



Noé Ortiz Uribe, Renee Cloutier and M. Javaid Iqbal (left to right) are part of a University of Guelph team developing a down-to-earth application for a space-age imaging system. Photo by Kyle Rodriguez

Canada's \$2-billion greenhouse industry depends on lighting, heating and cooling – three costly commodities in a northern climate. With rising energy prices, University of Guelph growers and researchers are looking to space technology for ways to screen and select healthy, energy efficient plants. It's led them to a Canadian-made 3-D laser camera system (LCS) that could help them identify cultivars that flourish in less-than-optimal conditions.

The laser camera was developed by Neptec Design Group Ltd. for the U.S. National Aeronautics and Space Administration (NASA) to take high-resolution images of the International Space Station and inspect the shuttle's tiles prior to re-entry. But Prof. Bernard Grodzinski and his team in the Department of Plant Agriculture have a down-to-earth application.

"Growers could realize substantial cost-savings by choosing cultivars that perform well under less heat and light," says Renée Cloutier, a graduate student in Grodzinski's lab. "This technology could help enhance the research to identify these cultivars."

Using a laser and a pivoting mirror, the LCS can scan a wide area. Its precise beam of laser light reflects off objects such as plants. A detector captures these reflections and creates a 3-D image of the plants. Using this data, researchers can determine stem height,

canopy area, leaf size, and other measurements. It's more accurate than traditional methods to measure these traits and it's non-invasive, says Cloutier.

By scanning multiple plants at the same time, the LCS is a big timesaver for the University of Guelph researchers using the new technology to monitor plant growth. The camera can also pinpoint disease-stricken plants in the early stages before growers notice visible signs of infection such as wilting leaves.

Graduate student Noé Ortiz Uribe and post doctoral fellows M. Javaid Iqbal and Evangelos Leonardos from Grodzinski's laboratory are collaborating with Prof. John Sutton and post doctoral fellow Weizhong Liu, Department of Environmental Biology, and Jonathan Brockerville, Adam DesLauriers and Iain Christie from Neptec Design Group Ltd. to test the LCS's ability to spot root rot infection.

They conducted their research with snapdragons, one of Canada's important cut flowers. The team inoculated half the plants with root rot fungus and compared the growth of healthy and infected plants.

Root rot, caused by a *Pythium* infection, doesn't always kill plants immediately. But in the early stages – before it's visible to the naked eye – it can begin stunting growth and leaf development.

Within a few days of inoculation, the growth rate of the diseased plants began to slow. The laser camera detected early changes in the plants too subtle for humans to see otherwise, says Cloutier. In fact, the LCS detected changes within 15 to 20 hours after the plants were infected – much faster than the typical three to five days it would take with human observation.

The camera's benefits aren't just limited to ornamental plants such as snapdragons, says Cloutier. It's an excellent research tool that could have a wide range of applications including automation of many greenhouse processes.

"This technology could have a big impact on monitoring crop health and production," says Cloutier.

This research is supported by Neptec Design Group Ltd., Flowers Canada, the Agricultural Adaptation Council, the Natural Sciences and Engineering Research Council, PanAmerican Seed, the Ontario Centres of Excellence – Centre for Earth and Environmental Technologies, and the Centro de Estudios Superiores del Estado de Sonora, Mexico. The LCS was on loan from Neptec Design Group Ltd.

Heather Filby is a writer with the SPARK (Students Promoting Awareness of Research Knowledge) program at the University of Guelph.

