

Netzwerkbasiertes Multi-Sensor-Messsystem für eine automatische Bewässerung von Nutzpflanzenbeständen im Gewächshaus (PLANTSSENS)

Multi-sensor Network-based Measuring System for Automatic Irrigation of Crop Stands in Greenhouses (PLANTSSENS)

Lukasz Rojek¹, Klaus Hehl¹, Matthias Möller¹, Markus Richter¹,
Monika Bischoff-Schaefer¹

¹Beuth Hochschule für Technik in Berlin · lukasz.rojek@beuth-hochschule.de

Zusammenfassung: Das Projekt PLANTSSENS¹, das 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 wird (FKZ 2815701615), verfolgt die Zielsetzung, Nutzpflanzenbestände im Freiland- und im geschützten Anbau (z. B. Gewächshaus) entsprechend ihres aktuellen Wasserbedarfs automatisch zu bewässern. Wasser ist eine lebensnotwendige Ressource für Pflanzen, welche im kurzwelligen und mittleren Infrarotspektrum absorbiert und eine Grundvoraussetzung für Pflanzenwachstum und hohe Erträge darstellt. Im Rahmen des Projektes wird ein Prototyp einer photogrammetrischen Aufnahmeapparatur für eine automatisierte Bestimmung des Versorgungszustandes von Pflanzen entwickelt. Die optischen Kamerasensoren werden mit einem multisensorischen Positionierungssystem auf einer beweglichen Trägerplattform zusammengestellt, um anhand einer zeitnahen Bilddatenauswertung und dazugehörigen Georeferenzierung die Nutzpflanzen orts- und bedarfsgerecht zu bewässern. In diesem Beitrag werden die Funktionsweise und der technische Aufbau dieses Monitoringsystems präsentiert.

Schlüsselwörter: Multi-Sensor-Messsystem, Indoor-Positionierung, Nahbereichsphotogrammetrie, automatische Bewässerung

Abstract: The R&D project PLANTSSENS, funded by the Federal Ministry of Food and Agriculture (BMEL) and managed by the Federal Office for Agriculture and Food (BLE), runs for three years (FKZ 2815701615) and it focuses primarily on automated crop irrigation in the open field and protected areas (e. g. glasshouses). Water is one of the essential resources for all plants and absorbs in the shortwave and middle infrared spectrum. It has a major impact on plant growth and prospective yield. Within the framework of this project, a prototype of a photogrammetric measuring system for automated determination of the crop water demand will be developed. The digital imagery recorded by the multispectral camera system is processed and analysed in real-time for an automated irrigation procedure for plants with respect to their sites of growth. This paper explains the functions and the technical structure of this monitoring system.

Keywords: Multi-sensor monitoring system, indoor positioning, close range photogrammetry, automatic irrigation

¹ <https://projekt.beuth-hochschule.de/plantsens/> (April, 2020)

1 Einleitung

Im Laufe der letzten Jahre hat die ressourcenschonende Verwendung von Wasser in gartenbaulichen Produktionssystemen zunehmend an Bedeutung gewonnen. Die meisten Pflanzenbestände reagieren bereits auf minimale Änderungen in der Wasserverfügbarkeit sehr empfindlich, daher muss deren Wasserstatus permanent kontrolliert werden (Rojek et al., 2019a). Es ist problematisch in größeren Produktionsbetrieben ganze Bestände zu überwachen und bedarfsgerecht zu wässern. Der Wasserversorgungsmangel ist für das menschliche Auge erst ab einem gewissen Grad erkennbar (Thiel, 2018) z. B. an den hängenden und zusammengezogenen Blättern oder Verbrennungserscheinungen. Allerdings ist fast immer vor dem Auftreten dieser Symptome schon Stress vorhanden. Somit sind negative Auswirkungen auf Pflanzen- und Ertragsqualität oder möglicherweise eine Verlängerung des Kulturzeitraums bereits gegeben. Die modernen Produktionsbetriebe des Gartenbaus sind standardmäßig mit digitalen Techniken u. a. für die Klimasteuerung, Düngung und Bewässerungsansteuerung ausgestattet. Nicht alle dieser Prozesse verlaufen zufriedenstellend. Aktuell führen Gärtner/-innen Messungen punktuell mit Bodenfühlern durch, um die Entscheidung über den Bewässerungszeitpunkt möglichst präzise zu treffen. Diese Vorgehensweise ist nicht besonders effektiv, denn auf größeren Flächen gibt es immer trockene und feuchte Zonen. Zudem basieren direkte Reaktionen der Pflanzenphysiologie eher auf Veränderungen des Wasserstatus im Gewebe als auf Veränderungen des Wasserangebots an der Wurzel. Daher spiegelt die Bodenfeuchte nur indirekt den Wasserbedarf einer Pflanze wieder und kann über den tatsächlichen physiologischen Wasserzustand der Pflanze nur ungenaue Aussagen treffen. Die aufwendigen Methoden zur quantitativen Bestimmung des Wassergehalts von Pflanzen z. B. Thermogravimetrie erfolgen im Regelfall nur zerstörungsbehaftet über Massenverwiegungen und Trocknung (Thiel, 2018). Der Einsatz von zusätzlichen optischen Messgeräten ermöglicht dagegen eine flächenhafte und zerstörungsfreie Erfassung der spektralen Parameter der Pflanze, welche zur Wasserstatusmessung eingesetzt werden können.

Im Rahmen des Projektes PLANTSSENS, das in enger Kooperation der beiden Fachbereiche III und V an der Beuth Hochschule für Technik Berlin (BHT) durchgeführt wird, entsteht ein automatisiertes, netzwerkbasiertes Multi-Sensor-Messsystem zur bedarfs- und zielgerechten Bewässerung von Nutzpflanzen im geschützten Anbau und in der späteren Phase auch im Freilandanbau. Die photogrammetrische Aufnahmeapparatur besteht aus einer Kombination von Nahinfrarot-, Thermalbild- und Kurzwelleninfrarot-Kamera. Im Gegensatz zu üblichen Kontaktfühlern können die optischen Sensoren auf beweglichen Trägersystemen untergebracht werden, wodurch eine flächige, berührungslose und zerstörungsfreie Messung möglich ist. Das integrierte multisensorale Positionierungssystem sorgt für die Georeferenzierung der Bilddaten. Da die Bewässerung der Pflanzen im Gewächshaus nicht individuell, sondern sektorweise erfolgt, ist eine Positionsgenauigkeit von mehreren Zentimetern akzeptabel. Die Steuerung der Messeinheit und die Echtzeitübertragung der Messdaten zum Server erfolgt automatisch. Schließlich findet – gemäß dem ermittelten Wasserbedarf – eine ressourcenschonende, orts- und bedarfsgerechte Bewässerung der Kulturpflanzen statt. Die Messergebnisse werden in einer objektrelationalen Datenbank (PostgreSQL²) gespeichert und mittels moderner Web-Technologien visualisiert.

² <https://www.postgresql.org>

In Abbildung 1 ist der praktische Einsatz der Aufnahmeapparatur dargestellt. Die Messeinheit ist an einem Schienensystem im Gewächshaus der Beuth HS direkt über der Pflanzkultur (hier Tomaten) montiert. Die Aufnahme des Pflanzenbestands geschieht im Sekunden-takt aus kurzer Distanz von ca. einem Meter horizontal, rechtwinklig zur Fahrtrichtung des Systems. Ein Schrittmotor bewegt das Kamerasystem mit einer konstanten Schrittgeschwindigkeit zwischen den Pflanzenreihen fort, die Trägerplattform stoppt während der Messung nicht. Diese Aufnahmestrecke ist jeweils am Start- und Endpunkt mit einem NFC-Marker (Near Field Communication) versehen, an dem die Lage- und Fahrtrichtungswechsel stattfinden. Der NFC-Chip wird mittels der Nahfeldkommunikation über eine kurze Strecke von 1-2 cm durch die Messeinheit automatisch erkannt. Ein zusätzlicher Schrittmotor ändert dann die horizontale Orientierung der photogrammetrischen Apparatur um 180°. Somit werden die Pflanzen bei der Hin- und Rückfahrt jeweils von einer Seite aufgenommen. Um den Auswertungsprozess zu optimieren, werden die Bilddaten direkt nach der Aufnahme bereits im Messsystem vorab analysiert und direkt zum Server übertragen. Die Messeinheit kann von jedem Endgerät, wie Laptop, Tablet oder Mobiltelefon, mittels selbstentwickelter Software/Apps überwacht und gesteuert werden.

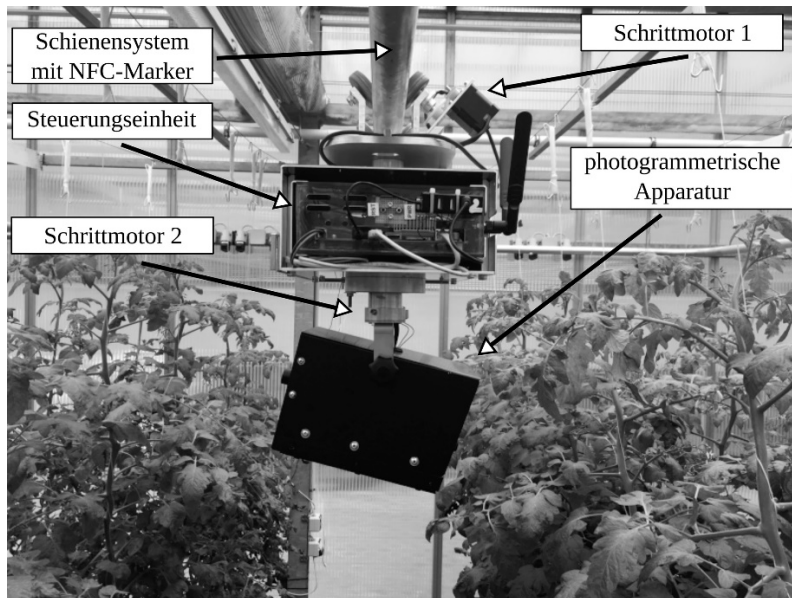


Abb. 1: Praktischer Einsatz der Aufnahmeapparatur im Gewächshaus der Beuth Hochschule für Technik Berlin (Rojek et al., 2019b)

2 Systemkonzept (Client ↔ Server)

Die Hardware des Pflanzen-Monitoring-Systems beruht auf der traditionellen netzwerkba-sierten Client-Server-Architektur, in der zwei Netzwerkteilnehmer, der Server (Anbieter) und der Client (Anwender), in einem gewissen Verhältnis zueinanderstehen. Aufgrund seiner Einfachheit und vielseitigen Flexibilität ist dieses Konzept die am weitesten verbreitete Form

für netzwerkbasierte verteilte Datenverarbeitung (Dietmar, 2015). In dieser Beziehung stellt der Anbieter Dienstprozesse bereit, welche die Anfragen des Anwenders entgegennehmen und bedienen. Die Voraussetzung für diese Art der Kommunikation ist die gegenseitige Erreichbarkeit der beiden Endpunkte. Damit die Dienstanfragen des Absenders beim richtigen Empfänger ankommen, müssen beide Kommunikationspartner eindeutig benannt (adressiert) sein. In einer TCP/IP-Netzwerkinfrastruktur erfolgt die Adressierung standardmäßig mit einer 32-stelligen Binärzahl, welche aus vier Zahlenblöcken von 0 bis 255 besteht und als Internet-Protokoll-Adresse (IPv4-Adresse, z. B. 192.168.0.1) bezeichnet wird. Zusätzlich wird jeder Verbindung eine feste Portnummer, jeweils auf der Seite des Clients und des Servers zugeordnet, damit eine parallele Datenübertragung zu unterschiedlichen Prozessen zwischen demselben Paar von Endpunkten möglich ist. Anhand der Portnummer können ebenfalls Netzwerkprotokolle und Netzwerkdienste automatisch erkannt werden. Insofern kann der Server genau identifizieren, welcher Dienst vom Client angesprochen wurde und kann die Anfrage an das entsprechende Programm sofort delegieren. So ist beispielsweise der Port 1883 für das „Message Queuing Telemetry Transport“ (MQTT) reserviert. Um die Informationspakete zwischen zwei Stationen aus unterschiedlichen Teilnetzen zu verschicken, müssen weitere Kommunikationsdienste, wie Router, eingesetzt werden. Der Router verfügt über IP-Adressen aus beiden Subnetzen und kann demgemäß die Datenpakete korrekt weiterleiten.

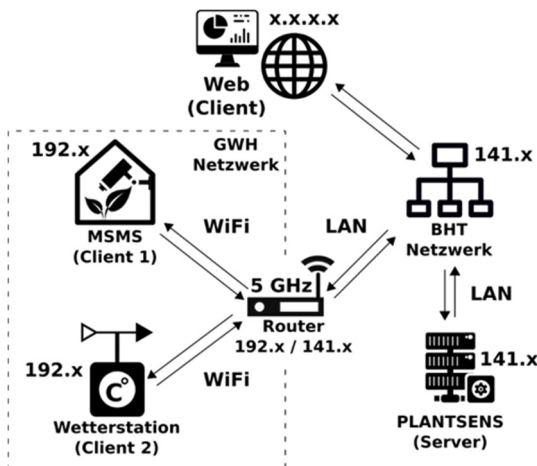


Abb. 2: Schematische Darstellung der Sensornetzwerkinfrastruktur des PLANTSENS-Systems

Gemäß Abbildung 2 besteht das Sensornetzwerkmodell des Pflanzen-Monitoring-Systems aus einem Multi-Sensor-Messsystem (MSMS, Client 1) zur Bild- und Positionsaufnahme von Pflanzen, einer Wetterstation (Client 2) zur Erfassung der meteorologischen Daten und einem zentralen Rechner (Server) zur Speicherung, Auswertung und Visualisierung der Messdaten. Beide Client-Systeme sind im Gewächshaus der Beuth HS implementiert und werden von der zentralen Instanz aus einem zweiten Standort (Büro) angesteuert. Bei der Umsetzung dieses Konzeptes wurde die bereits existierende Netzwerkinfrastruktur der Beuth HS verwendet und um ein eigenes lokales Netzwerk innerhalb des Gewächshauses (GWH) mittels eines WLAN-Routers erweitert. Server und Router sind über eine physikalische Leitung

(LAN) an das Beuth-HS-Netzwerk angebunden und können dementsprechend miteinander kommunizieren. Da die Messsensoren auf einer beweglichen Trägerplattform montiert sind, erfolgt die Übertragung der Messdaten drahtlos über die 5 GHz Funkleitung (WLAN) des Routers, der den Zugriff zum Server über das Beuth-HS-Netzwerk gewährleistet.

Dieses Modell entspricht wesentlich dem Muster aus z. B. einem privaten Haushalt, wo der Netzwerk-Router das Heimnetz (hier GWH-Netzwerk) und die dazugehörigen Clients, wie z. B. Laptop oder Tablet (hier MSMS und Wetterstation), mit dem Internet (hier Beuth-HS-Netzwerk) verbindet. Aufgrund der öffentlichen IP-Adresse des Servers sind die Fernsteuerung der Messeinheit und der Zugriff auf die Messdaten mithilfe von einer webbasierten Software auch außerhalb des Hochschulnetzwerkes möglich. Des Weiteren erfüllt der Router die Rolle einer zusätzlichen Firewall, bei der die eingehenden Anfragen streng gefiltert werden. Ein direkter Zugriff auf die Messinstrumente ist daher standardmäßig ausgeschaltet und kann nur für Wartungsarbeiten über das Secure Shell (SSH) Netzwerkprotokoll an veränderter Portnummer 10022 (Standardport ist 22) erfolgen.

3 Multi-Sensor-Messsystem (MSMS)

Die Messplattform besteht aus einer Kombination mehrerer Sensorelemente, die zueinander in einer vordefinierten Beziehung stehen und zu einer Einheit verbunden wurden. Alle diese Module bilden ein redundantes und sich ergänzendes Multi-Sensor-Messsystem, in dem die einzelnen Sensoren unterschiedliche Messgrößen mit verschiedenen Aufnahmeprinzipien erfassen, um schließlich die Zielgröße, den Wasserbedarf der Pflanzen, zu bestimmen. Die Messmodule sind in Bezug auf den Anwendungszweck in zwei technische Bereiche aufgeteilt und in Abbildung 3 schematisch dargestellt. Die Steuerungs- und Positionierungssensoren befinden sich im oberen und die Bildaufnahmesensoren im unteren Teil des Gehäuses. Um die Pflanzen von unterschiedlichen Blickwinkeln aus photogrammetrisch aufnehmen zu können, lässt sich das untere Bauteil mittels der eingebauten Lenkachse horizontal um 360° drehen.

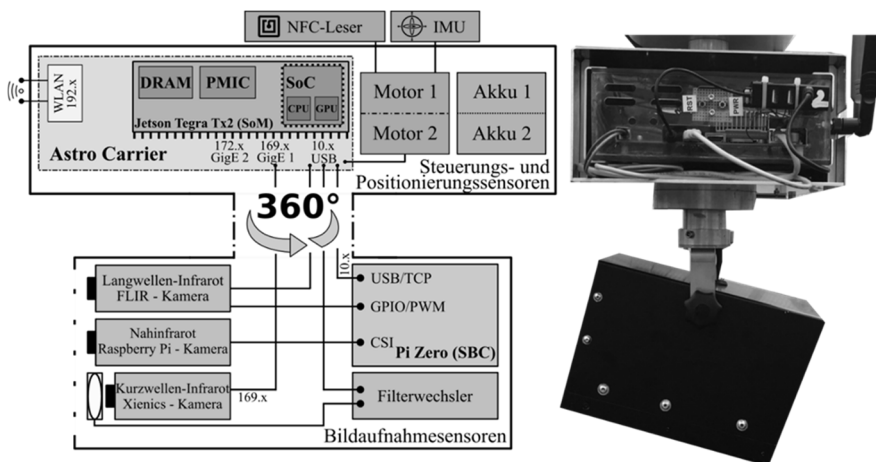


Abb. 3: Aufbau des Multi-Sensor-Messsystems

Das Herzstück der Messeinheit zur Ansteuerung der einzelnen Sensoren und Verarbeitung der Rohdaten ist das Jetson Tx2 System-on-Module (SoM) der Firma NVIDIA, auch Computer-on-Module (CoM) genannt. Es handelt sich dabei um eine eingebettete Architektur, bei der die Kernbestandteile eines vollständigen (Computer-)Systems auf einer einzelnen Leiterplatte von der Größe einer Kreditkarte vereinigt werden. Das SoM enthält einen Tegra System-on-Chip (SoC), der wiederum den Hauptprozessor (CPU), Grafikprozessor (GPU) und sämtliche Schaltkreise für Schnittstellenfunktionen (z. B. für Ethernet, USB, I2C, HDMI usw.) integriert.

Des Weiteren verfügt das Modul über eine Energieverwaltung („Power Management Integrated Circuit“ – PMIC), Arbeitsspeicher („Dynamic Random Access Memory“ – DRAM) und Flashspeicher, um die Nutzung des Chips zu gewährleisten³. Im Gegensatz zu einem Einplatinencomputer („Single Board Computer“ – SBC), wie z. B. dem Raspberry Pi bzw. Raspberry Pi Zero, sind die physikalischen Konnektoren für externe Peripheriegeräte, wie z. B. Kameras, bei einem System-on-Module standardmäßig nicht vorhanden. Die Implementierung der benötigten Ein- und Ausgabeschnittstellen erfolgt mittels einer Trägerplatine (Carrier Board). Das System-on-Module ist an der Unterseite mit einer standardisierten Steckerleiste ausgestattet, welche für die Verbindung mit dem Carrier Board vorgesehen ist. Dieses Konzept bietet mehr Flexibilität, da der Entwicklungsaufwand eines Basisboards im Vergleich zum SBC deutlich niedriger ist. Weiterhin kann der Entwickler praktisch selbst entscheiden, welche Anschlüsse auf der Trägerplatine untergebracht werden und diese an seine Anwendungsbedürfnisse optimal anpassen. Abhängig von dem jeweiligen Verwendungszweck kann das Basisboard gegen eine andere Version getauscht werden, ohne dabei zusätzliche Änderungen am Hauptsystem vornehmen zu müssen.

Im Rahmen des Pflanzen-Monitoring-Systems wurde das Jetson Tx2 Rechenmodul mit der Astro Carrier⁴ Trägerplatine der Firma Connect Tech Inc. ausgebaut. Die Steuerungs- und Messsensoren sind überwiegend kabelgebunden über USB- und Ethernet-Schnittstellen an das System angeschlossen. Die kompakte Gesamtgröße der Hardware und ein geringer Stromverbrauch ermöglichen den Einsatz auf beweglichen Trägerplattformen.

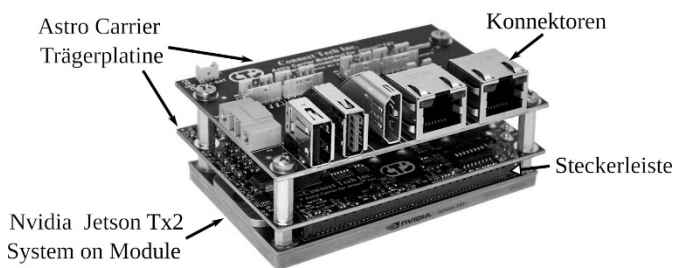


Abb. 4: Jetson Tx2 mit integrierter Astro Carrier Trägerplatine

³ <http://developer.nvidia.com/embedded/jetson-tx2> (April, 2020)

⁴ <http://connecttech.com/product/astro-carrier-for-nvidia-jetson-tx2-tx1/> (April, 2020)

Das installierte Betriebssystem Linux for Tegra (L4T 32.2.1) basiert auf Linux-Kernel 4.9 mit abgeleitetem Referenzdateisystem von Ubuntu 18.04. Die automatische Erfassung, Speicherung und Prozessierung von Messdaten erfolgt mittels der selbst geschriebenen Programme. Hierfür wurde bei der Umsetzung auf Frameworks, wie z. B. „Open Computer Vision“ (OpenCV⁵) und „Common Vision Blox“ (CVB⁶), zurückgegriffen, um den Entwicklungsaufwand zu minimieren. Dank der innovativen NVIDIA-Pascal-Architektur des Grafikprozessors und der dazugehörigen CUDA⁷ Programmier-Technik lässt sich die Performance der Berechnungsalgorithmen deutlich erhöhen, indem die leistungsaufwendigen Prozesse, wie z. B. die Bild- und Positionsanalyse durch die GPU abgearbeitet werden, ohne dabei die CPU zu belasten. Die Kamera- und Positionierungsinformationen werden direkt im Messsystem voranalysiert und zur genauen Auswertung und grafischen Darstellung in Echtzeit zum Server übertragen.

Zwei Schrittmotoren steuern die Position und die Orientierung der Bildaufnahmesensoren. Die Messplattform ist zusätzlich mit zwei Akkus ausgestattet, welche eine Gesamtkapazität von 40800 mAh haben und eine Systemlaufzeit von bis zu fünf Stunden gewährleisten.

Die Fernsteuerung des Messsystems verläuft standardmäßig über die webbasierte Software. Weiterhin steht dem Benutzer die Möglichkeit zur Verfügung, das System über die Kommandozeile zu bedienen. Hierfür könnte beispielsweise die zweite Ethernet-Schnittstelle benutzt werden, welche mit einer statischen IP-Adresse benannt ist.

3.1 Bildaufnahmesensoren

Die Bildaufnahmeapparatur besteht aus einer Nahinfrarot-Digitalkamera (VNIR – „Visible Near-Infrared“) zur Zielflächenerkennung, einer kurzwelligen Infrarotkamera (SWIR – „Short-Wave Infrared“) zur Ermittlung der Intensität der Reflexion bestimmter Spektralbanden in Wechselwirkung mit der entsprechenden Absorption durch das Wasser im Pflanzengewebe und der langwelligen Infrarot-Wärmebildkamera (LWIR – „Long-Wave Infrared“) zur Messung der Oberflächentemperatur des Pflanzenbestands (Abb. 5).

Diese Kombination bildet ein System, das in einem Spektralbereich von 0,4 µm bis 13,5 µm arbeitet. Die Bildaufnahme der Pflanzenbestände geschieht mit allen drei Kameras gleichzeitig. Des Weiteren findet eine Echtzeitbildübertragung von jeder Kamera zum Server statt. Hierfür wird das Bild bereits in der Messeinheit entsprechend komprimiert, um die Sendezeiten zu reduzieren. Somit hat auch der Anwender die Möglichkeit, den aktuellen Status jeder Kamera zu sehen.

⁵ <https://opencv.org> (April, 2020)

⁶ <https://commonvisionblox.com> (April, 2020)

⁷ <https://www.nvidia.de/object/cuda-parallel-computing-de.html> (April, 2020)

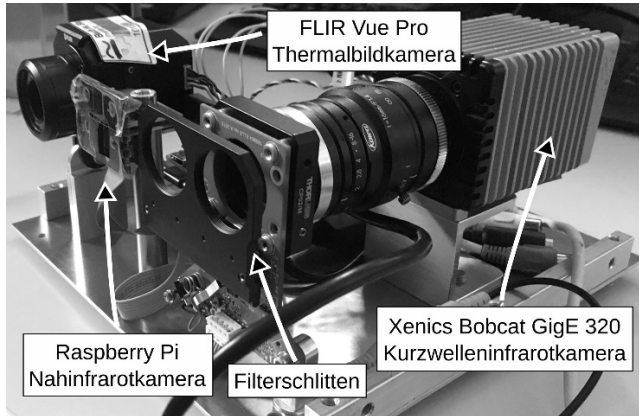


Abb. 5: Bildaufnahmeapparat bestehend aus Kurzwelleninfrarotkamera (rechts), Nahinfrarot-Digitalkamera (mitten) und Thermalbildkamera (links)

Die Zielflächenerkennung erfolgt mittels einer kostengünstigen Einzelchip-Farbkamera des Raspberry Pi⁸ mit entferntem Infrarotfilter. Der „Sony IMX-219“ CMOS-Sensor registriert die Strahlung im sichtbaren Lichtbereich (400 nm bis 750 nm) und nahen Infrarot (bis 900 nm) und kann demzufolge zur Ermittlung des „Normalized Difference Vegetation Index“ (NDVI) nach Rouse et al. (1974) verwendet werden.

$$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R} \quad (1)$$

Der NDVI ist ein Parameter, der die photosynthetische Aktivität (Vitalität) einer Pflanze anhand der Reflexionsdifferenzen im Bereich der Nahinfrarotstrahlung (NIR) und des roten Lichtes (R) widerspiegelt. Das irrelevante grüne und blaue Licht wird mithilfe eines „Rosco Storaro #2001“⁹ Rotfilters blockiert. Der Umriss des Pflanzenobjektes wird abschließend auf das Wärmebild und Kurzwelleninfrarotbild übertragen.

Die Raspberry Pi Kamera wird von der Raspberry Pi Zero Platine über die CSI-Schnittstelle gesteuert. Die Platine wurde umkonfiguriert, sodass eine Kommunikation mit dem Hauptsystem im TCP/IP-Standard über das USB-Interface stattfinden kann.

Die Messung der Oberflächentemperatur der Pflanzenblätter findet mit einer „FLIR Vue Pro“¹⁰ Thermalbildkamera im langwelligen Infrarotbereich von 7,5 µm bis 13,5 µm statt. Die Blatttemperatur der Pflanze steht in einem direkten Zusammenhang mit ihrem Wasserversorgungszustand. Mithilfe des „Crop Water Stress Index“ (CWSI) nach Jones et al. (1992) kann man auf den Wasserversorgungszustand der Pflanzen rückschließen. Der CWSI kann wie folgt ermittelt werden:

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

Dabei beschreiben der Parameter T_{Blatt} die aktuelle Blatttemperatur, $T_{Trocken}$ und T_{Feucht} jeweils die maximale und minimale Temperatur bei komplett geschlossenen und geöffneten

⁸ <https://www.raspberrypi.org/documentation/hardware/camera/> (April, 2020)

⁹ <https://ca.rosco.com/en/products/filters/r2001-storaro-red> (April, 2020)

¹⁰ <https://www.flir.de/products/vue-pro-r/> (April, 2020)

Spaltöffnungen (Stomata) (Cohen et al., 2005; Zia et al., 2009; Agam et al., 2013). Diese Messmethode basiert auf der Tatsache, dass die Differenzen zwischen Luft- und Bestandstemperatur ansteigen, wenn die Pflanze unter Wasserstress leidet (Payero & Irmak, 2006). Der CWSI kann nur Werte zwischen 0 und 1 annehmen. Je weiter der Wert Richtung 1 tendiert, umso schlechter ist der Wasserversorgungszustand der Pflanzen.

Die Kamera speichert die Aufnahmen im jpeg-Format (radiometric-jpeg) direkt auf der integrierten SD-Karte. Die absoluten Messwerte des Mikrobolometer-Sensors sowie die vordefinierten Planck'sche Konstanten der Kamera sind in den Metadaten des Bildes verschlüsselt. Diese Informationen sind erforderlich, um das Sensorsignal in Temperaturwerte umzuwandeln und anschließend den Wasserstressindex zu bestimmen. Die Bilddatenübertragung erfolgt über die USB-Schnittstelle, welche den direkten Zugriff auf den Speicher ermöglicht. Die Messdaten werden automatisch mit dem Server synchronisiert, sobald die Aufnahme beendet ist und die SD-Karte von der Kamera nicht länger blockiert wird. Die Steuerung der Kamera erfolgt über die GPIO-Schnittstelle der Raspberry Pi Zero Platine mittels der Pulsweitenmodulation (PWM), bei der die elektronische Spannung zwischen zwei Werten (3,3 V und 0 V) wechselt. Die Steuerungseinheit sendet ein moduliertes PWM-Signal bei konstanter Frequenz von 50 Hz an die Wärmebildkamera. Der Befehl entspricht der Impulsdauer.

Die Kurzwellen-Infrarotkamera „Xenics Bobcat 320 GigE“¹¹ arbeitet in einem Wellenlängenbereich zwischen 900 nm und 1.700 nm. Dieses Messverfahren basiert auf der starken Absorption der Lichtstrahlung vom Wasser in Wellenlängenbereichen von 970 nm, 1.200 nm, 1.450 nm und 1.950 nm (Clevers et al., 2017). Diese Eigenschaft verursacht, dass wasserhaltige Stellen im Bild dunkler und die trockenen Partien entsprechend heller auf dem Bild erscheinen. Der „Normalized Difference Water Index“ (NDWI) wird aus den Reflexionsdifferenzen der höheren ($SWIR_{1450}$) und der niedrigen ($SWIR_{1300}$) Absorption nach Seelig al. (2009) berechnet:

$$NDWI = \frac{SWIR_{1300} - SWIR_{1450}}{SWIR_{1300} + SWIR_{1450}} \quad (3)$$

Damit die Empfindlichkeit der Kamera nur für die gefragte Bandbreite von exakt 1.300 nm und 1.450 nm fokussiert bleibt, sind zwei Filter vor dem Objektiv eingebaut worden, welche von einem Filterschlitten abwechselnd aktiviert werden.

Das Kameramodul kommuniziert mit dem Steuerungssystem über die Gigabit-Ethernet-Schnittstelle. Die generierten Bilddaten der Größe 336 x 256 px und einer 16 bit Pixeltiefe werden mittels des GigE-Vision-Protokolls, basierend auf dem UDP/IP-Standard zum Rechenmodul und schließlich zum Server übertragen.

Eine detaillierte Beschreibung der Auswertungsmethoden findet sich in Rojek et al. (2019a, 2019b).

3.2 Positionierungssensoren

Eine möglichst genaue Orts- und Lagebestimmung der photogrammetrischen Apparatur steht im Mittelpunkt einer ressourcenschonenden automatisierten Bewässerung. Die Information über die aktuelle Position des Messsystems zum Zeitpunkt der Bildaufnahme ist erforderlich, um die Pflanzen entsprechend des ermittelten Wasserbedarfs zielgerecht zu bewässern.

¹¹ <http://www.xenics.com/short-wave-infrared-imagers/bobcat-320-series/> (April, 2020)

Die bisherigen Methoden zur Positionierung in geschlossenen Räumlichkeiten (Indoor) beruhen hauptsächlich auf dem Prinzip der Feldstärkemessung (Fingerprinting) und der Distanzmessung zu Referenzpunkten (Trilateration). Die Bereitstellung eines eigenständigen Systems mittels der bekannten Technologien, wie RFID, WiFi, Ultraschall und Magnetfeld, ist in der Regel mit sehr hohen Anforderungen an die Infrastruktur verbunden, damit eine zufriedenstellende Genauigkeit erreicht werden kann. Um den Aufwand zu minimieren werden autonome Inertialmesssysteme eingesetzt, welche keine zusätzlichen Infrastrukturmaßnahmen erfordern (Willemssen et al., 2014).

Die Positionsbestimmung des Aufnahmesystems im Gewächshaus wird von einem hybriden Sensorsystem durchgeführt. Hierzu werden drei Messverfahren miteinander kombiniert. In Abbildung 6 ist das Prinzip der integrierten Positionsbestimmung schematisch dargestellt.

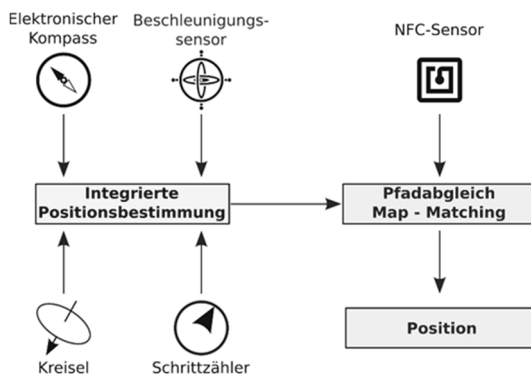


Abb. 6: Prinzip der integrierten Positionsbestimmung

Die daraus resultierende Positionierungsmethode beruht hauptsächlich auf dem Prinzip der Koppelnavigation, bei der die aktuelle Geschwindigkeit und Richtung in bestimmten Zeitabschnitten gemessen werden. Die Geschwindigkeit wird entlang der Richtung über die Zeit integriert, um die Positionsänderung zu ermitteln. Die berechneten Positionsänderungen werden jeweils auf den letzten bekannten Standpunkt aufaddiert, um die neue Position 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 gesamte Standardabweichung proportional zu der Zeit. Der immer größer werdende Fehler kann beispielsweise mittels der Korrekturdaten der gleichmäßig verteilten Referenzpunkte in Form von NFC-Markern reduziert werden. Der Bewegungspfad der Aufnahmeapparatur ist von einem schienengeführten Trägersystem vordefiniert. Somit können die Positionierungsalgorithmen zur Verbesserung der Positionsgenauigkeit mit zusätzlichen Informationen über die Sollstrecke ergänzt werden.

Das erste Positionierungsverfahren basiert auf der inertialen Navigation. Für diese Messmethode wird eine kostengünstige Inertialmesseinheit (IMU¹²) der Firma Tinkerforge eingesetzt. Die IMU ist mit einem Beschleunigungssensor, Drehratensensor und Magnetometer

¹² https://www.tinkerforge.com/de/doc/Hardware/Bricks/IMU_V2_Brick.html (April, 2020)

ausgestattet. Die Messgrößen werden im körperfesten Koordinatensystem (Strapdown-System) entlang der X-, Y- und Z-Achse in extrem kurzen Zeitabschnitten mit einer Frequenz von bis zu 1000 Hz erfasst. Hierfür wird das Modul direkt auf der beweglichen Plattform montiert, sodass die X-Achse in Fahrtrichtung zeigt. Die Sensorfusion verwendet den Attitude Heading Reference System Algorithmus (AHRS) von Madgwick (2010), um die komplette Orientierung des Messsystems im Raum zu bestimmen. Im Grundprinzip wird die Ausrichtung des Beschleunigungssensors anhand der Messwerte des Drehratensensors und Magnetometers über die Zeit ermittelt. Die Aufgabe des AHRS-Algorithmus ist es, eine möglichst optimale Kombination der Messdaten aus allen drei Sensoren zu generieren. Somit können die in einem Sensor entstehenden Driften mit den beiden weiteren Stützsensoren zum Teil eliminiert werden. Des Weiteren kann die Anpassung des Fusionsparameters die störende Einwirkung eines der Sensoren auf die endgültige Orientierung beheben. Damit lässt sich beispielsweise der Einfluss des Magnetometers reduzieren, der gegenüber Störungen und Missweisungen, verursacht durch das Metallgehäuse des Messsystems und das Schienensystem, sehr empfindlich ist. Die automatische Kalibrierung der Sensoren vor und während der Messung erhöht die Genauigkeit der berechneten Position.

Die Aufnahmeapparatur ist an einem Schienensystem montiert und wird von einem Motor (Stepper Brick¹³) der Firma Tinkerforge mit integriertem Schrittzähler mit konstanter Schrittgeschwindigkeit fortbewegt. Bei dieser Positionierungsmethode werden die zurückgelegte Strecke und schließlich die neue Position aus der Anzahl der Drehungen des Rades ermittelt. Der Sensor arbeitet in unterschiedlicher Schrittauflösung und kann das Rad im Voll-, Halb-, Viertel- bis zu 1/256-Schritt drehen. Anhand des bekannten Schrittmodus und der aktuellen Schrittzahl wird der Raddrehwinkel (Φ_R) nach der Formel (4) berechnet:

$$\Phi_R = \frac{2\pi}{\text{Schrittmodus}} \cdot \text{Schrittzahl} \quad (4)$$

Die zurückgelegte Strecke (S_R) und die Geschwindigkeit (v) berechnen sich mittels des Raddrehwinkels (Φ_R), Raddurchmessers (R_R) und der Zeit (T) zu:

$$v = \frac{S_R}{T} = \frac{R_R \cdot \Phi_R}{T \cdot 2\pi} \quad (5)$$

Die aktuelle Fahrtrichtung (θ) wird vom IMU-System bereitgestellt und für die Bestimmung des Geschwindigkeitsvektors ($\hat{v}$) eingesetzt:

$$\hat{v} = \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v \cdot \cos \theta \\ v \cdot \sin \theta \end{bmatrix} \quad (6)$$

Im letzten Schritt wird der Geschwindigkeitsvektor ($\hat{v}$) mit dem Zeitintervall (Δt_k) multipliziert, um die Positionsverschiebung und letztendlich die neue Position (x_{k+1}) zu bestimmen.

$$x_{k+1} = x_k + \Delta t_k \cdot \hat{v} \quad (7)$$

Im Gegensatz zum Inertialmesssystem ist diese Messmethode vom kumulierten Driftfehler nicht betroffen, wodurch eine genauere Positionierung im Zentimeterbereich möglich ist. Trotz der Stabilität des Systems kann es auch hier zu mechanischen Schwierigkeiten kommen. Beispielsweise könnte ein abgenutztes Gummirad den Systemwagen an der Weiterbe-

¹³ <https://www.tinkerforge.com/de/shop/silent-stepper-brick.html> (April, 2020)

wegung hindern. Dennoch würde aber die Anzahl der Schritte weiter hochgezählt und es käme an dieser Stelle zu einer Positionsverfälschung.

Das dritte Positionierungsverfahren basiert auf der Nahfeldkommunikation (NFC¹⁴). Die NFC-Technologie ermöglicht auf einer geringen Entfernung im Zentimeterbereich einen kontaktlosen Datenaustausch. Hierfür werden spezielle NFC-Aufkleber mit einem Durchmesser von 22 mm und einer Höhe von 0,41 mm verwendet, die für metallische Oberflächen geeignet sind. Die NFC-Chips sind in gleichmäßigen Abständen von 1,50 m über die gesamte Fahrstrecke verteilt, um die Position der Referenzpunkte zu markieren. Jeder NFC-Tag ist mit einer ID-Nummer eindeutig identifiziert. Sobald der NFC-Leser des Messsystems nun am NFC-Marker vorbeifährt, werden die Koordinaten des Referenzpunktes anhand der ID-Nummer aus der Datenbank ausgelesen. Somit kann die exakte Position der Aufnahmeapparat in regelmäßigen Zeitabschnitten ermittelt und demzufolge für die Kalibrierung der restlichen Positionierungssensoren verwendet werden. Die Präzision dieses Verfahrens hängt vom Identifizierungszeitpunkt ab. Aus diesem Grund ist der Abstand zwischen dem NFC-Leser und dem NFC-Marker so festgelegt, dass der Referenzpunkt vom System erst dann erkannt wird, wenn beide möglichst exakt übereinanderliegen.

4 Datenauswertung und Visualisierung

Das Pflanzen-Monitoring-System zur Bestimmung des Wasserversorgungszustands und der automatisierten Bewässerung besteht gemäß der Abbildung 7 aus drei Hauptprozessen, welche jeweils von den Clients und dem Server durchgeführt werden.

Im ersten Schritt findet die Erfassung der Bild- und Positionsdaten mittels der im Projekt selbstentwickelten photogrammetrischen Apparatur statt. Die Kameramodule und die Geosensoren werden von getrennten Systemprozessen der Messeinheit automatisch gesteuert. Die atmosphärischen Bedingungen, wie z. B. die Luftfeuchtigkeit und die Lufttemperatur, werden von der Wetterstation während der Bildaufnahme gemessen und in einer vordefinierten Datenbankstruktur mit einem Zeitstempel auf dem Server gespeichert. Diese Informationen sind für die Spektralauswertung der Thermalbilddaten relevant, damit die Sensorsignale in die Temperaturwerte korrekt umgewandelt werden können. Hier ist für größere Aufnahmestrecken im Besonderen die störende Einwirkung der atmosphärischen Transmission und der Hintergrundobjekte zu berücksichtigen. Darüber hinaus werden anhand der atmosphärischen Messdaten die beiden Grenzwerte, T_{Feucht} und $T_{Trocken}$, für die Bestimmung des Wasserstressindex ermittelt.

¹⁴ https://www.tinkerforge.com/de/doc/Hardware/Bricklets/NFC_RFID.html (April, 2020)

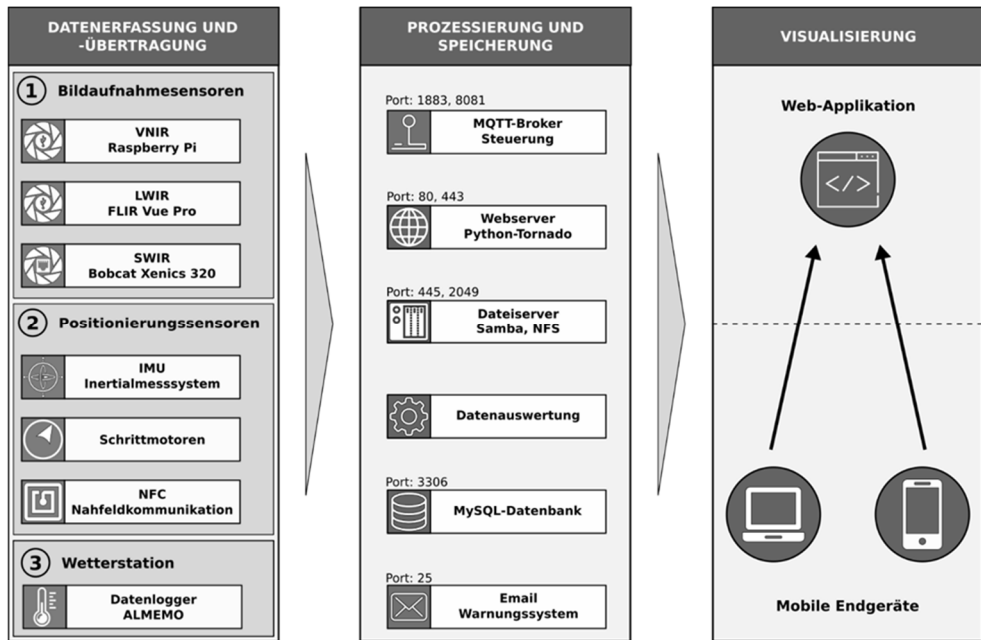


Abb. 7: Das Pflanzen-Monitoring-System besteht aus drei Hauptphasen: Datenerfassung, Prozessierung und Visualisierung

Der Server ist ein fundamentaler Teil des gesamten Überwachungssystems, welcher die jeweiligen Dienstprozesse zur Nachrichtenübertragung, Datenspeicherung, -auswertung und -visualisierung bereitstellt. Die Sicherung der erfassten Bilddaten erfolgt im SMB-Standard (Server Message Block). Dieses Netzprotokoll für Dateidienste macht die Aufnahmen für mehrere Clients, z. B. Laptops parallel und betriebssystemunabhängig zugänglich. Die individuell entwickelten Java- und Python-Algorithmen sind für die zeitnahe Prozessierung und Verarbeitung der Bilddaten zuständig. Die Auswertungsergebnisse werden anschließend in einer MySQL-Datenbank gespeichert. Eine interaktive Darstellung der Messdaten verläuft durch die Anwendung der modernen Web-Technologien und Implementierung eines Python-Webservers basierend auf dem Tornado-Framework¹⁵.

Die Steuerung der Messeinheit und deren einzelnen Sensoren erfolgt von einem beliebigen Endgerät über das leichtgewichtige „Message Queue Telemetry Transport“ (MQTT¹⁶) Protokoll. MQTT entspricht einem ereignisbasiertem Publish/Subscribe-Kommunikationsmodell. Die Clients publizieren ein Ereignis, das mit einem sogenannten Thema-Namen versehen ist. Andere Clients, die sich für das bestimmte Thema registriert haben, werden diese Information erhalten. Das gesamte Benachrichtigungssystem wird von einer zentralen Komponente (Broker) reguliert. Der Broker evaluiert die Themen eingehender Nachrichten gegen die registrierten Themen der Abonnenten und verteilt die Benachrichtigungen an interessierte Clients (Blankenbach & Herle, 2017).

¹⁵ <https://www.tornadoweb.org> (April, 2020)

¹⁶ <https://mqtt.org> (April, 2020)

5 Fazit

Die optischen Verfahren bieten im Gegensatz zu den konventionellen Methoden die Möglichkeit, schonender und effizienter mit begrenzten Ressourcen wie Wasser umzugehen. Des Weiteren kann die Messung flächig und zerstörungsfrei mehrfach am Tag erfolgen. Dabei wird der tatsächliche Wasserzustand des Pflanzengewebes ermittelt. In den letzten Jahren sind bereits einzelne marktverfügbare Systeme für die Bestimmung der morphologischen und spektralen Parameter der Pflanze mittels der Multispektralsysteme entwickelt worden, z. B. „PlantEye“¹⁷ der Firma Phenospex und „FieldScanalyzer“¹⁸ der Firma LemnaTec (vgl. Thiel, 2018). Diese Systeme sind in der Regel mit höherem Kosten- und Installationsaufwand verbunden.

Das Projekt PLANTSSENS verbindet Gartenbau und Geoinformatik, um ein intelligentes, pflanzenbasiertes und kameragestütztes Überwachungssystem zu entwickeln. Das System soll autonom durch die Kulturen fahren, den ganzen Bestand photogrammetrisch erfassen und für die trockenen Bereiche ortsgerecht die Bewässerung auslösen. Hierfür wird die Kombination von Nahinfrarot-, Wärmebild- und Kurzwelleninfrarot-Kameras zur Ermittlung des Wasserversorgungszustands von Pflanzen getestet. Der Wasserbedarf wird mit zwei verschiedenen Verfahren gemessen, die sich gegenseitig ergänzen und kontrollieren. Der Benutzer kann den aktuellen Stand der Messung jederzeit über die Monitoring-Software kontrollieren. Alle Systemkomponenten wurden an Tomatenpflanzen im geschlossenen Gewächshaus und zu einem Labor-Funktionsmuster zusammengestellt. Das System soll zukünftig dabei helfen, den Wasserverbrauch in Pflanzenbaubetrieben zu senken und den Anbau deutlich effizienter zu gestalten. Unser Dank gilt dem Fördergeber, ohne dem dieses Projekt nicht möglich gewesen wäre.

Gefördert durch:



Abb. 8:

Das Projekt PLANTSSENS wird vom Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft in Verbindung mit dem Projektträger Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung gefördert

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.
- Blankenbach, J., & Herle, S. (2017). Geospatial meets IoT – Echtzeit-Geodaten im Internet der Dinge. In: Kolbe, T. H. et al. (Eds), *Geoinformationssysteme* (pp. 2–18). Berlin/Offenbach: Wichmann. Retrieved Apr 14, 2020, from ISBN 978-3-87907-626-0.
- Clevers, J. G. P. W., Kooistra, L., & Schaepman, M. E. (2007). Canopy water content retrieval from hyperspectral remote sensing. *Researchgate*, Retrieved Apr 14, 2020, from https://www.researchgate.net/publication/40794269_Canopy_water_content_retrieval_from_hyperspectral_remote_sensing.

¹⁷ <https://phenospex.com> (April, 2020)

¹⁸ <https://www.lemnatec.com> (April, 2020)

- 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 14, 2020, from doi:10.1093/jxb/eri174.
- Dietmar, A. (2015). *Masterkurs Client/Server Programmierung mit Java: Anwendungen entwickeln mit Standard-Technologien* (5th Ed.). Wiesbaden: Springer.
- 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 14, 2020, 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 14, 2020, from doi:10.1093/jxb/erf083.
- Madgwick, S (2011). *An efficient orientation filter for inertial and inertial/magnetic sensor arrays*. Retrieved Apr 14, 2020, from http://x-io.co.uk/res/doc/madgwick_internal_report.pdf.
- 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 14, 2020, from doi:10.1007/s00271-006-0031-2.
- Rojek, L., Hehl, K., Möller, M., Richter, M., & Bischoff-Schaefer, M. (2019a). Entwicklung eines sensorgestützten Steuerungssystems für eine ressourcen-schonende Bewässerung in der Landwirtschaft von Feld- und Fruchtgemüse auf der Basis der Nahbereichsphotogrammetrie (PLANTSSENS). *Forum GeoBau: Urbane Konzepte und Entwicklungen*, 9, 55–67. Retrieved Apr 14, 2020, from ISBN 978-3-8440-6272-4.
- Rojek, L., Hehl, K., Möller, M., Richter, M., & Bischoff-Schaefer, M. (2019b). Strategie für die Entwicklung eines photogrammetrischen Überwachungssystems für eine ressourcen-schonende und automatisierte Bewässerung von Nutzpflanzenbeständen im Freiland- und im geschützten Anbau (PLANTSSENS). *AGIT – Journal für Angewandte Geoinformatik*, 5-2019, 87–99. Retrieved Apr 14, 2020, from doi: 10.14627/537669008.
- 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 14, 2020, 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 14, 2020, from doi:10.1007/s00271-009-0152-5.
- Thiel, M. (2018): *Bildgebende NIR-Hyperspektral-Technologie zur in-situ Erfassung des Blattwassergehalts* (Dissertation). Leibniz Universität Hannover.
- Willemsen, T., Keller, F., & Sternberg, H. (2014). Indoor-Positionierung und -Navigation mit Smartphone. In: DVW e. V. (Ed.), *Multi-Sensor-Systeme – Bewegte Zukunftsfelder*, 75, 175–188.
- 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. Retrieved Apr 14, 2020, from doi:10.3965/j.issn.1934-6344.2009.04.046-054.