Abschlussbericht

PRo-MAPPER

PLANT ROBOT FOR MULTIDIMENSIONAL ARTIFICIAL PHENOTYPING FOR PLASMA ENHANCED RESEARCH

Registriernummer: 254 021 0329

OGP-ROB OGP-PT OGP-HS

Niklas Noack (wiss. Bearbeitung)
Christian Ochs (wiss. Bearbeitung)
Dr. Stefan Paulus (wiss. Bearbeitung)
Nathan Okolo (stud. Unterstützung)
Luca Menze (stud. Unterstützung)
Susanne Dräger (unternehm. Bearbeitung)
Dr. Georg Avramidis (Projektkoordination)
Prof. Dr. Wolfgang Viöl (wiss. Leitung)
Elke Haase (unternehm. Leitung)
Prof. Dr. Anne-Katrin Mahlein (wiss. Leitung)
Prof. Dr. Thomas Linkugel (Projektleitung / wiss. Leitung)

Bewilligungszeitraum: 29. März 2021 bis 15. Februar 2024

Projektzeitraum: 01. August 2021 bis 31. Dezember 2023

Inhaltsverzeichnis

1 Kurzdarstellung **2**
1.1 Ausgangssituation und Bedarf 2
1.2 Projektziel und konkrete Aufgabenstellung 2
1.3 Mitglieder der OG 3
1.4 Projektgebiet 6
1.5 Projektlaufzeit und Dauer 6
1.6 Budget 6
1.7 Ablauf des Verfahrens 7
1.8 Zusammenfassung der Ergebnisse 11

2 Eingehende Darstellung **13**
2.1 Verwendung der Zuwendung 13
2.1.1 Gegenüberstellung der Planung im Geschäftsplan und der tatsächlich und abgeschlossenen Teilschritte und die Aufgaben im Rahmen der laufenden Zusammenarbeit der OG 13
2.1.2 Darstellung der wichtigsten finanziellen Positionen 16
2.2 Detaillierte Erläuterung der Situation zu Projektbeginn 19
2.2.1 Ausgangssituation 19
2.2.2 Projektaufgabenstellung 19
2.3 Ergebnisse der OG in Bezug auf 21
2.3.1 Wie wurde die Zusammenarbeit im Einzelnen gestaltet? . . . 21
2.3.2 Was war der besondere Mehrwert bei der Durchführung des Projekts als OG? 21
2.3.3 Ist eine weitere Zusammenarbeit der Mitglieder der OG nach Abschluss des geförderten Projekts vorgesehen? 22
2.4 Ergebnisse des Innovationsprojektes 23
2.4.1 Zielerreichung 23
2.4.2 Abweichung zwischen Planung und Ergebnis 25
2.4.3 Projektverlauf 25
2.4.4 Beitrag des Ergebnisses zu förderpolitischen EIP-Themen . . 46
2.4.5 Nebenergebnisse 47
2.4.6 Arbeiten, die zu keinem Ergebnis geführt haben 47
2.4.7 Mögliche weitere Verwendung von Investitionsgütern 47
2.5 Nutzen der Ergebnisse für die Praxis 48
2.6 Verwertung und Nutzen der Ergebnisse 49
2.7 Wirtschaftliche und wissenschaftliche Anschlussfähigkeit 50
2.8 Kommunikations- und Disseminationskonzept 51

3 Anhänge **52**

1 Kurzdarstellung

1.1 Ausgangssituation und Bedarf

Die nachhaltige Versorgung unserer Gesellschaft mit landwirtschaftlich erzeugten Lebensmitteln steht im Mittelpunkt der gesamten Nahrungsmittelproduktion. Bisweilen verzeichnet die Direktsaat unter idealen Bedingungen eine hohe Auflaufrate und führt durch den mittlerweile hohen Technologisierungsgrad und dem weit fortgeschrittenen Einsatz von chemischen Pflanzenschutzmitteln zu hohen Erträgen.

Bedingt durch eine stetig steigende Nachfrage bei zunehmend erschwerten klimatischen Bedingungen sind umfangreiche Maßnahmen unter anderem in Bezug auf den Einsatz chemischer Pflanzenschutzmitteln nötig. Pilzbefall oder Insektenbefall stellen durch immer extremere und schneller wechselnde Umwelteinflüsse wie Regen- oder Trockenperioden neue Herausforderungen dar. Trotz erheblichem Fortschritt in Wissenschaft und Technik über die letzten Jahre liegt für Landwirte oft die Lösung im homogenen Aufbringen erheblicher Mengen an Pestiziden über die gesamte Freifläche. Oft werden diese präventiv ausgebracht. Der vermehrte Einsatz führt beispielsweise zu Resistenzen bei Schädlingen oder Krankheitserregern, was wiederum eine weitere Erhöhung der aufgebrachten Menge an Pflanzenschutzmitteln nach sich zieht.

Mittelbar können chemische Pflanzenschutzmittel Auswirkungen auf die Umwelt oder auch Biodiversität haben. Nicht-Zielorganismen wie andere Insektenarten sind durch Insektizide im großen Umfang betroffen, wodurch ganze ökologische Systeme aus dem Gleichgewicht geraten. Die Liste der mit diesen Mitteln verbundenen Probleme ist umfangreich und reicht neben den bereits aufgeführten, über den Verdacht, krebserregend zu sein, bis hin zu Fruchtbarkeitsstörungen beim Menschen.

So entstehen in Zeiten der Digitalisierung und Mikromechanisierung neue Möglichkeiten und Ansätze im landwirtschaftlichen Betrieb, welche unter dem Sammelbegriff der „intelligenten Landwirtschaft“ oder *smart Farming* verstanden werden. Chemische Pflanzenschutzmittel werden nicht mehr großflächig aufgetragen, sondern punktuell im sogenannten *Spot Spraying*. Vor diesem Hintergrund nimmt die operationelle Gruppe (OG) den Sachverhalt als Motivation, kompetenzübergreifend, interdisziplinär eine Gesamtlösung zu erarbeiten, welche sich im Folgenden in Form eines hoch-automatisierten, intelligenten Anzuchtbeets manifestiert.

1.2 Projektziel und konkrete Aufgabenstellung

Ziel des Projekts war es, neuartige Methoden der Robotik, eine multisensorielle Datenfusion zur Phänotypisierung sowie plasmatechnologische Interventionsansätze für den hochautomatisierten Einsatz im Agrarbereich zu einem neuartigen Gesamtsystem zu kombinieren. Dieses System soll den effizienten Einsatz von konventionellen Pflanzenschutzmaßnahmen und Nährstoffadditiven deutlich früher als bei klassischen Bewirtschaftungssystemen ermöglichen. Zum anderen soll der Einsatz von Pflanzenschutzmitteln durch eine frühzeitige Intervention (z. B. Anwendung alternativer Behandlungs-

methoden, wie plasmaaktivierter Flüssigkeiten) an Saatgut oder Blattapparat, deutlich reduziert oder vermieden werden. Die Versuche wurden prototypisch in automatisierten Anzuchtbeeten durchgeführt. Dazu wurde eine marktverfügbare teilautomatisierte Hochbeetplattform, zu einer multisensoriellen und automatisierten Anlage erweitert (siehe Abbildung 1). Methoden des maschinellen Lernens wurden genutzt, um aus einer geeigneten Menge an Trainingsdaten ein Modell zu entwickeln, das in der Lage ist, die Aufgabe der Klassifikation autonom durchzuführen.

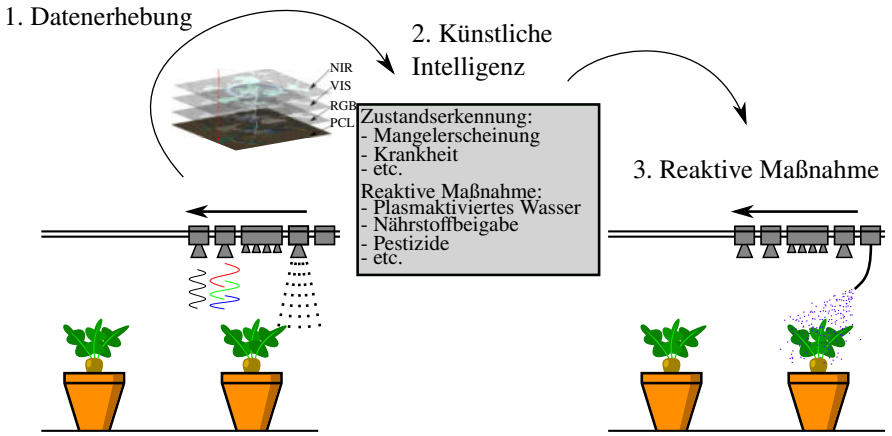


Abbildung 1: Schematische Darstellung bestehend aus den Kernelementen: 1. Datenerhebung durch das Multisensorsystem, 2. Zustandserkennung und Bestimmung der reaktiven Maßnahme durch die künstliche Intelligenz und 3. Durchführung der reaktiven Maßnahme (beispielsweise Behandlung mit plasmaaktiviertem Wasser).

1.3 Mitglieder der OG

Insgesamt engagieren sich vier Kooperations-Partner in der operationellen Gruppe (OG). Dabei übernimmt die HAWK die Rolle des Koordinators, insbesondere durch ihre Abteilung für Robotik (**OGP-ROB**). Ebenfalls beteiligt ist die Abteilung Plasmatechnologie (**OGP-PT**) der HAWK. Das Institut für Zuckerrübenforschung (IfZ) (**OGP-HS**) war ebenfalls in der OG vertreten. Als viertes Mitglied bringt der gartenbauliche Betrieb Piccoplant (**OGP-PP**) sein Know-how aus dem Bereich der Urproduktion ein.

HAWK-Robotik (OGP-ROB): Der Lehrstuhl Robotik und Embedded Systems verfügt über eine breitbandige und fundierte Expertise im Bereich der Robotik, Automation und Embedded Systems. Durch die drei direkt an diesen Lehrstuhl gebundenen Labore für Automatisierungstechnik, Embedded Systems und das vor einem Jahr neu gegründete Autonomous Mobile Robotics Lab (AMRL) stehen, neben einer auf den aktuellsten Stand der Technik ausgelegten Infrastruktur, auch Büros und Werkstätten zur Umsetzung des beantragten Projektes zur Verfügung.

OGP-HS: Das IfZ verfügt über ausführliches Grundlagen- und Expertenwissen im Bereich Zuckerrübe und anderer Nutzpflanzen in landwirtschaftlichen Produktionssystemen. Am IfZ besteht die erforderliche Infrastruktur für agronomisches und laborgestütztes Versuchswesen, aber auch für Experimente mit pilzlichen Pathogenen, Virosen, Unkräutern, oder bodenbürtigen Schaderregern auf unterschiedlichen Skalenebenen (Labor, Gewächshaus, Feld), für pflanzenbauliche Versuche (Feldversuchswesen) und für analytische und physiologische Fragestellungen (Qualitätsanalyse).

HAWK-Plasmatechnik (OGP-PT): Die Expertise des OG-Mitgliedes besteht in der plasmagestützten Behandlung von organischen Materialien bzw. Geweben sowie der Entwicklung entsprechend angepasster Plasmaquellen, z. B. in der Plasmamedizin. Des Weiteren konnten durch langjährige Forschungsaktivitäten Erfahrungen in unterschiedlichen Bereichen der Plasmaanwendungen im Agrarbereich, insbesondere in der Anwendung von PAL (*plasma activated liquids*), gewonnen werden. Das OG-Mitglied hat außerdem langjährige Erfahrung im Maschinenbau insbesondere bei Konstruktion und Fertigung von Funktionsmustern und Demonstratoren.

Piccoplant GmbH: (OG-PP): Die Diplom-Biologin und Geschäftsführerin Elke Haase gründete das Unternehmen piccoplant Mikrovermehrungen GmbH im Jahr 1988 als Labor zur in vitro-Vermehrung von Pflanzen. Im Jahr 2017 belief sich die Jahresproduktion auf etwa 6 Millionen Exemplare. Der Vertrieb der Ware findet sowohl in Deutschland als auch zu 50 Prozent im europäischen Ausland statt. Baumschulen, Gartengroßmärkte und Zierpflanzenhandel machen den Hauptanteil der Kunden aus. Daneben werden Forstgehölze für Forstbaumschulen sowie für den Direktverkauf an Forstämter und private Forsten produziert.

Mitglied	**Mitarbeiter und Funktion**	**Aufgabe**
OGP-ROB (HAWK)	Prof. Thomas Linkugel Projektleitung	Projektleitung
	Dr. Georg Avramidis Projektkoordination	Projektkoordination
	Niklas Noack Wiss. Mitarbeiter	Federführend verantwortlich für die Weiterentwicklung und Konstruktion eines Aufzuchtbeets, die Entwicklung und Konstruktion einer Multisensorsystems, die Gestaltung des Prozessablaufs, die Entwicklung des multisensoriellen Datenfusionsalgorithmus zur Bestimmung des Zustands und der Früherkennung von Stressfaktoren der Pflanze sowie den Entwurf von weiterführenden Projektstrategien.

Fortsetzung auf nachfolgender Seite

Fortsetzung - Mitarbeiter und Funktion

Mitglied	Mitarbeiter und Funktion	Aufgabe
	Luca Menze Wiss. Hilfskraft	Unterstüzung (u. a.) bei der Integration der Multispektralkamera in das Multisensorsystem, Unterstützung bei der Schnittstellenauslegung von Farmbot und Multisensorystem und der Kamerakalibrierung
OGP-PT (HAWK)	Christian Ochs Wiss. Mitarbeiter	Konzeption und Integration des Sensorsetups, Sprühapplikators und des Speichers für das Interventionsmedium. Konstruktive und sicherheitstechnische Optimierung bzw. Anpassung des Farmbotsystems an Realbedingungen sowie Beseitigung konstruktiver Mängel des ursprünglichen Systems. Durchführung von Versuchen und Interpretataion der Ergebnisse zur plasmabasierten Schädlingsbekämpfung.
OGP-HS (IfZ)	Dr. Stefan Paulus Wiss. Mitarbeiter	Konzeption und Implementierung des Sensorsetups, Durchführung von Messungen (einzeln und im hohen Durchsatz), Implementierung von Machine Learning Routinen, automatisierte Auswertung von PAL-versuchen mit Krankheitserregern in Petrischalen, Analyse der PAL Wirkung auf das Wurzelwachstum, bzw. Keimraten, Wissenstransfer, Veröffentlichung.
	B.Sc. Nathan Okole Wiss. Hilfskraft	Aufnahme mit dem Sensorsetup, Datenaufbereitung, -prozessierung, Implementierung und Evaluierung Machine Learning „Erkennung *Cercospora beticola* in Zuckerrübe“.
OGP-PP (PiccoPlant)	Susanne Draeger Dr. Elke Haase	Vorbereitung der Versuchsflächen in Form vergleichbarer Pflanzen zur Versuchsdurchführung. Addressierung der unternehmensspezifischen Anforderungen an das zu entwickelnde System. Prüfung des System-Konzeptes mit anwendungsorientiertem Blick in der Entwicklungs- und Erprobungsphase unter Realbedingungen.

Tabelle 1: Operationelle Gruppen, deren Mitarbeiter und Funktionen

1.4 Projektgebiet

Alle beteiligten wissenschaftlichen Einrichtungen, sowie der gartenbauliche Betrieb befinden sich in Niedersachsen. Die HAWK sowie das IfZ sind in Göttingen ansässig, Piccoplant in Oldenburg. Im ersten Jahr der Projektdurchführung liegt der Schwerpunkt der Entwicklung in Göttingen bei den OG-Partnern OGP-ROB, OGP-PT und OGP-HS. In den Monaten 13-24 wird die OGP-PP aktiv in das Projektgeschehen eingebunden wodurch das Wirken der OG nach Oldenburg ausgeweitet wurde.

1.5 Projektlaufzeit und Dauer

Das Projekt wurde zum 29. März 2021 bis zum 15. August 2023 bewilligt. Der Projektbeginn verschob sich aus verwaltungstechnischen Gründen (Personaleinstellung) an der HAWK auf den 15. Mai 2021, am IfZ auf den 01. Juni 2021. Operativ startete das Projekt am 01.06.2021. Verzögerungen im Projektablauf aufgrund von Einschränkungen (Einzelbelegung von Laboren und Vorbereitungsräumen, zeitliche Arbeit im Schichtsystem, Krankheitsausfall, Lieferverzögerungen) während der Covid19-Pandemie führten (u.a.) dazu, dass die Wachstumsperioden des jahreszeitlichen Zyklus nicht wie geplant zu Versuchsdurchführungen genutzt werden konnten. Deshalb wurde eine kostenneutrale Verlängerung der Projektlaufzeit bis zum 15. Februar 2024 beantragt und am 25. Juli 2023 genehmigt.

1.6 Budget

Insgesamt wurden 481.054,65 € als Gesamtausgaben (netto) bewilligt.

Für das OG-Mitglied Robotik (**OGP-ROB**) wurden insgesamt 135.941,84 € vorgesehen, wobei 97.052,60 € auf Personalkosten, 7.737,84 € für wissenschaftliche Untersuchungen/Sachmittel, 27.007,00 € für den Kauf von Instrumenten und Ausrüstungsgegenständen und 4.144,40 € auf Reisekosten entfallen.

Für das OG-Mitglied Plasmatechnik (**OGP-PT**) wurden insgesamt 116.497,55 € bewilligt, wobei 77.928,50 € auf Personalkosten, 15.520,00 € für wissenschaftliche Untersuchungen/Sachmittel, 18.821,65 € auf den Kauf von Ausrüstungsgegenständen und 4.227,40 € auf Reisekosten entfallen.

Für das OG-Mitglied IfZ (**OGP-HS**) wurden insgesamt 150.617,43 € (durch Kürzung 148.217,71 €) vorgesehen, wobei 91.471,92 € auf Personalkosten, 52.599,73 € für wissenschaftliche Untersuchungen/Sachmittel (Instrumentenkauf) und 4.144,40 € auf Reisekosten entfallen.

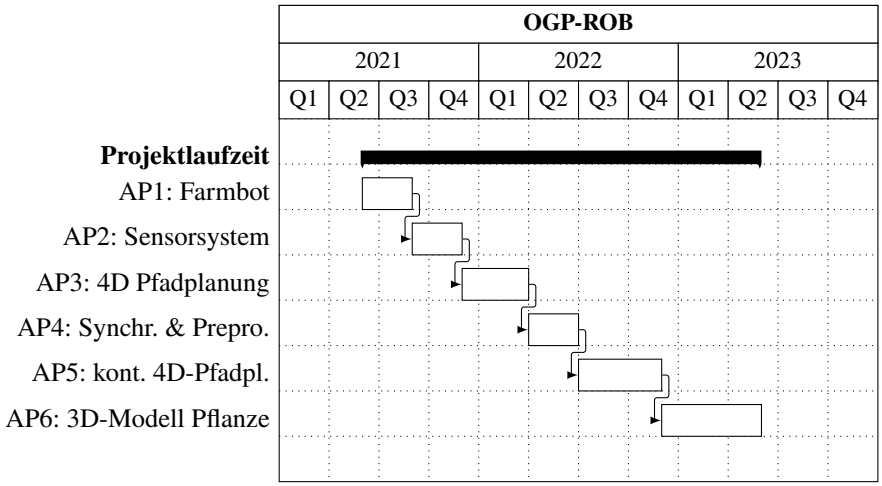
Für die **Projektkoordination** wurden insgesamt 49.497,83 € vorgesehen, wobei 30.299,50 € (zzgl. 4.544,93 € Verwaltungskostenpauschale) auf Personalkosten, 12.500,00 € für Öffentlichkeitsarbeit und 2153,40 € auf Reisekosten entfallen.

Aufgrund der Reisebeschränkungen während der Covid19-Pandemie wurden Projekttreffen in Präsenz und Multiplikatorveranstaltungen weitestgehend unmöglich, sodass die vorgesehenen Finanzmittel für die Öffentlichkeitsarbeit und Reisekosten nicht oder kaum abgerufen wurden.

1.7 Ablauf des Verfahrens

Die **koordinativen Arbeiten** wurden am 15. Mai 2021 begonnen und endeten am 15. Februar 2024. Die Tätigkeiten umfassten: Durchführung und Vorbereitungen zum Projektablauf wie Auszahlungsverfahren, wissenschaftliche Recherche, Vorbereitung und Durchführung von Videomeetings und Präsenztreffen der OG, Koordinierung des wissenschaftlichen Austauschs der OG-Mitglieder untereinander, Planung der wissenschaftlichen und verwaltungstechnischen Arbeiten, Recherche und Koordination zu projektbezogenen verwaltungstechnischen Abläufen und Erstellung der zugehörigen Zwischenberichte und des Abschlussberichtes.

Der OGP-ROB hat ihre Projektarbeit im Juni 2021 mit der Einstellung von Herrn Niklas Noack als wissenschaftlichen Mitarbeiter aufgenommen. OGP-ROB begann mit umfangreichen Recherchearbeiten zu in Frage kommenden Sensoren für das in AP 2 „Konzeptionierung und Entwicklung der Sensorplattform für die multisensorielle Datenaufnahme“ vorgesehene Multisensorsystem. Die Rahmenbedingungen zur Funktionalität und letztlich zur Auswahl der Sensoren wurde unter anderem durch die Expertise der Projektpartner getroffen. Grund des verfrühten Beginns von AP 2 war ein stark verzögerter Start des AP 1 „Aufbau und Untersuchung des Pflanzroboters“ durch eine herstellerseitige Verzögerung in der Produktion des teil-automatisierten Beets FARMBOT. So wurde eher mit AP 2 begonnen wobei bildgebende sowie geometrigebende Sensoren beschafft und separat in Betrieb genommen wurden. Gegebenenfalls wurden für diese Schnittstellen und Treiber geschrieben und robust für das Vorhaben ausgelegt. Weiter wurde das AP 4 mit dem Inhalt der „Synchronisation und Vorverarbeitung der Multisensordaten“ verfrüht begonnen. Unterschiedliche Auslösemechanismen und Laufzeiten der Sensoren führten zu einem nicht synchronen Erfassen der Pflanzen wodurch verschiedene Konzepte (Hard- und Software) erprobt und entwickelt wurden.



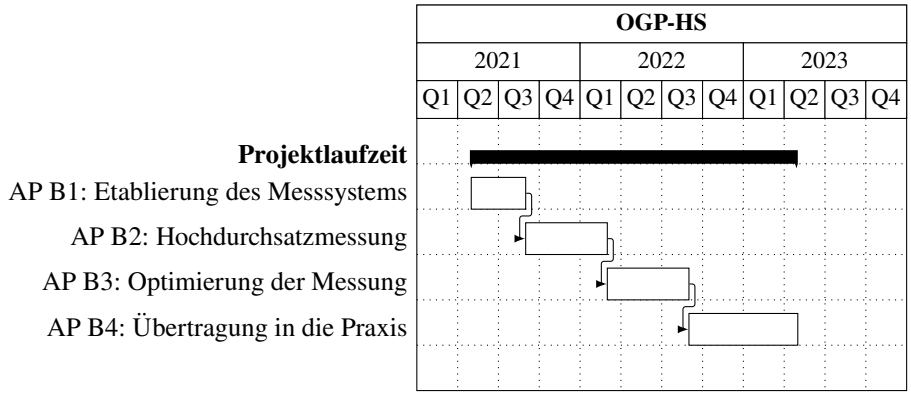
Anfang Mai 2022 konnte mit Unterstützung der OG-Partner der FARMBOT in Betrieb genommen werden. Es konnte verzögert mit (AP 1) begonnen werden und erstmals relevante Parameter sowie mögliche Schnittstellenkomunikationsfähigkeiten bestimmt

werden (in Unterunterabschnitt 2.1.1 wird im Detail auf die Umstrukturierung des Geschäftsplans eingegangen). Mit diesen Erkenntnissen wurde folgend in Arbeitspaket 3 mit der „Modellierung und 4D-Pfadregelung des Pflanzroboters“ begonnen. Mit Hilfe von passenden Regelstrategien wurde ein kinematisches Modell konzipiert, welches den Pflanzroboter zu einem teil-automatischen Betrieb befähigte. Durch das bereits umgesetzte AP 4 wurde folgend mit AP 5 – der „Entwicklung eines 4D-Pfadplanungsalgorithmus für das kontinuierliche Pflanzenmonitoring“ begonnen. Dabei wurden Schnittstellen geschaffen, um von der KI getroffene Erkenntnisse über die jeweilige Pflanze zu berücksichtigen, um entsprechende Behandlungsmethoden in die kontinuierliche Pfadplanung einfließen zu lassen (geschlossener Regelkreis). Die gesamte Mensch-Maschine-Schnittstelle zum Interagieren mit der Maschine wurde mit den OG-Partnern an die jeweiligen Ansprüche konzipiert und entwickelt.

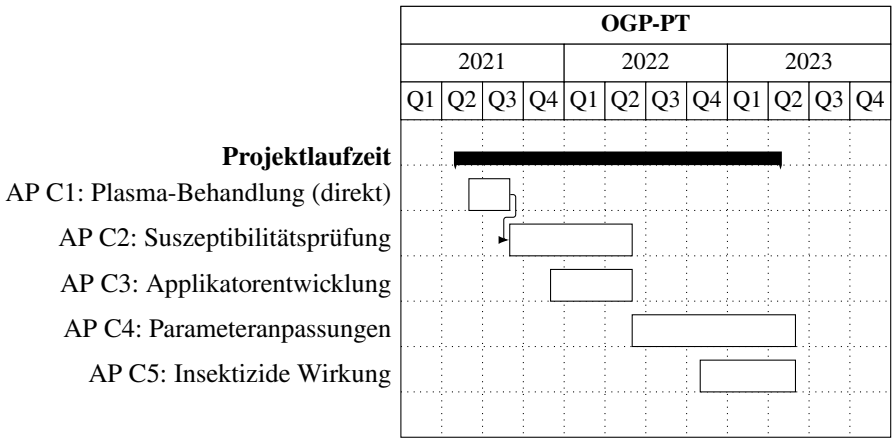
Der OGP-HS begann ihre Projektarbeit 01. Mai 2021 durch Dr.-Ing. Stefan Paulus. Die Arbeitspakete wurden wie folgt bearbeitet: B1 (Monat 01-04), B2 (Monat 05-10), B3 (Monat 11-16) und final B4 (Monat 17 -24ff inklusive Verlängerung). Dabei stand die Etablierung des biologischen Systems Zuckerrübe bzw. Mangold und die Planung des Sensorsetups (Kamera, Beleuchtung, Messsetup etc.) im Vordergrund (B1). Dazu wurden unterschiedliche Sensorhardware angeschafft, in die Abläufe integriert und Datensätze aufgenommen (B1). Nachdem erste Testaufnahmen erstellt wurden wurde das Setup nochmal überprüft und für die Messung mit erhöhtem Durchsatz, d.h. Messung vieler Pflanzen, als auch die Aufnahme von Zeitreihen zum automatisierten Monitoring der Wachstumsentwicklung bzw. der Krankheitsentwicklung, angepasst (B2). Um das System nicht nur in artifiziellen Testumgebunden nutzbar zu machen, sondern auch in hochproduktiven Produktionsbedinungen, sowohl im Gewächshaus, als auch im Feld wurde die räumlichen, spektralen und zeitlichen Parameter optimiert. Dies beinhaltete die Evaluierung der Gewichtung der gemessenen Wellenlängen bezüglich ihres Beitrages zum Klassifikationsergebnis. Der hierzu benutzte Algorithmus der Recursive Feature Elemination zeigt die Wichtigkeit der Einzelwellenlängen und ihren Beitrag zum Klassifikationsergebnis [1] (B3). Final wurde die Anwendung angepasst an die praxisnahe Hochdurchsatzmessung mit der möglichen Kopplung mit Plasmaanwendungen und der Anwendung auf unterschiedlichen Kulturen (B4).
Im Rahmen der Zusammenarbeit wurden folgend zwei weitere Aufgabe definiert und erforscht. Zum Einen die Bestimmung der Wirkung von PAL auf die Keimraten von Zuckerrüben- und Mangoldsaatgut (Z1), sowie die Wirkung von PAL auf die Ausbreitung von etablierten Erregern von Krankheiten in der Zuckerrübe (Z2). Die zusätzlichen Arbeitspakete ergaben sich aus der intensiven Zusammenarbeit mit OGP-PT und stehen im direkten Zusammenhang mit den dortigen Arbeitspaketen C1 (Z1) und C2 (Z2).
Die Relevanz der Arbeiten Z1 und Z2 für die Arbeiten im Projekt ergab sich erst durch die intensive Zusammenarbeit zwischen **OGP-HS** und **OGP-PT**. Sowohl für Z1 als auch für Z2 wurden detaillierte und fundierte Studien durchgeführt, um die Wirkung von PAL auf das Wachstumsverhalten von Zuckerrüben und Mangoldkeimlingen zu beurteilen, als auch die Wirkung auf den Schaderreger (*Cercospora beticola*, *Aphana-*

[1] Yan, K., Zhang, D. (2015). Feature selection and analysis on correlated gas sensor data with recursive feature elimination. In Sensors and Actuators B: Chemical (Vol. 212, pp. 353–363). Elsevier BV. https://doi.org/10.1016/j.snb.2015.02.025

myces, *Phoma betae* zu untersuchen.



Der OGP-PT begann ihre operativen Tätigkeiten im Rahmen des Projektes am 01. Juni 2021 durch die Beschäftigung von Herrn Christian Ochs. Die Arbeitspakete wurden - mit zeitlichen Unterbrechungen im operativen Verlauf der einzelnen Arbeitspakete - wie folgt bearbeitet: C1 (Monat 01-04), C2 (Monat 14-24, C3 (Monat 04-30), C4 (Monat 20 -23) und C5 (Monat 14-28). Die Bearbeitung der Projektaufgaben startete mit der Planung und Durchführung von Versuchen zum Arbeitspaket C1 (Plasma-Behandlung des Saatgutes, Erhebungen zum Einfluss auf das Keimverhalten). Aufgrund von Lieferverzögerungen des Mangold-Saatgutes wurde auf Zuckerrübensaatgut als Substitut zurückgegriffen. Verzögerungen im AP C2 (Suszeptibilitätsprüfung des Pseudomonas s. /Cercospora beticola gegenüber PAL) ergaben sich durch Lieferverzögerungen bei der Bereitstellung der *Pseudomonas s./Cercospora b.*-Kulturen. Deshalb wurden Arbeiten zum AP C3 (Applikatorentwicklung zur Nutzbarmachung der PAL's mittels Farmbot-System) vorgezogen um einem erheblichen zeitlichen Verzug des Teilprojektes C zu vermeiden. Im Rahmen des Arbeitspaketes C3 wurde das Tank- und Sprühsystem für Interventionsmaßnahmen des Farmbot-Systems konzipiert und gefertigt, wobei flüssigkeitsspezifischen Anforderungen (Säurebeständigkeit etc.) und Arbeitsicherheitsaspekte hinsichtlich Anwenderschutz, Anlagensicherung etc. für den Realeinsatz zu berücksichtigen waren. Des Weiteren ergaben sich im Projektverlauf Bedarfe an konstruktiven Optimierungsarbeiten und Anpassungen (u. a. bzgl. Arbeitsicherheitsaspekte) am Farmbot-System im Rahmen der Zusammenarbeit der OGs, so wurde ein neuer Führungsrahmen für die Laufschienen gefertigt und integriert und Schlauchleitungen mit größerem Durchmesser eingezogen, was die Integration einer breiteren Energiekette (+ Peripherie) notwendig machte (vgl. Unterunterabschnitt 2.4.3). Im Rahmen des Arbeitspaketes C4 kam es Problemen bei der Anzucht der Bakterien auf dem Nährmedium, diese Probleme konnten aber im weiteren Verlauf der Versuchsdurchführung gelöst werden.


OGP-PT
2021
2022
2023
Q1
Q2
Q3
Q4
Q1
Q2
Q3
Q4
Q1
Q2
Q3
Q4
Projektlaufzeit
AP C1: Plasma-Behandlung (direkt)
AP C2: Suszeptibilitätsprüfung
AP C3: Applikatorentwicklung
AP C4: Parameteranpassungen
AP C5: Insektizide Wirkung

1.8 Zusammenfassung der Ergebnisse

Das visionäre Ziel des Projektantrages PRo-MAPPER beinhaltet die robotische Steuerung des Multisensorsystems, die automatisierte Datenaufnahme gekoppelt mit der KI-basierten Bildauswertung auf Grundlage eines etablierten Datensatzes, die bedarfsorientierte Applikation (Intervention) mit Plasma/PAL sowie das automatisierte Monitoring des weiteren Krankheitsverlaufes in einer geschlossenen Regelung. Dabei konnte jeder Projektpartner sicherstellen, dass die separaten Komponenten wie die robotische Steuerung des Beets, die vollautomatische Datenerhebung, die KI-gestützte Auswertung und das Monitoring des Krankheitsverlaufen sowie die vollumfängliche Nutzbarkeit erfüllt ist und Maßnahmen zur Arbeitssicherheit berücksichtigt wurden. Des Weiteren konnten Parametersätze zur Prozessicherheit der Plasmaanwendung bestimmt und der Nachweis der grundsätzlich mikrobiziden Wirkung von PAL auf ausgewählten Phytopathogenen erbracht werden.

Die im Projekt entwickelte KI-gestützte Hochbeetautomation erfüllt im Kern folgende Funktionen:

- Vollautomatisierte Datenerhebung (Training)
  - Pflanzen anfahren
  - Multisensorielle Daten erheben
  - Erhobene Daten über Schnittstelle einer KI zur Verfügung stellen
- kontinuierlicher Betrieb (*closed-loop*)
  - kontinuierlicher, autarker Betrieb (starten der Routine nach Bedarf und Notwendigkeit)
  - Pflanzen anfahren
  - Multisensorielle Daten erheben
  - Multisenorielle Daten über Schnittstelle einer KI zur Verfügung stellen
  - KI Modell analysiert Bilddaten auf Basis eines Deep Learning Ansatzes
  - Ergebnis der KI über Schnittstelle empfangen
  - Reaktive Maßnahme anhand des Ergebnisses auf Pflanze anwenden
- Reaktive Maßnahmen
  - Applikation von Interventionsmittel (PAL, Dünger, Bewässerung)

The visionary goal of the PRo-MAPPER project proposal includes the robotic control of the multi-sensor system, automated data acquisition coupled with AI-based image analysis based on an established data set, needs-based application (intervention) with plasma/plasma water and automated monitoring of the further course of the disease in a closed control system. Each project partner was able to ensure that the separate components such as robotic control of the bed, fully automated data collection, AI-supported evaluation and monitoring of disease progression as well as full usability were fulfilled and that occupational safety measures were taken into account. Furthermore, parameter sets for the process safety of the plasma application were determined and proof of the fundamentally microbicidal effect of PAL on selected phytopathogens was provided.

The AI-supported raised bed automation developed in the project essentially fulfils the following functions:

- *Fully automated data collection (training)*
  - *Approach plants*
  - *Collect multisensory data*
  - *Provide collected data to an AI via interface*
- *- Continuous operation (closed-loop))*
  - *Continuous, autonomous operation (start routine as required and necessary)*
  - *Approach plants*
  - *Collect multisensory data*
  - *Provide collected data to an AI via interface*
  - *AI model analyses image data based on a deep learning approach*
  - *Receive AI result via interface*
  - *Apply reactive measure to plant based on the result*
- *Reactive measures*
  - *Application of intervention agents (PAL, fertiliser, irrigation)*

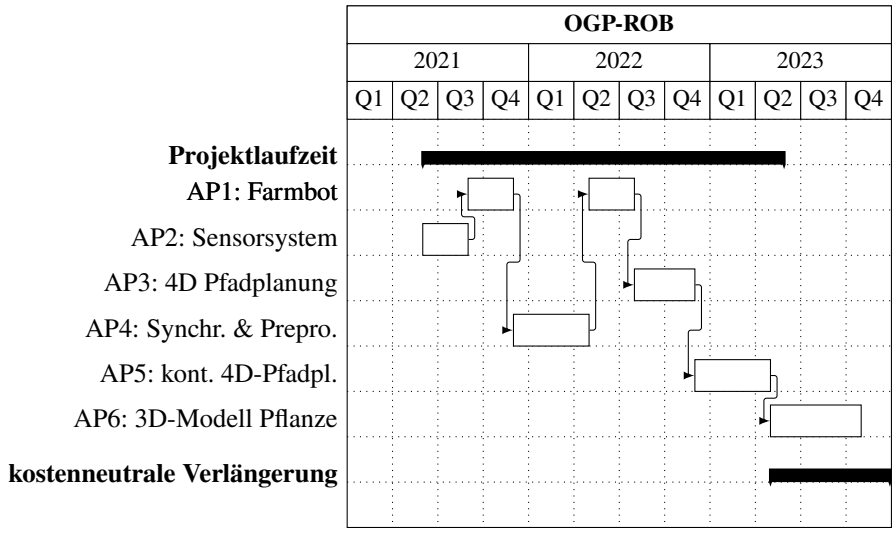
2 Eingehende Darstellung

2.1 Verwendung der Zuwendung

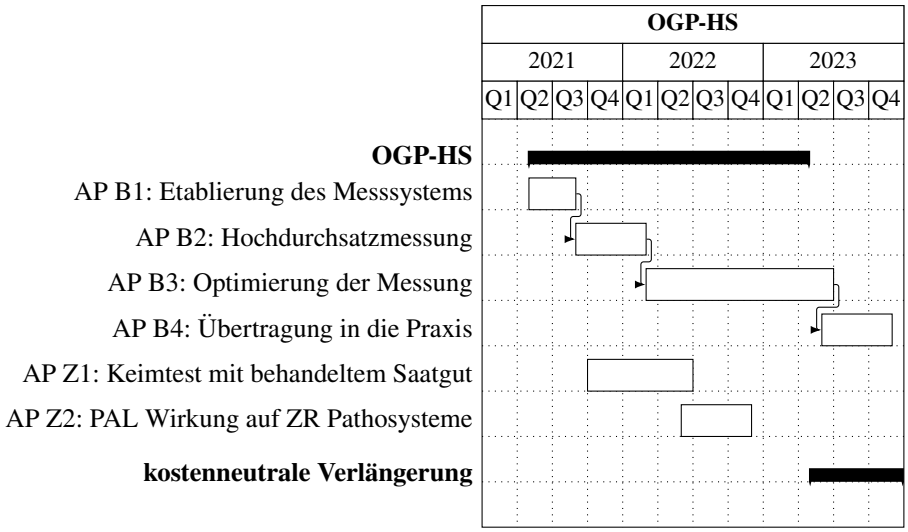
2.1.1 Gegenüberstellung der Planung im Geschäftsplan und der tatsächlich und abgeschlossenen Teilschritte und die Aufgaben im Rahmen der laufenden Zusammenarbeit der OG

Im Mai 2023 traf sich die OG um den aktuellen Stand und das weitere Vorgehen im Projekt zu besprechen. Dabei ergab es sich, dass durch (unter anderem) den lieferbedingten Verzug des Beets und die an die Jahreszeiten geknüpften Wachstumsperioden der Pflanzen eine kostenneutrale Verlängerung des Projekts als sinnvoll erachtet wurde. Die bewilligte Genehmigung des Änderungsantrags sah eine Verlängerung bis zum 31.12.2023 (Abrechnungsdatum 15.2.2024) vor.

Bedingt durch die produktionsbedingte Lieferverzögerung des in AP 1 anzuschaffenden FARMBOT wurden umfangenreiche Umgestaltungen des Projektplans für **OGP-ROB** vorgenommen. Dabei wurden wie bereits in Unterabschnitt 1.7 dargestellt umfangreiche Umstrukturierungen im Projektplan vorgenommen. AP 2 wurde um drei Monate vorverlegt. Mit Hilfe von **OGP-HS** konnten dennoch ab September 2021 erste Erkenntnisse für das AP 1 mit dem Farmbot gesammelt werden. Der OG-Partner war im Besitz eines solchen Systems und stellte diesen für Untersuchungen zur Verfügung. So konnte AP 1 bereits teilweise begonnen werden. Ebenfalls wurde verfrüht mit AP 4 begonnen und auch bis Mai 2022 abgeschlossen. Im Mai 2022 wurde nach 12-monatiger Verzögerung der FARMBOT geliefert. Es wurde AP 1 erneut aufgenommen und final Mitte des Jahres beendet. Dabei stellten sich jedoch erhebliche Mängel im Schienensystem heraus, welche zu erheblichen Verzögerungen im AP 1 des **OGP-PP** führten (s. u.).

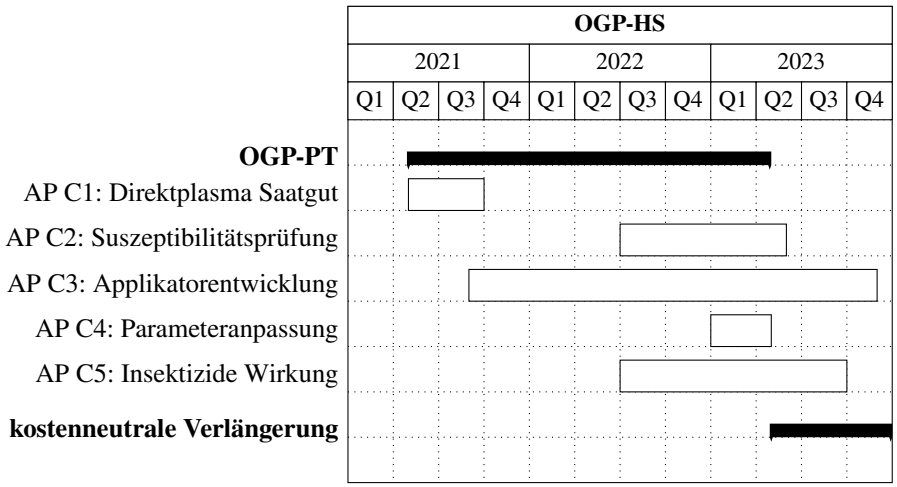


Ab diesem Zeitpunkt wurde, wie im Projektplan vorgesehen, fortgefahren.



Das Projekt startete für den Partner **OGP-HS** trotz Einschränkungen der Pandemie weitestgehend ohne Komplikationen. AP B1 und B2 liegen im geplanten Zeitrahmen. Im Verlauf der Messungen wurde allerdings festgestellt, dass der Anteil der Mitwirkung von **OGP-HS** bei den Arbeitspaketen von **OGP-PT** erhöht werden sollte, um verifizierbare und qualitativ hochwertige Ergebnisse zu erzielen. Daher wurden zwei Arbeitspakete (Z1 und Z2) definiert, die nun auch lokal in den Laboren des Partners (IfZ) durchgeführt wurden. Dazu zählen die Durchführung von Keimtests und damit die Quantifizierung der Plasmawirkung auf die Keimrate und -fähigkeit von behandeltem Saatgut (Z1), sowie die Wirkung von Plasmawasser und der zugehörigen Pufferlösung auf wichtige Pathosysteme in der Zuckerrübe (Z2). Diese Arbeiten liefen ausserhalb der geplanten Arbeitspakete, finden sich jedoch als Zuarbeit in den Arbeitspaketen C1 und C2 im Projektantrag beschrieben. Durch den erhöhten Arbeitsaufwand wurden die beiden APs nun als eigenständige Zuarbeiten als Arbeitspakete definiert. Weiterhin wurde das Arbeitspaket B3 - Optimierung der Messung, der Messroutinen und der Analyse verlängert. Dies war nötig, da die Ergebnisse sich mit der Zeit deutlich verbesserten und so eine umfassendere Lösung mit einer validierten Genauigkeit geliefert werden konnte. Arbeitspaket B4 wurde versetzt durchgeführt.

Bedingt durch Lieferverzögerungen (s. o.) musste die Abfolge der Bearbeitung der einzelnen Arbeitspakete im Teilprojekt C (**OGP-PT**) umgestellt werden, so wurde beispielsweise die Bearbeitung des Arbeitspaketes C3 vorgezogen, da im Arbeitspaket C2 *Pseudomonas s./Cercospora beticola*-Kulturen nicht bereitgestellt werden konnten bzw. die Anzucht der Kulturen unvorhergesehene Probleme bereitete. Des Weiteren konnten einzelne Arbeitspakete (z.B. aufgrund konstruktiver Nacharbeiten am Farmbotsystem) nicht kontinuierlich bearbeitet werden, sodass Arbeitspakete zeitlich gestreckt wurden (siehe Gantt-Diagramm).



Der Projektplan sah für den **OGP-PP** ab Monat 13 (Mai 2023) einen Start in das Vorhaben vor. Jedoch konnte aufgrund von unvorhergesehenen mechanischen Defiziten (vergleiche Unterunterabschnitt 2.1.1) am FarmBot selbst das Arbeitspaket D1 nicht wie geplant starten und umgesetzt werden. Das auf dem Holzbeet montierte Führungssystem des FarmBots erfuhr aufgrund von witterungsbedingten Längenänderungen im Holz Verspannungen, was dazu führte, dass das mobile Portal sporadisch blockierte. Zur Lösung des Problems wurde der Roboter durch den **OGP-PT** physisch vom Hochbeet getrennt (vgl. AP C3). Der Aluminiumrahmen wurde frei auf dem Hochbeet gelagert und behält so seine starre Form, ohne, dass dieser durch die witterungsbedingten Längenänderungen des Holzes beeinflusst wird. Diese umfangreiche Korrekturmaßnahme wurde Mitte 2023 abgeschlossen.

2.1.2 Darstellung der wichtigsten finanziellen Positionen

aufgeschlüsselt nach OGP:

OGP	Position	bewilligt inkl. Kürzung	abgerufen	Differenz
Koord.	5.2.1 Personalausgaben WiMi	30.299,50 €	33.014,67 €	−2715,17 €
	5.2.2 Öffentlichkeitsarbeit	12.500,00 €	0,00 €	12.500,00 €
	5.2.3 Reisekosten	2153,40 €	350,00 €	1803,40 €
	5.2.4 Verwaltungspauschale 15%	4544,93 €	4952,20 €	407,27 €
	Gesamt	***49.497,83 €***	***38.316,87 €***	***11.180,96 €***
OGP-ROB (HAWK)	5.3.1 Personalausgaben WiMi	86.806,10 €	86.111,97 €	694,13 €
	5.3.1 Personalausgaben HiWi	10.246,50 €	2959,26 €	7287,24 €
	5.3.2 wiss. Studien, Analysen, Tests	7737,84 €	4171,46 €	3566,38 €
	5.3.4 Reisekosten	4144,40 €	133,29 €	4011,11 €
	5.3.6 Kauf v. Instrumenten	27.007,00 €	23.380,29 €	3626,71 €
	Gesamt	***135.941,84 €***	***116.756,27 €***	***19.185,57 €***
OGP-HS	5.3.1 Personalausgaben WiMi	87.986,60 €	85.588,22 €	2398,38 €
	5.3.1 Personalausgaben HiWi	5886,70 €	7874,65 €	−1987,95 €
	5.3.2 wiss. Studien, Analysen, Tests	5666,76 €	196,88 €	5471,22 €
	5.3.4 Reisekosten	4144,40 €	2243,55 €	1900,85 €
	5.3.6 Kauf v. Instrumenten	46.931,63 €	46.279,40 €	652,23 €
	Gesamt	***150.617,43 €***	***142.182,70 €***	***8.434,73 €***
OGP-PP	5.3.1 Personalausgaben WiMi	67.682,00 €	66.727,76 €	954,24 €
	5.3.1 Personalausgaben HiWi	10.246,50 €	3392,64 €	6853,86 €
	5.3.2 wiss. Studien, Analysen, Tests	15.520 €	10.728,25 €	4791,75 €
	5.3.4 Reisekosten	4227,40 €	240,10 €	3987,30 €
	5.3.6 Kauf v. Instrumenten	18.821,65 €	19.960,00 €	1138,35 €
	Gesamt	***116.497,55 €***	***101.048,75 €***	***15448,80 €***
OGP-PP	5.3.1 Personalausgaben WiMi	20.000,00 €	19.918,00 €	82,00 €
	5.3.3 Nutzungskosten, Material/Bedarf	6000,00 €	0,00 €	6000,00 €
	5.3.4 Reisekosten	2500,00 €	382,20 €	2117,80 €
	Gesamt	***28.500,00 €***	***20.300,20 €***	***8.199,80 €***
OG	***Gesamt***	***481.054,65 €***	***418.604,79 €***	***64.763,00 €***

Tabelle 2: Darstellung der wichtigsten finanziellen Positionen

OGP ROB - HAWK Robotik

- Personalkosten: Für die wissenschaftliche Bearbeitung der Arbeitspakete für OGP-ROB wurde Herr Niklas Noack im Zeitraum vom 1.6.2021 bis 31.5.2023 befristet beschäftigt. Weiter war Herr Luca Menze im Zeitraum vom 1.7.2022 - 28.2.2023 als studentische Hilfskraft tätig. Für Die Projektkoordination wurde Herr Georg Avramidis vom 15.05.2021 bis 15.02.2024 beschäftigt.

- Beet:
  - Anschaffung Farmbot: Der Farmbot der Firma FARMBOT dient als Trägerplattform für das Multisensorsystem. Es besitzt entwicklerfreundliche Dokumentationen und ist weitesgehend von Seiten der *Soft-* sowie *Hardware* quelloffen. Es wurde die 18 m^2-Variente in der Version Genesis XL v1.6 beschafft.
  - Anschaffung Unterkonstruktion: Die Unterkonstruktion, das eigentliche Hochbeet, ist eine massive Holzkonstruktion aus einzelnen Holzplanken unterschiedlicher Maße.
  - Zollabhandlung: Für den FarmBot sind durch die Einfuhr aus dem EU-Ausland (Kanada) Steuern und Abhandlungsgebühren angefallen.
- Anschaffung Eingebettes System: Zur Datenverarbeitung (Einlesen, Verarbeiten, Ausgeben) wurde der *Dell Optiplex 7090 Micro* beschafft. Dieser dient im Vorhaben als Hauptbestandteil des Multisensorsystems. Bedingt durch die Leistungsanforderung wurde sich dabei für einen leistungsstarken i7-Prozessor mit 16 GB Arbeitsspeicher entschieden.
- Anschaffung Time-of-Flight-Kamera: Die TOF-Kamera dient der geometrischen Erfassung der Pflanze als 3D-Punktwolke. Die Kamera ist Teil des Multisensorsystems.
- Anschaffung Thermalkamera: Die Thermalkamera *VUE Pro R 640* der Firma FLIR erfasst Teile des nicht-sichtbaren Lichts der Pflanzen und ist Teil der Sensoren auf dem Multisensorsystem.
- Anschaffung Multispektralkamera: Die *MicaSense - Altum* Multispektralkamera besitzt neben den Kanälen des sichtbaren Lichts (R,G,B) noch die Kanäle im *red edge* (717 nm) und im Nah-Infrarotbereich (842 nm).
- Anschaffung RGB-Kamera: Neben der spektralen und der thermalen Erfassung dient die *BFS-PGE-1222S6C* RGB-Kamera zur Erfassung der Pflanze im sichtbaren Bereich des Lichts.

OGP HS - IfZ

- Personalkosten: Für die Bearbeitung der Arbeitspakete sind für zwei Personen Personalkosten angefallen. Dabei wurde die wissenschaftliche Bearbeitung durch Dr.-Ing. Stefan Paulus (05/2021-10/2023) sichergestellt, unterstützt durch B.Sc. Nathan Okole (08/2022-12/2023) als studentische Hilfskraft.
- Anschaffung Speichermedien (NAS, interne und externe Festplatten): Für die Speicherung der großen Datenmengen (Hochdurchsatz, hyperspektraler Datenkubus ($\approx 1GB$ pro Aufnahme Rohdaten, sowie Zwischenergebnisse), sowie für die Nachhaltung der Daten nach Projektende

- Anschaffung Hyperspektralkamera: Zur Überprüfung des pflanzlichen Reflektanzverhaltens wurde eine Hyperspektralkamera angeschafft. Messungen damit wurden während der Projektphase mit hohem Durchsatz durchgeführt und die Ergebnisse analysiert, die Ergebnisse wurden publiziert (siehe Optica Keynote Vortrag unter Paragraph 2.8).

- Anschaffung Beleuchtung: Da die interne Beleuchtung der angeschafften Kamera zwar ausreichend, aber nicht optimal war wurde eine externe Beleuchtung angeschafft, um die Beleuchtungsstärke zu erhöhen. Die erzielten Ergebnisse waren qualitativ hochwertiger und die Analysen wesentlich genauer.

- Anschaffung Thermalkamera: Um nicht nur spektrale ($500-1000nm$) und visuelle ($370-700nm$) Aufnahmen zu testen, wurde eine Thermalkamera ($7.5-13.5$ µm) angeschafft und eingesetzt. Zu allen eingesetzen Kameras sind Beispielaufnahmen in Abbildung 10 gezeigt.

- Anschaffung Farmbot: Im Rahmen von PRo-Mapper wurden zwei Farmbot-Systeme (automatisierte Hochbeetroboter, 1x OGP-ROB, 1x OGP-HS) angeschafft. Diese sind in der Lage automatisiert Positionen innerhalb des Aktionsbereiches anzufahren und Aktionen auszuführen. Dazu zählt die Aussaat, wie auch die Bewässerung. Die Möglichkeiten der Kamerasteuerung wurde angepasst und nachgerüstet, so dass auch automatisiert Bilder (nach vorherigem Positionslernen/Teachen) aufgenommen werden können.

- Kürzungen: Beim OGP-HS ergaben sich Kürzungen durch den Projektträger in Position 5.3.1 wissenschaftliches Personal in Höhe von $2398,38$ € und in Position 5.3.2 wiss. Studien in Höhe von $1,34$€.

OGP-PT - HAWK Plasma

- Personalkosten: Für die Bearbeitung der Arbeitspakete sind für eine Person Personalkosten angefallen. Für die wissenschaftliche Bearbeitung der Arbeitspakete für OGP-PT wurde Herr Christian Ochs im Zeitraum vom 01.06.2021 bis 10.05.2023 beschäftigt.

- Anschaffung Tantec Netzgerät: Netzgerät HV-X20 zum Betrieb des PAL-Reaktors zur Produktion von Plasmawasser.

OGP-PP PiccoPlant

- Personalkosten: Für die Bearbeitung der Arbeitspakete sind für eine Person Personalkosten angefallen. Dabei wurde die Bearbeitung durch Frau Susanne Draeger (03/2023, 05/2023 und 07/2023 - 10/2023) sichergestellt.

2.2 Detaillierte Erläuterung der Situation zu Projektbeginn

Zu Beginn des Projektes gab es weder Grundlagenlitaratur zur Wirkung von Plasma/PAL auf den Organismus Zuckerrübe/Mangold, noch auf das Wirt/Pathogensystem *Cercospora beticola*. Für die Quantifizierung dieser Wirkung fehlten wesentliche Versuche mit großer Wiederholungsanzahl, bzw. Laborversuche. Dies gilt sowohl für das Pathogen, als auch für die Kultur Zuckerrübe/Mangold. Ebenso gab es keine vergleichbare Lösung zur automatisierten Datenerhebung am Hochbeet. Zum Multisensorsytem gibt es Teillösungen aber kein für das Vorhaben in Frage kommende Gesamtkonzept.

2.2.1 Ausgangssituation

Durch die Zusammenarbeit der Arbeitsgruppen **OGP-HS**, **ROB** und **PT** konnten Synergien bei der Versuchsdurchführung gebündelt werden um diese Wissenslücke mit der Hilfe einer hochautomatisierten Monitoringanlage zu schließen. Dabei kam eine marktverfügbare Hochbeetautomatisierung zum Tragen, welche durch **OGP-ROB** weiterentwickelt wurde, um zielgerichtet ein automatisiertes Monitoring **OGP-HS** der Wirksamkeit bzw. Notwendigkeit einer Interventionsmaßnahme (hier Applikation von Direktplasma oder PAL) seitens der **OGP-PT** durchzuführen.

2.2.2 Projektaufgabenstellung

Die Aufgabenstellungen ergab sich maßgeblich aus dem definierten Ziel des zu entwickelnden automatisierten Hochbeets, einschließlich eines kontinuierlichen Pflanzen-Monitorings sowie innovativer plasmatechnologischer Lösungsansätze als reaktive Maßnahme innerhalb eines geschlossenen Regelkreises. Die jeweilige Aufgabenstellungen der einzelnen OGP ergaben sich aus den Kompetenzen. So galt es für den **OGP-ROB** zu allen ingenieurstechnischen, robotischen, informationstechnischen Problemstellungen Lösungen zu konzipieren und umzusetzen welche sich zu den folgenden Punkten konkretisieren lassen:

1. Entwicklung und Integration eines Multisensorsystems auf einem kommerziellen Pflanzroboter
2. Modellierung und Akquisition der Sensor- und Aktordaten des Pflanzroboters
3. Synchronisation und Fusion der Multi-Sensordaten
4. Entwicklung eines 4D-Pfadplanungs- und Regelungsalgorithmus für das kontinuierliche Pflanzenmonitoring
5. Entwicklung eines 3D-Modells der pflanzlichen Geometrie

Für den **OGP-HS** ergaben sich Aufgabenschwerpunkte im Bereich der Sensordatenaufnahme und der Sensordatenauswertung. Konkret waren dies

1. Nutzung einer Hyperspektralkamera mit dem Ziel Bilder aus Applikationstests aufzunehmen und Parameter abzuleiten

2. Analyse von Zeitreihenmessungen zur Identifikation von Stress durch die Unterscheidung von gesunden / gestressten Pflanzen
3. Vertiefte Analyse der spektralen Aufnahmen mit dem Ziel der Reduktion der benötigten Wellenlängen und des Transfers auf andere Kulturen neben der Zuckerrübe
4. Übertragung in praxisnähere Sensorbedingungen

Für den **OGP-PT** ergaben sich Aufgabenschwerpunkte im Bereich der konstruktiven Ausstattung des Farmbotsystems, Beseitigung konstruktiver Mängel und Versuchen zur Bekämpfung von Schädlingen mittels PAL und Direktplasma-Anwendung.

1. Plasma-Behandlung des Saatgutes, Erhebungen zum Einfluss auf das Keimverhalten
2. Versuche zur Inaktivierung bakterieller und pilzlicher Schädlinge
3. Applikatorenentwicklung (Sprüh- und Tanksystem) zur Intervention bei Krankheiten und Schädlingsbefall mittels des Farmbot-System.
4. Umsetzung (arbeits)sicherheitstechnischer Aspekte am Farmbot
5. Versuche zur plasmabasierten Bekämpfung von Schadinsekten

2.3 Ergebnisse der OG in Bezug auf

2.3.1 Wie wurde die Zusammenarbeit im Einzelnen gestaltet?

Im gesamten Verlauf des Projekts wurde ein intensiver Austausch zwischen allen Projektpartnern gepflegt. Dabei wurden die Treffen *online* oder gegebenenfalls vor Ort abgehalten. Aufgrund der Kontaktbeschränkungen infolge der Covid-19-Pandemie wurden diese bis Anfang 2022 auf ein Minimum reduziert und fanden nur bei absoluter Notwendigkeit persönlich statt. Wöchentliche *Jour-fixe*-Termine hielten alle Teilnehmer auf dem Stand des Projektverlaufs der einzelnen OGs und gestalteten den Austausch über die Zusammenarbeit als zeitsparend und unkompliziert.

Kleinere Anliegen wurden flexibel per Telefon geklärt. Aufgrund der kurzen Anfahrwege zwischen **OGP-ROB, OGP-HS** und **OGB-PT** konnten auch spontane logistische Probleme schnell gelöst werden. Regelmäßige Feldtage auf den Versuchsflächen von **OGP-HS** gaben einen praktischen Einblick in das Erheben und Auswerten von erhobenen Daten. Die Entwicklung des Beets wurde regelmäßig durch Vorführungen bei **OGP-ROB** durch die anderen OG-Partner begutachtet und Beurteilt. Technische Anforderungen und Machbarkeiten wurden durch die Beteiligung von **OGP-PP** mit anwendungsorientiertem Blick aufeinander abgestimmt.

2.3.2 Was war der besondere Mehrwert bei der Durchführung des Projekts als OG?

Als Teil einer Operationellen Gruppe ist die Austauschmöglichkeit eine wichtige Grundlage für den erfolgreichen Projektablauf. Eine gute Koordination und dichte Absprachen zwischen den OG-Partnern trägt daher insbesondere zum Fortschritt der Arbeiten bei, bietet aber auch Einblicke in andere fachliche Sparten mit entfernterem Themenbezug. Im Rahmen des Projektes konnte die Aufgabenstellung fachübergreifend bearbeitet werden. Ohne das Projekt wären grundsätzliche Arbeiten nicht möglich gewesen, dies betrifft vor allem die Übertragung von i) Methoden der Robotik in den Agrarbereich, ii) Methoden der Plasmaanwendungen aus dem Medizin- in den Agrarbereich (speziell Keimverhalten), iii) Monitoring- und Analyserroutinen der Kultur Zuckerrübe auf weitere Kulturen wie Mangold, sowie iv) Erkenntnisse der Wirkung und Nutzbarkeit von PAL Anwendungen auf pflanzliche Pathosysteme (*Cercospora beticola, Aphanamyces, Phoma* siehe Abbildung 12).

Hierdurch konnten neue Schnittmengen entdeckt (bspw. Multisensorsysteme im Outdoorbereich) und gemeinsame Synergien zur Bearbeitung und Lösung bislang ungeklärter Fragestellungen genutzt werden. Unabhängig davon war die Verzahnung der OG-Partner in Abhängigkeit vom vorgesehenen Projektverlauf sehr eng. Regelmäßige Treffen zu den gesetzten Zwischenzielen und operativen Tätigkeiten sowie enge Absprachen zu den Zwischenberichten führten trotz aller externen Widrigkeiten im Projektzeitraum zu einem stringenten Bearbeiten der Aufgaben innerhalb des Projektes. Für die Bearbeitung der formulierten Projektziele erwies es sich als vorteilhaft, für die Versuche und Entwicklungen Projektpartner mit unterschiedlichen Kompetenzen in der Operationellen Gruppe zu haben. Während die **OGP-ROB** ihre Expertise in der Automatisie-

rung und Sensordatenfusion in die Entwicklung von Lösungsansätzen einfließen ließ, konnte der **OGP-PT** ihre Expertise bei der Optimierung des Farmbotsystems hinsichtlich konstruktiver und fertigungstechnischer Fragestellungen einbringen. Während der gesamten Projektphase bestand immer ein enger Austausch zwischen den Mitarbeiter/-innen des IFZ und der HAWK. Die Institutionen bearbeiteten aufgrund der unterschiedlichen Kernkompetenzen auch unterschiedliche Arbeitsschwerpunkte (OGP-ROB: Automatisierungstechnik, Informationstechnik, Algorithmik, OGP-PT: plasmabasierte Interventionsmaßnahmen und Maschinenbau, OGP-HS: Interpretation der biologischen Antwort, Datenanalyse). Auch für die Öffentlichkeitsarbeit war es von Vorteil, dass die beteiligten Institutionen unterschiedliche Schwerpunkte und Zielgruppen im Fokus hatten, so konnte ein breites wirtschaftliches und wissenschaftliches Zielpublikum angesprochen werden.

2.3.3 Ist eine weitere Zusammenarbeit der Mitglieder der OG nach Abschluss des geförderten Projekts vorgesehen?

Direkte Nachfolgeprojekte zu PRo-MAPPER sind aktuell nicht vorgesehen, jedoch wird eine weitere Zusammenarbeit der OG-Mitglieder im Rahmen der wissenschaftlich-studentischen Ausbildung geplant und angestrebt. Dies betrifft sowohl die gemeinsame Betreuung von Abschlussarbeiten, sowie auch die gegenseitige Unterstützung innerhalb der Lehre der Universität Göttingen und der HAWK.

2.4 Ergebnisse des Innovationsprojektes

2.4.1 Zielerreichung

Gemäß der in Unterunterabschnitt 2.2.2 definierten Ziele ergibt sich nachfolgende Tabelle 3 mit der jeweiligen Zielerreichung:

OGP	Aufgabe	Erfüllt	Ergänzung
ROB	1. Entwicklung und Integration eines Multisensorsystems auf einem kommerziellen Pflanzroboter	Ja	-
	2. Modellierung und Akquisition der Sensor- und Aktordaten des Pflanzroboters	Ja	-
	3. Synchronisation und Fusion der Multi-Sensordaten	Ja	-
	4. Entwicklung eines 4D-Pfadplanungs- und Regelungsalgorithmus für das kontinuierliche Pflanzenmonitoring	Ja	-
	5. Entwicklung eines 3D-Modells der pflanzlichen Geometrie	Teilweise	Nicht für die kontinuierlichen Pfadplanung
HS	1. Aufbau des Roboters und erste Aufnahmen mit dem Sensorsystem	Ja	-
	Auswertung der hyperspektralen Aufnahmen über die Zeit liegt vor	Ja	-
	Eine Abschätzung der Wellenlängenimportance für die Klassifikation von Krankheiten in der Zuckerrübe liegt vor. Die Analyse der Übertragbarkeit auf multispektral messende Kameras ist abgeschlossen.	Ja	-

Fortsetzung auf nachfolgender Seite

Fortsetzung - Aufgabestellungen und Zielerreichung

OGP	Aufgabe	Erfüllt	Ergänzung
	Eine Untersuchung die die Nutzbarkeit einer multispektralen Kamera belegt ist abgeschlossen.	Teilweise	aus dem HS PoC lässt sich die Nutzung einer MS Kamera simulieren. Jedoch sind die benötigten Wellenlängen nicht marktüblich und somit nicht praktisch validierbar.
PT	1. Plasma-Behandlung des Saatgutes, Erhebungen zum Einfluss auf das Keimverhalten	Ja	-
	2. Inaktivierung bakterieller und pilzlicher Schädlinge	Teilweise	vgl. 2.4.3
	3. Applikatorenentwicklung (Sprüh- und Tanksystem) zur Intervention bei Krankheiten und Schädlingsbefall mittels des Farmbot-Systems	Ja	-
	4. Umsetzung von Maßnahmen zur Arbeitssicherheit am Farmbot	Ja	-
	5. Plasmabasierte Bekämpfung von Schadinsekten	Nein	PAL erwies sich in applizierter Menge als unwirksam, Direktplasma führte zur thermischen Schädigung von Pflanzenteilen.

Tabelle 3: Aufgabestellungen und Zielerreichung

Das Ziel ein Modell auf Grundlage maschineller Lernmethoden zu etablieren um automatisiert eine frühzeitige Erkennung einer Krankheit in Zuckerrüben zu erreichen

konnte erreicht werden. Dabei wurden nicht nur aktuelle Deep-Learning Methoden verwendet, sondern ebenso etablierte Methoden evaluiert. Diese haben Vorteile bei der Erklärbarkeit der Ergebnisse, konnten jedoch im Projekt nur wesentlich geringere Genauigkeiten erreichen (siehe Abbildung 11).

2.4.2 Abweichung zwischen Planung und Ergebnis

Im Arbeitspaket C1 wurde aufgrund von Lieferverzögerungen des Mangold-Saatgutes auf Zuckerrübensaatgut als Substitut zurückgegriffen. Dennoch konnte ein geeigneter Parametersatz identifiziert werden um thermische Schädigungen am plasmabehandelten Saatgut zu vermeiden. Im Arbeitspaket C4 konnte nicht auf Flieder zurückgegeriffen werden um Versuche zur Bekämpfung der *Pseudomonas* durchzuführen, sattdessen wurden aus Beschaffungsgründen *in-vitro*-Versuche zur Suszeptibilität gegen PAL durchgeführt. Versuche zur Bekämpfung der *Myzus p.* (Arbeitspaket C5) wurden an Zuckerrübenpflanzen als Substitut zum Flieder durchgeführt. Da Versuche zur insektiziden Wirkung des PAL gegen *Myzus p.* keine signifikant reduzierende Wirkung des PAL zeitigten wurden Versuche mit einer Direkt-Plasma-Applikation durchgeführt. Des Weiteren ergaben sich unvorhergesehene Aufgabenstellungenen der **OGP-PT** hinsichtlich konstruktiver Lösungen aufgrund von Insuffizienzen des ausgelieferten FARMBOTS. Die Mängel am FARMBOT führten auch zu erheblichen Nacharbeiten bei der Auslegung der Schnittstellen und der Sicherstellung eines robusten Betriebs zur Datenaufnahme unter Realbedingungen im produktiven Einsatz (Dauereinsatz).

Weiter ist auszuführen, dass das Vorhaben der Entwicklung eines hochautomatisierten Hochbeets nicht aus den von den OG-Partnern entwickelten Komponenten zu dem erdachten Gesamtsystem zusammengeführt werden konnte: Die Schnittstellen zur Kommunikation mit der KI (Datenbereitstellung und Empfang der Analys) sind implementiert und Funktionstüchtig; jedoch konnte die entwickelte KI nicht in das Gesamtsystem integriert werden.

2.4.3 Projektverlauf

Für den Projektpartner **OGP-ROB** ergaben sich gemäß des Projektantrags sechs Arbeitspakete unterschiedlicher Laufzeit (vergleich Unterabschnitt 1.7). Wie bereits in den vorherigen Unterkapiteln ausgeführt, kam es während der Laufzeit des Projekts zu lieferbedingten Umstrukturierungen in der zeitlichen Abfolge der Arbeitspakete. Im Folgenden werden die Arbeitspakete allerdings gemäß der Abfolge der ursprünglichen vorgesehenen Projektplanung dargelegt.

OGP-ROB - Arbeitspaket A1 Das in Arbeitspaket 1 definierte Ziel vom Aufbau des FARMBOT wurde erfolgreich umgesetzt (s. Abbildung 2a). Es ist ein 1 m hohes Hochbeet mit einer Fläche von 18 m^2 entstanden. Das Beet bietet Platz für etwa 30 Pflanzen und wird somit dem Anspruch an umfangreiche Untersuchungen gerecht. Als Unterkonstruktion wurde ein Hochbeet aus massiven Holzbrettern gefertigt. Die Außenbeplankung wurde an insgesamt zwölf Pfosten befestigt an welche ebenfalls der Farmbot

fest verschraubt wurde. Die Grundfläche wurde mit einer Folie ausgekleidet und anschließend mit Rindenmulch bedeckt. Nachdem das Beet in Betrieb genommen wurde, fanden umfangreiche Anpassungen an die für das Projekt erforderlichen Gegebenheiten statt: An der Spitze des Auslegers wurde eine Aufnahme für das Multisensorsystem konstruiert und angebracht. Weiter wurden umfangreiche Versorgungsleitungen (Spannung, Ethernet) durch den Kabelkanal des Farmbots gelegt. Für Witterungseinflüsse sensible Komponenten (Schaltschrank und Multisensorsystem) wurden Umhausungen konstruiert, welche den Betrieb auch bei z. B. Starkregen ermöglicht bzw. als Spritzwasserschutz dienen (siehe Abbildung 2b und 4). Es sind die zu erfassenden Parameter wie Verfahrgeschwindigkeiten, Beschleunigungen, Genauigkeiten, etc. ermittelt worden. Weiter wurde sich mit der Benutzeroberfläche sowie der zugehörigen, „Beet"-spezifischen Skriptsprache vertraut gemacht. Es wurden mögliche Schnittstellen zur Kommunikation erarbeitet und evaluiert. Im späteren Verlauf des Projekts wurde der Roboter physisch vom Hochbeet durch den **OGP-PT** getrennt. Der Aluminiumrahmen liegt durch diese Maßnahme frei auf dem Hochbeet und behält so seine Form, ohne, dass dieser durch die witterungsbedingten Längenänderungen des Holzes beeinflusst wird. Der Roboter wurde weiter an einen Festwasseranschluss angeschlossen, wodurch dieser ebenfalls die Funktion der Bewässerung übernimmt. Die Netzwerkkommunikation wird über Ethernet realisiert, wodurch dieser eine Anbindung an das Internet erfährt und im späteren Verlauf des Projekts auf das eingebettete System zugegriffen wird.

(a) FARMBOT mit Multisensorsystem (Dummy) (b) Schaltschrank

Abbildung 2: Hochbeet mit FARMBOT

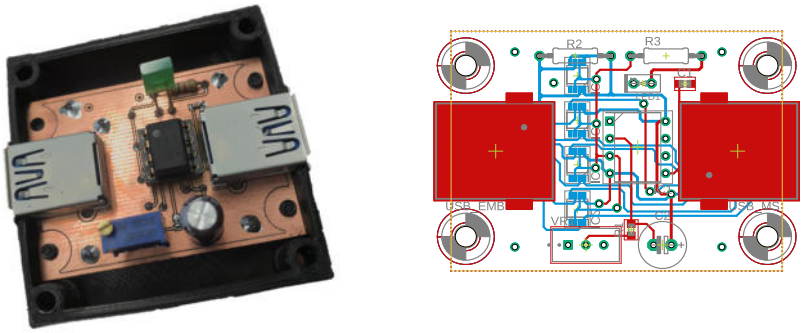
OGP-ROB - Arbeitspaket A2 Im Arbeitspaket 2 „Konzeptionierung und Entwicklung der Sensorplattform für die multisensorielle Datenaufnahme" sind umfangreiche Entwicklungen getätigt worden: Es wurde ein nach den Anforderungen leistungsstarkes eingebettetes System konzipiert, aufgesetzt und hardwareseitig mit Peripherie ausgestattet. Auf dem eingebetteten System läuft Ubuntu 18.04 LTS als Betriebssystem und ROS Noetic als Metabetriebssystem zur Verarbeitung der robotischen Anwendung. Bildgebende Sensoren wie eine RGB-Kamera, eine Multispektralkamera sowie eine

geometriegebende *Time-Of-Flight*-Kamera wurden nach Herstellervorgaben in Betrieb genommen und in ihrem Umfang evaluiert. Dazu wurden Spannungsquellen in Form kleiner Netzteile oder POE-Injektoren realisiert. Als Grundplatte auf welcher sämtliche Komponenten montiert wurden, dient eine trapezförmige, 1 cm starke Aluminiumplatte. Diese erfüllt ebenfalls die Funktion als Kühlkörper sämtlicher Komponenten. Weiter sind Lüfter an dieser angebracht um diesen Effekt zu unterstützen. Im nächsten Schritt ist eine umfangreiche Recherche nach zur Verfügung stehenden *Software* (Treibern, Schnittstellen) zu dem zur Verwendung findenden *Framework* getätigt worden. Dabei ergab sich die Notwendigkeit einen für die Multispektralkamera (MICASENSE) passenden Treiber inklusive Schnittstelle zu programmieren. Die Schnittstelle zur Kamera selbst sind über die HTTP-Methoden POST und GET *Requests* realisiert (s. u.). Zur RGB-Kamera wurden umfangreiche Anpassung im vom Hersteller zur Verfügung gestellten Treiber vorgenommen. Des Weiteren mussten Anpassungen in der Schnittstelle getätigt werden um sporadisch auftretende Abstürze des Treibers zu verhindern. Thermal- sowie *Time-Of-Flight*-Kamera wurden mit vom Hersteller ausgelieferten Treibern an das *embedded* System integriert. Die Netzwerkkonfiguration der Adapter wurde mittels `ifupdown` in der `/etc/network/interfaces` umgesetzt. Für einige Adapter wurden `udev`-Regeln erstellt, wodurch diese eindeutig zugewiesen werden konnten. Weiter wurde ein provisorischer, naiver Ansatz für einen nichtsynchronisierten *software*seitigen Auslöser entwickelt, welcher dem im Arbeitspaket 2 definiertem Ziel der „Rohdatenauswertung“ gerecht wird.

Mit Hilfe der Rohdatenauswertung sind so wichtige Kenngrößen wie Bildwiederholungsraten, Belichtungszeiten, interne Laufzeiten, Auflösungen, Punktwolkendichten, etc. ermittelt worden. Dabei zeigte sich beispielsweise dass eine synchronisierte Auslösung, unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Signallaufzeiten der Kameras, zwingend nötig ist. Ein weiterer wichtiger Punkt ist der Durchsatz der Daten. Sämtliche Daten der Kameras (Thermal ausgenommen) werden über TCP/IP via Ethernet übertragen. Das hat zur Folge, dass sehr hohe Datenmengen über die Netzwerkschnittstelle gelesen, übertragen und geschrieben werden müssen. Infolgedessen sind umfangreiche Recherchen zur Netzwerktechnik getätigt und entsprechende Lösungen im eingebetteten System umgesetzt worden.

Während im Allgemeinen die Sensoren umfangreich von Seiten der Hersteller mit Software gepflegt wurden, war dies bei der MICASENSE Altum nicht der Fall. Es mussten hard- sowie softwareseitig Entwicklungsarbeiten geleistet werden. Der Sensor wird üblicher Weise an fliegenden System betrieben und nicht wie im Vorhaben vorgesehen dynamisch ausgelesen, mittels eingebettetem System. Die Kommunikation über die MICASENSE geschieht in der Regel über eine App oder Netzwerkoberfläche via WLAN oder das MAVLINK-Protokoll. Die Daten werden während des Flugs auf eine SD-Karte geschrieben und im späteren auf einen Rechner kopiert (*postprocess*). Möchte man die Daten in „Echtzeit“ erheben und lesen, besteht nur die Möglichkeit über einen USB-Ethernet-Adapter die Daten via HTTP-POST-GET-Requests auszulösen und zu lesen. Damit der USB-Ethernet-Adapter in der Kamera korrekt initialisiert wird, darf dieser erst nach erfolgreichem Startvorgang (30 s) der Kamera an diese angeschlossen werden. Befindet sich der Adapter zum Zeitpunkt des Startens der Kamera bereits an die-

ser, ist der Startvorgang nicht erfolgreich[2]. Dies hat zur Konsequenz, dass der Adapter per Hand vor jedem Startvorgang von der MICASENSE getrennt werden muss und nach 30-sekündigem Warten wieder mit dieser verbunden werden kann. Realisiert wird dies schaltungstechnisch über die in Abbildung 3 zu sehende, entwickelte Platine.



(a) Platine

(b) PCB-Schaltplan

Abbildung 3: Einschaltverzögerung „EiVö“ des USB-Ethernet-Adapters an der MICASENSE

Die Platine besteht aus der integrierten Schaltung NE555, einem Potentiometer zum Einstellen der Verzögerungszeit von 0 s bis zu 2 min und einer Eingangs- sowie Ausgangsseite. Auf der Eingangsseite (links) wird die MICASENSE angeschlossen, auf der Ausgangsseite (rechts) der USB-Ethernet-Adapter. Wird die MICASENSE gestartet, wird die Einschaltverzögerung mit Spannung versorgt und schaltet die Datenleitungen zum USB-Ethernet-Adapter nach der eingestellten Zeit durch. Somit kann die Kamera Hardwareseitig autark betrieben werden.

Um das Multisensorsystem autark lauffähig zu gestalten, wurde ein `systemd`-Eintrag geschrieben (siehe Auflistung 1). Dieser Dienst verwaltet und überwacht daemonisierte Prozesse welche im folgenden den Hauptprozess der Sensoraufnahme verwaltet. Der Eintrag sieht vor, dass der Hauptprozess nach dem Start des Systems automatisch initialisiert wird. Das System selbst ist so konfiguriert, dass beim zuschalten von Spannung der Startvorgang initiiert wird. Sollte der Hauptprozess abstürzen oder einen Fehler verursachen, wird im Abstand von 30 s versucht diesen neu zu starten. Fehlermeldungen werden in einer vorgesehen Log-Datei eingetragen. Diese Vorgehensweise führt zu einer vereinfachten Handhabung des Systems für technisch-nicht-versierte Nutzer.

[2]Es wird vermutet, dass die zugehörige `udev`-Regel auf dem eingebetteten System der Kamera falsch konfiguriert ist; über ein Terminalzugang ließe sich das Problem eleganter lösen...

Auflistung 1: Datentyp farmbot_state_msg

```
[Unit]
Description=Start promapper.launch
After=systemlog.target
[Service]
WorkingDirectory=/home/promapper/
User=promapper
ExecStart=/usr/local/bin/promapper-bringup.sh
Restart=on-failure
RestartSec=30s

[Install]
WantedBy=multi-user.target
```

Auf Seiten der Software wurde ein Treiber mit Schnittstelle in das Robot Operating System geschrieben. Damit ist es möglich, die Multispektralkamera in eingebetteten System zu betreiben. Der sogenannte Knoten (Bestandteil in der ROS-Infrastruktur) bietet die Möglichkeit die Kamera zu konfigurieren und Funktionen zu bedienen. Die erhobenen Bilder lassen sich damit anderen Knoten im ROS-Netzwerk zur Verfügung stellen. Dabei kann mit der Kamera über zwei ROS-Services `capture` und `changeChannels` interagiert werden. Der erste Service löst die Kamera aus und publiziert die Bilder der Kamera von allen aktivierten Kanälen unter separaten *topics*. Der zweite Service ermöglicht es die Kanäle zu aktivieren beziehungsweise zu deaktivieren. Dadurch lässt sich Bandbreite sparen und es wird eine höhere Bildwiederholungsrate erzielt.

Abbildung 4: Multisensorsystem mit Umhausung

OGP-ROB - Arbeitspaket A3 Teil des Arbeitspakets 3 ist die Entwicklung eines 4D-Pfadplanalgorithmus. Mit diesem sollen Daten einer spezifischen Pflanze zu einem gewünschten Zeitpunkt, multisensoriell erhoben werden. Der gesamte Umfang an Daten aller Pflanzen soll dabei über einen Wegfindungsalgorithmus vollautomatisch erhoben werden. Dazu wurde eine Schnittstelle vom Multisensorsystem zum Farmbot geschaffen, um den Zustand des Farmbots für das Multisensorsystem erfassbar zu machen. Dabei wurden unterschiedliche Möglichkeiten (vgl. Abschlussarbeiten Unterabschnitt 2.6) untersucht und entwickelt und final auf die bestehende Mensch-Maschine-Schnittstelle des FarmBots gesetzt, um die Benutzereingaben möglichst niederschwellig zu gestalten (Rücksprache Projektpartner). Diese Schnittstelle wird über einen herkömmlichen Browser mittels PC, Smartphone oder Tablet aufgerufen. Der Benutzer hat dort Möglichkeiten, dass Beet zu verwalten; Pflanzen virtuell zu setzen, Bewässerungszeiten zu wählen oder etwa Sequenzen zu programmieren, etc. Zum Datenaustausch wird auf eine zentrale Client-Server Infrastruktur gesetzt (siehe Abbildung 5), in welcher das Beet selbst sowie die Mensch-Maschine-Schnittstelle (Netzseite) als Client auf einen zentralen Server verbinden und dort bidirekltional Daten und Befehle tauschen.

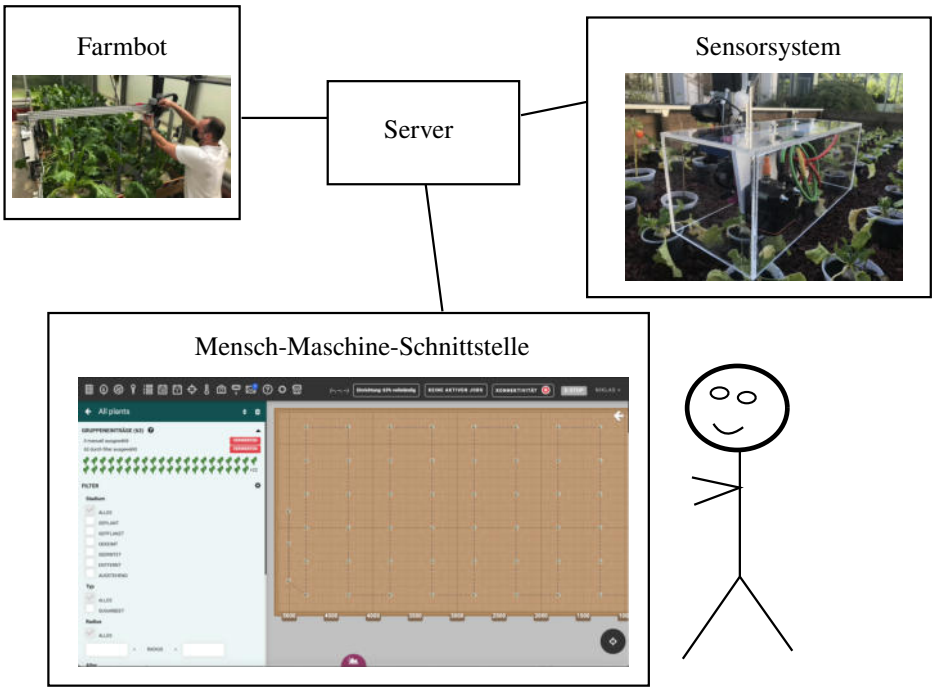


Abbildung 5: Infrastruktur aus Beet (links oben), Server (mitte oben), Sensorsystem (rechts oben), Mensch-Maschine-Schnittstelle (links unten) sowie Anwender (rechts unten)

Der Hersteller des FARMBOT stellt offenen Quellcode sowie eine API (engl. Application Programming Interface) für Entwickler zur Verfügung. Darüber wurde das Multisen-

sorsystem in diese bestehende Infrastruktur als Client integriert. Es wurden Programme (Knoten) für das auf dem Sensorsystem laufende ROS (Robotic Operating System) geschrieben, welche Zustände des Beetes über die API erfassen und in ROS standardisierten Nachrichten publizieren.

Die Nachricht (s. Auflistung 2) besteht aus einem Zeitstempel `dt`, einer Koordiante `x, y, z` und zwei Boolean `periphal1` und `2`. Diese wird bei jeder Zustandsänderung vom Beet der Sensoraufnahme mitgeteilt. Da die Abstände der Publikationen nicht fest getaktet sind, wird eine Zeitdifferenz `dt` übergeben. Weiter wird die Position der Sensoraufnahme in kartesischen Koordinaten gesendet. Außerdem können zwei Variablen `periphal1` und `periphal2` geschaltet und übergeben werden. Diese werden genutzt um beispielsweise der Sensoraufnahme mitzuteilen, dass ein Datensatz erhoben werden soll oder dass das Ventil zur Applikation des Plasma aktivierten Wassers schaltet. Die Sensoraufnahme fragt kontinuierlich diese Nachricht ab. Befindet sich das Multisensorsystem über einer Pflanze von welcher Daten erhoben werden sollen, wird dieser Boolean (Schalter) `periphal1` auf `true` gesetzt. Ist dies der Fall, soll im folgenden Arbeitspaket 4 ein Datensatz der Pflanze mit Zeit und Position erfasst werden.

Auflistung 2: Datentyp farmbot_state_msg

```
promapper@pro-mapper:/home/promapper$ rosmsg show farmbot_talker/farmbot_state_msg
std_msgs/Header header
  uint32 seq
  time stamp
  string frame_id
time dt
float64 x
float64 y
float64 z
bool periphal1
bool periphal2
```

Im Anwendungsfall programmiert der Benutzer über die Mensch-Maschine-Schnittstelle eine Route: Pflanzen werden innerhalb dieser Route angefahren und es wird 10 s über der Pflanze verweilt. Die Variable Auslöser (`periphal 1`) wird während dieser Zeit auf 1 gesetzt um über den im folgenden Arbeitspaket zu entwickelnden Auslöser einen Datensatz der jeweiligen Pflanze zu erheben.

OGP-ROB - Arbeitspaket A4 Inhalt des Arbeitspakets 4 „Synchronisation und Vorverarbeitung der Multisensordaten“ ist die Zusammenführung multisensorieller Daten auf dem eingebetteten System. Neben den bildgebenden Sensoren wie RGB-Kamera, Multispektral-Kamera oder Thermal-Kamera sollen auch kinematische Daten, Zustände oder beliebige andere Daten des Pflanzroboters auf dem eingebetteten System synchronisiert werden. Jede der Kameras bietet die Möglichkeit über einen *Software*seitigen Impuls oder einen *hardware*seitigen Impuls ausgelöst zu werden. Der Anspruch an eine zeit-synchrone Auslösung aller Kameras sind durch interne Laufzeitdifferenzen sowie unterschiedliche notwendige Belichtungszeiten gegeben.

Dafür wurde der naive Ansatz des Auslöser (vgl. AP 2) verworfen und ein neues Konzept umgesetzt. Dazu wurde ein Knoten für das Meta-Betriebssystem ROS geschrieben welcher abhängig der ermittelten Laufzeiten Δt die Sensoren verzögert auslöst. Die ermittelten Zeitdifferenzen von RGB, Thermal und Laserscanner liegen dabei in einem vernachlässigbaren kleinen Bereich. Hingegen liegt die ermittelte Laufzeit der MICASENSE Multispektralkamera im Bereich von 2 s.

Als Auslöser der diese Laufzeiten berücksichtigt wurde ein Knoten im ROS-Netzwerk geschrieben, welcher kontinuierlich den Zustand des Beets abfragt. Dieser Zustand wird über die im vorherigen Arbeitspaket publizierte Nachricht erhoben. Wie bereits ausgeführt, wurde ein wahrer Zustand der Variable `periphal1` als Aufforderung vom Beet an das Sensorsystem definiert, die Sensoren auszulösen. Wird ein Bilder-Datensatz erhoben, werden die Bilder über gängige Algorithmen kalibriert. Dies entfernt die optischen Verzerrungen im Bild wodurch genauere Aussagen über Abstände und Größen im Bild getroffen werden können. Weiter ist dies notwendig, um einen räumlichen Bezug zwischen dem beobachteten Objekt und der 2D-Bildebene herzustellen. Weiter werden extrinsische Parameter der Sensoren bestimmt um die erhobenen Bilder zu einem Bildstapel zu fusionieren (bei geringer Disparität).

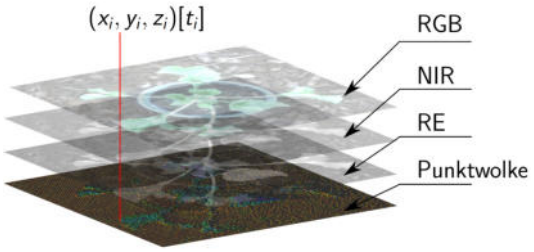


Abbildung 6: Bildstapel bestehend aus RGB, NIR, RE und einer Punktwolke

Der Datensatz wird in einer Ordnerstruktur bestehend aus der Position der Pflanzen (`x` und `y`), dem Kanal (`n`), der Bezeichnung des Kanals (`B`) und der Unixzeit[3] (`t`) angegeben: `_y_n_B_t.*`.

Für das in **Arbeitspaket 5** – „Entwicklung eines 4D-Pfadplanungsalgorithmus für das kontinuierliche Pflanzenmonitoring“ – definierte Ziel vom kontinuierlichem Pflanzenmonitoring wird der Fortschritt von den vorherigen Arbeitspaketen mit der Schnittstelle zum Erfragen der erhobenen Sensordaten erweitert. Diese Schnittstelle sieht vor, dass eine dezentrale Instanz einer künstlichen Intelligenz die Daten in Echtzeit erfragt und auswertet. Die Erkenntnis zu einem dezentralen System zwang sich aufgrund begrenzter Rechenkapazitäten des eingebetteten Systems des Multisensorsystem. Als Schnittstelle wurde sich auf einen niederschwelligen `sftp`-Server geeinigt, welcher umfangreiche

[3] Zeit in Sekunden seit dem 1.Januar 1970

Möglichkeiten bietet, Daten in Echtzeit zur Verfügung zu stellen. Ebenso werden die Daten niederschwellig über `HTTP` und einer `htaccess` Zugangsbeschränkung angeboten. Dies hat den Vorteil, dass die Daten sich auch über einfache Browser am *Smartphone* oder *Tablet* abrufen und verifizieren lassen.

Im weiteren Schritt des Arbeitspakets gilt es die Rückführung gewonnener Informationen in den Regelkreis der Routine zu gewähren. Beispielsweise sollen Krankheiten einer individuellen Pflanze erkannt und dann spezifisch behandelt werden. Dazu müssen die zuvor gewonnen Datensätze an künstliche Intelligenzen wie beispielsweise neuronale Netze als Trainingsdaten gegeben werden. Die erzeugten angelernten Netze können dann darüber hinaus neu erhobene Daten auswerten und Gelerntes, Zuständen zuweisen. Diese zugewiesenen Zustände sind als priori Wissen zu verstehen und werden dann in die Pfadregelung und einem entsprechendem Kultivierungsmechanismus (Wässern. Düngen, PAL aufbringen, etc) eingebracht. Dazu wurde eine Schnittstelle für die KI-Instanz entwickelt, welche auf Ergebnisse der Analyse wartet. Wird ein Ergebnis zu der Pflanze empfangen, wird mit einer entsprechenden Maßnahme reagiert.

Der gesammte Ablauf befindet sich in einer geschlossenen Regelung welche zu jedem Zeitpunkt ausgeführt werden kann. Pflanzen werden selbstständig angefahren, es werden Daten erhoben und mit der dezentralen KI eine Entscheidung über die Maßnahme getroffen, unabhängig davon ob es sich dabei um einfach Bewässerung, eine Applikation mit einem Düngemittel oder um eine Behandlung mit plasmatechnologischen Ansätzen handelt. Visualisieren lässt sich der Prozess der Datenerhebung in Abbildung 7. Dieser gesamte Prozess lässt sich durch die im Vorfeld bereits verwendete Benutzeroberfläche terminieren und steuern.

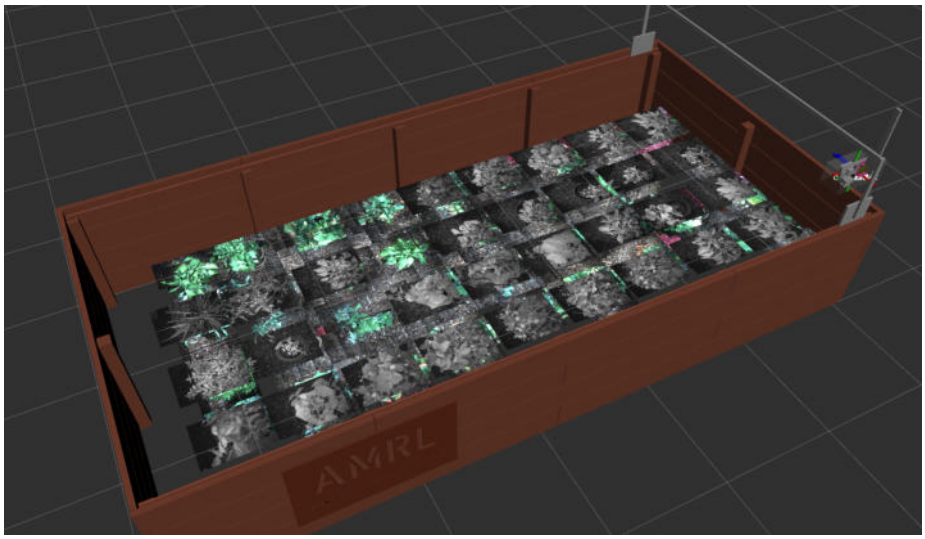


Abbildung 7: Erhobene Bildstapel sämtlicher im Beet befindlicher Pflanzen bestehend aus RGB, NIR und RE durch die automatisierte Routine

Zur nicht-terminierten Datenaufnahme (Training) oder der automatisierten Bewirtschaftung lassen sich ebenfalls Taster nutzen. Im wesentlichen besteht die Abfolge der Schritte aus den folgenden Schritten:

1. Dem Zuschalten von Spannung an das Gesamtsystem
2. dem Anbringen der Multisensorplattform und dem Verbinden mit Spannung und dem Netzwerk sowie
3. dem Starten der Datenerhebung (Training) oder der reaktiven Maßnahme.

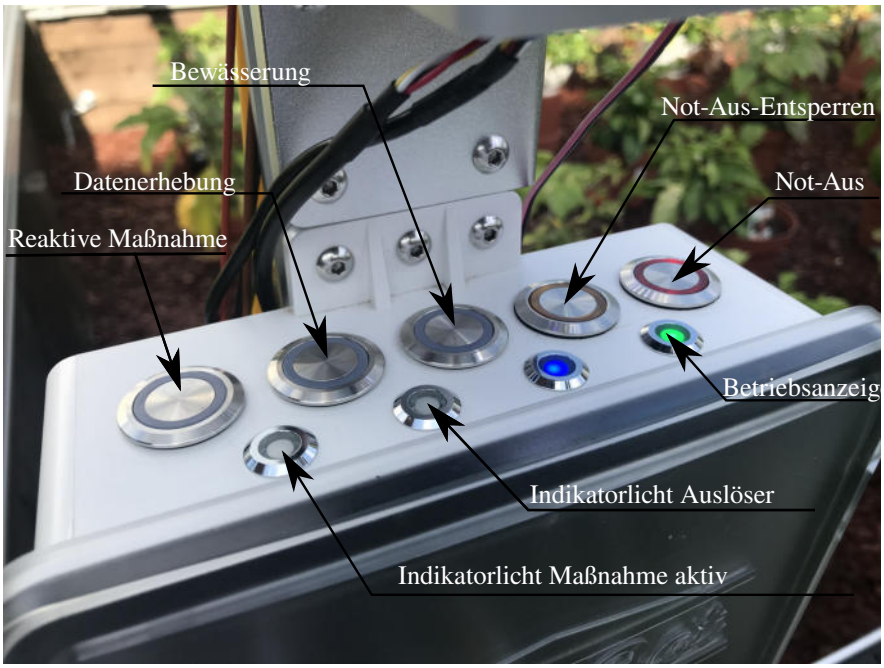


Abbildung 8: Mensch-Maschine-Schnittstelle taktile Taster

Weiter wurde **Arbeitspaket 6** „Entwicklung eines 3D-Modells der Pflanzengeometrie“ bearbeitet. Dabei wurde festgestellt dass die TOF(*Time of flight*)-Kamera ein stark verrauschtes Bild erzeugt. Selbst mit entsprechender Filterung lies sich kein ruhiges Ergebnis erzielen. Rückführend lies sich die Sonneneinstrahlung als Ursache ermitteln. Daher wurde die Sensoraufnahme umkonzipiert und sich mit einem im Besitz des Labors befindlichen LiDAR Ouster-OS1-128 entschieden. Dieser wurde mechanisch, elektrisch und softwareseitig in das Gesamtsystem integriert und evaluiert. Da dieser erheblich mehr Abwärme erzeugt als bisher, sind diverse Lüfter für eine bessere Zirkulation installiert worden. Neben diesen grundlegenden Änderungen wurden unterschiedliche Konzepte zur 3D-Rekonstruktion der Pflanzen evaluiert.
Zur Rekonstruktion des 3D-Modells ist es notwendig, die verwendete Kamera zu kalibrieren. Die angebrachte Multispektralkamera Micasense Altum besteht aus sechs nebeneinander angeordnete Bildsensoren, die unterschiedliche Wellenlängen aufnehmen

können. Um eine geeignete Aussage über aufgenommene Geometrie aus den Bildern zu treffen ist es notwendig die intrinsischen Parameter (wie Brennweite, Bildhauptpunkt und Verzerrungen des Objektivs) der einzelnen Bildsensoren und Objektive zu kennen. Die monokulare Kamerakalibrierung wurde nach den gängigen und bereits implementierte Kalibrierungsverfahren durch ein Schachbrettmuster durchgeführt. Zusätzlich ist eine Stereokalibrierung notwendig, um die extrinsischen Parameter (Translation und Rotation) der Kamerakoordinatensysteme zu bestimmen. Hier wurde ebenfalls auf gängige Kalibrierungsverfahren zurückgegriffen.

(a) Isometrisch (b) Frontal (c) Draufsicht

Abbildung 9: Kolorierte 3D-Punktwolke

Für den Projektpartner **OGP-HS** (IfZ) ergaben sich dem Projektantrag folgend vier Arbeitspakete **B1-B2**, sowie die beiden vorab beschriebenen Zusatzpakete **Z1** (verlinkt zu C1 OGP-PT) und **Z2** (verlinkt zu C2 OGP-PT).

OGP-HS - Arbeitspaket B1 In Arbeitspaket **B1** stand die Etablierung des biologischen Systems Zuckerrübe bzw. Mangold und die Planung des Sensorsetups (Kamera, Beleuchtung, Messsetup etc.) im Vordergrund. Dazu wurden unterschiedliche Hardware angeschafft wie ein Netzwerkspeicher (NAS) zur effizienten Datenspeicherung von Rohdaten und Verarbeitungsschritten, eine Hyperspektralkamera (Wellenbereich 500-1000nm), eine entsprechende artifizielle Beleuchtung zur Optimierung der Reflektanz und Erhöhung der Aufnahmequalität, sowie eine Thermalkamera um auch thermische Änderungen zu messen und ein Farmbot zur Integration der Sensorik in ein Hochdurchsatzsystem.Durch die verspätete Lieferung der Thermalkamera, begründet durch pandemiebedingte Lieferbedingungen und Änderungen in der Besitzstruktur des Lieferanten wurde die Thermalkamera erst zum Ende der Projektlaufzeit integriert.

Ergebnis:
Mit Abschluss des Arbeitspaketes konnten Aufnahmen mit spektraler und räumlicher Auflösung durchgeführt werden. Die Thermalmessungen wurden gegen Ende des Projektes integriert. Das System ist in der Lage Reflektanzbilder zur automatisierten Auswertung, analog zum aktuellen Stand der Technik (siehe [4]) aufzunehmen (siehe 10 A-F).

[4] Paulus, S., Mahlein, A.-K. (2020). Technical workflows for hyperspectral plant image assessment and processing on the greenhouse and laboratory scale. In GigaScience (Vol. 9, Issue 8). Oxford University Press (OUP). https://doi.org/10.1093/gigascience/giaa090

OGP-HS - Arbeitspaket B2 In Arbeitspaket **B2** wurden erste Testaufnahmen erstellt, das Setup nochmal überprüft und angepasst, um Messung mit erhöhtem Durchsatz, d.h. Messung vieler Pflanzen, als auch die Aufnahme von Zeitreihen zum automatisierten Monitoring der Wachstumsentwicklung bzw. der Krankheitsentwicklung, durchzuführen.

Ergebnis:
Es wurde gezeigt, dass die spektrale Signatur der Kamera wie erwartet aufgenommen werden kann ist und genutzt werden kann, um signifikante Änderungen im pflanzlichen Spektrum aufgrund von Stress zu detektieren.

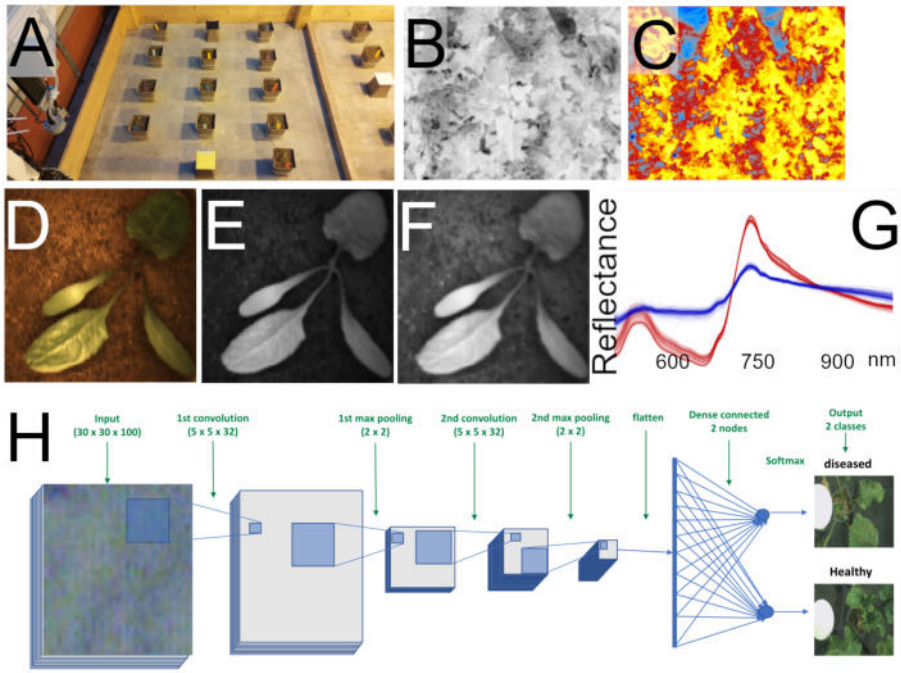


Abbildung 10: Das benutzte Sensorsystem in PRo-Mapper umfasst unterschiedliche Kameratypen. Die Untersuchungen dabei wurden weitestgehend im Farmbot-System durchgeführt (A). Dabei kommt eine Thermalkamera zum Einsatz (B Rohdaten, C aufbereitete Daten), weiterhin RGB (D) und spektrale Kameras, welche den NIR Bereich ($700 - 1000nm$) abdecken (E $742nm$, F $927nm$). Daraus lassen sich klare Spektren ableiten für bspw. Boden- und Blattsignaturen (G, Blatt rot, Boden blau). Zur Erkennung von Zuckerrübenkrankheiten (hier *Cercospora beticola*) wurde final ein auf Deep Learning (H) basiertes Modell benutzt, welches in der Lage war kranke Pflanzen mit hoher Genauigkeit zu erkennen. Diese Ergebnisse wurden im Rahmen von PRo-Mapper auf der Optica Konferenz in München im Juli 2023 als Keynote vorgestellt.

OGP-HS - Arbeitspaket B3 In Arbeitspaket **B3** wurde die Anpassung der Hochdurchsatzmessung zur praxisnahen Anwendung durchgeführt. In artifiziellen Testumgebungen werden hochpräzise Messungen mit hoher spektraler, räumlicher und zeitlicher Auflösung durchgeführt. Für eine praxisnahe Übersetzung, sowohl für die Anwendung im Gewächshaus, als auch auf Feld muss die Auflösung daher optimiert werden. Dies beinhaltete die Evaluierung der Gewichtung der gemessenen Wellenlängen bezüglich ihres Beitrages zum Klassifikationsergebnis. Der hierzu benutzte Algorithmus der Recursive Feature Elemination nutzt dafür das Herauslassen der einzelnen Wellenlängen und leitet aus einem gleichbleibenden oder schlechteren Ergebniss den Beitrag der Wellenlänge zum Klassifikationsergebnis ab (Literatur siehe weiter vorne im Text).

Ergebnis:
Es wurde gezeigt, dass die aufgenommenen Daten geeignet sind, um State-of-the-Art KI Anwendungen wie Convolutional Neural Net Ansätze darauf anzuwenden (siehe Abbildung 10 G & H). Dabei ist je nach Abstand die räumliche Auflösung der Kamera so hoch, dass frühzeitig *Cercospora*-Blattflecken entdeckt werden können. Dies ist die Vorraussetzung für Routinen des automatisierten Monitorings und für eine perspektivische frühzeitige Erkennung und Quantifizierung (siehe Arbeitspaket B3).

OGP-HS - Arbeitspaket B4 In Arbeitspaket **B4** wurden die Algorithmen für eine praxisnahe Hochdurchsatzmessung mit der möglichen Kopplung mit Plasmaanwendungen und der Anwendung auf unterschiedlichen Kulturen angepasst. Unterschiedliche Algorithmen mit weniger hoher Komplexität wurden evaluiert um final die bestmögliche Lösung mit hoher Genauigkeit und trotzdem hoher Robustheit und geringer Komplexität zu gewährleisten (siehe Abb. 11).

Ergebnis:
Das im Projektantrag beschriebene visionäre System des Projektantrages PRo-Mapper beinhaltet die robotische Steuerung der Position und Ausrichtung der Kamera, die automatisierte Bildaufnahme, gemäß der angefahrenen Position (Einzelpflanzenposition), gekoppelt mit der KI-basierten Bildauswertung auf Grundlage eines etablierten Trainiungsdatensatzes, die bedarfsorientierte Applikation mit Plasma/PAL, sowie das automatisierte Monitoring des weiteren Krankheitsverlaufes bzw. die Quantifizierung der Wirkung der Behandlung. Eine Gesamtintegration war aufgrund unterschiedlicher Gegebenheiten (zeitliche Einschränkung aufgrund erheblicher Verzögerungen der Lieferung, pandemiebedingte Einschränkung der persönlichen Treffen, Verzögerungen durch Neukonstruktion mechanischer Teile des Farmbots) nicht möglich. Dennoch konnten die Partner in PRo-Mapper sicherstellen, dass die Einzelaspekte eigenständig funktionieren und die vollumfängliche Nutzbarkeit gewährleistet ist, so dass einer Gesamtintegration technisch nichts im Wege steht.

OGP-HS - Zusatzpaket Z1 In Zusatzpaket **Z1** wurde der Einfluss von Plasma auf das Keim- und Aufwuchsverhalten von unpilliertem Zuckerrüben und Mangoldsaatgut durchgeführt. Dazu wurden jeweils 100 Samen einer Behandlung unterzogen und an vier aufeinanderfolgenden Tagen die Keimung bestimmt. Durchgeführt wurden hier Wiederholungen mit unterschiedlicher Plasmakonzentration und für die Kulturen Zucker-

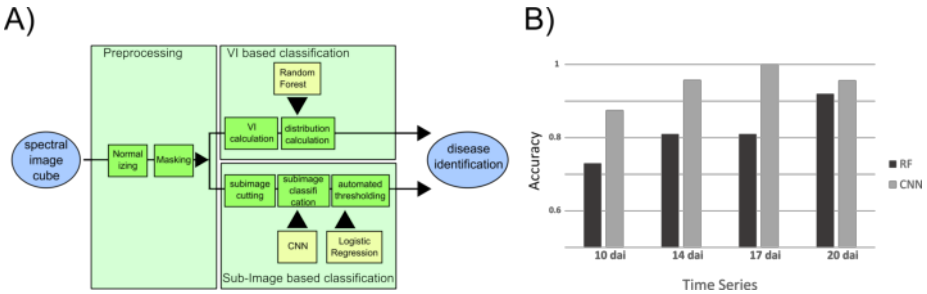


Abbildung 11: Zur Erkennung von Zuckerrübenkrankheiten (hier *Cercospora beticola*) wurden unterschiedliche Methoden angewendet (A). Die vegetationsindex-basierte Methode ist zwar einfacher erklärbar und ermöglicht eine bessere biologische Interpretation, erweist sich jedoch als deutlich ungenauer als die Methode basierend auf Deep Learning (B). Diese Ergebnisse wurden im Rahmen von PRo-Mapper auf der Optica Konferenz in München im Juli 2023 als Keynote vorgestellt.

rübe (3x) und Mangold (5x).

Ergebnis:
In den Versuchen wurde das Saatgut direkt mit Plasma behandelt. Der Vorgang an sich spielt sich unter hohen Temperaturen ab. Daher ist es schwierig eine Wirkung des Plasmas auf die Keimrate von der Wirkung der hohen Temperatur auf selbige zu unterscheiden. Bei hohen Temperaturen ist die negative Wirkung auf die Keimrate sichtbar für beide Kulturen. Jedoch gibt es Hinweise auf eine positive Wirkung bei der gewissen Konzentration. Erschwert wird die Interpretation da die optimale Konzentration der Applikation nicht bekannt ist.

OGP-HS - Zusatzpaket Z2 In Zusatzpaket **Z2** wurden unterschiedliche Pathosysteme auf einer Nährlösung kultiviert und dann ausgestanzt und in neue Petrischalen mit Nährmedium übertragen. Nun wurde Flüssigkeiten beigesetzt abhängig von der Fragestellung. Benutzt wurde destilliertes Wasser zur Kontrolle, sowie Plasma aktiviertes Wasser in unterschiedlchen Konzentrationen mit und ohne Pufferlösung. Als Pathosysteme kamen dabei *Cercospora beticola*, *Phoma betae* und *Aphanamyces cochliodes* zum Einsatz.

Ergebnis:
Bei jedem Pathosystem konnte eine Wirkung gezeigt werden, jedoch benötigt eine fundierte Aussage eine weitere Untersuchung i) der Plasmakonzentration und ii) des Einflusses der Pufferlösung auf das Wachstum bzw. die Proliferation des Erregers (siehe dazu Abbildung 12).

OGP-PT - Arbeitspaket C1 Aufgrund von Lieferverzögerungen des Mangold-Saatgutes wurde für grundlegende Versuche zur Erfassung der Wirksamkeit der Plasmabehandlung bezüglich einer thermischen Schädigung und damit einer verringerten Keim-

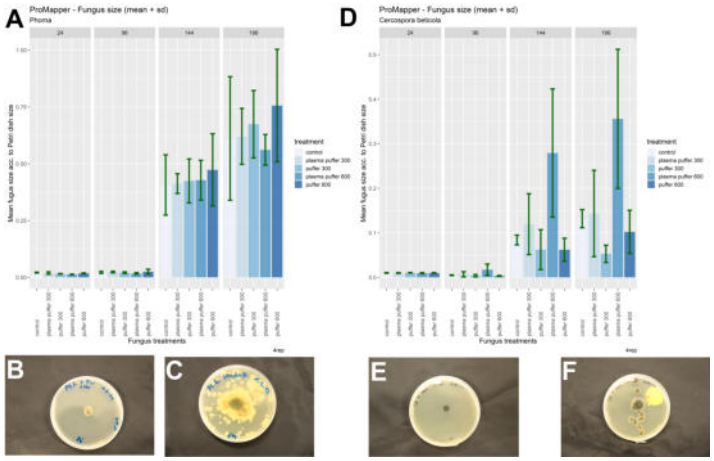


Abbildung 12: Ergebnisse aus den Versuchen mit Zuckerrübenpathogenen auf Petrischalen zur Untersuchung der Wirkung unterschiedlicher Plasmakonzentrationen. Die Untersuchungen wurden für *Cercospora beticola* (A,B,C), *Phoma betae* (D,E,F), sowie *Aphanomyces cochlioides* (hier nicht gezeigt) durchgeführt. Diese Ergebnisse werden den Zusatzleistungen Z2 zugeordnet.

fähigkeit, als Substitut auf Zuckerrübensaatgut zurückgegriffen. Die Durchführung von Keimtests ist wesentlicher Bestandteil der Bestimmung der Betriebsparameter der eingesetzten Plasmaanlage zur Saatgutbehandlung. Dazu musste zuerst ein Parameterkorridor gefunden werden, der eine (thermische) Schädigung des Saatgutes aussschließt. Diese Keimtests wurden periodisch durchgeführt, dabei wurden unterschiedliche Parametersätze (Variation der Expositionszeit und des Behandlungsabstandes, siehe Tabelle 4) evaluiert. So konnte festgestellt werden, dass einige der verwendeten Parametersätze zu einer verminderten Keimrate führen, diese wurden für zukünftige Behandlungen ausgeschlossen. Damit liegt ein Set an Parametern vor, das für die Plasma(vor)behandlung von Saatgütern verwendet werden kann, ohne die Keimrate zu beinträchtigen (vgl. OGP-HS - Zusatzpaket Z1).

Parametervariation (Abstand, Zeit)	**BewertungParameterset**	**Keimrate**
Kontrolle		95%
10 mm, 5 s	+	96%
10 mm, 10 s	+	97%
10 mm, 15 s	+	94%
10 mm, 20 s	-	78%
12 mm, 10 s	+	93%
8 mm, 10 s	-	78%

Tabelle 4: Keimrate der Probenkollektive nach Plasmabehandlung mit Parameter-Variation (Expositionszeit und Behandlungsabstand).

OGP-PT - Arbeitspaket C2 Im Arbeitspaket C3 wurden *Cercospora beticola*, *Phoma betae* und *Aphanamyces cochliodes* in Petrischalen auf einem Nährmedium kultiviert. Auf diese Kulturen wurden TRIS-Puffer (0,5molar), destiliertes Wasser und plasmabehandelter TRIS-Puffer appliziert (300µl) um Auswirkungen auf das Wachstumsverhalten der phytopathogenen Kulturen zu evaluieren (vgl. OGP-HS - Zusatzpaket Z2 und Abbildung 12).

OGP-PT - Arbeitspaket C3 In diesem Arbeitspaket wird die Konzeption, Konstruktion, Fertigung eines Tank- und Sprühsystem (PAL) für den Farmbot erarbeitet. Dabei gilt es die flüssigkeitsspezifischen Anforderungen (Säurebeständigkeit etc.) zu berücksichtigen. Das PAL soll im späteren Verlauf unter Realbetrieb funktionieren. Daher muss darauf geachtet werden, dass z.B. der Anwenderschutz, Anlagensicherung etc. gewährleistet wird. Des Weiteren liegt ein besonderer Fokus auf der Erzeugung eines feinen Sprühnebels für eine hinreichende Benetzungsdichte der Pflanzenoberflächen.

Plasmaquelle

Begonnen wurde das Arbeitspaket C3, mit der Konzeptionierung und Konstruktion einer Plasmaquelle, die für die Herstellung von plasmabehandelten Wässer geeignet ist. Die Quelle besteht im Wesentlichen aus den Komponenten Keramikrohr, Masseelektrode, Hochspannungselektrode, Gaseinlass und Hochspannungsbuchse. Hinzukommend sind noch diverse Verbindungselemente in dem Plasma-TJ-X8 verbaut.
Der Plasma-TJ-X8 ist ausgelegt zum Betreiben mit einem Hochspannungsgenerator der Firma Tantec HV-X20. Die Spannungseinkopplung erfolgt über die auf der Oberseite integrierte Hochspannungsbuchse. Via des speziell für diese Quelle entwickelten Spannungsverteilersystems wird die Spannung auf die einzelnen Hochspannungselektroden aufgeteilt. Durch den Gaseinlass wird das Prozessgas in den Ringspalt, der sich zwischen den Hochspannungselektroden und Keramikröhren befindet eingeleitet. Dort werden die Plasmaentladungen generiert. Umschlossen sind die Keramikröhren von einem Rippen-Aluminiumkühlkörper. Durch die Rippen wird eine größere Oberfläche realisiert, bei gleichbleibenden Grundabmaßen des Bauteils. Durch extern angebrachte Axiallüfter wird der Rippen-Aluminiumkühlkörper mit Luft umströmt. Dieser Luftstrom entzieht dem Rippen-Aluminiumkühlkörper thermische Energie und kühlt somit die gesamte Plasmaquelle. Im Weiteren dient der Rippen-Aluminiumkühlkörper als Masseelektrode. Nachdem das eingespeiste Prozessgas den Plasmaentladungsraum passiert hat, strömt es am unteren Ende der Keramikröhren aus und kann somit in jegliches Medium eingeleitet werden. Abbildung 13 zeigt den technischen Aufbau der Plasmaquelle.

Tank- und Sprühsystem

Hier wird die Konzeption, Konstruktion und Fertigung eines Tank- und Sprühsystem (PAL) für den Farmbot innerhalb des Arbeitspaketes C3 beschrieben. Dabei gilt es die flüssigkeitsspezifischen Anforderungen (Säurebeständigkeit etc.) einzuhalten, da das Tank- und Sprühsystem im späteren Verlauf unter Realbetrieb gemäß den sicherheitstechnischen Anforderungen der PICCOPLANT Mikrovermehrungen GmbH funktionieren soll. Folglich muss darauf geachtet werden, dass z.B. der Anwenderschutz, Anlagensicherung etc. gewährleistet wird. Des Weiteren liegt ein besonderer Fokus auf der

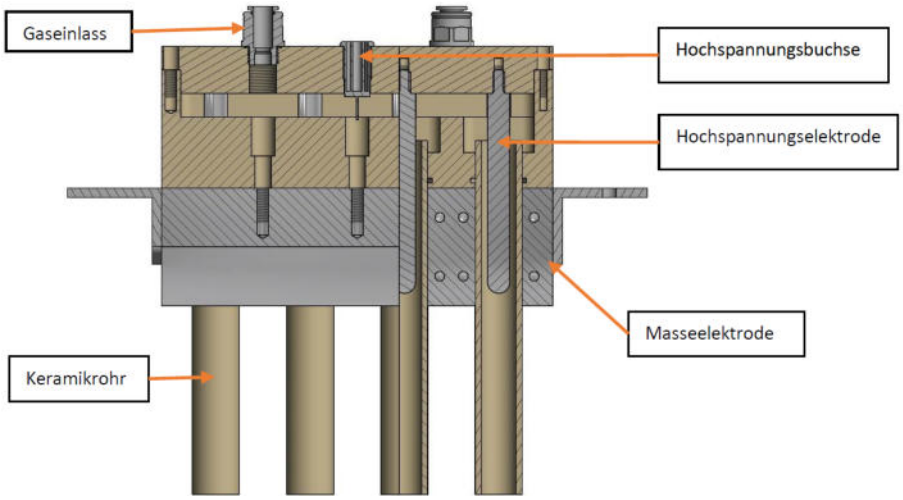


Abbildung 13: Schematischer Aufbau der Plasmaquelle TJ-X8.

Erzeugung eines feinen Sprühnebels für eine hinreichende Benetzungsdichte der Pflanzenoberflächen.
Für das spätere Sprühsystem, welches auf dem Farmbot installiert werden soll, wurden zunächst die Sprühdüsen evaluiert. Dabei kamen aus wirtschaftlichen Gründen Kaufteile zum Einsatz. Für das Vorhaben im Projekt wurde speziell nach Düsen gesucht, die einen feinen Sprühnebel erzeugen. Um die Düsen praktisch testen zu können, wurde ein Sprühsystem aufgebaut. Dieses System besteht aus einem 10 Liter Wassertank mit Trockenlaufschutz. An dem Trockenlaufschutz, Netzsteckdose geschaltet über einen sich im Tank befindenden Schwimmer, wird eine M.R.S. Whisper PowerPump Standard 24V - 8.5 bar angeschlossen (siehe Abbildung 3). Hierbei handelt es sich um eine Membranpumpe mit Bypass. Der Bypass öffnet bei überschreiten eines bestimmten Drucks und lässt dann einen Teilstrom wieder auf die Druckseite der Pumpe zurückströmen. Somit wird verhindert das die Pumpe einen bestimmten Druck übersteigt. Der Nachteil bei diesem System ist, dass der Öffnungsdruck des Bypasses vom Hersteller voreingestellt ist und nicht verändert werden kann. Um dennoch den Ausgangsdruck variabel einstellen zu können, sitzen nachgeschaltet am Pumpenausgang ein Druckregler und ein 24 V 2/2 Magnetventil. Am Ausgang des Magnetventils befinden sich die Düsen. Dieser Aufbau ist so gestaltet, das im späteren Einsatz auf dem Farmbot nur die Komponenten Druckregler, Magnetventil und Wasserleitungen bewegt werden müssen. Der Wassertank und die Pumpe werden stationär angebracht, somit muss das Gewicht dieser Komponenten nicht berücksichtigt werden. Die Auswahl der Strahldüsen für das Sprühsystem wird eingeschränkt durch die Vorgabe, dass ein feiner Nebel erzeugt werden soll. Daher wurde sich für Düsen der Firma M.R.S. entschieden. Hierbei handelt es sich um Micro-Nebeldüsen aus Metall für feinste Vernebelung. Eine Micro- Nebeldüse aus Kunststoff dient als Vergleich, um einen direkten Benchmark zu den Metalldüsen durchführen zu können. Die Micro-Nebeldüsen gewährleisten eine optimale Feinstzerstäubung. Dies bedeutet, das Wasser tritt kegelförmig aus der Nebeldüse aus und wird in

kleinste Aerosole vernebelt. Die Düsenköpfe besitzen Ausgangsbohrungen mit einem Durchmesser zwischen 0,15 mm und 0,5 mm. In praktischen Versuchen hat sich gezeigt, dass die Kunststoffdüse nach mehrmaligen Betreiben zerstört wurde. Die Strahlcharakteristik des Kegels ging verloren und es kam nur noch ein feiner Strahl aus dem Düsenkopf. Die Metalldüsen wiesen keine Defekte auf, auch nach mehrmaligen Ein- und Ausschalten der Düsen. Somit lag das Hauptaugenmerk auf den Metalldüsen. Wie auch zu erwarten war, erzielte die Micro-Nebeldüse mit der 0,15 mm Ausgangsbohrung das beste Ergebnis hinsichtlich der Erzeugung des Sprühkegels.
Allerdings musste das ursprüngliche Düsenkonzept revidiert werden, da die praktischen Bewässerungsversuche an den Pflanzen zeigten, dass bei Verwendung der Sprühdüse nicht genügend Flüssigkeit an die Erdoberfläche gelangt, das System erreicht nicht den notwendigen Druck, um einerseits die Blätter zur Seite drücken zu können und andererseits noch gleichzeitig den Sprühnebel bis zur Erdoberfläche zu transportieren. Im neuen PAL-Sprühsystem wurde der prinzipielle Aufbau der ursprünglichen Verteilerdüse des Farmbotherstellers übernommen, da dieses Konzept sich grundsätzlich gut bei der Bewässerung bewährte. Das neue Konzept erweitert die bestehende Einkanalverteilerdüse konstruktiv zu einer Zweikanalverteilerdüse. Hierzu musste ein weiterer interner Leitungskanal in die Verteilerdüse integriert werden, über den das Wasser eingespeist werden kann. Ein weiterer Aspekt liegt in der Gewichtsersparnis, da eine zusätzliche Düse mit Peripherie für die Applikation von Wasser entfällt und somit die Schrittmotoren des Farmbotsystems entlastet werden. Die Zweikanalverteilerdüse wurde auf dem hauseigenen Prusa 3D-Drucker der HAWK Fakultät I gedruckt und in das Gesamtsystem integriert.Im integrierten Zustand am Farmbot sind die Leitungsanschlüsse für die Bewässerung mit Leitungswasser und für die PAL-Applikation zu erkennen. Durch das 2-Kanalverteilersystem in der Düse, kann ein gleichmäßiges wässern mit dem jeweilig gewünschten Medium gewährleistet werden. Dabei besteht auch die Möglichkeit zwischen den Kanälen von Pflanze zu Pflanze zu wechseln. So kann z.B. die erste Pflanze bewässert werden und die nächste Pflanze wird, beispielsweise mit PAL behandelt. Durch eine individuelle Programmierung in der Steuereinheit des Farmbots, können so verschiedenste Anfahrszenarien an die Pflanzen realisiert werden.

Weitere Arbeiten

(Arbeits)Sicherheitstechnische Aspekte gemäß den Aufgabenstellungen der Piccoplant GmbH machten verschiedene Anpassungen des Farmbotsystems erforderlich. Die ursprünglich vorhandene Schlauchleitung des Farmbots wurde durch eine strömungstechnisch geeignetere Schlauchleitung ersetzt. Die neue Schlauchleitung passte nicht mehr in die ursprünglich verbaute Energiekette, da diese bereits mit den einzelnen Steuerleitungen der elektrischen Bauteile belegt war. Deshalb musste die urpsrüngliche Energiekette durch eine Energiekette mit angepasster Dimensionierung ersetzt werden. Als Austauschenergiekette dient die IGUS e-Kette Serie E2.26. Das Innenmaß der verwendeten Energiekette vergrößert sich dadurch um 27 mm. Dadurch können zu den vorhandenen elektrischen Steuerleitungen eine neue größere Schlauchleitung und zusätzlich noch weitere Steuerleitungen eingezogen werden, falls diese in Zukunft benötigt werden sollten. Das Aufbaumaß in der Höhe beträgt 10 mm. Konstruktiv hatte das neue Breitenmaß der Energiekette Auswirkungen. Die vorhandenen Energiekettenfixierungen waren zu schmal, aus diesem Grund wurden 24 neue Energiekettenfixierun-

gen aus 1,5 mm S235JR-Stahlblech gefertigt, abgekantet und am Pflanzroboter verbaut. Um die flüssigkeitsspezifischen Anforderungen (z.B. Korrosion, Witterung) im Realbetrieb gewährleisten zu können, wurden die Energiekettenfixierungen im Anschluss mittels Schutzlack beschichtet. Konstruktiv sind die Energiekettenfixierungen so ausgelegt, dass am Farmbot - auch bei Einzug weiterer Steuerleitungen - keine größeren Umbaumaßnahmen mehr durchgeführt werden müssen.
Des Weiteren ergaben sich im Zeitverlauf signifikante Defizite im Aufbau des Farmbotführungssystem. Die einzelnen Profilstreben des Systems waren auf Stoß miteinander verbunden, wiesen jedoch erhebliche Schwachstellen in der Passgenauigkeit der stirnseitigen Verbindungsstellen auf. Diese maßlichen Abweichungen betrugen bis zu 0.5 mm, was zur Folge hatte, dass der Farmbot in seiner X- und Y-Achsführung nicht reibungslos verfahren konnte. Dementsprechend konnte ein positionsgenaues und fehlerfreies Anfahren der Pflanzen nicht realisiert werden. Des Weiteren erwies sich der Ausleger zur Aufnahme der Sensorik als unterdimensioniert und neigte zum Aufschwingen. Für die Beseitigung dieser essentiellen Defizite, musste ein komplett neuer Führungsrahmen konstruiert werden und anschließend gegen den bisherigen Rahmen im Farmbot ausgewechselt werden. Ein besonderes Augenmerk lag bei der Konstruktion des neuen Führungsrahmensauf der Entwicklung eines geschlossenen Rahmens in Leichtbauweise mit gleichzeitig hohen Widerstandsmomenten gegen Verformungen in den einzelnen Komponenten. Durch den Einsatz von Leicht-Materialien wurde eine optimale Balance zwischen Stabilität und Gewicht erreicht. Erst diese Intervention ermöglichte eine effiziente und zuverlässige Funktion des Farmbotsystems (siehe Abbildung 14). Um die Anforderungen hinsichtlich Leichtbauweise mit hohen Widerstandsmomenten gegen Verformungen gerecht zu werden, besteht der Führungsrahmen aus F-40x80-L Konstruktionsprofilen der Firma Rose + Krieger, da diese eine hohe Verwindungssteifigkeit bei sehr leichten Eigengewicht von 2,518 kg/m aufweisen. An dem Führungsrahmen sind innen an den Längsprofilen die Laufschienen, auf dem die Rollen des Farmbots laufen, mittels eigengefertigten passgenauen Verbindungselementen angeflanscht. Der geschlossene Führungsrahmen bietet zudem Schutz vor äußeren Einflüssen wie Staub, Schmutz oder Feuchtigkeit, was die Lebensdauer erhöht und die Wartungsanforderungen reduziert. Der implementierte Führungsrahmen im Hochbeet, ist zudem schwimmend gelagert. So besteht zu jeder Zeit die Möglichkeit, Verschiebungen des Holzgestells ausgleichen zu können. Diese Verschiebungen basieren darauf, dass das Holz Feuchtigkeit aus der Umgebung aufnehmen und auch wieder abgeben kann. Somit kann das Holz ausdehnen oder schrumpfen. Das Ausgleichen geschieht passiv, ohne Beeinflussung auf das Farmbot-Verfahrsystemes zu nehmen. Anschließende Versuchsfahrten mit dem Farmbot auf dem neuen Führungsrahmen verliefen problemlos.

OGP-PT - Arbeitspaket C4 Für die *in-vitro* Versuche zur PAL-basierten Bekämpfung der Pseudomonas wurde ein Versuchsprotokoll etabliert und erste Testreihen begonnen. Zu Anfang der Versuchsreihe ergaben sich Rückschläge bei der Anzucht der Bakterien auf dem Nährmedium, diese Probleme konnten aber im weiteren Verlauf der Experimente gelöst werden.

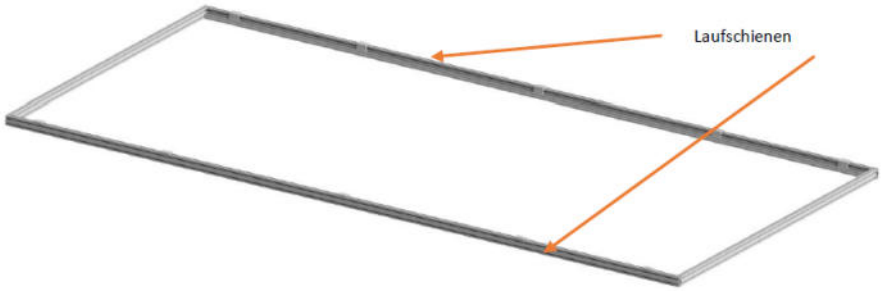


Abbildung 14: Implementierter Führungsrahmen im Gesamtaufbau des Farmbots (unten) und CAD-Modell des Führungsrahmen mit Laufschienen des Farmbots (oben).

Versuchsprotokoll zum Nachweis der bioziden Wirkung von PAL

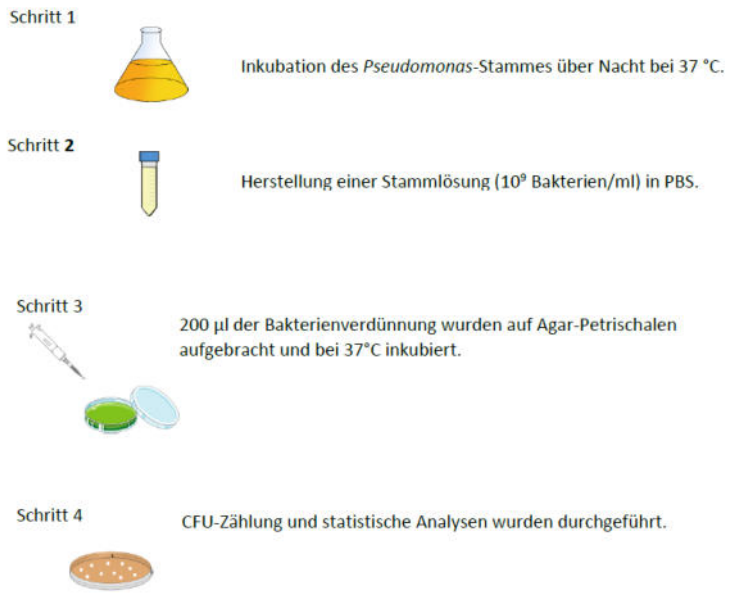


Abbildung 15: Darstellung des Versuchsablaufs zur grundsätzlichen bioziden Wirkung von plasmabehandelten TRIS-Puffer gegen *Pseudomonas*.

Um die bakterizide Wirkung PAL auf Pseudomonas abzuschätzen wurde eine Kultur über Nacht bei 37 °C inkubiert. Am darauffolgenden Tag wurden die Bakterien gezählt und in PBS resuspendiert, um eine Stammlösung mit einer Konzentration von 109 Bakterien/ml herzustellen. Im Versuchsplan war das getestete Bakterienpräparat, das für die PAL-basierte Desinfektion verwendet werden sollte, eine Bakterienmischung, die in Tris-HCL-Puffer (Kontrolle) und auch Tris-HCL (plasmabehandelt) resuspendiert wurde. Die Inkubationszeit der Bakterienmischung in Tris HCL (Kontrolle) oder Tris HCL (Plasma) betrug 30 Minuten. Anschließend wurden 200 µl jeder Lösung auf Petrischalen mit Nährmedium aufgebracht und über Nacht bei 37 °C inkubiert. Am folgenden Tag wurden die koloniebildenden Einheiten (KBE) gezählt. In Abbildung 15 ist der allgemeine Ablauf der Versuchsdurchführung dargestellt. Die Ergebnisse zeigen, dass die Überlebensrate der Pseudomonas-Bakterien nach der Inkubation in Tb-PAW signifikant reduziert ist, 100 % der Bakterien wurden im Vergleich zur Kontrolle abgetötet. Allerdings erwies sich im weiteren Verlauf der Arbeiten die Sprühzapplikation von PAL als nahezu wirkungslos. Dies wird auf die, im Vergleich zum "klassischen"Versuch zur bioziden Aktivität von PAL, sehr geringe Menge an PAL, die durch die Besprühung auf die jeweiligen Kulturen appliziert wurden, zurückgeführt.

sample	CFU	bacteria/ml
Kontrolle I	249	4,98E+05
Kontrolle II	256	5,12E+05
Kontrolle III	198	3,96E+05
Probe I	0	0,00E+05
Probe II	0	0,00E+05
Probe III	0	0,00E+05

Tabelle 5: Ergebnisse zur grundsätzlichen Wirkung von PAL gegen *Pseudomonas s.*

OGP-PT - Arbeitspaket C5 Im Arbeitspaket 5 wurden Versuche zur PAL- und Direkt-Plasma basierten Bekämpfung der grünen Pfirsischblattlaus (Myzus persicae) durchgeführt. Die Applikation von TRIS-gepuffertem PAL ergab keine signifikante Wirkung bzgl. der Bekämpfung des Schädlings, während eine Direkt-Plasma-Applikation erwartungsgemäß zur zuverlässigen Abtötung führte. Problematisch bei der Direktanwendung war das potentielle Schädigungspotential an der zu schützenden Pflanze, hierbei wurden die Pflanzen erheblich thermisch geschädigt. Weitere Versuche bei reduzierter Leistung ergaben, dass sich entweder keine Entladung ausbildete oder der betreffende Pflanzenteil im Submillimeter-Bereich angefahren werden musste, was sich unter Realbedingungen, aufgrund von Unebenheiten des biologischen Gewebes oder Bewegung des Pflanzenkörpers (z.B. Wind) als extrem fehlerbehaftet erwies.

2.4.4 Beitrag des Ergebnisses zu förderpolitischen EIP-Themen

Die Operationelle Gruppe „PRo-MAPPER - Plant Robot for Multidimensional Artificial Phenotyping for Plasma Enhanced Research“ adressiert im Projekt förderpolitische EIP-Themen im Zusammenhang mit einer alternativen Bewirtschaftungsmethode mit reduziertem Anteil an chemischem Pflanzenschutz für die moderne Landwirtschaft im Besonderen und einem landwirtschaftlichem Innovationsgeschehen im Allgemeinen. Entsprechend der Richtlinie wird das automatisierte System als Ansatz gewählt, eine Alternative zur herkömmlichen Bearbeitungs-, Bonitur- und Interventionsmethoden in der Landwirtschaft zu entwickeln. Unter Einbindung eines gartenbaulichen Betriebes wird hier der Weg der Innovation in die praktische Anwendung vorbereitet. Angesichts der bisherigen Erkenntnisse sind bereits vielversprechende Ansätze, insbesondere hinsichtlich der Sensordatenfusion, der Phänotypisierung, der Automatisierung und potentieller Interventionspfade erkennbar. Dennoch besteht noch weiterer Forschungs- und Entwicklungsbedarf um diesen hochinnovativen Ansatz in die Praxis zu überführen.
Mit Bezug zu den niedersächsischen Themenschwerpunkten kommen sowohl die Reduzierung bzw. die Vermeidung des Einsatzes von Pflanzenschutzmitteln, als auch eine erhebliche Produktivitätssteigerung in konventionell und ökologisch bewirtschafteten Anbausystemen zum Tragen, die als Initiatoren für das Projekt im Fokus standen. Insgesamt ist die Anwendung dieser interdisziplinären ressourcenschonenden Technologie angesichts der wirtschaftlich angespannten Situation von Interesse für konventionell und gleichfalls auch für ökologisch wirtschaftende Betriebe der Agrarwirtschaft.

2.4.5 Nebenergebnisse

Die Arbeiten zur Keimraten von unbehandeltem Saatgut (gezeigt an Zuckerrübe und Mangold) führten zu keinem statistisch verwertbaren Ergebnis, jedoch ist ein Trend sichtbar. Dieser Trend soll nach Ende des Projektes weiter im Rahmen von gemeinsamen Abschlussarbeiten (OGP-PT & OGP-HS) untersucht werden. Perspektivisch kann dabei verstärkt auf die Nutzung aktueller Bildverarbeitung gesetzt werden. Dies ermöglicht nicht nur die Erfassung der Keimrate, sondern ebenso die Vermessung der Wachstumsgeschwindigkeit der Wurzeln nach der Keimung. Die dafür nötigen Sensoraufbzw. Umbauten waren zur Laufzeit von PRo-MAPPER nicht zu realisieren.

2.4.6 Arbeiten, die zu keinem Ergebnis geführt haben

Die in B2 durchgeführten Arbeiten zur Untersuchung der spektralen Signaturänderung des finalen Blattapparates durch Plasmabehandlung des Saatgutes vor der Keimung hat zu keinem Ergebnis geführt, bzw. ließ keine sensorisch erkennbaren Unterschiede zu. Die mikrobizide Wirkung auf den Erreger *Pseudomonas b.* konnte durch die sensible Handhabung des Erregers im wissenschaftlichen (IfZ) bzw. wirtschaftlichen (Piccoplant) Umfeld und die komplexe Beschaffung nicht an den Pflanzen, sondern lediglich *in-vitro* mit *Pseudomonas s.* durchgeführt werden.

2.4.7 Mögliche weitere Verwendung von Investitionsgütern

Die angeschafften Datenspeicher werden weiterhin genutzt, um die Vorhaltung der Daten gemäß den Projektauflagen zu gewährleisten. Sollten aus den Daten weitere Publikationen entstehen, so wird auch weiterhin das Projekt PRo-MAPPER genannt und auf die Unterstützer des Vorhabens gemäß der Vorgaben hingewiesen.

2.5 Nutzen der Ergebnisse für die Praxis

Die Übertragung der Ergebnisse und Erkenntnisse in die Praxis ist das übergreifende Ziel von PRo-MAPPER. Im Projekt wurde ein zeitlich, räumlich und spektral hochauflösender Ansatz gewählt und demonstriert, dass die Identifikation von gestressten bzw. befallenen Pflanzen und damit die Unterscheidung von gesunden Pflanzen möglich ist. Die aus dem Projekt PRo-MAPPER erhaltenen Ergebnisse stellen eine vielversprechende Grundlage für weitere Anwendungen des Konzeptes zur frühzeitigen Erkennung von Schädlingsbefall und Pflanzenkrankheiten sowie frühzeitiger und automatisierter Intervention in der Agrarwirtschaft dar. Es wurden wichtige Erfahrungen über die Applikationsformen von PAL im Rahmen des Konzeptes, Anwendungen der Sensorik allgemein und die vielfältigen Applikationsmöglichkeiten gesammelt.
Des Weiteren wurden zahlreiche Erkenntnisse gewonnen, die sowohl in die Antragstellung als auch bei der Durchführung weiterer Projekte einfließen werden. Während der Projektlaufzeit gab es bereits Interesse aus der Praxis, wobei auch zu berücksichtigen ist, dass es während der Pandemie nur eingeschränkt möglich war, persönliche Multiplikation auf Messen und Tagungen zu realisieren. Es ist geplant, dass auch nach Projektabschluss entsprechende Öffentlichkeitsarbeit in Form von Artikeln, Vorlesungen, Vorträgen und Messebesuchen durchgeführt werden wird um das Konzept in die Praxis zu überführen.

2.6 Verwertung und Nutzen der Ergebnisse

Die Ergebnisse werden und wurden in unterschiedlichen Beiträgen und Vorträgen vorgestellt und publiziert.
Lehrveranstaltungen in die die Ergebnisse aus PRo-MAPPER eingeflossen sind/ einfließen werden:

- Uni Göttingen: "Digitale Technologien in der Pflanzenproduktion"(Modul M.Agr. 0147)
- Uni Göttingen: „Digital Techniques for Agricultural Plant Monitoring“ (Module M.Cp.0024)
- Uni Göttingen: "Digitale Pflanze - Pflanzenparameter messen"(Bachelor, geplant SS 2024)
- Uni Göttingen (Gastvortrag): "Grundlagen der Phytomedizin und Pflanzenernährung"(B.Agr.0010)
- HAWK Göttingen „Einführung in die Robotik“, M. Eng.
- HAWK Göttingen „Innovative, robotergestützte Technologien in der Waldbewirtschaftung“, M. Sc.

Abschlussarbeiten mit Relevanz für das Projekt:

- Bachelorarbeit von Herrn Yves Marquardt [HAWK, IfZ] „Segmentierung von Zuckerrüben mittels Deep Learning“
- Bachelorarbeit von Frau Ira-Mareen Abken [HAWK] „Implementierung einer Web-basierten Benutzeroberfläche für ROS-Roboter“
- Bachelorarbeit von Frau Sharmeen Ashraf [HAWK] „Evaluierung des Biomassezuwachses und der Keimfähigkeit von Argonplasma behandeltem Saatgut“

Sonstige Arbeiten mit Relevanz für das Projekt:

- Studienarbeit von Herrn Luca Menze [HAWK] „Integration der Multispektralkamera MicaSense Altum in das Robot Operating System“

2.7 Wirtschaftliche und wissenschaftliche Anschlussfähigkeit

Die Ergebnisse des Projektes stehen als Abschlussbericht auf der Internetseite der EIP-Vernetzungsstelle (EIP-Datenbank) der Öffentlichkeit zur Verfügung. Ergebnisse und weiterführende Informationen werden ebenfalls auf der Internetseite der HAWK eingestellt [5] und über die Projektlaufzeit hinaus gepflegt.
Die wirtschaftliche Anschlussfähigkeit im Hinblick auf die Nutzung der Ergebnisse und des Konzeptes Methoden der Robotik, einer multisensorielle Datenfusion für den automatisierten Einsatz im Agrarbereich zu einem neuartigen Gesamtsystem zu kombinieren, werden als positiv eingeschätzt.
Aufgrund der perspektivisch (Klimawandel) Häufigkeit von Schädlingsbefall und Pflanzenkrankheiten und der hohen Relevanz des wirtschaftlichen Schadens, besteht ein deutlich erkennbarer Bedarf an alternativen Behandlungsmethoden und -konzepten. Insbesondere vor dem Hintergrund des zunehmenden Bedarfs an Automatisierung im landwirtschaftlichen Sektor ist das entwickelte Konzept attraktiv und die Ergebnisse des Projektes hinsichtlich frühzeitiger Erkennung von Schädlingsbefall bzw. Krankheiten und Intervention vielversprechend. Die wissenschaftliche Anschlussfähigkeit an das Projekt Promapper ist in hohem Maße gegeben und teilweise bereits umgesetzt. Auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse werden weitere Untersuchungen angeschlossen, die den Einsatz des Konzeptes in weiteren Bereichen (z. B. Forstwirtschaft, Phytomedizin) vorantreiben. Es haben sich vielfältige weitere assoziierte Anschlussmöglichkeiten bzw. Forschungskooperationen eröffnet, die u.a. in den EIP-Projekten Roboforest, Robo-Tree-Sense (HAWK), BMEL Farmerspace, DFG PhenoRob (IfZ) verfolgt werden. Weitere Projekte befinden sich im Beantragungs- bzw. Begutachtungsprozess. Im Hinblick auf die hohe Variabilität der Anwendungsmöglichkeiten können sich hier vielfältige Fragestellungen anschließen.
Die im Rahmen von PRo-Mapper erzielten Ergebnisse werden u.a. in der Lehre, in Publikationen und Vorträgen genutzt (vgl. Unterabschnitt 2.6 und Unterabschnitt 2.8). Weiterhin wird die Weiterführung der Versuche im Rahmen neuer Projektanträge in Abhängigkeit neuer Förderlinien geprüft.

[5] `https://www.hawk.de/de/newsportal/pressemeldungen/hightech-und-plasma-statt-pflanzenschutzmittel`

2.8 Kommunikations- und Disseminationskonzept

Für die Verbreitung der Ergebnisse und Durchführung des Projektes wurden unterschiedliche Kommunikationswege genutzt, so wurden (und werden) das Projekt und dessen Ergebnisse beispielsweise im Rahmen von Zeitungsartikeln, Social-Media-Kanälen (z.B. HAWK-Newsfeed, HAWK-Radio[6], Youtube) öffentlichen Veranstaltungen und Vorführungen (Plasma-for-Life-Symposium, Besuch des PFEIL-Ausschusses[7], Future-Forest-Forum, EIP-Gartenfest 2023, SNIC-Info-Tage, Farmerspace-Feldtage) als auch in zahlreichen HAWK-Veranstaltungen (Nacht des Wissens, Industrial Lab Day, etc.) sowie in Fachjournalen und -Vorträgen vorgestellt.
Weiterhin wurden die Projektergebnisse über die Social-Media Kanäle des Projektes Farmerspace [8] im Speziellen Instagram und LinkedIn geteilt.

Beim OGP-HS wurden außerdem die Projektideen und -ergebnisse über die internen Fachausschüsse (bspw. AK Digitalisierung) und über den Institutsausschuss an die beteiligten Firmen des Trägervereins (Südzucker AG, Nordzucker AG, Pfeifer & Langen KG und Cosun Beet Company GmbH) geteilt.
Vorträge:

- **Paulus** et al.: Using spectral information in agriculture and plant science, Keynote Optica Conference, München, Deutschland, Juli 2023
- **Paulus** et al.: Digital Cameras in Plant Phenotyping, CiBreed Workshop, Göttingen,Deutschland, 11/12.10.2023
- **Okole** et al.: Hyperspectral Signatures and Betalain Indicator for Beet Mosaic Virus Infection in Sugar Beet, IEEE MetroAgriFor, November 2023, Pisa, Italien
- **Paulus**: Digital Plant Protection - IIRB Working Group Agriculture Technology, Oktober 2023, Berny-en-Santerre, Frankreich.

Publikationen (abgeschlossen, peer-reviewed):

- **Paulus** et al.: Using spectral sensing in plant science, Sugar Industry 2024 (in press)
- **Paulus** et al.: A pre-study for the integration of Edge AI in plant science, Beitrag zur DGPF Jahrestagung 2024, Remagen, Deutschland (in press)

In Planung/Bearbeitung/Begutachtung:

- **Paulus, Linkugel**, Ahmadi, Ruckelshausen, McCool, **Mahlein**: A generalized concept of autonomy levels for weeding robots (planned to be submitted to *Journal of Field Robotics*)

[6] https://hawk-radio.letscast.fm/episode/pflanzroboter-an-der-hawk-goettingen-besucht

[7] https://www.ml.niedersachsen.de/startseite/themen/eu_forderung_zur_entwicklung_im_landlichen_raum/pfeil_2014_2020/13-sitzung-des-begleitausschuss-pfeil-215552.html

[8] www.farmerspace.uni-goettingen

- Ispiza Yamati, **Noack**, Rana, **Linkugel**, **Paulus**, Mahlein : Set-up and automation of a multi-sensor platform on a UAV and UGV to evaluate CLS-affected fields (planned to be submitted to *Journal of Computer and Electronics in Agriculture*)

Der Abschlussbericht wird auf der EIP-Webseite eingestellt.

Veröffentlichungen im Rahmen des Projektes sind im Anhang beigefügt.

3 Anhänge

Using spectral information in agriculture and plant science

Stefan Paulus,[1,*] Nathan Okole, [1] and Anne-Katrin Mahlein[1]

[1] *Institut of Sugar Beet Reserach, Holtenser Landstr. 77, 37079 Göttingen, Germany*

[*] *paulus@ifz-goettingen.de*

Abstract: This study shows how spectral sensing of plants extends technical challenges of spectral measuring. A greenhouse experiment shows that plant diseases can be recognized even before a human expert is able to detect visible symptoms. © 2024 The Author(s)

1. Spectral sensing in plant science

Spectral sensing has shown its applicability in plant science and is widely used to describe the plant state [Mahlein, 2016]. The most important applications are hyperspectral trait description and the identification of biotic and abiotic stress effects [Paulus and Mahlein, 2020]. All these aspects are important for plant breeding to enable a fast and non-destructive detection of promising individuals regarding stress tolerance or yield. In contrast to other non-invasive measuring methods only spectral sensing is able to collect information of the plant tissue and connect this to a likely state change of the plant in future [Behmann et al., 2014].

The most important steps in spectral imaging for the demands of plant science are i) preprocessing using normalization and spectral smoothing to get proper data, ii) vegetation index calculation to compare with established routines, iii) prepare for machine learning and finally iv) interprete and compare with previous studies. Especially step three is crucial as variance within the spectrum can be explained by aspects (Fig. 1) like growing ages of plants and single leaves, spectral variance by genotypes or environmental influence, reactions due to stress (diseases, nutrient deficiency, water, soil etc.).

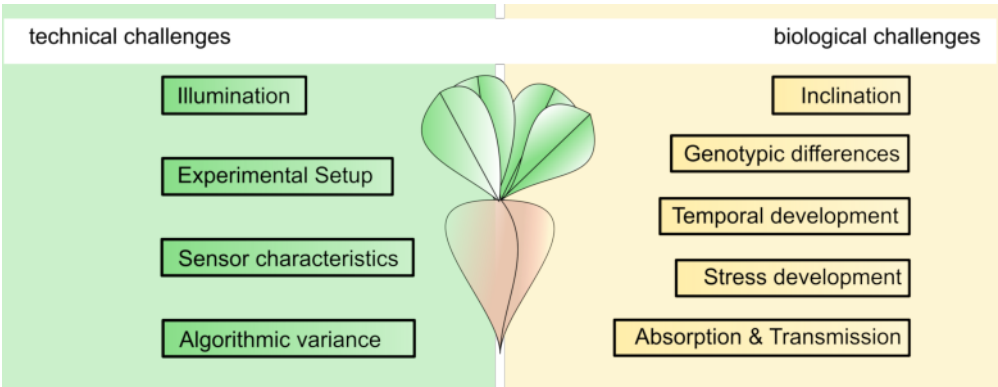


Fig. 1. Measuring plants with spectral sensors entails beside technical challenges also plant specific challenges like the influence of the leaf inclination, differences of the genotypes, temporal development by growth and stress and stress symptom development and absorption and transmission of the leaf chlorophyll.

2. Use-Case: Detection of *Cercospora beticola* in sugar beet

In a greenhouse trial three genotypes of sugar beet with two repetitions, four stages and two treatments have been measured at four different dates using a mobile spectral camera(Black Mobile, Haip Solutions GmbH, Hannover, Germany). The device covers the spectral area of 500-1000nm and provides a resolution of 640x480 pixels. 100 bands with 5 *nm* spectral distance were measured with each dataset. The field of view covers $22 * 16,5$ *cm* at a distance of 50 *cm*. The datasets were normalized using a global white reference and masked using adapted NDVI vegetation index (see Fig. 2, A) to differentiate between plant and background pixels. Two different analysis procedures have been implemented. As vegetation indices were established in plant science XX different literature

based vegetation indices (VI) were defined and their distribution was calculated. Based on this distribution a random forest machine learning method was applied. The second approach subdivides the plant image into subimages of a size of 30x30 pixels. These subimages were classified using a convolutional neural network (CNN). A logistic regression is used to define a classification result for the complete image.

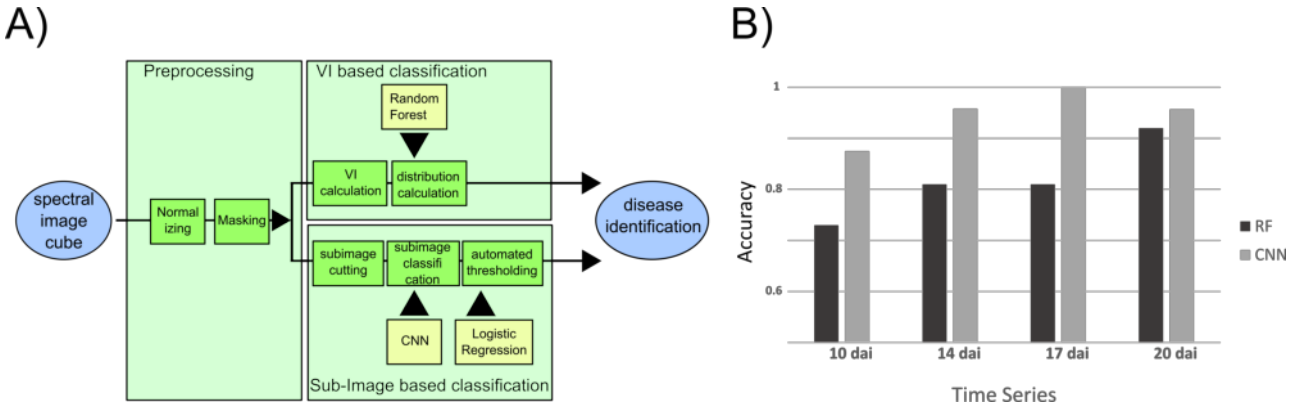


Fig. 2. Analysis workflow for the processing of hyperspectral plant data cubes. Two different analysis pipelines using vegetation indices and subimage classification are used (A). The subimage approach performed at four different dates after inoculation (dai - days after inoculation) using CNN outperforms the VI based approach to detect a plant infection before a human expert was able to see first symptoms (B) at date 14 dai. Nevertheless, both approaches show a high accuracy of about 80%.

Results (Fig. 2, B) show a results of more than 73% accuracy for both approaches for all dates starting at the first date of 10 days after inoculation (dpi). Nevertheless, visual symptoms occur at the second date (14dpi). Which means that both approaches enable a identification before visual symptoms can be seen by a human expert. In general the results show an superior classification accuracy for the subimage-CNN approach ($> 88\%$) in comparison to the more intuitive VI-distribution approach (73%).

Spectral sensing in plant science extends the catalogue of challenges that have to be mastered. Nevertheless, this study showed two different processing pipelines using VI and a subimage based approach to predict a possible plant disease infection. It could be shown that this is possible with a high accuracy and in addition temporal before a human expert was able to see symptoms.

2.1. Funding

This study was partially funded by the Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG, German Research Foundation) under Germany's Excellence Strategy—EXC 2070-390732324. This study was supported by federal funds and by the ELER Fond of the European Union for development of rural space in Lower Saxony and Bremen 2014-2020 (PFEIL) as part of the PRo-MAPPER project (EIP AGRI - 276032540210329).

References

[Behmann et al., 2014] Behmann, J., Steinrücken, J., and Plümer, L. (2014). Detection of early plant stress responses in hyperspectral images. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.*, 93:98–111.

[Mahlein, 2016] Mahlein, A.-K. (2016). Plant disease detection by imaging sensors - parallels and specific demands for precision agriculture and plant phenotyping. *Plant Dis.*, 100(2):241–251.

[Paulus and Mahlein, 2020] Paulus, S. and Mahlein, A.-K. (2020). Technical workflows for hyperspectral plant image assessment and processing on the greenhouse and laboratory scale. *Gigascience*, 9(8).

DOI: 10.36961/si30916 | Cite this: *Sugar Industry 149* (2024), 122–126

Using spectral sensing in plant science

Stefan Paulus, Lea Pichler, and Abel Barreto

Institute of Sugar Beet Research, Holtenser Landstraße 77, 37079 Göttingen, Germany; e-mail: paulus@ifz-goettingen.de

Abstract: Digital cameras are widely used tools for plant monitoring in plant science today. Used to track plant growth or even visible symptoms, they are important tools for breeding and plant protection field trials. Nevertheless, its extension to measure the near infrared (NIR) region (700–1000 nm) includes great potential as plants show a higher light reflectance within this spectrum. Various applications have shown its use for disease detection, quantification, virus content estimation, and stress monitoring. As the next step is a comprehensive integration into agricultural routines, this study will show two use-cases with a high technological readiness level. One use-case shows a hand-held multispectral sensor, which is used for manual measurements to detect and discriminate different virus types in sugar beet. In contrast, the second use-case shows a transfer to an UAV based disease quantification routine based on spectral imaging for Cercospora leaf spot. In addition, two prototypical workflows are shown for processing non-imaging and imaging spectral data in an agricultural setting. This study shows the state of the art in spectral sensing in the field for the two major sugar beet diseases – virus yellows and Cercospora leaf spot. Furthermore a future perspective for coming technological challenges regarding the integration of AI in sensors or robotic workflows is provided.

Keywords: agriculture, disease detection, plant monitoring, EdgeAI

1 Background

Nowadays, digital sensors are widely deployed in research to measure plants response to abiotic and biotic stress. Spectral measuring devices have been shown to be effective in detecting fungal or virus infection (Paulus and Mahlein 2020). Although these measurements are available combining moving platforms to increase the throughput is essential for practical applications (Pretto *et al.* 2021).

The use of spectral sensing in practical scenarios involves the following platform requirements: (a) handling under field conditions, (b) easy handling without deeper technical understanding, (c) affordability and (d) combination with market-available software to cover the whole process from data acquisition, stitching, combination, referencing and transfer to parameter extraction.

Nevertheless, the most critical part is the combination of state-of-the-art tools for knowledge extraction. By using established machine learning models, or in the case of two-dimensional images, deep convolutional neural networks, it is possible to add semantics to the data and to determine disease intensity. This includes expressing epidemiology terms of disease severity and incidence with high precision (Barreto *et al.* 2023).

The present study will focus on introducing two different use-cases, showing the workflow of spectral sensing in agricultural field experiments. The first approach will introduce a new market available, non-imaging sensor measuring sixteen different wavelengths, and its application in the field. The approach includes the detection of a typical virus disease in sugar beet. The results from a manually moved hand-held spectrometer and its combination with the latest machine learning depict state-of-the-art hand-held spectral sensing for identifying plant diseases. The presented results display the preliminary stage for later integration of the AI model into the spectrometer. For field use, a large amount of data to train the model is needed to enable a general applicability and offer further practical use-cases.

The second use-case shows the integration of market-available sensors into a quadrocopter UAV platform. With a more detailed view of the workflow, the single steps from path planning, estimation of the ground sampling distance, flight, data registration, and region of interest calculation to the use of deep learning routines to identify disease intensity in the field and, in addition, the quantification of disease severity and incidence is shown. The results underline the use of this technology for quantifying a variety susceptibile to *Cercopsora beticola* Sacc., a fungal disease in sugar beet. Furthermore, the quantification allows a further step the reduction of applied fungicides guided by disease and UAV-based application maps.

Both use-cases show typical handling scenarios for integrating spectral sensors into the digital workflow of today's plant production standards. All the scenarios shown aim at fast and highly automated data acquisition and analysis using standardized data pipelines.

The two introduced use-cases show the state-of-the-art workflow for applying spectral measurements in plant science. An overview of the future perspective of approaching tech-

Paper received: January 19, 2024
Paper reviewed: January 19, 2024

nical challenges is given to set the scene. Starting from data-oriented challenges like hurdles of data sharing and the integration of AI routines into sensing devices (EdgeAI) to the explainability of AI routines (XAI).

2 Use-Case 1 – handheld field measurements

With the discontinuation of neonicotinoids as seed treatment in the EU, virus yellows in sugar beet has become more prevalent. *Beet yellows* (*BYV*), *beet chlorosis* (*BChV*) and *beet mild yellows virus (BMYV*) are dominant in the field today. While detecting a virus infection has been shown (Hossain *et al.* 2022), differentiating different virus types is rather new. A handheld spectral sensor that integrates a leaf clip for manual measurements of leaf reflectance on the field that is able to differentiate virus type would bring huge benefit. The sensor is a prototype, and market availability is estimated during the next two years, targeting a price of less than €1000. It measures within the spectral area of 980 nm to 1620 nm using 16 bands.

The data was acquired during one of the field trials at the Institute of Sugar Beet Research near Göttingen (Germany). To estimate the spread of virus diseases in sugar beet, the spectrum of *BMYV*, *BChV* and *BYV* was compared with each other and a healthy control. These virus types widespread in Germany, adversely impacting beet quality and development, leading to significant yield losses (Hossain *et al.* 2021).

At the field trial, three blocks were separated, one for each virus, including a control. Between the plots, buffer zones were determined to avoid mixed measurements with two viruses due to virus spread via aphids. Moreover, the virus block was separated into 6 × 4 plots. In four repetitions, this fully randomized block design comprised five different inoculation time points, going from an early inoculation with more severe symptoms to a late inoculation with light to no visible symptoms of infection. Plants were inoculated with viruliferous wingless *Myzus persicae*.

Eighty leaves per treatment for each virus were sampled from the plots. The samples were measured using the spectrometer (combined with the leaf-clip) relayed to a laptop via Bluetooth. An energy source for the laptop is recommended for field measurements over a long period. A barium sulfate plate was used for calibration. The calibration was repeated every 10 minutes to avoid measurement errors and to ensure high data integrity.

The analysis involved three machine learning procedures (support vector machine [linear], support vector machine [radial] and random forest). They were chosen to estimate differences in the data and to predict the accuracy of the differentiation and classification of the viruses compared to the controls. The results showed that linear support vector machines performed better for most of the testing combinations than the other two methods. Thus, further analysis used this method, and a tuning step was added. The classifier was evaluated to find the highest accuracy for every cross-validated performance.

The results show a clear separation between the virus species and the control plants as well as between the virus species for the early and late inoculation time points. The measurements of the early inoculation depict a measurement of 90 days past inoculation (90 dpi), while late measurements describe a timepoint of 50 days past inoculation (50 dpi).

As shown in Figure 1, the accuracy of the linear classification varied between 0.71 and 0.92 for an early infection and between 0.72 and 0.96 for late inoculation.

3 Use-Case 2 – UAV based field measurements

Cercospora leaf spot (CLS) is a harmful fungal leaf disease in sugar beet caused by the pathogen *Cercopsora beticola* Sacc. CLS significantly reduces white sugar yield. Controlling the disease is difficult due to its rapid spore production and genetic diversity (Rangel *et al.* 2020). To combat the disease, an integrated pest management strategy is applied comprising crop rotation, utilizing resistant cultivars, and fungicide application (Wolf and Verreet 2002). Assessing the extent of the disease, particularly in terms of disease severity (DS), is vital in screening for plant resistance in breeding programs (Bock *et al.* 2020). The robustness of resistance screening is improved when temporal data is included in the assessment of disease development via the Area Under Disease Progress Curve (AUDPC) (Madden *et al.* 2007).

The present use-case is based on data collected during the monitoring campaign in 2021 in a field trial located near Göttingen (Germany, Barreto *et al.* 2022). A multispectral UAV system, a DJI Matrice 210 with a six-channel sensor variant, Micasense Altum, was used during the campaign. To get high resolution images, flight missions were planned to deliver a ground sample distance (GSD) of 3–4 mm. Raw images were calibrated from digital numbers to reflectance, according to Barreto *et al.* (2023). For photogrammetry, the software Agisoft Metashape Professional (Agisoft LLC, St.Petersburg, Russia) was used to stitch truncated multichannel images and export the output as an orthomosaic. The analysis of the orthomosaic took place by applying a pipeline based on machine learning methods. This pipeline integrates multispectral UAV channels and the digital surface model to automatically determine the circle- and area-based DS parameters.

The monitored field was arranged as a variety trial with five sugar beet varieties (A–E) and two fungicide strategies in a two-factorial block design with four blocks or repetitions (Fig. 2A). The two fungicide strategies were: control with fungicide and inoculated without fungicide as mentioned in Barreto et al 2022. Human-based DS assessment was carried out simultaneously with the UAV flights. The assessment was conducted at the leaf level. One hundred leaves were randomly sampled per treatment (25 leaves/plot) and inspected for CLS symptoms. The temporal analysis for the disease development was considered by calculating the AUDPCDS from the UAV as well as the human data. After harvesting, yield information determined white sugar yield (WSY). Finally, the loss in WSY was calculated by comparing it with the control.

DOI: 10.36961/si30916 | Cite this: *Sugar Industry 149* (2024), 122–126
Sugar Industry international

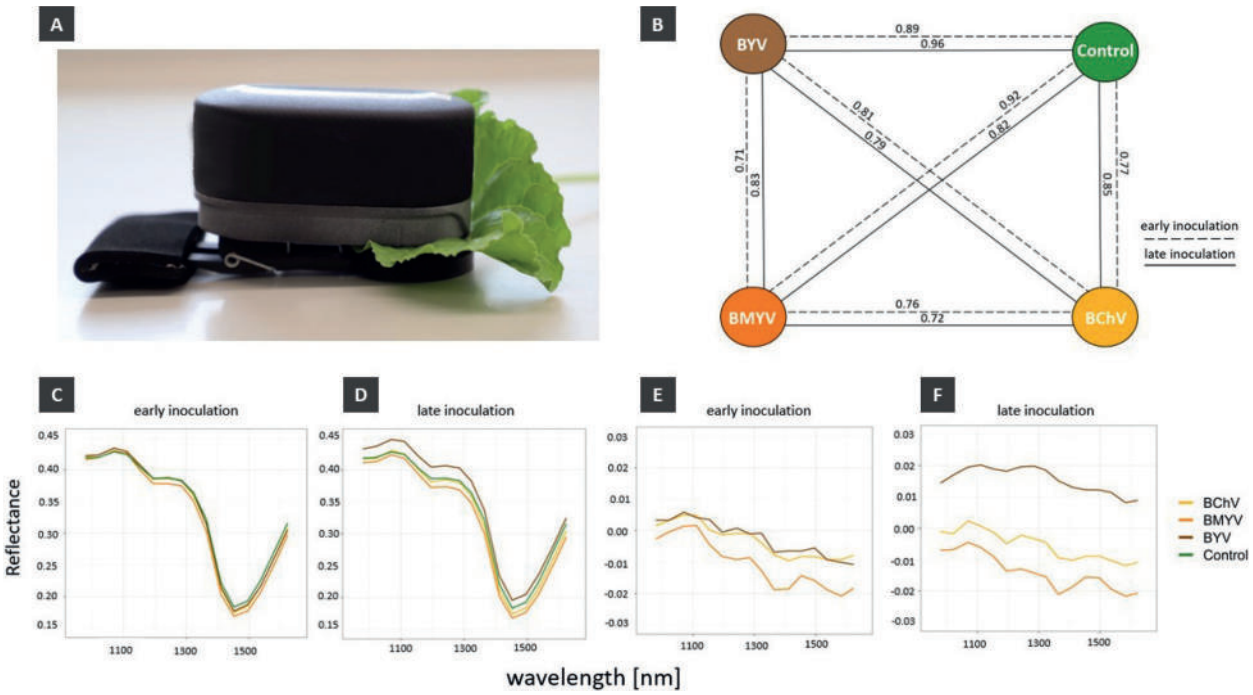


Fig. 1: RGB-picture of the 16 band spectrometer combined with the 3D-printed leaf-clip measuring a sample sugar beet leaf **(A)**, results of the accuracy of the linear classification for an early and late inoculation **(B)**, spectral signature with 16 bands at early inoculation, divided by the virus species and the control samples **(C)**, spectral signature with 16 bands at a late signature at a late inoculation, divided by the virus species and the control samples **(D)**, difference between the spectral signature of the virus species and the control samples at an early inoculation time **(E)**, difference between the spectral signature of the virus species and the control samples at a late inoculation time **(F)**

The results show a high degree of coefficient of determination (R^2 close to 1) for both UAV and human data (Fig. 2B). Varieties with high susceptibility are located as far as possible from the origin in an $AUDPC_{DS}$-$loss_{WSY}$ plane. Figure 2B shows the rank of susceptibility with the order A, C, D, B, and E from the most susceptible to the most resistant variety to CLS; the same rank is feasible to obtain from both, UAV- as well as human-based assessments. This rank of susceptibil-

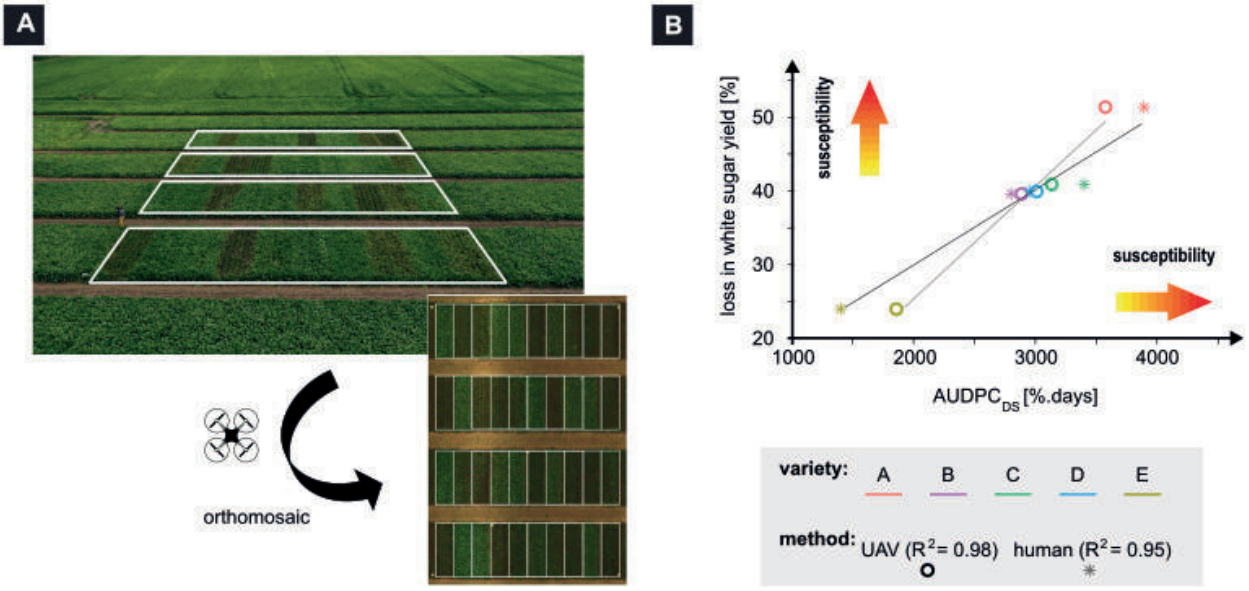


Fig. 2: Spectral Sensing can be divided into (handheld) smart measuring and mobile mapping. For smart sensing a virus detection use-case is introduced, while for mobile mapping an UAV-based disease rating has been shown. This results in the description of five future technical challenges. The use and evaluation of EdgeAI devices, the explainability of ML algorithms (XAI), the integration of monitoring routines into practical agriculture, data sharing and harmonization to accelerate knowledge spreading and establishing of communities of similar interest and finally the use of smart robots to automate various tasks in agriculture.

ity is corroborated by the German Federal Variety Office Bundessortenamt (Bundessortenamt 2022), highlighting the application of multispectral UAV imagery and the automatic scoring implemented for plant breeding programs.

4 Discussion

Digital tools are an essential part of agricultural field trials today. Their application is a key driver for the acceleration of usually manual procedures and work tasks in plant breeding, crop protection scenarios, and integration into disease forecast systems. Moreover, using non-imaging and imaging technologies is imperative to drive productivity and profitability, and elicit early on the predictability of operational decisions and outcomes in modern farming practices. Two use-cases have been introduced: 1) the use of a 16-band spectrometer for virus detection and 2) a multispectral approach to quantify a leaf disease from a UAV platform targeting the quantification of a varietal susceptibility to fungal plant disease.

The shown use-cases depict two possible use-cases that represent the state-of-the art application of spectral sensors in agriculture. Nevertheless, the influence of leaf age, symptom age, infection of multiple diseases for the point sensor or aspects of camera and leaf angle, illumination and weather conditions for the imaging camera depict an important role but were not considered here. Thus, the findings can just be interpreted prototypically and visualized in two broadly established workflows. Both use-cases are state-of-the-art, and the used hardware describes the current availability of the market.

Nevertheless, the shown use-cases can be understood as representatives of the two main areas of application – smart measuring in the field and mobile mapping (Fig. 3). Both applications of spectral sensing led to the definition of future challenges. The introduced spectrometer can combine spectral information directly with an integrated machine-learning model on the device. The so-called EdgeAI depicts a change in data collecting as the sensor output can directly be interpreted (Sing and Gill 2023). This requires interpretable machine learning routines that deliver an explainable result. This explainable AI (XAI) is a further challenge that will transform data analysis results from a black box to an understandable model that is easily adaptable to practical agriculture (Dwivedi *et al.* 2023). Once established, this will lead to a well-integrated use of monitoring routines. This improves the understanding of field processes and helps to follow the idea of precision agriculture – doing the right action at the right position at the right time in the field.

Nevertheless, precision agriculture combines multiple disciplines, from computer science, engineering, data analysis, geodesy, agronomy and biology to daily agriculture. To avoid data atrophy in private silos, the definition of standards for data sharing according to the principles of findability, accessibility, interoperability, and reuse (FAIR) is important (Martone 2015). This helps evaluate new data science methods, bundles the effort of finding a solution, and enables machine learning models to be trained on more realistic, heterogeneous training data to provide valid results (Paulus and Leiding 2023).

The recommended platforms for bringing sensors to the field are drones and robots. Once implemented and integrated, they bring a lot of flexibility to acquire field data in high resolution and with a huge area performance. Today, sowing and weeding can be performed by robots (Bawden *et al.* 2017), and monitoring is highly automated on drones. The future will show more and more use-cases where robots help automate agricultural work tasks in the field.

5 Conclusion

This study introduces two scientific use-cases for plant disease detection based on spectral sensing in the field. We showed that disease detection is possible using low-cost handheld multispectral devices as well as UAV-based imaging cameras. The data processing using AI methods provided high accuracies with a high degree of transferability to further experiments. In addition, future challenges have been described, such as edgeAI, XAI, robots, data sharing, the definition of standards, and the transfer of these routines to daily agriculture.

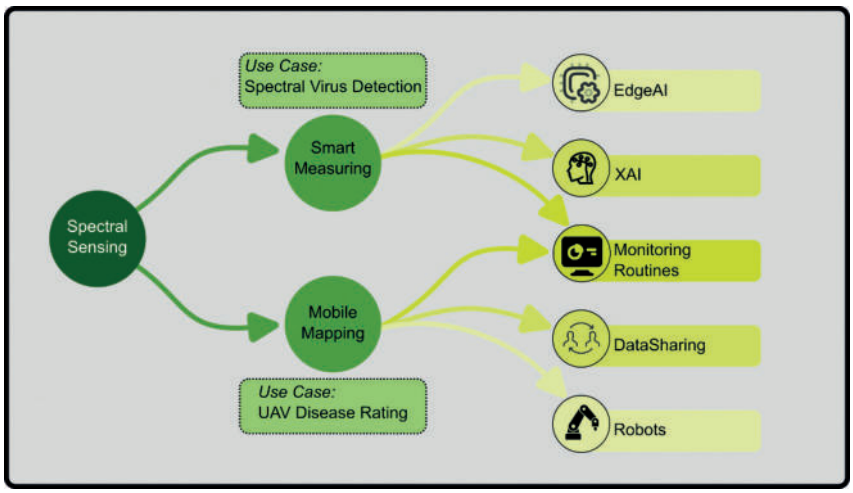


Fig. 3: Aerial image of variety field trial (near Göttingen) at the end of August 2021 and respective RGB composite orthomosaic **(A)**, relationship of Area Under Disease Progress Curve (AUDPC) of parameter disease severity (DS) and relative loss in white sugar yield (WSY) for drone-based (UAV) and expert-based assessment (human); average of five varieties (A, B, C, D and E).

DOI: 10.36961/si30916 | Cite this: *Sugar Industry 149* (2024), 122–126
Sugar Industry international

Funding

This work has been funded by the Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG, German Research Foundation) under Germany's Excellence Strategy – EXC 2070 – 390732324.
In addition, this study was supported by federal funds and by the ELER Fond of the European Union for development of rural space in Lower Saxony and Bremen 2014–2020 (PFEIL) as part of the PRo-MAPPER project (EIP AGRI – 276032540210329).
This research was supported by funds of the Federal Ministry of Food and Agriculture (BMEL) based on a decision of the Parliament of the Federal Republic of Germany. The Federal Office for Agriculture and Food (BLE) provides coordinating support for artificial intelligence (AI) in agriculture as funding organisation, grant number FKZ 28DE104A18.

Acknowledgements

The authors thank Simon Borgolte for proofreading and access to his research experiment.

References

Barreto A., Ispizua Yamati F. R., Varrelmann M., Paulus S., Mahlein A.-K. (2023): Disease Incidence and Severity of Cercospora Leaf Spot in Sugar Beet Assessed by Multispectral Unmanned Aerial Images and Machine Learning, *Plant Disease 107 (1)*, 188–200; DOI: 10.1094/PDIS-12-21-2734-RE

Barreto A., Reifenrath L., Vogg R., Sinz F. (2022): Using UAV-imagery for leaf segmentation in diseased plants via mask-based data augmentation and extension of leaf-based phenotyping parameters, *preprint*; DOI: 10.1101/2022.12.19.520984

Bawden O., Kulk J., Russell R., McCool C., English A., Dayoub F., Lehnert C., Perez T. (2017): Robot for weed species plant-specific management, *Journal of Field Robotics 34 (6)*, 1179–1199; DOI: 10.1002/rob.21727

Bock C., Barbedo J., Del Ponte E., Bohnenkamp D., Mahlein A.-K. (2020): From visual estimates to fully automated sensor-based measurements of plant disease severity: status and challenges for improving accuracy, *Phytopathology Research 2*, 1–30; DOI: 10.1186/s42483-020-00049-8

Bundessortenamt (2022). Beschreibende Sortenliste Getreide, Mais, Öl- und Faserpflanzen, Leguminosen, Rüben und Zwischenfrüchte

Dwivedi R., Dave D., Naik H., Singhal S., Omer R., Patel P., Qian B., Wen, Z., Shah T., Morgan G., Ranjan R. (2023): Explainable AI (XAI): Core Ideas, Techniques, and Solutions, *ACM Computing Surveys 55 (9)*, pp. 1–33); DOI: 10.1145/3561048

Hossain R., Ispizua Yamati F.R., Barreto A., Savian F., Varrelmann M., Mahlein A.-K., Paulus S. (2022): Elucidation of turnip yellows virus (TuYV) spectral reflectance pattern in *Nicotiana benthamiana* by non-imaging sensor technology, *Journal of Plant Diseases and Protection 130 (1)*, 35–43; DOI: 10.1007/s41348-022-00682-9

Hossain R., Menzel W., Lachmann C., Varrelmann M. (2020): New insights into virus yellows distribution in Europe and effects of beet yellows virus, beet mild yellowing virus, and beet chlorosis virus on sugar beet yield following field inoculation, *Plant Pathology 70 (3)*, 584–593; DOI: 10.1111/ppa.13306

Martone M. E. (2015): FORCE11: Building the Future for Research Communications and e-Scholarship, *BioScience 65 (7)*, 635–635; DOI: 10.1093/biosci/biv095

Paulus S., Leiding B. (2023): Can Distributed Ledgers Help to Overcome the Need of Labeled Data for Agricultural Machine Learning Tasks?, *Plant Phenomics 5*; DOI: 10.34133/plantphenomics.0070

Paulus S., Mahlein A.-K. (2020): Technical workflows for hyperspectral plant image assessment and processing on the greenhouse and laboratory scale, *GigaScience 9 (8)*; DOI: 10.1093/gigascience/giaa090

Pretto A., Aravecchia S., Burgard W., Chebrolu N., Dornhege C., Falck T., Fleckenstein F., Fontenla A., Imperoli M., Khanna R., Liebisch F., Lottes P., Milioto A., Nardi D., Nardi S., Pfeifer J., Popovic M., Potena C., Pradalier C., ... Nieto J. (2021): Building an Aerial–Ground Robotics System for Precision Farming: An Adaptable Solution, *IEEE Robotics & Automation Magazine 28 (3)*, 29–49; DOI: 10.1109/MRA.2020.3012492

Rangel L., Spanner R., Ebert M., Pethybridge S., Stukenbrock E., de Jonge R., Secor G., Bolton M. (2020): *Cercospora beticola*: The intoxicating lifestyle of the leaf spot pathogen of sugar beet, *Molecular Plant Pathology 21*, 1020–1041; DOI: 10.1111/mpp.12962

Singh R., Gill S.S. (2023): Edge AI: A survey, I*n Internet of Things and Cyber-Physical Systems 3*, 71–92; DOI: 10.1016/j.iotcps.2023.02.004

Wolf P., Verreet J. (2002): An integrated pest management system in Germany for the control of fungal leaf diseases in sugar beet: The IPM sugar beet model, *Plant Disease 86*, 336–344; DOI: 10.1094/PDIS.2002.86.4.336

A generalized concept of autonomy levels for weeding robots

Stefan Paulus *
Institute of Sugar Beet Research
Holtenser Landstr. 77, 37079 Göttingen
paulus@ifz-goettingen.de

Thomas Linkugel *
Hochschule für angewandte Wissenschaft und Kunst
Von-Ossietzky-Str. 99, 37085 Göttingen
thomas.linkugel@hawk.de

Alireza Ahmadi
University of Bonn
Nussallee 5, 53115 Bonn
alireza.ahmadi@uni-bonn.de

Arno Ruckelshausen
University of Applied Science
Nelson-Mandela-Str. 1, 49076 Osnabrück
a.ruckelshausen@hs-osnabrueck.de

Chris McCool
University of Bonn
Nussallee 5, 53115 Bonn
cmccool@uni-bonn.de

Anne-Katrin Mahlein
Institute of Sugar Beet Research
Holtenser Landstr. 77, 37079 Göttingen
mahlein@ifz-goettingen.de

Abstract

Agriculture is concerned by a huge change process where robots play an important part. Especially weeding robots help to automate the weeding part on the field and just entered the market. Their method of operation using a GNSS-based or a vision-based approach is explained and evaluated. These robots differ in their ability to navigate and to recognise crops and weeds on the field. A technological rating is performed together with a description of advantages and critical aspects. Therefore a measure for the robots navigation autonomy, the recognition level and their ability for targeted effect is introduced. The concept is applied for three market ready robots (Farmdroid FT 20, Farming Revolution Farming GT and Ecorobotix Ara) and three different research platforms (BoniRob, Agbot II and Bonn-Bot). Finally challenges for the use of robots in the field are discussed as well as their ability to support existing agriculture workflows and interaction models between remote sensing and field robots. This study introduces a generalized level scheme that enables a comparison of various weeding robots independent of their development stage by categorizing navigation autonomy, recognition ability and weeding application effect focus.

Keywords— weeding robots, scheme, autonomy, recognition, application, intelligence, concept

*equally contributed