Abschlussbericht

Richtlinie zur Förderung von Projekten im Rahmen von

„WIR!-Bündnis Region 4.0“

Uckerbots: Konzept- und Technologieentwicklung für Schwarmrobotik zur Ausweitung des Bio-Zuckerrübenanbaus in der Uckermark

Teilvorhaben: KI-gestützte Schwarmrobotik für die Unkrautregulierung im Zuckerrübenanbau

Förderkennzeichen:

3WIR0813B

Projektlaufzeit:

01.04.2023 – 31.03.2025

Zuwendungsempfänger:

Zauberzeug GmbH

Projektleitung:

Rodja Trappe

Gefördert durch:

Bundesministerium
für Forschung, Technologie
und Raumfahrt

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

I. Kurzdarstellung

I.1 Ursprüngliche Aufgabenstellung sowie wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

Gesamtziel des neuen Projektes Uckerbots war es, den im Vorgängerprojekt zUckerrübe eingeschlagenen Weg einer mechanischen Beikrautregulierung im Bio-Zuckerrübenanbau in Form eines Roboterschwarms zu skalieren, um einen Beitrag zur Ausweitung des ökologischen Zuckerrübenanbaus in der Uckermark zu legen. Das Schwarmkonzept erfüllt zugleich die Anforderungen der regionalen Landwirte nach einer kleinen, flexibel einsetzbaren und günstigen Robotik, die gleichzeitig eine hohe Schlagkraft und Einsatzsicherheit gewährleistet, da das Zeitfenster für das Hacken sehr kurz ist. Der Ansatz erlaubt ein flexibles Auf- und Abstocken des Schwarms, wodurch die erforderliche sukzessive Ausweitung und Anpassung der Anbaufläche für Biozuckerrüben in der Region erleichtert wird.

Das Teilprojekt von Zauberzeug beschäftigte sich schwerpunktmäßig mit den technischen Aspekten beim Einsatz der Schwarmrobotik für die Unkrautbekämpfung im Zuckerrübenanbau einschließlich der Kommunikation zwischen den Robotern. Wesentliche Arbeitsziele beinhalteten die

- Erbringung eines Proof-of-Concept zur Maximierung der Arbeitsgeschwindigkeit im Schwarm.
- Analyse der Robustheit des Roboterschwarms durch Definition von Anwendungsszenarien und Erstellung eines Labormusters.
- Konzeption eines Erkundungsroboters, welcher als “Schäferhund” als Ersatz für die UAV-Aufklärung dienen kann.
- Funktionsnachweis für eine kostengünstige, gegenseitige Positionierung der Schwarmroboter auf dem Feld unter Zuhilfenahme von KI-basierter Bildverarbeitung.

Die Schwarmrobotik ist ein relativ junges Forschungsgebiet und stellt einen der wichtigsten Anwendungsbereiche der Schwarmintelligenz dar. Gegenüber einzelnen Robotersystemen bieten Schwärme die Möglichkeit, komplexe Aufgaben kooperativ zu erledigen und eine hohe Skalierbarkeit sowie Ausfallsicherheit (kollektive Robustheit) zu erreichen. Für die ortsdifferenzierte und zielgerichtete Bewirtschaftung landwirtschaftlicher Nutzflächen (Precision Farming) sind diese Eigenschaften von hoher Relevanz.

Zum Projektbeginn gab es am Markt keine schwarmtauglichen Robotersysteme zur KI-gestützten Unkrautregulierung. Der Einsatz von Roboterschwärmen für andere landwirtschaftliche Aufgaben war bereits ein einzelnen Forschungsprojekten untersucht worden, von dem zum Mähen von Grasflächen eingesetzte Roboter Vitrirover des gleichnamigen französischen Herstellers war ein koordinierter Einsatz mehrerer Systeme von einer mobilen Servicezentrale aus koordiniert. Robotische Einzelsysteme für die mechanische Unkrautkontrolle waren von verschiedenen Herstellern bekannt, etwa von Naio Technologies aus Frankreich oder Farmdroid aus Dänemark.

Der im Vorgängerprojekt zUckerrübe entwickelte einzelne Uckerbot arbeitet bisher ausschließlich innerhalb einer Zuckerrübenreihe und ermöglicht eine Beikrautentfernung in einem möglichst

engen Radius um die Pflanze, während zwischen den Reihen weiterhin auf die gängigen Hackmethoden gesetzt wird. Der Fokus lag in der Entwicklung bislang insbesondere auf der Präzision des Systems, wodurch Arbeitsgeschwindigkeit und damit Flächenleistung des Einzelsystems für einen kommerziellen Einsatz auf größeren Flächen noch unzureichend waren.

I.2 Ablauf des Vorhabens

Im Vorgängerprojekt zUckerrübe wurde im Rahmen eines partizipativen Innovationsprozesses, eine an die regionalen Bedingungen adaptierte Robotertechnik – der Uckerbot – entwickelt. Das hier vorgestellte Uckerbots-Projekt baut nun auf dessen Ergebnissen auf und soll die bereits entwickelte Robotertechnik weiter optimieren, sowie deren Einsatz im Schwarm erproben. Zunächst konzentrierte sich das Uckerbots-Projekt auf die Verbesserung der Hard- und Software des Roboters. Hardwareseitig wurden iterativ neue Einzelteile erprobt und außerdem ein neues Hackwerkzeug entwickelt, das auf den Anbau der Zuckerrüben optimiert wurde.

Im Rahmen des Arbeitspaketes **AP 2.1**, wurde eine signifikante Erhöhung der Arbeitsgeschwindigkeit angestrebt. Hierzu wurde der Arbeitsablauf grundsätzlich überdacht und iterativ optimiert.

Anschließend wurde der Uckerbot im Zuge des **AP 2.2** zu einem robusten Schwarmroboter weiterentwickelt. Neben der verbesserten Konstruktion wurden an Hard- und Software wesentliche Anpassung für eine nutzerfreundliche Handhabung des Uckerbots vorgenommen und auf den Einsatz im Schwarm vorbereitet. Über eine Bedienoberfläche für die Remote-Kontrolle kann der gesamte Arbeitsablauf von Erfassung des Feldes bis hin zur Automationssteuerung und -überwachung durchgeführt werden kann.

In Bezug auf **AP 3.1** wurde abweichend von der ursprünglichen Planung keine Draufsicht oder Vogelperspektive auf das Feld untersucht, da durch eine hochgenaue Positionierung der Roboter eine präzise Lokalisierung der Roboter möglich ist und durch integrierte Kameras, die eine Rundumsicht um einen Roboter liefern, ausreichende Informationen vorhanden sind, um eine sichere und präzise Feldbearbeitung zu gewährleisten. **AP 3.2** konzentrierte sich auf die Implementierung und Erprobung eines günstigen Multisatelliten- und Multiband-GNSS-Moduls. Hierzu wurde entsprechende Hardware recherchiert, elaboriert und schließlich im Roboter verbaut.

Mit Hilfe der in den vorangehenden APs entwickelten Techniken, war es möglich einen Roboterschwarm zu designen, welcher nicht, wie zunächst angedacht auf einem Erkundungs- oder Schäferhundroboter beruht, sondern das Konzept wurde hin zu einem eines serverzentrierten Schwarms neu ausgerichtet. Daher wurden im Rahmen der Arbeitspakete **AP 3.3** und **AP 3.4** nicht nur ein Dashboard für eine nutzerfreundliche Koordinierung des Schwarms entwickelt, sondern auch Missionsplanung sowie die entsprechende Koordination eines Schwarms auf einem unabhängigen Server implementiert.

Abschließend konnte in einer Live-Demonstration ein lauffähiger Roboterschwarm mit mehreren Robotern präsentiert werden, die gemeinsam aber dennoch autonom auf einem Feld arbeiten. Somit konnte die Funktionalität der konstruierten Hardware des Uckerbots, seiner Software und der zentrale Schwarm-Server unter Beweis gestellt werden. Außerdem wurden signifikante

Fortschritte gemacht, um die Marktreife des Robotersystems zu erreichen, was einen großen Erfolg des Projektes Uckerbot darstellt.

I.3 Wesentliche Ergebnisse sowie Zusammenarbeit mit anderen Forschungseinrichtungen

Im Rahmen des Projekts konnte Zauberzeug in Kooperation mit den Partnern signifikante Verbesserungen des Uckerbots erzielen, die wichtigsten hiervon sind:

- Eine Erhöhung der Rechenleistung im Roboter ermöglicht eine kontinuierliche Erkennung der Umgebung und somit eine höhere Arbeitsgeschwindigkeit des Roboters.
- Die Verbesserung des Fahrwerks führte zu einer höheren Leistung und Beweglichkeit, aber auch zu einer besseren Resilienz gegenüber Verschmutzungen.
- Mit dem „Tornado“ wurde ein neuartiges Werkzeug zur Beikrautregulierung entwickelt, welches bei geringeren Fertigungskosten eine höhere Arbeitsgeschwindigkeit und Präzision ermöglicht.
- Die Weiterentwicklung des Benutzerinterfaces und die Entwicklung einer neuen Schwarm UI mit flexiblerer Organisation der Felder und Beete sorgt für eine bessere und intuitivere Handhabung und Steuerung des Roboterschwarms.
- Eine verbaute Rundumsicht bestehend aus vier Kameras verbessert die Erkundungsfähigkeiten des einzelnen Roboters.
- Ein eingebautes GNSS-Modul verbesserte die Navigationsfähigkeiten der Roboter.
- Die Weiterentwicklung des Uckerbots zum Schwarmroboter ermöglicht nun einen flexiblen Einsatz bei der Beikrautregulierung. Der Schwarm ist skalierbar und kann somit nahezu beliebige Feldgrößen bearbeiten.

In regelmäßigen Meetings mit den Verbundpartnern fand ein konstruktiver Austausch zwischen den einzelnen Akteuren des Projekts statt. Dabei konnten Schnittstellen und Teilaufgaben besprochen und Erkenntnisse ausgetauscht werden, woraufhin eine gemeinsame Orientierung des Gesamtprojektes vorgenommen werden konnte.

Überdies fanden mehrere technische Tests von unserer Seite auf dem Gut Wilmersdorf statt, bei denen Mitarbeitende der Zauberzeug GmbH vor Ort eingeführt und unterstützt wurden. Außerdem fanden häufige Tests am Gut Wilmersdorf statt, die remote durch die Entwickelnden von Zauberzeug begleitet wurden. Gerade der Austausch mit Anwendenden brachte wertvolle Einblicke in die Benutzung des Uckerbots und trug maßgeblich zu seiner Entwicklung bei.

Eine wichtige Austauschplattform bot das DeepFarmBots-Netzwerk (https://www.deepfarmbots.net/) wo regelmäßige offene Gespräche stattfanden.

Für die Abschlusspräsentation der Schwarmrobotik stellte uns der Biohof Herzkamp in Havixbeck freundlicherweise ein Feld zur Verfügung.

II. Eingehende Darstellung

II.1 Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse

Als Grundlage für das Uckerbots-Projekt diente der im Vorgängerprojekt zUckerrübe konstruierte Roboter, welcher iterativ zu einer schwarmfähigen Plattform weiterentwickelt werden sollte. Im Folgenden werden die wichtigsten Ergebnisse der einzelnen Arbeitspakete präsentiert.

Im Rahmen des Arbeitspaketes **AP 2.1**, das sich auf das Proof-of-Concept für maximale Fahr- und Arbeitsgeschwindigkeit konzentrierte, wurden wesentliche Fortschritte erzielt. Um die Arbeitsgeschwindigkeit signifikant zu erhöhen, wurde der Arbeitsablauf grundlegend überdacht und von der unterbrochenen Fahrt für Bildaufnahme und Detektionen zu einer kontinuierlichen Aufnahme/Detektion während der Fahrt umgebaut. Hierfür war ein erhöhter Grafik-Rechenaufwand vonnöten, weshalb ein Upgrade des “Zauberzeug Robot Brains”, dem Rechenzentrum des Uckerbots, erfolgte: Es wurde um einen “Nividia Jetson Orin Nano” erweitert, welcher deutlich leistungsstärker als das zuvor verwendete Computing-Board ist. Die rechenintensivere Hardware führte zu einer erhöhten Temperaturentwicklung. Diesbezügliche Untersuchungen lieferten wichtige Anhaltspunkte für die Konzipierung eines neuen Robot Brain-Gehäuses und eines Lüftungssystems für die gesamte Elektronikbox des Roboters, welche in der aktuellen Version des Uckerbots verbaut wurden.

Die Weiterentwicklung des Gummiraupen-Fahrwerks brachte unterschiedliche Herausforderungen mit sich. Durch die Verwendung dünnerer Gummiraupen, die im Unterschied zu vorangehenden Versionen keine Stahlseile mehr enthielten, reduzierte sich die benötigte Antriebsleistung. Dies führte allerdings zu einer Längung der Gummiraupen und durch scharfkantige Anlaufscheiben zum häufigen Springen der Gummiraupen (*Abb. **1***).

Abb. 1: Längung und mangelnde Seitenführung bei den verwendeten dünnen Gummiraupen

Eine Neuentwicklung in Form einer CNC-gefertigten Felge mit integriertem Motor und modifizierten Anlaufscheiben verbesserte diese Situation, jedoch traten weiterhin Probleme mit der Kompatibilität der Zahnformen der Ketten auf. Dies führte zu einer Kollision der Zähne und einem Aufbocken (*Abb. **2***).

Abb. 2: Kollision der Zähne aufgrund von Kompatibilitätsproblemen beim Zahnantrieb

Die Erweiterung der Antriebseinheit auf vier Antriebsmotoren (anstelle von zwei) konnte die Antriebsleistung des Roboters signifikant auf 1000 W erhöhen und ermöglichte damit ein dynamisches Fahren, eine engere Kurvenfahrt und Drehen auf der Stelle (*Abb. **3***).

Abb. 3: Verbesserte Fahrdynamik durch die Erweiterung auf vier Antriebsmotoren

Die Entwicklung von Felgen mit Hinterschnitt am Zahn sowie Löchern am Seitendeckel für einen Schmutzablass waren weitere Schritte zur Stabilisierung des Fahrwerkes. Hierbei kam es jedoch weiterhin zur Verklebung der Zähne durch vertrockneten Schlamm (*Abb. **4***), was ebenfalls zum Aufbocken und Springen der Gummiraupen führte.

Abb. 4: Blockieren des Raupenantriebs durch anhaftenden zähen Schlamm

Hierauf folgte die Entwicklung eines weiteren Felgenkranzes, welcher einen verbesserten Schmutzablass erzielte und somit die Schmutz- und Schlammresistenz des gesamten Roboters erhöhte (*Abb. **5***).

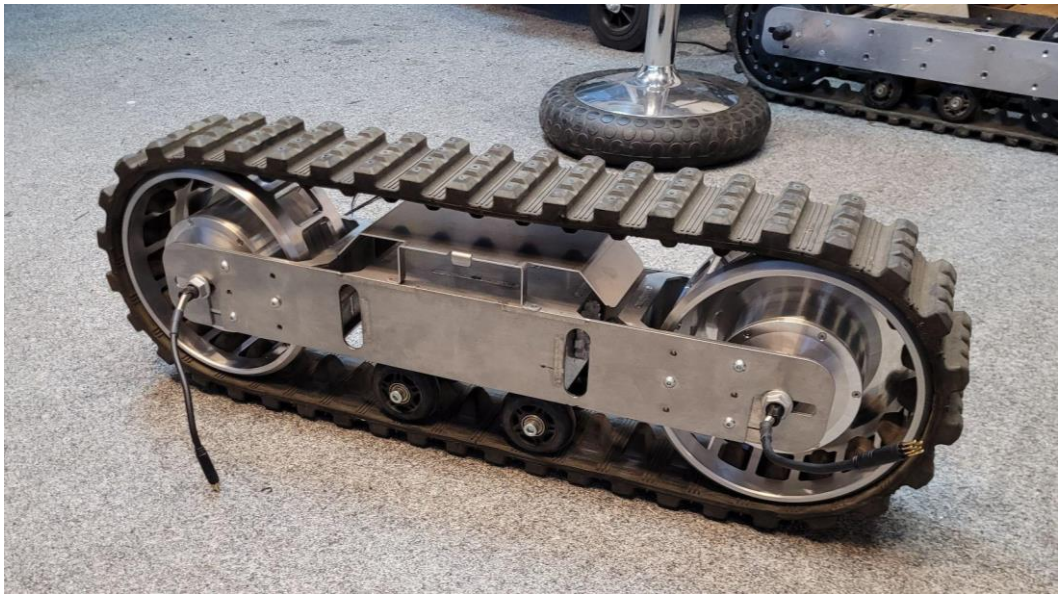

Abb. 5: Zusätzlicher Felgenkranz für verbesserten Schmutzablass zur Erhöhung der Schmutzresistenz

Über die Verbesserung der Kettenlaufwerke hinaus wurde im Zuge des **AP 2.1** Fortschritte in der Entwicklung einer dualen Werkzeugträger-Mechanik erzielt, die die simultane Nutzung einer Pendelhacke und eines Bohrers erlaubt, um sowohl Geschwindigkeit (Hacke) als auch Präzision (Bohrer) bei der Unkrautbekämpfung zu optimieren. Durch ein patentiertes Kettensystem (*Abb. **6***) wird die simultane Bewegung der Pendelhacke in horizontaler und vertikaler Richtung ermöglicht.

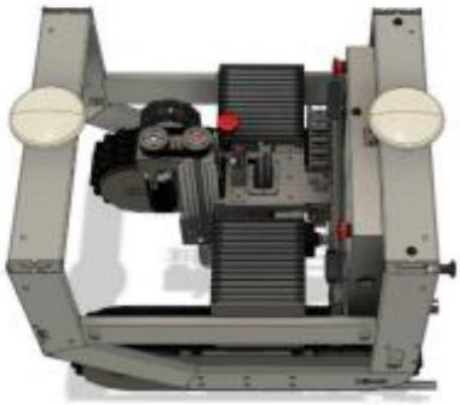

Abb. 6: Neue duale Werkzeugträger-Mechanik auf Basis eines patentierten Kettensystems.

Im Rahmen der Untersuchung der Entwicklungswerkzeuge wurde ein neues Werkzeug, welches den Namen “Tornado" erhielt, konzipiert und entwickelt (*Abb.* ***7***). Dieses Werkzeug ist in der Lage, die Nutzpflanzen gezielt zu bearbeiten und dabei einen Bereich unmittelbar um die Pflanze herum vom Beikraut zu befreien, was eine schonendere und effizientere Unkrautbekämpfung ermöglicht. Außerdem ist der Tornado in seiner Herstellung deutlich günstiger als die zuvor vorgestellte Doppelmechanik. Die Entwicklung und Erprobung eines Prototypen basierend auf drei festgesetzten Hackmessern (vgl. *Abb.* ***7***), sowie die anschließende Weiterentwicklung zu einem funktionellen Anbaugerät waren bedeutende Schritte in der effizienten Feldbearbeitung durch den Uckerbot. In fortschreitenden Versuchen wurde eine Verzahnung in den Messerklingen sowie der Einsatz einer einzelnen Messerscheibe erprobt, wobei sich beides als praktikable Anpassung herausstellte. Unabhängig von der Anzahl der eingesetzten Tellermesser können diese je nach Drehrichtung des Antriebsmotors um die eigene (Verstellung des freiliegenden inneren Durchmessers) oder um die gemeinsame mittlere Achse (Hacken der Beikräuter) gedreht werden. Hierfür wurde die notwendige Sensorik verbaut und ein geeigneter Motor ausgewählt, der ausreichend Drehmoment und Präzision aufbaut.

Abb. 7: Prototyp des neuen „Tornado“-Werkzeugs für die Beikrautregulierung in einem engen Bereich rund um die Nutzpflanze. Hier mit drei Tellermessern ohne Verzahnung.

In Anbetracht der Funktionalität des Tornados stellte sich die Doppelmechanik als nicht mehr praktikabel und zu kostenintensiv heraus. Allerdings wurde der Bohrer daraufhin als alleinstehendes Werkzeug erprobt und als Geräteoption neben dem Tornado etabliert, da er sich bei der gezielten Bearbeitung von einzelnen großen oder stark verwurzelten Beikräutern als sehr effizient herausstellte. Damit hat der Bohrer neben dem Tornado einen sinnvollen Anwendungsbereich gefunden.

Um die Genauigkeit der Unkrautbekämpfung weiter zu steigern, wurde der Kalibrierprozess der Innenkamera zur Bodenebene deutlich verbessert. Dazu wurde eine aus Blech gefertigte Kalibrierplatte entwickelt, welche den vollständigen Arbeitsbereich des Roboters abdeckt und mit Anschlägen zur präzisen Positionierung unter dem Roboter ausgestattet ist. Der Kalibrierprozess wurde durch einen halb autonomen Erkennungsalgorithmus ergänzt und die UI entsprechend angepasst (*Abb. **8***).

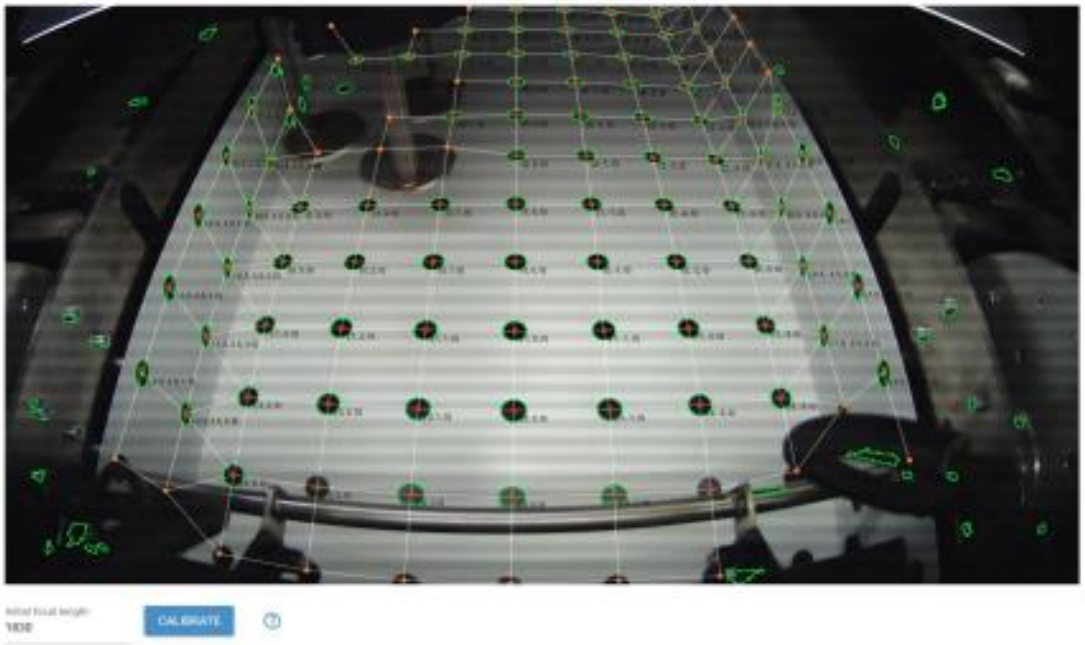

Abb. 8: Neu in die Software implementierter Kalibrierprozess unter Verwendung der Kalibrierplatte

Das User Interface des Uckerbots wurde zwischenzeitlich um einen Feldplaner ergänzt (*Abb. **9***). Dieser erlaubt das Anlegen von Feldern inklusive Feldgrenzen, Reihen und Hindernissen. Des Weiteren ist es möglich, einem Roboter ein spezifisches Feld bzw. spezifische Reihen auf dem Feld als Arbeitsbereich zuzuordnen.

Der Feldplaner wurde in einem späteren Arbeitsschritt vereinfacht und in die Hauptseite des UI integriert. Die Nutzbarkeit der Felderstellung wurde hierbei maßgeblich verbessert und Nutzende werden nun Schritt für Schritt durch den Prozess geführt (*Abb. **10***).

Außerdem wurde das Speichern von Feldern durch die Möglichkeit, ein Feld mit mehreren Beeten anzulegen, erweitert und weiter optimiert. Die aktuell implementierte Felddefinition basiert auf einigen wenigen Parametern und einer AB-Linie, welche eine häufig genutzte Orientierung für die Definition von Feldern darstellt. Die notwendigen Parameter sind die Beet- und Reihenanzahl, Beet- und Reihenabstand, die Breite des Vorgewendes sowie die angebaute Frucht pro Beet. Die einzelnen Reihen des Feldes, welche zur Navigation der Roboter entscheidend sind, werden dynamisch berechnet. Zu einem existierenden Feld können Stützpunkte für einzelne Reihen erfasst werden, sollten Reihenabstände von Standardparametern abweichen, wodurch auch unregelmäßige Felder bearbeitbar bleiben.

Abb. 9: User Interface des neu entwickelten Feldplaners

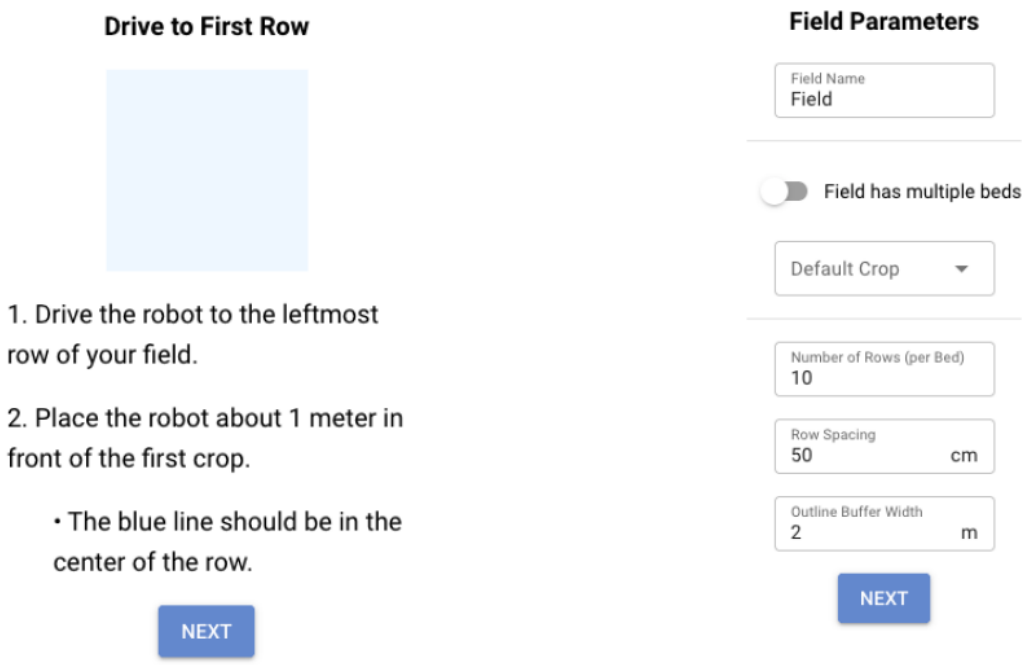

Abb. 10: Das UI führt schrittweise durch die Felderstellung und gibt Nutzenden gezielte Anweisungen. Zuerst wird eine AB-Linie erfasst. Dazu muss der Roboter jeweils auf Start- und Endpunkt platziert werden (links). Anschließend werden weitere Parameter abgefragt, die das Feld definieren (rechts). In einem dritten Schritt können pro Beet individuelle Nutzpflanzen eingestellt werden.

Weiter wurde eine Importfunktion für Felddaten entwickelt, die die Integration und Verarbeitung externer Feldinformationen ermöglicht. Diese Innovation unterstützt die präzise Navigation und Aufgabenplanung des Roboters, indem sie relevante Felddaten direkt in den Planungsprozess einbezieht.

Im Rahmen des **AP 2.2**, das sich mit der Entwicklung robuster Schwarmroboter beschäftigt, wurden ebenfalls bedeutende Fortschritte erzielt. Dabei standen die iterative Konzeptualisierung

und Entwicklung des Roboteraufbaus im Fokus. Besondere Aufmerksamkeit wurde der Integration verschiedener Schlüsselkomponenten gewidmet, um die Funktionalität und Handhabbarkeit des Roboters zu verbessern.

Durch einen iterativen Entwicklungsprozess konnte ein verbessertes Chassis entwickelt werden. Das neue Fahrgestell ist durch eine Knickform der Flanken und die Verwendung von Alu-Nut-Profilen gekennzeichnet (*Abb.* ***11***). Durch das erneuerte Konzept konnten die grundlegende Montage sowie individuelle Modifikationen, gerade im Entwicklungsprozess, vereinfacht werden, was eine wesentliche Verbesserung gegenüber den Vorgängermodellen darstellt.

Abb. 11: Neu gestaltetes Chassis mit integrierten Alu-Nutprofilen

Ein weiterer wesentlicher Bestandteil der Umkonstruktion des Roboters war die Umgestaltung der Anordnung von Antennen und Nothalt-Schaltern. Diese wurden ins Innere bzw. an die Seiten verlagert, um den Transport und die Ablage von Gegenständen auf dem Roboter zu ermöglichen. Diese Maßnahme trägt nicht nur zur Funktionalität bei, sondern äußert sich auch in einer verbesserten Ästhetik und Ergonomie.

Zur weiteren Verbesserung der Witterungsbeständigkeit des Roboters wurde eine Schutzplane entwickelt (*Abb.* ***12***). Diese erleichtert durch ihre vereinfachte (De-)montage zudem den Zugang für Wartungsarbeiten und Reinigung, was die Instandhaltung der Roboter erheblich vereinfacht.

Abb. 12: Witterungsschutz ist durch die leicht anzubringenden Plane gewährleistet

Ein weiteres Merkmal der neuen Robotermodelle sind die seitlich angebrachten Henkel, die einen vereinfachten Transport ermöglichen. Diese Ergänzung ist besonders wichtig für die Handhabung im Feld, da sie die Mobilität und Einsatzbereitschaft der Roboter steigert. Die Anbringung von Beleuchtungselementen und Bumpern dient der Erhöhung der Sichtbarkeit und Sicherheit der Roboter, sowohl für Nutzende als auch im Rahmen des Schwarmbetriebs für andere Roboter (*Abb.* ***13***).

Abb. 13: Zusätzliche Designelemente am Roboter: klappbare Tragegriffe, Beleuchtungselemente und Bumper).

Die Neugestaltung der Elektronikbox ermöglicht eine bessere Raumnutzung und einen leichteren Zugang zu den elektrischen Komponenten des Roboters, was für die Wartung und die dynamische Anpassung und Weiterentwicklung des Roboters sehr bedeutsam ist (*Abb.* ***14***).

Abb. 14: Einblick in die Elektronikbox des Uckerbots. Eine gesteigerte Komplexität und gleichbleibende Raumnutzung machen eine Optimierung der Komponentenanordnung erforderlich.

Ein weiterer Schwerpunkt des Redesigns des Uckerbots lag in der Schaffung von ausreichendem Platz für Zusatzakkus. Diese Maßnahme zielt darauf ab, die Betriebsdauer des Roboters zu verlängern und somit seine Effizienz und Ausdauer im Feld zu steigern.

Insgesamt wurden im Zuge der Forschungsprojekte zUckerrübe und Uckerbots nach den ersten Prototypen weitere vier felderprobte Uckerbots produziert, die den Namen U3 bis U6 tragen. Sie spiegeln die iterative Verbesserung des Systems wider und münden in dem aktuellen Design des Uckerbots (*Abb.* ***15***).

Abb. 15: Finaler Prototyp des modifizierten Feldroboters als Grundlage für den Einsatz im Schwarm.

Im Zuge der Weiterentwicklung des Erkundungsroboters, wie im **AP 2.3** beschrieben, wurden signifikante Upgrades durchgeführt, um dessen Fähigkeiten zu erweitern und ihn in einen autonomen Schwarmroboter zu verwandeln. Ein entscheidender Schritt dafür war die Ausstattung des Roboters mit einem “Teltonika RUT”-Router, der über LTE, WiFi und Hotspot-Funktionalität verfügt. Dadurch öffneten sich neue Möglichkeiten der Kommunikationsfähigkeit und der Netzwerkanbindung des Roboters, sodass er effizienter in einem verteilten Roboternetzwerk agieren kann.

Des Weiteren wurde der Roboter mit einer Rundumsicht, der sogenannten „Circle Sight“, ausgestattet, welche aus vier Mjpeg-Kameras besteht, die über einen Video-Encoder an den RUT-Router angeschlossen sind. Diese Erweiterung verbessert die visuelle Erkundungsfähigkeit des Roboters erheblich, da sie eine 360-Grad-Ansicht der Umgebung ermöglicht. In diesem Zuge wurde die Bedienoberfläche des Uckerbots durch die neuen Fähigkeiten des Roboters erweitert. Die aktualisierte Oberfläche ermöglicht nun eine effektive Fernsteuerung des Roboters und stellt die Daten der Circle Sight bereit (*Abb.* ***16***). Im **AP 3.1** wurde speziell die Erkundungsfähigkeit des Roboters mittels der „Circle Sight“ (vgl. *Abb.* ***16***) getestet, die eine Erweiterung der bisher

verwendeten Antennensignale darstellt. Dies erlaubt eine direkte und intuitive Steuerung des Roboters bei der Erkundung und Überwachung von Feldern.

Das **AP 3.2** konzentrierte sich auf die Implementierung und Erprobung eines günstigen Multisatelliten- und Multiband-GNSS-Moduls. Dieses Modul, welches mit zwei Antennen ausgestattet ist, ermöglicht den Zugang zu RTK-Diensten mit zentimetergenauer Positionierung und der genauen Orientierung des Roboters. Eine solche präzise Lokalisierung ist für die Navigation und die Durchführung positionsbasierter Aufgaben im Feld von zentraler Bedeutung.

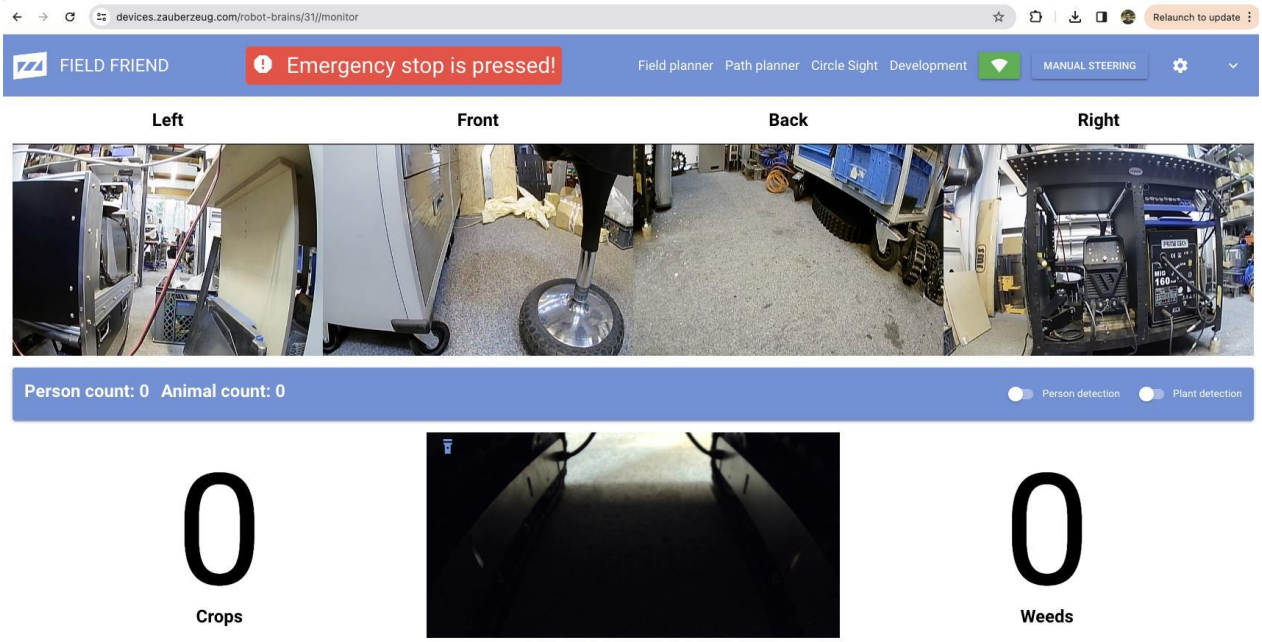

Abb. 16: Die überarbeitete Bedienoberfläche bietet eine Übersicht über die Ansichten der Umsichtkameras (Circle-Sight), wodurch eine Rundumsicht und Überwachung des Roboters möglich ist.

Der in **AP 2.3** im Uckerbot integrierte „Teltonika RUT“-Router gewährleistet eine Internetverbindung per WLAN oder SIM-Karte, die im vorgestellten Konzept aus **AP 3.2** für eine RTK-fixierte Positionsbestimmung vorausgesetzt wurde. Unter der Annahme, dass eine Internetverbindung für die vollständige Funktionalität eines Roboters erforderlich ist, bedarf es keines weiteren Aufwands, die Vorteile eines unabhängigen Servers für die Koordination eines Roboter-Schwarms zu nutzen. Der größte Vorteil hierbei ist es, Prozesse von Robotern auf den Server auszulagern. Damit wird die Notwendigkeit, einen Roboter als „Schäferhund“ zu identifizieren und diesen mit zentralen Prozessen zu belasten, beseitigt. Zwar besteht das Risiko, dass Roboter die Verbindung zum Internet und somit zum Server verlieren, aber dieses Risiko ist letztlich hinfällig, da eine stabile Internetverbindung bereits mit **AP 2.3** obligatorisch ist. Der fehlenden Autarkie auf Grund der Anbindung an einen Server stehen sowohl die stabile Erreichbarkeit des Dashboards als auch die Verwendung der Roboter-Flotte entgegen, obgleich einzelne Roboter nicht erreichbar sind. Mit der Gleichstellung aller Roboter kann der Ausfall einzelner Roboter konsistent kompensiert werden, wohingegen die Verwendung eines „Schäferhundes“ ein größeres Ausfallrisiko bedeuten würde. Außerdem bleibt der Roboterschwarm weiterhin durch zentrale Koordinierung skalierbar, gerade da abhängig von der

Anwendung nicht gewährleistet werden kann, dass eine stabile Verbindung unter den Robotern bestünde.

Trotz der Entscheidung, die Internetverbindung für eine serverbasierte Schwarmsteuerung zu nutzen, wurde gemäß **AP 3.4** ein Austausch relativer Daten für eine Inter-Roboter-Kommunikation erprobt. Dazu wurde das vom IHP gebaute LoRaWan-Gateway und ein LoRaWan-Node verwendet. Ein „Schäferhund“ würde mit dem Gateway (vgl. *Abb.* ***17***) ausgestattet werden und andere Roboter könnten dann mit diesem über einen LoRaWan Node kommunizieren. So wäre es möglich, dass über LoRaWan Nachrichten an den „Schäferhund“ gesendet werden. Dieser wiederum könnte über eine Cloud-Anbindung Informationen über das Internet bereitstellen.

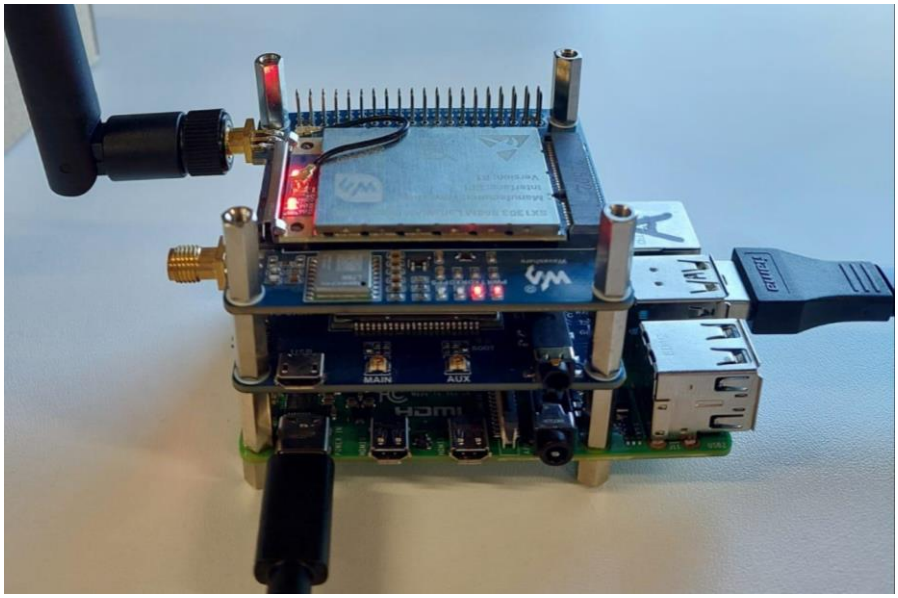

Abb. 17: Der Gateway-Stack setzt sich aus einem Raspberry Pi 4B, einem LTE-Sim-Modul und einem LoRaWan Gateway-Modul zusammen

Im Zuge des **AP 3.3** wurde ein Konzept einer anwenderfreundlichen Bedienbarkeit eines Roboter-Schwarms im Sinne des Projektes erstellt. Daraus resultierend wurde ein User-Interface entworfen, welches eine Übersicht und die Steuerung eines Roboterschwarms ermöglicht. Das daraus resultierende Schwarm-Dashboard (vgl. *Abb.* ***18***) besteht aus drei wesentlichen UI-Elementen: einer Roboterliste, einer Karte und der Automationssteuerung.

Die Roboterliste enthält eine Übersicht aller dem Schwarm zugewiesenen Roboter sowie deren aktuellen Status (siehe *Abb.* ***19***). Der Status eines Roboters gibt Auskunft über dessen Erreichbarkeit, seinen Betriebszustand (aktiv, inaktiv) und ob ein Fehler vorliegt. Zusätzlich werden weitere Parameter wie der Akkustand, die aktuelle Position, der Automationszustand und die installierten Softwareversionen in der Liste angezeigt. Über die Roboterliste besteht die Möglichkeit, auf die Benutzeroberfläche der einzelnen Roboter zuzugreifen, um detaillierte Monitoring-Funktionen zu nutzen und roboterspezifische Konfigurationen vorzunehmen. Die Liste ermöglicht eine schnelle und zentrale Wartung der Roboterflotte.

Ein weiteres Element des Schwarm-Dashboards ist eine Landkarte. Diese bietet eine Übersicht über die Position der gesamten Flotte. Aktive Roboter werden farblich hervorgehoben und deaktivierte Roboter ausgegraut dargestellt. Wird in der Automationssteuerung ein Feld ausgewählt, wird dieses ebenfalls in der Karte angezeigt. So gibt das Dashboard Aufschluss darüber, welcher Roboter sich auf dem gewählten Feld befindet.

Die Automationssteuerung (siehe *Abb. **20***) bietet eine Auswahl sämtlicher Felder, die dynamisch über die API der erreichbaren Roboter abgerufen werden. Darüber hinaus ermöglicht die Bedienung die Zuweisung von Beeten innerhalb des ausgewählten Feldes an spezifische Roboter des Schwarms. Dadurch erhalten Nutzende die Kontrolle über die Verteilung der Arbeitsbereiche der einzelnen Roboter. Der Automationsbereich kann in der UI ein- und ausgeblendet werden, wodurch das Gesamtbild bereinigt wird und den Blick der Nutzenden auf wesentliche Elemente lenkt. Eine Automation kann über die Bedienung gestartet, pausiert und gestoppt werden, sobald ein Feld ausgewählt ist und dessen Beete Robotern zugewiesen sind. Durch diese sehr reduzierten Bedienmöglichkeiten wird die Nutzung eines Roboterschwarms vereinfacht und mit einem sehr geringen Einarbeitungsaufwand ermöglicht.

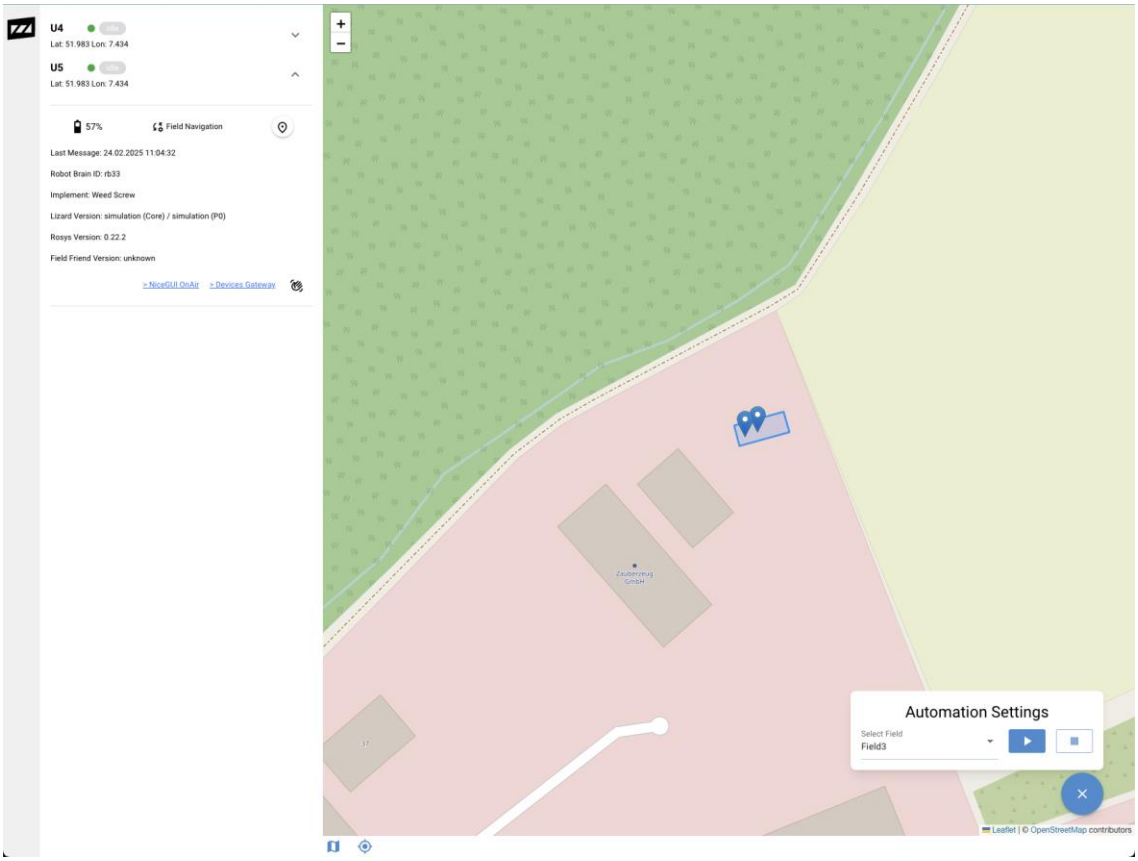

Abb. 18: Das Schwarm-Dashboard ist eine Webanwendung, die aktuelle Statusinformation sowie die Position der Roboter-Flotte anzeigt. Außerdem ist in den Automations-Einstellungen die Steuerung einer Schwarm-Automation möglich.

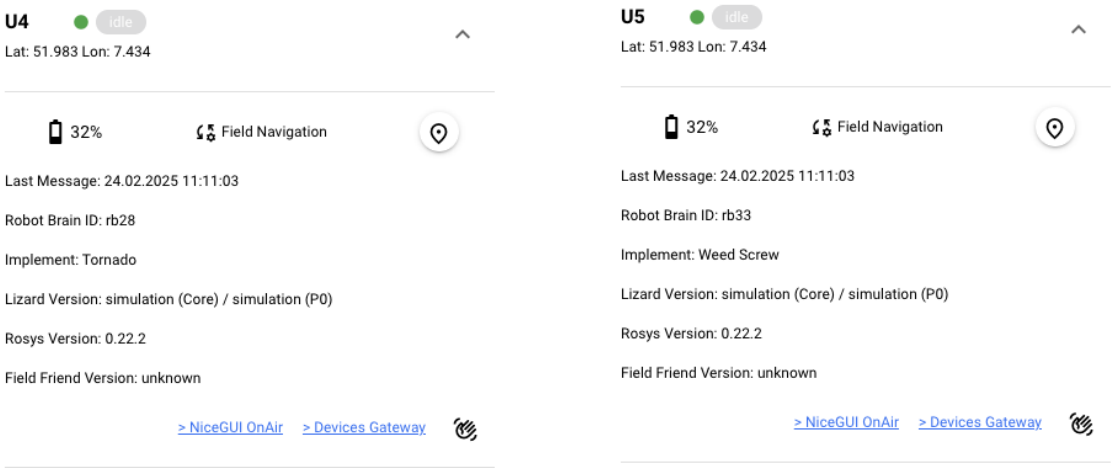

Abb. 19: In der Liste der Roboter-Flotte im Dashboard können dynamisch detaillierte Informationen über die Roboter angezeigt werden. Außerdem besteht eine direkte Verbindung zu den Interfaces der einzelnen Geräte.

Hinsichtlich **AP 3.4** bietet dies die Möglichkeit, ein Feld mit mehreren Robotern zu bearbeiten und dabei den notwendigen Sicherheitsabstand zwischen den Robotern zu gewährleisten.

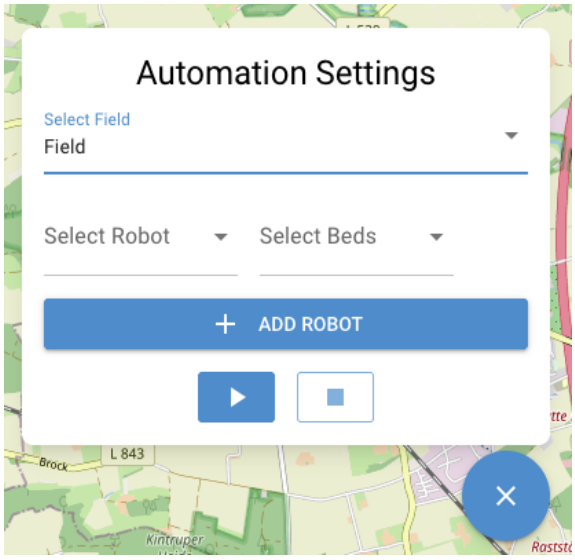

Abb. 20: Im Automationsfenster kann ein Feld ausgewählt und es können einem Roboter Beete dieses Feldes zugeteilt werden. Außerdem können mehrere Roboter zur Automation hinzugefügt werden. Außerdem kann eine Automation gestartet, pausiert und gestoppt werden.

Die Verwendung der Schwarmfunktionalität setzt voraus, dass die einzelnen Roboter bereits entsprechend eingerichtet sind. Die Einrichtung ist auch bei der Verwendung einzelner Roboter notwendig, weshalb für detaillierte Einstellungen auf die einzelnen Roboter UIs zurückgegriffen werden kann. Bei der Schwarmautomation werden gewählte Roboter über ihre Schnittstelle mit jeweils einer eigenen Automation beauftragt. Dafür wurde die Software der Roboter durch API-Endpunkte erweitert, die den Abruf des Status und die Steuerung der Automation ermöglichen. Diese sind entsprechend durch eine Authentifizierung vor unbefugtem Zugriff geschützt. Die Schnittstelle der Roboter kann in Zukunft erweitert werden und ermöglicht theoretisch auch eine Kommunikation unter Robotern.

Um die Bearbeitung eines Feldes mit Beeten und eine Auswahl an Beeten mit einem Roboter zu ermöglichen, wurde die bisherige Feldnavigation dahingehend angepasst. Einerseits wurde der Prozess der Felderfassung wie oben beschrieben überarbeitet und durch die Erstellung von Beeten erweitert. Die Aufteilung eines Feldes in Beete ermöglicht eine dynamische Bearbeitung von Beeten im Schwarm.

Für eine benutzerfreundliche Verwendung wurde die Feldnavigation durch die Funktionalität erweitert, die Navigation auch zu dann ermöglichen, wenn sich der Roboter bereits auf einer Reihe befindet. Wurde beispielsweise eine Automation gestoppt oder soll an einer bestimmten Stelle fortgesetzt werden, wird die Ausrichtung des Roboters geprüft und die Automation von seiner Position aus gestartet. Dies erhöht die Flexibilität der Automation.

Durch die Arbeit auf verschiedenen Beeten und die individuelle Einstellung der Roboter samt ihrer Einbaugeräte ist eine Feldbearbeitung durch eine heterogene Roboter-Flotte möglich. Auch die flexible Erweiterung oder das Abfangen von Ausfällen im Schwarm ist somit ohne Weiteres gewährleistet.

Ergänzend zu **AP 2.1** wurde die Positionsbestimmung der Roboter durch die Nutzung eines Kalman-Filters erweitert, welcher eine kontinuierliche Positionsbestimmung ermöglicht, Messungenauigkeiten ausgleicht und insgesamt die Arbeitsgeschwindigkeit erhöht.

II.2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Bedingt durch die sehr aufwändigen Arbeiten im Projekt stellte der Personalkostenblock die größte Budgetposition im Projekt dar; diese Kostenposition fiel gegenüber der ursprünglichen Planung sogar noch etwas größer aus.

Ein geringer, bewilligter Kostenblock für vorhabenspezifische Abschreibungen (mobile Workstations) wurde nicht in Anspruch genommen. Daneben fielen in geringem Umfang Kosten für Software-Lizenzen im Kostenblock „Sonstige unmittelbare Vorhabenkosten“ sowie Reisekosten an.

II.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Das Projekt war durch zahlreiche, komplexe Entwicklungen an der Trägerplattform und diversen Baugruppen, umfangreichen Entwicklungsarbeiten an den Werkzeugen sowie Software-Entwicklungen gekennzeichnet. Die Entwicklung erforderte darüber hinaus die Erprobung mehrerer Iterationen im Rahmen aufwändiger Praxis- und Feldversuche.

Diese Arbeiten waren mit einem erheblichen (insbesondere personellen und in geringerem Umfang auch materiellen) Aufwand verbunden, der allerdings bereits bei der ursprünglichen Projektkonzeption berücksichtigt und durch die Bewilligung auch von Zuwendungsgeber-Seite bestätigt wurde. Dieser Aufwand war jedoch unverzichtbar und damit sowohl notwendig als auch angemessen. Die einzelnen Schritte bzw. Phasen im experimentellen Vorgehen können anhand der detaillierten Darstellung in Abschnitt II.1 dabei gut nachvollzogen werden.

Mit Blick auf die Notwendigkeit und Angemessenheit der Arbeiten ist hervorzuheben, dass nahezu alle wichtigen Projektziele erreicht werden konnten und im Rahmen des Vorhabens Lösungen entwickelt werden konnten, die sich durch ihren großen Nutzen und sehr vielversprechende Verwertungsperspektiven auszeichnen.

II.4 Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse

Gemäß dem ursprünglichen Verwertungsplans ist eine kommerzielle Markteinführung des Uckerbots eingeplant. An den Einschätzungen des Verwertungsplans wird ohne Änderungen gegenüber der Antragstellung festgehalten. Dazu befindet sich die Zauberzeug GmbH bereits in konkreten Gesprächen mit möglichen Vertriebspartnern, was die Zielerreichung weiter manifestiert.

Die im Zuge dieses Projektes produzierten Uckerbots verbleiben am Ende des Projektes wie geplant beim Verbundpartner HNEE und werden von der Zauberzeug GmbH weiter mit betreut. Hier gibt es bereits weitere Anwendungsfälle für die lauffähigen Roboter.

Der Uckerbot als offene Plattform wird überdies als anpassbares Trägersystem „Feldfreund“ weiterentwickelt, um den Roboter auch für andere Anwendungsbereiche zu öffnen und so das Wissen der wissenschaftlichen Arbeit weiter sinnvoll zu verwerten. Hier konnten bereits erste Kooperationen und Anwendungsbereiche erschlossen werden, was den Wert des Systems verdeutlicht.

II.5 Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Neben dem Uckerbot-Projekt gab es weitere Entwicklungen im Bereich robotergestützter Unkrautregulierung. Beispiele sind der Farming GT (Farming Revolution), der FarmDroid FD20 oder Forschungsprojekte wie *NextGen:CropCare* und *Robs4Crops*. Während viele dieser Vorhaben entweder auf kommerzielle Großsysteme, rein kamerabasierte Lösungen oder konventionelle Anbausysteme abzielen, verfolgt *der Uckerbot* mit dem Einsatz eines leichtgewichtigen Hackroboters und dem Ziel der schwarmgestützten Unkrautregulierung einen innovativen Ansatz. Insbesondere der Fokus auf den ökologischen Zuckerrübenanbau, die Entwicklung eines modularen, ressourcenschonenden Robotersystems und die offene Forschungsumgebung zur Weiterentwicklung der KI-gestützten Pflanzenerkennung heben das Vorhaben von anderen ab. Zudem wurde mit dem Projekt frühzeitig ein Feld erschlossen, das mittlerweile auch in marktnäheren Lösungen an Bedeutung gewinnt, was die Pionierrolle und die strategische Relevanz des Uckerbots zusätzlich unterstreicht.

II.6 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen

Rundfunk

Der WDR hat im Zuge der Abschlusspräsentation des hier beschriebenen Uckerbot-Projekts einen Bericht über den Uckerbot und das Unternehmen Zauberzeug gedreht (https://youtu.be/4h0mgS4NXyw?si=I5iFLJGxurSlTeKf). Außerdem sind weitere mediale Veröffentlichungen geplant.

Patentpublikationen:

Bereits im Zuge des zUckerrüben-Projekts wurde ein Patent für die Sprossachserfassung angemeldet. Dieses wurde nun veröffentlicht und internationalisiert (EP4324313B1: https://patents.google.com/patent/EP4324313B1/de).

Außerdem wurde ein Patent für die Pendelhacke der beschriebenen Doppelmechanik unter dem Titel “Pendulum hoe and robot vehicle with pendulum hoe” patentiert (EP4466967A1: https://patents.google.com/patent/EP4466967A1/en?q=(pendelhacke)&oq=pendelhacke)

Wissenschaftliche Veröffentlichungen:

- „Unkrautregulierung im ökologischen Zuckerrübenanbau in der Uckermark – Erprobung und Bewertung des autonomen Feldroboters Uckerbot“, Conference Paper; 64. Tagung der Gesellschaft für Pflanzenbauwissenschaften e.V., Göttingen, Oktober 2023.
- „Organic sugar beet (Beta vulgaris L.) cultivation using the field robot Uckerbot as a system for sustainable farming“, GIL-Jahrestagung 2024, Beitrag von Steinherr, Leonie (Hochschule für nachhaltige Entwicklung Eberswalde) und Belo, Miguel (Zauberzeug GmbH).
- „Roboterschwärme auf dem Feld“, Fachmagazin „Lumbrico“, Ausgabe 15/2023, Seiten 15–18.
- „AI in Current and Future Agriculture“, Editorial in „KI-Künstliche Intelligenz“ 37.2 (2023): 113–115, von Hertzberg, Joachim, Benjamin Kisliuk und Jan Christoph Krause.
- „Zauberzeug Learning Loop: A no-code AI Platform“, Forschungsbericht von Glahe, Philipp und Rodja Trappe, im „German Journal for Artificial Intelligence“, Springer Verlag, Dezember 2023.