

Roboterbasierte Vegetationskontrolle (RoVeKo) im Gleisrandbereich als Glyphosat-Alternative (Nr. 1337000626)

*Schlussbericht,
Forschungsjahre 2022 bis 2025*

Technik & Architektur
21. Oktober 2025



Einleitung

Dieser Abschlussbericht fasst die Ergebnisse zum RoVeKo Forschungsprojekt 2022...2025 zusammen. Die Zielsetzungen des Projektes haben sich im Verlauf der Durchführung nicht geändert: das Projekt forscht an der Umsetzung einer bahntauglichen, autonomen Roboterlösung zur Vegetationskontrolle; dabei soll der Einsatz von Glyphosat oder anderen Herbiziden zur Bekämpfung von Vegetation im Gleisrandbereich reduziert werden.

Mit dem Projektabschluss wurde ein Demonstrator (S-bot) fertig gestellt, mit dem die notwendige Funktionalität und Autonomie erfolgreich demonstriert werden konnte. Neben der schriftlichen Dokumentation zu den einzelnen Arbeitspaketen, geben verschiedene Videos Einblick in die Realisierung des Funktionsmusters.

Das Funktionsmuster wurde insbesondere im Bereich der Systemautonomie und der Bedienung weiterentwickelt. Die Arbeitspakete umfassen dabei den Systemmonitor, die Einsatzplanung und Bedienung, den Kollisionsschutz sowie ein mehrstufiges Sicherheitskonzept für Objekte und Personen.

Eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung der roboterbasierten Vegetationskontrolle wurde durchgeführt und es wurden Firmen kontaktiert für eine zukünftige kommerzielle Umsetzung. Das Projekt schliesst ab mit einer Videodokumentation des Funktionsmusters (S-bot) im Gleisbereich am Güterbahnhof Basel. Dabei wurde im Zwischengleisbereich ein bewachsenes Teilstück vollständig autonom gemäht.

Dieses Forschungsprojekt war nur Dank finanzieller Unterstützung durch BAV/BIF und SBB möglich und wir bedanken uns für das Vertrauen.

Inhaltsverzeichnis

1. Projektplanung Übersicht (ab Folie 4)
 - Executive Summary DE, EN, FR
 - Ausgangslage
 - Anwendungsfälle & Herausforderungen
 - Projektziele & Forschungsfragen
 - Potenzialanalyse «Use Cases»
 - Minimum Viable Product (MVP) & Lösungsvorschlag
 - Marktanalyse
2. Technische Umsetzung (ab Folie 16)
 - Robot Operating System (ROS)
 - Prozess / Simulationsumgebung
 - Systemmonitor
 - Sicherheitssystem
 - Mähtechnik
 - Navigation & Pfadplanung / Mähmusterplanung
 - GIS-Integration
3. Wirtschaftlichkeitsbetrachtung (ab Folie 34)
4. Zusammenfassung & Ausblick (ab Folie 39)
 - Gesamtfazit und Empfehlungen
 - Ausblick

1. Executive Summary DE

Im Rahmen des Projektes RoVeKo 4.0 wurde die automatisierte Vegetationskontrolle mit einem Roboter im Zwischengleisbereich bearbeitet. Die Ziele gemäss BIF-Antrag vom 06.12.2021 liegen in einer umweltfreundlichen Alternativlösung zur chemischen Vegetationskontrolle im gleisnahen Bereich ohne Personal oder den Zugverkehr zu gefährden (Einhaltung LRP). Die Rahmenbedingungen hierfür sind umfassend und anspruchsvoll. Neben der begrenzten Grösse (Höhe und Gewicht) des Roboters soll sich der elektrisch betriebene Roboter autonom im Zwischengleisbereich mit sicherem Abstand zur Schiene im Bahnschotter bewegen und dabei die vorhandene Vegetation eliminieren oder schneiden. Die Position des Roboters und das Arbeitsgebiet werden auf einem mobilen IT-Gerät dargestellt. Hindernisse sollen erkannt werden und Personen dürfen nicht gefährdet werden.

Im Verlauf des Projektes konnte in mehreren Iterationen ein Prototyp (S-bot) realisiert und demonstriert werden, der den o.g. Anforderungen gerecht wurde. Die Positionierung im cm-Bereich (kameraunterstütztes GPS System), das Umfahren von Hindernissen, die Erkennung von Personen und der Sicherheitsabstand zum Gleis wurden erfolgreich umgesetzt. Die Bedienung des Roboters wurde komfortabel gestaltet, indem das Arbeitsgebiet in einer Karte ausgewählt wird, Start- und Endpunkt festgelegt und die Pfadplanung automatisiert werden. Während dem Arbeitsprozess wird der Roboter mit einem Monitoring überwacht, das Mähwerk kontrolliert ein- und ausgeschaltet und die Kamera erfasst allfällige Personen vor dem Roboter und kontrolliert den zulässigen Arbeitsbereich ausserhalb der Gleise. Die Funktionalität des Roboters wurde im realen Arbeitsgebiet auf dem Güterbahnhof Basel getestet (dok. Video). Das Mähwerk wurde mit zwei Fadenmähern realisiert und deckt die gesamte Breite des Roboters ab.

Neben der technischen Umsetzung wurde ebenfalls eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung durchgeführt. Dabei zeigte sich, dass aktuell eine Robotik Lösung zur Vegetationskontrolle für Flächen mit einem geringen Pflanzenbewuchs im direkten Vergleich mit punktueller chemischer Vegetationskontrolle ökonomisch (noch) nicht konkurrenzfähig ist, jedoch gegenüber einer manuellen Bewirtschaftung bei dichterem Bewuchs, sowie aus ökologischer Sicht, Vorteile hat.

1. Executive Summary FR

Dans le cadre du projet RoVeKo 4.0, le contrôle automatisé de la végétation à l'aide d'un robot a été mis en œuvre dans la zone intermédiaire des voies. Les objectifs définis dans la demande BIF du 06.12.2021 consistent à trouver une solution alternative écologique au contrôle chimique de la végétation à proximité des voies sans mettre en danger le personnel ou le trafic ferroviaire (respect du LRP). Les conditions cadres pour cela sont complexes et exigeantes. Outre sa taille (hauteur et poids) limitée, le robot électrique doit se déplacer de manière autonome dans la zone intermédiaire des voies, à une distance sûre des rails, dans le ballast ferroviaire, tout en éliminant ou en coupant la végétation existante. La position du robot et la zone de travail sont affichées sur un appareil informatique mobile. Les obstacles doivent être détectés et les personnes ne doivent pas être mises en danger.

Au cours du projet, un prototype (S-bot) répondant aux exigences susmentionnées a pu être réalisé et présenté après plusieurs itérations. Le positionnement au centimètre près (système GPS assisté par caméra), le contournement des obstacles, la détection des personnes et la distance de sécurité par rapport à la voie ont été mis en œuvre avec succès. L'utilisation du robot a été rendue confortable grâce à la sélection de la zone de travail sur une carte, à la définition des points de départ et d'arrivée et à l'automatisation de la planification du trajet. Pendant le processus de travail, le robot est surveillé, la faucheuse est activée et désactivée et la caméra détecte les personnes éventuellement présentes devant le robot et contrôle la zone de travail autorisée en dehors des voies. La fonctionnalité du robot a été testée dans la zone de travail réelle de la gare de marchandises de Bâle. Le dispositif de coupe a été réalisé avec deux tondeuses à fil et couvre toute la largeur du robot.

Outre la mise en œuvre technique, une analyse de rentabilité a également été réalisée. Il a été démontré qu'à l'heure actuelle, une solution robotique de contrôle de la végétation pour des surfaces à faible densité de couverture végétale n'est pas encore économiquement compétitive par rapport au contrôle chimique ponctuel de la végétation. Néanmoins, elle présente des avantages par rapport à une gestion manuelle dans les zones à végétation plus dense, ainsi que du point de vue environnemental.

1. Executive Summary EN

As part of the RoVeKo 4.0 project, automated vegetation control with a robot in the area between the tracks was addressed. The objectives according to the BIF application of 06.12.2021 are to develop an environmentally friendly alternative to chemical vegetation control in the track-adjacent area without endangering personnel or train traffic (compliance with LRP). The conditions for this are extensive and demanding. In addition to the limited size (height and weight) of the robot, the electrically powered robot should be able to move autonomously in the area between the tracks at a safe distance from the rail on the track ballast while eliminating or cutting the existing vegetation. The position of the robot and the work area are displayed on a mobile IT device. Obstacles should be detected, and people must not be endangered.

During the course of the project, a prototype (S-bot) was developed and demonstrated in several iterations, which met the aforementioned requirements. Positioning within the centimeter range (camera-assisted GPS system), obstacle avoidance, person detection, and the safety distance to the track were successfully implemented. Operation of the robot was made convenient by selecting the work area on a map, defining start and end points, and automating path planning. During the work process, the robot is monitored with a monitoring system, the mower is controlled to switch on and off, and the camera detects any persons in front of the robot and monitors the permissible working area outside the tracks. The functionality of the robot was tested in the real working area at the Basel freight yard. The mower was implemented with two string trimmers and covers the entire width of the robot.

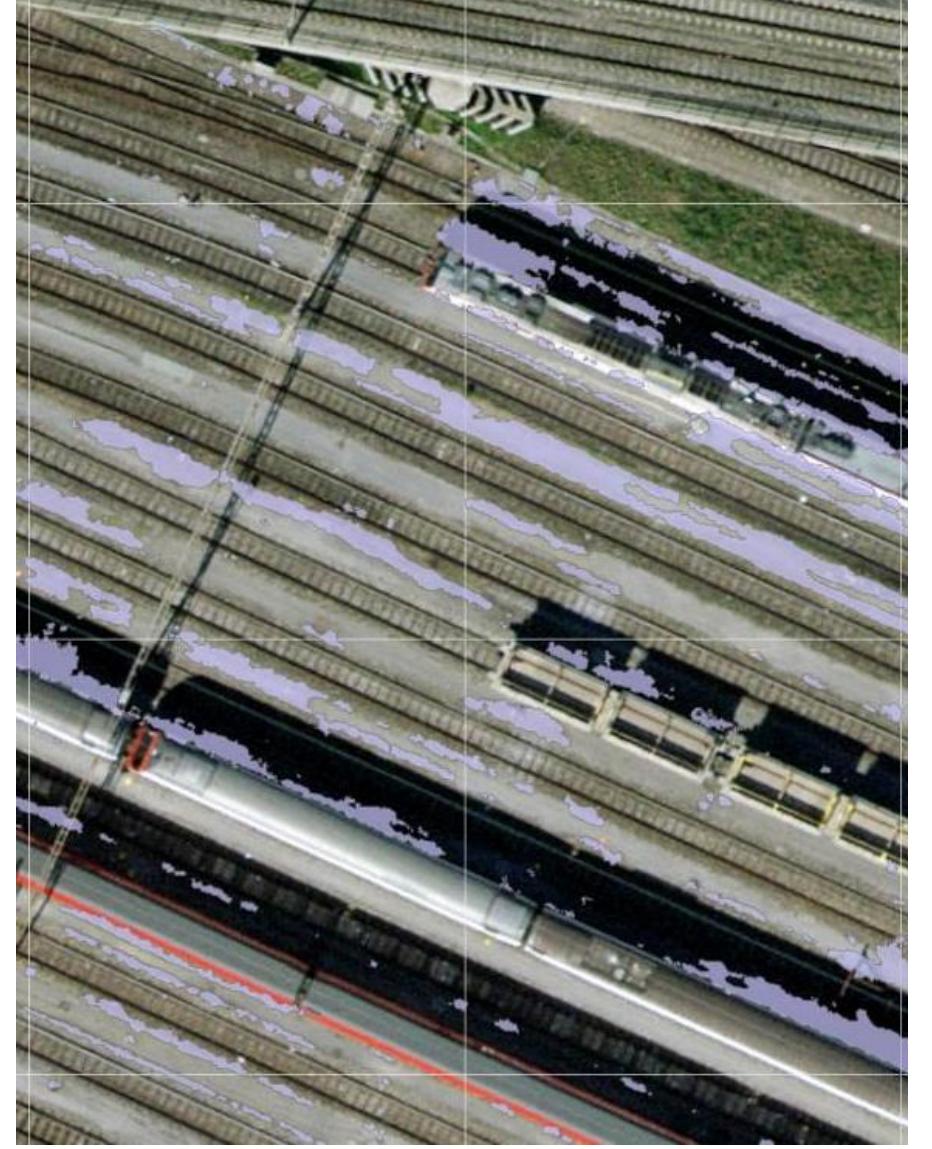
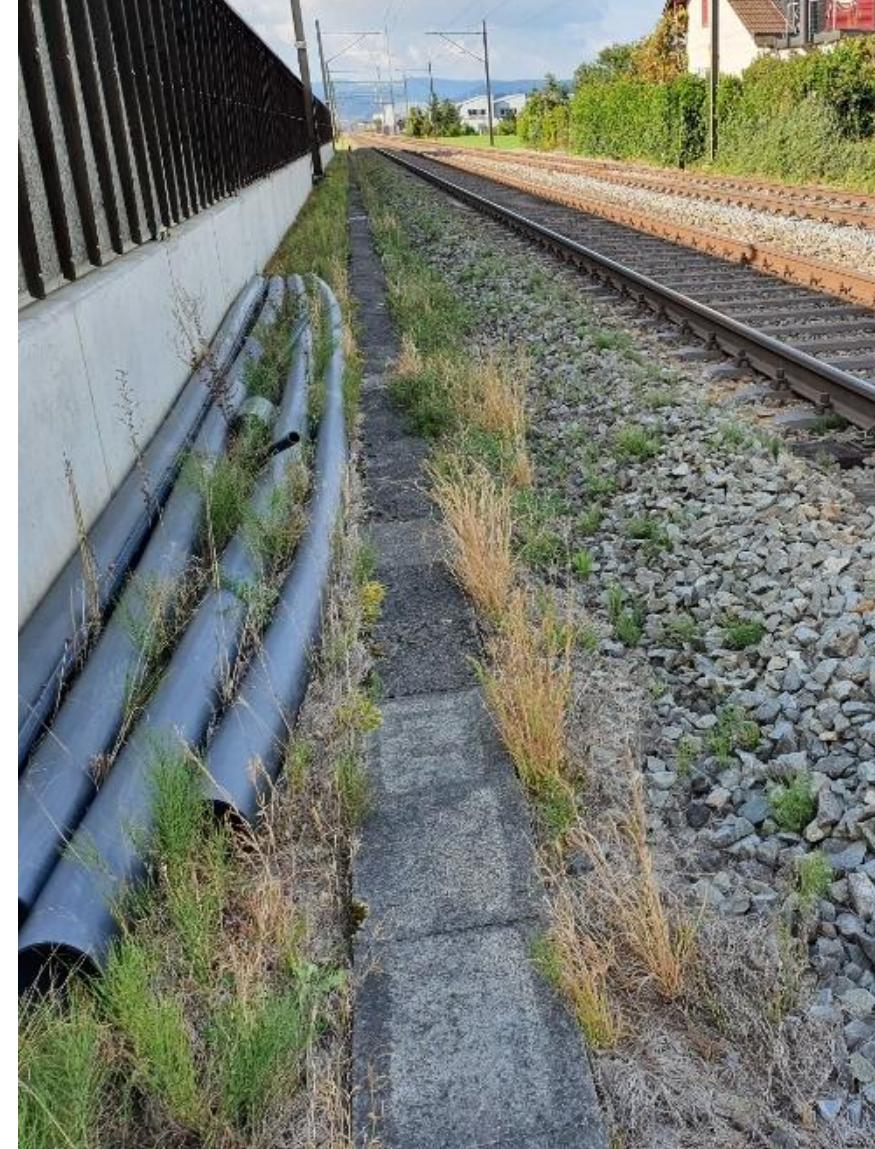
In addition to the technical implementation, an economic feasibility analysis was also carried out. The findings indicate that, at the current stage, a robotic solution for vegetation control on areas with sparse plant cover is not yet economically competitive when compared to localized chemical vegetation control. Nevertheless, it demonstrates advantages over manual management in areas with denser vegetation and provides clear benefits from an ecological standpoint.

Ausgangslage - Warum eine Vegetationsregulation auf Bahnanlagen?

Die Regulation der Vegetation im Gleisbereich und entlang von Bahnstrecken ist von grosser Bedeutung, um die Sicherheit und die Verfügbarkeit sowie den langfristigen Erhalt der Bahnanlagen zu gewährleisten. Ungehindertes Wachstum von Pflanzen kann im Extremfall zu Schäden an den Bahnanlagen oder zu Betriebsstörungen führen. Dies gilt insbesondere für verholzende Pflanzen, da diese die Stabilität der Gleise gefährden können.

Auch gebietsfremde invasive Arten sollten ferngehalten werden, um die Artenvielfalt nicht zu bedrohen. Die Regulation der Vegetation erfolgt mit mechanischen, thermischen, chemischen, elektrischen, biologischen oder anderweitigen Methoden. Auch werden bei der Planung und dem Bau von neuen Bahnanlagen präventive Massnahmen vorgesehen, um unerwünschten Pflanzenbewuchs möglichst zu verhindern. Der Einsatz von chemischen Mitteln (Herbizide) erfolgt sehr zurückhaltend und als «Ultima Ratio», wenn andere Massnahmen mit einem unverhältnismässigen Aufwand verbunden sind. Bezahlbare nicht-chemische Lösungen, wie z.B. der Einsatz von Mährobotern, sind gefragt.

Die Herausforderungen von autonomen Roboterlösungen



Unwegsames Gelände / Terrain mit Unebenheiten und teilweise wenig Raum.

Präzise Navigation und eine hohe **Zuverlässigkeit** damit die **Sicherheit** gewährleistet ist (auch bei schlechtem GPS-Empfang).

Hindernisse und Heterogenität des Geländes.

Robustheit (Outdoor) und Energieversorgung.
Heterogener Pflanzenbewuchs (u.a. hohe und verholzte Vegetation, sporadische Vegetation).

Fragmentierung der zu bearbeitenden Flächen.
Wirtschaftlichkeit.

Projektziele / Forschungsfragen

- Wo können Lösungen mit autonomen Robotern bei der Vegetationskontrolle entlang von Gleisanlagen einen Nutzen / Mehrwert bringen?
- Wie können/müssen solche Lösungen aussehen und realisiert werden? (Entwicklung eines Funktionsmusters)
- Welche Verfahren zur Vegetationsregulation sind für Roboterlösungen interessant?
- Wie wirtschaftlich sind Roboterlösungen?

Dabei ist zu beachten, dass die Dimensionen und das Gewicht des Roboters begrenzt sein soll, so dass die Sicherheit des Bahnverkehrs nicht gefährdet ist. Dies unterscheidet die angestrebte Lösung auch von grösseren Systemen aus der Landwirtschaft. Derartige Systeme sind in der Regel deutlich schwerer als 50kg.

Kommerzielle Kleinsysteme sollen ebenfalls in die Lösung einbezogen werden, sofern sie für Bahnschotter geeignet sind und eine offene Schnittstelle für die Programmierung verfügbar ist (Zugang zu Sensorik, Pfadplanung, Kommunikation, etc.).

Es soll untersucht werden, welche Mähtechnik sich im Gleisbereich bewährt und wie diese auf dem Roboter integriert werden kann. Durch die Integration von Sensoren und Rechenleistung soll ein möglichst autonomer Roboter entstehen.

Der Roboter soll elektrisch betrieben werden und nicht mit Benzin betrieben werden.

Der Roboter soll im gleisnahen Bereich getestet und demonstriert werden (Testgelände, Praxiserprobung).

Potenzialanalyse

Anwendungsfälle (Use Cases) für Robotik zur Vegetationskontrolle.

Die Vegetationsregulation entlang von Bahnanlagen ist sehr vielfältig und umfasst ein Set von unterschiedlichen, an die lokale Situation angepassten Massnahmen. Aufgrund des meist sehr anspruchsvollen Terrains und der hohen Sicherheitsanforderungen sind Aufwand und Kosten in der Regel hoch. Oft ist zur Durchführung der Unterhaltsarbeiten auch separates Sicherheitspersonal notwendig.

Es wird erhofft, dass mithilfe der Robotertechnik belastende und teilweise gefährliche Handarbeiten reduziert werden können und die Effizienz z.B. durch Reduktion des Personalaufwands gesteigert werden kann.

Als potenzielle Anwendungsfälle für den Einsatz von Roboterlösungen werden unter anderem folgende Einsatzgebiete gesehen:

- 1) Allgemeine Randbereiche zwischen Gleis und Böschung
- 2) Zwischen Gleis und Lärmschutzwänden
- 3) «Vergrünte» Gehwege zwischen Gleisen
- 4) «Graue» Gehwege und Kiesflächen mit wenig Bewuchs
- 5) Böschungen
- 6) Biodiversitätsflächen

Aufgrund der ursprünglichen Zielsetzung des F&E-Projekts, eine roboterbasierte Lösung zur Reduktion des Glyphosat-Einsatzes zu entwickeln, wurden die Anwendungsfälle 1-4 priorisiert, da nur auf solchen Flächen Herbizid eingesetzt wird. Eine universelle Robotik Lösung, die alle sechs Einsatzgebiete adressiert, ist ausserdem nicht realisierbar (Grösse, Gewicht, Leistung).

Potenzialanalyse

Anwendungsfälle (Use Cases) für Robotik zur Vegetationskontrolle.



Allgemeine **Randbereiche** zwischen Gleis und Böschung (in der Regel nur 1x Mähen / Jahr)



Zwischen Gleis und
Lärmschutzwänden



«**Vergrünte**» Gehwege zwischen Gleisen
(mehrfaches Mähen pro Jahr)



Böschungen



Biodiversitätsflächen

Im Fokus des F&E Projekts RoVeKo

Anforderungen für eine Roboterbasierte Vegetationskontrolle im Gleisrandbereich

(Lastenheft für ein «Minimum Viable Product»)

Der Einsatz von autonomen Robotern zur Vegetationsregulation entlang von Bahnanlagen stellt deutlich höhere Anforderungen als z.B. bei der Grünflächenpflege von Liegenschaften: Das meist unwegsame Terrain (u. a. Schotter) und die oft engen Verhältnisse verlangen geländegängige und wendige Geräte. Eine präzise Navigation und eine hohe Zuverlässigkeit sind unerlässlich, um die Sicherheit zu gewährleisten, damit ein Roboter nie aus Versehen «auf dem Gleis» landet. Mit Hindernissen wie Kabeln, Signalanlagen, Bauwerken, Gegenständen aller Art und auch Tieren muss jederzeit gerechnet werden. Bahnanlagen dürfen nicht beschädigt werden (z.B. Durchschneiden von Kabeln). Die Robustheit muss genügend sein, um auch bei hoher Vegetation oder bei verholzten Pflanzen zurechtzukommen. Als letztes muss zudem die starke Fragmentierung (Zerstückelung) der zu bearbeitenden Flächen berücksichtigt werden. Unter all diesen Anforderungen eine wirtschaftliche Lösung zu entwickeln, ist sehr anspruchsvoll. Eine zusätzliche Hürde sind auch die bestehenden regulatorischen Rahmenbedingungen im Bereich Sicherheit: Der Einsatz von sich autonom fortbewegenden Robotern in der Gleisumgebung ist in den Vorgaben noch nicht berücksichtigt und muss noch besser geregelt werden. Eine Risikobeurteilung in Abhängigkeit von Grösse und Gewicht des autonomen Systems aber auch von dessen Zuverlässigkeit ist zwingend durchzuführen.

Definition der System Anforderungen (MVP):

- Es wurden 16 Kriterien (E1...E16) aufgestellt, die für das MVP gelten, diese beinhalten Anforderungen an das Mähen, an das Roboter gewicht, an die Geländetauglichkeit, den Verzicht auf Glyphosat, den elektrischen Betrieb (kein Benzin), die Autonomie des Roboters, den Umgang mit Biomasse, den Datenaustausch, die Bedienbarkeit sowie den Test im realen Gelände.
- Daneben wurden 7 sicherheitsrelevante Kriterien (S1...S7) zusammengestellt für den Betrieb des Roboters im gleisnahen Umfeld.

Erzielte Resultate (MVP):

- Alle sicherheitsrelevanten Kriterien konnten erfüllt werden. Die weiteren technischen Kriterien konnten nahezu vollständig erzielt und erfolgreich demonstriert werden.

Ausstehende Resultate (MVP):

- Aufgrund der Komplexität (sowie Grösse, Gewicht und Leistung des Roboters) wurde entschieden, eine Lösung für die Aufnahme und Abtransport des Schnittguts (E5) nicht im F&E Vorhaben zu integreren / zu lösen. Begründet wird dieser Verzicht u.a. damit, dass bei der chemischen Vegetationskontrolle die abgestorbenen Pflanzenreste auch nicht aufgenommen werden.
- Die erarbeitete Roboterlösung arbeitet bisher nicht im Verbund (E12), d.h. es erfolgt keine Kommunikation zwischen mehreren Robotern. Es konnte ein Demonstrator entwickelt werden.
- Die Realisierung von modularen Anbaugeräten (E14), welche im Feld ausgetauscht werden können konnte nicht bearbeitet/gelöst werden. Zunächst wurde ein Balkenmäher verwendet, dieser wurde jedoch aus mehreren Gründen durch zwei parallel montierte Fadenmäher ersetzt. Damit kann die gesamte Breite des Roboters gemäht werden.

Marktanalyse

Die Mehrheit der professionellen Maschinen für den Grünflächenunterhalt werden auch heute noch mit Verbrennungsmotoren betrieben. Eine Roboterlösung auf Basis fossiler Energieträger wurde aus Umwelt- und Lärmschutzgründen jedoch ausgeschlossen. Das Angebot an kommerziell erhältlichen Mährobotern ist zwischenzeitlich sehr gross. Jedes Jahr kommen neue Mähroboter für den Unterhalt von Grünflächen auf den Markt, mit erweiterten Funktionen und Fähigkeiten. Auch auf Fussballfeldern, Golfplatzanlagen etc. kommen immer mehr Mähroboter zum Einsatz. Dazu beigetragen haben die immer höhere Leistungsfähigkeit, Robustheit, Präzision und Intelligenz der Geräte, dies bei sinkenden Kosten. Einfache Handhabung, technologische Fortschritte bei der Navigation als auch der Einsatz von künstlicher Intelligenz bei der Hinderniserkennung und kostengünstige Solid-state LiDAR Systeme (Unitree, Robosense, Leishen, Ouster) bei der Navigation haben zu diesem starken Wachstum beigetragen. Trotz dieser Entwicklung fehlt es bis heute an kommerziellen Produkten, die sich für einen Einsatz im Gleisumfeld eignen. Dabei soll insbesondere das Gewicht des Roboters 30kg nicht übersteigen gemäss den Sicherheitsanforderungen (MVP). Die heutigen Produkte sind mehrheitlich für ebene, gleichmässig bewachsene und regelmässig geschnittene Rasenflächen entwickelt. Dort schneiden sie kurzen Rasen zurück. Fahrwerk, Räder, Schneidesystem, Navigation und Energieversorgung sind auf diese Anwendung ausgerichtet. Auf unebenem Gelände, auf Bahnschotter oder in Hochgrassituationen sind solche Geräte in der Regel überfordert und nicht mehr in der Lage, zuverlässig zu navigieren und ihre Arbeit zu verrichten. Auch fehlen Produkte, die selbständig durch die heterogenen Bereiche navigieren können und trotz Abschattung durch z. B. Lärmschutzwände über grössere Distanzen (z. B. in Güterbahnhöfen) präzise arbeiten können.

Marktanalyse



System	Herkunft	Klasse	Dimension/ Gewicht/ Schnittbreite/ Schnitthöhe	Einsatzgebiet/ Kapazität/ Steigung	Besondere Merkmale	Kritische Punkte
Mammotion LUBA 2 AWD	China	Klein	Gewicht: ca. 18.6 kg Dimension: 690 × 513 × 273 mm Schnittbreite: 400 mm Schnitthöhe verstellbar: 25–70 mm	Gartenflächen Mähfläche 5.000 m ² Steigung: bis 80 % Vertikale Passierfähigkeit: 5cm	Navigation: RTK + Vision + Ultraschall < Automapping, Multi-Zonen, WiFi / 4G, App-Steuerung, Objekterkennung Automatisches Nachladen möglich	gute Agilität, kann Steigungen gut bewältigen Robustheit? Funktionalität?
Husqvarna Automower 535 AWD EPOS	Schweden	Klein	Gewicht: 18.1 kg Schnittbreite 24 cm Dimension: 930x550x330 mm Schnittbreite: 220 mm Schnitthöhe: 30-70 mm	Anwendung: gewerbliche Rasenpflege Mähfläche 5.000 m ²	EPOS-Technologie: GPS-basierte Navigation ohne Begrenzungskabel (für Draht-freie Nutzung) für professionelle Modelle – Systemmuster-Mähen, Zonensteuerung, Integration mit Fleet-Services, App-Steuerung, Schnittmuster- Robuste Gehäuse, Sensorik wie Neigungssensor, Hebe-	Flottenmanagement Vor allem auf Rasen verwendet Fragezeichen bei Gebrauch auf Schotter und bei hoher und verholzter Vegetation GPS-Lokalisierung bei schlechtem Empfang?
Novaziun Monotrac	Schweiz	Mittel	Spurbreite: 1.10 m – 2.10 m Keine weiteren	Entwickelt für Hang- und Bergflächen	(Schweizer Hersteller mit Fokus auf steile Gelände) Einsatz in extensiven Wiesen, Hängen, terrestrischem Gelände Elektrisch Keine Autonomie	Könnte besonders gut in Hanglagen und steilem Gelände funktionieren Nicht für Gleisumgebung geeignet

Marktanalyse



System	Herkunft	Klasse	Dimension/ Gewicht/ Schnittbreite/ Schnitthöhe	Einsatzgebiet/ Kapazität/ Steigung	Besondere Merkmale	Kritische Punkte
Raymo TORPEDO	Tschechien	Mittel	Dimension: 205x115x51 Achslast: 250 kg Schnittbreite: 104 cm Schnitthöhe: 40-100 mm	Solarparks, Hänge Böschungen Große Flächen	Modulares Konzept: Trägerfahrzeug austauschbare Schneidaggregate austauschbare Akkumodule 4WD, Zero-Turn-Steuerung, tiefe Bauhöhe für niedrige Durchfahrten, gute Hangfähigkeit Remote-Control (Funk), Telemetrie (Raylink)	Modulares System Hohes Gewicht und größere Breite weniger geeignet für enge Gleisbereiche
Probotics SCARABAEUS	Schweiz	Mittel	Gewicht ca. 130 kg Schnittbreite: 1,35 m	Ca 0.6 ha pro Tag Kann zwischen Baumreihen, Obstplantagen, Freiflächen Flaches Gerät, Navigiert unter tiefen Ästen	Nutzt präzise Satellitennavigation (RTK- ähnlich), Kompass, Gyroskop, Berührungsensoren Kein Einsatz von Kameras oder teuren Laserscannern Bewegung mit Raupenantrieb zur Bodenschonung	geringes Gewicht Flaches Gehäuse Schweizer Hersteller
Rapid Cosmos	Schweiz	Gross	Arbeitsbreite: ca. 3 m Gewicht: 414 kg (Fahrgestell) 346 kg (Mähaggregat)	Steigung: bis max. 30 % Flache Ebene Wiesen Gut für nasse Bodenverhältnisse	Lokalisierung über GNSS (GPS), Korrektursignal über RTK Cosmos-App für Bahnplanung, Fahrschema usw.	Große Schnittbreite Hohes Gewicht Nur für große Felder geeignet

2. Technische Umsetzung

Technische Umsetzung: Robot Operating System (ROS)

Eine open-source Entwicklungsumgebung für Robotik-Anwendungen

- Die Entwicklungsumgebung wurde mit dem open-source Framework “Robot Operating System (ROS)” realisiert. Diese Entwicklungsumgebung hat sich in FuE für zahlreiche Robotik-Anwendungen bewährt und bietet umfassende Möglichkeiten für eine Roboter spezifische Konfiguration (Sensorik, Schnittstellen, physikalische Struktur, Pfadplanung, Visualisierung, usw.).
- ROS wird von einer breiten wissenschaftlichen und industriellen Community betreut und öffentlich dokumentiert. Dies erlaubt regelmässige Korrekturen von Objekten, Ergänzungen, Anpassungen sowie die Entwicklung von neuen Features. Die Entwicklungsumgebung kann zudem mit weiteren Softwaretools verknüpft werden (Bsp. Visualisierung, Simulation, Parameteroptimierung).
- Allerdings müssen frühere Softwareentwicklungen von ROS auf ROS2 portiert werden, um zukünftig unterstützt zu werden. Jedoch bietet ROS2 auch neue Möglichkeiten. Dies umfasst beispielsweise die Integration von neuen Sensoren/Kameras und weiterer Lokalisierung- und Navigationsalgorithmen oder Unterstützung von Roboterflotten.

Potential: ROS2 ist ein sehr aktives Open-Source Projekt. ROS2-Verwendung auch bei industriellen Produkten immer verbreiteter.

Technische Umsetzung: Prozess- / Simulationsumgebung

Zur Vereinfachung und Beschleunigung der Softwareentwicklung wurde eine eigene Simulationsumgebung für den Roboter realisiert. Diese Simulationsumgebung beinhaltet/umfasst:

- Mehrkörpersimulation dank Physics-Engine
- Einfache Integration in ROS-Umgebung
- Einfügen von Wänden oder anderen Objekten (z.B. um Hindernisse zu simulieren)
- Viele Plug-ins für Sensoren (Lidar, IMU, etc.) und Aktoren vorhanden
- Beschleunigt und vereinfacht Integration von neuen Features

Die Simulationsumgebung ersetzt nicht das Testen am realen Roboter in der realen Umgebung.



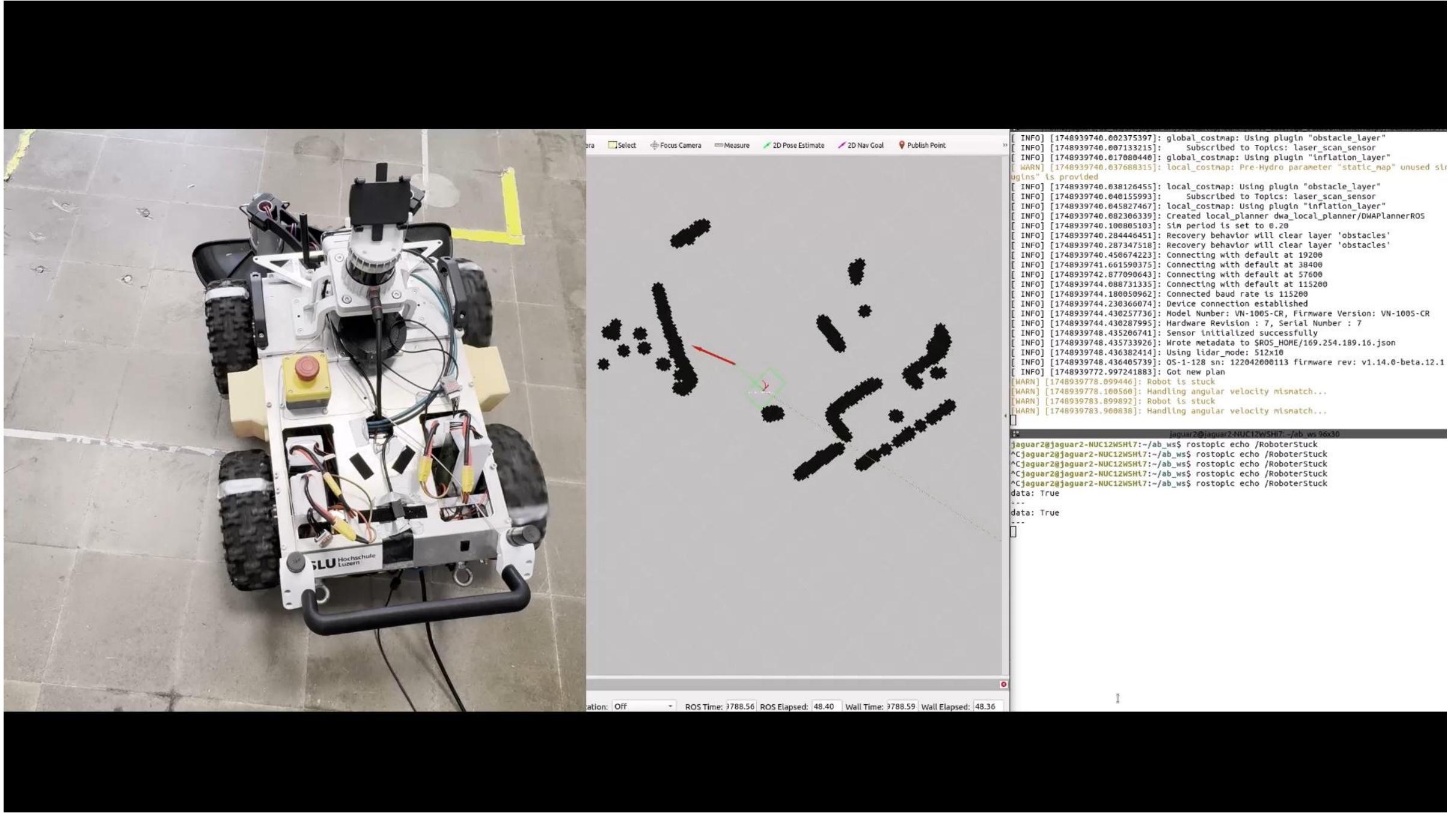
Technische Umsetzung: Systemmonitor

Zur Überwachung des Gesamtsystems und Verhinderung von kritischen Betriebssituationen

- **Das Monitoring verschiedener Komponenten des Roboters ist besonders wichtig, um potenzielle Fehlerquellen frühzeitig zu erkennen.**
- Das Monitoring erfolgt zweistufig: Zum einen wird das Verhalten des Roboters als Gesamtsystem geprüft, zum anderen werden einzelne Systemkomponenten überwacht.
- Folgende Parameter werden als kritisch eingestuft und daher kontinuierlich überwacht:
 - Temperaturen aller Motoren
 - Stromstärke aller Motoren
 - Differenz zwischen Ist- und Soll-Geschwindigkeit
- Beim Gesamtmonitoring wird die vom Navigation Stack vorgegebene Sollgeschwindigkeit mit der tatsächlichen Geschwindigkeit des Roboters verglichen.
- Die reale Geschwindigkeit wird aus den Odometrie Daten des Fixposition-Systems abgeleitet. Dabei handelt es sich um eine Kombination aus visuell-inertialer Odometrie und GPS-Daten.
- Auf diese Weise kann erkannt werden, ob der Roboter feststeckt und sich nicht mehr selbstständig befreien kann.

Technische Umsetzung: Systemmonitor

- Es gibt **zwei** Szenarien, in denen der Roboter feststecken könnte
 - Wenn er gerade aus fahren sollte aber nicht mit weiter kommt (**Linear Velocity Mismatch**)
 - Wenn er sich drehen sollte dies aber nicht kann (**Angular Velocity Mismatch**)
- In beiden Fällen wird ein spezifisches recovery behavior ausgelöst
 - Bei einem **Angular Velocity Mismatch** bewegt sich der Roboter ein kleines Stück zurück und versucht erneut, sich auszurichten
 - Bei einem **Linear Velocity Mismatch** passiert genau das umgekehrte und der Roboter versucht sich zu drehen
- Um dies zu erreichen, wird jeweils der Geschwindigkeit Befehl (vom Path Planner) überschrieben



Technische Umsetzung: Systemmonitor

- Monitoring einzelner Systemkomponenten**

Folgende Komponenten werden kontinuierlich überwacht und deren Daten aufgezeichnet sowie bei Bedarf visualisiert:

- Temperaturen aller Motoren
- Stromstärken aller Motoren
- Beim Erreichen definierter Grenzwerte wird automatisch eine Systemwarnung ausgelöst.
- Zusätzlich erfolgt eine akustische Warnung, um das Bedienpersonal sofort zu informieren.



Technische Umsetzung: Systemmonitor

- Das vorhandene Systemmonitoring ist als **Proof of Concept** zu verstehen.
- Es deckt nicht alle denkbaren Situationen ab und überwacht auch nicht sämtliche sicherheitskritischen Funktionen.
- Die **Recovery-Strategien** können situationsabhängig ergänzt und angepasst werden.
Je nach verbauten Komponenten im Roboter können weitere Sensoren und Messgrößen in das Monitoring eingebunden werden.
- Aktuell werden bestimmte Parameter lediglich überwacht. Bei Überschreiten definierter Grenzwerte wird ein **akustischer Alarm** ausgegeben.
- Eine Integration in das bestehende **Human-Machine-Interface (HMI)** wäre möglich und würde die Bedienbarkeit weiter verbessern.

Fazit: Der Systemmonitor hat sich bei den realen Feldtests bewährt. Ein Festsetzen des Roboters konnte auch im schwierigen Schotterbereich vermieden werden. Die Lautstärke bei Warnungen müsste zukünftig an den Pegel der Umgebungsgeräusche angepasst werden, insbesondere wenn das Mähwerk läuft.

Technische Umsetzung: Sicherheitssystem

Personenerkennung zur Gewährleistung der Arbeitssicherheit.

- Erkennung von Personen im Sichtfeld einer RGB-D Kamera (RealSense)
 - Abstandsmessung mithilfe des Tiefenbildes
 - Ausgabe von Alarm und Abschaltung des Mähers bei Menschen < 1.5m

Fazit: Die Personenerkennung funktioniert sehr gut mit einer sehr kurzen zeitlichen Verzögerung. Die Warnung über den Lautsprecher hat sich bewährt.

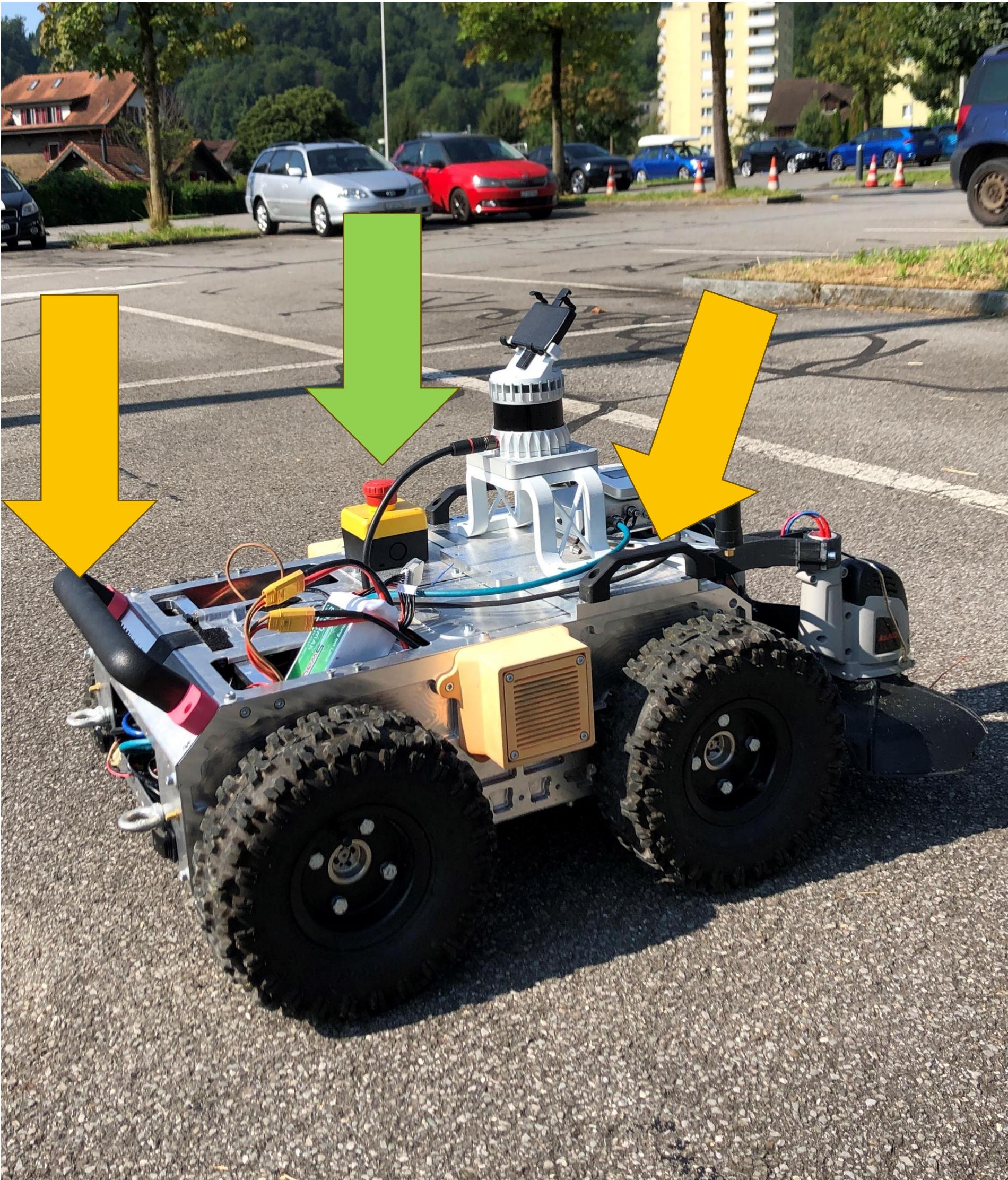


Technische Umsetzung: Sicherheitssystem

Notstopp und Traggriffe für ein Eingreifen durch Personal

- Arbeitssicherheit verbessert durch Anpassungen am Fahrzeug:
 - Notaus
 - „Pilz“ (grüner Pfeil)
 - Funk-Notaus
 - Handgriffe vorne und hinten (gelbe Pfeile)
 - Für einfach und sichere Greifbarkeit / Transport aus einer gefährlichen Zone

Fazit: Die Griffe und der Notaus sind selbsterklärend und ermöglichen bei Bedarf ein rasches Eingreifen. Zukünftig könnte es mehrere Notaus-Positionen geben, damit dieser von jeder Position gut erreichbar ist.



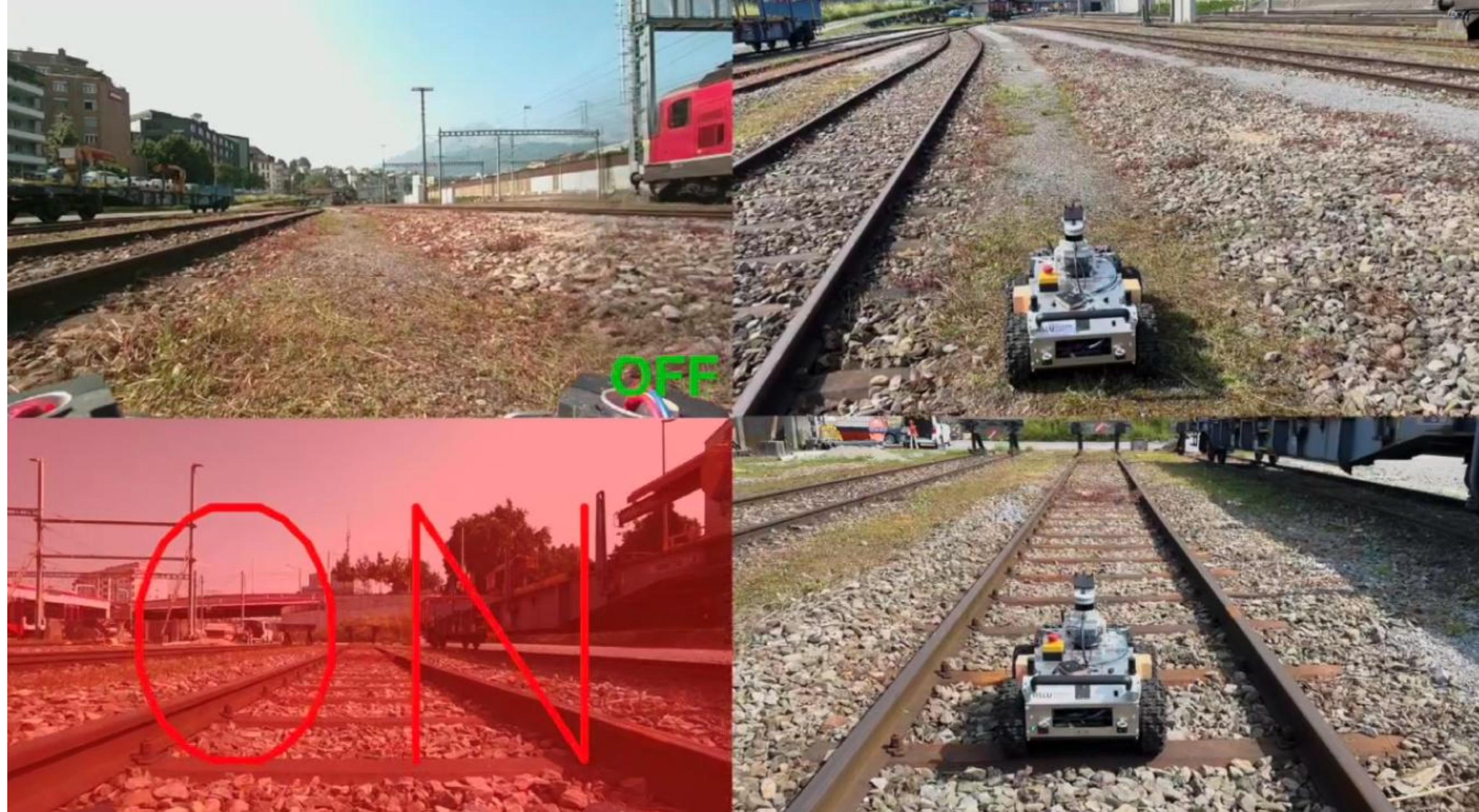
Technische Umsetzung: Sicherheitssystem

Erkennung von Gleisen durch einen "Gleismonitor".

Klassifikation:

- Binary Classification
- Roboter sammelte Daten entlang und auf den Schienen
- 8 Klassifikationsmodelle wurden trainiert und getestet
- 97,8% Genauigkeit (validierter Datensatz), 81% (externe Daten)

Fazit: Die Erkennung einer Gefahrensituation ist sehr gut. Das rote Einfärben des Monitors - sollte sich der Roboter im Zwischengleisbereich aufhalten - hat sich bewährt.



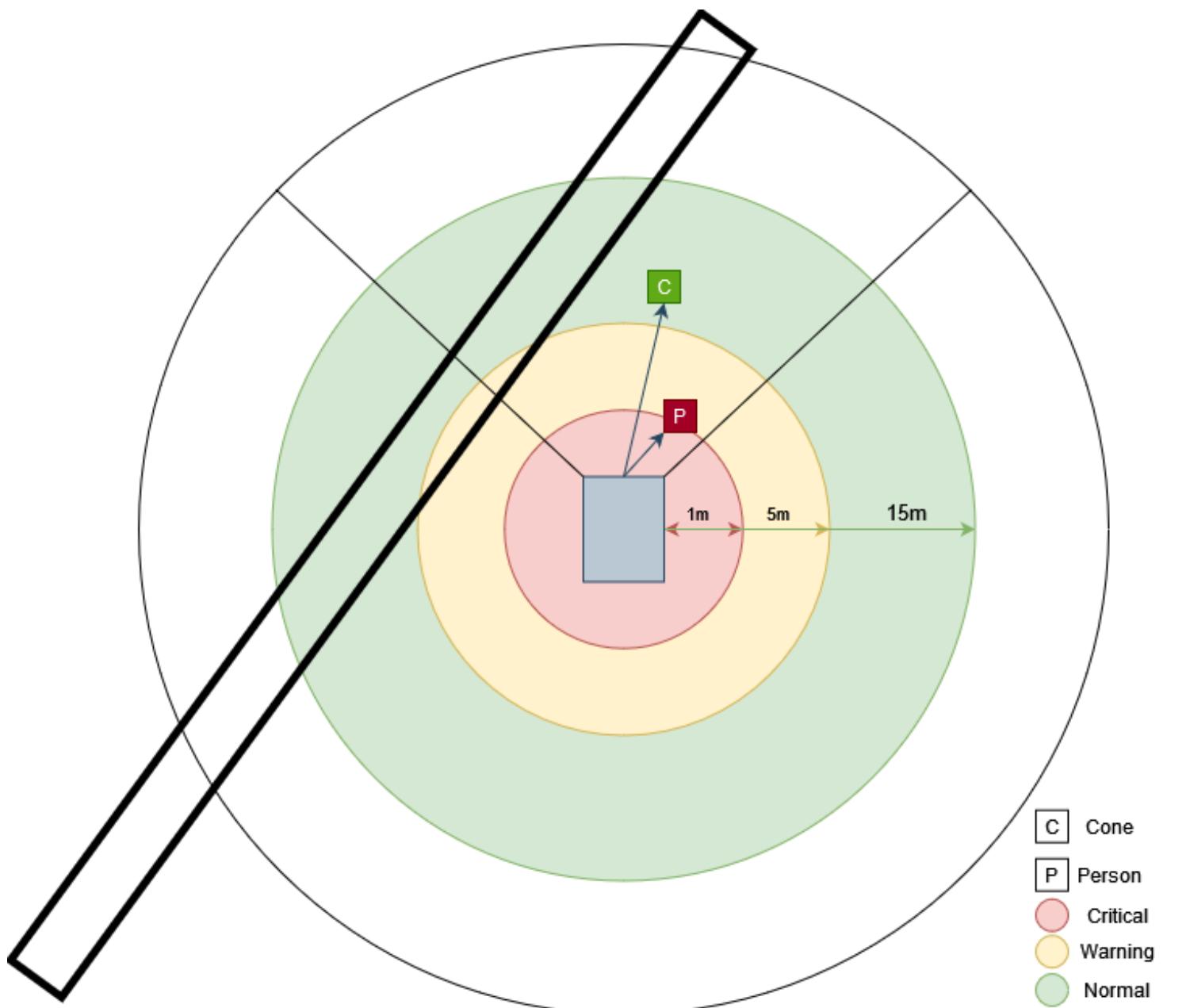
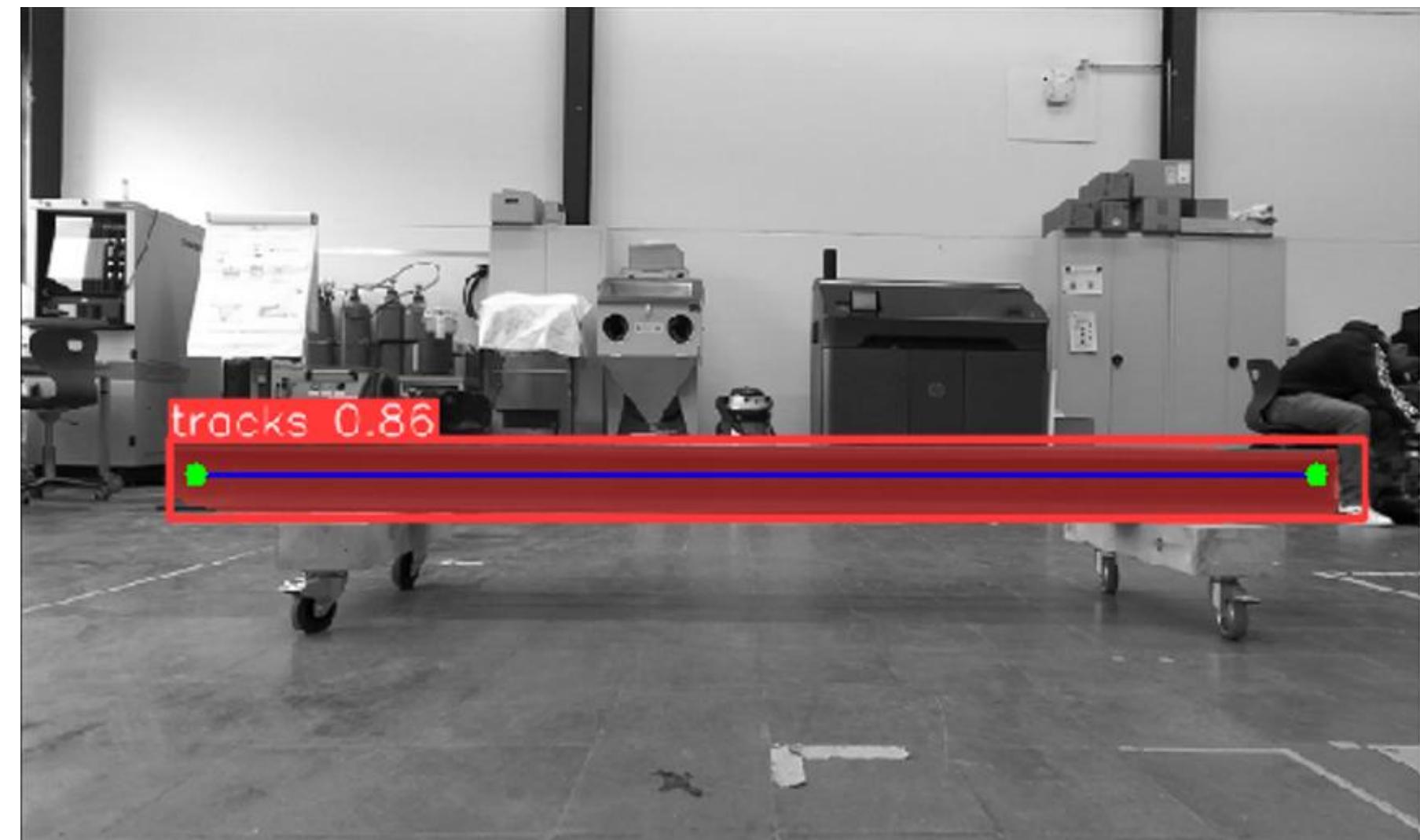
Technische Umsetzung: Sicherheitssystem

Erkennung von Gleisen durch einen "Gleismonitor"

Segmentation:

- Detektion von Gleisen mit der Hilfe von AI
 - Training eines Neuronalen Netzwerk (YOLOv8)
 - Objekte werden klassifiziert und Umrisse approximiert
- Zwei Sicherheitsfeatures für Sicherheitsmonitor
- Anpassung Operationsgeschwindigkeit des Roboters anhand des minimalen Abstands eines detektierten Objekts
- Umgebung des Roboters in verschiedene Zonen eingeteilt
 - Grün: Normaler Betrieb
 - Gelb: Geschwindigkeit wird reduziert
 - Rot: Kritischer Not-Stop
- Gleise werden auf Karte als Hindernis eingezeichnet
 - Hindernisse beeinflussen die Pfadplanung
- Diese Funktionalität wurde auf einer anderen Hardware entwickelt.
Konzeptionell auf dem S-bot integriert und validiert.

Fazit: Für schwierige Sichtbedingungen (Gegenlicht, Schattenwurf, usw.) muss die Gleiserkennung noch besser trainiert werden.



Technische Umsetzung: Sicherheitssystem

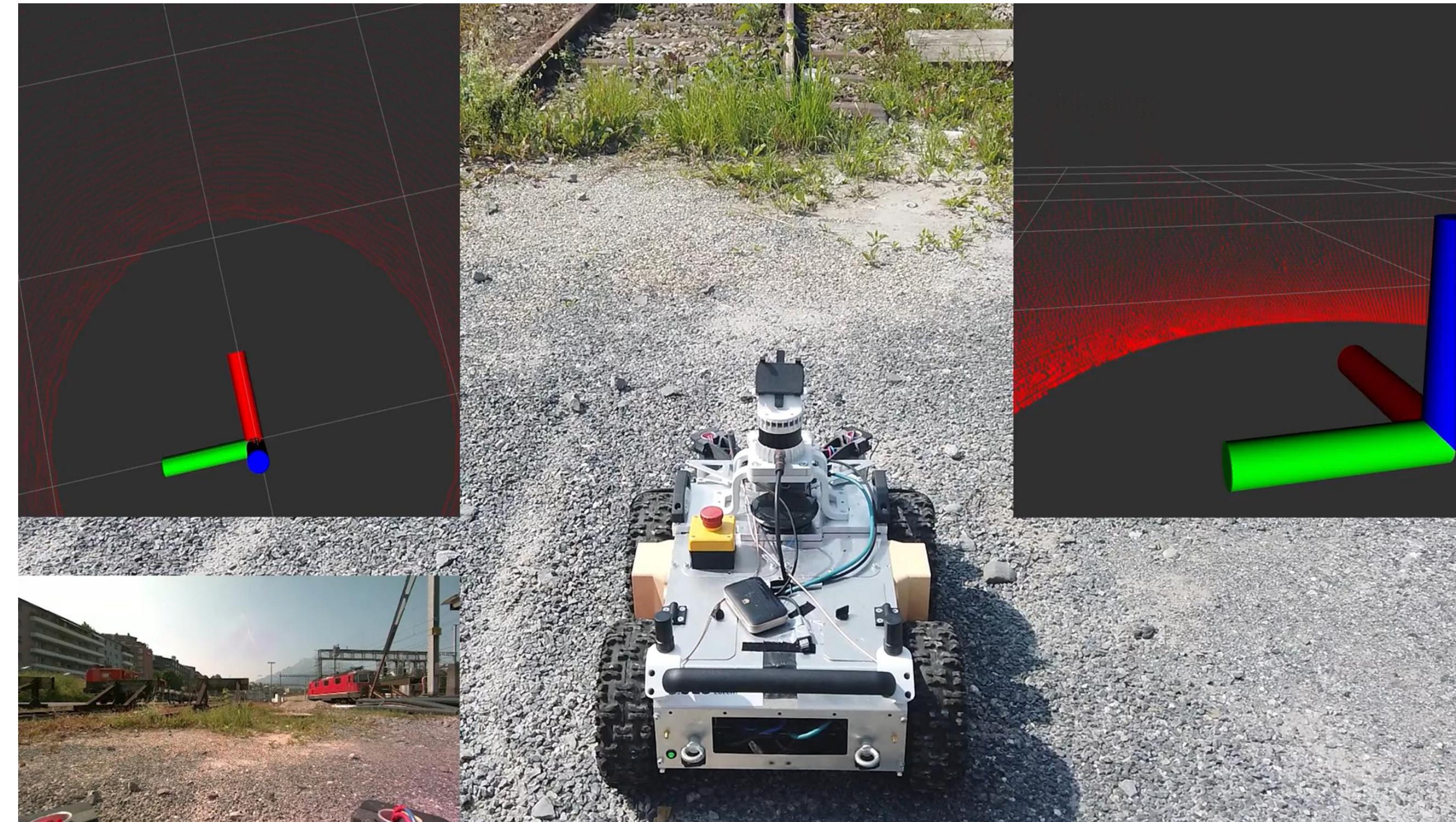
Hinderniserkennung mit LiDAR

Problematik:

In der Regel wird ein LiDAR Sensor auf dem Roboter verwendet, um Objekte/Hindernisse zu erkennen und zu umfahren oder die Route neu zu planen. Im Gleisumfeld gibt es ebenfalls zahlreiche Hindernisse. Gleichzeitig wird die Vegetation im Laserscan ebenfalls als Hindernis erkannt. Dadurch kann der Roboter seine vorgegebene Fläche nicht korrekt abfahren und mähen.

Das Video zeigt vier Aufnahmen im Gleisbereich, bei denen der Roboter einem Hindernis entgegen fährt das mit Vegetation umgeben ist.

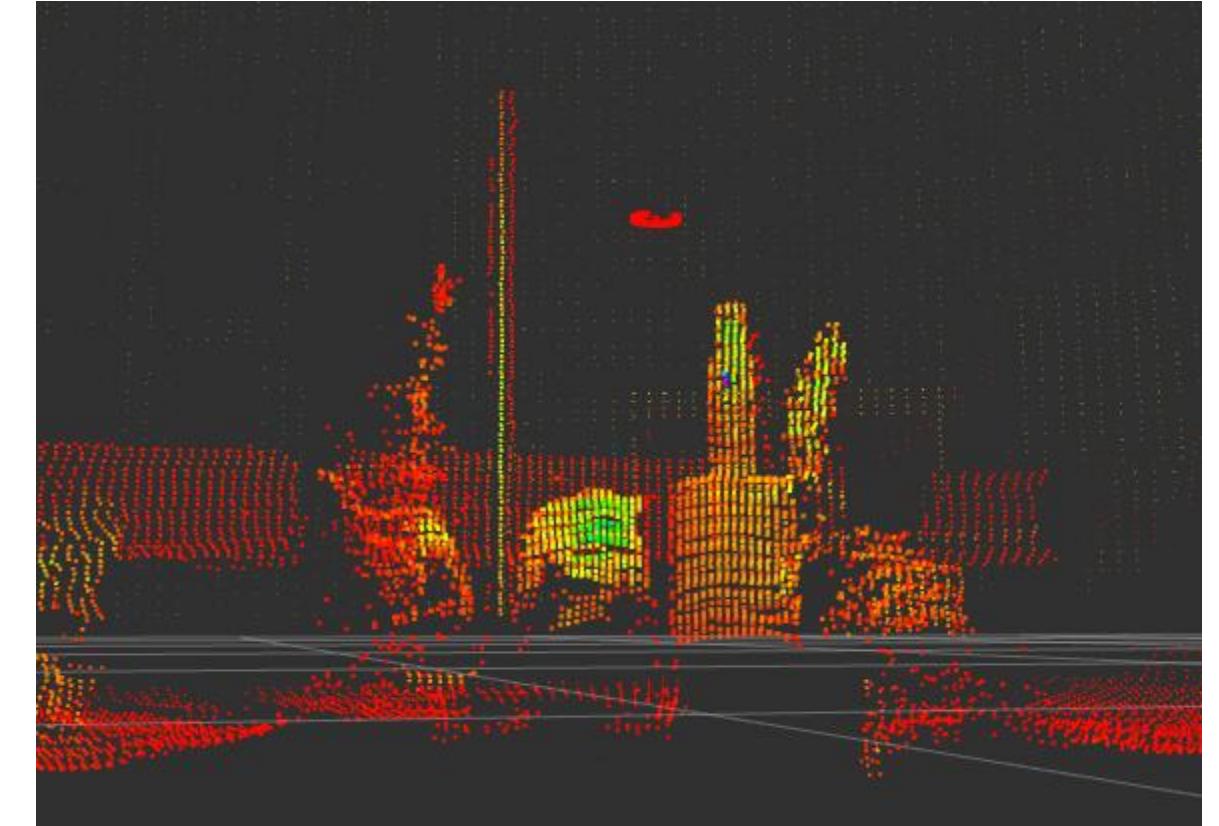
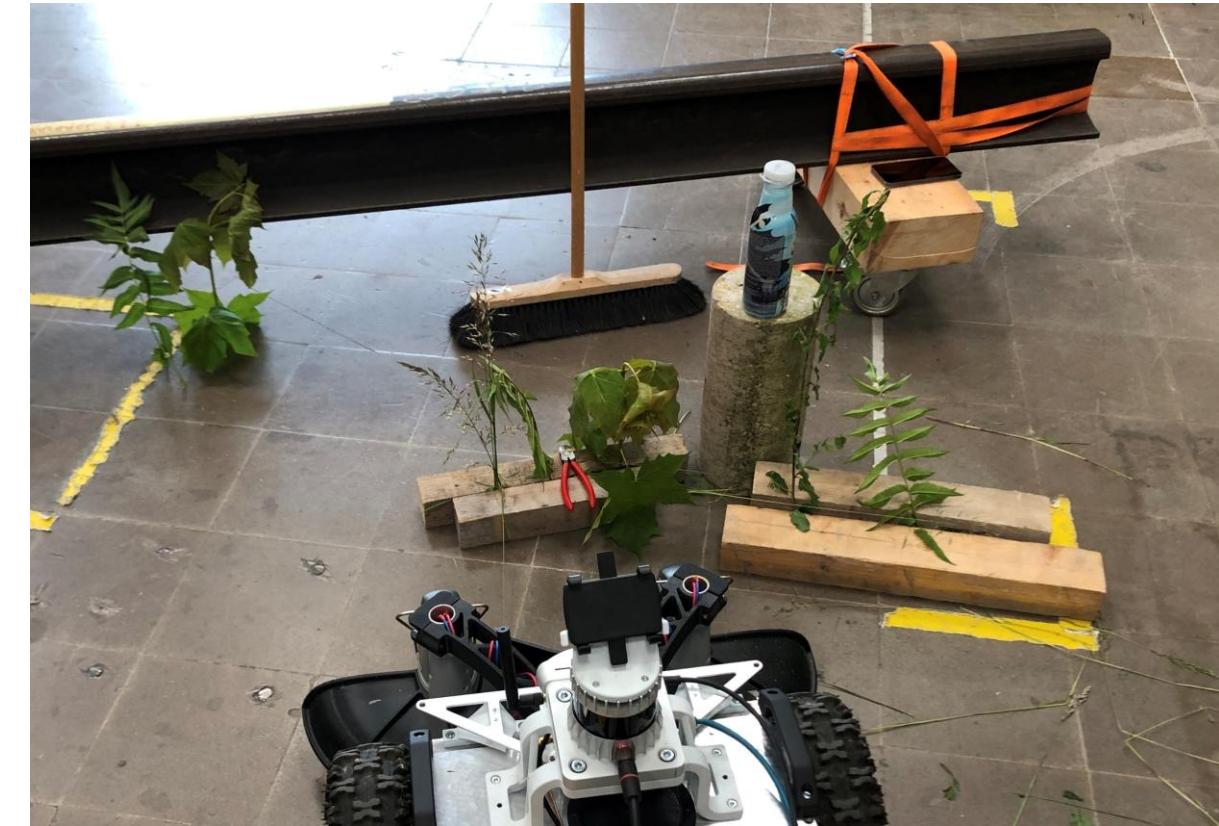
In den Aufnahmen sieht man wie schwierig es ist die Objekte im Scan zu erkennen, da es keine visuell offensichtlichen Unterschiede gibt.



Technische Umsetzung: Sicherheitssystem Hinderniserkennung mit LiDAR

Im Labor wurden für erste Tests Vegetation und Hindernisse aufgestellt und gescannt. Der Farbverlauf im Scan stellt die Intensität der reflektierten Laserpunkte dar:

Man sieht, dass im Laserscan sowohl Hindernisse als auch Vegetation erkannt wird und beide sehr ähnliche Verteilungen der Intensität haben können.



Literaturrecherche:

Es wurde eine Literaturrecherche durchgeführt, um zu sehen ob die Problematik der Vegetationserkennung mittels Laserscan ein Thema ist, zu dem aktuell geforscht wird oder schon geforscht wurde.

Beim Thema Vegetationserkennung gehen die gefundenen Artikel in Richtung Wachstumsmessung mit Hilfe von mehreren Sensoren (Laser, Spektralkamera, RGB-Kamera).

Wenn man sucht, was im Gebiet der autonomen Fahrzeuge geforscht wird, findet man einiges zu Klassifizierung von Punktwolken. Allerdings werden dort nur Autos, Gebäude oder 'pole-like structures' wie Ampeln oder Strassenschilder detektiert, zu Pflanzen wurde nichts gefunden.

Technische Umsetzung: Sicherheitssystem Hinderniserkennung mit LiDAR

Lösungsversuch:

Durch Filterung die Vegetation aus dem Laserscan entfernen. Verschiedene Einstellungen mit einem Nearest-Neighbour-Filter wurden getestet, jedoch ohne Erfolg. Die Vegetation und die Hindernisse haben eine zu ähnliche Punkteverteilung, um sie zu unterscheiden.

Eine weitere Möglichkeit Hindernisse zu erkennen wäre über Object-Matching, dafür wird jedoch von jedem Objekt, das erkannt werden soll eine genaue 3D-Beschreibung benötigt. Diese Methode ist sehr rechenaufwendig und ermöglicht es nicht unbekannte oder anders aussehende Objekte zu erkennen.

Fazit:

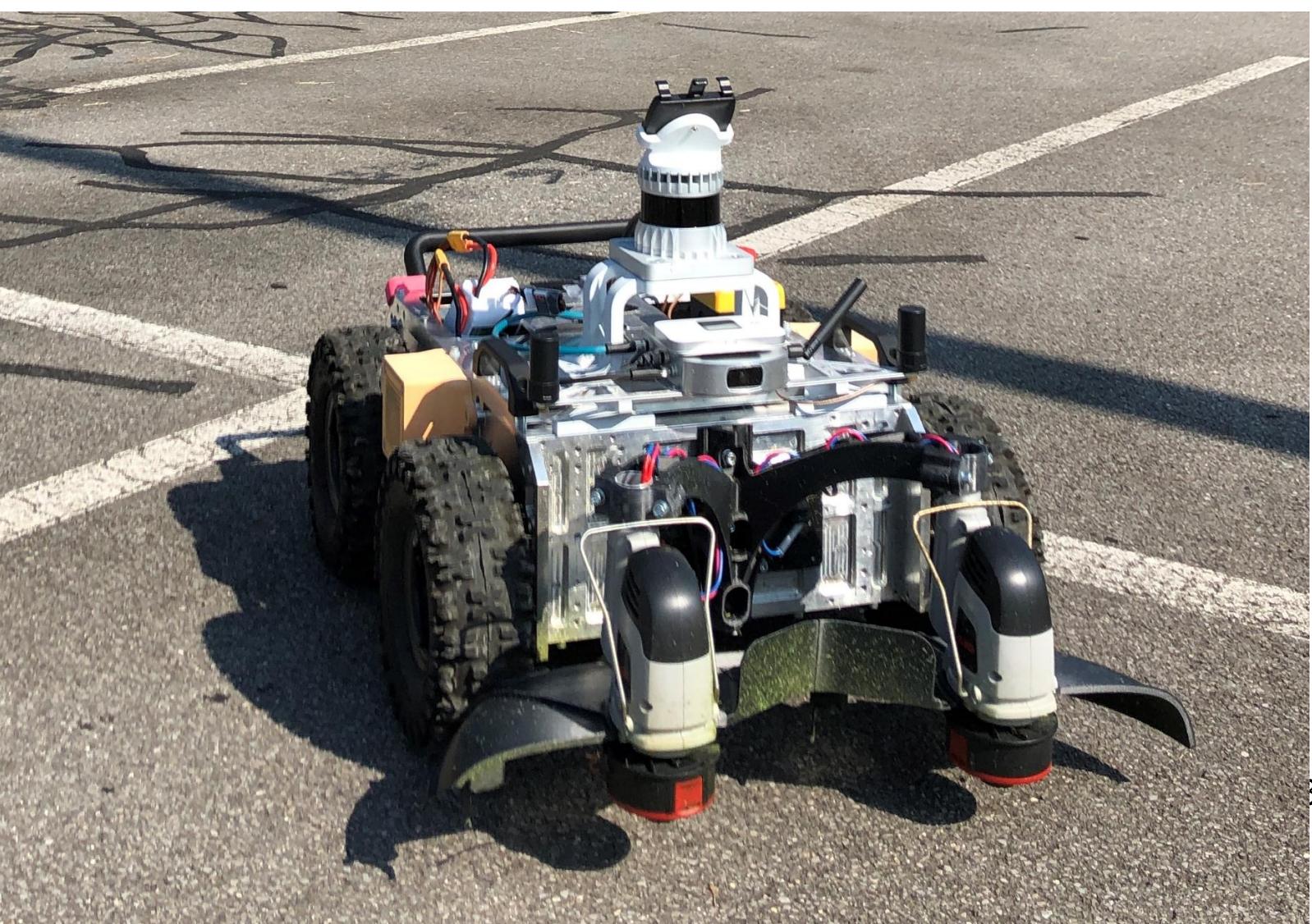
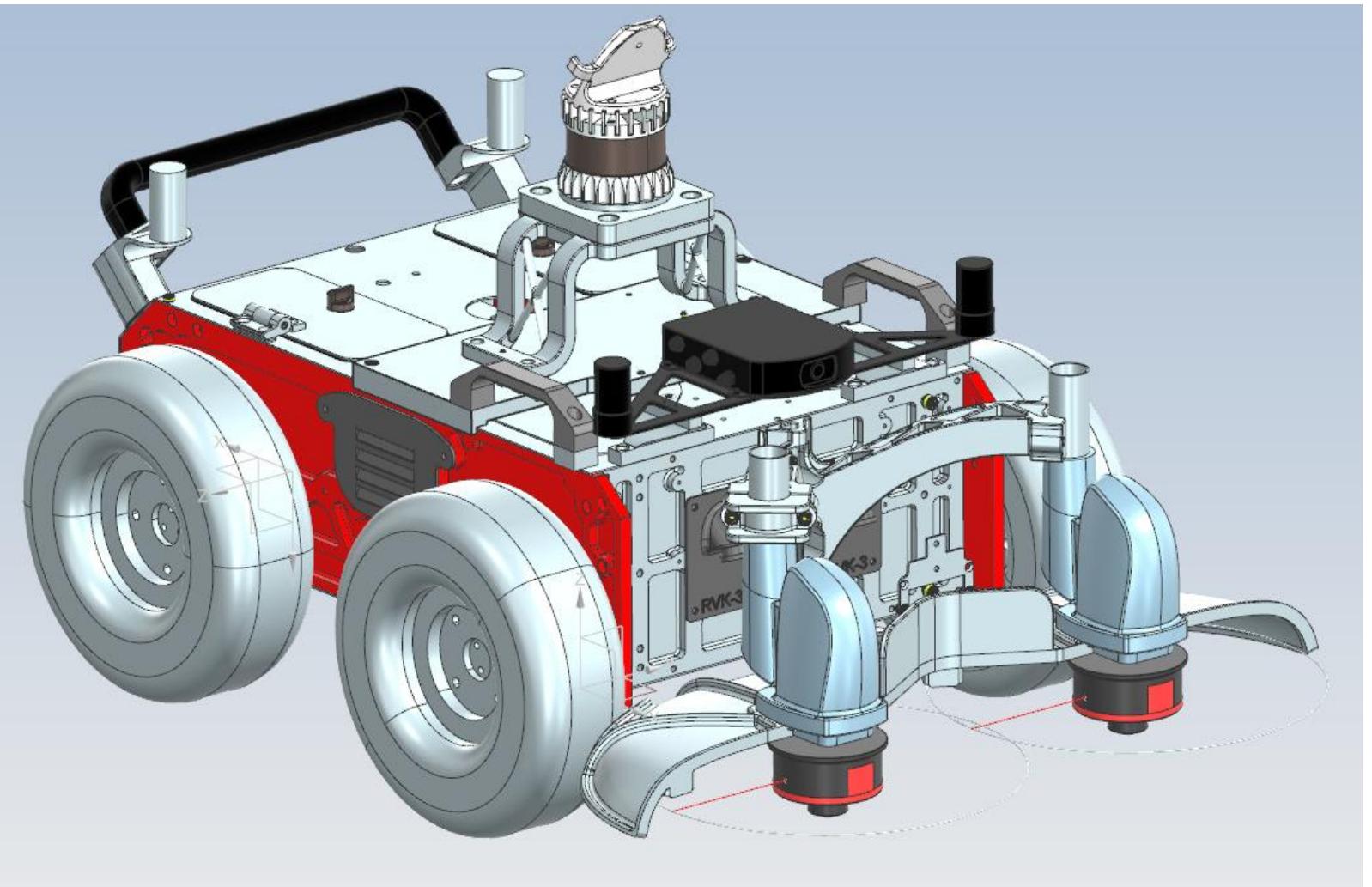
Die Unterscheidung von Vegetation und Hindernis mit reinem LiDAR konnte in Hochgrasssituationen nicht erfolgreich umgesetzt werden.

Potential: Hinderniserkennung zu überarbeiten, Sensorauswahl neu bewerten,
Relevanz von LiDAR und Tiefenkameras überprüfen.

Technische Umsetzung: Mähtechnik

Balkenmäher, Epilierer versus Fadenmäher

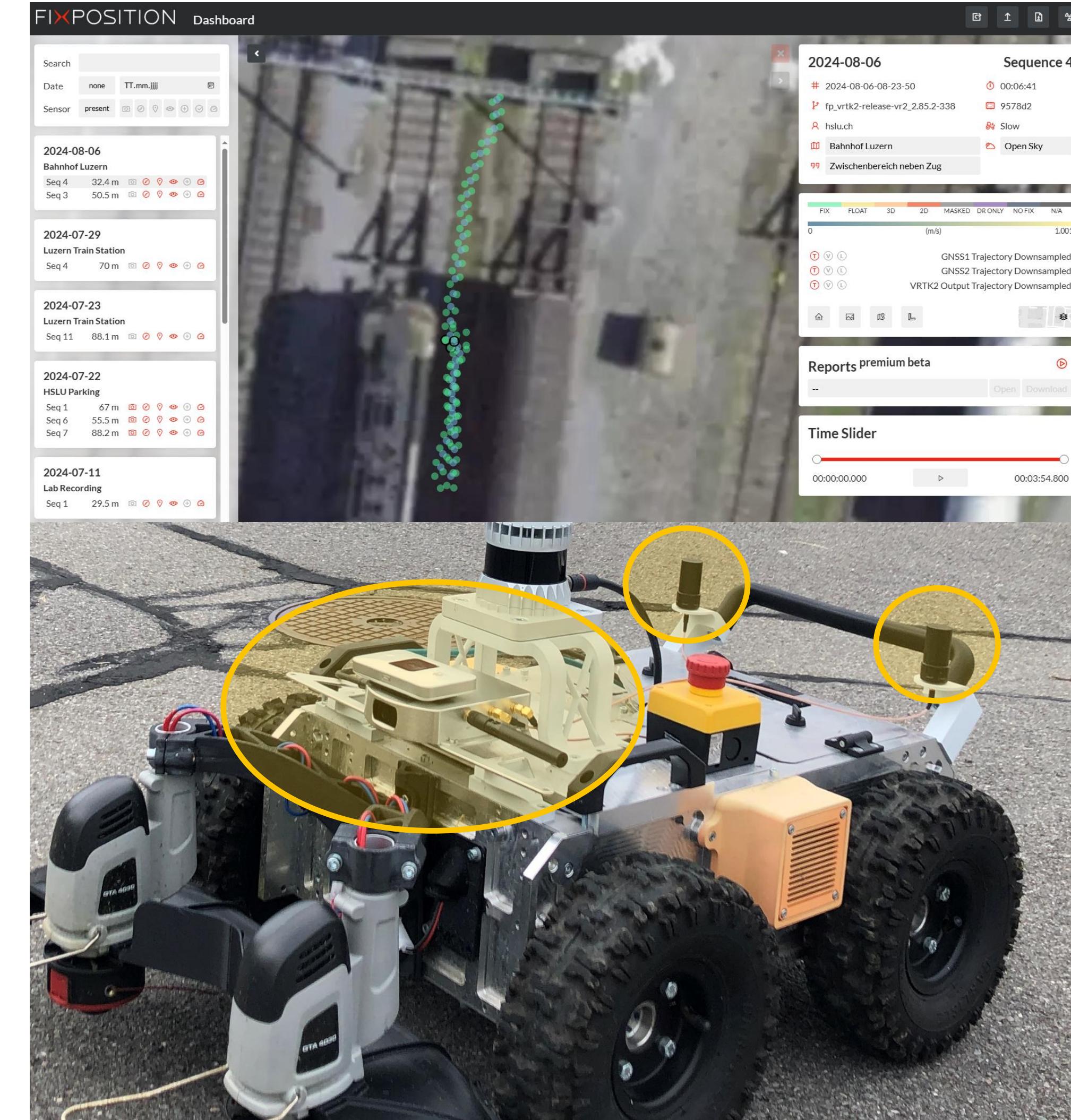
- Balkenmäher: Zunächst wurde ein für den Roboter miniaturisierter Balkenmäher entwickelt und eingesetzt. Es zeigte sich jedoch in der Anwendung, dass der Balkenmäher v.a. bei blattartiger oder dichter Vegetation verstopft oder das Schnittgut auf den Boden drückt, statt zu mähen.
- Epilieren: Versuche mit Ausreissen der Vegetation zeigten, dass die Kräfte sehr gross sind und von diesem Roboter nicht aufgebracht werden können. Zudem können Löcher (= Beschädigungen) entstehen welche zu Stolperfallen führen. Das Epilieren der Vegetation wurde daher nicht mehr weiter verfolgt.
- Fadenmäher: Als erfolgsversprechend zeigte sich eine Fadenmäher-Lösung: Mit keiner anderen Methode lässt sich eine so grosse Anzahl an unterschiedlicher Vegetation schneiden. Zudem wird das Schnittgut weggefördert. Im Prototyp wurde eine Doppel-Fadenmäher Lösung umgesetzt und in unterschiedlichen Umgebungen getestet. Es sind jedoch auch hier Grenzen des Schneidens aufgrund "Verholzung" und dichter Vegetation vorhanden.
- **Fazit:** In Anbetracht, dass der Vorgang automatisiert erfolgen soll, wird mit dem Fadenmäher der beste Kompromiss aus Zuverlässigkeit, Robustheit, Energieaufwand und Variabilität auf die Vegetationsart erreicht.



Technische Umsetzung: Navigation Lokalisierung und Sensorik

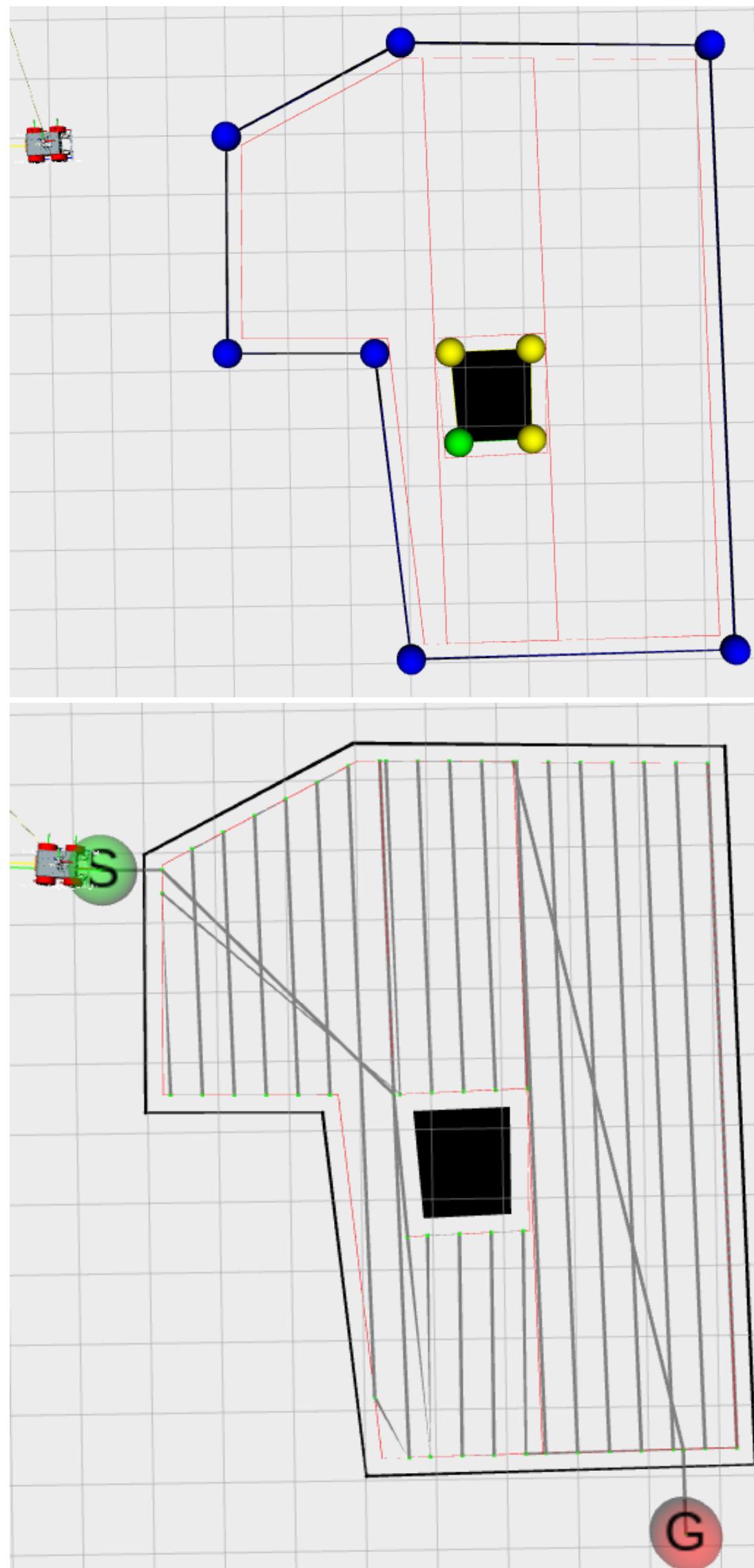
- Kameraunterstützter GPS Sensor mit zwei Antennen
 - Position und Ausrichtung
- Keine Basisstation nötig!
- Sensor verwendet zur Unterstützung der GPS-Lokalisierung
 - Korrektursignale (Internet-Dienst Swipos)
 - „visual Odometry“ (eingebaute Kamera)
 - Geschwindigkeitsinformation des Roboters
- Verschiedene Messungen in Horw und am Güterbahnhof Luzern
 - auch durch „urbane Schluchten“
 - Güterbahnhof Signal fast durchgehend in Qualität „fix“ (bestmögliches Signal)

Fazit: Das kameragestützte Dual-Antenna-GPS System hat sich bewährt und ermöglicht eine Positionsgenauigkeit im cm-Bereich, insbesondere bei schwierigen GPS-Empfangsbedingungen.



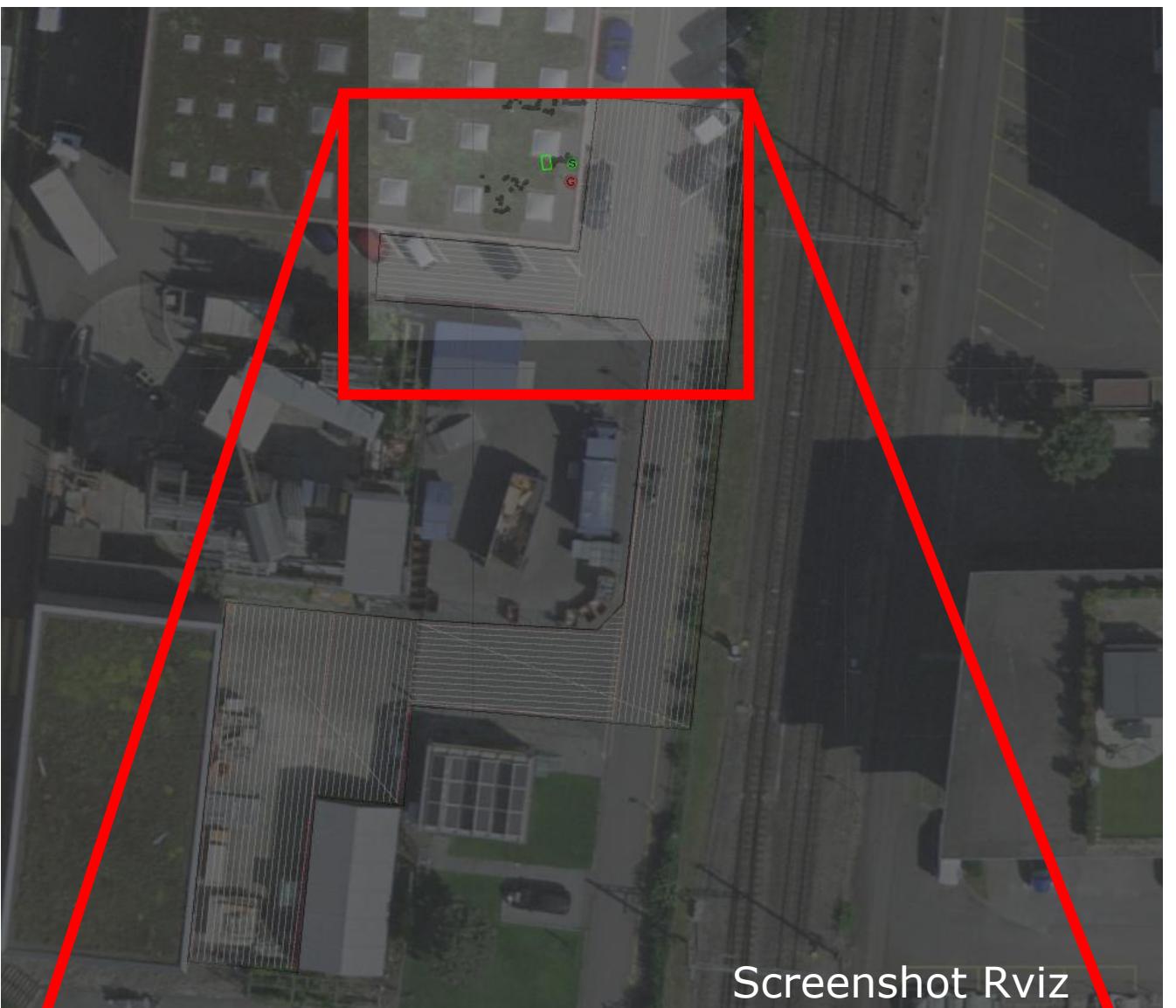
Technische Umsetzung: Navigation Pfadplanung / Mähmusterplanung

- Integration von Open Source Coverage Planner ([GitHub - ethz-asl/polygon coverage planning: Coverage planning in general polygons with holes.](#))
- Motivation
 - Coverage Planner für beliebige Polygone, auch mit «Sperrflächen»
 - Mathematisch optimiert nach Pfadkosten in [s]
 - Berechnet aus Strecke, maximaler Geschwindigkeit und maximaler Beschleunigung
- Algorithmus
 1. Polygon wird in Zellen unterteilt
 2. «Sweep Pattern» für jede Zelle wird berechnet (möglichst lange Strecken)
 3. Gesamtpfad (Startpunkt -> alle Zellen -> Endpunkt) wird über die Zeit optimiert
- Fazit:
 - Gegenüber anderen Optimierungsmethoden >10% Zeitersparnis ([Paper](#))
 - Ein mathematisch optimaler Pfad wirkt auf den Menschen nicht immer logisch



Technische Umsetzung: Navigation GIS-Integration

- Import von .kml Dateien implementiert, einfach erweiterbar mit verschiedenen Typen von Dateien.
- Erweiterung für bekannte (genauer Standort + räumliche Ausdehnung) Hindernissen einfach implementierbar.
- Automatische Routenplanung (covering salesman problem)



Ablauf Routenplanung:

Feld erstellen in beliebiger Umgebung

Exportieren als .kml

Importieren in Rviz

Start und Endpunkt festlegen in Rviz

Potential: Integration in SBB Toolchain sollte durch Rücksprachen und Standard-Formate einfach gewährleistet sein.

3. Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Total Cost of Ownership für eine roboterbasierte Vegetationskontrolle

Eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung wurde durchgeführt in Zusammenarbeit mit Jan Heuberger, Master ETH in Umweltnaturwissenschaften:

Betrachtet wurde hierbei die „**Total Cost of Ownership**“ eines Roboters, verglichen mit konventioneller und chemischer Vegetationskontrolle (VeKo).

$$TCO = \text{Investitionskosten} + \text{jährliche Kosten} + \text{Entsorgungskosten}$$

Die jährlichen Kosten beinhalten

- Unterhaltskosten
- Betriebskosten
- Betreuungskosten

Weitere Kosten wurden in dieser Analyse vernachlässigt.

Um einen direkten Vergleich der Varianten zu ermöglichen wurde die Funktionseinheit (FU) als **Kosten pro Quadratmeter [CHF/m²]** definiert.

Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Total Cost of Ownership für eine roboterbasierte Vegetationskontrolle

Folgende Annahmen wurden gemacht, damit eine erste grobe Abschätzung möglich ist:

- Lebensdauer des Roboters: ~5 Jahre
- Nutzung pro Jahr: ca. 45 Tage a 4 Stunden
- Kaufpreis Einzelgerät: CHF 50'000.-
- Mengenrabatt: bei einer grösseren Bestellung können die Beschaffungskosten pro Roboter um 40% bis 60% gesenkt werden.
- Jährliche Betriebs- & Unterhaltskosten: pauschal 5 % der Investitionskosten
- Betreuungskosten: gemäss SBB-Daten, als CHF/m² ausgewiesen (Angaben ohne Gewähr)
- Kapitalwertberechnung: jährliche Kosten diskontiert mit 2 %.

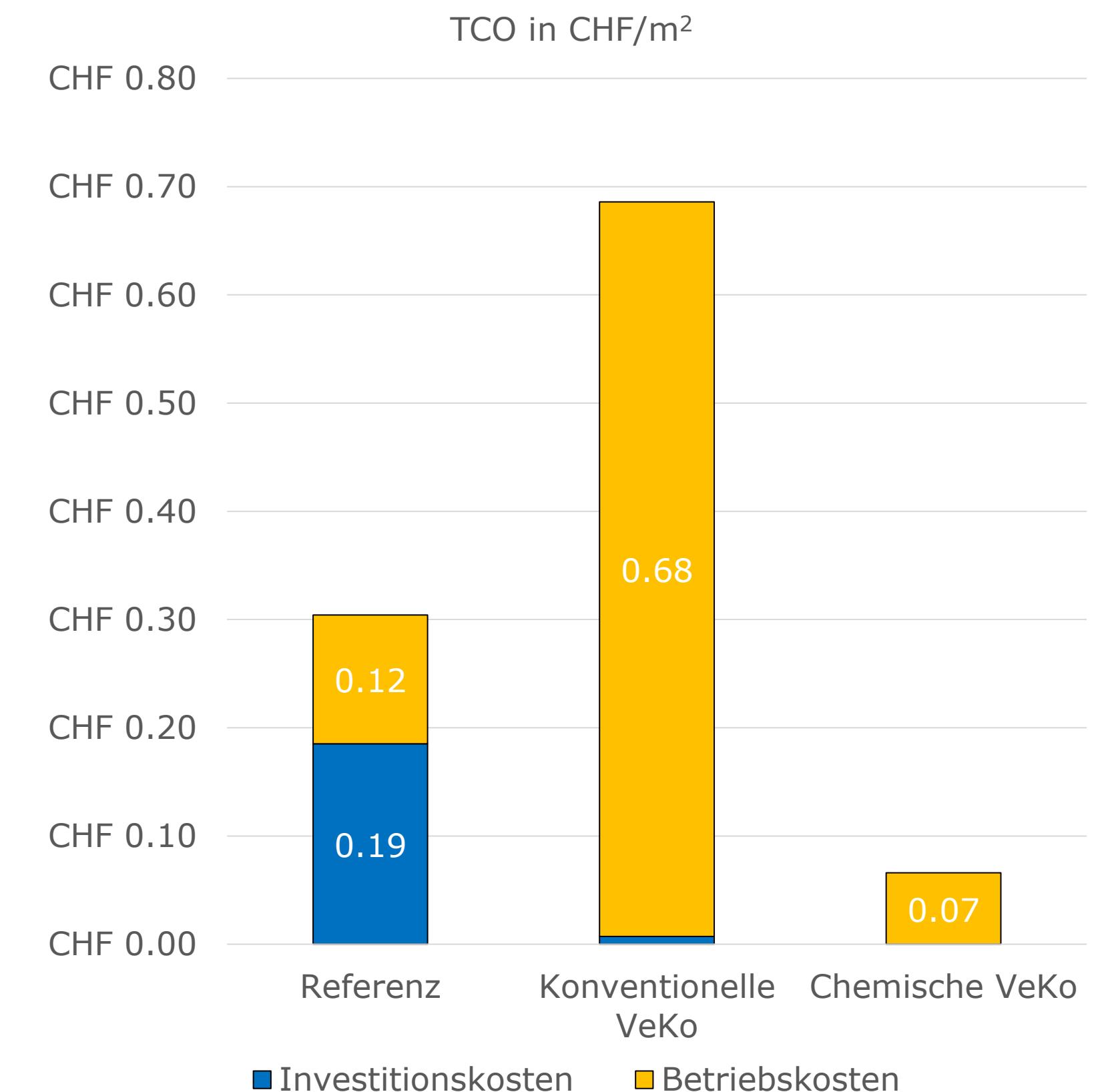
Zusätzlich erfolgt eine **Sensitivitätsanalyse** (Best-Case/Worst-Case Szenario) hinsichtlich Investitionskosten, Einsatztage und Betreuungsaufwand.

Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Total Cost of Ownership für eine roboterbasierte Vegetationskontrolle

Ergebnisse TCO-Betrachtung roboterbasierte Vegetationskontrolle:

- Langfristig sind die Kosten für die roboterbasierte Vegetationskontrolle (Referenz) deutlich tiefer gegenüber der konventionellen Vegetationskontrolle.
- Die Kosten der chemischen Vegetationskontrolle fallen deutlich geringer als alle anderen Methoden auf. Ökologische Auswirkungen wurden jedoch nicht gewichtet.
- Bei der roboterbasierten Vegetationskontrolle (Referenz) fallen v.a. die Investitionskosten ins Gewicht. Je länger die Roboter im Einsatz sind, desto weiter können die Kosten gesenkt werden.
- Je höher der Autonomiegrad des Roboters ist, desto geringer fallen die Betreuungs-/Betriebskosten für den Roboter aus.
- Roboterbasierte Lösungen bringen ökologische Vorteile mit sich, wie zum Beispiel reduzierter Einsatz von Glyphosat und eine geringere Belastung des Wasserabflusses.



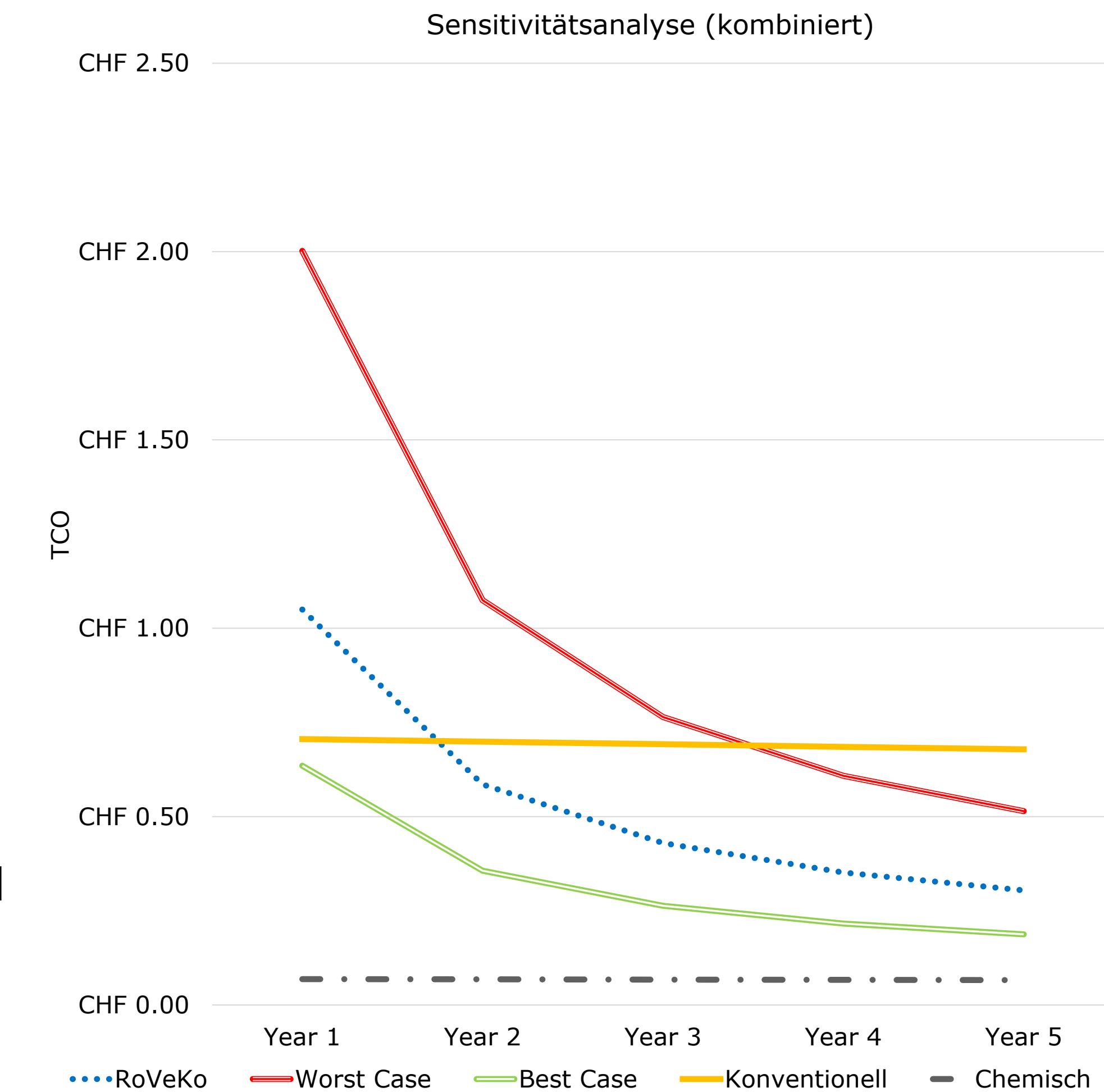
Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Total Cost of Ownership für eine roboterbasierte Vegetationskontrolle

Sensitivitätsanalyse für die Vegetationskontrolle:

- Für eine Sensitivitätsanalyse wurde jeweils ein «best-case» und ein «worst-case» Szenario erarbeitet und umfasst:
 - Investitionskosten (-40% ... +100%)
 - Einsatztage (+33% ... -33%)
 - Betreuungsaufwand (-50% ... + 100%)

Fazit: Die roboterbasierte Vegetationskontrolle ist ökonomisch sehr konkurrenzfähig, insbesondere gegenüber der konventionellen VeKo. Werden auch ökologische Kriterien berücksichtigt, kann die roboterbasierte VeKo noch stärker punkten. Allerdings erfordert die roboterbasierte VeKo eine lange Lebensdauer, eine hohe Autonomie und eine möglichst kostengünstige Produktion und Wartung der Roboter.



4. Zusammenfassung & Ausblick

Gesamtfazit und Empfehlungen

Das F&E Projekt RoVeKo konnte zeigen, dass eine Robotik Lösung für die gleisnahe Vegetationskontrolle realisierbar ist. Dank dieser Robotik Lösung kann die chemische Vegetationskontrolle (Glyphosat) reduziert werden. Die verschiedenen Anforderungen hinsichtlich Sicherheit, Navigation bei GPS-Abschattung, Erkennen von Personen, Fahren im Bahnschotter ohne Festzusetzen, Einhaltung von Gewicht und Größenanforderungen, Pfadplanung in einem vordefinierten Feld, Umfahren von Hindernissen, Einhaltung des Abstands zu den Gleisen, automatische Abschaltung des Mähwerkes ausserhalb des Felds, usw. konnten erfüllt werden. Die Lösung besteht in einem geländetauglichen Prototyp mit Integration von verschiedenen Sensoren, einem leistungsfähigen Rechnersystem und einer modularen Softwarearchitektur.

Dennoch wurde sichtbar, wie komplex der Betrieb im Gleisumfeld ist und wie viele Störfaktoren möglich sind. Es viele unerwartete Hindernisse (Schläuche, Werkzeug, Löcher, Betonbrocken, Abfall, ...) und die Vegetation kann zu gross, zu dicht und/oder zu kräftig werden. Der Abtransport von Schnittgut erfordert eigene Lösungen. Eine Universallösung ist nicht möglich und eine Konzentration auf die gleisnahe Vegetationskontrolle ist sinnvoll.

Es konnte gezeigt werden, dass eine Robotik Lösung sowohl wirtschaftlich als auch ökologisch sinnvoll und möglich ist, sofern das bestehende Know-how auf eine kommerzielle Robotik Lösung integriert werden kann. Hierfür bedarf es einer Zusammenarbeit mit einer Firma, welche Erfahrung in Produktion und Wartung von Kleinrobotern besitzt. Um im Schweizer Markt zu bestehen und um wettbewerbsfähig zu sein, muss diese Umsetzung möglichst umgehend durchgeführt werden. Aus diesem Grund wurden bereits potentielle Partner wir novaziun, probotics und raymo kontaktiert. Wir empfehlen die Weiterführung des Projektes mit dem Fokus auf die kommerzielle Umsetzung.

Ausblick

Weiterführung mit Industriepartnerschaft oder für spezifische Forschungsfragen

Der Markt und das Produktangebot an kommerziell erhältlichen (Mäh-)Robotern ist zwischenzeitlich sehr gross und entwickelt sich rasant weiter. Bisher ist aber kein Standard-Robotersystem für spezifische Anwendungsfälle im Bahnumfeld einsatzfähig.

Mit dem Projekt RoVeKo konnte an der HSLU ein Demonstrator eines autonomen Roboters für den Gleisbereich entwickelt und demonstriert werden, welcher jedoch noch nicht für einen umfassenden Outdoor-Einsatz (z.B. im Rahmen eines Pilotversuchs) eingesetzt werden kann. Zur Weiterentwicklung und Integration in eine Vor-Serie (Serie 0) sind zusätzliche Entwicklungsschritte gemeinsam mit einem geeigneten Industrialisierungspartner notwendig. Trotz intensiver Bestrebungen ist es bisher im Rahmen des F&E Projekts nicht gelungen eine Entwicklungspartnerschaft aufzubauen. Die kontaktierten kommerziellen Hersteller von Mährobotern und Mähgeräten in der Schweiz, Europa und ausserhalb von Europa zeigen kein oder nur ein geringes Interesse an Produkten, welche für das Bahnumfeld ausgelegt/adaptiert sind.

Dennoch laufen weiterhin Abklärungen mit den Unternehmen novaziun, probotics und raymo. Über laufende und geplante Studierendenarbeiten werden weitere Unternehmen kontaktiert und neue Fragestellungen werden derzeit bearbeitet. In einer Industriepartnerschaft oder bei spezifischen Forschungsfragen empfehlen wir eine Weiterführung des Projektes unter Anwendung der bisherigen Forschungsergebnisse.

Danke!

Technik & Architektur
21. Oktober 2025

