

Abschlussbericht

POTATOSCAN

GEOREFERENZIERTE GRÖSSENERKENNUNG VON HACKFRÜCHTEN AUF
LANDMASCHINEN

Registriernummer: 254 021 0329

OG-Robotik OG-Landwirt OG-Koiotech

Jan-Luca Regenhardt (wiss. Bearbeitung)
Niklas Noack (wiss. Bearbeitung)
Jonas Otto (wiss. Bearbeitung)
Mattis Kaiser (stud. Unterstützung)
Philipp Schmidt (stud. Unterstützung)
Massoud Koshan (unternehm. Bearbeitung)
Gerald Spahiu (unternehm. Bearbeitung)
Dr. Georg Avramidis (Projektkoordination)
Anthony Ioan (unternehm. Leitung)
Claus Tobaben (unternehm. Leitung)
Prof. Dr. Thomas Linkugel (Projektleitung / wiss. Leitung)

Bewilligungszeitraum: 13. März 2022 bis 30. April 2024

Projektzeitraum: 01. April 2022 bis 31. März 2025



Inhaltsverzeichnis

1 Kurzdarstellung	3
1.1 Ausgangssituation und Bedarf	3
1.2 Projektziel und konkrete Aufgabenstellung	4
1.3 Mitglieder der OG	5
1.4 Projektgebiet	7
1.5 Projektlaufzeit und Dauer	7
1.6 Budget	8
1.7 Ablauf des Verfahrens	8
1.8 Zusammenfassung der Ergebnisse	13
2 Eingehende Darstellung	15
2.1 Verwendung der Zuwendung	15
2.1.1 Gegenüberstellung der Planung im Geschäftsplan und der tatsächlich und abgeschlossenen Teilschritte und die Aufgaben im Rahmen der laufenden Zusammenarbeit der OG	15
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	20
2.3.1 Wie wurde die Zusammenarbeit im Einzelnen gestaltet?	20
2.3.2 Was war der besondere Mehrwert bei der Durchführung des Projekts als OG?	20
2.3.3 Ist eine weitere Zusammenarbeit der Mitglieder der OG nach Abschluss des geförderten Projekts vorgesehen?	21
2.4 Ergebnisse KoioTech	21
2.4.1 Position des Gestells auf dem Roder	21
2.4.2 Konzeptionierung der Potato-Scanner Hardware	21
2.4.3 Implementierung GNSS-Positionsbestimmung	22
2.4.4 Fusionierung der Multi-Sensorik	24
2.4.5 Auswertung der Ergebnisse Ernte 2024	26
2.5 Ergebnisse OGP-ROB	33
2.5.1 Konzeptionierung und prototypischer Aufbau der berührungslosen Bewegungserfassung des Förderbandes	33
2.5.2 Konzeptionierung und Implementierung der berührungslosen Bewegungserfassung des Förderbandes	34
2.5.3 Analyse und Bewertung der berührungslosen Bewegungserfassung des Förderbandes	41
2.5.4 Konzeptionierung und Aufbau eines hoch performanten Embedded Systems in Bezug auf Hardwareanforderungen und praktischen Einsatz und reale Erntebedingungen	43
2.6 Weitere Ergebnisse	45
2.6.1 Beitrag des Ergebnisses zu förderpolitischen EIP-Themen	45
2.6.2 Nebenergebnisse	46

2.6.3	Arbeiten, die zu keinem Ergebnis geführt haben	46
2.6.4	Mögliche weitere Verwendung von Investitionsgütern	47
2.7	Nutzen der Ergebnisse für die Praxis	48
2.8	Verwertung und Nutzen der Ergebnisse	49
2.9	Wirtschaftliche und wissenschaftliche Anschlussfähigkeit	50
2.10	Kommunikations- und Disseminationskonzept	51
3	Anhänge	52

1 Kurzdarstellung

1.1 Ausgangssituation und Bedarf

Die wachsende Weltbevölkerung zwingt die Urproduzenten ihre Erträge, bei gleichbleibender Flächennutzung, zu steigern und gleichzeitig erschweren die durch den Klimawandel verursachten Extrem-Wetterbedingungen die landwirtschaftliche Nutzung. Unter diesen Aspekten gewinnen *Precision Farming* und *Smart Farming* in der Landwirtschaft eine herausragende Rolle, da mit ihren Innovationen und neu gewonnenen Daten den Herausforderungen der Zukunft begegnet werden kann.

In der Kartoffelwirtschaft bestehen maßgeblich zwei große Probleme, die sich wie folgt darstellen: Erstens fehlt es an Kenntnis über die Größenverteilung von gelagerten Kartoffelbeständen. So ist es bisher kaum möglich, Kartoffeln maschinell zu sortieren und danach einzulagern, da sie durch die notwendige Vereinzelung oder durch die verwendeten Rüttelsiebe Druckstellen und kleinere Beschädigungen davontragen. Diese führen während der Lagerung zu Fäulnis. Für die saisonale Kartoffelwirtschaft, die auf die Einlagerung angewiesen ist, stellt das ein großes Problem dar. Außerdem kann bei einer Sortierung per Sieb nur das kleinste Quadrat, durch das die Kartoffel hindurch passt (Quadratmaß), bestimmt werden. Andere geometrische Eigenschaften (z. B. Länge) lassen sich mit dieser Methode nicht bestimmen. Daher werden in der Praxis Stichproben entnommen und von Hand vermessen, um die Größenverteilung einer Kartoffelpartie abzuschätzen, was jedoch zeitaufwendig und ungenau ist. Dabei leitet sich der Wert von Kartoffeln entscheidend von ihrer Größe und Form ab. Das hat je nach Verwendungszweck verschiedene Gründe. So werden Speisekartoffeln in unterschiedliche Handelsklassen unterteilt, die durch das Quadratmaß definiert werden. Kartoffeln für die Zucht müssen eine Mindestgröße haben, damit aus der Knolle schnell eine kräftige Pflanze entsteht. Sie dürfen allerdings auch nicht zu groß sein, damit möglichst viele auf kleinem Raum eingepflanzt werden können. Ein bedeutender Anteil der in Deutschland angebauten Kartoffeln ist zur Veredlung bestimmt. Hier gilt fast immer: Je größer, desto wertvoller. Denn aus großen Kartoffeln lassen sich höherwertige Endprodukte herstellen. Zu kleine Kartoffeln, etwa mit einem Quadratmaß unter 40 mm, kommen für die Weiterverarbeitung zum Teil nicht mehr in Frage.

Das zweite große Problem entsteht durch die Verdeckung der Frucht bei Fernerkundung: *Precision Farming* mittels Satellitenbildern funktioniert nicht bei Hackfrüchten, die unter der Erde liegen. So werden z. B. Satelliten dazu verwendet, großflächig Nutzflächen zu analysieren um darauf aufbauend Entscheidungen für einen optimalen Ertrag zu treffen. Bei Kartoffeln jedoch gibt es keine Evidenz zwischen der Korrelation von Pflanze und Knolle. Somit kann das Potential von *Precision Farming* in diesem Bereich nicht voll ausgeschöpft werden. Die georeferenzierte Größenbestimmung auf dem Kartoffelroder löst beide Probleme gleichzeitig. Dazu muss ein Echtzeit-Vermessungssystem auf einer Erntemaschine installiert werden, dass die Größeninformationen mittels GNSS mit dem Standort verknüpft. Die Herausforderungen bei diesem Verfahren liegen jedoch in der anspruchsvollen optischen Vermessung der auf dem Fließband befindlichen Kartoffeln.

Bisher bleiben die Versuche, die Größen der Kartoffeln noch während der Ernte zu bestimmen, ohne Erfolg. Häufig wird auf ein 3D-Kamerasystem zurückgegriffen, dies ist etwa der Ansatz des Projekts HarvestEye des Unternehmens B-hive in Großbritannien (<https://www.harvesteye.com/>). Problematisch sind hier die hohen Fließbandgeschwindigkeiten, die eine hohe Aufnahmefrequenz erfordern. Zusätzlich muss die Kamera hochauflösende Aufnahmen machen, um die erforderliche Genauigkeit zu erreichen. Beides führt zu großen Datenmengen und damit zu Problemen in der Auswertung. Zudem ist es eine Herausforderung, die Bilderkennungssoftware auf die Unterscheidung zwischen den Kartoffeln und den Fremdkörpern wie Kluten, Steinen und Dreck auszurichten, noch dazu bei allen möglichen Wetterlagen und Bodenverhältnissen. Die Verwendung eines LiDAR-Sensors stellt eine Lösung für diese komplexen Probleme dar. Die Aufnahmefrequenz und -auflösung sind für eine genaue Größenbestimmung geeignet. So kann der LiDAR-Sensor bei Förderbandgeschwindigkeiten von bis zu 120 m min^{-1} operieren. Da nur Punktwolken und keine Bilder generiert werden, sind die Datenmengen kleiner. Im Gegensatz zu Kamerasystemen lassen sich zudem Fremdkörper leichter von Kartoffeln unterscheiden, da der LiDAR-Sensor nicht nur die Höhe ausgibt, sondern zusätzlich noch ein Intensitätsprofil erstellt. So unterscheidet sich die Intensität von Kartoffeln zu der von Steinen, Asten oder Kluten. Der wirtschaftliche Nutzen der frühzeitigen Größenbestimmung wäre groß. Vor allem würden die Erzeuger davon profitieren, da sie ihre Ernte besser und zielgerichteter vermarkten können. Zudem würde die frühzeitige Informationsbereitstellung die Effizienz der Kartoffelwirtschaft auf mehreren Ebenen steigern, wovon Züchter, Händler und Verarbeiter profitieren. Aus Gesprächen mit dem Pflanzkartoffelzüchter EUROPLANT und dem Experten für Technik in der Kartoffelwirtschaft Dr. Rolf Peters steigert eine genaue Ermittlung der Größenverteilung den Wert einer Kartoffelpartie um ungefähr 5 Prozent.

Mit dem in diesem Projekt entwickelten innovativem Vermessungssystem werden die Landwirte zudem Anbaumaßnahmen überarbeiten und optimieren. So können etwa Stellen im Feld identifiziert werden, wo die Ernte nicht zufriedenstellend war. Bisherige Verfahren ermöglichen nur eine Ertrags erfassung der bewirtschafteten Fläche. Mit dem in diesem Projekt entwickelten Verfahren ist eine zentimetergenaue Kartierung der wirtschaftlichen Parameter der Hackfrucht auf der Fläche möglich. Damit ist die Technik wegweisend für das *Precision Farming*. Die Größenerkennung der Kartoffeln auf Landmaschinen ermöglicht neue Verfahren zur Generierung von Daten, welche dem Ziel gerecht werden, eine ressourcenschonende Bewirtschaftung, umweltfreundliche Düngung sowie frühzeitige und effiziente Vermarktung der Ernte zu ermöglichen.

1.2 Projektziel und konkrete Aufgabenstellung

Die Ausgangslage des Projekts stellte das von Koiotech entwickelte Vermessungssystem EulerX dar. Die proprietäre Lösung, die Vermessung von ungeordneten Objekten, insbesondere Hackfrüchte, auf einem sich schnell bewegenden Förderband mittels Künstlicher Intelligenz (KI) und einem performanten LiDAR-Sensor, wurde von dem Unternehmen Koiotech anfänglich für den Einsatz in Produktionshallen entwickelt, wo die Einsatzbedingungen kontrolliert werden können. Im Rahmen des Projekts war die

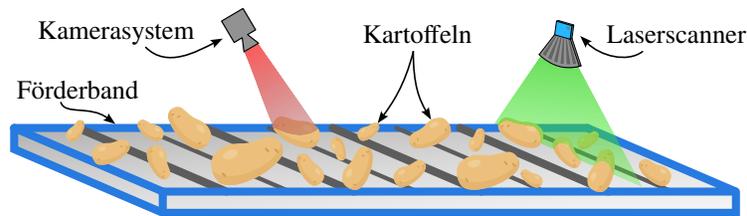


Abbildung 1: Prinzipieller Aufbau Förderanlage

Aufgabenstellung, eine robuste Hardware für den Außeneinsatz zu konzipieren, die wetterbeständig ist, ihre Spannungsversorgung direkt vom Traktor bezieht und sowohl staub- als auch vibrationsfest ausgelegt ist. Dazu soll eine nicht-invasive Methode zur Geschwindigkeitsbestimmung des Förderbands entwickelt werden, bei der eine RGB-Kamera zum Einsatz kommt und sowohl analytische Verfahren wie Mustererkennung und Objektverfolgung als auch KI-gestützte Ansätze kombiniert werden. Schließlich erfolgt die GPS-Positionsbestimmung des Erntefahrzeugs und die Verknüpfung dieser Positionsdaten mit der kartografischen Größenbestimmung der Kartoffeln, sodass eine exakte, positionsgenaue Zustandserfassung während der Ernte möglich wird.

Ziel des Projekts war es, durch den Einsatz neuartiger Methoden aus den Bereichen Sensorik, Algorithmik und Künstliche Intelligenz (KI) den Einsatz des Vermessungssystems auf einem Kartoffelroder während der Ernte zu ermöglichen und eine positionsgenaue Zustandserfassung von Kartoffeln zu realisieren.

1.3 Mitglieder der OG

Insgesamt engagierten sich drei Kooperations-Partner (OGP) in der operationellen Gruppe (OG). Dabei übernahm die HAWK durch die Abteilung für Robotik (**OGP-Robotik**) auch die Rolle des Koordinators. Das Unternehmen Koiotech (**OGP-Koiotech**) war neben dem Kartoffelgut Tobaben (**OGP-Landwirt**) ebenfalls in der OG vertreten.

OGP-Robotik: 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 AUTONOMOUS MOBILE ROBOTICS LAB (AMRL) stehen, neben einer auf den aktuellen Stand der Technik ausgelegten Infrastruktur, auch Büros und Werkstätten zur Umsetzung des beantragten Projektes zur Verfügung.

OGP-Koiotech: Das beim Start-Up KOIOTECH UG vorhandene Wissen in den Bereichen Neuronale Netzwerke, Machine Learning und Data Analysis wird in das Projekt einfließen, sodass die Integration optimal umgesetzt werden kann. Außerdem besitzt die OG-KOIOTECH Expertise im Ingenieurwesen, sodass sie die Konzeption und den Bau einer Vorrichtung für den Scanner auf den Rodern bearbeiten kann.

OGP-Landwirt: Der Familienbetrieb TOBABEN bewirtschaftet rund 70 Hektar Kartoffelanbaufläche mit dem Schwerpunkt auf Speisekartoffeln. Der Betrieb verfügt sowohl über ein eigenes Lager als auch über einen eigenen Roder. Claus und Beate Tobaben bringen langjährige Erfahrung sowohl im Anbau als auch in der Vermarktung von Kartoffeln mit. Durch diese Expertise sowie die vorhandenen Gerätschaften ist die OGP-LANDWIRT in der Lage, die Realisierbarkeit und den Nutzen der LIDAR-Technologie auf Erntemaschinen zu evaluieren.

Mitglied	Mitarbeiter und Funktion	Aufgabe
OGP-ROB (Robotik)	Prof. Thomas Linkugel Projektleitung	Projektleitung
	Dr. Georg Avramidis Projektkoordination	Projektkoordination
	Jan-Luca Regenhardt Wiss. Mitarbeiter	Federführend verantwortlich für die Entwicklung und Konstruktion eines eingebetteten Systems, dem Versuchsaufbau, die Entwicklung und Konstruktion einer Multisensorsystems, die Gestaltung des Prozessablaufs, die Entwicklung des Algorithmus zur Bestimmung der geforderten Kenngrößen sowie den Entwurf von weiterführenden Projektstrategien.
	Jonas Otto Wiss. Mitarbeiter	
Niklas Noack Wiss. Mitarbeiter	Unterstützung (u. a.) bei der Integration der Sensoren auf dem eingebetteten System, bei systemadministrativer Tätigkeiten unix-er Betriebssysteme sowie zum Metabetriebssystem ROS.	
Mattis Kaiser stud. Hilfskraft	Unterstützung (u. a.) bei der Recherche von Förderanlagen sowie dem Versuchsaufbau sowie der Recherche und Konzeptionierung einer naiven Bewegungserfassung	
OGP-KT (Koiotech)	Anthony Ioan Unternehm. Leitung	Konzeption und Implementierung des Versuchs, Durchführung der Versuche auf dem Feld, Implementierung der Sensorik, Auswertung, Öffentlichkeitsarbeit.

Fortsetzung auf nachfolgender Seite

Fortsetzung - Mitarbeiter und Funktion

Mitglied	Mitarbeiter und Funktion	Aufgabe
	Massoud Koshan unternehm. Bearbeitung	Konzeptionierung der Vorrichtung für den Scanner auf der Landmaschine; Durchgehender Austausch mit OGP-ROB und OGP-LW, Recherchen, Implementierung der Sensorik, Planung und Konzeptionierung Öffentlichkeitsarbeit
	Gerald Spahiu unternehm. Bearbeitung	Übernahme aller organisatorischen Aufgaben für OGP-KT, Unterstützung beim Versuchsaufbau
	Philipp Schmidt stud. Hilfskraft	Entwicklung des Gestells, Erstellung CAD Konstruktionspläne, Prototypenstellung, Montage des vorläufigen Gestells, Initialisierung der GPS-Module, Montage der finalen Konstruktion, Betreuung des Versuchs
OGP-LW (Landwirt)	Claus Tobaben unternehm. Bearbeitung	Vorbereitung der Versuchsdurchführungen. 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 landwirtschaftliche Betrieb befinden sich in Niedersachsen. Die HAWK sowie das Unternehmen KOIOTECH sind in Göttingen ansässig, der landwirtschaftliche Betrieb TOBABEN in Apensen. Im ersten Jahr der Projektdurchführung liegt der Schwerpunkt der Entwicklung in Göttingen bei den OG-Partnern OGP-ROB und OGP-KT. In den fortschreitenden Monaten wird der OGP-LW aktiv in das Projektgeschehen eingebunden wodurch das Wirken der OG nach Apensen ausgeweitet wurde.

1.5 Projektlaufzeit und Dauer

Das Projekt wurde zum 13. März 2022 bis zum 30. April 2024 bewilligt. Der Projektbeginn verschob sich aus verwaltungstechnischen Gründen (Personaleinstellung) auf den 1. April 2022. Verzögerungen im Projektablauf aufgrund von Einschränkungen (Einzelbelegung von Laboren und Vorbereitungsräumen, zeitliche Arbeit im Schichtsystem,

Krankheitsausfall, Lieferverzögerungen) führten (u.a.) dazu, dass die Wachstumsperioden des jahreszeitlichen Zyklus nicht wie geplant zu Versuchsdurchführungen genutzt werden konnten. Deshalb wurde eine kostenneutrale Verlängerung des Bewilligungszeitraums bis zum 31. März 2025 beantragt und am 23. Juli 2024 bewilligt (Änderungsbescheid Nr. 3).

1.6 Budget

Die Zahlen gelten vorbehaltlich der ausstehenden Auszahlungen des 6. Mittelabrufs und der Schlusszahlung (siehe Anhang 1). Eine Anpassung der finanziellen Darstellung erfolgt unaufgefordert nach Schlusszahlung. Insgesamt wurden 359.037,04 € als Gesamtausgaben (netto) bewilligt. Für das OG-Mitglied Robotik (**OGP-ROB**) wurden insgesamt 146.236,40 € bewilligt, wobei 119,236,40 € auf Personalkosten, 25.000,00 € für den Kauf von Instrumenten und Ausrüstungsgegenständen und 2000,00 € auf Reisekosten entfallen.

Für das OG-Mitglied Koitech (**OGP-KT**) wurden insgesamt 162.670,37 € bewilligt, wobei 142.445,52 € auf Personalkosten, 5100,80 für studentische Hilfskräfte, 12.624,05 € auf den Kauf von Ausrüstungsgegenständen und 2.500,00 € auf Reisekosten entfallen.

Für das OG-Mitglied Tobaben (**OGP-LW**) wurden insgesamt 16.008,00 € bewilligt, wobei 15.120,00 € auf Personalkosten und 888,00 € auf Reisekosten entfallen.

Für die **Projektkoordination** wurden insgesamt 34.122,27 € bewilligt, wobei 23.149,80 € (zzgl. 3.472,47 € Verwaltungskostenpauschale) auf Personalkosten, 7.000,00 € für Öffentlichkeitsarbeit und 500,00 € auf Reisekosten entfallen.

Aufgrund der Restriktionen und Lieferverzögerungen während und im Nachgang der Covid19-Pandemie waren Projekttreffen in Präsenz und Multiplikatorveranstaltungen eingeschränkt, sodass die vorgesehenen Finanzmittel für die Öffentlichkeitsarbeit und Reisekosten teilweise umgewidmet wurden.

1.7 Ablauf des Verfahrens

Die **koordinativen Arbeiten** wurden am 15. Mai 2022 begonnen und endeten am 31. März 2025. 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.

Die Projektarbeit von **OGP-KT** begann am 1.4.2022 mit dem Personal Gerald Spahiu, Massoud Koshan und Anthony Ioan. Im Rahmen von **Arbeitspaket 1 „Konzeptionierung und prototypischer Aufbau der berührungslosen Bewegungserfassung des Förderbandes“** wurden erste Treffen mit den beteiligten Gruppen vor Ort in Apensen

organisiert, um die Anforderungen und Ziele des Projekts zu definieren. Dabei wurden Konzepte für die Versuchsdurchführung erarbeitet. Die OG-KT hat daraufhin das Team mit dem Ingenieur Phillip Schmidt als Studentischen Hilfskraft erweitert, um bei der technischen Umsetzung des Gestells zu unterstützen. Zudem erfolgte die Bestellung der benötigten Hardware, welche im Anschluss in ersten Vor-Ort-Tests evaluiert wurde.

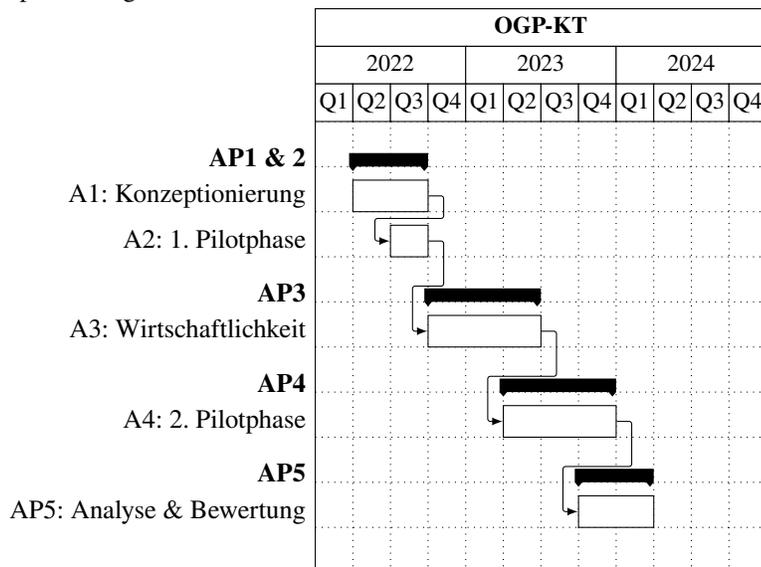
Im Zuge von **Arbeitspaket 2 „Erste Pilotphase unter Real-Bedingungen während der Ernte** wurde die zuvor bestellte Hardware erfolgreich installiert. Die Funktionalität und Robustheit der Systeme wurden durch erste Tests auf dem Feld unter realen Einsatzbedingungen überprüft. Ein Stresstest diente zur Bewertung der Systemstabilität und Performance. Die dabei gewonnenen Erkenntnisse wurden dokumentiert und mit den OG-Gruppen abgestimmt, um frühzeitig Optimierungsmaßnahmen abzuleiten.

Darauf aufbauend wurde die gewonnenen Ergebnisse aus Arbeitspaket 2 im Rahmen von **Arbeitspaket 3 „Weiterentwicklung der Hardware sowie die Ausarbeitung der Wirtschaftlichkeit unter Anwendung der erhobenen Daten** ausgewertet. Die Erkenntnisse wurden bei der technischen Weiterentwicklung berücksichtigt und floßen in die neue Version mit ein. In engem Austausch mit der OG-ROB wurde die berührungslose Bewegungserfassung erfolgreich konzipiert und erläutert. Gemeinsam wurde der Feldversuch für die Ernte 2023 erarbeitet, sodass ein erster Einsatz der berührungslosen Bewegungserfassung ermöglicht wird. Die Applikation wurde direkt auf dem Kartoffelroder unter realen Bedingungen getestet, wodurch wertvolle Rückschlüsse über die Praxistauglichkeit des Systems gezogen werden konnten. Parallel wurde die Konzeptionierung und der Aufbau eines hoch performanten Embedded Systems in enger Zusammenarbeit mit der OG-ROB durchgeführt, das speziell auf die Anforderungen des praktischen Einsatzes zugeschnitten wurde. Das System wurde direkt in die bestehenden Strukturen eingebunden und unter realen Bedingungen getestet, um eine optimale Performance sicherzustellen

Im **Arbeitspaket 4 Zweite Pilotphase unter Real-Bedingungen während der Ernte** wurde das neue Hardwaresystem evaluiert und die Verbesserungen unter Praxis-Bedingungen getestet. Zudem wurden die Sensorik der OGP-KT und OGP-ROB fusioniert und ebenfalls im Einsatz auf dem Feld getestet.

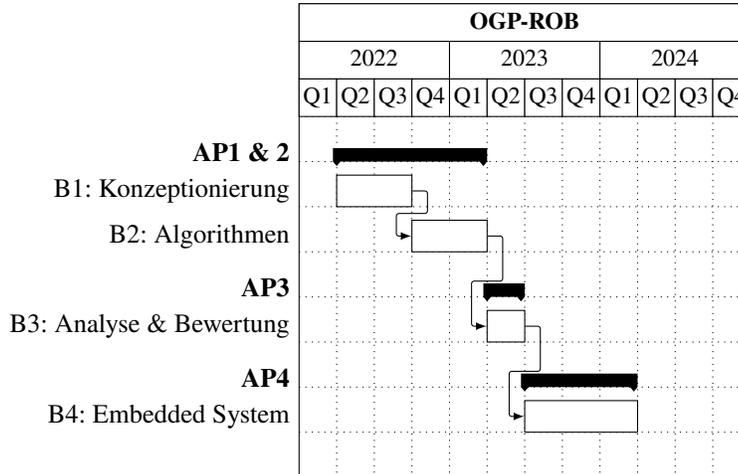
Im **Arbeitspaket 4 – Zweite Pilotphase unter Real-Bedingungen während der Ernte** erfolgte eine umfassende Evaluierung des neuen Hardwaresystems im praktischen Einsatz. Dazu wurden zunächst sämtliche Komponenten vor Ort auf Funktion und Robustheit geprüft, um aussagekräftige Vergleichswerte zu den Laborbedingungen zu gewinnen. Anschließend gingen wir in die Feldtests über, bei denen das System unter realen Erntebedingungen – inklusive wechselnder Bodenebenenheiten, variierender Lichtverhältnisse und unterschiedlichster Wetterverhältnissen – seine Leistungsfähigkeit unter Beweis stellte. Parallel dazu wurde die Sensorik der OGP-KT und der OGP-ROB zusammengeführt und zu einer integrierten Plattform verschmolzen, um die Datenfusion in Echtzeit zu optimieren. Auch diese fusionierte Sensorik wurde während der Ernteeinsätze in den Praxisparzellen intensiv erprobt. Abschließend wurden die gewonnenen Ergebnisse ausgewertet und für kommende Entwicklungsschritte aufbereitet.

Im **Arbeitspaket 5 – Analyse und Bewertung des LiDAR-Systems auf dem Kartoffelroder** erfolgte zunächst eine umfassende Aufbereitung und Validierung der umfangreichen LiDAR-Datensätze. Hierzu wurden die Rohdaten mit Hilfe der von Koio-tech entwickelten Software verarbeitet und separiert. Anschließend kamen statistische Analyseverfahren und spezialisierte Softwarepakete zum Einsatz, um aussagekräftige Kennzahlen zu extrahieren. Zur visuellen Exploration und Interpretation wurden verschiedene Darstellungsformen erstellt: Heatmaps, um räumliche Dichteveränderungen und Bodenoberflächenunregelmäßigkeiten im gesamten Erntegebiet zu identifizieren und Histogramme, die Häufigkeitsverteilungen von Höhenprofilen und Abstandsmessungen zwischen Knollen und Erdoberfläche abbilden. Während des gesamten Analyseprozesses fand ein enger fachlicher Austausch mit OGP-LW statt. In regelmäßigen Abstimmungsrunden wurden gemeinsam Kriterien definiert, welche Darstellungen für die betriebswirtschaftliche Nutzung – etwa zur Abschätzung von Ernteerträgen – besonders relevant sind. Gleichzeitig wurden auch Anforderungsprofile berücksichtigt, die eine Optimierung der Anbaumethoden unterstützen.



Der OGP-ROB hat ihre Projektarbeit im Mai 2022 mit der Einstellung von Herrn Jan-Luca Regenhardt als wissenschaftlichen Mitarbeiter aufgenommen. OGP-ROB begann seine operative Projektarbeit mit **Arbeitspaket 1** „Konzeptionierung und prototypischer Aufbau der berührungslosen Bewegungserfassung des Förderbandes“ mit umfangreichen Rechercharbeiten zu in Frage kommenden Sensoren und Algorithmen für die im Vorhaben angedachte berührungslose Bewegungserfassung. Die Rahmenbedingungen zur Funktionalität und letztlich zur Auswahl der Sensoren wurde unter anderem durch die Expertise der Projektpartner getroffen und in **Arbeitspaket 2** „Konzeptionierung und Implementierung der Algorithmen zur berührungslosen Bewegungserfassung des Förderbandes“ prototypisch für den Laborbetrieb umgesetzt. Zur Unterstützung wurde Herr Niklas Noack vom 01.01.2023 bis zum 31.05.2023 mit 8,25 Wo-

chenstunden als wissenschaftlicher Mitarbeiter eingestellt. Weiter wurden in A2 bestehende Algorithmen auf ihre Eignung für die berührungslose Bewegungserfassung geprüft. Ein multisensorielles Template-Matching-Verfahren kombiniert RGB-Bilder und Punktwolken der Stereokamera, um Bewegungsmuster zu analysieren. Durch die Verfolgung markanter Bildpunkte wird die Geschwindigkeit des Förderbands abgeleitet, wobei OGP-KOIOTECH mit Expertise zur Bewegungsanalyse unterstützt.



Arbeiten zum **Arbeitspaket 4** „Konzeptionierung und Aufbau eines hoch performanten Embedded Systems in Bezug auf Hardwareanforderungen und dem praktischen Einsatz und reale Erntebedingungen“ wurden priorisiert. Alle bisherigen Entwicklungsschritte (Algorithmen von OGP-KT und OGP-ROB) wurden zu einem Gesamtsystem auf dem speziell angepassten *Embedded System* integriert. Sicherheits- und Systemparameter wurden aus den Feldversuchen und durch OGP-LW berücksichtigt und so zu einem sicheren, robusten, für den Einsatz auf der Erntemaschine eingebettetem System zusammengeführt. Leicht verspätet wurde mit **Arbeitspaket 3**, der „Analyse und Bewertung der berührungslosen Bewegungserfassung des Förderbandes“ begonnen und eine 3D-Kamera zur Verifikation der Ergebnisse in das Test-Setup integriert. Der Einsatz auf dem Förderband liefert submillimeter-genau aufgelöste Punktwolken welche mit den Ergebnissen der Bewegungserfassung (B2) und der LiDAR-Objektrekonstruktion zur Analyse der Systemgenauigkeit im Praxisbetrieb verglichen wurden. Dabei zeigte sich dass eine Geschwindigkeitsmessung über Bilderkennung wie z. B. das *Template-Matching* Verzerrungen bei einigen Kartoffeln erzeugten die durch Schlupf verursacht wurden. Daher wurde eine KI-basierte Lösung entwickelt die Geschwindigkeiten individueller Kartoffeln erfasst.

Die Projektarbeit des OG-Mitglieds **OGP-LW** begann ebenfalls am 1. April 2022 und erfolgte in enger Zusammenarbeit mit den anderen Mitgliedern der Operationellen Gruppen. Im Rahmen von **Arbeitspaket 1** „Konzeptionierung des Aufbaus auf den Roder und Unterstützung“ brachte die OGP-LW landwirtschaftliches Fachwissen ein, um OGP-KT und OGP-ROB bei der Entwicklung und optimalen Integration des Scanner-Systems auf dem Kartoffelroder zu unterstützen. Außerdem stellte die OGP-LW die

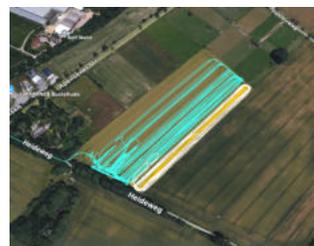
erforderlichen Landmaschinen bereit, die während der Erntezeit für die erste Pilotphase eingesetzt wurden. Während des **Arbeitspakets 2** „Durchführung der Pilotphasen, Evaluation sowie Ausarbeitung der Daten“ spielte OGP-LW eine zentrale Rolle bei der praktischen Durchführung der Pilotphase. In enger Abstimmung mit OGP-KT und OGP-ROB wurden notwendige Reparaturen und Wartungsarbeiten koordiniert und durchgeführt, um kontinuierliche Verbesserungen des Systems zu ermöglichen. Dabei war insbesondere die langjährige landwirtschaftliche Erfahrung der OGP-LW entscheidend.

OGP-LW legte dabei maßgeblich die Rahmenbedingung gemäß des *Bottom-up*-Ansatzes der Entwicklung durch seinen anwendungsorientierten Blick fest. Dies beinhaltet Anwendbarkeit der mechanischen Komponenten auf dem Roder sowie die Mensch-Maschine-Schnittstelle in Form von grafischer Bedienoberfläche, Ausgabe sowie allgemeiner Anwenderfreundlichkeit. Abschließend wurden im Austausch mit OGP-KT technische Neuerungen und Ergebnisse genau bewertet und auf ihre Praxistauglichkeit hin überprüft.

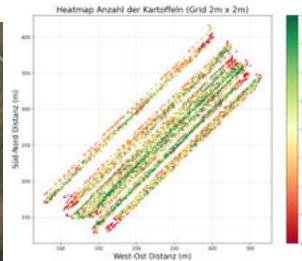
1.8 Zusammenfassung der Ergebnisse

Die im Projekt entwickelten Arbeitspakete haben gezeigt, dass das von OGP-KT entwickelte Vermessungssystem EulerX, welches für die Vermessung der Kartoffeln auf dem Förderband in einer kontrollierten Umgebung - wie z. B. einer Lagerhalle - entwickelt wurde, erweitert werden kann, sodass die Kartoffeln auf der Erntemaschine direkt bei der Ernte vermessen werden. Insbesondere wurde gezeigt, dass das System kostengünstig auf dem Roder nachgerüstet werden kann, ohne gravierende Veränderungen an der Maschine vorzunehmen. Vor allem die noninvasive optische Geschwindigkeitsbestimmung ermöglicht eine einfache Systemintegration unabhängig vom Förderbandtyp. Im Rahmen der Feldversuche wurde zudem gezeigt, dass durch richtige Konzeptionierung der Hardware, das System den harten Bedingungen auf dem Feld, wie z. B. Wetterfestigkeit, Staubbildung und Vibrationen ausgesetzt werden kann und die Vermessung der Kartoffeln zuverlässig erfolgt.

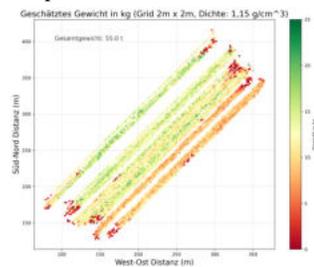
Das Vermessungssystem wurde zudem dahingehend erweitert, dass mittels eines GNSS-Moduls die Position an das Vermessungssystem übermittelt wird und die Kartoffelgeometrien somit mit der Position auf dem Feld in Verbindung gebracht werden. Damit lassen sich erstmalig wichtige Erkenntnisse über das Knollenwachstum unter der Erde generieren. Im Rahmen des Projekts wurde zudem erarbeitet, inwiefern das System weiterentwickelt werden kann, sodass Landwirte schon bei der Ernte in Echtzeit auf den Informationen zugreifen können und Wirtschaftsentscheidungen optimiert werden.



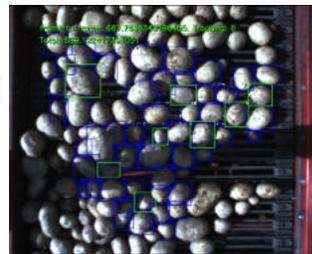
(a) Trajectory from GNSS positions of the harvester



(b) Number of potatoes per 2x2m area



(c) Weight of potatoes per 2x2m area



(d) AI-based velocity estimation

Abbildung 2: Overview of the main results

The work packages developed within the project have demonstrated that the EulerX measurement system, developed by OGP-KT for measuring potatoes on a conveyor belt in a controllable environment such as a storage facility, can be extended to allow for the measurement of potatoes directly on the harvester during the harvesting process. In particular, it was shown that the system can be retrofitted to the harvester cost-effectively without requiring major modifications to the machine. Above all, the non-invasive optical speed measurement enables easy system integration regardless of the conveyor belt type. As part of the field trials, it was also demonstrated that, with proper hardware design, the system can withstand the harsh conditions in the field—such as exposure to weather, dust, and vibrations—while still reliably measuring the potatoes.

The measurement system was also enhanced to include a GNSS module that transmits positional data to the system, allowing the potato geometries to be linked to their respective positions in the field. This makes it possible for the first time to gain valuable insights into tuber growth beneath the surface. Additionally, the project explored how the system could be further developed to enable farmers to access this information in real time during the harvest, thereby optimizing decision-making in agricultural management.

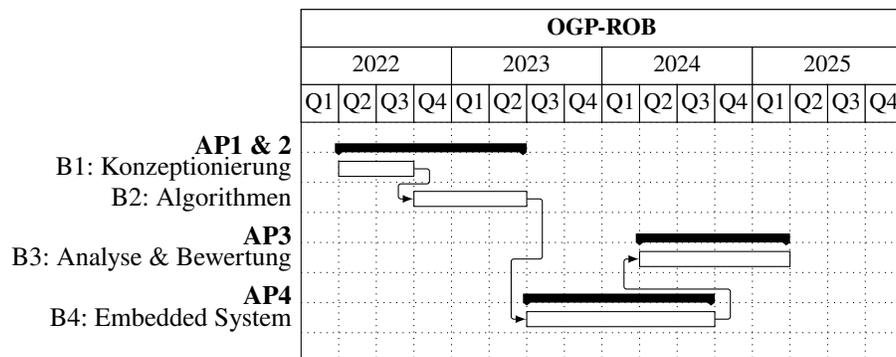
2 Eingehende Darstellung

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

Anfang 2024 traf sich die OG um den aktuellen Stand und das weitere Vorgehen im Projekt zu besprechen (s. u.). Dabei ergab es sich, dass durch 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 30.4.2025 vor.

Vorgesehen war es, einen prototypische Aufbau während der Ernte 2022 auf dem Roder zu erproben, jedoch konnten aufgrund von Problemen bei der Ernte keine aussagekräftigen Ergebnisse generiert werden. Die Spannungsversorgung des Systems auf dem Roder selbst erwies sich als nicht ausreichend, sodass neue Herangehensweisen erdacht werden mussten. Dadurch kam es zu Änderungen in den Arbeitspaketen von **OGP-KT**, wo ein Teil der vorgesehenen Arbeit in A3 nach hinten verschoben wurde. Bei der Ernte 2023 ergaben sich weitere technische Herausforderungen, die aufgrund der unterschiedlichen Systemarchitekturen der von OPG-KT und OPG-ROB entwickelten eingebetteten Systeme entstanden. Dadurch konnten die Analysen und Bewertungen der Algorithmen nur verzögert abgeschlossen werden.



OGP-ROB hat, wie in Unterabschnitt 1.7 dargelegt den Beginn des AP B4 „Konzeptionierung und Aufbau eines hoch performanten Embedded Systems in Bezug auf Hardwareanforderungen und dem praktischen Einsatz und reale Erntebedingungen“ priorisiert. Dies ergab sich maßgeblich durch ein Umdenken bezüglich der Strategie im Umgang mit Erkenntnissen in der Bewegungserfassung und der zu Grunde liegenden Algorithmen und Sensoren. So wurden nicht nur die Zeitpunkte der Startzeiten der Pakete getauscht, sondern diese auch teilweise parallel abgearbeitet. Anfang 2024 wurde einer Umwidmung von Mitteln aus den Positionen Reisekosten, Öffentlichkeitsarbeit und Kauf von Ausrüstung zugunsten der Personalkosten stattgegeben.

2.1.2 Darstellung der wichtigsten finanziellen Positionen

aufgeschlüsselt nach OGP:

OGP	Position	bewilligt inkl. Kürzung	abgerufen	Differenz
Koord.	5.2.1 Personalausgaben WiMi	23.149,80 €	22.667,57 €	428,23 €
	5.2.2 Öffentlichkeitsarbeit	7000,00 €	5126,26 €	1873,74 €
	5.2.3 Reisekosten	500,00 €	0,00 €	500,00 €
	5.2.4 Verwaltungspauschale 15%	3472,47 €	3400,14 €	72,33 €
	Gesamt	34.122,27 €	31.193,97 €	2.928,30 €
OGP-ROB	5.3.1 Personalausgaben WiMi	119.236,40 €	111.186,08 €	8050,32 €
	5.3.4 Reisekosten	2000,00 €	3713,68 €	-1713,68 €
	5.3.6 Kauf v. Instrumenten	25.000,00 €	24.008,45 €	991,55 €
	Gesamt	146.236,40 €	138.908,21 €	7.328,19 €
OGP-KT	5.3.1 Personalausgaben	142.445,52 €	142.128,00 €	317,52 €
	5.3.1 Personalausgaben HiWi	5100,80 €	5100,80 €	0,00 €
	5.3.4 Reisekosten	2500,00 €	2304,72 €	195,28 €
	5.3.6 Kauf v. Instrumenten	12.624,05 €	9557,16 €	3066,89 €
	Gesamt	162.670,37 €	159.090,68 €	3.579,69 €
OGP-LW	5.3.1 Personalausgaben	15.120,00 €	15.093,00 €	27,00 €
	5.3.4 Reisekosten	888,00 €	0,00 €	880,00 €
	Gesamt	16.008,00 €	15.093,00 €	915,00 €
OG	Gesamt	359.037,04 €	344.285,86 €	14.751,18 €

Tabelle 2: Vorläufige Darstellung der wichtigsten finanziellen Positionen (Stand 6. Mittelabruf).

OGP-Robotik

- Personalkosten: Für die wissenschaftliche Bearbeitung der Arbeitspakete für OGP-Robotik wurde Herr Jan-Luca Regenhardt im Zeitraum vom 01.05.2022 bis 31.01.2024 mit einer 50% E11-Stelle und im Zeitraum vom 01.02.2024 bis 31.03.2024 mit einer 20% E11-Stelle befristet beschäftigt. Herr Niklas Noack war im Zeitraum vom 01.01.2023 bis 31.05.2023 mit einer 21% E11-Stelle und Herr Jonas Otto im Zeitraum vom 01.04.2024 bis 28.02.2025 mit einer 50% E11-Stelle für die wissenschaftliche Bearbeitung der Arbeitspakete befristet beschäftigt. Weiter war Herr Mattis Kaiser im Zeitraum vom 01.05.2022 - 30.09.2022 als studentische Hilfskraft tätig. Für die Projektkoordination wurde Herr Georg Avramidis vom 15.05.2022 bis 31.03.2025 mit einer 11% E13-Stelle beschäftigt.
- Anschaffung 3D-Kameras: Die 3D-Kameras (Echtzeit 3D-Kamera Zivid Two, Stereokamera Multisens S7) dienen der geometrischen Erfassung der Pflanze auf dem Förderband als 3D-Punktwolke. Die Kameras arbeiten dabei mit unterschiedlichen Prinzipien der Messwerterfassung und finden dabei Einsatz in

Labor- sowie Realbedingungen.

- Anschaffung RTK-GNSS: Das RTK GNSS *Emlid Reach RS2* der Firma EMLID erfasst echtzeitkinematisch korrigierte Positionsdaten zur georeferenzierung der erhobenen Messwerte.
- Anschaffung Switch: Das *D-Link Switch DXS1212TC* dient dem Austausch erhobener Daten (Sensor, PC) für den Datenhöchstdurchsatz im Laborbetrieb.
- Anschaffung RGB-Kamera + Objektiv: Neben der geometrischen Erfassung dient die *BFS-U3-16S2C-CS* RGB-Kamera zur Erfassung des Förderbandes im sichtbaren Bereich des Lichts.

OGP-KT - Koiotech

- Personalkosten: Für die Bearbeitung der Arbeitspakete wurden zunächst Masoud Koshan und Anthony Ioan mit einer LG3 Stelle über das ganze Projekt eingeplant. Zur Unterstützung im Tätigkeitsbereich der Öffentlichkeitsarbeit, Projektkoordination und Recherche Arbeiten wurde Gerald Spahiu im Zeitraum 04-2022 bis 09-2022 ebenfalls mit einer LG3 Stelle eingeplant. Die wissenschaftliche Hilfskraft Philipp Schmidt wurde als Masterstudent Maschinenbau als Unterstützung für die Konzeptionierung des Aluminiumgestell und Installation auf dem Roder vom 07-2022 bis 09-2022 eingestellt.
- Anschaffungen PotatoScan: Für den Scanner auf dem Roder wurde der für die Vermessung essentielle 2D-LiDAR LMS-400 Scanner bestellt. Der mit Hochleistung operierende Sensor ist für die submillimeter-genaue Aufnahme bei sich schnell bewegenden Förderbänder elementar. Zudem ist das System kompatibel mit der von OGP-KT entwickelten Software. Um die hohen Prozessanforderungen der Datenverarbeitung auf dem Feld und die Auswertung der großen Datensätze (50 Gb/h) abbilden zu können, wurde der leistungsstarke Nvidia Jetson NX mit 30 TOPS bei 20 W angeschafft.
- Anschaffungen Embedded System: Zur hochpräzisen Bestimmung der Position auf dem Feld wurde das GNSS-Modul SparkFun GPS-RTK-SMA Breakout - ZED-F9P (Qwiic) eingeplant. Zudem wurde ein Mikrocontroller Arduino Nano zur Unterstützung bei der Datenaufnahme angeschafft. Für die Spannungsversorgung wurde zudem ein Transformator, welcher die Ausgangsspannung 12V vom Traktor auf 24V für die Versorgung der Sensoren umwandelt, benötigt.
- Anschaffung Gestell: Das Gestell wurde mit B-Typ Aluminiumprofilen konzipiert und stellt einen Industriestandard dar. Neben den Profilen wurden Nut-Steine, Schrauben, Schutzkappen, Winkel und Kabelführungen angeschafft.

OGP-LW - Tobaben

- Personalkosten: Für die Bearbeitung der Arbeitspakete sind für eine Person Personalkosten angefallen (LG1). Für die Bearbeitung der Arbeitspakete für OGP-LW war Herr Claus Tobaben im Zeitraum von 01.04.2022 bis 31.03.2025 beschäftigt.

2.2 Detaillierte Erläuterung der Situation zu Projektbeginn

2.2.1 Ausgangssituation

Die Landwirtschaft steht vor großen Herausforderungen: Eine wachsende Weltbevölkerung erfordert höhere Erträge auf gleichbleibender Fläche, während Extremwetterereignisse infolge des Klimawandels die Nutzung dieser Flächen zusätzlich erschweren. In diesem Kontext gewinnen *Precision Farming* und *Smart Farming* zunehmend an Bedeutung, um durch innovative Technologien und verbesserte Datengrundlagen die landwirtschaftliche Produktion effizienter und nachhaltiger zu gestalten. Besonders in der Kartoffelwirtschaft treten zwei wesentliche Problembereiche auf: Einerseits ist die Bestimmung der Größenverteilung eingelagerten Ernteguts bislang nur ungenau und aufwendig möglich, da eine maschinelle Sortierung häufig zu Beschädigungen führt, die wiederum Fäulnis während der Lagerung begünstigen. Andererseits stößt der Einsatz von satellitengestütztem *Precision Farming* bei Hackfrüchten wie Kartoffeln an Grenzen, da sich der Zustand der Knollen nicht zuverlässig aus dem Pflanzenwachstum ableiten lässt. Die Entwicklung eines Systems zur georeferenzierten Größenbestimmung direkt auf dem Kartoffelroder könnte diese Probleme maßgeblich adressieren.

Als Grundlage zu einem solchen System bringt der OGP-KT seine bereits entwickelte stationäre Lösung mit ein. Diese Lösung umfasst ein LiDAR-basiertes Messsystem, das die Größenbestimmung von Kartoffeln auf stationären Förderbändern ermöglicht. Dieses System ist mittels neuronaler Netzwerke in der Lage aus den Sensordaten die einzelnen Kartoffeln zu segmentieren und aus 3D-Punktwolken das Quadratmaß, Länge und Volumen zu bestimmen.

Weiter wird OGP-ROB seine Kompetenz in der Entwicklung mobiler Sensorsysteme, Algorithmik und eingebetteter Elektroniklösungen in das Projekt einbringen. Durch Expertise im Bereich der Echtzeit-Datenverarbeitung, Maschinensteuerung und robuster Elektroniklösungen kann OGP-ROB die Anpassung der stationären Vermessungslösung für den Einsatz auf dem mobilen Kartoffelroder sicherstellen.

Die OGP-LW bringt umfassende praktische Erfahrungen im Kartoffelanbau mit. Mit rund 70 ha Anbaufläche, spezialisiert auf Speisekartoffeln, eigenem Lager und Kartoffelroder bietet der Betrieb die ideale Infrastruktur und das *Know-how*, um die Entwicklung des Vermessungssystems praxisorientiert umzusetzen und die Alltagstauglichkeit des Systems direkt unter realen Betriebsbedingungen zu validieren.

2.2.2 Projektaufgabenstellung

Ziel des Projekts ist die Entwicklung und Erprobung eines innovativen Vermessungssystems zur georeferenzierten Größenbestimmung von Kartoffeln direkt auf dem Roder während der Ernte. Hierzu soll ein LiDAR-Sensor in Kombination mit einem präzisen GNSS-Modul auf einer Erntemaschine installiert werden. Das System muss in der Lage sein, unter den anspruchsvollen Bedingungen der Ernte, wie hoher Förderbandge-

schwindigkeit, wechselnden Lichtverhältnissen und Verunreinigungen durch Erde, Steine und Kluten, zuverlässig die Größen und Formen der Kartoffeln zu erfassen. Durch die Nutzung der LiDAR-Technologie sollen die bisher bestehenden Herausforderungen hinsichtlich Datenmenge, Erfassungsfrequenz und Unterscheidung von Fremdkörpern gelöst werden. Diese Herangehensweise macht die berührungslose Erkennung der Fließbandgeschwindigkeit sowie die Integration eines robusten eingebetteten Systems erforderlich.

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. Regelmäßige *Jour-fixe*-Termine hielten alle Teilnehmer auf dem Stand des Projektverlaufs der einzelnen OGP 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** und **OGB-KT** konnten auch spontane logistische Probleme schnell gelöst werden. Regelmäßige Feldtage auf den Versuchsflächen von **OGP-LW** gaben einen praktischen Einblick in das Erheben und Auswerten von erhobenen Daten. Die Stand der Entwicklung des Sensorsystems wurde regelmäßig durch Erprobungen durch die anderen OG-Partner begutachtet und beurteilt. Technische Anforderungen und Machbarkeiten wurden durch die Beteiligung von **OGP-LW** 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 tragen daher insbesondere zum Fortschritt der Arbeiten bei, bietet aber auch Einblicke in andere fachliche Sparten mit entferntem 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 künstlichen Intelligenz in den Agrarbereich, ii.) Methoden der Robotik in den Agrarbereich, iii.) Monitoring- und Analyseroutinen der Fruchtverteilung auf der landwirtschaftlichen Nutzfläche sowie iv.) der anwendungsorientierte Blick eines Landwirts auf die entwickelte Gesamtlösung.

Hierdurch konnten neue Schnittmengen entdeckt 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 eng. Regelmäßige Treffen zu den gesetzten Zwischenzielen und operativen Tätigkeiten sowie enge Absprachen zu den Zwischenberichten führten trotz aller ex-

ternen Widrigkeiten im Projektzeitraum (bspw. Wuchsperioden) 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 der **OGP-ROB** ihre Expertise in der Automatisierung und Sensordatenfusion in die Entwicklung von Lösungsansätzen einfließen ließ, konnte der **OGP-KT** seine Expertise bei der Entwicklung von Lösungen mittels künstlicher Intelligenz einbringen. Die Expertise des OGP-LW war insbesondere von großer Wichtigkeit, um die Entwicklung zielgerecht auf die Bedürfnisse des Landwirts zu entwickeln. Damit wurde sichergestellt, dass die Ergebnisse einen realen Mehrwert für den Landwirt liefert. Während der gesamten Projektphase bestand immer ein enger Austausch zwischen den Mitarbeiter/-innen von KOIOTECH, der HAWK und dem Betrieb GOLDGELB. Auch für die Öffentlichkeitsarbeit war es von Vorteil, dass die beteiligten Partner 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?

Zwischen den OGP-KT und OGP-LW sind weitere Zusammenarbeiten vorgesehen. So bietet OGP-LW weiterhin die Möglichkeit, den Scanner während der Ernte einzusetzen und OGP-KT bei der weiteren Entwicklung zu unterstützen. Außerdem wird eine weitere Zusammenarbeit der OG-Mitglieder im Rahmen der wissenschaftlich-studentischen Ausbildung in Form von Abschluss- oder Semesterarbeiten angestrebt.

2.4 Ergebnisse Koitech

2.4.1 Position des Gestells auf dem Roder

Zu Beginn des Projekts wurde ein Projekttreffen mit den Projektpartnern OGP-LW und OGP-ROB in Apensens am 02.06.2022 abgehalten. Ziel des Treffens war es zum einen den Ablauf des Projekts zu planen und zum anderen den Aufbau des PotatoScanners auf dem Roder zu diskutieren und die ideale Stelle zur Anbringung des Gestells zu identifizieren. So musste bei der Konzeptionierung des PotatoScanners darauf geachtet werden, dass das Förderband beim Ausleeren des Bunkers beweglich ist und hochfährt. Des Weiteren darf das Gestell nicht die Tätigkeit der ErntehelferInnen während der Ernte stören. In Rücksprache mit OGP-LW wurde daraufhin die Position am Ende des Förderbands kurz vor dem Bunker identifiziert (siehe Abbildung 3). Zwei von vier Stehlätzen auf dem Roder waren bei der Positionierung des Gestells noch zugänglich.

2.4.2 Konzeptionierung der Potato-Scanner Hardware

Bei der Erstellung des Gerüst zur Anbringung der Sensoren des Potato-Scanners standen die Aspekte Sicherheit und Stabilität im Vordergrund. Zum einen musste darauf geachtet werden, dass das Gerüst bei starken Bewegungen und Erschütterungen auf dem Feld nicht nachgibt. Daher wurden drei Querbalken einkalkuliert, welche mit Nutschrauben befestigt wurden. Mittels Schraubenkleber wurde dafür gesorgt, dass die



(a) Höhe Laser-Linie, an der die 3D-Punktwolken aufgenommen werden.



(b) Stehplatz der Erntehelfer, welcher durch den Scanner wegfällt.

Abbildung 3: Abstimmung mit den Projektpartnern OGP-KT und ORP-ROB am Kartoffelroder (Grimme SE 75/85-55) beim Projekttreffen.

Schrauben sich nicht durch Vibration lösen. Durch den stabilen Aufbau wurde zudem verhindert, dass Vibrationen die Messungen während der Ernte stören. Das Gestell wurde vorerst im CAD entworfen (Abbildung 4) und anschließend umgesetzt. Der Steuerungsschrank wurde seitlich am Gestell angebracht, sodass bei dem beweglichen Förderband die Kabelanschlüsse mitbewegt werden. Die Kabeln wurden mit Schraubführungen fest an dem Gestell angebracht. Dies war vor allem aufgrund des beweglichen Förderbands von großer Notwendigkeit, um das Verfangen der Leitungen und Materialschaden zu verhindern.

Für die Elektronik wurde der Steuerungsschrank so entwickelt, dass die Anschlüsse resistent gegen Vibrationen waren und nicht sich während der Fahrt lösen. Zudem musste dafür gesorgt werden, dass der Steuerungsschrank spritzwasserfest und Staub undurchlässig ist, sodass die Hardware den Witterungsgegebenheiten auf dem Feld überstehen kann. In der ersten Erntephase wurde jedoch beobachtet, dass nach einem Starkregen Wasser eingedrungen war. Daraufhin wurde der Schaltschrank neu konstruiert und weiterentwickelt.

2.4.3 Implementierung GNSS-Positionsbestimmung

In der ersten Erntephase wurde das Gestell zunächst montiert und in einem gemeinsamen Testlauf von OGP-LW und OGP-KT in Apensen auf seine Funktionstüchtigkeit überprüft. Dabei lief das System ohne Unterbrechung, und erste LiDAR-3D-Daten konnten erfolgreich aufgenommen werden. Auch wurde überprüft, ob die Mittagssonne den Laser beeinflusst. Erste Daten hatten gezeigt, dass zwar die Intensität in den Datenaufnahmen des 3D-LiDAR reduziert wurde, jedoch die eigentliche Vermessung stabil blieb. An dem Tag des Testlaufs war zusätzlich die Aufwirbelungen von Staub und Dreck durch die Landmaschine sehr extrem, da der Regen über mehrere Wochen ausblieb. Auch hier wurde die Aufnahme des Sensors nicht beeinträchtigt. Positiv zu



Abbildung 4: CAD-Visualisierung des Gestells für die Erntemaschine Grimme SE75/85

vernehmen war die Tatsache, dass die Laseröffnung nicht beschmutzt wurde wie anfänglich angenommen wurde. Anschließend erfolgte der kontinuierliche Einsatz im regulären Erntebetrieb.

Während des laufenden Betriebs kam es jedoch zu einem Ausfall der Stromversorgung, als sich der Roder in Bewegung befand. Infolgedessen ließ sich das Steuerungssystem nicht hochfahren, sodass keine LiDAR-Daten erfasst wurden. Lediglich die Positionsdaten wurden über das hochpräzise GNSS-Modul von SparkFun im Sekundentakt aufgezeichnet und gespeichert. Im ersten Schritt wurden diese Rohdaten automatisch vom Hauptsystem übernommen und weiterverarbeitet. Mit den Daten konnte sich somit die Trajektorie der Erntemaschine nachvollzogen werden und erste Darstellungen wurden erzeugt (siehe Abbildung 6).

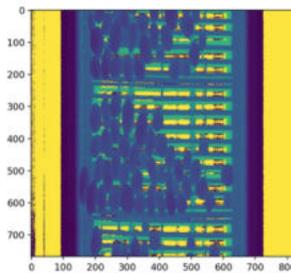


Abbildung 5: Testlauf auf dem Feld. Im ersten Versuch wurde der Aufbau unter echten Bedingungen getestet.

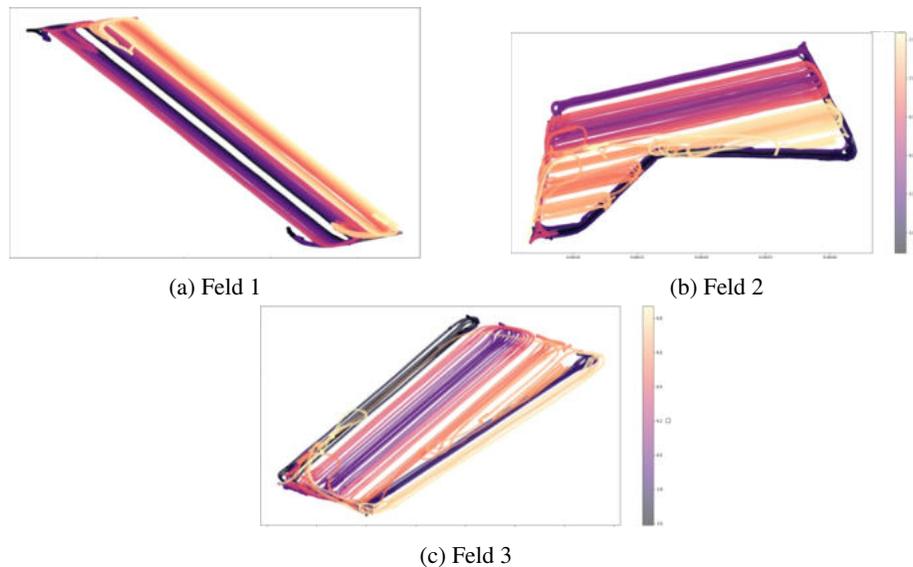


Abbildung 6: GNSS-Position auf dem Feld. Darstellung der zeitlichen Veränderung der Position auf dem Feld.

2.4.4 Fusionierung der Multi-Sensorik

Für eine präzise Datenauswertung ist es unerlässlich, die Sensordaten zeitlich exakt zu synchronisieren. Das ermittelte Höhenprofil nutzt man, um den Abstand zwischen RGB-Kamera und Förderband möglichst genau abzuschätzen. Weil die Höhe der Kartoffelpartien schwankt, erfolgt anhand dieses Profils die korrekte Zuordnung der einzelnen Aufnahmen (Frames), was die Genauigkeit der Geschwindigkeitsbestimmung maßgeblich erhöht.

Zur Gewährleistung der zeitlichen Konsistenz greift das Embedded System auf seine Real-Time Clock (RTC) zurück. Eine eigens entwickelte Software steuert das koordinierte Auslesen aller Sensordaten und sichert so die präzise zeitliche Zuordnung. Auf diese Weise lässt sich eine optimierte Synchronisation der Sensordaten erreichen, die die Genauigkeit der gesamten Datenauswertung deutlich verbessert.

Da die Position des GNSS-Moduls mit einer geringeren Frequenz als die des 3D-LiDAR Sensor aufgenommen wurden (siehe Tabelle 3), musste in einem Zwischenschritt zu jeder 3D-LiDAR Aufnahme die Position zugeordnet werden. Dafür wurde auf die Interpolationsmethode zurückgegriffen, bei der angenommen wurde, dass die Geschwindigkeit des Roders innerhalb zweier GNSS-Messpunkten konstant blieb. Die Zeitstempel der 3D-LiDAR Aufnahmen wurden daraufhin mit den Zeitstempel der Position interpoliert (siehe Abbildung 7 und Abbildung 8).

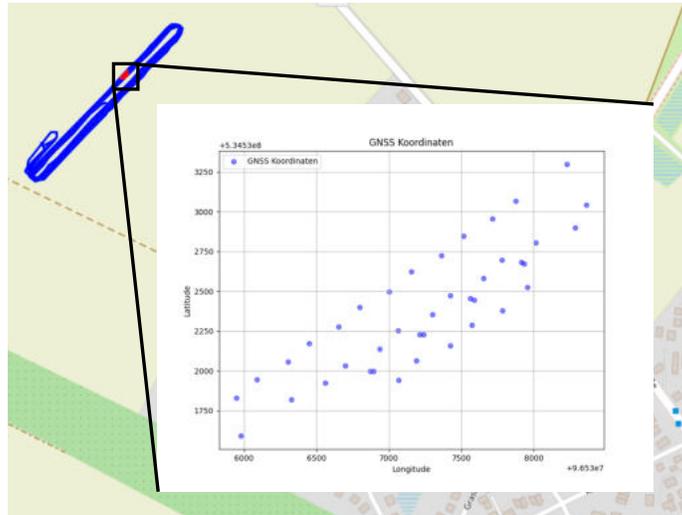


Abbildung 7: Darstellung der GNSS Position im Teilbereich des Feldes.

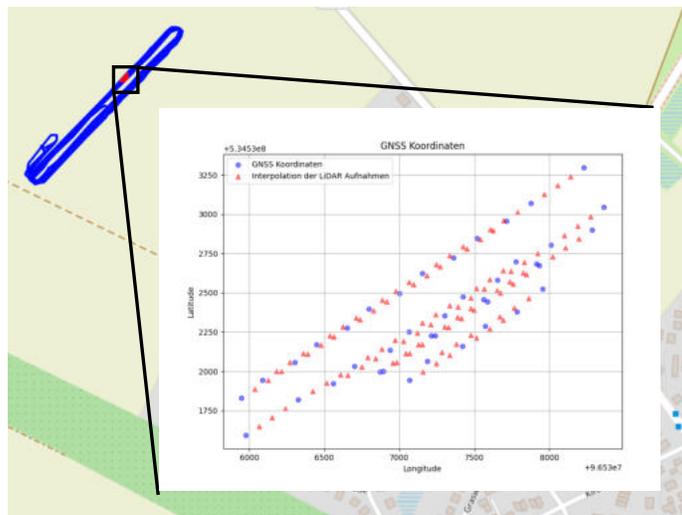


Abbildung 8: Interpolation der LiDAR 3D Aufnahmen in Bezug auf die GNSS Position.

Tabelle 3: Darstellung des Datenaufkommens: GNSS-Positionen und LiDAR 3D-Aufnahmen

Zeitstempel GNSS Position	Zeitstempel LiDAR Aufnahmen
	2024-10-25_08-02-27
2024-10-25_08-02-28	2024-10-25_08-02-28
	2024-10-25_08-02-29
	2024-10-25_08-02-31
2024-10-25_08-02-32	2024-10-25_08-02-32
	2024-10-25_08-02-33
	2024-10-25_08-02-34
2024-10-25_08-02-36	2024-10-25_08-02-36
	2024-10-25_08-02-37
2024-10-25_08-14-48	2024-10-25_08-14-50
2024-10-25_08-14-52	2024-10-25_08-14-52
	2024-10-25_08-14-53
	2024-10-25_08-14-54
2024-10-25_08-14-56	2024-10-25_08-14-55

2.4.5 Auswertung der Ergebnisse Ernte 2024

Während der Ernte 2024 wurde erfolgreich vom 5. Oktober bis 2. November sowohl GNSS-Positions Daten als auch 3D-LiDAR Daten aufgenommen. Das Problem mit der Spannungsversorgung wurde final gelöst, indem die Anschlussbuchse vom Traktor repariert wurde. In diesem Kapitel werden die Datenauswertungen vom 16. Oktober sowie vom 25. Oktober dargestellt. An diesen beiden Tagen wurde vom selben Feld geerntet, sodass ein größeres Gesamtbild erstellt werden kann. In Abbildung 11 werden die jeweiligen Trajektorien auf dem Feld angezeigt und somit die Position wo geerntet wurde.

Mittels der von OGP-KT bereitgestellten Software wurden die 3D-LiDAR Daten ausgewertet. Im ersten Schritt segmentiert das Neuronale Netzwerk die Kartoffeln im Bild, worauf die Punktwolke für die einzelne Kartoffel weiter prozessiert wird. In Verbindung mit der Geschwindigkeitsbestimmung wurden die Daten in das kartesische Koordinatensystem überführt. Anschließend wurden Quadratmaß und Länge bestimmt.

In Abbildung 9 und Abbildung 10 werden jeweils die Verteilungen für die Ernte am 16. Oktober als auch am 25. Oktober dargestellt. Insgesamt wurden an diesen zwei Tagen etwa 900.000 Kartoffeln vermessen. Zu jeder Kartoffel wurde das Quadratmaß und die zugehörige bestimmt. Die Histogramme zeigen die Anzahl der Kartoffeln, die das Quadratmaß x und die Länge y haben. So lässt sich aus den Abbildungen entnehmen, dass das größte Aufkommen an Kartoffeln das Quadratmaß 45 mm mit der Länge 55 mm haben. Da OGP-LW die Kartoffeln im Lager dem Feld und den Erntetag zuordnen kann, wurden die erhobenen Werte für den 25. Oktober mit den Ergebnissen aus der mechanischen Sortierung verglichen. Es konnte tatsächlich beobachtet werden, dass

mehrheitlich Kartoffeln mit Quadratmaß 45 mm in der Partie vorhanden waren, sodass gesagt werden kann, dass die Verteilung der sortierten Kartoffeln der gemessenen Verteilung nicht widerspricht.

Anschließend wurden die Größenverteilungen der jeweiligen Position auf dem Feld zugeordnet. Hierfür wurden die Daten wie im vorherigen Kapitel Unterunterabschnitt 2.4.4 interpoliert und jeder 3D-LiDAR Aufnahme die genaue Position zugeordnet. Des Weiteren wurden die punktuellen Messungen in 2 m^2 große Bereiche zur besseren Darstellung zusammengefasst.

In Abbildung 12 wird die Gesamtanzahl an vermessenen Kartoffeln angezeigt. Diese Heatmap zeigt somit an, wie viele Kartoffeln etwa in diesem Bereich gewachsen sind. Auffällig ist hierbei, dass rechten äußeren Rand weniger Kartoffeln gewachsen sind. Nach den Aussagen von OGP-LW ist das auch so zu erwarten, da am Rand des Feldes oftmals das Wasser nicht gut gehalten werden kann und somit weniger Knollen gebildet werden.

In den Abbildung 13, 14 und 15 werden jeweils die Anzahl an Kartoffeln mit Quadratmaß größer als 35mm, 45mm und 50mm in Relation zu der Gesamtanzahl zu der jeweiligen Position auf dem Feld prozentual angezeigt. Aus diesen Darstellungen lässt sich somit die Größe der Knollen ableiten. In Abbildung 15 deuten die roten Pixel an, dass in diesem Bereich das Aufkommen von Kartoffeln mit Quadratmaß 50 mm prozentual zum Aufkommen an dieser Stelle gering ist, also die Knollen kleiner ausfallen. Grün dagegen bedeutet, dass mehr große Knollen aufkommen. Im Austausch mit OGP-LW wurden die Kartierungen der gesamten Anzahl an Kartoffeln in Abbildung 12 mit der Kartierung aus Abbildung 15 verglichen. Es lässt sich tatsächlich beobachten, dass Knollen in Bereichen mit geringerer Dichte tendenziell größer gewachsen sind als in dichteren Regionen. Die Beobachtung stimmt somit mit dem bekannten Verhalten des Knollenwachstums überein, denn die Knollen werden größer je mehr Platz sie haben.

In den Abbildung 13, 14, 15 sowie 12 fällt auf, dass in dem Bereich West-Ost Distanz 320m und Süd-Nord Distanz 310m in allen Kartierungen die Werte schlechter ausfallen als auf dem restlichen Feld. Sowohl die Anzahl der Kartoffeln ist geringer als auch das Knollengrößen fallen geringer aus. Diese Anomalie könnte darauf hinweisen, dass in diesem Bereich die Konditionen schlechter waren, als auf dem restlichen Feld. Der OGP-LW hat somit die Erkenntnis gewonnen, diesen Bereich genauer zu untersuchen und die Ursachen für den schlechteren Knollenwuchs zu finden. Positionsspezifische Maßen könnten somit entwickelt und ausgeführt werden.

Abschließend wurde in Abbildung 17 das Gewicht für die vermessenen Kartoffeln geschätzt. Dazu wurden zum einen sowohl die von OGP-KT bestimmte Längen als auch das Quadratmaß der Kartoffeln herangezogen. Zum anderen wurde die Dichte als 1.15 g/cm^3 angenommen. Zur Berechnung des Gewichts wurde zunächst das Volumen durch die Formel $V \approx \frac{2}{3}AL$, abgeschätzt, wobei A die vom Quadratmaß geschätzte Querfläche (qm^2) und L die Länge in cm ist. Anschließend wurde die Masse durch das Volumen

und die geschätzte Dichte berechnet: $m \approx \rho \cdot V$.

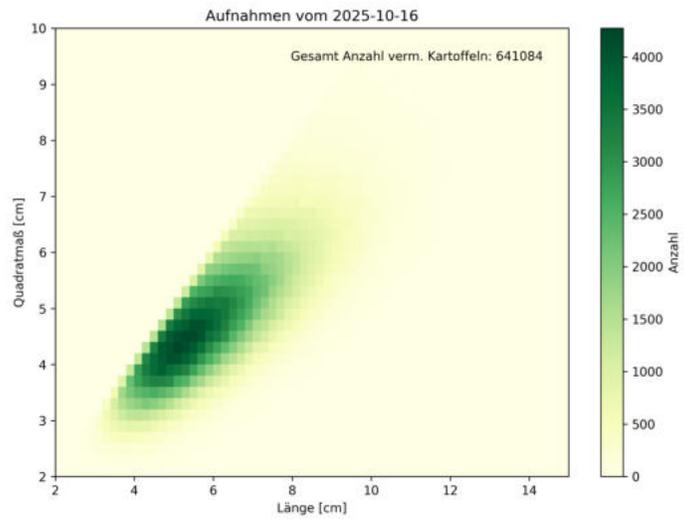


Abbildung 9: Histogramm der Größen Quadratmaß und Länge von der Ernte am 16. Oktober. Die Größen werden in cm angegeben.

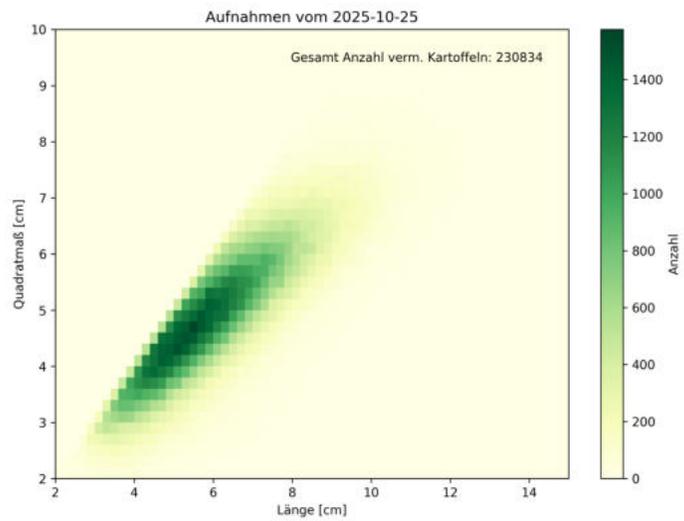


Abbildung 10: Histogramm der Größen Quadratmaß und Länge von der Ernte am 16. Oktober. Die Größen werden in cm angegeben.

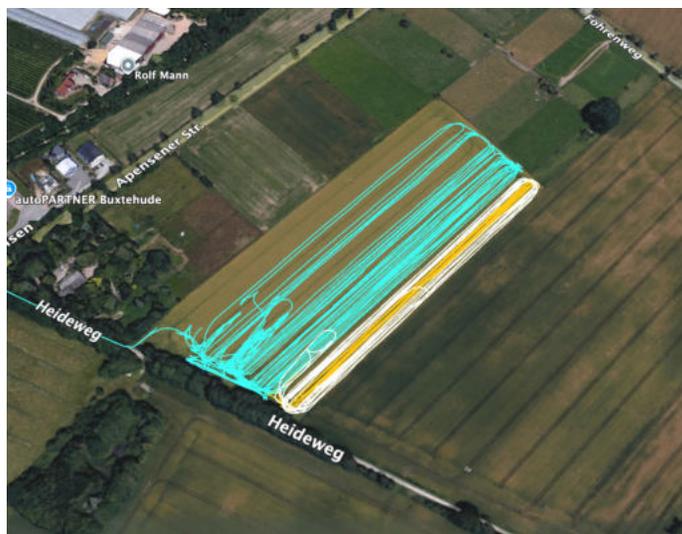


Abbildung 11: Visualisierung der GNSS Position auf dem Feld. Die unterschiedlichen Farben stellen den Tag der Ernte dar. Türkis: 2025-10-16, Gelb: 2025-10-24, Weiß: 2025-10-25.

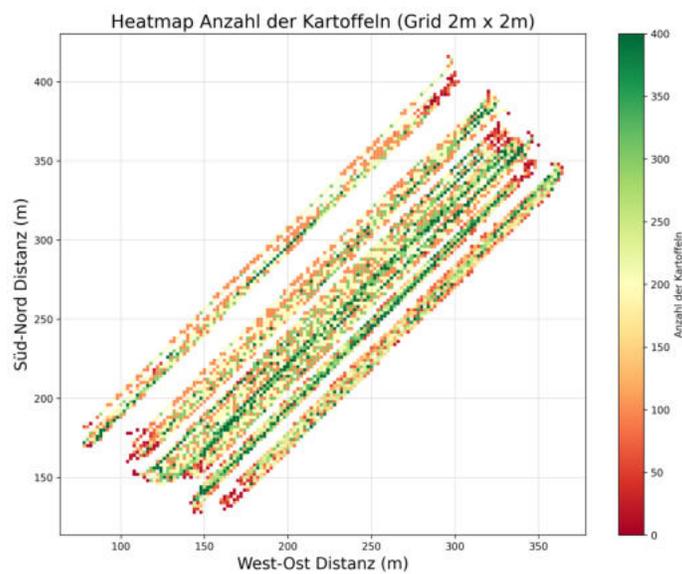


Abbildung 12: Darstellung der Anzahl der Kartoffeln auf dem Feld in 2m x 2m großen Bereichen.

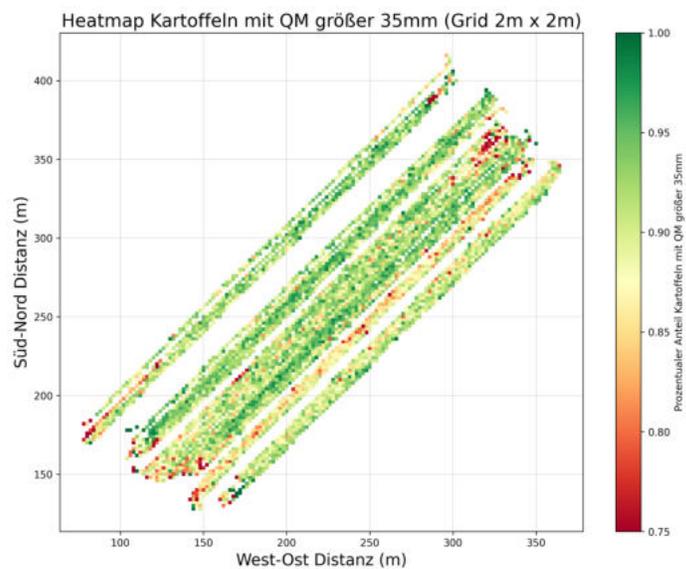


Abbildung 13: Prozentualer Anteil an Kartoffeln die größer sind als 35 mm Quadratmaß.

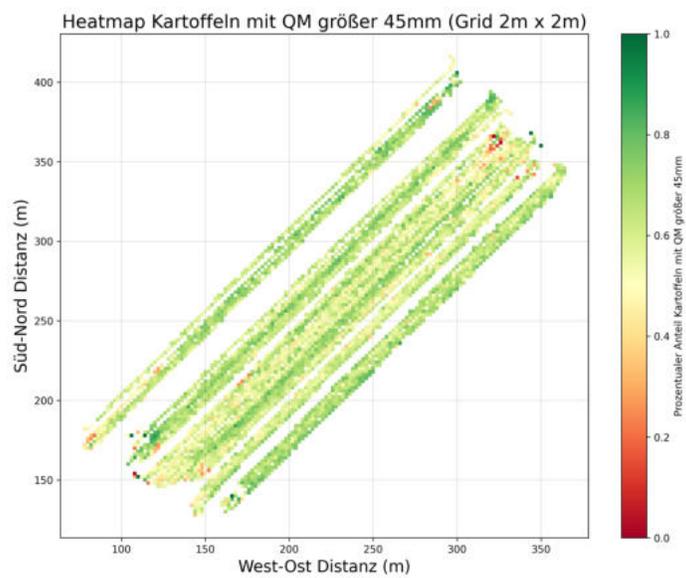


Abbildung 14: Prozentualer Anteil an Kartoffeln die größer sind als 45 mm Quadratmaß.

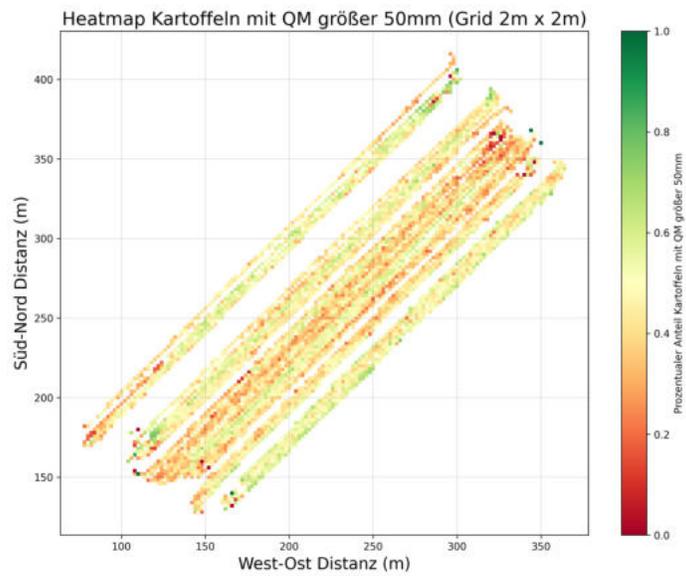


Abbildung 15: Prozentualer Anteil an Kartoffeln die größer sind als 50 mm Quadratmaß.

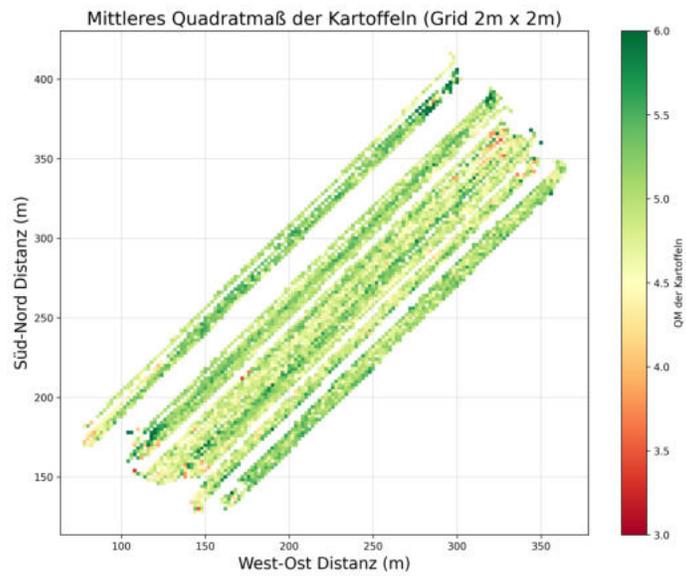


Abbildung 16: Durchschnittswert des Quadratmaßes in Abhängigkeit von der Position auf dem Feld.

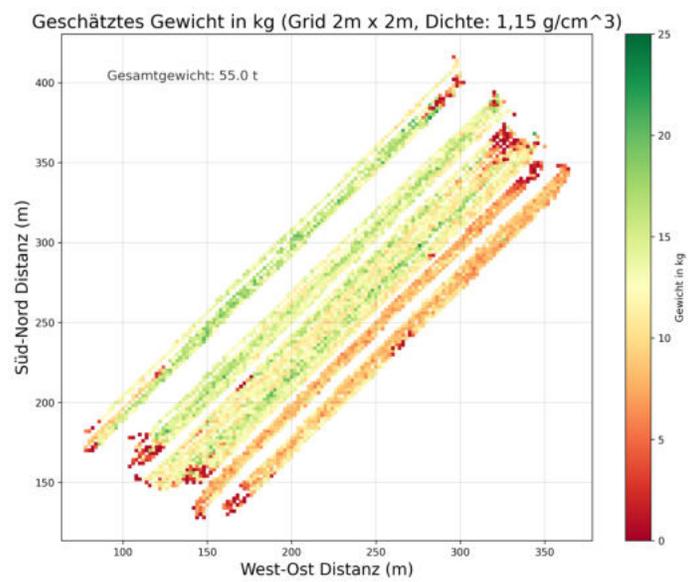


Abbildung 17: Geschätztes Gewicht in Abhängigkeit von der Position auf dem Feld.

2.5 Ergebnisse OGP-ROB

2.5.1 Konzeptionierung und prototypischer Aufbau der berührungslosen Bewegungserfassung des Förderbandes

Recherche und Vorarbeit In enger Abstimmung mit den Projektpartnern OGP-KT und ORP-LW wurden in diesem Arbeitspaket die grundlegenden Anforderungen an eine berührungslose Bewegungserfassung des Förderbandes definiert. Im Rahmen eines Projekttreffens am 02.06.2022 in Apensen beim Partner OGP-LW erfolgte eine erste Begutachtung des eingesetzten Kartoffelroders (GRIMME SE 75/85-55). Dabei wurden erste Messungen an der Förderbandanlage durchgeführt, um ein besseres Verständnis für die Bedingungen vor Ort zu erhalten.

Auf Basis dieser Erkenntnisse wurden zwei technische Ansätze für die Bewegungserfassung entwickelt:

1. eine markerbasierte Erfassung,
2. eine bildbasierte Erkennung der Kartoffelstruktur.

Für beide Ansätze wurden geeignete Kamerapositionen an bzw. oberhalb des Förderbands bestimmt, sowohl für RGB-Kameras als auch für Stereokameras. Auf Grundlage der definierten Sensorparameter und Platzierungsoptionen wurde anschließend ein Konzept zur elektromechanischen Integration der Komponenten erstellt.

Darüber hinaus wurden Aspekte der Betriebssicherheit analysiert – insbesondere im Hinblick auf geltende Normen und Vorschriften sowie den sicheren Einsatz der Technik auf dem Kartoffelroder. Dabei wurde auch berücksichtigt, dass sich während des Betriebs Erntehelfer auf der Maschine befinden. Die technische Realisierbarkeit und ein störungsfreier Betrieb innerhalb des Gesamtsystems wurden im Austausch mit den Partnern kontinuierlich bewertet.

Prototypischer Versuchsaufbau Um unabhängig vom Einsatzort am Multisensorsystem und der Bewegungserfassung arbeiten zu können, wurde ein prototypischer Testaufbau mit einem Vevor-Förderband aus der Lebensmittelindustrie realisiert (siehe Abbildung 18a). Zur Erfassung der Förderbandbewegung wurde eine RGB-Kamera des Typs FLIR BlackflyS USB3 13Y3C-C eingesetzt. Zusätzlich kam die Carnegie Robotics Multisense S7 Stereo-Tiefenkamera zum Einsatz, die im Rahmen von Arbeitspaket 3 für die Bewertung der Bewegungserfassung vorgesehen ist. Beide Kameras wurden in einer eigens konstruierten Sensorhalterung oberhalb des Förderbands montiert (siehe Abbildung 18b).

Beide Kameras verfügen über offizielle Treiber im Middleware-Framework ROS (Robot Operating System) und sind somit in der Lage, Sensordaten standardisiert bereitzustellen. Dies ermöglicht eine flexible Weiterverarbeitung innerhalb der bestehenden Softwarearchitektur.

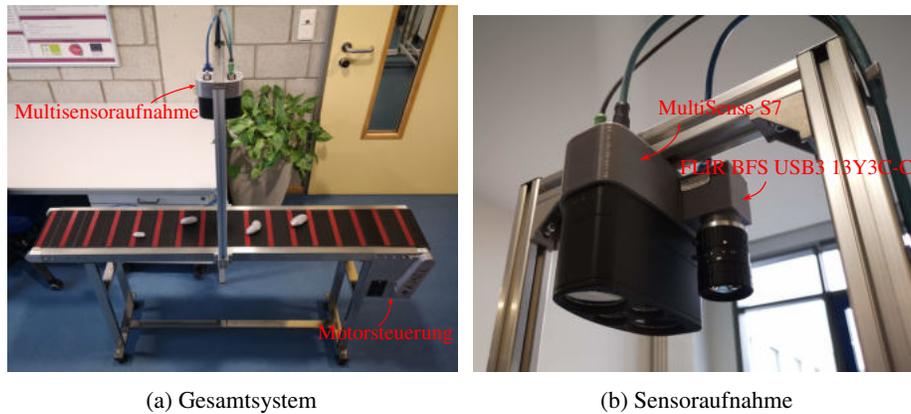


Abbildung 18: Test-Förderband Firma Vevor mit Sensoraufnahme

Die bei dem Projekttreffen am 02.06.2022 in Apensen bei OGP-LW erhobenen Informationen dienen als Grundlage für die Auslegung des Testaufbaus. Dabei ergaben sich folgende relevante Randbedingungen:

- Senkrechter Abstand der Kamera zum Förderband: ca. 1 m
→ resultierende Brennweite: $F = 16\text{mm}$
- Förderbandgeschwindigkeit variabel zwischen $1 \dots 3 \frac{\text{m}}{\text{s}}$

Alle erstellten CAD-Modelle sind auf dem GitLab des AMRL (Autonomous Mobile Robotics Lab) frei verfügbar.

Link: <http://amrl.hawk.de:3373/potatoscan/3dfiles.git>

Im nächsten Schritt wurden die Kamerasysteme entsprechend eingerichtet und in Betrieb genommen. Abbildung 19 zeigt exemplarisch die Ausgabe der MultiSense S7 – oben das RGB-Bild, unten die dazugehörigen Tiefendaten. Aktuell ist die Kamera quer zur Bewegungsrichtung des Förderbands montiert, um ein möglichst breites Sichtfeld zu erhalten. Für den späteren Einsatz am Förderband des Kartoffelrodors wird die Kamera um 90° gedreht montiert, um die gesamte Förderbandbreite vollständig erfassen zu können.

2.5.2 Konzeptionierung und Implementierung der berührungslosen Bewegungserfassung des Förderbandes

Umsetzung der Geschwindigkeitserfassung mit Bildverarbeitung Im ersten Quartal 2023 fasste sich die OG mit der Entwicklung eines Verfahrens zur optischen Erfassung der Förderbandgeschwindigkeit. Zu diesem Zweck wurden verschiedene Ansätze erprobt und hinsichtlich ihrer Praxistauglichkeit bewertet.

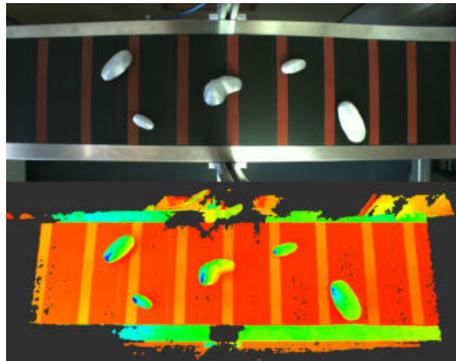
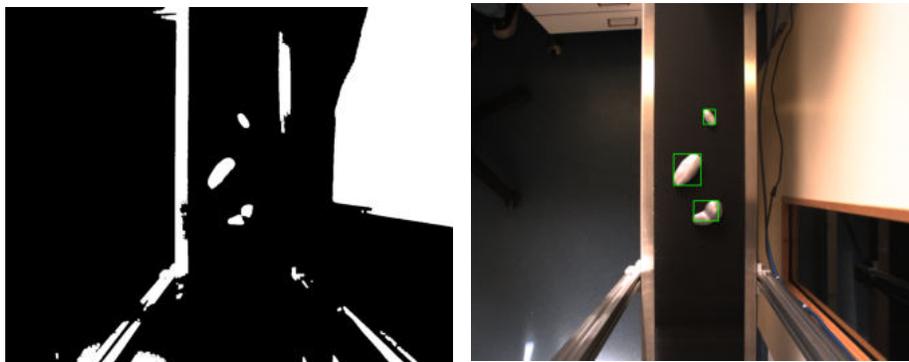


Abbildung 19: Ausgabe der Multisense S7: RGB (oben), Tiefendaten (unten)

Im ersten simplifizierten Ansatz wurden die Farbbilder in Graustufenbilder umgewandelt und anschließend binarisiert, sodass die zu erfassenden Kartoffeln als helle Formen vor dunklem Hintergrund deutlich hervortreten (siehe Abbildung 20a). Im nächsten Verarbeitungsschritt wurden diese Objekte im Bild erkannt und ihre Umrisse nachgezogen. Dadurch konnten sie als einzelne Bewegungseinheiten identifiziert und im weiteren Verlauf analysiert werden (siehe Abbildung 20b).

Zur Effizienzsteigerung wurde ein bestimmter Bildausschnitt, eine *Region of Interest* (ROI), definiert, in dem die Auswertung stattfindet. Bereiche außerhalb dieses Fensters wurden ignoriert, um die Rechenzeit zu verringern und die Bildverarbeitung gezielt auf relevante Informationen zu fokussieren. Dieser Bildausschnitt ist in Abbildung 21 als grüner Rahmen dargestellt.



(a) Vorprozessiertes Kameraframe

(b) Konturen

Abbildung 20: Erste Ansätze der Geschwindigkeitserfassung

Verfolgung einzelner Objekte zur Geschwindigkeitserfassung Zur Bestimmung der Förderbandgeschwindigkeit wurde im nächsten Schritt die größte erkannte Kontur im Bild über mehrere *Frames* hinweg verfolgt. Dafür kam ein sogenannter MIL-Tracker (engl. *Multiple Instance Learning*) zum Einsatz. Dieses Verfahren ist in OpenCV ab Version 3.0 verfügbar und zeichnet sich durch eine hohe Robustheit aus, insbesondere bei teilweiser Abdeckung des zu verfolgenden Objekts. Das ist für den vorliegenden Anwendungsfall besonders relevant, da sich die Kartoffeln auf dem Förderband häufig überlagern oder verdecken.

Ein weiterer untersuchter Ansatz ist die Geschwindigkeitserfassung mittels sogenannter optischer Flussverfahren (*Optical Flow*). Dabei wird die Bewegung von Bildpunkten zwischen zwei aufeinanderfolgenden Frames berechnet. In diesem Fall wurde die Lucas-Kanade-Methode verwendet, ein bewährter Algorithmus zur Schätzung lokaler Bewegungen.

Die Lucas-Kanade-Methode geht davon aus, dass benachbarte Pixel ähnliche Bewegungen ausführen. Um die Bewegung eines bestimmten Punktes im Bild zu ermitteln, analysiert der Algorithmus einen kleinen Bildausschnitt (typischerweise 3×3 Pixel) um diesen Punkt herum. Mithilfe der Methode der kleinsten Quadrate wird daraus ein Bewegungsvektor berechnet, der sowohl Richtung als auch die Verschiebung in Pixeln angibt (siehe Abbildung 21).

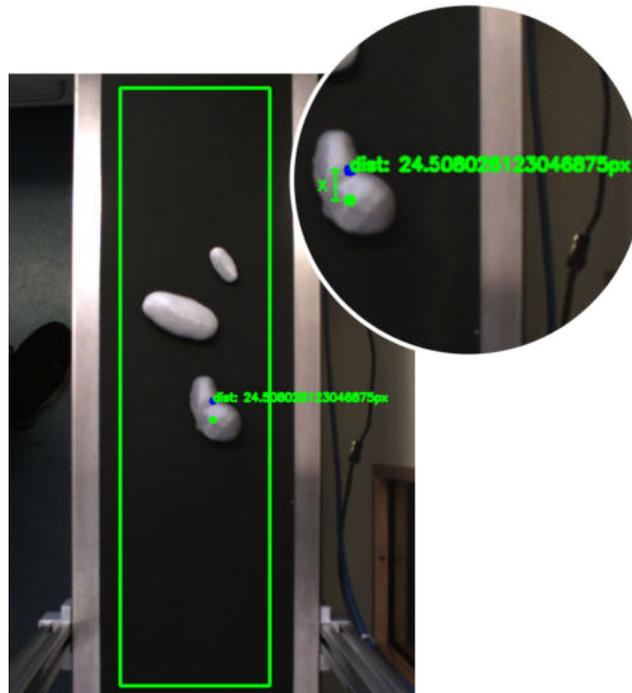


Abbildung 21: Optical-Flow Bewegungsabstand, grün: ursprünglich gewählter Bildpunkt, blau: wiedererkannter Bildpunkt im Folgeframe, x Distanz in Bildpunkten (Pixeln)

Kalibrierung und Interpretation der Bewegung in realen Einheiten Beide Ansätze zur Geschwindigkeitserfassung – das *Contour-Tracking* und der *Optical Flow* – ermöglichen es, die Bewegung der Kartoffeln als diskrete Objekte auf dem Förderband in Pixeln pro Sekunde zu quantifizieren. Um diese Bildbewegung jedoch in reale Maßeinheiten wie Meter pro Sekunde zu überführen, ist eine geometrische Kalibrierung des Kamerasystems unerlässlich. Denn die bloße Pixeldistanz allein liefert keine Aussage über die tatsächliche Geschwindigkeit, solange keine Informationen über die Abbildungsgeometrie vorliegen. Dazu müssen die optischen Eigenschaften der Kamera exakt bestimmt werden – insbesondere die sogenannten intrinsischen Kameraparameter. Diese beinhalten die Brennweite, die Lage des Bildhauptpunkts (optisches Zentrum), etwaige Schiefstellungen sowie objektivbedingte Verzerrungen (z. B. Radial- und Tangentialverzerrungen).

Eine entsprechende Kamerakalibrierung bildet somit die Grundlage, um die Bewegung der erkannten Objekte aus dem Bild korrekt in die jeweilige Geschwindigkeit zu überführen. Über ein berechnetes Δ_t der beiden Folgebilder und der Relativierung von Bildpunkte zu Distanz wird eine Geschwindigkeit v_p bestimmt.

Erkennung von Kartoffeln in Bilddaten mittels künstlicher Intelligenz: Die Erkennung der Kartoffeln in den Bilddaten wurde auf Basis eines *Object-Detection*-Ansatzes realisiert. Dabei handelt es sich um eine Methode des maschinellen Lernens, die speziell zur Identifikation und Markierung bestimmter Strukturen (Objekte) in Bilddaten entwickelt wurde. Aufgrund dieser Eigenschaften ist sie besonders gut für die Erkennung von Kartoffeln in unseren Bildaufnahmen geeignet.

Im Rahmen der Recherche wurde das Modell-Framework YOLO (*You Only Look Once*) in Kombination mit Darknet als Trainingsumgebung evaluiert. YOLO zeichnet sich durch eine hohe Verarbeitungsgeschwindigkeit und eine effiziente Objekterkennung aus, was es für Echtzeitanwendungen attraktiv macht. Allerdings erwies sich Darknet als veraltet und die Einbindung in ROS als kompliziert. Aus diesem Grund fiel die Entscheidung auf das von ULTRALYTICS entwickelte YOLO-Framework, das eine modernisierte Version der YOLO-Architektur bereitstellt. Diese Variante wird aktiv weiterentwickelt und ermöglicht eine einfache Integration in ROS mittels Python.

Ultralytics stellt derzeit die elfte Version von YOLO (YOLOv11) zur Verfügung, welche bereits vortrainierte Modelle beinhaltet. Diese Modelle können ohne zusätzliches Training direkt genutzt werden, erkennen jedoch nur die Objekttypen, für die sie vortrainiert wurden. Um eine präzise Erkennung von Kartoffeln zu gewährleisten, wurde ein eigenes Modell auf Basis eines individuell erstellten Datensatzes trainiert. Aufgrund der Anforderungen an eine Echtzeitanwendung fiel die Wahl auf die Nano-Architektur (YOLOv11n), die hinsichtlich Geschwindigkeit, Speicherverbrauch und Genauigkeit optimiert ist.

Zur Erstellung des Datensatzes wurden > 200 Bilder von Kartoffeln unter verschiedenen Bedingungen aufgenommen, um eine hohe Diversität hinsichtlich Hintergrund, Lichtverhältnissen, Kameraabständen und Blickwinkeln zu gewährleisten. Anschließend erfolgte eine manuelle Annotation der Bilddaten, bei der mithilfe eines Bildbearbeitungsprogramms die Kartoffeln mit Begrenzungsrahmen (*Bounding Boxes*) markiert wurden (siehe Abbildung 22). Die erstellten Labels wurden in einem für YOLO kompatiblen Format gespeichert.

Der Datensatz wurde in einen Trainings- und einen Validierungssatz aufgeteilt. Der Trainingssatz dient dem Modell zur Anpassung seiner Parameter, während der Validierungssatz zur Evaluierung der Modellleistung auf unbekanntem Daten verwendet wird. Vor dem Training wurde eine Konfigurationsdatei erstellt, die das Modell über die Anzahl der zu erkennenden Objekte sowie den Speicherort der Trainingsdaten informiert.

Für das initiale Training wurde das Modell über 50 Epochen trainiert (eine Epoche entspricht einem vollständigen Durchlauf des Trainingssatzes). Erste Tests zeigten eine hohe Erkennungsrate für Kartoffeln, jedoch wurden visuell ähnliche Nicht-Kartoffel-Objekte gelegentlich fälschlicherweise als Kartoffeln klassifiziert. Um die Robustheit des Modells zu verbessern, wurde der Datensatz um weitere Aufnahmen ergänzt und erneut trainiert. Nach 50 weiteren Epochen zeigte sich eine deutliche Reduktion der Fehlklassifikationen. Abschließend wurde ein finales Modell mit identischem Daten-



Abbildung 22: Auszug Trainingsdatensatz bestehend aus händisch angelegter *bounding boxes* innerhalb vielfältiger Umgebungen

satz, jedoch über 120 Epochen trainiert, um die Genauigkeit noch weiter zu optimieren.

Die Integration des Modells zur Objektverfolgung (*Object Tracking*) in ROS erfolgte durch die Implementierung einer ROS-Node in Python. Diese empfängt RGB-Bilddaten der RGB-Kamera BFS, verarbeitet sie mittels des trainierten YOLO-Modells und gibt die erkannten Objekte als *Bounding Boxes* auf den ursprünglichen Bilddaten aus (siehe Abbildung 23). Die normalisierten Koordinaten der *Bounding Boxes* werden zudem separat zur weiteren Verarbeitung publiziert.

KI-basierte Verfolgung einzelner Objekte zur Geschwindigkeitserfassung Zum *Tracking* einzelner Kartoffel-Elemente werden zwei Ansätze geprüft: der Vergleich von Merkmalen (dynamisch oder statisch) sowie der direkte Vergleich der Positionen in aufeinanderfolgenden Bildern. Aufgrund der Annahme, dass eine ausreichend hohe Bildfrequenz (*Framerate*) vorliegt, ist ein effizienter Positionsvergleich möglich. Eine Kartoffel kann sich innerhalb eines Bruchteils einer Sekunde nur begrenzt weit bewegen,

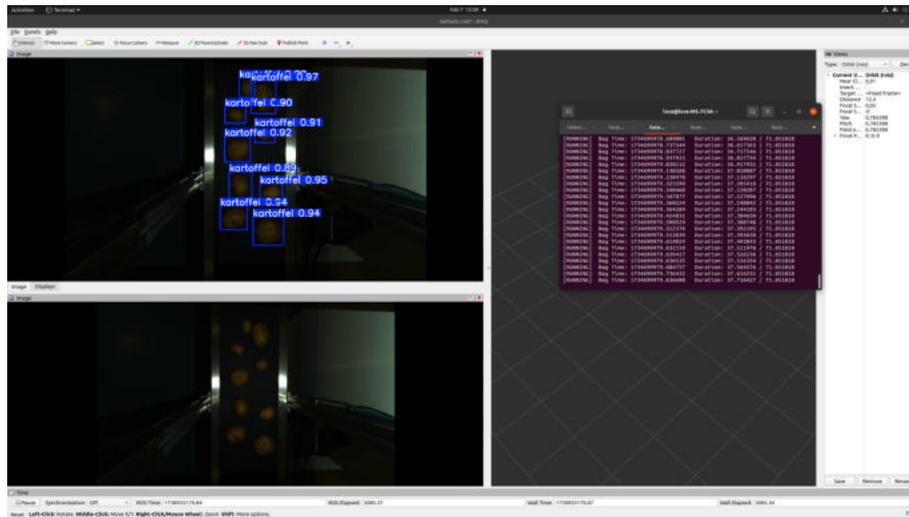


Abbildung 23: Echtzeiterkennung und Objektverfolgung *Object-Tracking* im Laboraufbau

sodass sie in zwei aufeinanderfolgenden Bildern (*Frames*) sehr nahe beieinander liegt. Diese Eigenschaft wird mittels eines sogenannten *Overlap-Scans* ausgenutzt.

Zwar kommt es gelegentlich zu Sprüngen im *Tracking* einzelner Kartoffeln, dies ist jedoch im aktuellen Anwendungsfall vernachlässigbar. Im Anschluss wurde die Ermittlung der relativen Geschwindigkeit (analog zum *Optical-Flow*) einzelner Kartoffeln integriert. Da die Geschwindigkeit relativ zum Bildraum bestimmt wird, erfolgt eine Normalisierung in Prozent der Bildlänge pro Sekunde. Ein Beispiel: Bei einem 640×640 Pixel großen Bild und einer gemessenen Geschwindigkeit von 0,4 bewegt sich die Kartoffel mit 256 Pixeln pro Sekunde über das Bild. Diese Geschwindigkeit kann später bei Bedarf in absolute Einheiten wie Zentimeter pro Sekunde umgerechnet werden, was je nach Kameraperspektive und Entfernung variiert.

Der Algorithmus zur Geschwindigkeitsbestimmung läuft in zwei Schritten ab: Es wird die zuletzt eingetretene Kartoffel ausgewählt und die Differenz der Mittelpunkte in aufeinanderfolgenden Frames berechnet. Anschließend werden diese Differenzen aufaddiert und ein Durchschnitt gebildet, der die Geschwindigkeit repräsentiert.

Um die Genauigkeit zu testen, wird auf Basis der ermittelten Geschwindigkeit eine Prognose erstellt, wann eine verfolgte Kartoffel einen definierten Bereich (z. B. die letzten 15 % des Bilds) erreicht. Dazu wird abgewartet, bis mindestens zehn Differenzen gesammelt wurden, um Schwankungen zu reduzieren. Danach wird ein erwarteter Zeitpunkt berechnet, zu dem die Kartoffel den Zielbereich erreichen müsste. Beim tatsächlichen Erreichen dieses Bereichs wird der errechnete mit dem realen Zeitpunkt verglichen und die Abweichung notiert.

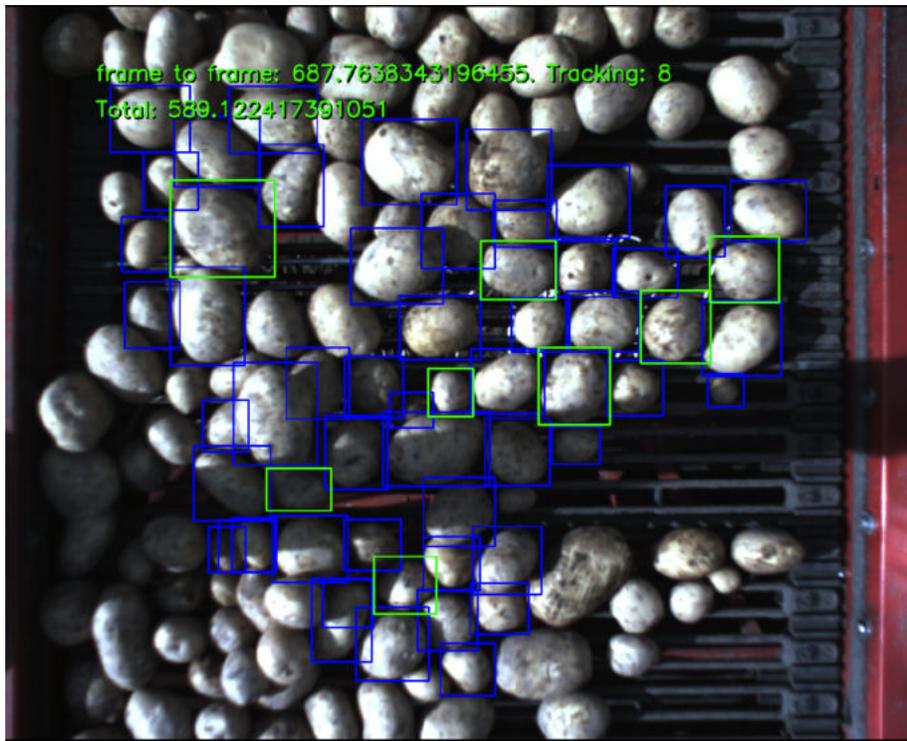


Abbildung 24: Echtzeiterkennung und Objektverfolgung *Object-Tracking* im Realbetrieb

Tests mit aufgezeichneten Bilddaten im Realbetrieb (siehe Abbildung 24) zeigen: Die Prognosen weichen im Durchschnitt nur um 0,01 Sekunden vom tatsächlichen Eintreffen ab. Dieses Ergebnis ist sehr vielversprechend, insbesondere da ein „Springen“ und „Kullern“ der Kartoffeln die Rekonstruktion der Linienlaserscannerdaten ein Verzerren der Kartoffel zur Folge hat. Die Erkennung und Filterung solcher Ausreißer erhöht maßgeblich die Güte der Messergebnisse.

Insgesamt zeigt sich damit, dass es möglich ist, Kartoffeln anhand von Bilddaten zuverlässig zu erkennen, zu identifizieren, zu verfolgen und ihre relative Geschwindigkeit zu bestimmen, Ausreißer eindeutig zu erkennen und zu filtern.

2.5.3 Analyse und Bewertung der berührungslosen Bewegungserfassung des Förderbandes

Das *Template-Matching* umfasst das Finden eines Vorlagenobjekts in einem Frame und das Suchen einer ähnlichen Vorlage in nachfolgenden Frames. Die Ähnlichkeitsmaße zwischen der Vorlage und dem Suchfenster können durch verschiedene Techniken, wie

Korrelation oder der Summe der quadrierten Unterschiede, berechnet werden.

Erste Ergebnisse zeigen, dass die Geschwindigkeit in den meisten Fällen zuverlässig berechnet werden kann. Allerdings treten Fehler auf, wenn ähnliche Kartoffeln aufgrund ihrer einheitlichen Erscheinung fälschlicherweise am falschen Ort im Bild identifiziert werden. Diese Fehler entstehen häufig durch die geringe Variation der Form und Textur der Kartoffeln, die es dem *Template-Matching* erschwert, korrekte Übereinstimmungen zu finden. Zusätzlich kann es bei Bewegungen des Förderbandes zu unscharfen oder teilweise verdeckten Objekten kommen, was die Erkennung weiter erschwert.

Ein weiteres Problem bei der Anwendung von *Template-Matching* in dieser Situation ist die Notwendigkeit, die Vorlagen im Voraus zu definieren. Wenn sich die Kartoffeln während der Ernte variieren, etwa durch unterschiedliche Winkel oder Oberflächenmerkmale, kann das *Template-Matching* Schwierigkeiten haben, diese neuen, ungewohnten Vorlagen korrekt zu erkennen. Weiterhin können starke Helligkeitsschwankungen oder Schatten auf dem Förderband die Genauigkeit der Berechnungen beeinträchtigen.

Zur Behebung dieses Problems werden zwei Ansätze entwickelt: Zum einen kann mit Hilfe eines Kalman-Filters die Varianz minimiert werden, sodass der Fehler über einen längeren Zeitraum herausgefiltert wird. Der Kalman-Filter nutzt die Messungen über mehrere *Frames* hinweg, um Fehler in der Bewegungserfassung zu glätten, und kann so zu einer stabileren und genaueren Geschwindigkeitsberechnung beitragen. Dieser Filter ist besonders hilfreich, wenn es zu Ausreißern kommt, etwa durch ungenaue Objekterkennung in einem einzelnen *Frame*.

Zum anderen kann ausgenutzt werden, dass sich das Förderband immer in eine feste Richtung bewegt. Diese Information erlaubt es, den Maximierungsschritt im *Template-Matching* gezielt auf eine bestimmte Richtung zu fokussieren, was die Fehlerquote erheblich reduziert. Das heißt, dass der Algorithmus nicht mehr nach Übereinstimmungen in alle Richtungen suchen muss, sondern sich nur auf die Bewegungsrichtung des Förderbandes konzentriert. Diese Eingrenzung erhöht die Präzision der Objektverfolgung, besonders bei gleichförmiger Bewegung der Kartoffeln, und reduziert die Wahrscheinlichkeit, dass ähnliche Objekte fälschlicherweise zugeordnet werden.

Ein zentrales Problem bei der Rekonstruktion von Kartoffeln mithilfe eines Linienlaser-scanners und der Geschwindigkeitsmessung über *Template-Matching* ist die verzerrte Darstellung einzelner Objekte. Da sich die Kartoffeln während der Aufnahme auf dem Förderband bewegen, kommt es durch Geschwindigkeitsänderungen oder Rotationen zu lokalen Verzerrungen. Insbesondere wenn sich eine Kartoffel dreht, beschleunigt oder abbremst, kann dies zu einer gestauchten oder gestreckten Rekonstruktion führen. Die auf dem Förderband tatsächlich zurückgelegte Strecke stimmt dann nicht mehr mit der über das *Template-Matching* ermittelten Geschwindigkeit überein, was zu inkonsistenten Punktwolken individueller Kartoffeln führt. Diese Problematik wurde durch die ergänzende Verwendung der S7 Multisens-Kamera deutlich sichtbar: Mit Hilfe ihrer RGB-D-Daten konnten Diskrepanzen zwischen der realen Objektbewegung

und der angenommenen Bewegung anhand des Templates identifiziert und analysiert werden: relativ zum Förderband in Bewegung versetzte Kartoffeln werden deutlich gestaucht oder anders verzerrt. Um dieses Problem zu beheben, wurde ein KI-basiertes Tracking-Verfahren implementiert, das in Echtzeit jede Kartoffel individuell verfolgen kann. Dabei wird das Objekt nicht nur detektiert, sondern auch über mehrere Frames hinweg identifiziert, sodass Bewegungsmuster zuverlässig erkannt und korrekt in die 3D-Rekonstruktion integriert werden können. Die KI kann so auf Veränderungen im Bewegungsverhalten reagieren und die zeitliche Zuordnung der Laserschnitte deutlich robuster gestalten.

Ein vielversprechender Ansatz, ist die Verwendung eines Objekterkennungsmodells wie z. B. YOLO (You Only Look Once). YOLO ist ein neuronales Netzwerk, das in Echtzeit Objekte erkennt und lokalisiert, indem es das Bild in Regionen unterteilt und für jede Region die Wahrscheinlichkeit berechnet, dass sie ein Objekt enthält. YOLO hat sich insbesondere bei der Erkennung von Objekten in dynamischen Szenen als äußerst robust und schnell erwiesen.

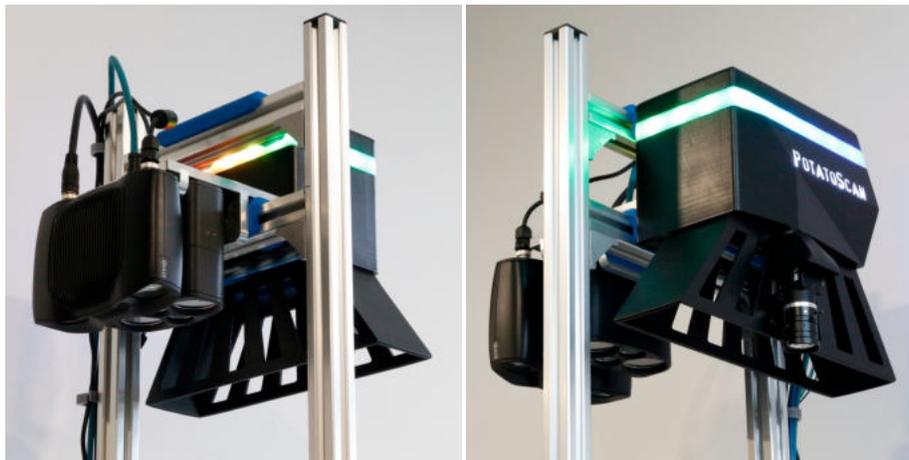
2.5.4 Konzeptionierung und Aufbau eines hoch performanten Embedded Systems in Bezug auf Hardwareanforderungen und praktischen Einsatz und reale Erntebedingungen

Der Teststand, bestehend aus einem Förderband und der Aufnahme verschiedenster Sensoren, wurde aufgebaut. In Abbildung 25 ist dieser Teststand zu sehen, einschließlich der Sensoraufnahme und dem entwickelten Schaltkasten im Hintergrund, welcher im Folgenden eingehend beschrieben wird.



Abbildung 25: Teststand Förderbandsystem

Für den SICK LMS4000 Linienlaserscanner wurde eine Umhausung im PETG 3D-Druckverfahren konstruiert und am Linienlaserscanner verbaut (siehe Abbildung 26b). Die FLIR RGB-Kamera, die der Geschwindigkeitserfassung dient, ist am Laserschutzschirm der Umhausung montiert. Ihre Position wurde so gewählt, dass die Entfernung der Kamera zum Förderband über den Linienlaserscanner kalibriert werden kann. In Abbildung 26a sind die 3D-Kameras MultiSense S7 und Zivid2 an der entsprechenden Sensoraufnahme abgebildet.



(a) Stereo-/ und 3D-Kameras

(b) Linienlaserscanner mit RGB-Kamera

Abbildung 26: Sensoraufnahme

Abbildung 27 zeigt einen Blick in die Steuereinheit und Spannungsversorgung der Sensoreinheiten. Über einen 12V-Anschluss von der Traktorbatterie können die eingebetteten Systeme der OGP-KT und OGP-ROB direkt mit Strom versorgt werden. Im Schaltkasten befinden sich zwei Siemens SITOP PSU3400 Spannungswandler, die die Eingangsspannung von 12V auf 24V/4A umwandeln, um den Linienlaserscanner und die 3D-Kameras mit der benötigten Spannung zu versorgen. Ein weiterer Spannungswandler reduziert die 12V auf 5V, um den Arduino Zero und das Ublox GNSS-Modul zu betreiben. Diese Module sind derzeit für die Beleuchtung der Linienlaserscanner-Umhausung und die Erfassung der GPS-Daten zuständig. In einer späteren Phase des Projekts werden diese Module durch ein entsprechendes Embedded System ersetzt.

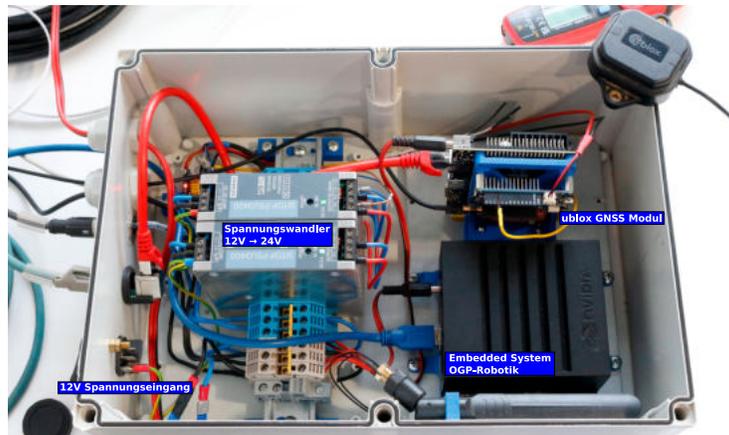


Abbildung 27: Elektronischer Schaltkasten, Sicht von Rechts

Erprobung und Videodreh Feldtag in Apensen Vom 26.09. bis 27.09.2023 nahmen OGP-KT und OGP-ROB an einem Feldversuch in Apensen bei der OGP-LW teil. Der Tag diente dem Testen der Hard- und Software sowie der Rücksprache mit dem Landwirt. Während des Versuchs wurden auch Daten durch die RGB-Kamera gesammelt, um die berührungslose Geschwindigkeitserfassung des Förderbandes zu testen und später zu analysieren.

2.6 Weitere Ergebnisse

2.6.1 Beitrag des Ergebnisses zu förderpolitischen EIP-Themen

Das Projekt PotatoScan leistet einen direkten Beitrag zu mehreren zentralen Zielen der Europäischen Innovationspartnerschaft „Landwirtschaftliche Produktivität und Nachhaltigkeit“ (EIP-AGRI). Im Fokus steht die Entwicklung eines präzisen, sensorgestützten Verfahrens zur automatisierten Erfassung und Bewertung von Kartoffeln während der Verarbeitung. Durch den Einsatz von 3D-Bildgebung und intelligenter Bildverarbeitung trägt das System zur Steigerung der Produktqualität, zur Minimierung von Verlusten und zur effizienteren Ressourcennutzung bei.

Zudem unterstützt das Projekt den digitalen Wandel in der Landwirtschaft, indem es moderne Technologien in bestehende Betriebsprozesse integriert und damit einen Beitrag zur Digitalisierung und Automatisierung in der Primärproduktion und -verarbeitung leistet. Die entwickelten Lösungen fördern Innovationen entlang der Wertschöpfungskette und stärken die Wettbewerbsfähigkeit landwirtschaftlicher Betriebe – insbesondere kleiner und mittlerer Unternehmen.

2.6.2 Nebenergebnisse

Im Verlauf des Projekts traten keine signifikanten Nebenergebnisse auf, die über die ursprünglich definierten Zielstellungen hinausgingen. Alle relevanten Beobachtungen und Erkenntnisse flossen direkt in die jeweiligen Arbeitspakete ein und wurden dort berücksichtigt.

2.6.3 Arbeiten, die zu keinem Ergebnis geführt haben

Versuche, die Bewegung der Kartoffeln allein über *Template-Matching* zu erfassen, führten zu unzureichenden Ergebnissen. Es traten z. B. Probleme mit Schattenwurf (siehe Abbildung 28) oder anderen variierenden Lichtverhältnissen auf. Um dieses Problem zu beheben, wurde versucht einen verbesserten Ansatz zu entwickeln, bei dem die Schattenzonen kontinuierlich detektiert und die Pixelverfolgung nur in den jeweiligen Bereichen durchgeführt werden. Jedoch war der Ansatz nicht stabil genug und eine präzise Geschwindigkeitsmessung nicht möglich. Weiter kam es insbesondere bei rotierenden oder beschleunigenden Objekten zu sichtbaren Verzerrungen in der Rekonstruktion, da die tatsächliche Bewegung nicht korrekt abgebildet wurde. Diese Problematik wurde mithilfe der S7 Multisens-Kamera sichtbar gemacht, deren RGB-D-Daten Abweichungen zwischen realer und angenommener Bewegung aufzeigten. Die Methode wurde daher verworfen und durch ein KI-basiertes Tracking ersetzt, das eine individuelle Verfolgung der Objekte ermöglicht.

Weiter zeigt sich dass die Zivid2 im Feldbetrieb nur unzulänglich bis gar nicht zu gebrauchen ist. Die Zivid 2 basiert auf strukturiertem Licht (mit RGB-gestützter 3D-Messung über Streifenprojektion). Diese Technik funktioniert nur unter kontrollierten Lichtverhältnissen, da Sonnenlicht (insbesondere direktes oder diffuses Tageslicht) die projizierten Muster überstrahlt. Das führt zu verrauschten oder komplett fehlerhaften Tiefenbildern. Im Laborbetrieb erwies sich die Kamera allerdings als sehr präzise und zuverlässig, solange konstante und kontrollierte Lichtverhältnisse herrschten.

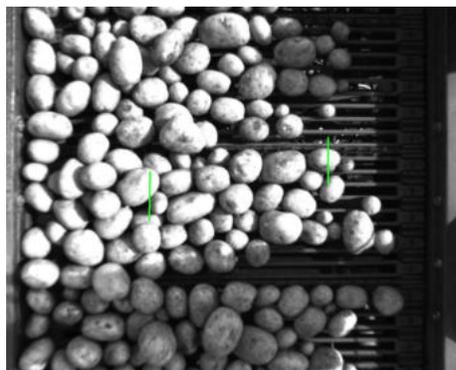


Abbildung 28: Bewegungserfassung Kartoffeln auf Förderband mit Templatematching in Fahrtrichtung.

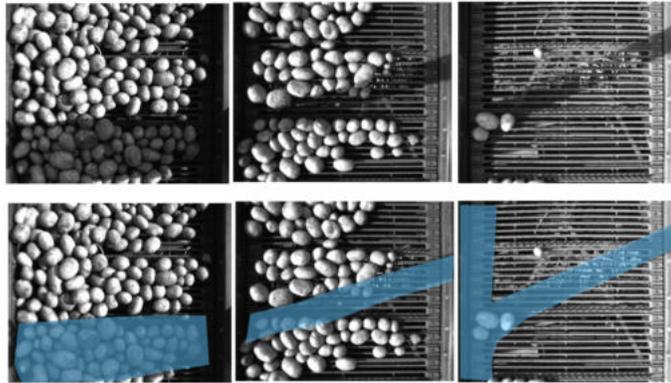


Abbildung 29: Schattenwurf durch das Gestell.

2.6.4 Mögliche weitere Verwendung von Investitionsgütern

Die im Rahmen des Projekts beschafften Investitionsgüter wurden ausschließlich projektbezogen eingesetzt und sind auf die spezifischen Anforderungen und Rahmenbedingungen des Vorhabens ausgelegt. Eine weiterführende Nutzung außerhalb des Projektkontexts ist nicht vorgesehen und aufgrund der speziellen Anpassungen sowie der funktionalen Ausrichtung der Komponenten nicht umsetzbar.

2.7 Nutzen der Ergebnisse für die Praxis

Die Übertragung der Ergebnisse und Erkenntnisse in die Praxis ist das übergreifende Ziel von PotatoScan. Im Projekt wurde ein geometrisch erfassender, verortender berührungsloser Ansatz gewählt und demonstriert, dass die Verortung und geometrische Rekonstruktion durch Linienlaserscanner von Hackfrüchten möglich ist. Die aus dem Projekt PotatoScan erhaltenen Ergebnisse stellen eine vielversprechende Grundlage für weitere Anwendungen des Konzeptes zur Georeferenzierung von Hackfrüchten in der Agrarwirtschaft dar. Es wurden wichtige Erfahrungen über die Erfassung der Geometrie dynamischer Objekte im Rahmen des Konzeptes, Anwendungen der Sensorik allgemein und die vielfältigen Anwendungsbereiche gesammelt.

Die Kartierungen stellen außerdem ein großer Mehrwert für den Landwirt dar. Es können in Zukunft diese Ergebnisse benutzt werden, um Vermarktungsstrategien zu optimieren und damit die Wirtschaftlichkeit der Betriebe zu steigern. Auch lässt sich erstmalig mit den Kartierung Informationen über den Knollenwachstum unter Erde erschließen, sodass der Landwirt in der Lage sein wird, Strategien zur Optimierung von Anbaumethoden zu entwickeln.

Des Weiteren wurden zahlreiche Erkenntnisse gewonnen, die sowohl in die Antragstellung als auch bei der Durchführung weiterer Projekte einfließen werden. Es ist geplant, dass auch nach Projektabschluss entsprechende Öffentlichkeitsarbeit in Form von Artikeln, Vorlesungen, Vorträgen und Messebesuchen durchgeführt werden, um das Konzept in die Praxis zu überführen.

2.8 Verwertung und Nutzen der Ergebnisse

Die Ergebnisse werden und wurden in unterschiedlichen Beiträgen und Vorträgen vorgestellt und publiziert.

Lehrveranstaltungen in die die Ergebnisse aus PotatoScan eingeflossen sind/ einfließen werden:

- 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 Frau Ira-Mareen Abken [HAWK] „Implementierung einer Web-basierten Benutzeroberfläche für ROS-Roboter“

Die Kartierungen der Größenverteilung (Heatmaps) stellen einmalige Informationen dar, welche Akteuren aus der Kartoffelwirtschaft vorgestellt werden sollen, sodass das Bewusstsein sensibilisiert und die Darstellung der Daten optimiert wird. Außerdem werden die Ergebnisse dazu verwendet, das Vermessungssystem auf dem Roder weiter zu optimieren, sodass Marktreife erreicht wird. Im Rahmen dessen werden weiterhin Testphasen während der Ernte durchgeführt.

2.9 Wirtschaftliche und wissenschaftliche Anschlussfähigkeit

Die im Rahmen von PotatoScan erzielten Ergebnisse werden im wissenschaftlichen Anschluss u. a. in der Lehre, in Publikationen und Vorträgen genutzt (vgl. Unterabschnitt 2.8 und Unterabschnitt 2.10). Weiterhin wird die Weiterführung der Versuche im Rahmen neuer Projektanträge in Abhängigkeit neuer Förderlinien geprüft.

Die wirtschaftliche Anschlussfähigkeit im Hinblick auf die Nutzung der Ergebnisse und das Konzept mit Methoden der Robotik, Sensorik, einer robusten Datenaufnahme und Algorithmik für den Einsatz auf einem Kartoffelroder im Agrarbereich zu einem neuartigen Gesamtsystem zu kombinieren, wird als positiv eingeschätzt. Zu Beginn von PotatoScan hatte Koiotech das Vermessungssystem EulerX, welches in kontrollierten Umgebungen wie in einer Lagerhallen eingesetzt wurde. Aus Gesprächen mit Vertretern aus der Kartoffellandwirtschaft ergab sich schnell der Bedarf einer Erweiterung des Vermessungssystem, nämlich die direkte Vermessung bei der Ernte auf dem Roder. Eine direkte Integration war indes nicht möglich, da nicht bekannt war, wie das System unter den erschwerten Bedingungen funktionieren würde. Ein enger Austausch mit einem Kartoffelproduzenten war enorm wichtig, um die Rahmenbedingungen für das System zu erörtern. Im Laufe des Projekts wurden die wirtschaftlichen Vorteile zudem nochmal deutlich. Zum einen können Landwirte mit der direkte Erhebung der Kartoffelgrößen die Vermarktung optimieren, zum anderen liegt der besondere Wert von PotatoScan darin, dass Erntemaschinen kostengünstig nachgerüstet werden können.

Langfristig besteht das Ziel darin, die Vermessungen in Applikationskarten zu übersetzen, welche direkt auf Dünger- sowie Pflanzmaschinen übertragen werden können. Somit ließe sich die Automatisierung in der Kartoffelwirtschaft weiter voranbringen.

Nach erfolgreicher Durchführung des Projekts PotatoScan wird der OGP-KT die Ergebnisse weiter nutzen, mit dem Ziel ein marktreifes Produkt für die Kartoffelwirtschaft zu entwickeln. OGP-KT und OG-LW werden weiterhin zusammen kooperieren, so hat OGP-LW angeboten weiterhin den Roder für benötigte Testphasen nutzen zu können. Geplant ist es bis Anfang 2026 das Produkt auf dem Markt zu bringen.

2.10 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.

- LinkedIn¹
- Youtube

öffentlichen Veranstaltungen und Vorführungen

- Hannover-Messe
- Plasma-for-Life-Symposium,
- Future-Forest-Forum,
- EIP-Gartenfest 2023,
- Weuthen Kartoffeltage,
- PotatoEurope,
- Wirtschaftsempfang der Stadt Göttingen 2023,
- GreenTech Innovation Day 2023

als auch in zahlreichen HAWK-Veranstaltungen (Nacht des Wissens, Industrial Lab Day, etc.) vorgestellt.

Im Rahmen des Projekts ist durch die Firma FILMFLUT ein knapp drei-minütiges Video² entstanden welches auf Veranstaltungen vorgeführt wird.

Der Abschlussbericht wird auf der EIP-Webseite eingestellt.

¹<https://www.linkedin.com/feed/update/urn:li:activity:7318614365421621249/?actorCompanyId=74481842>

²<https://www.koiotech.com/video.mp4>

3 Anhänge

1. Aufschlüsselung der bewilligten Kosten
2. Sitzungsprotokoll der OG am 30.1.2025

61040037 PotatoScan

voraussichtliches Ergebnis

13.05.2025

Anhang 1

Kostenart	Bezeichnung	Bewilligung	MA1-MA5	MA6 in Prüfung	Schlusszahlung	Gesamt
Z	Koordinator					
5.2.1	Personalausgaben	23.149,80 €	16.140,60 €	2.400,72 €	4.126,25 €	22.667,57 €
5.2.2	Öffentlichkeitsarbeit	7.000,00 €	5.126,26 €	- €	- €	5.126,26 €
5.2.3	Reisekosten	500,00 €	- €	- €	- €	- €
5.2.4	Verwaltungspauschale	3.472,47 €	2.421,09 €	360,11 €	618,94 €	3.400,14 €
	Z	34.122,27 €	23.687,95 €	2.760,83 €	4.745,19 €	31.193,97 €
OG1	Koitech					
5.3.1	Personalausgaben wiss MA	142.445,52 €	118.327,50 €	22.356,00 €	1.444,50 €	142.128,00 €
5.3.1	Personalausgaben Hiwi	5.100,80 €	5.100,80 €	- €	- €	5.100,80 €
5.3.4	Reisekosten	2.500,00 €	1.580,32 €	724,40 €	- €	2.304,72 €
5.3.6	Kauf/Leasing Instrumente	12.624,05 €	9.557,16 €	- €	- €	9.557,16 €
	OG1	162.670,37 €	134.565,78 €	23.080,40 €	1.444,50 €	159.090,68 €
OG2	HAWK					
5.3.1	Personalausgaben wiss MA	119.236,40 €	85.499,83 €	19.562,56 €	6.123,69 €	111.186,08 €
5.3.4	Reisekosten	2.000,00 €	1.239,13 €	1.126,47 €	1.348,08 €	3.713,68 €
5.3.6	Kauf/Leasing Geräte	25.000,00 €	24.008,45 €	- €	- €	24.008,45 €
	OG2	146.236,40 €	110.747,41 €	20.689,03 €	7.471,77 €	138.908,21 €
OG3	Tobaben					
5.3.1	Personalkosten	15.120,00 €	8.721,00 €	5.697,00 €	675,00 €	15.093,00 €
5.3.4	Reisekosten	888,00 €	- €	- €	- €	- €
	OG3	16.008,00 €	8.721,00 €	5.697,00 €	675,00 €	15.093,00 €
Gesamt		359.037,04 €	277.722,14 €	52.227,26 €	14.336,46 €	344.285,86 €

„PotatoScan“ – Projekttreffen

Georg Avramidis, Thomas Linkugel, Niklas Noack

30. Januar 2025

Ort:

HAWK
Von-Ossietzky-Straße 99
37085 Göttingen
Raum GöF 101

in Präsenz anwesend

- Thomas Linkugel
- Georg Avramidis
- Anthony Ioan
- Susanne Blüthgen
- Niklas Noack (in Vertretung)
- Jonas Otto

Agenda zum Projekttreffen:

1. Stand des Projektes
2. Vorhaben der einzelnen OG-Mitglieder
3. Weiterer Projektverlauf (Abschlussbericht)
4. Abgabe Zwischenbericht
5. Finanzielle Aufschlüsselung

Ablauf

- Stand des Projektes
 - Darstellung Ergebnisse Feldtag (November 2024)
 - Besprechung Ergebnisse AP B4
- Öffentlichkeitsarbeit
 - Finalisierung Imagefilm
- Besprechung Abschlussbericht
 - Darstellung der Finanzpositionen der OGPs
 - Arbeitsaufteilung zur Erstellung der einzelnen Kapitel
 - Einigung auf Erstellung mittels gemeinsamen Dokumentes in Share-Latex
 - Einigung auf ein gemeinsames Layout
 - Festlegung von Terminen zur gemeinsamer Bearbeitung des Abschlussberichtes
- Diskussion zur Weiterverwertung der Projektergebnisse
- Verabschiedung