

PotatoScanner – ein System zur drahtlosen Übertragung von Sensordaten für Smart Farming Anwendungen am Beispiel der Trockenstresserfassung bei Kartoffelpflanzen

Björn Gernert, Jan Schlichter, Rolf Peters, Lars Wolf

Für die Umsetzung einer nachhaltigen Bewirtschaftung von Agrarflächen werden möglichst genaue Informationen über den Zustand der Pflanzen und der Umgebung, in der diese wachsen, benötigt. Unter dem Begriff „Smart Farming“ werden Technologien verstanden, die diese Informationen erheben, auswerten und zielgerichtet anwenden können. Nachfolgend wird der PotatoScanner vorgestellt, welcher in der Lage ist, Umweltparameter auf dem Feld zu erfassen und auszuwerten. Als Anwendungsbeispiel soll die Blattoberflächentemperatur von Pflanzen erfasst werden. Mit diesem Parameter ließe sich der Trockenstress von Pflanzen ermitteln. Darüber hinaus ist der PotatoScanner in der Lage, Messdaten von weiteren auf dem Feld befindlichen Sensoren abzurufen und zu speichern. Dies ist von Vorteil, wenn für die im Feld befindlichen Sensoren eine sichere Übertragungsmöglichkeit, z. B. mittels Mobilfunks, fehlt. Diese Problematik tritt verstärkt im ländlichen Raum auf, da die Bereitschaft der Mobilfunkbetreiber, dort ein flächendeckendes Netz aufzubauen, gering ist. Der PotatoScanner ist in der Lage, dieses Defizit zu kompensieren, wodurch der Einsatz von Sensortechnik auch in Gebieten ermöglicht wird, in denen kein Mobilfunknetz vorhanden ist. Im Anschluss an die Vorstellung des Systems wird eine Evaluierung über zwei Wachstumsperioden durchgeführt. Weiterhin wird gezeigt, welche Möglichkeiten zur Datenübertragung auf dem Feld vorhanden und welche Umwelteinflüsse bei dessen Betrieb zu beachten sind.

Schlüsselwörter

Smart Farming, Datenübertragung, Blattoberflächentemperatur, Trockenstress, Kartoffel

Die Digitalisierung hat in den vergangenen Jahren immer stärker Einzug in die Prozesse der Landwirtschaft gehalten. Sie hat das Potenzial in die einzelnen Arbeitsschritte einzugreifen, die Qualität der produzierten Lebensmittel zu überwachen und den Weg der Ware vom Erzeuger bis zum Endverbraucher zu dokumentieren. Auf dem Feld können Sensoren verschiedene Wachstumsvariablen, wie z. B. Temperatur und Bodenfeuchte bzw. Wassergehalt des Bodens und Luftfeuchte, erfassen und dem Landwirt auf diese Weise Informationen über Wachstumsfaktoren seiner Felder bereitstellen. Diese Daten eröffnen die Möglichkeit, das Wachstum der Pflanzen mit gezielten pflanzenbaulichen Maßnahmen zu unterstützen. Gleichzeitig lassen sich so Prognosesysteme zum Auftreten von Schaderre-

gern entwickeln, die beispielsweise über die Berechnung des Beginns des Befalls und Empfehlungen zu nachfolgenden Behandlungsterminen einen ressourcenschonenden Pflanzenschutz ermöglichen.

Für all diese Aufgaben wird eine möglichst breite Datenbasis benötigt. Je detaillierter und je präziser die Daten erhoben werden, umso aussagekräftiger sind die daraus abgeleiteten Handlungsempfehlungen. Neben der eigentlichen Erhebung ist die Übermittlung der Daten vom Feld an eine zentrale Stelle zu deren zeitnaher Auswertung zwingend notwendig. Hierfür wird meistens an die Nutzung eines Mobilfunknetzes gedacht. Allerdings geht der Ausbau dieser Netze, gerade im ländlichen Bereich, sehr schleppend voran, da der jeweilige Netzanbieter viel Geld investieren muss, die zu erwartenden Gewinne aufgrund der geringen Bevölkerungsdichte jedoch nur minimal ausfallen.

Der in diesem Artikel beschriebene PotatoScanner ist ein Ansatz, die zwei soeben beschriebenen Herausforderungen, das Sammeln von möglichst vielen Daten und deren Übermittlung an eine zentrale Stelle zur Auswertung (Backend), zu lösen.

Das Sammeln der Daten geschieht zum einen durch stationär auf dem Feld installierte Sensorknoten, die zum Beispiel die Temperatur und Bodenfeuchtigkeit erfassen. Zum andern wurde eine Pflanzenschutzspritze mit Temperatursensoren ausgestattet, um bei der Fahrt über den Acker die Oberflächentemperatur der Pflanzen ermitteln zu können.

Die Übertragung aller gesammelten Daten geschieht ebenfalls durch die Pflanzenschutzspritze. Sie fungiert als mobiler Datenknoten an den während der Fahrt über den Acker die Messdaten der stationären Sensorknoten per Funk übertragen werden. Die auf diese Weise auf der Pflanzenschutzspritze gespeicherten Daten können bei der Rückkehr auf den Betrieb über das dort vorhandene WLAN an die zentrale Auswertungsstelle übermittelt werden.

In den nachfolgenden Kapiteln wird zunächst, um einen Überblick zu vermitteln, das Gesamtsystem des PotatoScanners skizziert. Im Anschluss werden die einzelnen Komponenten, beginnend mit der Hardware der stationären Sensorknoten, erläutert. Es folgt die Darstellung der verwendeten Software sowie eine genauere Analyse der Kommunikation und der gemessenen Pflanzentemperaturen durch den PotatoScanner in den Wachstumsperioden 2018 und 2019.

Systemüberblick

Der PotatoScanner besteht aus einer Reihe verschiedener eigenständiger Systeme, welche in der Lage sind, über ihre Systemgrenzen hinweg Daten auszutauschen. In der Abbildung 1 ist das Gesamtsystem des PotatoScanner dargestellt. Die Beschriftung folgt dem Datenfluss, beginnend mit den Sensorknoten auf dem Feld (a) bis hin zur Datensenke auf dem Hof (e). Auf dem Feld ist zusätzlich ein Traktor mit Pflanzenschutzspritze zu sehen, welche so umgerüstet wurde, dass diese in der Lage ist, die Oberflächentemperatur der Pflanzen aufzunehmen. Die einzelnen Komponenten haben die folgenden Aufgaben:

- (a) **Kleiner Sensorknoten:** Die roten Punkte auf dem Feld stellen kleine Sensorknoten, welche ungefähr die Größe einer Kartoffel haben, dar. Diese Knoten sind in der Lage, verschiedene Variablen (Lufttemperatur, Luftfeuchte, Bodenfeuchte bzw. Wassergehalt des Bodens) kontinuierlich zu erfassen. Die gesammelten Daten werden nicht lokal auf dem Knoten gespeichert, sondern per Funk an die beschriebenen „Sammelknoten“ (b) weitergeleitet. Die kleinen Sensorknoten sind dabei eingegraben und über das Feld verteilt.

- (b) **Sammelknoten:** Innerhalb der Kommunikationsreichweite zu den kleinen Sensorknoten stehen sogenannte Sammelknoten. Auf diese größeren, mit Solarzellen und Akku ausgestatteten Knoten werden die Messwerte der kleineren Sensorknoten übertragen und persistent gespeichert. Von hier aus ist eine automatische Übertragung der Daten an die Pflanzenschutzspritze, wenn diese sich in Reichweite befindet, möglich. Im Notfall lassen sich die Daten auch manuell per USB-Stick vom Sammelknoten abrufen. Die Sammelknoten selbst können ebenfalls mit Sensorik, beispielsweise Bodenfeuchtesensoren, ausgestattet werden. Durch die vorhandenen Energie- und Speicherressourcen ließen sich auch Fotos von den umgebenen Pflanzen erstellen, um das Wachstum zu dokumentieren.
- (c) **Pflanzenschutzspritze mit mobilem Sensorknoten:** Die Pflanzenschutzspritze erfüllt zwei Funktionen. Zum einen lassen sich Blattoberflächentemperaturen zur Abschätzung von Pflanzenstress erheben. Zum anderen können die auf den Sammelknoten gespeicherten Daten (Messdaten der kleinen Sensorknoten und Messdaten der Sammelknoten) automatisiert abgerufen werden. Die automatische Übertragung hat den Vorteil, dass die Daten zuverlässig während der Vorbeifahrt am Sammelknoten übertragen werden und somit menschliche Interaktionen mit dem System minimiert wird. Dies vereinfacht die Verwendung des Systems und sorgt zudem für eine zuverlässige und regelmäßige Übertragung von Sensordaten, auch wenn kein Mobilfunk auf dem Feld verfügbar ist. Für die präzise Zuordnung der gemessenen Blattoberflächentemperatur zu einem Pflanzenstandort wurde die Pflanzenschutzspritze mit einem GPS ausgestattet. Bei Betrieb in der Praxis ließe sich hierfür auf vorhandene Systeme auf dem Schlepper selber zurückgreifen (GPS ist dort meist schon vorhanden).
- (d) **Tablet:** Das Tablet im Schlepper dient zur Steuerung des Systems und als zusätzlicher Datenspeicher. Auf dem Tablet wird die Messung der Blattoberflächentemperaturen vom Fahrer gestartet. Während der Fahrt zeichnet das System die gemessenen Daten auf und stellt sie dem Benutzer visuell auf dem Tablet dar. Somit lässt sich für den Benutzer der Fortschritt der Messung leicht verfolgen. Eine genaue Auswertung der Daten erfolgt allerdings erst später, nachdem die Daten vom Tablet an einen Backend-Dienst übertragen wurden. Neben der Speicherung der Temperaturdaten nimmt das Tablet ebenfalls die von den Sammelknoten erhaltenen Daten auf.
- (e) **Farm:** Die Farm ist das Ziel sämtlicher auf dem Feld erhobener Daten. Nach Eintreffen des Traktors auf der Farm stellt das Tablet automatisch eine Verbindung mit dem dort vorhandenen WLAN her und lädt die Daten über das Internet an ein Backend zur weiteren Auswertung.

reduzieren, abgeschaltet. Am Mikrocontroller angeschlossen ist ein Laderegler, mit dessen Hilfe eine Batterie über ein vorhandenes Solarpanel geladen werden kann. Auf diese Weise lässt sich der Sammelknoten autark betreiben. Detaillierte Informationen über den Sammelknoten sind in (ROTTMANN et al. 2016) zu finden.

Für die durchgeführten Versuche auf dem Feld waren zwei Messungen der kleinen Sensorknoten pro Stunde vorgegeben. Um die Übertragung der Messwerte an die Sammelknoten sicherzustellen, wurde der Raspberry Pi zu jeder vollen und halben Stunde für 5 Minuten eingeschaltet. Die kleinen Sensorknoten wurden mit 2,5 Minuten Versatz zum Start des Raspberry Pis geweckt. Dieser Versatz der Zeiten ist notwendig, um die stärker werdenden Abweichungen der RTCs zu der Realzeit zu kompensieren. Die RTCs und Quarze wurden vor dem Versuchsaufbau kalibriert, sodass der Versatz bei nur etwa einer Sekunde pro Woche liegt. Somit können die Uhren um bis zu 150 Sekunden voneinander abweichen, was einen zuverlässigen Betrieb über die Saison hinweg sicherstellt. Durch regelmäßiges Synchronisieren der Uhren ließe sich das Problem ebenfalls lösen. Ein entsprechender Mechanismus zur Zeitsynchronisation wurde inzwischen für zukünftige Experimente implementiert.

In Abbildung 2 ist der auf der Pflanzenschutzspritze montierte mobile Sensorknoten (c) zu sehen. Dieser verfügt über ein GPS, einen Raspberry Pi und einen Akku zur Stromversorgung. Der Raspberry Pi ist mit zwei zusätzlichen WLAN-Antennen ausgestattet. Mit der einen wird eine Verbindung zu den Sammelknoten hergestellt und die aggregierten Daten werden von diesen an den Knoten selber übertragen. Die zweite Antenne stellt dem Tablet ein WLAN zur Verfügung, über welches dem Knoten Steuerkommandos übermittelt und Messdaten zwischen dem mobilen Knoten und dem Tablet ausgetauscht werden können.

Zur Messung der Blattoberflächentemperatur wurden Infrarot-Temperatursensoren (MLX90614, Melexis, Belgien) einseitig an dem 6 m langen Gestänge der Spritze in einem Abstand von 35 cm montiert. Sie messen die Temperatur mit einer Frequenz von 2 Hz, wobei die Daten auf dem mobilen Knoten der Pflanzenschutzspritze gesammelt und zusammen mit der GPS-Position auf dem mobilen Knoten gespeichert werden.

Das Tablet (d) stellt, wie eben beschrieben, eine Verbindung mit dem mobilen Knoten auf der Spritze her. Auf diese Weise lassen sich Steuerkommandos (Start/Stop einer Messung) an den Knoten übermitteln. Vom Knoten selber erhält das Tablet die gemessenen Blattoberflächentemperaturdaten der Pflanzen und ebenfalls alle Daten, die von den Sammelknoten abgerufen wurden. Somit sind auf dem Tablet alle Daten gespeichert, die auf dem Feld erhoben werden. Für eine erfolgreiche Übertragung dieser Daten an ein Backend, welches die Messdaten automatisiert auswertet und für den Landwirt bereitstellt, ist nur die Mitnahme des Tablets nötig. Ein manuelles (und damit fehleranfälliges) Kopieren entfällt. Alternativ ist eine direkte Übertragung der Daten vom Traktor an das Backend möglich, wenn dieser sich nach Erreichen des Hofes mit dem dort vorhandenen WLAN verbindet.

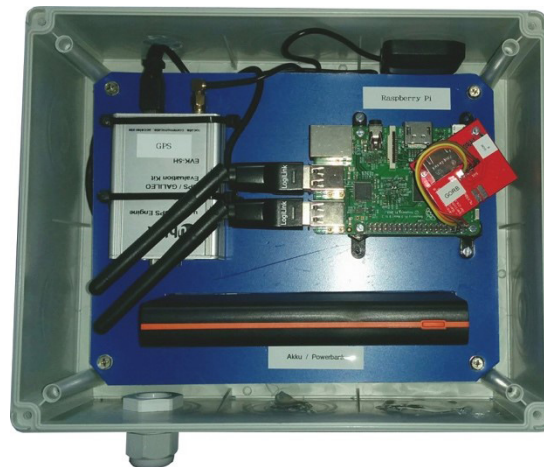


Abbildung 2: Mobiler Knoten auf der Pflanzenschutzspritze. Dieser enthält ein GPS, einen Raspberry Pi, einen Akku zur Stromversorgung sowie einen Anschluss für die an der Traverse der Feldspritze befestigten Temperatursensoren.

Verwendete Software

Der PotatoScanner besteht aus verschiedenen Teilsystemen, die miteinander interagieren und Daten austauschen. Eine Anforderung an das System ist eine robuste und zuverlässige Funktionsweise. Hierfür muss der Austausch der Daten möglichst zuverlässig funktionieren. Können beispielsweise nicht alle Daten von den Sammelknoten abgerufen werden, verringert sich die Genauigkeit der Auswertung. Auch muss die Aufzeichnung der gemessenen Blattoberflächentemperaturen sichergestellt werden.

Die Daten sollen drahtlos zwischen den einzelnen Komponenten übertragen werden. Derartige Übertragungen sind allerdings durch diverse Störer (fremde Sender) fehleranfällig. Beispielsweise beeinflussen sich gleichzeitig durchgeführte Übertragungen gegenseitig. Mehrwegeausbreitung, Reflexion und Brechung machen es für den Empfänger der Übertragung schwieriger, Daten aus dem empfangenden Funksignal zu dekodieren. Umwelteinflüsse verändern Übertragungseigenschaften und können die Reichweite der Übertragung reduzieren.

Für ein zuverlässiges System ist es somit notwendig, die Auswirkungen der genannten (und ggf. weiterer) Fehlerquellen zu minimieren und Mechanismen zu schaffen, die bei auftretenden Fehlern korrigierend eingreifen. Für die Implementierung des PotatoScanners wurde daher auf verzögerungstolerante Netzwerkarchitekturen, nachfolgend als „Delay Tolerant Networking“ (DTN) bezeichnet, (RFC4838 (CERF et al. 2007)) und im Speziellen auf das Bündelprotokoll (RFC5050 (SCOTT und BURLEIGH 2007)) verwendet. Das Bündelprotokoll kann in Netzwerken verwendet werden, in denen keine kontinuierliche Ende-zu-Ende-Verbindung zwischen den Teilnehmern besteht. Es nutzt das sogenannte Store-Carry-Forward-Prinzip (Teilstreckenprinzip), um Informationen mithilfe einer oder mehrerer Zwischenstationen (z. B. anderer Sensorknoten) an das Ziel zu übertragen. Die Daten werden dabei solange auf der jeweiligen Zwischenstation gespeichert, bis eine Verbindung zu der nächsten Station besteht. Gerade in sehr dynamischen Netzwerken, bei denen durch physische Bewegung dem Teilnehmer unbekannt ist, zu welchen Zeitpunkten welche Verbindungen bestehen, lassen sich auf diese Weise dennoch Daten vom Sender an einen Empfänger übermitteln. Bezogen auf das hier vorgestellte und in Abbildung 1 dargestellte Szenario stellt der Traktor mit der Pflanzenschutzspritze und dem Tablet die dynamische Komponente im System dar. Die Daten gelangen zunächst auf

die Sammelknoten wo sie so lange gespeichert werden, bis die Pflanzenschutzspritze in Reichweite kommt. Von dort werden die Daten an die Pflanzenschutzspritze übertragen und ebenfalls solange auf dieser vorgehalten, bis die Daten mittels WLAN beim Eintreffen auf dem Hof an das Ziel im Backend übertragen werden können. Durch redundante Speicherung der Daten auf den verschiedenen Sammelknoten konnte die Zuverlässigkeit des Systems weiter gesteigert werden.

Für die Übertragung der Daten von den Sammelknoten an die Pflanzenschutzspritze und von dieser an das Backend wurde IBR-DTN (DOERING et al. 2008, SCHILDT et al. 2011) verwendet. IBR-DTN ist eine Implementierung des Bündelprotokolls, welches am Institut für Betriebssysteme und Rechnerverbund (IBR) der Technischen Universität Braunschweig entwickelt wurde und durch seine leichtgewichtige Implementierung auf diverser Hardware eingesetzt werden kann. Beispiele hierfür sind die Android-Implementierung, die auf dem hier verwendeten Tablet verwendet wird, und die Linux-Implementierung, die auf den Sammelknoten zum Einsatz kommt.

Benutzerinterface

Die Messungen der Sensorknoten und die Übertragung an die Sammelknoten erfolgt automatisch und muss vom Benutzer nicht überwacht werden. Die Frequenz der Messungen, hier alle 30 Minuten, kann vor der Ausbringung der Knoten durch den Benutzer festgelegt werden. Die Sammelknoten stellen automatisch die Speicherung und Bereitstellung der Daten für die Pflanzenschutzspritze sicher.

Anders verhält es sich mit der Steuerung der Messung für die Blattoberflächentemperaturen. Auf dem Traktor befindet sich das Tablet, über das die Messung gestartet werden kann. Hierfür wird zunächst der Traktor samt Pflanzenschutzspritze auf dem Feld in Position gebracht. Bei den von uns verwendeten Temperatursensoren (MLX90614, Melexis, Belgien) ergibt sich aus dem Öffnungswinkel (72°) und dem Abstand der Sensoren zueinander, dass das Spritzengestänge circa 30 cm über den Pflanzen fahren muss, um die Blattoberflächentemperatur lückenlos zu erfassen. Das Gestänge muss somit vor Fahrtbeginn entsprechend angehoben werden. Der Start der Messung muss dem System durch Betätigung des entsprechenden Buttons in der Applikation angezeigt werden. Danach werden die Temperaturen zweimal pro Sekunde erhoben und gemeinsam mit der GPS-Position der Pflanzenschutzspritze in einer Datenbank abgespeichert. Ist das Ende der Reihe erreicht, kann dies erneut durch den Fahrer eingegeben werden. Im Anschluss kann der Traktor gewendet und die Messung wird für die nächste Reihe fortgesetzt werden. Dies wird solange wiederholt, bis die zu vermessende Fläche komplett erfasst ist.

In Abbildung 1 ist auf dem Tablet (Schritt d) die Auswertung der Messung angedeutet. Für jeden Sensor ist die jeweils gemessene Temperatur dargestellt und farblich codiert. Über die farbliche Hinterlegung lassen sich schnell Abweichungen ausfindig machen und Bereiche lokalisieren, die beispielsweise erhöhte Blattoberflächentemperaturen aufweisen.

Die in einer Datenbank gespeicherten Messwerte werden mithilfe von IBR-DTN zur weiteren Auswertung an ein Backend übertragen, sobald sich das Tablet im WLAN des Hofes befindet und eine Internetverbindung vorhanden ist. In unserem Fall wurden die Daten aus der Versuchsstation Dethlingen (VSD) an die Technische Universität Braunschweig übertragen, wo diese ausgewertet und der VSD zur Verfügung gestellt wurden. Übertragung, Auswertung und Bereitstellung erfolgten automatisiert.

Auswertung des Sensorknotennetzwerks

Die hier vorgestellten Ergebnisse stammen aus der Wachstumsperiode 2018 und wurden auf den Versuchsfeldern der Versuchsstation Dethlingen durchgeführt. Auf dem Feld wurden zwei Sammelknoten installiert (Abbildung 3). Knoten 19 stand im beregneten Teil des Feldes, Knoten 24 im nicht beregneten Bereich. Der Traktor mit Pflanzenschutzspritze fuhr von der Startposition aus los, machte am Ende eine Wende und fuhr zur Startposition zurück. Somit passierte die Pflanzenschutzspritze zweimal die Sammelknoten. Die kleineren Knoten zur Messung der Bodenfeuchte und Bodentemperatur waren jeweils nördlich und südlich der Sammelknoten platziert.

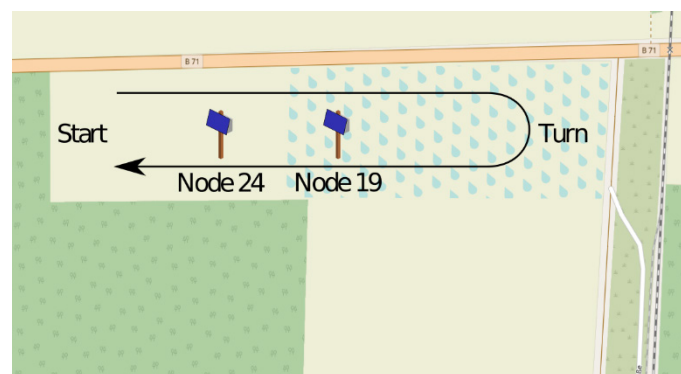


Abbildung 3: Aufbau des Feldversuchs zur Reichweitenermittlung. Die Signalstärke (RSSI) zu den Knoten 19 und 24 wurde jeweils an den zwei Punkten „Start“ und „Wenden“ an unterschiedlichen Tagen gemessen. Die Ergebnisse sind in Tabelle 1 festgehalten (Hintergrundquelle: ©OpenStreetMap).

Einfluss der Pflanzen auf die Konnektivität

Auch wenn der Aufbau auf dem Feld statisch wirkt, da die Knoten ortsfest installiert sind, sind die Verbindungen der kleinen Messknoten zu den Sammelknoten über die Saison hinweg nicht konstant. In der Abbildung 4 ist auf der linken Seite ein geöffneter Sammelknoten zur Mitte der Wachstumsperiode 2018 abgebildet und auf der rechten Seite zum Ende der Saison.



Abbildung 4: Die Abbildungen zeigen die unterschiedliche Umgebungsbedingungen für die Sammelknoten auf dem Feld. Im ersten Bild wird der Knoten fast von dem Kartoffelkraut umschlossen, auf dem zweiten steht der Knoten frei im Feld.

Durch das hohe Kraut der Kartoffeln (stellenweise bis zu einem Meter) werden die kleinen Sensorknoten stark abgeschirmt. Da frisches Kartoffelkraut einen Wasseranteil von über 90 % aufweisen kann (SCHREIBER 1961) und damit die Dämpfung der Funkwellen durch das Wasser relativ hoch ist, erreichen die kleinen Sensorknoten meist nur einen Sammelknoten. Zum Ende der Saison, wenn das Kraut der Kartoffeln zunehmend abstirbt und zusammenfällt, erreichen diese auch weitere Sammelknoten, da durch das Fehlen des Kartoffelkrauts die Funkreichweite auf dem Feld ansteigt.

Die Knoten 19 und 24 hatten einen Abstand von 51,4 m zueinander. Die kleinen Sensorknoten waren von den Sammelknoten zwischen 3,5 m und 5,3 m entfernt. Sie waren circa 15 cm im Boden vergraben, mussten also durch den Boden und durch das Kartoffelkraut den Sammelknoten erreichen. Bei diesen Abständen waren die kleinen Sensorknoten zu jeder Zeit in der Lage den nahegelegenen Sammelknoten zu erreichen und die Messwerte zu übertragen. Das Erreichen des weiter entfernten Sammelknotens war aufgrund des absterbenden Kartoffelkrautes nur zum Ende der Saison möglich. Da der Aufbau des Versuchs erst zur Mitte der Saison erfolgte, wo der Sprossapparat der Kartoffelpflanze schon entsprechend hochgewachsen war, kann keine detaillierte Aussage zum Anfang der Wachstumsperiode getroffen werden. Es ist aber zu vermuten, dass bei den kleinen Pflanzen die Erreichbarkeit beider Sammelknoten gegeben wäre und diese sich erst sukzessive mit dem Größenwachstum des Sprossapparats der Kartoffelpflanzen verschlechtert.

Kommunikationsreichweite der Sammelknoten

Für eine robuste Funktionsweise des Systems ist die Übermittlung der Daten von den Sammelknoten an die Pflanzenschutzspritze ausschlaggebend. Wichtig für die Pflanzenschutzspritze ist dabei möglichst lange in Kommunikationsreichweite der Sammelknoten zu sein, damit die Übertragung der DTN-Bündel sichergestellt werden kann. Folglich sollte die Funkreichweite der Sammelknoten möglichst hoch sein. Wie bereits erwähnt, ist die Reichweite durch das Sprosswachstum der Pflanzen beeinflusst. Daher wurde bei der Installation der Sammelknoten darauf geachtet, dass die Antennen möglichst über dem Sprossapparat der Kartoffeln bleiben. Die Sammelknoten wurden in einer Höhe von 1,2 m angebracht (Abbildung 4), wodurch sich der Einfluss der oberirdischen Pflanzenteile auf die Kommunikation zwischen Sammelknoten und Pflanzenschutzspritze auf ein Minimum reduzieren sollte.

Tabelle 1: Gemessene RSSI-Werte vom Start/Wende-Bereich zu Knoten 19/24

Datum	22.5.	28.5.	4.6.	11.6.	15.6.	18.6.	25.6.	2.7.	9.7.	16.7.	23.7.	30.7.	6.8.	13.8.	27.8.	3.9.
Knoten 19	-74	-75	-79	-79	-84	-80	-81	-83	-82	-85	-64	-80	-77	-80	-79	-79
Knoten 24	-79	-78	-79	-80	-80	-81	-74	-80	-72	-66	-72	-77	-78	-77	-73	-78

Alle Angaben in dBm.

Um die Qualität der Funkverbindung zwischen den Kommunikationspartnern zu bewerten, wird der Received Signal Strength Indicator (RSSI) verwendet. Je geringer er ausfällt, umso niedriger ist die Empfangsqualität. Die in diesem Versuch verwendeten WLAN-Chips (BCM43143, Infineon, Deutschland) können laut Datenblatt ein Signal bis zu -97 dBm empfangen. In der Realität fällt dieser Wert erfahrungsgemäß geringer aus. Die Tabelle 1 zeigt die gemessenen RSSI-Werte vom Startbereich zum Knoten 24 (74 m) und vom Wendebereich zum Knoten 19 (195 m). Die Daten wurden während

der Überfahrt der Pflanzenschutzspritze zur Blattoberflächentemperaturmessung aufgezeichnet. Die Pflanzenschutzspritze fährt zweimal an den Sammelknoten 19 und 24 vorbei (Abbildung 3). Die gemessenen RSSI-Werte liegen dabei für beide Knoten zwischen -64 dBm und -85 dBm. Berücksichtigt man die Wuchshöhe des Sprossapparats der Kartoffelpflanzen, erkennt man, dass dieser ein Einfluss auf die Signalqualität zwischen Sammelknoten und Spritze in den jeweiligen Bereichen hatte. Auch ist erkennbar, dass die Pflanzenschutzspritze mit den Knoten über eine Entfernung von bis zu 195 m kommunizieren kann. Leider war das Versuchsfeld nicht groß genug, um die maximale Kommunikationsreichweite zu ermitteln. Hinzu kommt, dass diese Beobachtungen stark von dem verwendeten Setup abhängig sind. Für die Kommunikation wurde WLAN im 2,4-GHz-Bereich verwendet.

Einfluss der Bodensättigung auf den RSSI-Wert

Die Abbildung 5 zeigt den Einfluss des Wasseranteils im Boden auf den RSSI-Wert, gemessen an einem Sammelknoten. Der kleine Sensorknoten befand sich in 3,6 m Entfernung zu diesem. Der Graph zeigt einen Ausschnitt der Messdaten vom 05.08.2018 bis zum 16.08.2018. In diesen Zeitraum regnete es auf dem Versuchsfeld an drei verschiedenen Tagen. Die Graphen der anderen Knoten zeigen einen ähnlichen Verlauf, da alle Knoten in derselben Tiefe vergraben waren und einen ähnlichen Abstand zum Sammelknoten aufweisen.

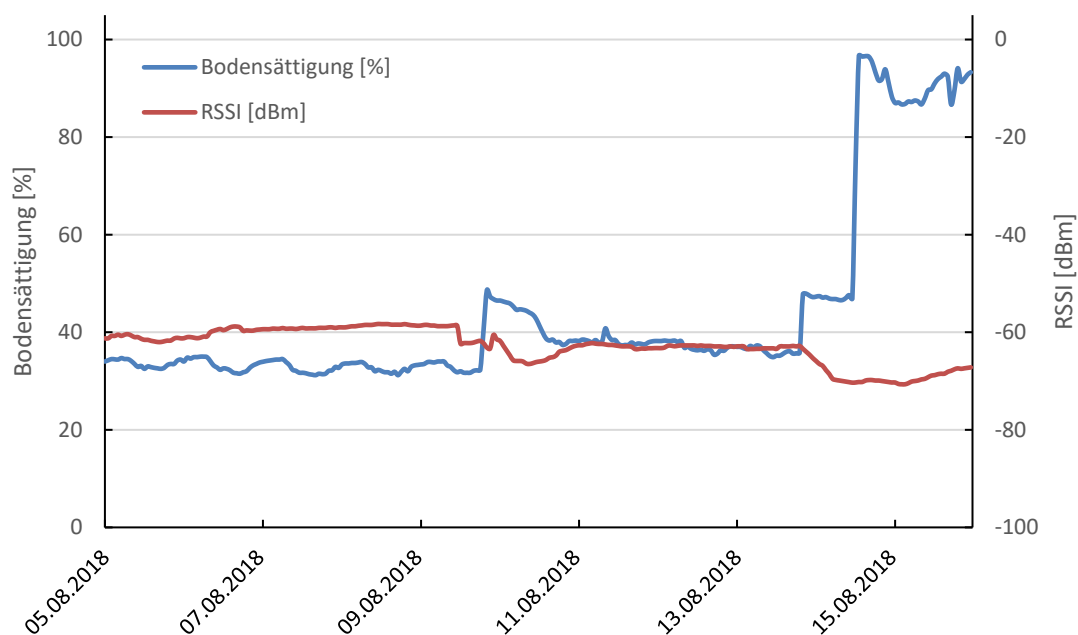


Abbildung 5: Einfluss der Bodensättigung auf die Signalstärke (RSSI). Der Indikator der Signalstärke verringert sich, wenn der Wasseranteil im Boden zunimmt, wie z. B. an Regentagen (09. August und 13./14. August).

Am 9. August 2018 regnete es 7 mm auf dem Versuchsfeld. Der RSSI-Wert verschlechterte sich dabei um 8 dBm. Am Abend des 13. August betrug der Niederschlag 9 mm und am darauffolgenden Morgen regnete es nochmals 6 mm. Der RSSI-Wert verschlechterte sich dabei erneut um 8 dBm. Nach dem 14. August, mit abnehmender Bodensättigung, ist eine Verbesserung der RSSI-Werte festzustellen.

Neben der Wuchshöhe des Sprossapparats der Kartoffelpflanzen hat somit auch die Wettersituation einen Einfluss auf die Verbindungsqualität der Datenübertragung. Bei der Errichtung eines Sensornetzwerks auf dem Feld sollten daher genug Reserven für die Kommunikation vorgesehen werden, um eine Übertragung der Daten garantieren zu können. Alternativ müssen Mechanismen implementiert werden, die die Daten solange vorhalten, bis sie übertragen werden können. Wie oben bereits erwähnt, eignen sich hierfür beispielsweise DTNs, welche die Daten lokal speichern, bis diese erfolgreich übermittelt werden können.

Analyse der gemessenen Oberflächentemperaturen

Nachdem der Traktor samt Pflanzenschutzspritze zurück auf dem Gelände der Versuchsstation Dethlingen war, wurden die Daten automatisch über das dort vorhandene WLAN in die Cloud (TU Braunschweig) übermittelt, woraufhin die Daten ausgewertet und für den Benutzer verfügbar gemacht wurden. Die Messdaten sind unter <https://www.ibr.cs.tu-bs.de/projects/potatoscanner/> abrufbar. Hierfür wurden die mit GPS aufgezeichneten Blattoberflächentemperaturen auf eine Karte eingezeichnet. Das Ergebnis ist aus Abbildung 6 für Messungen am 15.06.2018 zu entnehmen. Deutlich zu erkennen sind die zwei gefahrenen Spuren der Pflanzenschutzspritze. Ebenso lässt sich eine Temperaturdifferenz der Blattoberflächen zwischen dem westlichen und östlichen Teil des Feldes erkennen. Im westlichen Teil liegt die gemessene Blattoberflächentemperatur der Pflanzen zwischen 35 °C und 40 °C, während die Blattoberflächentemperatur im östlichen Teil zwischen 15 °C und 20 °C liegt. Ursache hierfür ist die künstliche Beregnung des östlichen Feldteils. Durch den feuchteren Boden konnten die Pflanzen mehr Wasser aufnehmen, welches über die Blätter abgegeben wurde und durch die dadurch bewirkte Verdunstungskälte zur Abkühlung der Blattoberflächen beiträgt.

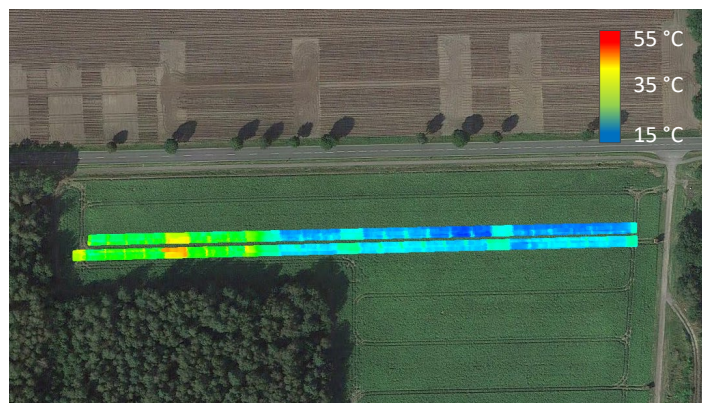


Abbildung 6: Visualisierung der gemessenen Blattoberflächentemperaturen (15.06.2018). Der rechte Teil des Feldes wurde künstlich bewässert, wohin der linke Teil nicht bewässert wurde. Zu erkennen ist eine deutlich erhöhte Blattoberflächentemperatur auf dem linken gegenüber dem rechten Feldabschnitt (Hintergrundquelle: ©Google Maps).

Bedeutung der Messdaten für die Landwirtschaft

Im Rahmen einer nachhaltigen Landbewirtschaftung stellt die Effizienzverbesserung der pflanzenbaulichen Maßnahmen, wie Düngung, Pflanzenschutz und Bewässerung, einen wesentlichen Baustein dar. Neben der Züchtung umweltstabilerer Sorten ist es wichtig, die zumeist limitierenden Wachstumsfaktoren Wasser und Nährstoffe den Pflanzen so gezielt und bedarfsabhängig zur Verfügung zu stellen, dass diese einen möglichst hohen Ausnutzungsgrad erreichen können. Durch das

Erfassen der Blattoberflächentemperaturen der Pflanzen während der Überfahrten mit einer Pflanzenschutzspritze lassen sich ohne zusätzlichen Aufwand aktuelle Daten generieren, die vor allem Auskunft über den Trockenstress der Pflanzen auf unterschiedlichen Teilbereichen des Schlages geben. Höhere Blattoberflächentemperaturen signalisieren bei Pflanzen einen Trockenstress (PRASHAR et al. 2013), der sowohl das Pflanzenwachstum als auch die Nährstoffaufnahme einschränkt. Ein z. B. an den trockensten Bereichen des Feldes ausgerichtetes Beregnungsregime ermöglicht einen bedarfsabhängigen Beregnungsbeginn sowie auf den besseren Teilflächen eine deutliche Wassereinsparung. Gleichzeitig wird so sichergestellt, dass die ausgebrachten Nährstoffe von allen Pflanzen in größtmöglichem Maße ausgenutzt und unerwünschte Verluste minimiert werden. Darüber hinaus stände mit den Blattoberflächentemperaturkarten ein weiterer Parameter zur Verfügung, der zusammen mit den historischen Schlagdaten eine ursachenbezogene Analyse der aktuellen Ertragsdaten erleichtert.

Mit der gezielten Verteilung einer größeren Anzahl von Sensorknoten auf dem Feld könnten die teilflächenspezifische Standortkenntnisse über die Nutzung verschiedener Boden-, Meteo- und Pflanzensensoren erweitert und deren Dynamik bei unterschiedlichen Witterungsbedingungen erfasst werden. Dies eröffnet bei vergleichbaren Situationen eine gezielte Einleitung von Maßnahmen, die die zu erwartenden Auswirkungen abmildern und damit insgesamt zu einer nachhaltigeren Ertragsbildung beitragen.

Schlussfolgerungen und Ausblick

Das System PotatoScanner besteht aus mehreren aufeinander aufbauenden Komponenten, welche eine Überwachung von Ackerflächen ermöglichen. Zum einen kommen lokale Sensorknoten zum Einsatz, welche beispielsweise Temperatur und Bodenfeuchte erfassen. Zum anderen ermöglichen an einer Pflanzenschutzspritze angebrachte Temperatursensoren die Ermittlung der Blattoberflächentemperaturen, welche beispielsweise genutzt werden können, um Rückschlüsse auf den Trockenstress von Pflanzen ziehen zu können.

Der durchgeführte Versuch zeigt, dass bei der Installation von Sensornetzen vorab Überlegungen bezüglich möglicher Einflussfaktoren wichtig sind. So haben unter anderem Wetter und die Wuchshöhe der Pflanzen einen Einfluss auf die Verbindungsqualität der einzelnen Sensorknoten. Bei der Konzeptionierung muss somit die dadurch erzeugte Dämpfung mit eingeplant werden, um ein robustes Arbeiten des Gesamtsystems sicherzustellen. Dies gilt ebenso für das zur Übertragung verwendete Protokoll. In diesem Versuch zeigte sich DTN als sehr robust, sodass alle Daten erfolgreich von den Sammelknoten an die modifizierte Pflanzenschutzspritze und von dort an das Backend übertragen werden konnten. DTNs sind in der Lage mit abbrechenden Verbindungen umzugehen und eine robuste Datenübertragung sicherzustellen. Schlussendlich war das System durch seinen hohen Automatisierungsgrad für die Mitarbeiter der VSD leicht zu bedienen und bedurfte keiner speziellen Schulung.

Mit den exemplarisch erhobenen Daten der Blattoberflächentemperaturen ließe sich die Intensität des Trockenstresses differenzieren und zeitnah entsprechende Gegenmaßnahmen, z. B. in Form einer teilflächenspezifischen Beregnung, einleiten. Gleichzeitig ließen sich Temperaturkarten erstellen, mit deren Hilfe Ertragsanalysen unterstützt werden können. Gezielt verteilte Sensorknoten bieten darüber hinaus die Möglichkeit, die Dynamik der Veränderungsprozesse im Bestand und Boden zu erfassen und für zukünftige pflanzenbauliche Maßnahmen im Sinne der Effizienzsteigerung zu nutzen.

In Zukunft sollen die verwendeten kleinen Sensorknoten weiter verbessert werden. Wünschenswert wäre ein Design bei dem die Sensorknoten wie Kartoffeln gepflanzt und geerntet werden kön-

nen. Dies würde den Aufbau eines Sensornetzes weiter automatisieren und vereinfachen. Auch wäre eine Einlagerung der „geernteten“ Sensorknoten denkbar, bei der die Sensorknoten im Lager weiter die Umgebungsbedingungen der Kartoffeln überwachen. Hierfür wurden bereits erste erfolgreiche Experimente durchgeführt (GERNERT et al. 2018).

Literatur

- Büsching, F.; Kulau, U.; Wolf, L. (2012): Architecture and Evaluation of INGA - An Inexpensive Node for General Applications. *Sensors*, 2012 IEEE, S. 842-845, <https://www.ibr.cs.tu-bs.de/papers/buesching-sensors2012.pdf?lang=de%3C>
- Cerf, V.; Burleigh, S.; Hooke, A.; Torgerson, L.; Durst, R.; Scott, K.; Fall, K.; Weiss, H. (2007): RFC4838 - Delay-Tolerant Networking Architecture. Internet Engineering Task Force (IETF), pp. 1-35, <https://tools.ietf.org/html/rfc4838>
- Doering, M.; Lahde, S.; Morgenroth, J.; Wolf, L. (2008): IBR-DTN: an efficient implementation for embedded systems. *Proceedings of the Third Workshop on Challenged Networks*, pp. 117-120, <https://doi.org/10.1145/1409985.1410008>
- Gernert, B.; Schwartau, F.; Raabe, S.; Schoebel, J.; Schubert, K.; Rottmann, S.; Wolf, L. C. (2018): Evaluation of Suitable Radio Frequencies for Data Transmission in Potato Warehouses. *IEEE 15th International Conference on Mobile Ad Hoc and Sensor Systems (MASS)*, pp. 220-227, <https://ieeexplore.ieee.org/document/8567565>
- Prashar, A.; Yildiz, J.; McNicol, J.; Bryan, G.; Jones, H. (2013): Infra-red Thermography for High Throughput Field Phenotyping in *Solanum tuberosum*. *PLoS ONE* 8(6), <https://dx.doi.org/10.1371/journal.pone.0065816>
- Rottmann, S.; Hartung, R.; Käberich, J.; Wolf, L. (2016): Amphisbaena: A Two-Platform DTN Node. *International Conference on Mobile Ad Hoc and Sensor Systems (MASS)*. IEEE, pp. 246-254, https://www.ibr.cs.tu-bs.de/oa/Rottmann_MASS_2016.pdf
- Schildt, S.; Morgenroth, J.; Pöttner, W.-B.; Wolf, L. (2011): IBR-DTN: A lightweight, modular and highly portable Bundle Protocol implementation. *Electronic Communications of the EASST*, Vol. 37, https://www.ibr.cs.tu-bs.de/papers/ibr_dtn_architecture_wasangi2011_slides.pdf
- Schreiber, K. (1961): *Chemie und Biochemie unter besonderer Berücksichtigung qualitätsbestimmender Faktoren*. In: *Die Kartoffel - Ein Handbuch*, Hg. Schick, R.; Klinkowski, M., Berlin, VEB Deutscher Landwirtschaftsverlag, S.191-352.
- Scott, K.; Burleigh, S. (2007): RFC5050 - Bundle Protocol Specification. Internet Engineering Task Force (IETF), pp. 1-50, <https://tools.ietf.org/html/rfc5050>

Autoren

Björn Gernert, **Jan Schlichter** und **Prof. Dr. Lars Wolf** arbeiten an der Technischen Universität Braunschweig am Institut für Betriebssysteme und Rechnerverbund (IBR), Mühlenpfordtstraße 23, 38106 Braunschweig, E-Mail: [gernert|schlichter|wolf]@ibr.cs.tu-bs.de

Dr. Rolf Peters ehemaliger Leiter der Versuchsstation Dethlingen, CEO der PotatoConsult UG, Hiddinger Straße 33, 27374 Visselhövede, E-Mail: info@docpotato.de

Danksagung

Wir möchten uns bei der Versuchsstation Dethlingen (VSD) bedanken, die uns bei der Durchführung unserer Versuche tatkräftig unterstützt hat und uns ermöglichte, die Experimente auf ihrer Versuchsfläche durchzuführen.