



WeBaRo

Weihnachtsbaumroboter

Autonome Trägerplattform zur Pflanzung, Pflege und Langzeitkartierung von
Weihnachtsbaumkulturen

Sachbericht zum Verwendungsnachweis gemäß NKBF 2017

Von

Innok Robotics GmbH
Bahnweg 4
93128 Regenstauf
info@innok-robotics.de

Förderkennzeichen 2818503B18

Gefördert durch



Bundesministerium
für Ernährung
und Landwirtschaft



Projektträger



Bundesanstalt für
Landwirtschaft und Ernährung



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Inhalt

1 Kurzdarstellung (Teil I)	3
1.1 Ursprüngliche Aufgabenstellung sowie wissenschaftlicher & technischer Stand	3
1.2 Ablauf des Vorhabens	3
1.3 Wesentliche Ergebnisse und Zusammenarbeit mit anderen Stellen	3
2 Eingehende Darstellung (Teil II)	5
2.1 Durchgeführte Arbeiten im Vergleich zur Vorhabenbeschreibung	5
2.1.1 Arbeitspaket 1 - Trägerplattform	5
2.1.2 Arbeitspaket 2 - Sensor- & Datenbasierte Baumkartierung	7
2.1.3 Arbeitspaket 3 - Navigation	8
2.1.4 Arbeitspaket 4 - Integration & Sicherheit	10
2.1.5 Arbeitspaket 5 - Test & Präsentation	11
2.1.6 Arbeitspaket 6 - Simulation	12
2.2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises	12
2.3 Notwendigkeit & Angemessenheit der geleisteten Arbeiten	13
2.4 Voraussichtlicher Nutzen & Verwertbarkeit	13
2.5 Fortschritt bei anderen Stellen	13
2.6 Veröffentlichungen	13

1 Kurzdarstellung (Teil I)

1.1 Ursprüngliche Aufgabenstellung sowie wissenschaftlicher & technischer Stand

Das Verbundprojekt *WeBaRo* (Laufzeit 01/2020 - 12/2024) war darauf ausgerichtet, eine autonome Trägerplattform für Weihnachtsbaumkulturen zu schaffen, die den gesamten Lebenszyklus der Bäume abdeckt: von der präzisen, RTK-GNSS-gestützten Pflanzung über eine mechanische Unkrautregulierung bis hin zur georeferenzierten Langzeitkartierung aller Einzelpflanzen. Diese Funktionsbündelung war zum Projektstart weder im Markt verfügbar noch in der Literatur als Gesamtlösung beschrieben. Vorhandene Ansätze, etwa LiDAR-basierte Reihenerkennung oder GNSS-Navigation aus dem Ackerbau, lagen isoliert vor und mussten zunächst zusammengeführt werden. Nachdem der ursprünglich vorgesehene Hardwarepartner KommTek ausstieg, übernahm Innok Robotics im März 2021 die Verantwortung für die Plattformintegration und entschied, die eigene Autonomie-Suite *Innok Cockpit* um einen „Plantagen-Modus“ zu erweitern. Parallel wurde das Steuermodul **NAVIBOX** mit RTK-GNSS-Empfänger, IMU, Safety-PLC und LiDAR-Schnittstellen konzipiert, um eine plug-and-play-fähige Basis für künftige OEM-Fahrzeuge zu liefern.

1.2 Ablauf des Vorhabens

Das Vorhaben gliederte sich in sechs Arbeitspakete, die im Juni 2022 noch einmal angepasst wurden: Die ursprünglich vorgesehene Eigenkonstruktion des Fahrzeugs entfiel, und an ihre Stelle traten Teilpakete, die den Umbau einer bereits existierenden Kettenraupe vorsahen. Trotz detaillierter System- und Verdrahtungspläne kam das Fahrzeug jedoch nicht zur Lieferung, so dass sämtliche Integrations-, Sicherheits- und Funktionstests vollständig in eine Webots-Simulationsumgebung sowie in Interimsprototypen-Aufbauten verlagert wurden. Während EZLS seine Algorithmen zur Baumreihen- und Einzelpflanzenerkennung sowie zur Hybridnavigation erfolgreich im virtuellen Zwilling erprobte, konzentrierte sich Innok Robotics auf die Fertigstellung der NAVIBOX-Blueprints und die Einbettung der neuen Funktionen in das Cockpit-Front-End. Die praktische Erprobung durch Innok Robotics auf realem Gerät musste entfallen, und auch das anfänglich verfolgte Vermarktungsmodell wurde ausgesetzt, da sich während der Laufzeit weder belastbares Kundeninteresse noch konkrete Bestellungen ergaben. Gleichwohl blieb die wissenschaftlich-technische Arbeit innerhalb der genehmigten Budget- und Zeitgrenzen, indem Verzögerungen konsequent durch simulationsbasierte Tests kompensiert wurden.

1.3 Wesentliche Ergebnisse und Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Obwohl kein physischer Demonstrator bei Innok entstand, konnte das Konsortium substantielle Resultate erzielen. Innok Robotics entwickelte einen vollständig IP-geschützten Aufbau der NAVIBOX mit nachgewiesener Not-Aus-Reaktionszeit von 78 ms. Die Baugruppen sind modular gehalten und können mit wenig konstruktivem Zusatzaufwand in fremde Fahrzeuge integriert werden. Der neue Plantagen-Modus des Innok Cockpit verbindet RTK-GNSS, IMU-Daten, LiDAR-SLAM und baumbasierte Landmarken zu einer Hybridlokalisierung, die im virtuellen Zwilling Spurfehler von maximal vier Zentimetern bei 0,8 m/s einhält. Automatische Wendemanöver und

ein Live-Overlay der Baumpositionen gehören zum Funktionsumfang. EZLS trug robuste Verfahren zur Reihen-erkennung und Einzelbaumdetektion sowie wesentliche Teile des Navigations- und Sicherheitskonzepts bei, während die Baumschule Solbach praxisrelevante Anforderungen definierte und Daten für die Bewertung durch Algorithmen bereitstellte. Aus der gemeinsamen Arbeit gingen ein Konferenzbeitrag für *AgEng 2024* und mehrere Fachartikel hervor. Alle Publikationen sind als Open-Access verfügbar und dokumentieren die Ergebnisse für Forschung und Industrie. Auch wenn das Raupenfahrzeug letztlich nicht beschafft wurde und derzeit kein akuter belastbarer Marktbedarf erkennbar ist, fließen sämtliche Erkenntnisse unmittelbar in die Weiterentwicklung der Serien-Software von Innok Robotics ein und bilden damit eine solide Grundlage für zukünftige OEM-Projekte in Sonderkulturen.

2 Eingehende Darstellung (Teil II)

2.1 Durchgeführte Arbeiten im Vergleich zur Vorhabenbeschreibung

2.1.1 Arbeitspaket 1 - Trägerplattform

Ausgangslage und Zielsetzung

Das Arbeitspaket verfolgte ursprünglich einen vollständigen Eigen-Entwurf der Fahrzeugbasis (AP 1.2-1.4). Nach dem Partnerwechsel zu Innok Robotics und den Erkenntnissen aus ersten Feldversuchen entschied das Konsortium im Juni 2022, eine bereits im Weihnachtsbaummanagement bewährte, ferngesteuerte Diesel-Kettenraupe des Partners Mera-Rabeler zu automatisieren. Damit wurden die Unterpakete 1.2-1.4 als obsolet gestrichen und durch 1.5-1.8 ersetzt. Ziel blieb, eine hangtaugliche Plattform mit adaptierbarer Bordelektronik, sicherer Energieversorgung, CAN-Schnittstelle und Anbaugeräte-Interface bereitzustellen.

Erreichte Teilziele in den Unterpaketen 1.1 bis 1.8

AP 1.1 Konzeption

Innok validierte gemeinsam mit Solbach die mechanische Eignung der Raupe (Spurbreite 0,70 m, Hangleistung $\geq 18\%$) und legte den Energiebedarf für Hydraulik- und Elektroverbraucher fest. Parallel wurden zwei manuell gesteuerte Testfahrzeuge aufgebaut, um Antriebskonzepte und Bodendruck zu verifizieren.

AP 1.5 Vorbereitung des Raupenfahrzeugs

Zwischen Februar und August 2022 definierte Innok eine CAN-basierte Kommunikationsschnittstelle zwischen Fahrzeug-SPS und NAVIBOX. Rad-Encoder, Linearmotor zur Motordrehzahlsteuerung und ein Generator-Upgrade wurden spezifiziert.

AP 1.6 Konfiguration und Ausstattung der NAVIBOX

Die NAVIBOX erhielt ein IP-65-Edelstahlgehäuse mit Trimble BX992 RTK-GNSS, Xsens-IMU, Safety-PLC (Sil 2) und LTE-Router. Stückliste, Einbaukonzept und Verdrahtungsplan sind abgeschlossen.

AP 1.7 Installation der NAVIBOX

Sämtliche Sensoren und Aktoren wurden beschafft. Aufgrund der noch ausstehenden Raupenlieferung konnte die mechanische Montage jedoch nicht beginnen. Die Komponenten wurden stattdessen in einem Interimprototypen durch den Projektkoordinator in Betrieb genommen.

AP 1.8 Anpassung der Anbaugeräte

Für Pflanzlochbohrer, Düngergabe, Schwingarm-Mulcher und Stumpfbeschneider wurden Hydraulik- und Elektro-Schnittstellen konstruktiv vorbereitet. Eine praktische Anpassung ist der Trägerplattform ausgesetzt. Erste Umsetzungen fanden an einem Prototypen statt.

Abweichungen und Ursachen

Material- und Chip-Engpässe sowie die Umstrukturierung der früheren Innok-Gesellschaft führten zu Verzögerungen im Projektablauf, weshalb das Projektende mehrfach verschoben wurde. Trotzdem wurde die eingeplane Raupe nicht bis Projektende ausgeliefert. Damit entfiel jede reale Integrations- und Sicherheitsabnahme. Alle Tests wurden in Webots-Simulation und Interimsprototyp verlagert.

Ergebnisse und Verwertung innerhalb Innok

- Eine **Plug-and-Play-Steuerbox** für zukünftige OEM-Fahrzeuge liegt vor. Die modulare Architektur ermöglicht schnelle Adaption auf andere Raupen- oder Radplattformen.
- Die dokumentierten CAN-Profile, Sensorpakete und Safety-Design-Regeln fließen in Serienprodukte des *Innok Cockpit*-Ökosystems ein, obwohl eine Markteinführung des Weihnachtsbaum-Roboters selbst nicht mehr verfolgt wird.
- Die in AP 1 erworbenen Erkenntnisse zu Energiebedarf, Hydraulik-Integration und Hangstabilität werden als Referenz für künftige Sonderkultur-Roboterprojekte genutzt.

Lessons Learned

Die Entscheidung, eine vorhandene Raupe statt eines Eigenbaus zu automatisieren, reduzierte zwar Entwicklungsrisiko und Kosten, band das Projekt jedoch an externe Lieferketten. Die frühzeitige Parallelisierung von Hardware-Blueprints und virtuellen Tests erwies sich als kritisch, um trotz Ausfall der Plattform sämtliche Software-Meilensteine termingerecht zu erreichen.

2.1.2 Arbeitspaket 2 - Sensor- & Datenbasierte Baumkartierung

Ausgangslage und Zielsetzung

Ziel dieses Arbeitspakets war es, eine durchgängig echtzeitfähige Pipeline zur Baumreihen- und Einzelpflanzenerkennung aufzubauen, sämtliche Ergebnisse georeferenziert abzulegen und die Algorithmen so in Innok Cockpit einzubetten, dass sie später ohne tiefgreifende Anpassungen auf OEM-Plattformen übertragbar sind.

AP 2.1 Echtzeit-Reihenerkennung

Zu Beginn wurden drei Sensorklassen - ein 16-Lagen-LiDAR (Velodyne Puck), eine ToF-RGB-Kamera (Argos 3D P330) und eine Stereo-RGB-D-Kamera (Intel RealSense D435/D455) - unter Praxisbedingungen verglichen. Wegen ihres günstigen Preis-Leistungs-Verhältnisses, der gleichzeitigen Bereitstellung von Tiefen- und Farbinformationen und des geringen Einbauaufwands fiel die Entscheidung zugunsten der RealSense-Familie. Der LiDAR bleibt für Reichweiten jenseits von zehn Metern eine Option. Die erzeugte Punktwolke wird in Echtzeit mit IMU- und Odometriewerten fusioniert. Ein bodenparalleler Schnitt entfernt niedrigen Bewuchs, anschließend gruppiert ein hierarchisches Cluster-Verfahren die Punkte zu Baumreihen. Auf rechenintensive Algorithmen wie RANSAC wurde bewusst verzichtet, um eine Verarbeitung mit mindestens 15 Hz auf der Ziel-CPU zu gewährleisten.

AP 2.2 Einzelpflanzenerkennung

Bäume ab etwa dreißig Zentimetern Höhe lassen sich zuverlässig direkt aus der 3-D-Clustergeometrie extrahieren. Bei jüngeren Setzlingen ist die Tiefenauflösung jedoch zu gering. Deshalb wurde ein zweistufiges Verfahren implementiert: Zuerst projiziert die 3-D-Detektion ihre Ergebnisse in die synchronen RGB-Bilder und erzeugt dort automatisch Bounding-Boxen. Anschließend wird ein Convolutional Neural Network auf diesen synthetisch erzeugten Labels trainiert. Auf diese Weise entfällt der manuelle Annotierungsaufwand nahezu vollständig, und die Detektion kleiner Pflanzen erreicht eine hinreichende Präzision. Die Methode bildete den Kern eines Beitrags zu den AgEng 2024-Proceedings.

AP 2.3 Georeferenzierung und Langzeitdatenbank

Alle Positionen, Größen- und Gesundheitsmerkmale der Bäume werden bereits während der Fahrt in eine GeoJSON-Plantagenkarte geschrieben. Nach Abschluss der Mission überträgt das System die verschlüsselten Daten an einen Server, auf dem eine Web-Schnittstelle einen selektiven Zugriff ermöglicht. Zusätzlich hat Innok Robotics eine Importfunktion entwickelt, mit der vorhandene GIS- oder CSV-Bestandsdaten in Cockpit eingelesen werden können. Die sensorgestützte Kartierung dient dann entweder als Qualitätskontrolle oder als Fallback, falls keine Vordaten vorliegen.

Abweichungen und Herausforderungen

Die fehlende Trägerplattform machte es erforderlich, Datensätze mit manuell gesteuerten Testfahrzeugen aufzunehmen und die Hauptentwicklung anschließend im Webots-Zwilling gegen synthetisch erzeugte Sensorströme zu validieren. Außerdem zeigte sich, dass Setzlinge unter dreißig Zentimetern ohne Deep-Learning-Erweiterung nicht zuverlässig erkannt werden konnten. Hierfür waren zusätzliche, domänenspezifische Trainingsdaten nötig.

Ergebnisse und Verwertung innerhalb Innok

Die gesamte Mapping-Pipeline läuft heute containerisiert innerhalb der Cockpit-Architektur. Ein neuer Plantagen-Layer visualisiert Baumpositionen, Spurabweichungen und GNSS-Warnungen in Echtzeit. Sensorprofile, Auto-Label-Workflows und REST-Endpunkte werden in Serienprojekte für Obst-, Beeren- und Baumschulkulturen einfließen, auch wenn eine Vermarktung des Weihnachtsbaum-Roboters selbst nicht weiterverfolgt wird.

Lessons Learned

Kostengünstige RGB-D-Sensoren können hohe Genauigkeiten liefern, sofern schwache Tiefendaten bei Jungpflanzen durch geeignete Deep-Learning-Verfahren kompensiert werden. Die Kombination aus 3-D-basierten, automatisch generierten Labels und anschließendem CNN-Training erweist sich als skalierbarer Ansatz, um große Trainingsdatensätze ohne manuelle Annotation bereitzustellen, und soll künftig als Standardverfahren in weiteren Innok-Projekten dienen.

2.1.3 Arbeitspaket 3 - Navigation

Ausgangslage und Zielsetzung

Weihnachtsbaumkulturen stellen hohe Anforderungen an die Fahrzeugführung: Die Reihen sind nur 1,5 bis 3 Meter voneinander entfernt, häufig terrassiert und von Hochwald umgeben, sodass GNSS-Signale zeitweise abgeschattet sind. Ziel von Arbeitspaket 3 war deshalb eine zentimetergenaue, reihenbasierte Navigation, die auch unter schwierigen Empfangsbedingungen zuverlässig arbeitet, automatische Wendemanöver am Reihenende beherrscht und für spätere OEM-Plattformen portierbar bleibt.

GNSS-basierte Spurführung und Pfadplanung

Im Regelbetrieb nutzt das System eine RTK-fähige Trimble BX992-Antenne als primäre Quelle für die absolute Position. Auf Basis der virtuellen Plantagenkarte erzeugt ein Pfadplaner B-Spline-Bahnen, die Spurbreite, Hangneigung und den jeweiligen Arbeitsmodus (Pflanzung, Pflege oder Kartierung) berücksichtigen. Da lange Kettenfahrwerke beim Lenken stark ausschwenken, wird der Lenkeinschlag in der Reihe begrenzt. Die Software erlaubt nur sanfte Korrekturen, um Kollisionen mit benachbarten Bäumen auszuschließen.

Reihenwechsel-Manöver

Sobald das Fahrzeug das Reihende erreicht, initiiert der Controller ein zweistufiges Wendemanöver. Zunächst verlässt der Roboter die aktuelle Spur und führt eine starke Drehung aus, bei der die Ketten gegenseitig laufen, um Schlupf am Hang zu vermeiden. Anschließend richtet er sich auf die nächste Reihe aus, fährt vor und dreht erneut, bis der optimale Einfahrwinkel erreicht ist. Dieses Vorgehen erwies sich in Steillagen als deutlich robuster als ein einfacher 90-Grad-Knick.

Hybrid-Lokalisierung und Sensorfusion

Um GNSS-Abschattungen abzufangen, wurde eine erweiterte Kalman-Filter-Architektur aufgebaut, die RTK-Positionen, IMU-Daten, Radencoders und Baumlandmarken aus der Einzelpflanzenerkennung kombiniert. Sinkt die Satellitenqualität, übernimmt das System nahtlos die relative Odometrietrajektorie und ergänzt sie mit LiDAR-SLAM-Korrekturen sowie einer Baum-zu-Baum-Korrelation. In den Webots-Tests blieb der Querfehler selbst in GNSS-freien Passagen unter vier Zentimetern bei 0,8 m/s.

Integration in *Innok Cockpit*

Alle Navigationsmodule laufen containerisiert auf der NAVIBOX und senden Status-Topics an die Cockpit-UI. Die Browseroberfläche zeigt Live-Spurabweichung, virtuelle Baumreihe und GNSS-Warnhinweise. Mode-Switches zwischen Pflanzung, Pflege und Kartierung lassen sich per Webanwendung auslösen. Durch die konsequente Nutzung von Docker-Containern kann der komplette Stack ohne Anpassung auf künftige Trägerplattformen migriert werden.

Test- und Validierungsstrategie

Mangels realer Raupe fanden sämtliche Fahrversuche in der Webots-Simulation statt. Hangprofile bis 18 Prozent, variable Bodenreibwerte und unterschiedliche GNSS-Masken wurden parametrisch kombiniert, wodurch mehr als sechzig Szenarien automatisch in der CI-Pipeline abliefen. Erst wenn Spurfehler, Wendewinkel und Safety-Trigger alle Grenzwerte einhielten, wurde der Code in das Hauptrepository gemergt. Einzelne Algorithmen, wie etwa der Reihenfolger, konnten zusätzlich auf manuell gesteuerten Testfahrzeugen gegen reale Sensordaten geprüft werden.

Abweichungen und Herausforderungen

Die fehlende Fahrzeugplattform zwang das Team, das ursprünglich geplante GNSS-Kalibrierverfahren für den Raupentrack virtuell zu simulieren. Gleichzeitig zeigte sich, dass eine rein GNSS-basierte Navigation am Waldrand nicht ausreicht. Erst die baumgestützte Erweiterung lieferte eine durchgängige Genauigkeit. Die Kombination aus RTK, IMU und Landmarken erwies sich jedoch als rechenintensiv, sodass Optimierungen an der Auswertefrequenz und an der Punktwolkenauflösung notwendig waren.

Ergebnisse und Verwertung innerhalb Innok

Der Navigations-Stack erfüllt heute alle funktionalen Anforderungen und ist vollständig in Innok Cockpit integriert. Auch wenn das Weihnachtsbaum-Robotersystem nicht mehr vermarktet wird, bilden Hybrid-Lokalisierung, Reihenfolger und Wendemanager die Grundlage für kommende Projekte in Obst-, Beeren- und Baumkulturen. Die Anpassung auf ein Radfahrzeug ist bereits in einer Vorstudie angelaufen.

Lessons Learned

Eine robuste Plantagen-Navigation erfordert eine mehrstufige Redundanzkette: RTK-GNSS für absolute Position, Inertial- und Radsensoren für Kurzzeitlokalisierung und baumgestützte Landmarken als Verankerung bei langanhaltender Abschattung. Simulation ersetzt zwar nicht das reale Versuchsfahrzeug, ermöglicht aber eine breite Abdeckung extremer Szenarien und beschleunigt die Entwicklung messbar. Die strikte Containerisierung erleichtert zudem den Transfer der Software auf zukünftige OEM-Plattformen.

2.1.4 Arbeitspaket 4 - Integration & Sicherheit

Auftrag und Rollenverteilung

Arbeitspaket 4 sollte die in den Arbeitspaketen 1 bis 3 entwickelten Hard- und Softwarebausteine zu einem Gesamtsystem zusammenführen und ein praxistaugliches Sicherheitskonzept bis mindestens Performance Level d vorlegen. Innok Robotics verantwortete Schnittstellendefinition, Benutzeroberfläche und Safety-Technik. EZLS lieferte die Daten aus Navigation und Kartierung, Solbach steuerte Anforderungen aus dem Plantagenbetrieb bei.

Fortschritt der Systemintegration

Bis Ende 2024 wurden alle relevanten CAN-Nachrichten zwischen Fahrzeugsteuerung und NAVIBOX spezifiziert, inklusive Motordrossel, Hydraulikventile und Sensor-Telemetrie. In gemeinsamen Workshops mit EZLS passte Innok das Cockpit-UI an den Plantageneinsatz an: Spurabweichung, Baum-Overlay und GNSS-Warnungen können jetzt in einer Weboberfläche freigeschaltet werden. Wegen der ausbleibenden Raupenlieferung blieb die echte Verschaltung jedoch aus. AP 4.1 verschob sich in die Dokumentations- und Simulationsphase.

Sicherheitskonzept

Das Konsortium prüfte mehrere Detektionsverfahren für die engen Fahrgassen. Ultraschall und Radar schieden wegen zahlreicher Fehlalarme an Astspitzen aus. Stattdessen wurde ein kamerabasiertes Schutzfeld mit Deep-Learning-Klassifizierung verfolgt. Ein externer Safety-Berater unterstützte die Gefahren- und Risikoanalyse nach EN ISO 12100. Daraus resultierten ein zweistufiges Not-Aus-Design (fahrzeugseitiges Schütz + softwarebasierter Stopp) sowie Leitlinien für eine spätere PLC-Implementierung.

Einschränkungen durch fehlende Hardware

Praktische Integrations- und Sicherheitstests konnten nur in Software-Simulationen ausgeführt werden. Alle Sensor- und Aktorschnittstellen wurden dabei virtuell durchgespielt, eine reale Verifikation am Fahrzeug blieb unmöglich. Die ursprünglich anvisierte Einbau- und Abnahmephase fand aus diesem Grund nicht mehr statt.

Ergebnisse und weiterer Nutzen

Arbeitspaket 4 liefert ein vollständiges Satz CAN-Protokolle, UI-Layouts und ein validiertes, kamerabasiertes Sicherheitskonzept. Diese Unterlagen fließen direkt in das Softwareprodukt Innok Cockpit: OEM-Partner können sie nutzen, sobald eine kompatible Fahrzeugplattform bereitsteht.

Lessons Learned

Die starke Abhängigkeit von einer einzelnen Fahrzeuglieferung erwies sich als wesentliches Projektrisiko. Künftige Vorhaben sollten frühzeitig auf modulare Referenzfahrzeuge oder alternative Hardwarepfade setzen, um Integrationsschritte nicht in die Dokumentationsphase abdrängen zu müssen.

2.1.5 Arbeitspaket 5 - Test & Präsentation

Die Validierung der im Projekt entwickelten Module erfolgte in einem dreistufigen Ablauf, den die Universität Siegen festlegte: Jede neue Softwareversion wurde zunächst in der Simulationsumgebung geprüft, anschließend auf eine universitäre Versuchsplattform portiert und schließlich auf einer Plantage der Baumschule Solbach erprobt. Dieses Verfahren stellte sicher, dass Funktionsfehler frühzeitig erkennbar blieben und die Feldtests nur ausgereifte Komponenten belasteten.

Parallel zu den technischen Prüfungen stand die fachöffentliche Verbreitung der Ergebnisse im Vordergrund. Das Projektteam stellte WeBaRo und die bisher erzielten Fortschritte auf fünf einschlägigen Veranstaltungen vor: dem Weihnachtsbaumfeldtag in Sundern (9. August 2022), den Innovationstagen des BLE in Bonn (19. Oktober 2022), einer Online-Sitzung des Bundes deutscher Baumschulen (15. Dezember 2022), dem Forum Zukunft Gartenbau in Heidelberg (21. Juni 2023) und dem Gartenbautag des Zentralverbandes Gartenbau in Mannheim (8. September 2023).

Begleitend erschienen Fachbeiträge in den Medien TASPO, top agrar online, Forst Praxis, TASPO Online, Nadel Journal und Gabot.de. Hinzu kam eine wissenschaftliche Veröffentlichung im Rahmen der AgEng-2024-Proceedings mit dem Titel *Automatic Generation of Shrub and Tree Crop Datasets for Use in Deep Learning Detection Algorithms on Agricultural Vehicles*.

Aus Innok-Sicht war Arbeitspaket 5 damit erfolgreich abgeschlossen: Die Module wurden nach dem festgelegten Testschema validiert, und die Fachwelt erhielt durch Vorträge und Publikationen einen umfassenden Einblick in den Stand der Technik.

2.1.6 Arbeitspaket 6 - Simulation

Ausgangslage und Zielsetzung

Als Innok Robotics im Juli 2021 zwischenzeitlich insolvent wurde, war unklar, wann eine reale Trägerplattform wieder zur Verfügung stehen würde. Um die Entwicklung dennoch fortsetzen zu können, beschloss das Konsortium, die geplante Raupe samt Sensorik digital nachzubilden. Ziel von Arbeitspaket 6 war daher ein vollständiges Simulationssystem, das virtuelle Weihnachtsbaumplantagen ebenso abbildet wie sämtliche Schnittstellen der NAVIBOX, sodass Navigations-, Mapping- und Safety-Algorithmen ohne Hardwareabhängigkeit entwickelt und getestet werden können.

Webots-basierte Umsetzung

Das EZLS realisierte die Umgebung in der Open-Source-Simulation Webots. Der virtuelle Roboter besitzt exakt jene Sensoren und Busschnittstellen, die für das reale Fahrzeug vorgesehen sind. Für die Plantage lassen sich Pflanzabstand, Wuchshöhe, Reihenbreite, Steigung und Bodenunebenheit frei konfigurieren. Die zugrunde liegende Physik-Engine bildet u.a. Kettenschlupf ab. Damit konnten Szenarien von flachen Jungkulturen bis zu steilen Hanglagen realitätsnah modelliert werden.

Beitrag von Innok Robotics

Innok band die Simulation über ROS-Topics an das browserbasierte Innok Cockpit an. Navigations- und Mapping-Container liefen dadurch unverändert in der virtuellen Umgebung, während die Benutzeroberfläche Spurabweichungen und Baum-Overlays in Echtzeit darstellte.

Ergebnisse und Nutzen

Das Arbeitspaket lieferte ein einsatzbereites Simulationssystem, mit dem sämtliche Softwaremodule bis zum Projektende validiert wurden. Da reale Feldtests logistisch aufwendig sind, ermöglichte die virtuelle Plantage schnelle und kostengünstige Iterationen und deckte Funktionsfehler frühzeitig auf. Die Umgebung bleibt Bestandteil der Innok-Entwicklungspipeline und kann für zukünftige OEM-Projekte um neue Fahrzeug- oder Kulturprofile erweitert werden.

Lessons Learned

Eine praxisnahe Simulation kann Lieferausfälle zwar nicht dauerhaft ersetzen, stellt aber ein wirkungsvolles Instrument dar, um Entwicklungsstillstand zu vermeiden und Algorithmen unter reproduzierbaren Bedingungen zu verifizieren. Künftig plant Innok, virtuelle Testfelder grundsätzlich parallel zur Hardwareentwicklung einzusetzen.

2.2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Der überwiegende Teil der Mittel entfiel auf Personalkosten der drei Partner, wobei Innok Robotics seine Aufwände vor allem in Hard- und Software-Integration einbrachte. Sachkosten schlugen zunächst mit Sensor- und

Elektronikkomponenten für die NAVIBOX zu Buche (RTK-GNSS-Empfänger, IMU, LiDAR- und RGB-D-Kameras, Safety-PLC). Die Bestellung einer ferngesteuerten Kettenraupe wurde zwar angestoßen, die Lieferung aber storniert. Dadurch blieben gebundene Mittel im Hardwareteil weitgehend unangetastet. Reise-, Messe- und Feldversuchsausgaben lagen deutlich unter Plan, weil pandemiebedingte Beschränkungen und der Verzicht auf reale Demonstrationen den Aufwand reduziert haben. Insgesamt blieb das Teilvorhaben bis zum 31.12. 2024 innerhalb des bewilligten Kostenrahmens.

2.3 Notwendigkeit & Angemessenheit der geleisteten Arbeiten

Trotz des Ausfalls der Fahrzeugplattform waren die erbrachten Arbeiten für die Zielerreichung zwingend erforderlich. Die vollständige Verlagerung der Integrations-, Navigations- und Safety-Tests in eine Webots-Simulation verhinderte Entwicklungsstillstand und sicherte den fristgerechten Abschluss aller Softwaremeilensteine. Der Ressourceneinsatz blieb angemessen: Personalstunden flossen in funktionskritische Module, während auf teure Umbauarbeiten und Feldversuche verzichtet wurde, als klar war, dass das Fahrzeug nicht mehr zur Verfügung stehen würde. Dadurch konnte der bewilligte Finanzrahmen ohne Überschreitungen eingehalten werden.

2.4 Voraussichtlicher Nutzen & Verwertbarkeit

Eine eigenständige Vermarktung des Weihnachtsbaum-Roboters ist nicht mehr geplant, weil aus dem Markt aktuell keine konkreten Anfragen an Innok Robotics vorliegen. Die Projektergebnisse bleiben jedoch wirtschaftlich verwertbar: Der Plantagen-Modus von *Innok Cockpit*, die hybridisierte Spurführung, die Baumkartierung und die Safety-Architektur werden in künftige Kundenprojekte für Obst-, Beeren- und Baumschulkulturen übernommen. Innok setzt dabei auf ein Dienstleistungs- und Lizenzmodell, bei dem die NAVIBOX als vorkonfigurierte Hardware ausgeliefert wird und die Software über Wartungsverträge aktuell gehalten wird. Patente sind nicht vorgesehen. Schnelle Update-Zyklen und offene Schnittstellen haben Vorrang.

2.5 Fortschritt bei anderen Stellen

Bis zum Projektende sind Innok Robotics keine in Deutschland publizierten Forschungs- oder Entwicklungsarbeiten bekannt geworden, die eine vergleichbare Kombination aus LiDAR-gestützter Baumkartierung, RTK-genaue Reihenfahrt und Safety-zertifizierter Trägerplattform speziell für steile Weihnachtsbaumkulturen bieten. Entwicklungen im Obst- und Weinbau adressieren zwar Teilaspekte, decken jedoch nicht die Besonderheiten eng beplanter Mittelgebirgslagen ab. Ein Patent- oder Schutzrechtskonflikt ist daher nicht ersichtlich.

2.6 Veröffentlichungen

- TASPO - Printausgabe vom 13. August 2023
- top agrar online - Artikel vom 15. Dezember 2022 (<https://www.topagrar.com/perspektiven/nachhaltigkeit/ein-roboter-fuer-weihnachtsbaeume-13256884.html>)

- forst praxis - Artikel vom 10. Dezember 2022 (<https://www.forstpraxis.de/wo-kaufen-10-fakten-ueber-weihnachts-baeume-und-ihren-anbau-21699>)
- TASPO Online - Meldung vom 14. November 2022 (<https://taspo.de/uebersicht/neuer-roboter-fuer-den-weihnachts-baumanbau/>)
- Nadel Journal - Printbeitrag in Heft 11/2022
- Gabot.de - Beitrag vom 31. Oktober 2022 (<https://www.gabot.de/ansicht/webaro-weihnachtsbaeume-nachhalti-ger-anbauen-419625.html>)
- Wissenschaftliche Publikation: *Automatic Generation of Shrub and Tree Crop Datasets for Use in Deep Learning Detection Algorithms on Agricultural Vehicles*, erschienen in den AgEng 2024 Proceedings (ISBN 978-618-82194-1-0)