

# Strategie für die Entwicklung eines photogrammetrischen Überwachungssystems für eine ressourcenschonende und automatisierte Bewässerung von Nutzpflanzenbeständen im Freiland- und im geschützten Anbau (PLANTSSENS)

## *Strategy for the Development of a Photogrammetric Monitoring System for a Resource-saving and Automated Irrigation of Crops in Open Field and Protected Environment (PLANTSSENS)*

Lukasz Rojek<sup>1</sup>, Klaus Hehl<sup>1</sup>, Matthias Möller<sup>1</sup>, Markus Richter<sup>2</sup>,  
Monika Bischoff-Schaefer<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Fachbereich Bauingenieur- und Geoinformationswesen, Beuth Hochschule für Technik in Berlin · lukasz.rojek@beuth-hochschule.de

<sup>2</sup>Fachbereich Life Science and Technology, Beuth Hochschule für Technik in Berlin

**Zusammenfassung:** Die Produktion von Obst und Gemüse im geschützten Anbau, aber auch im Freiland insbesondere im ökologischen Pflanzenbau in ariden Gebieten, ist von zusätzlicher Bewässerung abhängig. Um die Nutzpflanzen entsprechend ihrem aktuellen Wasserbedarf ortsgerecht zu bewässern, muss der Bestand permanent beobachtet werden. Im Rahmen des Projekts PLANTSSENS<sup>1</sup> wird ein multisensorisches Steuerungssystem für eine automatisierte Wasserstatusmessung mittels der Kombination von Nahinfrarot-, Wärmebild- und Kurzwelleninfrarot-Kameras entwickelt. Die optischen Kamera und die Positionierungssensoren werden zu einer photogrammetrischen Aufnahmeapparatur zusammengestellt, um anhand der zeitnahen Spektralauswertung der Bilddaten und einer präzisen Georeferenzierung orts- und bedarfsgerecht bewässern zu können.

**Schlüsselwörter:** Fernerkundung, Nahbereichsphotogrammetrie, Thermografie, Intelligente Landwirtschaft, Automatische Bewässerung

**Abstract:** *The production of fruits and vegetables in a protected environment (e. g. greenhouses) but also in the open field crops, especially in organic plant production in arid areas, depends on additional water supply. In order to achieve a precise and individually targeted irrigation matching the actual demand for water, the water status of the crop needs to be constantly monitored. The PLANTSSENS<sup>1</sup> project aims to develop a multisensory control system for automated water status measurement using a combination of near-infrared, thermal imaging and short-wave infrared cameras. The optical camera and positioning sensors will be combined within a photogrammetric monitoring system for automatic irrigation based on real-time processing and analysing of multispectral images and precise georeferencing.*

**Keywords:** *Remote sensing, close range photogrammetry, thermography, smart farming, automatic irrigation*

---

<sup>1</sup> <https://projekt.beuth-hochschule.de/plantsens/> (April, 2019)

## 1 Einleitung

Das menschliche Auge nimmt die Welt im sichtbaren Licht wahr. Dieser schmale Wellenlängenbereich von ca. 400 nm (blau) bis 750 nm (rot) ist nur ein Teil des vorhandenen Strahlungsspektrums. Der Einsatz von zusätzlichen optischen Messgeräten ermöglicht die Erfassung anderer Spektralbereiche, um weitere Informationen über die Beobachtungsobjekte zu ermitteln. Diese Informationen könnten bei Pflanzen zur Wasserstatusmessung eingesetzt werden. Wasser ist eine essenzielle Ressource für Pflanzen. Das Wachstum und der Ertrag, sowie die Qualität und Gesunderhaltung der Pflanze stehen in einem direkten Zusammenhang mit der Wasserversorgung. Die meisten Pflanzenbestände reagieren bereits auf minimale Änderungen in der Wasserverfügbarkeit sehr empfindlich (Jones et al., 2002), daher muss deren Wasserbedarf permanent kontrolliert werden. Die rechtzeitige Bestimmung einer mangelnden Wasserversorgung verhindert negative Auswirkungen auf die physiologischen Prozesse und damit den Ertrag der Pflanze.

## 2 Zielsetzung und theoretische Grundlagen

Im Rahmen des Projektes PLANTSSENS soll ein automatisiertes, intelligentes Steuerungssystem zur bedarfs- und zielgerechten Bewässerung von Nutzpflanzen im Freiland- und geschützten Anbau entwickelt werden. Mithilfe von unterschiedlichen Kamerasensoren in Wellenlängenbereichen von 400 nm bis 13.500 nm können relevante Einflussfaktoren, welche den Pflanzenstress verursachen, indirekt gemessen werden. Das System basiert auf der Kombination zweier verschiedener photogrammetrischer Aufnahmemethoden. Das erste Messverfahren basiert auf der Absorption der Lichtstrahlung vom Wasser im kurzwelligen Infrarotspektrum (SWIR). Diese weist insbesondere in den Bereichen 970 nm, 1.200 nm, 1.450 nm und 1.950 nm Maxima auf (Clevers et al., 2007; Ng et al., 2007). Hierbei werden entsprechende Bandpassfilter um 1.300 nm und 1.450 nm zur Bestimmung eines Wasserindex eingesetzt. Der „Normalized Difference Water Index“ (NDWI) berechnet sich nach Seelig et al. (2009) aus den Messwerten der höheren Absorption bei 1.450 nm ( $SWIR_{1450}$ ) und den Reflexionswerten der niedrigen Absorption bei 1.300 nm ( $SWIR_{1300}$ ) zu:

$$NDWI = \frac{SWIR_{1300} - SWIR_{1450}}{SWIR_{1300} + SWIR_{1450}}. \quad (1)$$

Hier ist im Besonderen die störende Einwirkung der Wasserpartikel in der Atmosphäre zu berücksichtigen. Die zweite Messmethode ermittelt den Wasserbedarf der Pflanze anhand der Blattemperatur, welche von der Transpirationsleistung und Leitfähigkeit der Stomata (Spaltöffnungen) abhängt (Leinonen et al., 2004). Die Oberflächentemperatur der Pflanze wird mit einer Wärmebildkamera ermittelt. Da die Infrarot-Thermografie ein berührungsloses Verfahren ist, muss auch hier der Einfluss der atmosphärischen Transmission und der Hintergrundobjekte auf die Infrarotstrahlung beachtet werden. Des Weiteren ist die Blattemperatur der Pflanze von ihrem Zustand der Wasserversorgung abhängig und kann zur Bestimmung des Wasserstressindex benutzt werden. In Bezug auf die gemessene Temperatur wird der „Crop Water Stress Index“ (CWSI) zur Bestimmung des Wasserzustands von Pflanzen nach Jones et al. (1992) wie folgt ermittelt:

$$CWSI = \frac{T_{Blatt} - T_{Feucht}}{T_{Trocken} - T_{Feucht}}. \quad (2)$$

Dabei beschreiben die Variablen  $T_{Blatt}$  die aktuelle Blatttemperatur,  $T_{Trocken}$  und  $T_{Feucht}$  jeweils die Temperatur bei komplett geschlossenen bzw. geöffneten Stomata (Cohen et al., 2005; Zia et al., 2009; Agam et al., 2013). Der CWSI basiert auf der Tatsache, dass die Differenz zwischen Bestands- und Lufttemperatur ansteigt, wenn Pflanzen unter Wasserstress stehen, da die Transpirationsrate als Kühlmechanismus abnimmt (Payero & Irmak, 2006). Die beiden Grenzwerte für die minimale und maximale Blatttemperatur werden unter Berücksichtigung der klimatischen Bedingungen bestimmt. Im Projekt PLANTSSENS wird das Potenzial der beiden Messmethoden zur Wasserstressbestimmung mittels der Infrarotstrahlung genau erforscht.

Die berührungslose Messung der Pflanzen erfolgt über eine selbstentwickelte photogrammetrische Apparatur mit einem integrierten multisensorischen Positionierungssystem. Eine präzise Positionsbestimmung und Georeferenzierung der Bilddaten spielt für eine automatische und bedarfsgerechte Bewässerung eine zentrale Rolle. Die aktuelle Positionsinformation der Messapparatur zum Zeitpunkt der Bildaufnahme ist erforderlich, um den ermittelten Wasserbedarf den Pflanzen korrekt zuzuordnen und im Endeffekt deren individuelle Bewässerung zu gewährleisten. Die Kameramodule lassen sich im Gegensatz zu üblichen Kontaktthermometern auf bewegliche Trägersysteme montieren, wodurch die Durchführung eines berührungslosen Messverlaufes in kontinuierlichen Messintervallen möglich ist. Eine zeitnahe Datenauswertung ist ein entscheidender Faktor, um das Eintreffen des Wasserstresses in seiner frühesten Phase zu erkennen. Dementsprechend dürfen die Zeitdifferenzen zwischen den ausgewerteten Bilddaten und den Messzeitpunkten nicht zu groß sein, sodass eine rechtzeitige Nachbewässerung innerhalb von einer Stunde möglich ist. Um den Auswertungsprozess zu optimieren, werden die Bilddaten direkt nach der Aufnahme bereits im Messsystem vorab analysiert und unmittelbar zum Server übertragen, auf dem eine präzise Spektralanalyse und Georeferenzierung stattfindet. Schließlich sollen die Kulturpflanzen anhand der ermittelten Ergebnisse ressourcenschonend, orts- und bedarfsabhängig, teilflächenspezifisch bewässert werden.

### 3 Systemarchitektur und Implementierung

Das Pflanzen-Monitoring-System beruht auf einer Client-Server Architektur. Gemäß Abbildung 1 ist das Projekt in zwei Entwicklungsphasen aufgeteilt. Die Systemarchitektur besteht aus einer Messeinheit, einer Wetterstation und einem zentralen Server. Die Kommunikation zwischen den einzelnen Subsystemen erfolgt netzwerkbasiert über das „Message Queuing Telemetry Transport“-Protokoll (MQTT-P<sup>2</sup>). Die Messeinheit besteht aus einer Kombination mehrerer Sensorelemente, die zueinander in einer vordefinierten Beziehung stehen und dadurch in bestimmter Reihenfolge gesteuert werden. Alle diese Elemente bilden das Multi-Sensor-Messsystem (MSMS), in dem die einzelnen optischen Sensoren unterschiedliche Messgrößen mit verschiedenen Aufnahmeprinzipien erfassen, um schließlich die Zielgröße, den Wasserbedarf der Pflanzen, zu bestimmen. Hierfür wird das Potenzial des „Nvidia Jetson

---

<sup>2</sup> <http://mqtt.org/> (April, 2019)

TX2<sup>3</sup> Rechenmoduls eingesetzt, welches die Programmier-Technik „Compute Unified Device Architecture“ (CUDA<sup>4</sup>) unterstützt. Somit können leistungsaufwendige Programmteile wie z. B. die Bild- und Positionsvoranalyse durch den Grafikprozessor (GPU) direkt im Messsystem abgearbeitet werden, ohne dabei den Hauptprozessor (CPU) zu belasten. Dies spart in letzter Konsequenz Rechenzeit und macht das System deutlich performanter. Der Infrarotsensor der Wärmebildkamera ist sowohl für die Strahlung des beobachteten Objektes, als auch für die Umgebungstemperatur und die Einwirkung der Luftfeuchtigkeit sensitiv. Um die Messverfälschungen bei der Spektralauswertung zu vermeiden, werden die atmosphärischen Bedingungen während der Bildaufnahme von der Wetterstation erfasst und mit einem Zeitstempel in einer vordefinierten Datenbankstruktur auf dem Server gespeichert. Damit ist der Server ein fundamentaler Teil des gesamten Monitoringsystems, welcher die jeweiligen Dienstprozesse zur Datenspeicherung, -auswertung und -visualisierung bereitstellt. Die Verarbeitung der Bilddaten findet mittels individuell erstellten Java- und Python-Programmrou-tinen statt. Um den Entwicklungsaufwand zu minimieren, wird bei der Umsetzung auf offene Frameworks wie z. B. „Open Source Computer Vision Library“ (OpenCV<sup>5</sup>) zurückgegriffen. Die Resultate lassen sich mittels moderner Web-Technologien, u. a. HTML, CSS und Javascript visualisieren. Der Server verfügt über eine öffentliche IP-Adresse, welche die Kommunikation und Integration über das Internet gewährleistet und einen Datenzugriff über das HTTP-Protokoll außerhalb des Hochschulnetzwerkes ermöglicht.

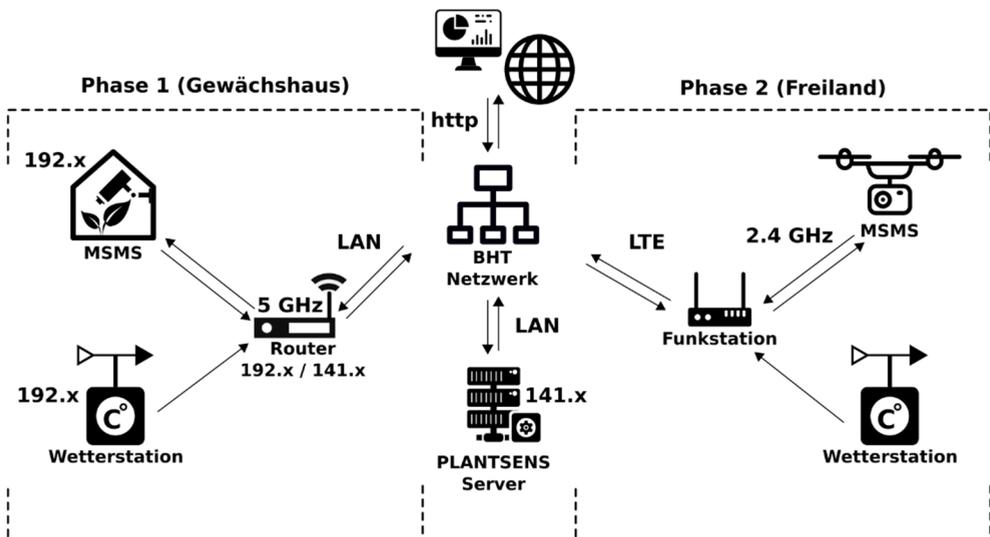


Abb. 1: Schematische Darstellung der Systemarchitektur

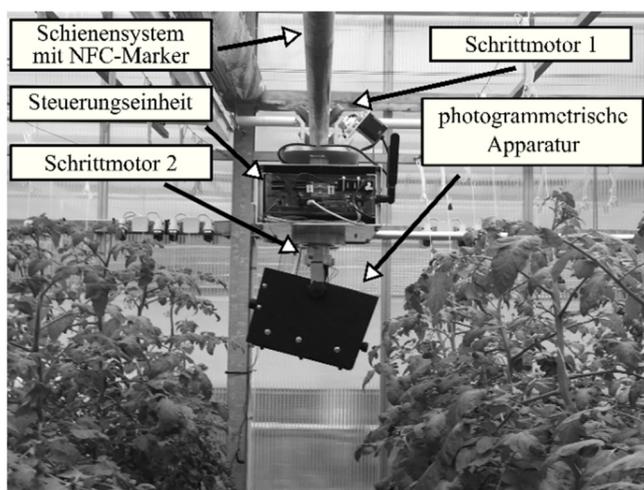
<sup>3</sup> <https://www.nvidia.com/de-de/autonomous-machines/embedded-systems/jetson-tx2/> (April, 2019)

<sup>4</sup> <https://www.nvidia.de/object/cuda-parallel-computing-de.html> (April, 2019)

<sup>5</sup> <https://opencv.org/> (April, 2019)

### 3.1 Messung im Gewächshaus (Phase 1)

Die erste Projektphase findet im geschützten Anbau, hier im Gewächshaus der „Beuth Hochschule für Technik Berlin“ (BHT), an einer Tomatenkultur statt. In Abbildung 2 ist der praktische Einsatz der Aufnahmeapparatur dargestellt. Die Messeinheit ist an einem Einschienenbahnsystem über den Pflanzen montiert, sodass die Aufnahmen obenliegender Blätter aus kurzer Distanz von ca. einem Meter erfolgen. Das Kamerasystem wird von einem Motor mit integriertem Schrittzähler und konstanter Schrittgeschwindigkeit fortbewegt. Ein zusätzlicher Motor verändert die Lage der optischen Sensoren, sodass die Pflanzen bei der Hin- und Rückfahrt jeweils von einer Seite gemessen werden. Die Aufnahme erfolgt im Sekundentakt, ein Stoppen der Messapparatur ist dabei nicht erforderlich. Dies ermöglicht eine flächenhafte Temperaturmessung und vermeidet mechanische Einwirkungen auf das Messobjekt. Die Steuerungs- und Positionierungssensoren sind im oberen und die Bildaufnahmesensoren im unteren Teil des Gehäuses verbaut. Der hohe Aufwand, welcher für die Erzielung einer hohen Positionsgenauigkeit in geschlossenen Räumlichkeiten in der Regel benötigt wird, ist durch die Verwendung des schienengeführten Trägersystems und des Schrittmotors deutlich reduziert worden. Des Weiteren ist das Aufnahmesystem mit einer inertialen Messeinheit (IMU – „Inertial Measurement Unit“) zur Bestimmung der aktuellen Fahrtrichtung ausgestattet. Die Positionsbestimmung der photogrammetrischen Apparatur basiert somit auf der Koppelnavigation, bei der die aktuelle Geschwindigkeit entlang der Richtung über die Zeit integriert wird, um so die zurückgelegte Strecke und schließlich die Positionsänderung zu ermitteln. Die berechneten Positionsdifferenzen werden jeweils auf den letzten bekannten Standpunkt aufaddiert, um die neue Lage zu bestimmen (Groves, 2013). Die Genauigkeit dieses Navigationsverfahrens hängt hauptsächlich von der Präzision der integrierten Messsensoren ab. Da die ermittelten Positionsänderungen ständig summiert werden, wächst die Standardabweichung proportional zu der Zeit. Die Reduzierung des potenziell immer größer werdenden Fehlers erfolgt mittels der Korrekturdaten der an der Schiene gleichmäßig verteilten NFC-Referenzpunkte (NFC – „Near Field Communication“). Zusätzlich übernehmen die NFC-Marker eine weitere Funktion, sie signalisieren den Start- und Endpunkt der Aufnahmestre-



**Abb. 2:** Praktischer Einsatz der Aufnahmeapparatur im Gewächshaus

cke, an dem das Kamerasystem automatisch seine Lage und die Fahrtrichtung um 180° ändert. Die miteinander kombinierten Messmethoden bilden somit ein hybrides Sensorsystem, in dem die Schwächen eines Verfahrens mit den Stärken des Anderen ausgeglichen werden. Die automatische Übertragung der Bild- und atmosphärischen Daten erfolgt über den „Wireless Local Area Network“ (WLAN) 5 GHz-Funkstandard mittels eines Routers, der den Zugriff zu dem BHT-Netzwerk im Gewächshaus gewährleistet.

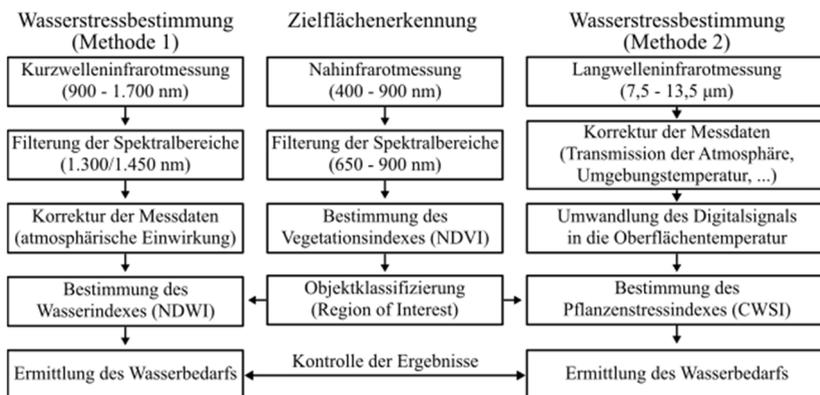
### **3.2 Messung im Freiland (Phase 2)**

Die zweite Projektphase im Freiland wird mithilfe von einer drohnenbasierten Überwachung der Nutzpflanzenbestände durchgeführt, die derzeit in der Entwicklung ist. Da die Möglichkeiten eines unbemannten Luftfahrzeuges beschränkt sind, müssen insbesondere das Gewicht und der Stromverbrauch der gesamten Messeinheit mitberücksichtigt werden. Eine präzise Georeferenzierung geschieht über die Integration vom globalen Navigationssatellitensystem (GNSS) mit einem Inertialnavigationssystem (INS). Die hochfrequenten und kurzstabilen Positionsinformationen des INS werden mit der Langzeitstabilität des GNSS kombiniert. Besonders herausfordernd ist die Gewährleistung einer stabilen Datenübertragung der Bilddaten über größere Entfernungen in der Frequenz von 2,4 GHz, ohne dabei die Steuerungskommunikation zu stören. Da eine Drohne nur in Sichtweite operieren darf, beschränkt sich die Reichweite auf maximal 1 km. Die Messdaten werden in der Funkstation erfasst und von dort zum zentralen Server übertragen.

## **4 Photogrammetrische Aufnahmemethoden**

Die Bildaufnahmeapparatur besteht aus drei unterschiedlichen Kamerasensoren. Dazu gehören die Nahinfrarot-Digitalkamera (VNIR – „Visible Near-Infrared“) zur Zielflächenerkennung, die kurzwellige Infrarotkamera (SWIR – „Short-Wave Infrared“) zur Ermittlung der Reflexionsintensität des Wassers im Pflanzengewebe und die langwellige Infrarot-Wärmebildkamera (LWIR – „Long-Wave Infrared“) zur Messung der Oberflächentemperatur der Pflanzenblätter. Die optischen Sensoren der photogrammetrischen Messanlage arbeiten hauptsächlich in Wellenlängenbereichen außerhalb des sichtbaren Lichtspektrums zwischen 400 nm bis 13.500 nm und erfassen Informationen über die Einflussfaktoren, die den Pflanzenstress verursachen aber für das menschliche Auge unsichtbar sind. Zusätzlich sind die Kameramodule mit entsprechenden Filtern ausgestattet, sodass die Sensoren nur auf die für Pflanzen signifikanten Spektralbereiche empfindlich sind. Die Bildaufnahme der Pflanzenbestände, hier Tomaten, erfolgt mit allen Kameras gleichzeitig. Die relative Orientierung der Kameras ist so festgelegt, dass die Bildgeometrie der VNIR-, SWIR- und Wärmebildkamera weitgehend ähnlich und damit überlappend ist. Die Bilddaten werden direkt im Messsystem analysiert und schließlich miteinander kombiniert (Abb. 3), um den Wasserbedarf zu bestimmen.

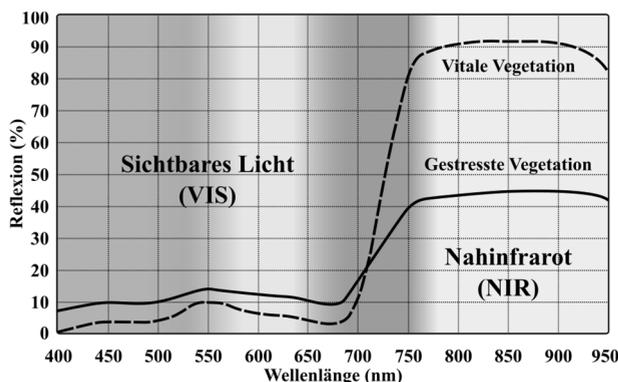
Abbildung 3 stellt die einzelnen Bildauswertungsprozesse zur Wasserstressbestimmung schematisch dar, welche in den nächstfolgenden Unterkapiteln genauer erläutert werden.



**Abb. 3:** Modell der einzelnen Bildauswertungsmethoden zur Wasserstressbestimmung

#### 4.1 Nahinfrarotaufnahme

Die Nahinfrarotmessung zur Zielflächenerkennung erfolgt mittels einer kostengünstigen Einzelchip-Farbkamera des Raspberry Pi mit verbautem „Sony IMX219“ CMOS-Sensor und entferntem Infrarotfilter (NoIR<sup>6</sup>). Somit registriert das Bildaufnahmemodul zusätzlich die Wellenlängen außerhalb des sichtbaren Lichts (400 nm bis 750 nm) im Nahinfrarotbereich (bis 900 nm) und kann daher zur Bestimmung des „Normalized Difference Vegetation Index“ (NDVI) eingesetzt werden. Der NDVI ist ein Parameter, der die photosynthetische Aktivität (Vitalität) der Pflanzen basierend auf den Reflexionsunterschieden widerspiegelt und demzufolge die Ermittlung der Vegetationsobjekte im Bild und deren Differenzierung von nicht pflanzlichen Objekten, wie z. B. Boden, ermöglicht (Leinonen et al., 2004; Zia et al., 2009; Dworak et al., 2013).

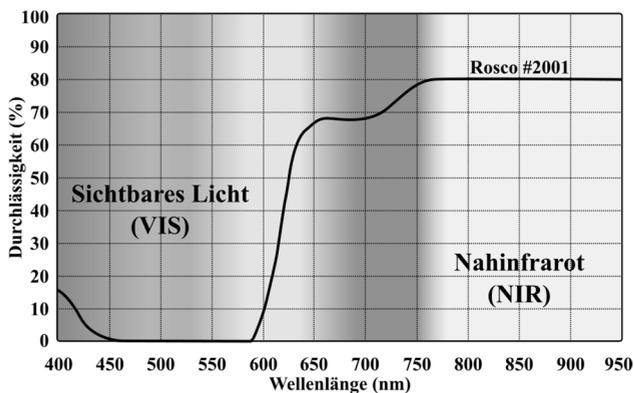


**Abb. 4:** Reflexionsintensität einer vitalen (gestrichelte Linie) und gestressten (durchgezogene Linie) Vegetation (Rosco Laboratories, 2018<sup>7</sup>)

<sup>6</sup> Raspberry Pi Infrarot-Kamera Modul v2  
<https://www.raspberrypi.org/documentation/hardware/camera/> (April, 2019)

<sup>7</sup> <https://www.rosco.com/spectrum/index.php/2018/03/rosco-filter-helps-students-observe-earths-vegetation-from-space/> (April, 2019)

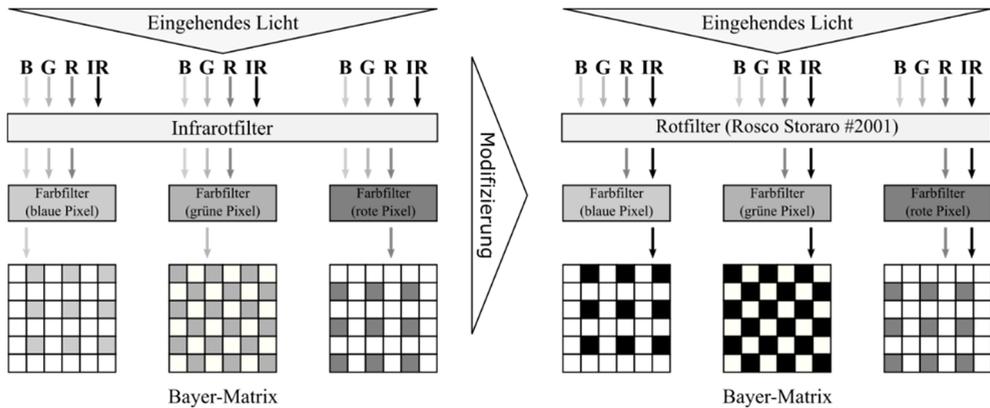
In Abbildung 4 ist die Reflexionsintensität einer vitalen und gestressten Vegetation im Spektralbereich von 400 nm bis 950 nm linear dargestellt. Anhand der beiden Reflexionskurven ist ersichtlich, dass der Vegetationszustand der Pflanzen in direktem Zusammenhang mit der Reflexion und Absorption des Lichtspektrums im infraroten und sichtbaren Bereich steht. Die hohe Chlorophyllaktivität verursacht eine starke Rückstrahlung des Infrarotsignals. Eine geringe Chlorophyllaktivität der Vegetation zeichnet sich dagegen durch schwächere Reflexion der Infrarotstrahlung aus. Um diese Ereignisse auf dem Bild eindeutig erfassen zu können, wurde der Kamerasensor zusätzlich mit einem „Rosco Storaro #2001“<sup>8</sup> Rotfilter ausgestattet, der den Spektralbereich des eingehenden Lichts reduziert. Gemäß der Durchlässigkeitskurve in Abbildung 5 lässt der eingebaute Hochpassfilter nur die Wellenlängen im roten Bereich (650 nm bis 750 nm) des Lichtspektrums und des nahen Infrarots (700 nm bis 950 nm) passieren.



**Abb. 5:** Durchlässigkeitskurve des Rotfilters „Rosco Storaro #2001“<sup>8</sup>

Der Kamerasensor arbeitet nach dem Konzept der Bayer-Matrix in einem asymmetrischen GBGR (Grün-Blau-Grün-Rot) Schachbrettmuster. Infrarot- und Farbfilter sorgen dafür, dass nur eine der drei Grundfarben im Sensorpixel erfasst wird. Die beiden fehlenden Farbinformationen werden aus den benachbarten Pixeln interpoliert, sodass jedes Pixel letztendlich aus drei Farbkanälen (RGB) besteht. Aufgrund der durchgeführten Modifizierung wird der blaue und grüne sichtbare Bereich des elektromagnetischen Spektrums blockiert und die Infrarotstrahlung durchgelassen. Somit verändert sich die Spektralinformation der einzelnen Bildkanäle, indem der blaue und der grüne Kanal jeweils das Infrarotsignal beinhalten. Der rote Kanal besteht dann aus der Intensität der roten und infraroten Strahlung. Im Endeffekt entsteht eine Nahinfrarot-Nahinfrarot-Nahinfrarot-Rot (NIR-NIR-NIR-R) Farbanordnung. In Abbildung 6 ist die veränderte Funktionsweise des Kamerasensors schematisch dargestellt.

<sup>8</sup> <https://ca.rosco.com/en/products/filters/r2001-storaro-red> (April, 2019)

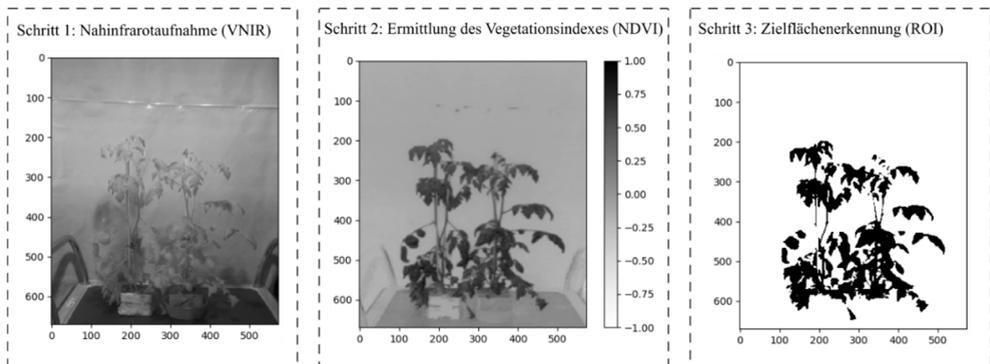


**Abb. 6:** Schematische Darstellung der veränderten Funktionsweise des Kamerasensors

Der Vegetationsindex kann folglich für jedes Pixel nach Rouse et al. (1974) ermittelt werden:

$$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R} \quad (3)$$

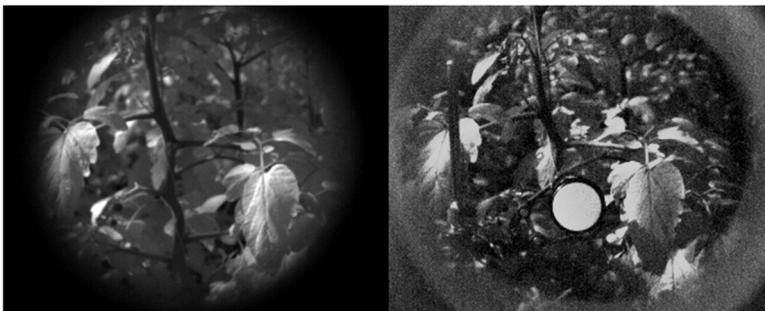
Der Wertebereich des NDVI liegt zwischen  $-1$  und  $+1$ . Je größer die positive Differenz zwischen der Rückstrahlung im Bereich des nahinfraroten (*NIR*) und roten (*R*) Spektrums, desto höher ist die photosynthetische Aktivität des beobachteten Objektes. Die Pixelwerte zwischen  $0,2$  und  $0,4$  repräsentieren eine aktive Photosynthese. Die nicht pflanzlichen Objekte weisen negative Werte auf. Im nächsten Schritt wird der Schwellenwert (Threshold) für das NDVI-Bild bei  $0,2$  gesetzt, um den Pflanzenbereich aus dem Bild herauszufiltern und von anderen Objekten zu separieren. Das resultierende Binärbild entspricht dann der „Region of Interest“ (ROI) einer Pflanze. Die Pflanzenfläche wird nun binär mit einer logischen Eins und die restlichen Pixel mit einer logischen null dargestellt. Schließlich wird so der Pflanzenumriss auf das Kurzwelleninfrarotbild und auf das Wärmebild übertragen, um dort den Pflanzenbereich herauszuheben und die irrelevanten Informationen bei der Bildauswertung auszuschließen. In Abbildung 7 sind die Ergebnisse der einzelnen Phasen zur Zielflächenerkennung bei einer Tomatenpflanze grafisch dargestellt.



**Abb. 7:** Einzelne Phasen zur Zielflächenerkennung bei einer Tomatenpflanze

## 4.2 Kurzwelleninfrarotaufnahme

Die Aufnahmen im Spektralbereich der kurzwelligen Infrarotstrahlung zwischen 900 nm und 1.700 nm werden mithilfe der „Xenics Bobcat 320 GigE“<sup>9</sup> Kamera erstellt. Die Detektoren dieses Messmoduls basieren auf der Indium-Gallium-Arsenik (InGaAs) Sensortechnologie, wodurch sie auf das Lichtspektrum im Kurzwellen-Infrarotbereich empfindlich reagieren (XIS 2015<sup>9</sup>). Da die Blattoberfläche einer Pflanze die Infrarotstrahlung transmittiert, kann diese Aufnahmemethode zur Ermittlung des Wassergehaltes bzw. der Wasserverteilung eingesetzt werden. Dieses Messverfahren basiert auf der Tatsache, dass Wasser in Wellenlängenbereichen von 970 nm, 1.200 nm, 1.450 nm und 1.950 nm stark absorbiert und im Nahinfrarotbereich reflektiert. Aufgrund dieser Eigenschaft erscheinen wasserhaltige Stellen im Bild dunkler und die trockenen Partien entsprechend heller. Mithilfe von Filtern wird die Empfindlichkeit der Kamera nur auf die relevante Bandbreite von exakt 1.300 nm und 1.450 nm reduziert und der „Normalized Difference Water Index“ (NDWI) aus den Reflexionsdifferenzen der höheren und der niedrigen Absorption nach Formel (1) berechnet. Der Wasserindex ist ein Parameter, der den Wasserstatus einer Pflanze definiert und somit für die Ermittlung des Wasserbedarfs geeignet ist. Der Wertebereich des Indexes liegt zwischen  $-1$  und  $+1$ . Je größer die positive Differenz zwischen der Reflexion im Wellenlängenbereich von 1.300 nm und 1.450 nm, desto höher ist der Wassergehalt einer Pflanze. In Abbildung 8 sind zwei Beispielaufnahmen im Wellenlängenbereich von 1.300 nm und 1.450 nm dargestellt, wobei die zweite Aufnahme eine Referenzmessung mit Reflexionsstandard abbildet. Die Intensität der kurzwelligen Infrarotstrahlung im Tageslicht variiert über die Zeit. Daher ist eine Referenzmessung mit einem Reflexionsstandard in regelmäßigen Abständen während der Messperiode notwendig. Ein Reflexionsstandard ist ein idealisierter Körper, der unabhängig vom Einfallswinkel, die eintreffende Strahlung zu 99 % reflektiert, wodurch die Ermittlung der Intensität eines bestimmten Lichtspektrums möglich ist. Eine weitere Herausforderung sind die Aufnahmezeiten, welche für beide Filter abhängig von dem Strahlungsgrad und den Wetterbedingungen individuell angepasst werden müssen. Abschließend wird der ermittelte Wasserstatus mit den Ergebnissen der Thermalaufnahme verglichen.



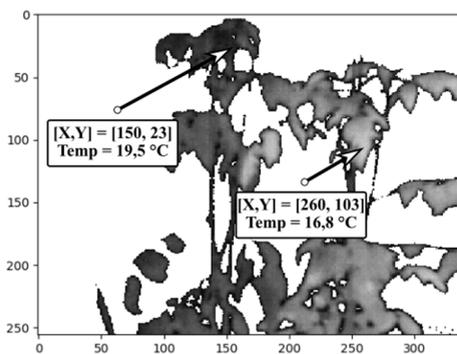
**Abb. 8:** Links: Beispielaufnahme für 1300 nm, rechts: Referenzaufnahme mit Reflexionsstandard für 1450 nm

<sup>9</sup> Xenics Infrared Solutions (April, 2019)

[http://www.xenics.com/sites/default/files/leaflets/xb-139\\_02\\_bobcat-320-gated\\_rd\\_lowres.pdf](http://www.xenics.com/sites/default/files/leaflets/xb-139_02_bobcat-320-gated_rd_lowres.pdf)

### 4.3 Thermalaufnahme

Die Messung der Oberflächentemperatur der Pflanzenblätter erfolgt berührungslos über eine „FLIR Vue Pro“<sup>10</sup> Wärmebildkamera. Dieses Messverfahren basiert auf dem physikalischen Grundgesetz, dass jeder Körper mit einer Temperatur über der absoluten null (= 0 K) thermale Infrarotstrahlung emittiert (Minkina & Dudzik, 2009). Die Kamera verwendet einen Mikrobolometer-Sensor zur Aufnahme des langwelligen Infrarotsignals im Spektrum von 7,5  $\mu\text{m}$  bis 13,5  $\mu\text{m}$  (FVP 2016<sup>10</sup>). Dieser Strahlungsbereich entspricht dem sogenannten langwelligen atmosphärischen Fenster, in dem die Durchlässigkeit der Atmosphäre auch über größere Distanzen gleichmäßig hoch ist. Die Strahldichte des Messobjektes wird über den infrarotempfindlichen Sensor gemessen und in eine digitale Information umgewandelt. Es entsteht ein Wärmebild mit der Auflösung  $336 \times 256$  px und 16 bit Pixeltiefe. Für die Ermittlung des Wasserstressindex der Pflanze muss die aktuelle Temperatur des Zielobjektes aus dem Sensorsignal korrekt ermittelt werden. Dabei sind der Einfluss der Umgebungstemperatur und die Transmission der Atmosphäre in Bezug auf die Messstrecke mit zu berücksichtigen. Bestandteile der Atmosphäre, wie z. B. Wasserdampf ( $\text{H}_2\text{O}$ ) und Kohlendioxid ( $\text{CO}_2$ ) absorbieren in bestimmten Wellenlängenbereichen die Infrarotstrahlung und verursachen somit schon auf einer Entfernung von 1 m Transmissionsverluste. Die Auswirkung der Aufnahmestrecke kann anhand der relativen Luftfeuchtigkeit, Messdistanz und der atmosphärischen Temperatur bestimmt werden (Minkina & Dudzik, 2009). Das Ergebnis ist ein Parameter, der die Durchlässigkeit der Atmosphäre widerspiegelt. Die vom Messobjekt emittierten und reflektierten Strahlungsanteile werden durch die Atmosphäre gemäß ihrer Transmission abgeschwächt. Zusätzlich hat der Emissionsgrad des Zielobjektes bei der Temperaturbestimmung eine wichtige Bedeutung. Die Ausstrahlungsintensität besagt, wie viel der Gesamttemperatur des Beobachtungsobjektes abgegeben wird. Der Emissionsgrad einer Pflanze beträgt 0.98 (Zia et al., 2009) und bleibt über jede Wellenlänge relativ konstant. In Abbildung 9 ist ein Beispiel für den trockenen und feuchten Temperaturzustand der Tomatenpflanze dargestellt. Hierfür wurden zwei Testobjekte nebeneinandergestellt. Bei der linken Tomatenpflanze wurde die Wasserversorgung reduziert, um den Pflanzenstress und somit die Erhöhung der Blattemperatur zu verursachen. Die hellen Pixelbereiche repräsentieren die niedrigen Temperaturwerte der gut bewässerten Tomatenpflanze.

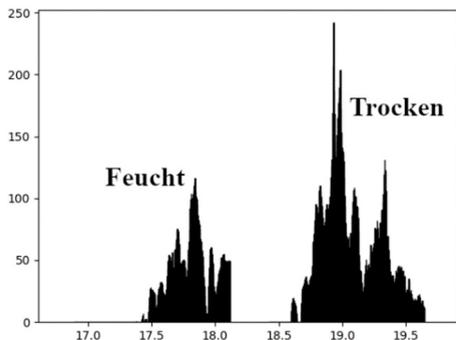


**Abb. 9:**  
Der trockene (links) und feuchte (rechts)  
Zustand einer Tomatenpflanze

<sup>10</sup> Flir Vue Pro (April, 2019)

<https://www.flir.de/globalassets/imported-assets/document/flir-vue-pro-r-datasheet-en.pdf>

Die dunklen Regionen beschreiben die höheren Temperaturwerte, welche aufgrund der geschlossenen Stomata und schwächeren Transpiration ausgelöst werden. In diesem konkreten Beispiel beträgt die durchschnittliche Temperaturdifferenz ungefähr 1,5 K.



**Abb. 10:**  
Histogramm der trockenen und der feuchten Tomatenpflanze

Die detaillierte Verteilung der Temperaturwerte ist mittels eines Histogramms in Abbildung 10 dargestellt. Die Messwerte werden schließlich in den CWSI nach Formel (2) umgerechnet, um den Wasserzustand zu bestimmen.

## 5 Fazit

Im Rahmen des Projektes PLANTSSENS wird ein innovatives, pflanzenbasiertes, kameragestütztes Steuerungssystem zur automatisierten Messung des Wassergehaltes und der Bewässerung von Nutzpflanzenbeständen im Gewächshaus und im offenen Feldanbau entwickelt. Die Kombination von Nahinfrarot-, Wärmebild- und Kurzwelleninfrarot-Kameras zur Ermittlung des Wasserbedarfs von Pflanzen steht im Mittelpunkt von PLANTSSENS. Alle Systemkomponenten wurden an Tomatenpflanzen im geschlossenen Gewächshaus getestet. Einzelne Komponenten sind zu einem Labor-Funktionsmuster zusammengestellt und werden sukzessive optimiert. Diese Messeinheit liefert an dem Einbahnschienensystem digitale Bilder des Pflanzenbestandes. Die Auswertelgorithmen der Messwerte befinden sich ebenfalls noch in einer – wenn auch fortgeschrittenen – Entwicklungsphase. Im nächsten Schritt werden die Methoden zur Bilddatenübertragung über lange Wegstrecken und die Georeferenzierung der Messdaten untersucht, damit das Messsystem dann auf einer Drohne für die Aufnahme von Nutzpflanzen im Freiland eingesetzt werden kann. Hierfür müssen insbesondere noch das Gewicht und der Stromverbrauch des Gesamtsystems effizienter gestaltet werden.

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Ernährung  
und Landwirtschaft



Projektträger Bundesanstalt  
für Landwirtschaft und Ernährung

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

Das Projekt PLANTSSENS wird vom Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) in Verbindung mit dem Projektträger Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung (BLE) mit einer Laufzeit von drei Jahren gefördert (FKZ 2815701615).

## Literatur

- Agam, N., Cohen, Y., Berni, J. A. J., Alchanatis, V., Kool, D., Dag, A., Yermiyahu, U., & Ben-Gal, A. (2013). An insight to the performance of crop water stress index for olive trees. *Agricultural Water Management*, 118, 79–86.
- Clevers, J. G. P. W., Kooistra, L., & Schaepman, M. E. (2007). Canopy water content retrieval from hyperspectral remote sensing. *Researchgate*. Retrieved Apr 8, 2019, from [https://www.researchgate.net/publication/40794269\\_Canopy\\_water\\_content\\_retrieval\\_from\\_hyperspectral\\_remote\\_sensing](https://www.researchgate.net/publication/40794269_Canopy_water_content_retrieval_from_hyperspectral_remote_sensing).
- Cohen, Y., Alchanatis, V., Meron, M., Saranga, Y., & Tsipris, J. (2005). Estimation of leaf water potential by thermal imagery and spatial analysis. *Journal of Experimental Botany*, 56(417), 1843–1852. Retrieved Apr 8, 2019, from doi:10.1093/jxb/eri174.
- Dworak, V., Selbeck, J., Dammer, K.-H., Hoffmann, M., Zarezadeh, A. A., & Bobda, C. (2013). Strategy for the development of a smart NDVI camera system for outdoor plant detection and agricultural embedded systems. *Sensors*, 13, 1523–1538. Retrieved Apr 8, 2019, from doi:10.3390/s130201523.
- Groves, P. D. (2013). *Principles of GNSS, Inertial, and Multisensor Integrated Navigation Systems* (2nd Ed.). London: Artech House.
- Jones, H. G. (1992). *Plants and Microclimate: A Quantitative Approach to Environmental Plant Physiology*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Jones, H. G., Stoll, M., Santos, T., de Sousa, C., Chaves, M. M., & Grant, O. M. (2002). Use of infrared thermography for monitoring stomatal closure in the field: Application to grapevine. *Journal of Experimental Botany*, 53(378), 2249–2260. Retrieved Apr 8, 2019, from doi:10.1093/jxb/erf083.
- Leinonen, I., & Jones, H. G. (2004). Combining thermal and visible imagery for estimating canopy temperature and identifying plant stress. *Journal of Experimental Botany*, 55(401), 1423–1431. Retrieved Apr 8, 2019, from doi:10.1093/jxb/erh146.
- Minkina, W., & Dudzik, S. (2009). *Infrared Thermography: Errors and Uncertainties*. Chichester: Wiley.
- Ng, C. Q. J., Toh, Y. Y., Lam, C. Y. L., Chang, C. W., & Liew, S. C. (2007). Effects of leaf water content on reflectance. *Researchgate*. Retrieved Apr 8, 2019, from [https://www.researchgate.net/publication/267397747\\_Effects\\_of\\_leaf\\_water\\_content\\_on\\_reflectance](https://www.researchgate.net/publication/267397747_Effects_of_leaf_water_content_on_reflectance).
- Payero, J. O., & Irmak, S. (2006). Variable upper and lower crop water stress index baselines for corn and soybean. *Irrigation Science*, 25, 21–32. Retrieved Apr 8, 2019, from doi:10.1007/s00271-006-0031-2.
- Rouse, J. W., Haas, R. H., Schell, J. A., Deering, D. W., & Harlan, J. C. (1974). Monitoring the vernal advancement and retrogradation of natural vegetation. *NASA*, Retrieved Apr 8, 2019, from <https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19750020419.pdf>.
- Seelig, H.-D., Hoehn, A., Stodieck, L. S., Klaus, D. M., Adams III., W. W., & Emery, W. J. (2009). Plant water parameters and the remote sensing R1300/R1450 leaf water index: controlled condition dynamics during the development of water deficit stress. *Irrigation Science*, 27, 357–365. Retrieved Apr 8, 2019, from doi:10.1007/s00271-009-0152-5.
- Zia, S., Spohrer, K., Merkt, N., Wenyong, D., He, X., & Müller, J. (2009). Non-invasive water status detection in grapevine (*Vitis vinifera* L.) by thermography. *Int J Agric & Biol Eng*, 2(4), 46–54. Retr. Apr 8, 2019, from doi:10.3965/j.issn.1934-6344.2009.04.046-054.