Abschlussbericht

ROBOTREESENSE

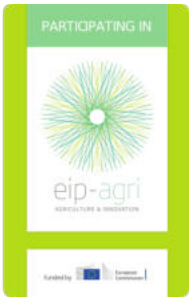
Registriernummer: 276 031 590 160 311

HAWK Göttingen

OGP-ROB

Jonas Otto (wiss. Bearbeitung)
Viktoria Knizia (stud. Unterstützung)
Franca Laabs (stud. Unterstützung)
Malte Woicke (stud. Unterstützung)
Prof. Dr. Thomas Linkugel (Projektleitung / wiss. Leitung)

Bewilligungszeitraum: 13. März 2022 bis 15. August 2024



Inhaltsverzeichnis

1 Kurzdarstellung **2**
- 1.1 Ausgangssituation und Bedarf . . . 2
- 1.2 Projektziel und konkrete Aufgabenstellung . . . 2
- 1.3 Mitglieder der OG . . . 3
- 1.4 Projektgebiet . . . 5
- 1.5 Projektlaufzeit und Dauer . . . 5
- 1.6 Budget . . . 5
- 1.7 Ablauf des Verfahrens . . . 5
- 1.8 Zusammenfassung der Ergebnisse . . . 7

2 Eingehende Darstellung **9**
- 2.1 Verwendung der Zuwendung . . . 9
  - 2.1.1 Gegenüberstellung der Planung im Geschäftsplan und der tatsächlich und abgeschlossenen Teilschritte und die Aufgaben im Rahmen der laufenden Zusammenarbeit der OG . . . 9
  - 2.1.2 Darstellung der wichtigsten finanziellen Positionen . . . 9
- 2.2 Detaillierte Erläuterung der Situation zu Projektbeginn . . . 10
  - 2.2.1 Ausgangssituation . . . 10
  - 2.2.2 Projektaufgabenstellung . . . 10
- 2.3 Ergebnisse der OG in Bezug auf . . . 12
  - 2.3.1 Wie wurde die Zusammenarbeit im Einzelnen gestaltet? . . . 12
  - 2.3.2 Was war der besondere Mehrwert bei der Durchführung des Projekts als OG? . . . 12
  - 2.3.3 Ist eine weitere Zusammenarbeit der Mitglieder der OG nach Abschluss des geförderten Projekts vorgesehen? . . . 13
- 2.4 Ergebnisse des Innovationsprojektes . . . 14
  - 2.4.1 Zielerreichung . . . 14
  - 2.4.2 Abweichung zwischen Planung und Ergebnis . . . 15
  - 2.4.3 Projektverlauf . . . 16
  - 2.4.4 Beitrag des Ergebnisses zu förderpolitischen EIP-Themen . . . 25
  - 2.4.5 Nebenergebnisse . . . 26
  - 2.4.6 Arbeiten, die zu keinem Ergebnis geführt haben . . . 26
  - 2.4.7 Mögliche weitere Verwendung von Investitionsgütern . . . 26
- 2.5 Nutzen der Ergebnisse für die Praxis . . . 27
- 2.6 Verwertung und Nutzen der Ergebnisse . . . 27
- 2.7 Wirtschaftliche und wissenschaftliche Anschlussfähigkeit . . . 27
- 2.8 Kommunikations- und Disseminationskonzept . . . 28

1 Kurzdarstellung

1.1 Ausgangssituation und Bedarf

Die nachhaltige und effiziente Pflege von Baumbeständen spielt eine zentrale Rolle für die Forst- und Landwirtschaft. Gesunde Bäume sind essenziell für die CO-Bindung, den Erhalt der Biodiversität und die wirtschaftliche Nutzung von Holz und Obst. Insbesondere in Baumschulen und Forstbetrieben erfordert die frühzeitige Erkennung von Krankheiten oder Schädlingsbefall eine regelmäßige, präzise und ressourcenschonende Kontrolle der Bäume.

Bisher sind solche Inspektionen in vielen Bereichen stark auf manuelle Prozesse angewiesen, die zeitaufwendig und personalintensiv sind. In großen Anbauflächen oder schwer zugänglichem Gelände können Symptome von Krankheiten oder Stressfaktoren oft erst spät erkannt werden, was die Bekämpfung erschwert und den wirtschaftlichen Schaden erhöht. Klassische Methoden, wie visuelle Kontrollen oder Stichprobenanalysen, sind ineffizient und führen häufig zu einem großflächigen Einsatz von Pflanzenschutzmitteln – oft präventiv und ohne genaue Kenntnis der tatsächlichen Befallsituation. Dies kann langfristig zu Resistenzen bei Schädlingen oder Krankheitserregern führen und ökologische Systeme negativ beeinflussen.

Moderne Technologien aus den Bereichen Robotik und Sensortechnik bieten neue Möglichkeiten zur nachhaltigen und präzisen Baumpflege. Durch den Einsatz autonomer Roboterplattformen, ausgestattet mit multispektralen Sensoren und künstlicher Intelligenz, können Umweltfaktoren kontinuierlich überwacht und Probleme frühzeitig erkannt werden. Insbesondere der Einsatz des Geruchssensors, der sogenannten *Electronic Nose*, ermöglicht es, Krankheiten oder Stressfaktoren anhand spezifischer Gasemissionen der Bäume zu identifizieren, noch bevor visuelle Symptome sichtbar werden.

Vor diesem Hintergrund verfolgt das Projekt **RoboTreeSense** das Ziel, ein innovatives und vollautomatisiertes System zur Überwachung und Pflege von Baumbeständen zu entwickeln. Die operationelle Gruppe (OG) setzt dabei auf interdisziplinäre Zusammenarbeit, um einen autonomen Roboter zu realisieren, der durch moderne Sensortechnik und künstliche Intelligenz eine präzise Analyse der Baumbestände ermöglicht. Diese Technologie soll eine ressourcenschonende, nachhaltige und effiziente Pflege unterstützen und langfristig zur Reduzierung des Einsatzes von Pflanzenschutzmitteln beitragen.

1.2 Projektziel und konkrete Aufgabenstellung

Ziel des Projekts RoboTreeSense war die Entwicklung eines autonomen, multisensorischen Robotersystems zur präzisen Überwachung und Analyse von Baumbeständen in Baumschulen und forstwirtschaftlichen Betrieben. Durch die Kombination moderner Robotik, multisensorischer Datenerfassung und intelligenter Datenverarbeitung soll eine frühzeitige Erkennung von Stressfaktoren, Krankheiten oder Schädlingsbefall ermöglicht werden.

Das System integriert verschiedene Sensortechnologien, darunter multispektrale Kameras, LIDAR-Scanner, GNSS-gestützte Positionsbestimmung sowie eine Electronic Nose zur Analyse gasförmiger Emissionen der Bäume. Ziel ist es, eine detaillierte und georeferenzierte Zustandsanalyse der Bäume zu erstellen und so datenbasierte Entscheidungen für gezielte Pflegemaßnahmen zu ermöglichen. Dadurch sollen klassische, großflächige Pflanzenschutzmaßnahmen reduziert und durch präzisere, nachhaltigere Eingriffe ersetzt werden.
Der entwickelte Roboter wurde speziell für den Einsatz in Baumschulen konzipiert. Er navigiert autonom durch die Baumreihen, erfasst kontinuierlich Sensordaten und analysiert diese in Echtzeit. Durch die Nutzung von maschinellen Lernverfahren werden die aufgenommenen Daten klassifiziert und mit bekannten Referenzwerten abgeglichen, um potenzielle Krankheitsmuster frühzeitig zu identifizieren.
Im Rahmen des Projekts wurde ein modular aufgebautes System entwickelt, das flexibel an verschiedene Anwendungsbereiche angepasst werden kann. Neben der technischen Entwicklung standen auch praxisnahe Feldversuche im Mittelpunkt, um die Einsatzfähigkeit und Effizienz des Systems unter realen Bedingungen zu validieren.

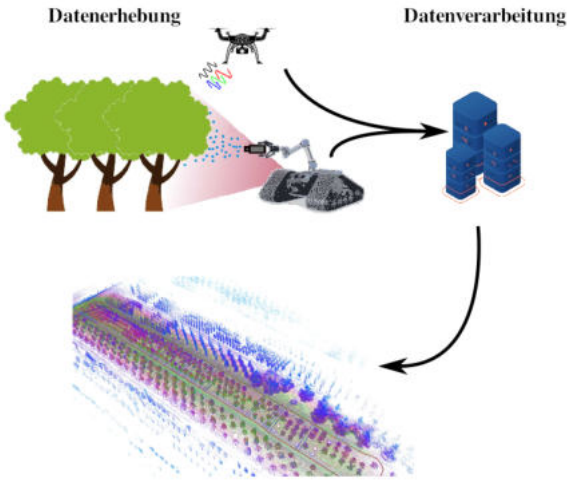


Abbildung 1: Schmetaische Darstellung der Projektidee

1.3 Mitglieder der OG

Die Hochschule für angewandte Wissenschaften und Kunst (HAWK) nimmt in der operationellen Gruppe (OG) eine zentrale Rolle ein und ist federführend für die Entwicklung der Robotik- und Sensortechnologie im Projekt RoboTreeSense verantwortlich. Insbesondere die Abteilung für Robotik (OGP-ROB) der Fakultät Naturwissenschaften und Technik in Göttingen übernimmt die Koordination der technischen Entwicklung und Integration der Sensormodule auf der bodengebundenen Plattform.

HAWK-Robotik (OGP-ROB): Der Lehrstuhl für Robotik und Embedded Systems verfügt über umfangreiche Expertise in den Bereichen autonome Robotik, Sensorfusion und künstliche Intelligenz. Mit modern ausgestatteten Laboren für Automatisierungstechnik, Embedded Systems und das Autonomous Mobile Robotics Lab (AMRL) steht eine hochmoderne Forschungsinfrastruktur zur Verfügung. Diese ermöglicht die Entwicklung, Erprobung und Optimierung der im Projekt eingesetzten Robotik- und Sensorsysteme.
Im Rahmen von RoboTreeSense entwickelt und implementiert die HAWK ein mobiles, autonomes Robotersystem, das mit multispektraler Sensorik, LIDAR-Technologie, GNSS-Navigation und einer Electronic Nose ausgestattet ist. Besondere Schwerpunkte liegen auf der Integration dieser Technologien in ein Gesamtsystem sowie auf der Entwicklung intelligenter Algorithmen zur Datenanalyse und Navigation.
Durch die interdisziplinäre Zusammenarbeit innerhalb der HAWK und mit den weiteren OG-Partnern leistet die Hochschule einen wesentlichen Beitrag zur nachhaltigen Automatisierung und Digitalisierung der Baumpflege.

Mitglied	**Mitarbeiter und Funktion**	**Aufgabe**
OGP-ROB (HAWK)	Prof. Thomas Linkugel Projektleitung	Projektleitung
	Jonas Wiss. Mitarbeiter	Federführend verantwortlich für die Betreuung des Projektes, sowie die Umsetzung der Arbeitspakete.
	Malte Woicke Wiss. Hilfskraft	Unterstüzung (u. a.) bei Flächenbegehungen, Fotografien sowie Zustandsanalyse. Des weiteren Vorstellung des Projektes (u. a.) bei der KWF-Tagung.
	Franca Laabs Wiss. Hilfskraft	Unterstüzung (u. a.) bei Flächenbegehungen, Fotografien sowie Zustandsanalyse. Des weiteren Vorstellung des Projektes (u. a.) bei der KWF-Tagung.
	Viktoria Knizia Wiss. Hilfskraft	Unterstüzung (u. a.) bei Flächenbegehungen, Fotografien sowie Zustandsanalyse. Des weiteren Vorstellung des Projektes (u. a.) bei der KWF-Tagung.

Tabelle 1: Mitarbeiter und deren Funktionen

1.4 Projektgebiet

Das Untersuchungsgebiet befindet sich im nordwestlichen Teil Niedersachsens, Deutschland, in der Nähe des Dorfes Aschhausen. Alle vier Plantagen liegen auf dem Firmengelände der "Bonk Pflanzen Handels GmbH". Die vier Teilgebiete befinden sich alle innerhalb von 1000 Metern voneinander und haben ein flaches Gelände mit einer Höhe über dem Meeresspiegel von etwa 10 Metern NHN. Der Boden wird von sandigen Podsol-Gleyen und Pseudogleyen dominiert. Der jährliche Niederschlag durchschnittlichen beträgt Temperatur 857 mm von 10,14 bei °C. einer Das Aufzuchtgebiet der Baumschule BONK umfasst insgesamt ca. 85 Hektar Gesamtfläche.

1.5 Projektlaufzeit und Dauer

Das Projekt lief vom 01.05.2022 bis zum 31.03.2025.

1.6 Budget

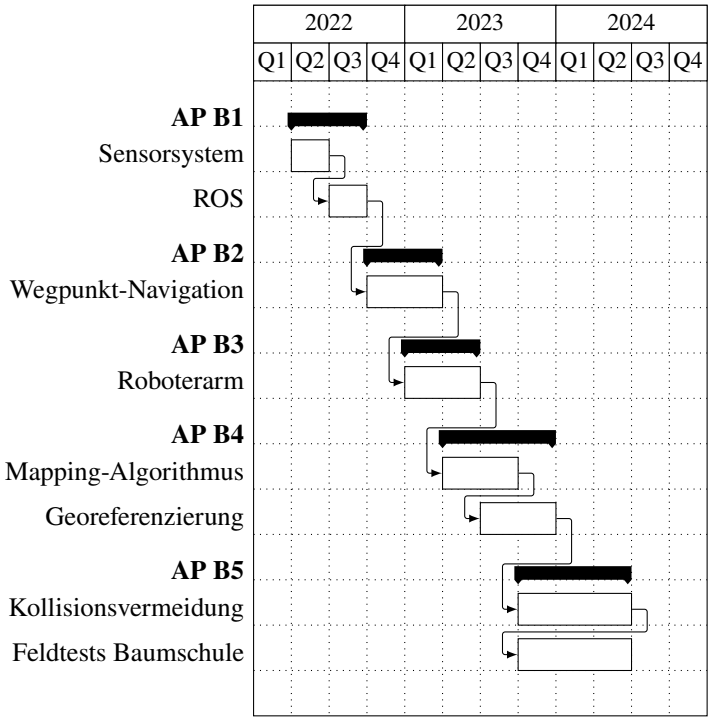
Insgesamt wurden 448.501,25 € als Gesamtausgaben (netto) bewilligt.
Für das OG-Mitglied Robotik (**OGP-ROB**) wurden insgesamt 223.232,62 € vorgesehen.

1.7 Ablauf des Verfahrens

Die **OGP-ROB** startete ihre Arbeiten im Juni 2022 mit der Einstellung von Herrn Jonas Otto als wissenschaftlicher Mitarbeiter für die Entwicklung der autonomen Roboterplattform. Zunächst erfolgte eine umfassende Recherche und Beschaffung geeigneter Hardware- und Sensorkomponenten für das Multisensorsystem, das im Rahmen von Arbeitspaket B1 („Konzeptionierung und Aufbau des Multisensorframeworks“) und Arbeitspaket B2 („Pfadplanung und Navigation des mobilen Roboters“) entwickelt wurde. Da es zu Lieferverzögerungen bei der geplanten Roboterplattform kam, wurden für die ersten Tests alternative Trägerplattformen und Ersatzsensoren verwendet. Bereits in dieser frühen Phase wurden Treiber für verschiedene Sensormodule programmiert und erste Algorithmen zur Sensordatenfusion erarbeitet. Gleichzeitig begann die Entwicklung einer eigenen Odometrie-Berechnung, da sich herausstellte, dass die von Clearpath bereitgestellte Lösung für die Anforderungen des Projekts nicht präzise genug war.
Im Laufe des Jahres 2023 konnte der nach werksseitigem Umbau gelieferte Roboter von Mattro in das System integriert werden. Die Navigations-Algorithmen aus Arbeitspaket B2 wurden weiterentwickelt und optimiert, wobei eine zweite IMU hinzugefügt wurde, um eine höhere Genauigkeit der Positionsbestimmung zu gewährleisten. Gleichzeitig begann die Implementierung der Mapping-Technologie im Rahmen von Arbeitspaket B4 („Kartenerzeugung und Georeferenzierung“), bei der durch Fusion der Punktwolken aus verschiedenen Sensordaten ein dreidimensionales Umgebungsmodell erzeugt wurde. Erste Tests im Innenhof der HAWK sowie in der Baumschule zeigten vielversprechende Ergebnisse, jedoch mussten noch Stabilitätsprobleme im Mapping-Algorithmus behoben werden.

Die Electronic Nose (Arbeitspaket B3) konnte aufgrund von Lieferverzögerungen erst später vollständig in das System integriert werden. Im Jahr 2024 wurde schließlich der BME680-Sensor von Bosch als optimale Lösung für das Projekt identifiziert, da er eine verbesserte Vorverarbeitung der Sensordaten ermöglicht. Erste Tests zur Erkennung von Baumstressfaktoren wurden durchgeführt. Zudem wurde die Georeferenzierung weiter optimiert, indem die RTK-GNSS-Signalstärke durch die Beschaffung einer SIM-Karte für den SAPOS-Kartendienst verbessert wurde, wodurch eine Genauigkeit von bis zu 1 cm erreicht werden konnte.
Parallel dazu wurde im Rahmen von Arbeitspaket B5 („Kollisionsvermeidung“) ein Echtzeit-Algorithmus entwickelt, der Hindernisse in den Baumreihen zuverlässig erkennt und automatisch eine alternative Route berechnet. Die Navigation wurde weiter optimiert, um eine sichere und effiziente Bewegung des Roboters innerhalb der Baumschule zu gewährleisten.

Der geplante Projektverlauf lässt sich wie folgt zusammenfassen:



Der tatsächliche Projektablauf weicht aufgrund von bereits angedeuteten Umständen hiervon ab und wird im Folgenden in gleicher Art dargestellt wird. Die zu betrachtenden Differenzen der beiden zeitlichen Verläufen werden später ausführlicher erklärt.

1.8 Zusammenfassung der Ergebnisse

Das zentrale Ziel des Projekts RoboTreeSense war die Entwicklung eines autonomen Robotersystems zur präzisen Überwachung und Erfassung von Baumbeständen. Im Laufe des Projekts wurden alle wesentlichen technischen und wissenschaftlichen Komponenten erfolgreich umgesetzt, sodass eine vollautomatische Datenerfassung und georeferenzierte Kartierung ermöglicht wurden.
Durch die Integration verschiedener Sensoren, darunter multispektrale Kameras, LIDAR-Scanner, ein RTK-GNSS-System sowie die Electronic Nose, konnte ein leistungsfähiges Multisensorsystem entwickelt werden, das eine detaillierte Erfassung der Bäume und ihrer Umgebung erlaubt. Der Roboter navigiert autonom durch die Baumreihen und sammelt kontinuierlich Sensordaten, die zur Analyse von Baumstrukturen und Umgebungsparametern genutzt werden. Die Electronic Nose ermöglicht es, bestimmte gasförmige Verbindungen zu detektieren, die für die Charakterisierung von Bäumen und ihrer Umgebung relevant sind.
Ein wesentliches Ziel war zudem die georeferenzierte Kartierung der erfassten Daten. Durch die Einbindung eines hochpräzisen RTK-GNSS-Systems konnte die Positionierung des Roboters in der Baumschule auf wenige Zentimeter genau verbessert werden. Dies ermöglichte die Erstellung hochaufgelöster 3D-Umgebungskarten, die mit Satellitendaten kombiniert wurden und als Grundlage für eine strukturierte Dokumentation der Baumbestände dienen.
Das im Projekt entwickelte autonome Robotersystem erfüllt im Kern folgende Funktionen:

- Vollautomatisierte Datenerhebung:
  - Autonome Navigation durch die Baumreihen
  - Aufnahme multisensorieller Daten (bildgebend und chemisch)
  - Georeferenzierte Dokumentation der erfassten Daten
- Erstellung digitaler Karten:
  - Fusion von Sensordaten zur Erstellung eines 3D-Modells
  - Verknüpfung der Kartendaten mit globalen Koordinaten
  - Erfassung langfristiger Veränderungen im Baumbestand
- Reaktive Maßnahmen zur gezielten Baumpflege:
  - Dokumentation von Veränderungen innerhalb der Baumschule
  - Verbesserung der Planbarkeit von Pflegemaßnahmen
  - Grundlage für weiterführende Forschungs- und Anwendungsprojekte

Mit der erfolgreichen Umsetzung dieser Komponenten leistet das Projekt einen wichtigen Beitrag zur dokumentationsgestützten Baumpflege, indem es eine detaillierte Erfassung und langfristige Nachverfolgbarkeit der Baumbestände ermöglicht. Die gewonnenen Erkenntnisse bieten zudem Potenzial für weiterführende Entwicklungen im Bereich der autonomen Agrarrobotik und digitalen Forstwirtschaft.

The central goal of the RoboTreeSense project was the development of an autonomous robotic system for the precise monitoring and recording of tree populations. Throughout the project, all essential technical and scientific components were successfully implemented, enabling fully automated data acquisition and georeferenced mapping.
By integrating various sensors, including multispectral cameras, LIDAR scanners, an RTK-GNSS system, and the Electronic Nose, a powerful multisensor system was developed that allows for a detailed recording of trees and their surroundings. The robot autonomously navigates through tree rows, continuously collecting sensor data used for analyzing tree structures and environmental parameters. The Electronic Nose enables the detection of specific gaseous compounds relevant for the characterization of trees and their surroundings.
Another key objective was the georeferenced mapping of the collected data. By incorporating a high-precision RTK-GNSS system, the positioning accuracy of the robot within the tree nursery was improved to within a few centimeters. This facilitated the creation of high-resolution 3D environmental maps, which were combined with satellite data and serve as the basis for structured documentation of tree populations.
The autonomous robotic system developed in the project fulfills the following core functions:

- *Fully automated data acquisition:*
  - *Autonomous navigation through tree rows*
  - *Collection of multisensory data (imaging and chemical)*
  - *Georeferenced documentation of the recorded data*
- *Creation of digital maps:*
  - *Fusion of sensor data to generate a 3D model*
  - *Linking map data with global coordinates*
  - *Recording long-term changes in the tree population*
- *Reactive measures for targeted tree care:*
  - *Documentation of changes within the tree nursery*
  - *Improved planning of maintenance measures*
  - *Basis for further research and application projects*

With the successful implementation of these components, the project makes a significant contribution to documentation-based tree care by enabling detailed recording and long-term traceability of tree populations. The findings also offer potential for further developments in the field of autonomous agricultural robotics and digital forestry.

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

Die Verzögerung bei der Lieferung der ursprünglich vorgesehenen Roboterplattform führte dazu, dass auf eine Ersatzträgerplattform umgestiegen werden musste. Auf dieser wurde die Implementierung der Navigationsalgorithmen erfolgreich abgeschlossen. Die Übertragung dieser Algorithmen auf die Hauptträgerplattform brachte jedoch unerwartete Schwierigkeiten mit sich und konnte nur teilweise realisiert werden. Die erreichte Robustheit ist derzeit nicht ausreichend, um einen sorgenfreien Einsatz in der Baumschule zu gewährleisten. So ist beispielsweise die Hinderniserkennung weniger präzise, was die Gefahr birgt, dass bei einer vollständig autonomen Fahrt Bäume beschädigt werden. Aus diesem Grund ist zum aktuellen Zeitpunkt eine Überwachung durch geschultes Aufsichtspersonal erforderlich.

Des Weiteren konnte der Geruchssensor der OGP-AWI nicht rechtzeitig fertiggestellt werden, sodass auf den BME860 Sensor von Bosch zurückgegriffen werden musste. Aufgrund diverser Verzögerungen erfolgte diese Umstellung jedoch so spät, dass leider keine Feldversuche mehr durchgeführt werden konnten.

Abgesehen von der Reihenfolge der Durchführung wurde jedoch alles wie im Antrag beschrieben umgesetzt.

2.1.2 Darstellung der wichtigsten finanziellen Positionen

Position (OGP-ROB)	bewilligt inkl. Kürzung	abgerufen	Differenz
5.3.1 Personalausgaben WiMi	97.690,01 €	97.690,03 €	−0,02 €
5.3.1 Personalausgaben HiWi	6009,38 €	4780,08 €	1229,30 €
5.3.4 Reisekosten	3917,27 €	867,28 €	3049,99 €
5.3.6 Kauf v. Instrumenten	114.058,05 €	89.689,64 €	24.368,41 €
Gesamt	221.674,71 €	193.027,03 €	28.647,68 €

Tabelle 2: Darstellung der wichtigsten finanziellen Positionen

OGP ROB - HAWK Robotik

- **Personalkosten**: Für die wissenschaftliche Bearbeitung der Arbeitspakete für OGP-ROB wurde Herr Jonas Otto im Zeitraum vom 15.6.2022 bis 31.3.2024 befristet beschäftigt. Weiter waren Herr Malte Woicke im Zeitraum vom 1.3.2024 - 30.6.2024, Frau Viktoria Knizia im Zeitraum vom 1.3.2024 - 31.8.2024 und Frau

Franca Laabs im Zeitraum vom 1.3.2024 - 30.6.2024 als studentische Hilfskräfte tätig.

- **Materialien**: Die wichtigsten beschafften Posten sind der Rovo der Firma MATTRO, der Roboterarm UR5e mit Manipulator sowie die Sensoren: Ouster LIDAR, Emlid RTK-GNSS, RGB-Kamera und die Multispektralkamera.

2.2 Detaillierte Erläuterung der Situation zu Projektbeginn

Zu Beginn des Projekts *RoboTreeSense* gab es keine bestehende Lösung für eine vollautomatisierte und georeferenzierte Erfassung von Baumbeständen in Baumschulen. Zwar existieren einzelne Technologien zur Umgebungserfassung, jedoch fehlte ein Gesamtkonzept, das eine mobile Robotikplattform mit multisensorieller Datenerhebung und präziser Navigation kombiniert.
Die manuelle Baumkontrolle ist zeitaufwendig, fehleranfällig und in großflächigen Beständen kaum effizient durchführbar. Insbesondere die frühzeitige Erkennung von Veränderungen in den Beständen, etwa durch Umwelteinflüsse oder Wachstumsunterschiede, erforderte bisher eine arbeitsintensive Begehung der Flächen. Es bestand daher ein erheblicher Bedarf an einer technologischen Lösung, die eine regelmäßige und systematische Erfassung der Bestände ermöglicht.

2.2.1 Ausgangssituation

Die HAWK übernahm im Rahmen des Projekts die Entwicklung einer autonomen Robotikplattform, die in der Lage sein sollte, sich selbstständig durch Baumreihen zu bewegen und dabei multisensorielle Umgebungsdaten zu erfassen. Eine besondere Herausforderung bestand in der Integration verschiedener Sensoren und der Fusion der erhobenen Daten zu einem präzisen digitalen Abbild der Umgebung.

2.2.2 Projektaufgabenstellung

Die Aufgabenstellung ergab sich aus dem Ziel, ein autonomes Robotersystem zu entwickeln, das eine kontinuierliche Erfassung und Dokumentation von Baumbeständen ermöglicht. Für die HAWK-Abteilung für Robotik (OGP-ROB) ergaben sich dabei folgende konkrete Aufgabenbereiche:

- Entwicklung und Integration eines Multisensorsystems auf einer mobilen Robotikplattform
  - Auswahl und Implementierung geeigneter Sensoren (LIDAR, RGB-Kamera, RTK-GNSS, Electronic Nose)
  - Anpassung der Hardware zur Integration der Sensortechnik
  - Sicherstellung der Echtzeit-Datenerfassung und -verarbeitung
- Navigation und Pfadplanung für den autonomen Betrieb
  - Entwicklung eines Algorithmus zur autonomen Navigation durch Baumreihen

  - Implementierung einer stabilen Odometrie und Wegpunktnavigation
  - Nutzung von GNSS-Daten zur genauen Positionsbestimmung
- Synchronisation und Fusion der Sensordaten
  - Verarbeitung und Zusammenführung von LIDAR-, Kamera- und GNSS-Daten
  - Entwicklung eines robusten Datenmodells zur Darstellung der Umgebung
  - Erstellung einer georeferenzierten 3D-Karte des Testgebiets
- Entwicklung eines Algorithmus zur Hinderniserkennung und Kollisionsvermeidung
  - Echtzeit-Erfassung von Hindernissen durch Multiline-LIDAR
  - Implementierung adaptiver Pfade zur Umfahrung von Hindernissen
- Implementation der Electronic Nose
  - Hardwareimplementation eines Roboterarms
  - Hard- und Softwareimplementation des Sensors
  - Gezieltes „beschnuppern“ eines Baumes

Durch die Umsetzung dieser Aufgaben konnte die HAWK maßgeblich zur Entwicklung eines innovativen Robotersystems beitragen, das eine effiziente und nachhaltige Baumbestandserfassung ermöglicht.

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. Die Treffen fanden sowohl online als auch vor Ort statt, wobei regelmäßige Abstimmungstermine den Austausch erleichterten und eine effiziente Zusammenarbeit sicherstellten.
Kleinere Anliegen wurden flexibel per Telefon oder E-Mail geklärt, und durch die räumliche Nähe zwischen den Partnern konnten logistische Herausforderungen kurzfristig gelöst werden. Versuchsflächenbesuche und Demonstrationen ermöglichten eine praxisnahe Bewertung der Entwicklungen, während die technischen Anforderungen und Machbarkeiten durch die Beteiligung aller Partner abgestimmt wurden.

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

Durch die interdisziplinäre Zusammenarbeit innerhalb der Operationellen Gruppe konnten verschiedene technologische Ansätze und Methoden aus unterschiedlichen Fachbereichen zusammengeführt und in einen wirtschaftlichen Kontext übertragen werden. Besonders hervorzuheben sind folgende Punkte:

- **Integration und Vergleich von Punktwolkendaten:** Ein wesentliches technisches Ergebnis war die Kombination und der Vergleich von Punktwolkendaten aus unterschiedlichen Quellen. Die OGP-AWI nutzte Drohnentechnologie zur Erfassung großflächiger Punktwolken aus der Luft, während die HAWK ein bodengebundenes Sensorsystem auf einem Pflanzroboter entwickelte. Der direkte Vergleich dieser Punktwolken erlaubt eine detaillierte Validierung der Datenqualität sowie eine präzisere Modellierung der Pflanzenstruktur. Die Kombination beider Methoden führte zu einer umfassenden räumlichen Erfassung der Pflanzenbestände, was insbesondere für die spätere Analyse von Wachstumsparametern und Stressfaktoren von großem Nutzen ist.

- **Nutzung der Expertise der Universität zur Integration geeigneter Gassensorik:** Obwohl die von der Universität entwickelte Ëlectronic Nose"nicht direkt in das System integriert wurde, konnte umfassend auf die wissenschaftliche Expertise der Universität zurückgegriffen werden. Durch den regelmäßigen Austausch zwischen den Partnern wurden wertvolle Erkenntnisse zur Gassensorik für die Anwendung im Projekt gewonnen. Insbesondere durch die gemeinsame Analyse bestehender Technologien konnten fundierte Entscheidungen zur Auswahl eines geeigneten Sensors getroffen werden. So wurde letztlich der Bosch BME680 als vielversprechende Lösung für die Detektion von pflanzenspezifischen Reaktionen auf Umweltstress oder Krankheiten ausgewählt.

- **Bedeutung der Expertise der Baumschule für praxisnahe Lösungen:** Die umfassenden praktischen Kenntnisse der Baumschule erwiesen sich als essenziell für den erfolgreichen Projektverlauf. Bei den regelmäßigen Feldversuchen wurden auftretende Herausforderungen direkt vor Ort gemeinsam diskutiert, wodurch

praxisnahe Lösungen entwickelt werden konnten. Durch diesen direkten Austausch konnten theoretische Konzepte aus der Forschung in praktikable, anwendungsorientierte Maßnahmen überführt werden. Dies führte dazu, dass Anpassungen an den eingesetzten Technologien vorgenommen wurden, um ihre Tauglichkeit unter realen Bedingungen zu optimieren.

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

Eine weitere Zusammenarbeit der OG-Mitglieder ist geplant. Derzeit wird ein neues Projekt mit dem Projektpartner OGP-BPH, also der Baumschule, erarbeitet, und ein Antrag zur Förderung steht kurz vor der Einreichung. Darüber hinaus ist eine verstärkte Kooperation im Bereich der wissenschaftlich-studentischen Ausbildung vorgesehen, insbesondere durch die gemeinsame Betreuung von Abschlussarbeiten und die Integration gewonnener Erkenntnisse in die Lehre.

2.4 Ergebnisse des Innovationsprojektes

2.4.1 Zielerreichung

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

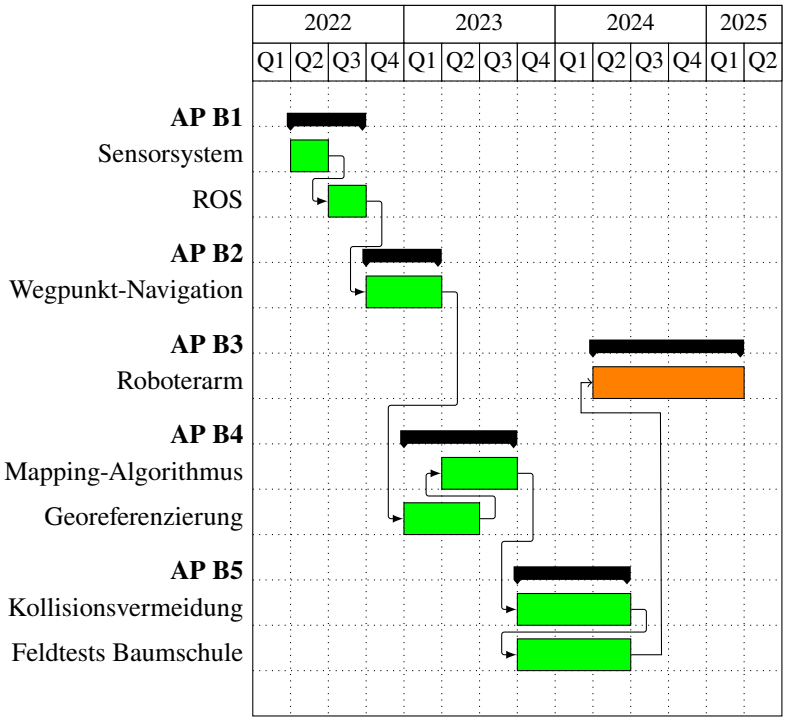
OGP	Aufgabe	Erfüllt	Ergänzung
ROB	1. Konzeptionierung und Aufbau des Multisensorframeworks	Ja	-
	2. Pfadplanung und Navigation des mobilen bodengebundenen Roboters	Ja	-
	3. Integration und Implementierung des Ausliegers für die *Electronic Nose*	Ja	leider keinEinsatz des Sensors im Feldversuch aufgrund von zeitlichen Verzügen
	4. Kartenerzeugung (Map-building) und Georeferenzierung	Ja	Ergebnisse sehr erfolgreich kombiniert
	5. Kollisionsvermeidung	Ja	-

Tabelle 3: Aufgabestellungen und Zielerreichung

Das Ziel, eine hochautomatisierte Sensoreinheit zur Analyse von Baumgesundheit in Kombination mit KI-gestützter Datenauswertung zu entwickeln, konnte größtenteils erfolgreich erreicht werden. Die Daten werden vollautomatisiert aufgenommen und georeferenziert. Lediglich die automatisierte Analyse der Daten ist noch offen. Durch die enge Zusammenarbeit zwischen den Projektpartnern wurden unterschiedliche Technologien aus verschiedenen Fachdisziplinen integriert und validiert.
Besonders hervorzuheben ist die erfolgreiche Fusion von Punktwolkendaten aus Drohnenaufnahmen der Universität Göttingen mit den vom Roboter der HAWK erfassten Punktwolken. Diese Zusammenführung ermöglichte eine verbesserte dreidimensionale Modellierung von Bäumen und eine detailliertere Analyse der Baumstruktur.
Ein weiterer zentraler Aspekt des Projekts war die Auswahl geeigneter Sensorik für die Luftanalyse. Hierbei wurde intensiv auf das Fachwissen der Universität Göttingen zurückgegriffen. Durch den regen Austausch konnte der Bosch BME680 als optimaler Sensor für die Anwendung in RoboTreeSense identifiziert werden.
Die enge Kooperation mit der Baumschule erwies sich als äußerst wertvoll für die praxisnahe Evaluierung der entwickelten Systeme. Herausforderungen, die während der Feldversuche auftraten, wurden in direkter Abstimmung mit den Experten vor Ort analysiert und entsprechende Optimierungen vorgenommen. Dies führte zu praxisgerechten und anwendungsorientierten Lösungen und Ideen, die für zukünftige Projekte weiterverwendet werden können.

2.4.2 Abweichung zwischen Planung und Ergebnis

Bedingt durch herstellerseitige Verzögerungen bei der Lieferung des Rovo-Roboters sowie einiger Sensorkomponenten mussten Anpassungen im Projektablauf vorgenommen werden. Ursprünglich geplante Arbeitspakete wurden teilweise umstrukturiert oder in ihrer Reihenfolge geändert, um den Projektfortschritt aufrechtzuerhalten.



Die HAWK-Abteilung für Robotik (OGP-ROB) begann ihre Arbeiten im Mai 2022 mit der Integration und Kalibrierung des Multisensorframeworks (Arbeitspaket B1). Aufgrund von Verzögerungen bei der Lieferung der finalen Robotikplattform wurde zunächst eine Ersatzplattform (Husky von Clearpath) verwendet, um erste Sensortests durchzuführen. Dies ermöglichte die frühzeitige Entwicklung von Softwaretreibern und Schnittstellen für die eingesetzten Sensoren. Gleichzeitig wurde die Odometrie-Berechnung überarbeitet, da sich die von Clearpath bereitgestellte Lösung als nicht präzise genug erwies.
Parallel dazu wurde mit der Entwicklung der Pfadplanung und Navigation (Arbeitspaket B2) begonnen. Der Algorithmus zur Wegpunkt-Navigation wurde implementiert, jedoch zeigten erste Tests, dass die Genauigkeit für den Einsatz in der Baumschule noch nicht ausreichte. Als Reaktion darauf wurde eine zweite IMU integriert, um eine präzisere Positionsbestimmung zu gewährleisten. Die Arbeiten zur Wegpunktnavigation wurden planmäßig weitergeführt und nach mehreren Optimierungen erfolgreich umgesetzt.

Das Arbeitspaket B3 („Integration des Roboterarms und der Electronic Nose“) musste aufgrund langer Lieferzeiten für die Electronic Nose verschoben werden. Um Verzögerungen zu kompensieren, wurde stattdessen Arbeitspaket B4 („Kartenerzeugung und Georeferenzierung“) vorgezogen. Erste Algorithmen zur Kartierung wurden implementiert, jedoch gab es zu Beginn Stabilitätsprobleme bei der Fusion der Sensordaten. Im weiteren Verlauf wurde die RTK-GNSS-gestützte Georeferenzierung erfolgreich integriert, wodurch eine Genauigkeit von bis zu 1 cm erreicht werden konnte.
Nach Eintreffen der Electronic Nose wurde die Integration des Sensorsystems in das bestehende Robotersystem durchgeführt. In umfangreichen Tests wurde der Bosch BME680-Sensor als optimal für das Projekt identifiziert, da er eine verbesserte Vorverarbeitung der Messwerte bietet. Gleichzeitig wurde das Mapping-System weiterentwickelt und durch die Fusion von Drohnen- und bodengebundenen Sensordaten erweitert, um eine vollständigere Darstellung der Baumschulumgebung zu ermöglichen.
Im Bereich der Kollisionsvermeidung (Arbeitspaket B5) wurde ein Echtzeit-Algorithmus implementiert, der es dem Roboter ermöglicht, Hindernisse in den Baumreihen zu erkennen und alternative Routen zu berechnen. Während der Testläufe wurde festgestellt, dass das RTK-GNSS-Signal in dichten Baumreihen teilweise ausfiel. Um dieses Problem zu lösen, wurde eine SIM-Karte beschafft, die es ermöglicht, SAPOS-Daten für eine stabilere Positionsbestimmung zu nutzen.
Mit der erfolgreichen Umsetzung dieser Maßnahmen konnte die HAWK ihre wesentlichen Aufgaben innerhalb des Projekts abschließen.

2.4.3 Projektverlauf

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

OGP-ROB - Arbeitspaket B1:
Das in **Arbeitspaket B1** festgelegte Ziel, ein leistungsfähiges Multisensorframework auf der ROVO-Plattform zu integrieren, wurde erfolgreich realisiert (vgl. Abbildung 2). Im Zuge dieser Umsetzung wurden eine Vielzahl unterschiedlicher Sensoren verbaut, die es dem Roboter ermöglichen, autonom zu fahren und komplexe Aufgaben zu bewältigen. Hierzu zählen unter anderem mehrere Inertial Measurement Units (IMUs), RTK-GNSS-Empfänger sowie zwei Ouster LIDAR-Laserscanner. Diese Sensoren spielen nicht nur eine Schlüsselrolle für das autonome Fahren, sondern werden später auch zur präzisen Kartenerstellung und zur effizienten Hinderniserkennung eingesetzt.

Darüber hinaus wurden diverse bildgebende Sensoren integriert, darunter eine Multispektralkamera und eine RGB-Kamera, die es dem Roboter ermöglichen, seine Umgebung in verschiedenen Spektralbereichen zu erfassen. Für die Nutzung der *Electronic Nose* wurde ein UR10e Roboterarm mit einem daran montierten Manipulator in das

System eingebaut, was die Flexibilität und Vielseitigkeit der Plattform zusätzlich erhöht.

Um all diese Komponenten in das System zu integrieren und einen leistungsstarken PC zu verbauen, wurde eine maßgeschneiderte Aufbaukonstruktion entwickelt und erfolgreich umgesetzt. Diese Konstruktion gewährleistet nicht nur die physische Integration der verschiedenen Geräte, sondern stellt auch sicher, dass alle Sensoren über den Roboterakku zentral mit Strom versorgt werden. Durch diese zentrale Energieversorgung sind alle Komponenten zudem über den Not-Aus-Mechanismus abgesichert, was für zusätzliche Sicherheit während des Betriebs sorgt.

Abbildung 2: Roboterplattform ROVO im finalen Stadium mit Sensorik und Roboterarm als Aufnahme für die *Electronic Nose*

OGP-ROB - Arbeitspaket B2:

Im Rahmen des **Arbeitspakets B2** mit dem Titel „*Pfadplanung und Navigation des mobilen bodengebundenen Roboters* wurde ein globaler Pfadplanungs- und Navigationsalgorithmus entwickelt. Dieser besteht aus zwei wesentlichen Komponenten: der lokalen und der globalen Pfadplanung. Die globale Pfadplanung agiert im Koordinatensystem der Erde, definiert Zielpunkte und legt die grobe Richtung des Pfades fest.

Im Gegensatz dazu ist die lokale Pfadplanung für die genaue Berechnung des tatsächlichen Pfades sowie die Hinderniserkennung zuständig. Darüber hinaus ermöglicht die lokale Pfadplanung die dynamische Anpassung des Pfades, wenn unerwartete Hindernisse, wie etwa Personen, auftreten. Die Hinderniserkennung selbst wurde in einem späteren Arbeitspaket entwickelt und wird dort detaillierter behandelt. Aufgrund der bestehenden Struktur des Navigationsalgorithmus ist diese jedoch bereits fest verankert und schwer aus der Beschreibung herauszulassen. Des Weiteren wird die Georeferenzierung zu einem späteren Zeitpunkt von höherer Relevanz sein, stellt jedoch bereits jetzt einen fundamentalen Bestandteil der Navigationsstrategie dar.
Das Hauptaugenmerk dieses Arbeitspakets lag auf der Lösung der Navigationsproblematik, konkret auf der Beantwortung der Fragen: *Wo befinde ich mich? Wo muss ich hin? Und auf welchem Pfad erreiche ich mein Ziel?* Zu Beginn wurde die Beantwortung der ersten beiden Fragen, die Standortbestimmung, hauptsächlich durch GPS-Daten realisiert. Allerdings zeigte sich in mehreren Feldversuchen, dass GPS-basierte Daten aufgrund ihrer Instabilität nicht ausreichend zuverlässig sind, um eine vertrauenswürdige Grundlage für die Navigation im Kontext dieses Projekts zu bieten. Folglich wurde intensiv an einer GPS-unabhängigen Lokalisierung gearbeitet, um auch im Falle eines Ausfalls oder Driftens der GPS-Daten eine zuverlässige Positionierung zu gewährleisten. Derzeit erfolgt eine Überprüfung der GPS-Daten mittels Bewegungsdaten, wobei bei festgestellten Abweichungen die GPS-Daten verworfen werden, da diese zu erheblichen Schwankungen neigen.

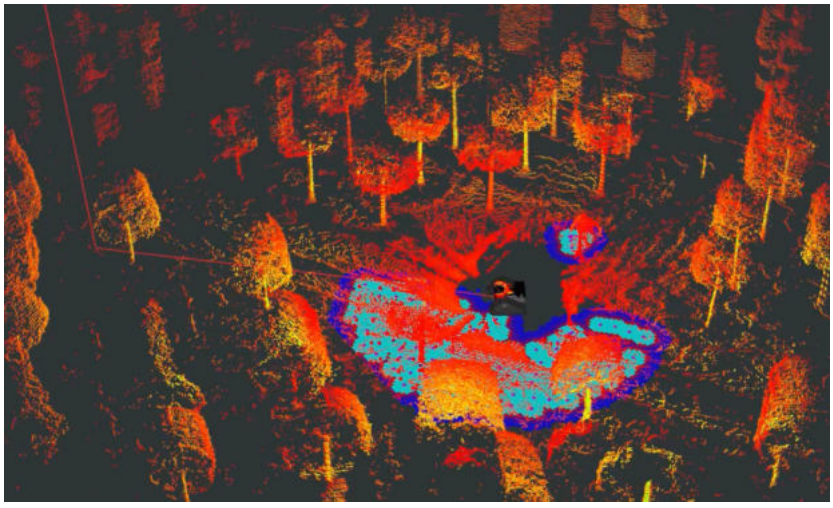


Abbildung 3: Roboterplattform bei der autonomen Navigation in der Baumschule

In Abbildung 3 sind alle relevanten Systeme im praktischen Einsatz abgebildet. Es sei an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass das Bildschirmfoto noch von der Ersatzträgerplattform *Husky* stammt. Die Messwerte der LIDAR-Laserscanner, also die 3D-Punktwolken der Bäume und der umgebenden Landschaft, sind für das menschliche Auge in Form von gelb bis rot dargestellten Bäumen deutlich sichtbar. Am linken Rand

des Bildes ist eine rote Linie zu erkennen, die das GPS-Ziel der aktuellen Navigationsfahrt markiert. Die Verbindungslinie zwischen diesem Ziel und der zentral positionierten Roboterplattform stellt das Ergebnis der globalen Pfadplanung dar, da der kürzeste und effizienteste Pfad zunächst als gerade Linie betrachtet wird. Im Falle von auftretenden Hindernissen wird die lokale Pfadplanung die ursprünglich gerade Linie anpassen und den Pfad entsprechend kurviger gestalten. In blauer Farbe sind die Hinderniserkennungszonen eingezeichnet. Um erkannte Hindernisse werden Sicherheitszonen definiert, die nicht befahren werden dürfen. Alle diese Daten werden intern verarbeitet und führen zu Bewegungsbefehlen für die Räder bzw. Ketten des Roboters, was in einer tatsächlichen Bewegung resultiert. Sobald der Roboter in Bewegung gesetzt wird, beginnt eine kontinuierliche Feedbackschleife, die fortlaufend die Ist-Position des Roboters mit der Soll-Position abgleicht. Einflüsse wie beispielsweise nasser Rasen oder steile Hänge können das Verhalten des Roboters verändern und sind nur schwer im Voraus kalkulierbar. Ein typisches Beispiel ist das Durchdrehen der Reifen auf nassem Rasen, was dazu führt, dass der Roboter fälschlicherweise annimmt, er sei weiter gefahren als tatsächlich der Fall war. Diese Effekte können jedoch durch die hohe Anzahl an verbauten Sensoren effektiv kompensiert werden.

OGP-ROB - Arbeitspaket B3:
Teil des **Arbeitspakets B3** ist die *Integration und Implementierung des Auslegers für die „Electronic Nose“*. Der Roboterarm vom Typ UR10e wurde erfolgreich an die *Rovo*-Plattform angebracht und für die spezifischen Anforderungen des Projekts angepasst. Dadurch ist es möglich, den Roboterarm mit Greifer automatisiert zu einer definierten Position zu bewegen. Auf diese Weise kann der Geruchssensor präzise in die Nähe des Baumes gebracht werden, um die Messung der volatilen Gase optimal zu unterstützen. Dies gewährleistet eine möglichst hohe Qualität der erfassten Daten.
Zur Befestigung des Roboterarms an der *Rovo*-Plattform wurde eine speziell konstruierte Anbaustruktur entwickelt, die sowohl das Gewicht des Arms trägt als auch ausreichende Stabilität bietet, um ungewollte Schwingungen während der Bewegungen des Arms zu verhindern. Ein solches Aufschwingen könnte zu einem sofortigen Arbeitsstopp führen, da der Arm auf eine hohe Sensitivität gegenüber Gegenkräften eingestellt ist, um eine sichere Zusammenarbeit mit Menschen in direkter Arbeitsumgebung zu ermöglichen.
Die softwareseitige Implementierung umfasst die präzise Steuerung des Arms sowie die sichere Handhabung der Sensorik während des Einsatzes. Durch die enge Integration mit dem restlichen System kann der Arm autonom Positionen anfahren und Proben für die *Electronic Nose* entnehmen. Die Algorithmen zur Auswertung der Punktwolken segmentieren die einzelnen Bäume (siehe Abbildung 6) und identifizieren automatisiert die Baumstämme. Auf Basis dieser Daten wird die Positionsdifferenz zwischen *Rovo* und dem jeweiligen Baum berechnet, sodass anschließend die entsprechende Bewegung des Arms initiiert werden kann.
Während die Baumerkennung bereits erfolgreich implementiert wurde, befand sich die Bewegungssteuerung des Arms noch in der Entwicklungsphase. Aufgrund des begrenzten Projektzeitraums konnte eine vollständig praxistaugliche Version des Algorithmus jedoch nicht fertiggestellt werden. Hervorzuheben ist jedoch, dass die softwareseitige

Steuerung des Arms für die präzise Ansteuerung vordefinierter Wegpunkte bereits vollständig implementiert wurde. Es bleibt lediglich die genaue Bestimmung dieser Wegpunkte offen.

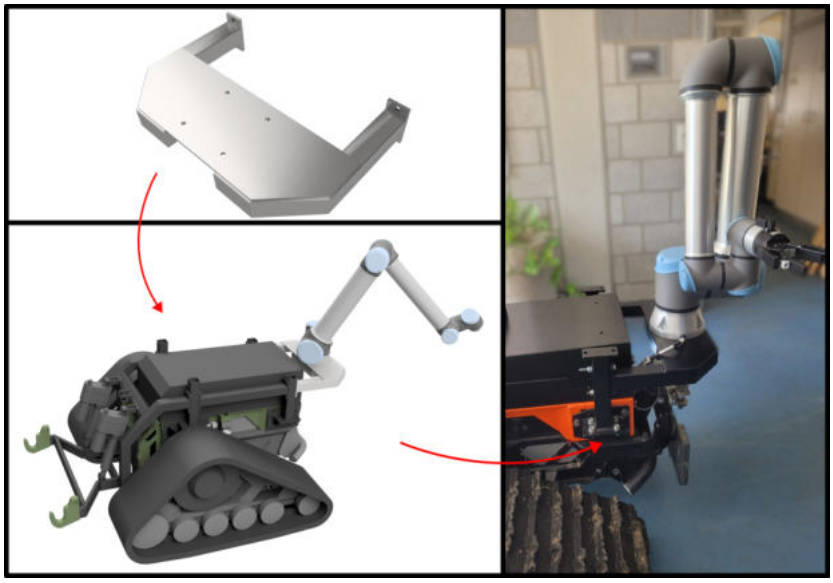


Abbildung 4: Roboterarm UR10e am *Rovo*

OGP-ROB - Arbeitspaket B4:
Das Arbeitspaket B4 mit dem Titel „*Kartenerzeugung (Map-Building) und Georeferenzierung*“ umfasst die Entwicklung von Algorithmen zur Erstellung präziser Umgebungsmodelle, die speziell für den Einsatz in Agroforstsystemen und Baumschulen optimiert sind. Dabei werden hochauflösende 3D-Karten generiert, die sowohl zur Navigation des Roboters als auch zur detaillierten Analyse der Pflanzenstruktur dienen.
Durch die Kombination von LIDAR-Sensoren mit RTK-GNSS-Daten entsteht eine dreidimensionale, global referenzierte Punktwolke der Umgebung. Diese erlaubt eine exakte Verortung aller relevanten Objekte in der Landschaft. In Abbildung 5 ist das Resultat dieses Kartierungsprozesses dargestellt. Es handelt sich um eine interaktive 3D-Karte, die eine detaillierte Betrachtung der Umgebung aus verschiedenen Perspektiven ermöglicht. Aufgrund der zweidimensionalen Darstellung in diesem Bericht kann die räumliche Wirkung jedoch nur eingeschränkt vermittelt werden.
Die aus den Sensordaten erstellte Punktwolke kann anschließend im Post-Processing weiter analysiert und verarbeitet werden. Mittels spezieller Segmentierungsalgorithmen ist es möglich, einzelne Bäume automatisiert voneinander zu trennen. In Abbildung 6 wird veranschaulicht, wie sämtliche Bäume innerhalb der Baumschule individuell identifiziert und farblich differenziert dargestellt werden. Diese separierte Darstellung bildet die Grundlage für weiterführende Analysen auf Einzelebene, darunter die Erfassung von Volumenparametern wie Höhe, Kronendurchmesser und Stammdicke. Die in

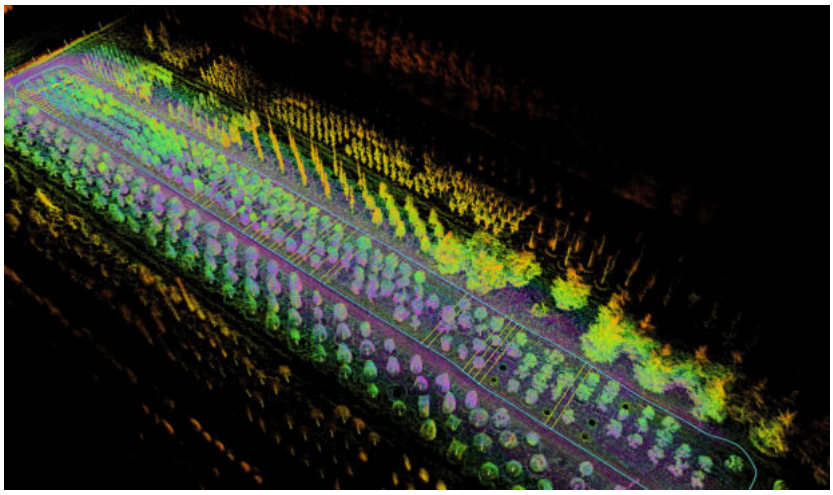


Abbildung 5: Kartenerstellung durch den Roboter *Rovo* – Darstellung als Punktwolke

Abbildung 5 sichtbare blaue Linie markiert die während der Kartierung zurückgelegte Trajektorie. Diese wird im System gespeichert und kann bei Bedarf zur Analyse oder zur weiteren Verarbeitung visualisiert werden.

Abbildung 6: Segmentierung der Punktwolke zur Trennung einzelner Bäume

Darüber hinaus ermöglicht die erzeugte Karte eine optimierte Pfadplanung für zukünftige Navigationsvorgänge in gleicher Umgebung. Durch die Integration dieser Daten in den Navigationsalgorithmus kann der Roboter effizientere Routen berechnen und potenzielle Hindernisse bereits im Vorfeld identifizieren und umgehen.
Ein weiterer wesentlicher Aspekt der Kartenerstellung ist die Fusion der bodengebundenen Punktwolken mit den aus Drohnenaufnahmen generierten 3D-Daten. In Abbildung 7 sind die beiden Datensätze gegenübergestellt: Die gelben Punkte stammen aus

den Bodenmessungen des Roboters, während die weißen Punkte durch die Drohnenkartierung erzeugt wurden.

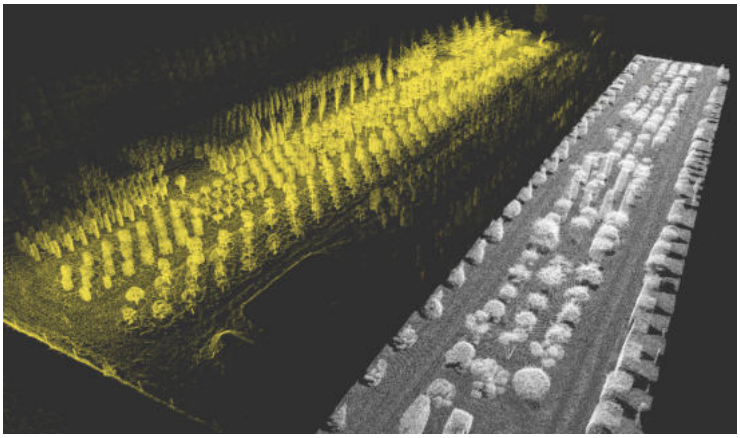


Abbildung 7: Vergleich der Punktwolken: Gelb – bodengebundene Messung, Weiß – Drohnenaufnahme

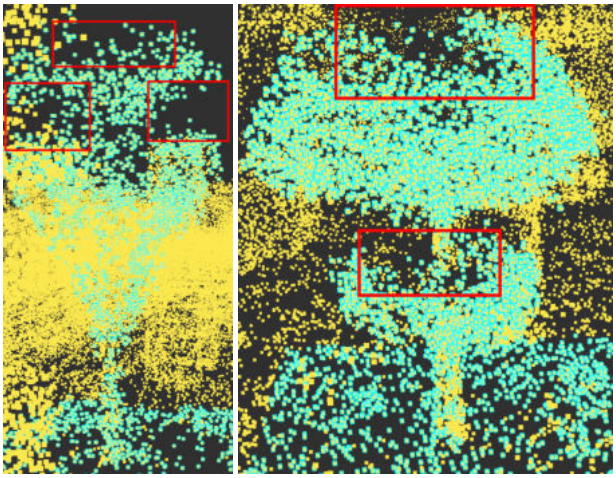


Abbildung 8: Bodengebundene Messung – fehlende Baumkronenbereiche

Die Kombination beider Messmethoden ist notwendig, da jede für sich genommen systematische Schwächen aufweist. Während bodengebundene Messungen die Baumstämme präzise erfassen, fehlen häufig Teile der Baumkrone (siehe Abbildung 8). Umgekehrt erfasst die Drohne die Baumkronen detailliert, jedoch sind die unteren Bereiche der Bäume, insbesondere die Stämme, oft nicht vollständig enthalten (Abbildung 9). Erst durch die Fusion beider Datenquellen entsteht eine umfassende und realitätsnahe 3D-Karte der Umgebung. Da sämtliche generierten Punktwolkendaten georeferenziert

sind, können sie mit globalen Kartenwerken abgeglichen und hochpräzise in einem geographischen Koordinatensystem verortet werden. In Abbildung 10 wird die erzeugte Punktwolke einer Baumschule in OpenStreetMap-Daten eingebettet. Dieser Abgleich ermöglicht eine verbesserte Orientierung im Feld und erlaubt es, Navigationsdaten mit existierenden Karten zu synchronisieren.

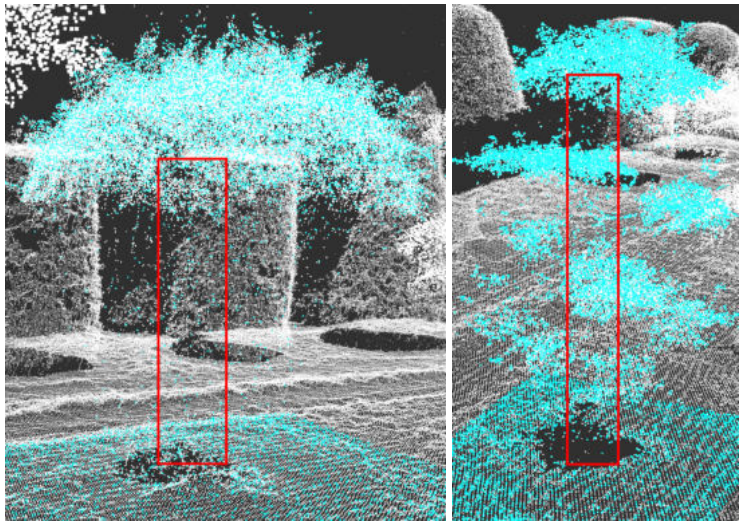


Abbildung 9: Drohnenaufnahme – fehlende Baumstämme

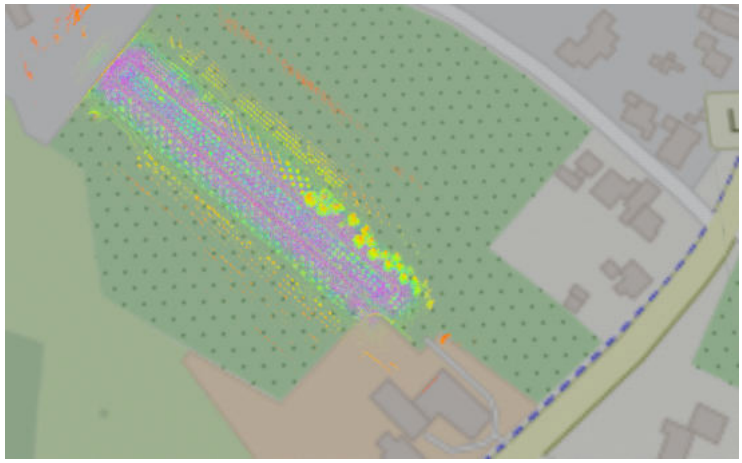


Abbildung 10: Globale Georeferenzierung der Baumschul-Punktwolke

Um die Kartendaten weiter zu evaluieren, wurden diese zusätzlich in das Satellitenbildmaterial von Google Earth® eingebunden. In Abbildung 11 ist das resultierende Bild zu sehen. Es zeigt eine hohe Übereinstimmung der Punktwolken mit den Luftaufnahmen,

allerdings sind leichte Verzerrungen im nordöstlichen Bereich erkennbar. Diese könnten durch Sensordrift, die Erdkrümmung oder andere externe Einflüsse verursacht sein. Eine detaillierte Untersuchung dieser Effekte wurde im Rahmen dieses Projekts jedoch nicht weiter verfolgt, da die erzeugten Karten bereits eine ausreichende Genauigkeit für die geplanten Anwendungen aufweisen.

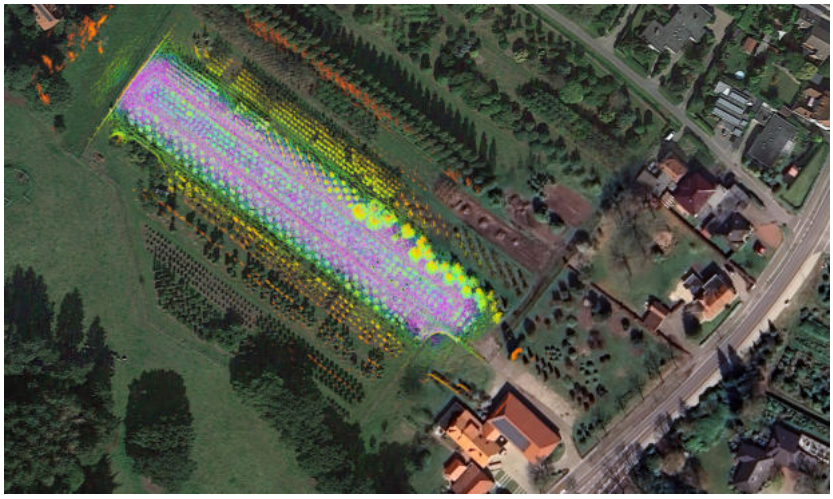


Abbildung 11: Integration der Punktwolke in GOOGLE EARTH®

Zusammenfassend stellt die erzeugte 3D-Karte eine wesentliche Grundlage für weiterführende Forschungs- und Entwicklungsarbeiten dar. Neben der Navigation kann sie für Umweltanalysen, Wachstumsstudien und die Optimierung landwirtschaftlicher Prozesse genutzt werden. Die erfolgreiche Fusion verschiedener Sensordatenquellen zeigt das Potenzial, das in der Kombination von Boden- und Luftmessungen liegt, und bietet wertvolle Erkenntnisse für zukünftige Anwendungen in der Präzisionslandwirtschaft.

OGP-ROB - Arbeitspaket B5:

Im Rahmen des **Arbeitspakets B5** „*Kollisionsvermeidung*“ wurde der Navigationsalgorithmus so weiterentwickelt, dass Hindernisse sowohl auf globaler als auch auf lokaler Ebene effizient umfahren werden können. Dabei unterscheidet das System zwischen statischen Hindernissen, die bereits in der erstellten 3D-Karte verankert sind, und dynamischen Hindernissen, die erst nach der Kartenerstellung in den Navigationspfad eintreten.
Dank dieser Erweiterung ist der Roboter nun in der Lage, feststehende Objekte wie Bäume, die in der Karte hinterlegt sind, direkt bei der globalen Pfadplanung zu berücksichtigen und zu umfahren. Gleichzeitig können bewegliche Hindernisse, wie beispielsweise Personen, Tiere oder andere unerwartete Objekte, in Echtzeit erkannt und in der lokalen Pfadplanung berücksichtigt werden. In einem solchen Fall wird der ursprünglich geplante Pfad dynamisch angepasst, sodass eine sichere und effiziente Fortbewegung gewährleistet bleibt.

Diese Hinderniserkennung ist in Abbildung 12 dargestellt. Die Visualisierung folgt dem bereits bekannten Schema aus den vorherigen Abschnitten, enthält jedoch eine wesentliche Neuerung: die gelbe Linie um den ursprünglich roten Pfadverlauf. Während die rote Linie die globale Pfadplanung darstellt, zeigt die gelbe Linie den tatsächlichen, in Echtzeit berechneten Navigationspfad. Deutlich zu erkennen ist, dass sich die gelbe Linie von der roten unterscheidet und eine Kurve beschreibt. Dies ist das Ergebnis der aktiven Hinderniserkennung: Der Roboter hat ein Hindernis auf seinem geplanten Weg erkannt und weicht diesem durch eine Neuberechnung des Pfades aus.

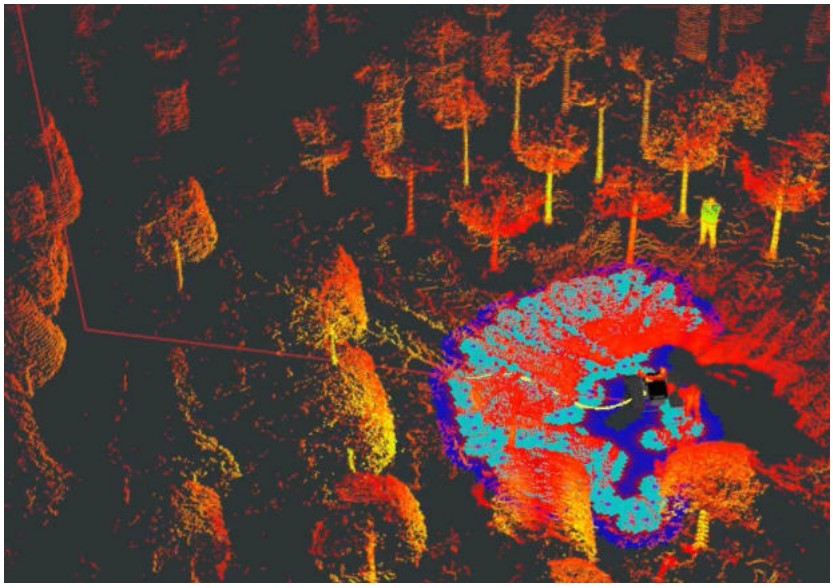


Abbildung 12: Hinderniserkennung im Feldversuch

2.4.4 Beitrag des Ergebnisses zu förderpolitischen EIP-Themen

Durch die Ergebnisse der einzelnen Arbeitspakete konnte eindrucksvoll demonstriert werden, dass eine automatisierte, bodenseitige Befahrung von Baumschulen durch autonome Robotersysteme grundsätzlich realisierbar ist. Zudem wurde erfolgreich gezeigt, dass eine regelmäßige, automatisierte Kartierung der Anbauflächen sowie eine gezielte Datenerfassung an dynamisch erkannten Wegpunkten effizient umgesetzt werden kann. In diesem Zusammenhang wurde das System so entwickelt, dass der Roboter eigenständig Karten erstellen, definierte Flächen autonom befahren und relevante Daten für die Einzelbaumanalyse erfassen sowie zentral verarbeiten kann. Die Weiterentwicklung des Systems hin zu einer direkten, individuellen Behandlung der Pflanzen erscheint daher als ein vielversprechender nächster Schritt.
Ein wesentlicher Vorteil dieser Technologie liegt in der lückenlosen und hochpräzisen Dokumentation großflächiger Befahrungen. Durch die Möglichkeit, regelmäßige Messungen über einen längeren Zeitraum durchzuführen, lassen sich Veränderungen an den

Pflanzen detailliert überwachen und systematisch erfassen. In Kombination mit einer Software, die Sensordaten zur Früherkennung von Krankheiten auswertet, könnte das entwickelte System einen bedeutenden Beitrag zur Digitalisierung und Effizienzsteigerung im Baumschulsektor leisten.
Für eine Anwendung in natürlichen Waldgebieten ist das aktuelle System jedoch noch nicht ausreichend ausgereift. Einerseits bedarf es einer weitergehenden Optimierung des Navigationsalgorithmus, da die derzeitige Hinderniserkennung in dichter Bewaldung dazu führen würde, dass der Roboter aufgrund zahlreicher Erkennungen nicht mehr fortbewegt werden könnte. Andererseits müssten auch die Algorithmen zur Datenauswertung weiterentwickelt werden, um Bäume, die stark ineinander verwachsen oder verzweigt sind, als einzelne Individuen identifizieren und voneinander trennen zu können.
Obwohl eine direkte Überführung in den praktischen Einsatz im Realwald zum jetzigen Zeitpunkt noch verfrüht erscheint, bildet das vorliegende System eine solide Grundlage für zukünftige Weiterentwicklungen. Durch gezielte Anpassungen und Optimierungen könnte das System schrittweise an die Herausforderungen realer Einsatzszenarien angepasst und letztlich in den praktischen Betrieb überführt werden.

2.4.5 Nebenergebnisse

Die Art der entwickelten Roboterplattform hat sich im praktischen Einsatz innerhalb der Baumschule als erfolgreich erwiesen. Aufgrund dieser positiven Ergebnisse werden derzeit Gespräche über mögliche Anschlussprojekte geführt. Dabei wird unter anderem erwogen, einen ämlichen bodengebundenen Roboter über die reine Kartierung hinaus zu erweitern und beispielsweise die Bewässerung der Pflanzen in den automatisierten Arbeitszyklus zu integrieren. Diese Weiterentwicklung könnte die Effizienz der Baumpflege weiter steigern und zusätzliche Optimierungspotenziale im Baumschulbetrieb erschließen.

2.4.6 Arbeiten, die zu keinem Ergebnis geführt haben

Die Anwendung der Electronic Nose in der Baumschule war leider bis zum Schluss des Projekts nicht möglich.

2.4.7 Mögliche weitere Verwendung von Investitionsgütern

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

2.5 Nutzen der Ergebnisse für die Praxis

Fertige Produkte, die in ihrer derzeitigen Form unmittelbar in der Praxis eingesetzt werden könnten, sind im Rahmen dieses Projekts nicht entstanden. Dies liegt einerseits daran, dass das Forschungsfeld des automatisierten Monitorings von Pflanzen mittels Drohnentechnik noch sehr jung und in seiner Entwicklung äußerst dynamisch ist. Andererseits war die Entwicklung eines vollumfänglich praxistauglichen Prototyps nicht primäres Ziel dieses Projekts. Vielmehr lag der Fokus auf der Erforschung und Implementierung grundlegender Technologien, die als Basis für zukünftige anwendungsorientierte Weiterentwicklungen dienen können.

2.6 Verwertung und Nutzen der Ergebnisse

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

- HAWK Göttingen „Einführung in die Robotik“, M. Eng.
- HAWK Göttingen „Innovative, robotergestützte Technologien in der Waldbewirtschaftung“, M. Sc.

Abschlussarbeiten mit Relevanz für das Projekt:

- Bachelorarbeit von Herrn Robin Uecker [HAWK] „Hardwareintegration eines stationären Cobotsystems auf einer mobilen Roboterplattform“
- Bachelorarbeit von Herrn Lorenz Hunold [HAWK] „Entwicklung einer Hauptplatine für ein mobiles Robotersystem“
- Masterarbeit von Herrn Jonas Otto [Georg-August Universität Göttingen] „Erweiterter Kalmanfilter zur exakten Geolokalisierung in der Robotik“

Sonstige Arbeiten mit Relevanz für das Projekt:

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

2.7 Wirtschaftliche und wissenschaftliche Anschlussfähigkeit

Auf Grundlage der erzielten Ergebnisse erscheint es vielversprechend, weitere Anstrengungen zur vollständig automatisierten Analyse von Baumschulflächen zu unternehmen. Insbesondere die effiziente Verarbeitung und Analyse der generierten Punktwolken stellt eine zentrale Herausforderung dar. Eine gezielte Reduktion des notwendigen Speicherbedarfs wäre von erheblichem Vorteil, da die langfristige Speicherung hochaufgelöster 3D-Karten in der Praxis aufgrund des hohen Speicherverbrauchs kaum realisierbar ist. Stattdessen wäre es zielführend, relevante Kernparameter aus den Punktwolken zu extrahieren, diese zu berechnen und gezielt zu speichern, um eine effiziente und nachhaltige Langzeitüberwachung zu ermöglichen.

Darüber hinaus wäre eine Ausweitung der Projektidee auf den Bereich der Forstkulturen von besonderem Interesse. Insbesondere neu entstehende Forstkulturen auf ehemaligen Kalamitätsflächen bieten ein großes Potenzial für praxisnahe Erprobungen und die Weiterentwicklung des Systems unter realen forstwirtschaftlichen Bedingungen.

2.8 Kommunikations- und Disseminationskonzept

Für die Verbreitung der Ergebnisse und Durchführung des Projektes wurden unterschiedliche Kommunikationswege genutzt, so wurden (und werden) das Projekt und dessen Ergebnisse beispielsweise im Rahmen von Zeitungsartikeln, Social-Media-Kanälen (z.B. HAWK-Newsfeed, HAWK-Radio, Youtube) öffentlichen Veranstaltungen und Vorführungen (Plasma-for-Life-Symposium, Future-Forest-Forum, EIP-Gartenfest 2024, KWF-Tagung) als auch in zahlreichen HAWK-Veranstaltungen (Nacht des Wissens, Industrial Lab Day, etc.) sowie in Fachvorträgen vorgestellt.
Es wird momentan an einem Manuskript gearbeitet, welches dann in wissenschaftlichen Journals veröffentlicht werden soll.