Abschlussbericht

Zuwendungsempfänger:	**Förderkennzeichen:**
Universität Kassel, Agrartechnik Mönchebergstrasse 19 34125 Kassel	281C212A19

Vorhabenbezeichnung:

SmartFence – Förderung der Weidehaltung durch Entwicklung eines sich selbst wartenden, digitalen Zaunsystems

Laufzeit des Vorhabens:

01. Oktober 2020 – 30. März 2024

Verbundpartner

Universität Kassel, Agrartechnik, Nordbahnhofstr. 1a, 37213 Witzenhausen

horizont group GmbH, Homberger Weg 4-6, 34497 Korbach

Gefördert durch

Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft

aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

Projektträger

Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft unter dem Förderkennzeichen 281C212A19 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei der Autorin/beim Autor.

1. Kurze Darstellung

1.1. Ursprüngliche Aufgabenstellung

Gegenstand und Aufgabenstellung des Projekts „SmartFence“ war die Entwicklung eines sich selbst wartenden, digitalen Zaunsystems zur Förderung der Weidehaltung. Die Weidehaltung von Nutztieren allgemein und Wiederkäuern im Besonderen bietet erhebliche Vorteile hinsichtlich Tierwohl, Klima-, Umwelt- und Ressourcenschutz und Verbrauchererwartungen und ist für ökologisch wirtschaftende Betriebe auch vorgeschrieben. Aus Sicht der Tierhalter bedeutet Weidehaltung allerdings einen erhöhten Arbeitsaufwand und dadurch höhere Kosten, die sich nicht ohne weiteres in höhere Produktpreise für Milch, Fleisch etc. übersetzen lassen. Aus diesem Grund werden die Potentiale der Weidehaltung nur sehr eingeschränkt genutzt. In den letzten Jahren hat sich diese Problematik durch die Ausbreitung von Wölfen in Deutschland zusätzlich verschärft, weil in vielen Gebieten zum Schutz der Herden nun besonders sichere wolfsabweisende Zäune benötigt werden, die nicht nur in der Anschaffung und Errichtung teurer sind als gewöhnliche Weidezäune, sondern auch deutlich öfter frei gemäht werden müssen.

Vor diesem Hintergrund sollte ein digitales Zaunsystem entwickelt werden, das seinen Zustand rund um die Uhr überwacht, mit Hilfe eines autonomen Roboters Bewuchs auch unter Wolfsschutzleitern entfernen und Störungen visuell erkennen kann. Die Automatisierung in der Landwirtschaft schreitet seit Jahren voran. In den letzten Jahren sind zunehmend auch Agrarroboter zur Marktreife entwickelt worden, beispielsweise der „Farmdroid FD20“, verschiedene Hackroboter von „naïo Technologies“, sowie diverse Systeme für die Innenwirtschaft. Im privaten wie auch gewerblichen Bereich erfreuen sich auch Mähroboter für die Rasenpflege zunehmender Beliebtheit. Es existiert bislang jedoch kein System mit vergleichbaren Fähigkeiten wie dem in „SmartFence“ entwickelten Zaunsystem.

1.2. Ablauf des Vorhabens

Die Arbeiten im Projekt begannen mit der Auswahl von Stereokamera und -prozessor und ersten Tests der Abstandsmessung in Labor und Freiland mit handelsüblichem Leitermaterial aus dem Standardprogramm des Projektpartners horizont. Verschiedenes Leitermaterial (Bänder, Seile und Litzen) in unterschiedlicher Farbe und Breite wurde bei verschiedenen Lichtbedingungen hinsichtlich der Abstandsmessung mit der Stereokamera untersucht.

Darauf hin wurde mit Entwurf und Herstellung von speziell auf die Erkennbarkeit mit Stereokameras optimiertem Leitermaterial begonnen und schließlich ein Set von 22 „Kandidaten“ angefertigt, getestet und ein Material mit guter Erkennbarkeit ausgewählt. Die Verfügbarkeit und Herstellbarkeit (auch langfristig) wurde geprüft und sichergestellt. Mit diesem

Material wurde ein umfangreicher Datensatz aus RGB-Bildern und den zugehörigen Abstandsmessungen (Depth-Maps) aufgebaut.

Nach Festlegung des Leitermaterials wurde mit der Entwicklung von Verfahren zur Bekämpfung von Bewuchs im Zaun durch einen autonomen Roboter, dem Entwurf der Roboter-Plattform und der Entwicklung eines Algorithmus zur Segmentierung des Zauns in den Bildern, bzw. Depth-Maps begonnen. Ebenso wurde der Aufbau eines MQTT-Servers für die Kommunikation zwischen Zaungeräten, Roboter und Benutzer begonnen und die ungefähre Architektur abgestimmt.

Die Roboter-Plattform wurde in Labor und Weide erprobt und iterativ weiterentwickelt. Es wurden mögliche Fehlerbilder am Zaun bestimmt und festgelegt, welche davon der Roboter erkennen soll.

1.3. Wesentliche Ergebnisse

Im Rahmen des Projekts wurde durch die erfolgreiche Zusammenarbeit des Fachgebiet Agrartechnik der Universität Kassel und der horizont group Gmbh ein sich selbst wartendes, digitales Zaunsystem entwickelt. Die wesentlichen innovativen Bestandteile sind ein auf die Erkennbarkeit und Messbarkeit mit Stereokameras und ComputerVision optimiertes Zaunmaterial, IoT-Messmodule zur Erkennung von Störungen/Defekten, sowie ein Roboter, der mit Hilfe von Stereokamera und ComputerVision am Zaun entlang navigiert, Bewuchs entfernt und Defekte mittels DeepLearning (KI) erkennt.

Es konnte gezeigt werden, dass mit Hilfe von modernen Methoden des Maschinellen Lernens eine robuste und zuverlässige Erkennung des Zauns möglich ist, die einem Roboter die Navigation am Zaun erlaubt. Um solide Ergebnisse zu erzielen, wurde ein seilförmiges Leitermaterial entwickelt, das durch seine Form und Farbgebung die Erkennung und Abstandsmessung unter vielfältigen Lichtbedingungen ermöglicht. Es wurde ein Roboter mit zwei angetriebenen Rädern entwickelt und getestet, der am Zaun entlang navigiert. Dazu wurde ein DeepLearning Modell erstellt, mit dem die Abstandsinformation zum Zaun aus den sonstigen Messpunkten der Stereokamera herausgefiltert werden kann. Für den Roboter wurde ein Mähwerk entwickelt, das bei Kontakt mit Zaunpfosten rechtwinklig zur Fahrtrichtung ausschwenkt und durch seinen flachen Aufbau auch unter wolfsabweisenden Zäunen mähen kann. Es wurden IoT-fähige Messgeräte entwickelt, die den Zustand des Zauns automatisch überwachen und Störungen anhand von Spannungsschwankungen erkennen. Um auch umgedrückte Pfosten oder stark durchhängende Leiter zu erkennen, wurden DeepLearning Modelle auf Basis von YOLOv6 erzeugt und verglichen. Es konnte gezeigt werden, dass sich die aufgeführten Störungen prinzipiell gut erkennen lassen, jedoch blickwinkelabhänig. Die Realisierbarkeit des System wurde nachgewiesen, ein Funktionsmuster entwickelt und in der Zielumgebung getestet.

2. Eingehende Darstellung

2.1. Durchgeführte Arbeiten

Zu Beginn des Projekts wurde am 26.10.2020 am Fachbereich Ökologische Agrarwissenschaften der Universität Kassel in Witzenhausen ein erstes Projekttreffen mit den am Projekt beteiligten Mitarbeitern der beiden Projektpartner abgehalten. Aufgrund der Pandemie konnten persönliche Treffen im weiteren Projektverlauf nur eingeschränkt stattfinden. Wo persönliche Treffen nicht möglich waren, wurden Online-Treffen kurzfristig nach Bedarf arrangiert.

Die Universität Kassel war entsprechend dem vereinbarten Arbeitsplan zunächst vorrangig mit Arbeitspaket 4 befasst, das sich mit der Entwicklung eines Stereo-Kamera Systems zur Erkennung und Messung des Abstands zu Zäunen beschäftigt. Die wesentliche Schwierigkeit lag darin, anhand von Farbbildern diejenigen Messpunkte heraus zu filtern, die die Entfernung zum Zaun – und nicht anderen Objekten in der Umgebung – angeben. Darüber hinaus wirkte die Uni Kassel unterstützend bei der Entwicklung von auf die Erkennbarkeit mit Computer Vision (CV) Techniken optimiertem Zaunmaterial Arbeitspaket 2 (AP 2) mit.

Im ersten Schritt wurden Kameras und Prozessoren gesucht, Angebote eingeholt und verglichen. Bestellt wurden schließlich das Karmin3 Kamera Modul mit dem SceneScan Pro Stereo Vision Prozessor von nerian Vision Technologies als Haupt-System, sowie die sehr preiswerte Intel Realsense D435i zum Vergleich.

Das Haupt-System von nerian verfügt über zwei 3-Megapixel Farbsensoren und vom Benutzer auswechselbare Objektive. Wegen Lieferschwierigkeiten konnte es erst Mitte Januar 2021 geliefert werden. Die Kamera von Intel verfügt über zwei 1-MP Graustufen Sensoren, einen aktiven Infrarot-Projektor und einen RGB-Sensor. Sie war sofort lieferbar und konnte daher schneller für erste Testbilder einsatzbereit gemacht werden.

Abbildung 1: Das RGB Bild links, die zugehörige Abstandsmessung rechts (blau = nah, rot = fern). Die Messung des Abstands gelingt mit der Intel RealSense D435i bei Seilen und Litzen wegen ihres kleinen Querschnitts selbst im Nahbereich nur stellenweise.

Die Kamera von Intel konnte prinzipiell alle Zäune abbilden. Bei Litzen und Seilen zeigten sich wegen ihres geringen Durchmessers erwartungsgemäß Schwierigkeiten hinsichtlich der Entfernungsmessung, wie in Abbildung 1 gezeigt.

In enger Abstimmung mit dem Projektpartner horizont wurden Proben von vorrätigem Material aus dem aktuellen Programm ausgewählt, um erste Hinweise auf die Eignung verschiedener Materialien und Zaunarten für die Anfertigung des Kandidaten-Sets zu gewinnen. Es wurden erste Versuchsaufbauten für die Intel Kamera angelegt und Aufnahmen gemacht, um bereits vor dem Eintreffen des eigentlichen für die Zaunerkennung vorgesehenen Systems von nerian erste Erkenntnisse zu gewinnen.

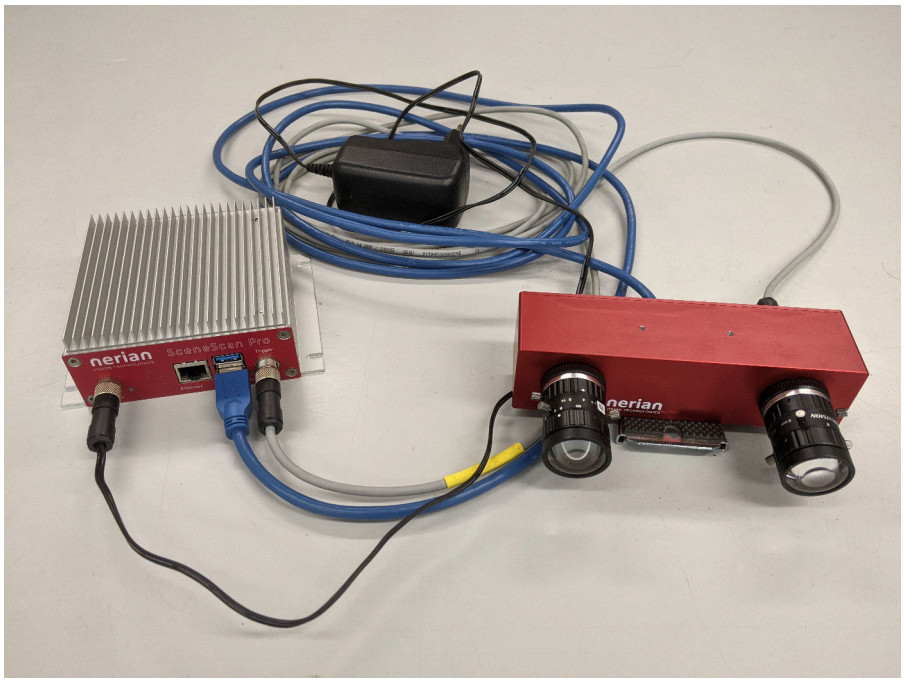

Abbildung 2: Das für den Roboter genutzte Kamerasystem von nerian: rechts Karmin3 Stereokamera mit 10cm Basisbreite, RGB Sensoren und 6mm Objektiven; links Stereoprozessor "SceneScan Pro" mit Datenkabel (blau), Triggerkabel (grau) und Netzanschluss.

Das Kamera-System von nerian wurde nach dessen Lieferung im Januar 2021 ebenfalls eingerichtet und mit dem vorhandenen Leitermaterial getestet. Abbildung 2 zeigt das System bestehend aus Stereokamera „Karmin 3“ mit 10cm Basisbreite und 6mm Objektiven (rechts), sowie dem Bildverarbeitungssystem „SceneScan Pro“ (links).

Es wurden Aufnahmen des vorhandenen Leitermaterials bei verschiedenen Lichtverhältnissen und wechselndem Hintergrund gemacht. Die Abstandsmessung bei Seilen und Litzen funktionierte mit dem System von nerian deutlich besser als das System von Intel. Im Unterschied zur Intel Realsense D435i reagierte das System von nerian allerdings empfindlicher auf sich in der Bildhorizontalen wiederholende Muster, was zu einer Beeinträchtigung der Abstandsmessung führen kann. Bei ungefähr waagerecht durch das Bild verlaufenden Bändern, Seilen und Litzen schlägt das Stereo-Matching deshalb oft fehl, wie beispielhaft für ein Seil in Abbildung 3 dargestellt. Ein Lösungsansatz besteht darin, die Kamera schräg zu stellen, sodass der Zaun diagonal durch das Bild verläuft. Weil der Zaun in der Regel parallel zum Boden und damit zur XY-Ebene des Roboters verläuft, kann das Stereo-Matching dadurch verbessert werden.

Abbildung 3: Bei horizontalem Verlauf des Leiters (hier weiß-gelbes Seil) ist das Stereo-Matching beeinträchtigt. Links eines der Farbbilder, rechts die resultierende Depth-Map. Weit entfernte Bereiche werden blau dargestellt, nahe rot. Schwarz repräsentiert fehlende Abstandsmessung.

Eine weitere Möglichkeit zur Verbesserung des Stereo-Matchings besteht darin, dem Leiter durch Wahl von Farben und Webtechnik eine unregelmäßige Textur zu verleihen. Aus technischen Gründen ist das bei den dünnen Litzen kaum möglich und bei Bändern nur mit sehr hohem Aufwand möglich. Bänder sind außerdem für den Anwender umständlicher in der Handhabung und neigen zum Verdrehen und Flattern, was den sichtbaren Querschnitt stark reduzieren kann.

Abbildung 4: Drei Proben des Kandidatensets: a) blau (mono), blau-rot mit unregelmäßigem Muster, blau-weiß für hohen Kontrast. Durchmesser der Proben ist 8,2mm.

Für die Herstellung des Kandidaten-Sets wurde deshalb in enger Abstimmung mit dem Projektpartner seilförmiges Leitermaterial ausgewählt, das sich gut in verschiedenen Farbmustern und Durchmessern herstellen lässt. Insgesamt wurden von horizont 22 Proben mit einem Durchmesser von 5,8mm und 8,2mm in Variationen aus blauen, roten und weißen Fasern entworfen und hergestellt.

Die Proben wurden zunächst vor verschiedenen Hintergründen bei unterschiedlichem Licht verglichen, um eine Vorauswahl zu treffen. Die Auswahl wurde schließlich auf drei Proben mit dem größeren Durchmesser von 8,2mm eingegrenzt: blau (mono), blau-rot im Verhältnis 2:1, sowie blau-weiß im Verhältnis 2:1. Bei dem blau-roten Seil sind beide Farben im angegebenen Verhältnis in jedem Strang enthalten, sodass sich auf der Oberfläche des Seils ein unregelmäßiges Muster ergibt. Die drei Proben sind in Abbildung 4 dargestellt.

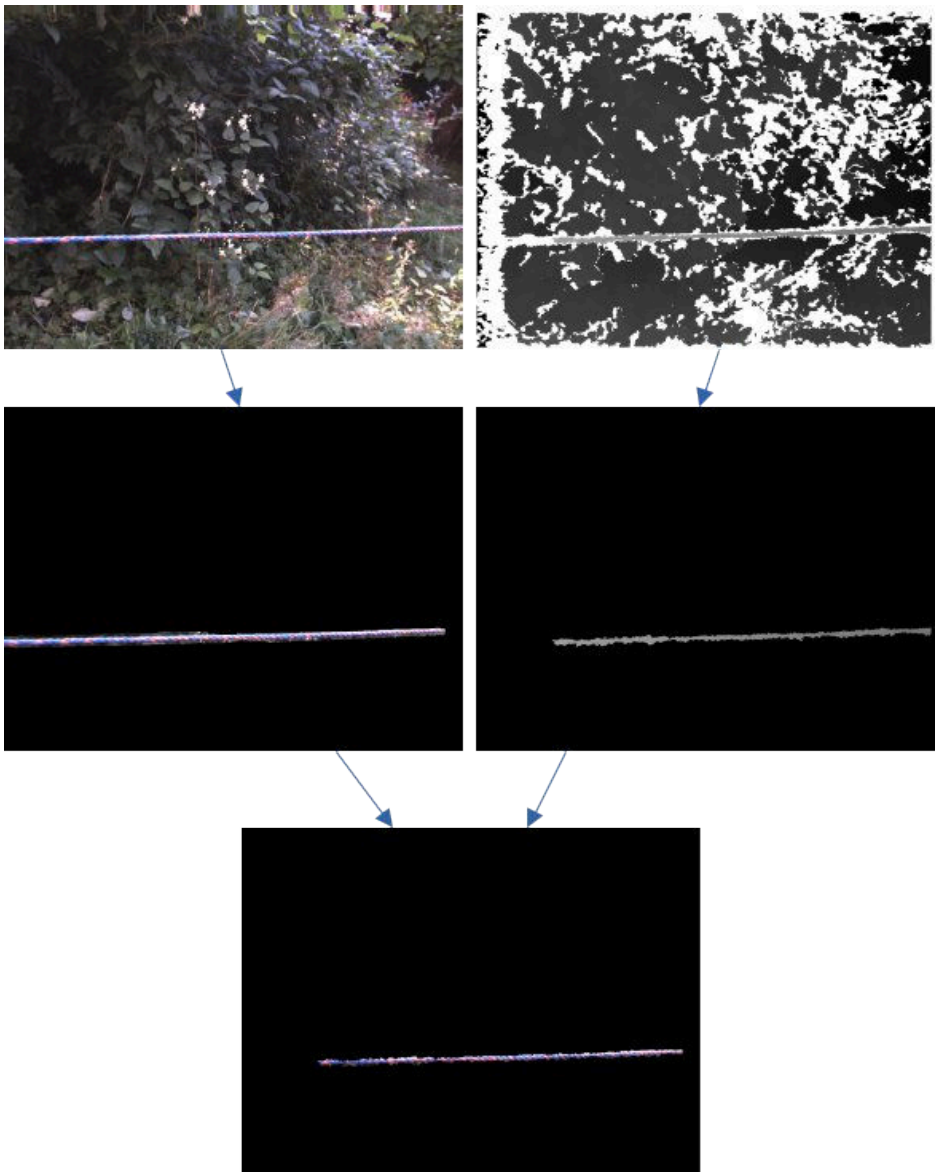

Abbildung 5: Erster Ansatz für Freistellung und Filtern des Abstands zum Zaun. Aus dem RGB-Bild (Farbbild oben links) und der Depth-Map (Graustufenbild oben rechts) werden Masken erzeugt (mittlere Reihe). Durch Kombination beider Masken lassen sich Regionen extrahieren, die Tiefeninformation zum Zaun enthalten (unten; zur Verdeutlichung und Erfolgskontrolle wurde die kombinierte Maske hier auf das RGB-Bild und nicht die Depth-Map angewendet).

Um aus den Depth-Maps der Stereokamera den Abstand zum Zaun (und nicht zur Umgebung) heraus zu filtern, wurde zunächst ein einfacherer Ansatz allein mit CV-Techniken entwickelt, ohne DeepLearning. Für dieses Verfahren wird sowohl das RGB-Bild als auch die zugehörige Depth-Map in OpenCV eingelesen. Über mehrere Zwischenschritte wird aus dem RGB-Bild zunächst eine Maske erzeugt, die den Zaun freistellt, wie in Abbildung 5 gezeigt.

Es wurden mehrere tausend Aufnahmen der drei Proben bei wechselnden Lichtverhältnissen, verschiedenen Hintergründen und mit unterschiedlichen Kamerapositionen gemacht. Weil die Roboter-Plattform entsprechend des Arbeitsplans zu diesem Zeitpunkt noch nicht existierte, wurde die Stereokamera für die Aufnahmen auf einem Kamerawagen montiert, der manuell in der vorgesehenen Arbeitsdistanz des Roboters von ca. 50-80cm am Zaun entlang bewegt wurde. Abbildung 6 zeigt den Kamerawagen mit Stereokamera und Laptop im Einsatz am Zaun.

Abbildung 6: Kamerawagen mit Kamera, Stativ, Batterie und Laptop auf dem Versuchsgelände "Am Sande".

Die so erstellten Aufnahmen wurden entsprechend dem Schema in Abbildung 5 verarbeitet. Dabei wurden Parameter der Auswertung sukzessive angepasst, um das Ergebnis der Freistellung zu optimieren. In Abstimmung der Projektpartner wurde schließlich das blau-rote Leitermaterial in 8,2mm mit unregelmäßigem Muster zur weiteren Verwendung im Projekt ausgewählt. Die Festlegung auf dieses Material trägt dazu bei, solide Ergebnisse im SmartFence-Projekt zu gewährleisten. Es erscheint perspektivisch jedoch möglich, auch dünneres Leitermaterial zu nutzen, das einen geringeren Querschnitt und/oder andere Farbgebung aufweist. **Mit der Anfertigung von mehreren hundert Metern dieses Materials und der Bereitstellung von mobilen Zaunpfosten wurde AP 2 erfolgreich abgeschlossen.**

Neben der Stereokamera, Bildverarbeitung und Festlegung eines CV-optimierten Zaunmaterials wurden Verfahren zur Beseitigung von Bewuchs im Zaun verglichen. Wie im Antrag beschrieben, hängt die Wahl des Verfahrens zur Bewuchsentfernung wesentlich von dem erst in der

Projektlaufzeit festgelegten Zaunmaterial ab. Außer rotierenden und linearen Mähwerken wurde zunächst auch ein mikrowellenbasiertes Verfahren in Betracht gezogen.

Der Vorteil von Mikrowellen zur Vegetationsbekämpfung liegt darin, dass das Verfahren kontaktlos funktioniert, keine beweglichen Teile benötigt, die sich im Zaun verfangen und ihn beschädigen können und dass es einen geringen bis moderatem Energiebedarf aufweist. Dieser Ansatz wurde jedoch nach Rücksprache mit Experten aufgrund praktisch kaum lösbarer erheblicher Sicherheitsprobleme verworfen, da Mikrowellen vom Boden reflektiert werden und noch über mehrere Meter schwere Gewebeschädigungen z.B. an der Netzhaut verursachen können. Außerdem können sie Mobilfunknetze massiv stören. Die mit mehreren hundert Watt erhebliche Leistung eines typischen Magnetrons lässt sich im Freiland an einem Zaun kaum abschirmen. Andere thermische Verfahren wie Heißschaum und Dampf wurden wegen des für einen mobilen Roboter sehr hohen Energiebedarfs und der langen Vorlaufzeit zum Aufheizen verworfen.

Abbildung 7: Der 4-Faden Mähkopf mit 4mm Fäden (oben), grobes Schnittbild der abgemähten Miscanthus-Stangen (unten).

Die Auswahl der Verfahren zum Entfernen von Bewuchs wurde damit auf Freischneider und Mähbalken eingegrenzt. Erste Versuche zur Belastbarkeit von Mähfäden zeigten, dass ein

Mähkopf mit 4 Fäden von 4mm Stärke die Anforderungen an eine angepasste Mähtechnik für autonome Zaunroboter hinsichtlich des Mähergebnisses erfüllen kann (Abbildung 7). Dazu wurden testweise Miscanthus-Stangen von ca. 10mm Durchmesser (um auch den Extremfall von sehr „groben“ Hindernissen wie beispielsweise Brombeerranken, Disteln und Ampfer abzubilden) gemäht und der durchschnittliche Verschleiß der Fäden gemessen. Bei vier Fäden von 4mm lag die durchschnittliche Abnutzung an jedem Faden nach 20 Stangen bei 0,26mm/Stange. Dünnere Fäden von 2,4mm Durchmesser konnten die Miscanthus-Stangen ebenfalls noch abtrennen, verschlissen mit 5,12mm/Stange nach 13 Stangen allerdings sehr viel schneller.

Hinsichtlich Arbeitspaket 7 (Rover) wurde im ersten Ansatz zunächst eine Plattform mit Vierrad-Antrieb und Differentiallenkung konstruiert und hergestellt. Als Antriebe wurden zwei Gleichstrommotoren mit Schneckengetriebe eingesetzt. Die Motoren verfügen jeweils über eine Nennleistung von 230W bei 24V und werden über einen Roboteq MDC 2460 Motorcontroller angesteuert. Die Motoren haben magnetische Encoder. Als Energiequelle wurden Lithium-Eisenphosphat (LiFePO4) Akkus genutzt. Die Programmierung und Steuerung der Plattform wurde über das Robotik-Framework „ROS noetic“ unter ubuntu 20.04 umgesetzt. Abbildung 8 zeigt diese erste Version des Rover mit vier angetriebenen Rädern am Zaun.

Abbildung 8: Erste Ausführung des SmartFence Rover mit vier Rädern und aufgebauter Stereokamera neben einem Zaun.Wiederholte Beschädigungen beim Wenden auf Grünland machten eine Veränderung des Antriebskonzepts notwendig. Manuelle Bedienung über Fernsteuerung (liegt auf dem Akku).

Beim ersten Test der fertig aufgebauten Plattform kam es zu einer Beschädigung eines Antriebs, die vom Hersteller auf Gewährleistung behoben wurde. Weitere Tests der Plattform im Labor und auf befestigten Flächen verliefen nach der Reparatur zunächst zufriedenstellend. Weitere Tests

auf der Wiese offenbarten jedoch, dass der Roboter hier kaum auf der Stelle wenden konnte, bzw. führte dieses Manöver schließlich zur erneuten Beschädigung der Antriebe.

Um weitere Beschädigungen zu vermeiden, wurde das Antriebskonzept geändert. Es kommen nur noch zwei angetriebene Räder und ein (passives) Stützrad zum Einsatz. Die angetriebenen Räder können frei abrollen und müssen zum Wenden keinen Schlupf erzeugen. Abbildung 9 zeigt die geänderte Plattform in einem frühen Zustand. Das neue Konzept wurde sowohl auf befestigten Flächen, als auch auf Grünlandflächen getestet und die Plattform nach Bedarf angepasst und verändert. Mögliche Verbesserungen bei der Weiterentwicklung zur Marktreife betreffen beispielsweise den Einsatz von stärkeren Motoren für eine bessere Steigfähigkeit, andere Bereifung für mehr Traktion und höhere Kippstabilität, sowie angepasste Akkus.

Abbildung 9: Rover mit neuem Antriebskonzept mit aufgebauter Stereokamera. Die Plattform verfügt nun über zwei angetriebene Vorderräder und ein nachlaufendes Stützrad und ist außerdem kompakter geworden. Unter dem abnehmbaren Deckel sind Akku und Elektronik gut geschützt, das Laptop als Hauptrechner ist zur besseren Erreichbarkeit noch von außen am Deckel befestigt.

Damit der Roboter am Zaun entlang navigieren kann, muss er seinen Abstand zum Zaun erkennen. Bei umfangreicheren Tests des oben beschriebenen Verfahrens zum Freistellen des Zauns und Filtern der Abstandsmessungen zeigte sich jedoch, dass die Freistellung des Zauns nicht immer zuverlässig funktionierte. Insbesondere Bilder mit hohem Dynamikumfang stellten eine Herausforderung dar, weil der Zaun dann nicht wie gewünscht belichtet wurde und die Freistellung in Folge scheiterte. Um diesem Problem zu begegnen, wurde auf das leistungsfähigere Verfahren „SemanticSegmentation“ umgestellt. Das Verfahren nutzt Deep Learning, um semantisch sinnvolle Bereiche in Bildern zu segmentieren, hier „Leitermaterial“, „Pfosten“ und „Hintergrund“.

Weil es sich bei Semantic Segmentation um ein Verfahren des überwachten Lernens (supervised learning) handelt, wird zum Trainieren des Modells zusätzlich zu den Bildern, die segmentiert werden sollen, auch die semantische Information zu jedem Bild benötigt, die sogenannte ‚annotation map', also eine pixel-genaue „Karte", die jedem Pixel eine semantische Klasse zuweist. Es wurden 3 Klassen festgelegt: Leitermaterial, Pfosten und Hintergrund. Abbildung 10 zeigt beispielhaft ein Farbbild der Stereo-Kamera und die zugehörige annotation map. Ein Datensatz mit 469 Bildern wurde erstellt, bei dem jedes Bild für das Training des DeepLearning Modells auf Pixelebene annotiert wurde.

Abbildung 10: Links das RGB-Bild der Stereokamera mit Zaunpfosten, Leitermaterial und Hintergrund. Rechts die zugehörige annotation map mit den 3 Klassen: Pfosten in gelb, Leiter in rot und Hintergrund in schwarz.

Zur Erzeugung und Evaluierung der DeepLearning-Modelle wurde „PyTorch" genutzt. PyTorch ist ein offenes Framework für Maschinelles Lernen, das gerade im Bereich DeepLearning verschiedene Implementierungen moderner Netzwerkarchitekturen fertig nutzbar zur Verfügung stellt und die Implementierung anderer Architekturen erleichtert, auch durch umfangreiche Dokumentation und entsprechende frei verfügbare Anleitungen anderer Entwickler.

Von PyTorch direkt zur Verfügung gestellte Modelle für SemanticSegmentation sind „DeepLabV3" (mit MobileNetV3-Large, ResNet-50 oder ResNet-101 als Backbone), „FCN" (mit ResNet-50 oder ResNet-101 als Backbone) und „LRASPP" (mit MobileNetV3-Large als Backbone). Die Modelle unterscheiden sich hinsichtlich Genauigkeit und Geschwindigkeit bzw. Anforderungen an die Rechenleistung sowohl beim Training als auch bei der Inferenz.

Eine hohe Bildrate bei der Inferenz ist wichtig, damit der aktuelle Abstand zum Zaun in möglichst kurzen Abständen gemessen und ggf. korrigiert werden kann. Die Bildrate hängt jedoch auch von der Leistungsfähigkeit des Rechners ab. Zunächst wurde die Bildrate bei der Inferenz auf einem „NVIDIA Jetson nano" (Developer Kit) getestet, der einfachsten und preiswertesten Ausführung der NVIDIA Jetson Reihe. Die Bildrate bei der Inferenz lag hier mit allen erprobten DeepLearning-Modellen im niedrigen einstelligen Bereich (<4 FPS).

Um ein robustes und leistungsfähiges System zu entwickeln und weitere Verzögerungen zu vermeiden, wurde im weiteren Verlauf der „NVIDIA Jetson AGX Orin“ (64GB Developer Kit) als Rechner für das Bildverarbeitungssystem und gleichzeitig als Hauptrechner für den Roboter ausgewählt. Lediglich das Modell „LRASPP“ konnte die Bildrate der Kamera (15 FPS) in Echtzeit verarbeiten. Dieses Modell wurde für die weitere Verwendung im Projekt festgelegt.

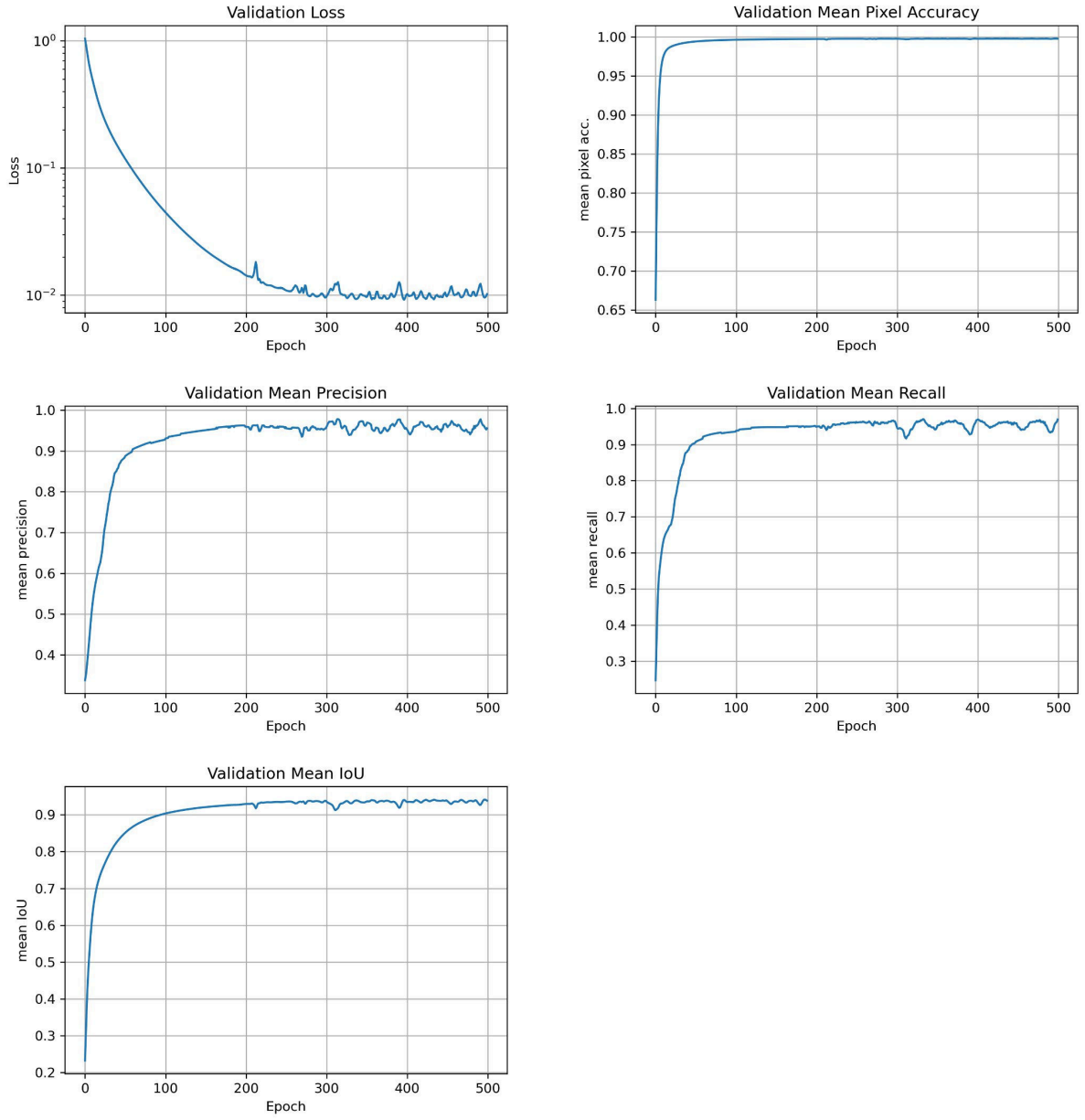

Abbildung 11: Relevante Metriken aus der Validierung während des Trainings des SemanticSegmentation Modells “LRASPP” zur Freistellung des Zauns.

Der Datensatz wurde im Verhältnis 75/25 in Training und Validierung aufgeteilt. Das Training wurde über 500 Epochen durchgeführt, also der gesamte Datensatz 500 Mal durchgearbeitet und das Modell mittels Gradient Descent optimiert. Die relevanten Metriken Cross Entropy Loss (Loss; Fehler zwischen vorhergesagten und wahren Werten), Mean Pixel Accuracy (mPA; Anteil der korrekt einer Klasse zugeordneten Pixel), Mean Precision (mP; Verhältnis von wahr Positiven zu allen wahr oder falsch Positiven Pixeln jeder Klasse), Mean Recall (mR; Verhältnis von wahr

Positiven zu wahr Positiven und falsch Negativen) und Mean Intersection over Union (mIoU; Verhältnis der wahr Positiven zur Summer der wahr Positiven, falsch Positiven und falsch Negativen) aus der Validierung sind in ihrem Verlauf während des Trainings in Abbildung 11 dargestellt.

Das Loss nimmt zunächst ab, während mPA, mP, mR und mIoU ansteigen. Ungefähr bei Epoche 300 beginnen die Metriken um ein stabiles Niveau zu oszillieren. Der Grund ist „over fitting“: die Güte des Modells steigt ab hier durch weiteres Training nicht mehr, sondern das Modell passt sich nur besser an die Trainingsdaten an.

Da eine zuverlässige (sensitive) Erkennung des Zauns für die Navigation wichtig ist, wurden zur Wahl des besten Modells die Gewichte des Modells mit dem höchsten Mean Recall im Bereich bis Epoche 300 ausgewählt, in diesem Fall vom Modell aus Epoche 295. Mit diesen Gewichten liegt das Modell bei einer Mean Pixel Accuracy von 0.99751, einer Mean Precision von 0.95399, einem Mean Recall von 0.96675 und einer Mean IoU von 0.93394.

Es konnte gezeigt werden, dass das entwickelte Stereo-Kamera-System einem autonomen Agrarroboter die Erkennung und Abstandsmessung zur Navigation am Zaun unter verschiedenen Lichtverhältnissen ermöglicht. **AP 4 wurde damit erfolgreich abgeschlossen.** Perspektivisch ist in der weiteren Entwicklung zur Marktreife zu prüfen, wie weit die Bildrate durch entsprechende Optimierung der Modelle auch mit kostengünstigeren Varianten der NVIDIA Jetson Serie, bspw. „Jetson AGX Xavier“, „Jetson Orin nano“ etc., mindestens auf die Bildrate der Kamera angehoben werden kann.

Hinsichtlich Arbeitspaket 6 (Manipulator/Mähtechnik) wurde im ersten Schritt mit der Entwicklung eines Freischneider-Mäharms begonnen, der mit zwei Mähköpfen bestückt ist, die an zwei Punkten drehbar gelagert sind und so um Zaunpfosten „herum greifen“ können um diese sauber auszumähen. Der Roboter fährt dazu im vorgesehenen Abstand von ca. 60-80 cm am Zaun entlang. Abbildung 12 zeigt das Mähwerk. Eine druckentlastete Parallelführung ermöglicht die Anpassung an das Gelände.

Trifft das Mähwerk auf einen Zaunpfosten, schwenkt das Mähwerk durch den Widerstand des Pfostens aus, sodass der Pfosten mittig zwischen die Mähköpfe rutscht und von diesen umgriffen wird. Während der Roboter weiter fährt, schwenkt der Arm weiter aus. Das Mähwerk dreht sich dabei weiter um den Pfosten und mäht einmal komplett um den Pfosten herum. Wenn der Roboter am Pfosten vorbei gefahren ist, hat sich das Mähwerk soweit gedreht, dass der Pfosten freigegeben wird und wieder zwischen den Mähköpfen heraus gleitet. Der Mäharm schwenkt schließlich in die ursprüngliche seitliche Arbeitsposition zurück.

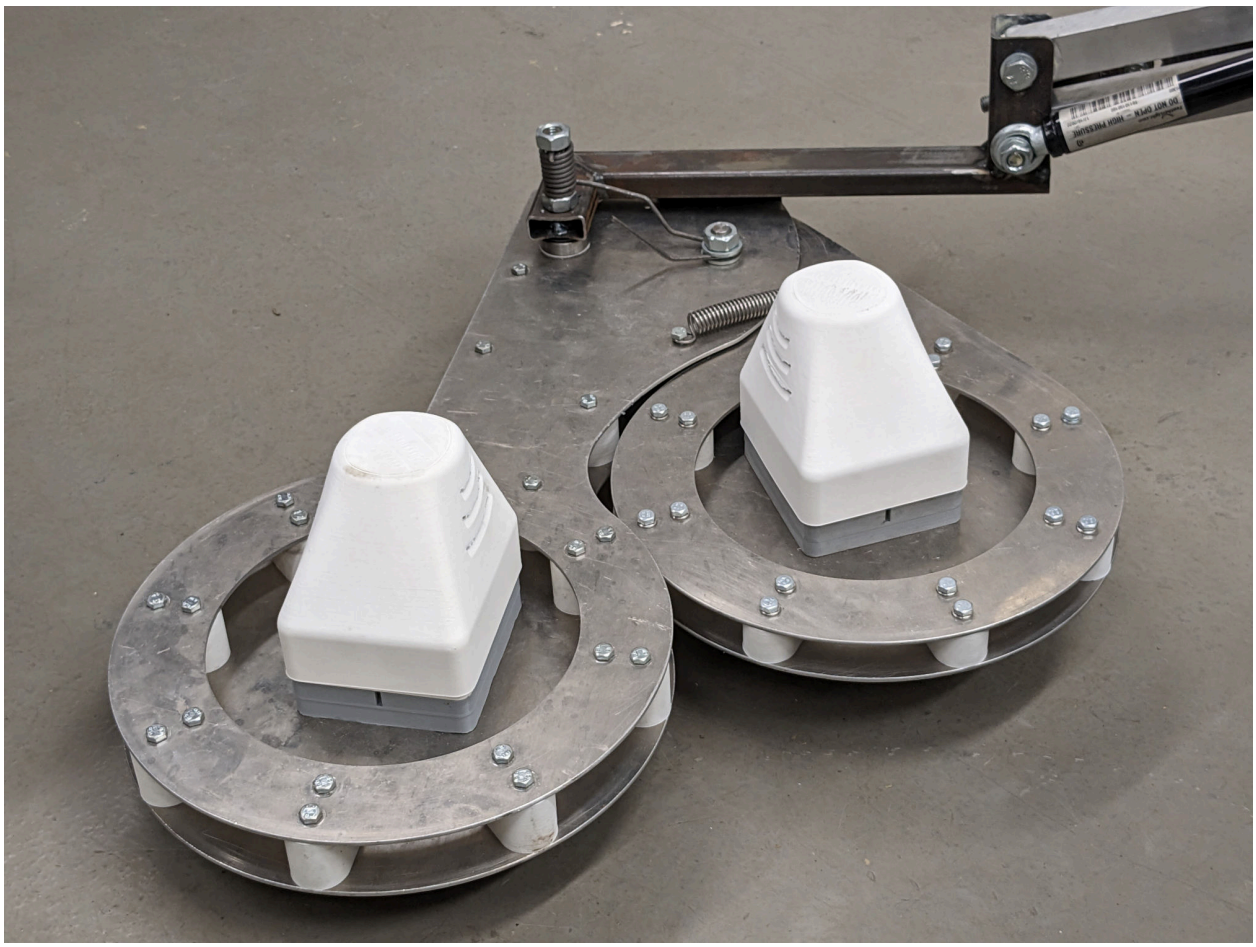

Abbildung 12: Das Doppel-Freischneider-Mähwerk wird seitlich rechts an der Rover-Plattform montiert. Oben rechts im Bild die Parallelführung mit Druckentlastung durch Gasfeder, damit das Mähwerk der Bodenkontur sanft folgen kann. Fahrtrichtung vorne ist im Bild unten.

Mit dem oben beschriebenen Doppelmähwerk kann aufgrund der sehr geringen Höhe des für wolfsabweisende Zäune nötigen Leiters von nur 20cm über Boden und der technisch bedingten Aufbauhöhe des Mähwerks mit Mähkopf, Getrieben, Motoren und Schutzabdeckung nicht unter Wolfsschutzzäunen gearbeitet werden. Auch die Abschirmung des Mähwerks mit Ketten, Tüchern o. ä. zum Auffangen/Bremsen von Steinen etc. entsprechend den Anforderungen der Maschinenrichtlinie 2006/42/EG gestaltete sich schwierig, wenn gleichzeitig möglichst nah bis an die Pfosten heran gemäht werden soll.

Weil für die Reduzierung der Aufbauhöhe und für die Abschirmung keine zufriedenstellende Lösung gefunden werden konnte, die hinsichtlich einer möglichen Weiterentwicklung zur Marktreife Aussichten auf eine erfolgreiche Zulassung für einen autonomen Roboter hätte, wurde stattdessen mit der Auslegung und Konstruktion eines Mähwerks auf Basis eines Balkenmähers ein alternatives Verfahren gewählt. Ein Balkenmäher baut grundsätzlich flacher auf, was den Einsatz an wolfsabweisenden Zäunen erleichtert. Weil lineare Mähtechnik anders als rotatorische Mähwerke keine Steine, Stöcke etc. aufwirbelt und umher schleudert, ist der Gefahrenbereich auch erheblich kleiner und es sind keine Tücher o.ä. zur Abschirmung notwendig. Außerdem ist der Energiebedarf eines solchen Mähwerks gering, was ebenfalls für den Einsatz an einem mobilen Roboter vorteilhaft ist.

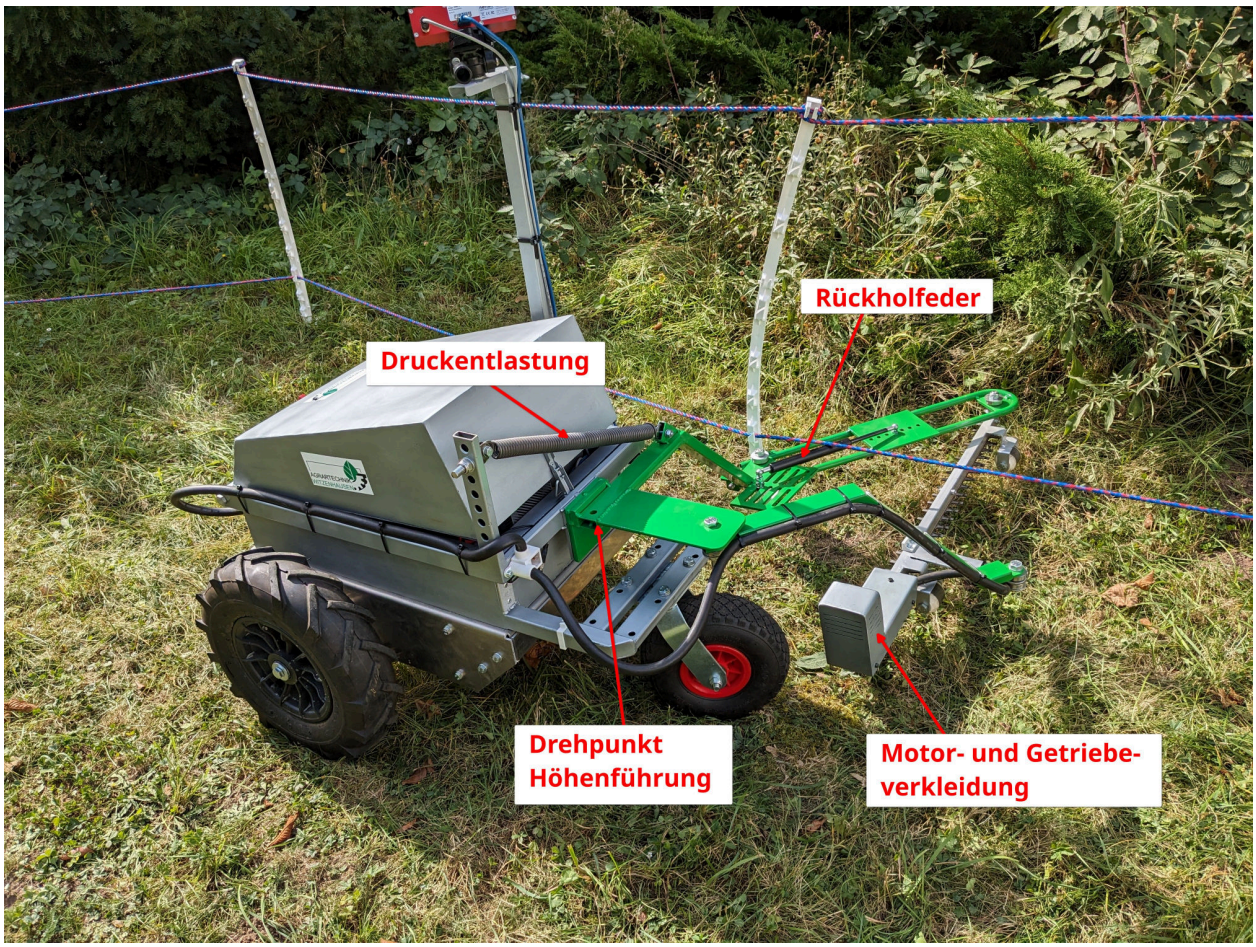

Abbildung 13: Funktionsmuster des SmartFence Rovers mäht autonom am Zaun. Der U-förmige Anfahrbügel schwenkt das Mähwerk bei Kontakt mit Zaunpfosten rechtwinklig zur Fahrtrichtung nach hinten weg. Es sind noch störende Ecken und Kanten vorhanden, mit denen der Roboter an Pfosten hängen bleiben kann – der betroffene Zaunpfosten biegt sich, der Zaun bleibt jedoch stabil, weil sich die Pfosten gegenseitig stützen.

Da Balkenmäher nur in einer Richtung sauber arbeiten können, musste ein Mechanismus entwickelt werden, der dem Mähwerk bei gleichzeitiger Anpassung an das Geländeniveau in jeder Stellung das Einklappen orthogonal zur Fahrtrichtung ermöglicht. In der Entwicklung und Erprobung wurde mit einem Anfahrbügel und einem Gasdruckdämpfer ein passiver Rückholmechanismus realisiert, der das Mähwerk seitlich neben dem Roboter hält, bei Kontakt mit Pfosten das Mähwerk rechtwinklig zur Fahrtrichtung weg klappt, und das Mähwerk sanft wieder ausklappt, sobald es am Hindernis vorbei ist. Eine Zugfeder sorgt als Druckentlastung dafür, dass auch dieses Mähwerk auch unter dem Zaun der Bodenkontur folgt (Abbildung 13). Im Rahmen des Projekts wurde das Schneidwerk einer Heckenschere benutzt, um die Funktion zu demonstrieren. Dieses ist jedoch nicht für Grasschnitt optimiert und erlaubt deshalb selbst bei geringem Bewuchs nur eine sehr langsame Mähgeschwindigkeit von ca. 500 - 700 m/h.

Es konnte gezeigt werden, dass sich dieses Mähwerk für die Bekämpfung von Bewuchs mit einem kleinen autonomen Roboter eignet, sogar bei wolfsabweisenden Zäunen, deren unterster Leiter auf nur 20cm über Boden verläuft. Ebenso konnte gezeigt werden, dass der SmartFence Rover mit dem oben beschriebenen Stereo-Kamera-System und dem Verfahren zur Abstandsmessung zum Zaun in der Lage ist, autonom am Zaun entlang zu fahren und

einwachsende Vegetation zu bekämpfen. **Die Arbeitspakete 6 und 7 konnten damit erfolgreich abgeschlossen werden.**

Arbeitspaket 8 (Simulation für den Rover) war wie im Antrag beschrieben ausschließlich als Hilfsmittel für die Entwicklung gedacht. Die ebenfalls im Antrag bereits angesprochene Komplexität der vielseitigen physikalischen Wechselwirkungen zwischen den Systemen und Baugruppen des Roboters untereinander und mit der Umgebung hätten eine auch nur halbwegs wirklichkeitsgetreue Simulation unverhältnismäßig aufwendig gemacht. Stattdessen wurden alle Entwicklungsarbeiten, Tests und Optimierungen direkt mit dem physischen Roboter durchgeführt. **AP 8 erwies sich damit als nicht hilfreich, sodass nach anfänglichen Bemühungen die Arbeiten in dieser Richtung eingestellt wurden.**

Der Roboter soll jedoch nicht nur einwachsende Vegetation beseitigen, sondern zu Kontroll- und Dokumentationszwecken auch den Zustand des Zauns anhand von Bildern selbstständig beurteilen können. Dazu wurden in Abstimmung mit dem Projektpartner mögliche Fehlerbilder identifiziert. Dabei zeigte sich, dass häufig auftretende und dringend zu behebende Störungen oft auf zwei visuell gut erkennbare und mit Mobilzäunen auch gut herstellbare Fehlerbilder hinauslaufen: 1.) stark durchhängende bis am Boden liegender Leiter, 2.) stark schief stehende Pfosten. Perspektivisch soll auch die optische Erkennung anderer Fehler realisiert werden. Der benötigte Arbeitsaufwand ist jedoch hoch, sodass sich im Rahmen des Projekts zunächst auf diese beiden Störungen konzentriert wurde.

Es wurden Aufnahmen von Zaun in unterschiedlichem Zustand vor unterschiedlichen Hintergründen und bei wechselnden Lichtverhältnissen aufgenommen. Dabei wurden drei Zustände erzeugt: 1.) ordnungsgemäßer Zustand, 2.) durchhängender Leiter, 3.) schiefe Zaunpfosten. Der Zaun wurde vor wechselnden Kulissen aufgebaut, die sowohl Grünland und Acker, als auch Baumbestand und Gebäude in unterschiedlicher Nähe zum Zaun enthalten. Die Aufnahmen wurden tagsüber bei wechselnden Lichtverhältnissen angefertigt, sodass Aufnahmen bei direkter Sonneneinstrahlung und dadurch kurzer Belichtungszeit ebenso enthalten sind wie Aufnahmen bei Bewölkung und in der frühen Abenddämmerung mit vergleichsweise langer Belichtungszeit und daraus resultierender Bewegungsunschärfe.

Es zeigte sich, dass die korrekte Bewertung des Zaunzustands allein anhand von Bildern für einen menschlichen Betrachter am einfachsten und deutlichsten in der Nähe der Zaunpfosten erkennbar ist. Bei der Erzeugung des Datensatzes wurde sich deshalb auf die Bereiche in unmittelbarer Nähe der Zaunpfosten beschränkt und nur hier das jeweiligen label eingezeichnet. Auf diese Weise wurden aus 20 Kulissen mit Zaun in den genannten Zuständen insgesamt 900 Bilder gesammelt und mit den entsprechenden labels versehen, also die „bounding boxes“ um die sichtbaren Störungen eingezeichnet. Der Datensatz wurde im Verhältnis 80/20 in Trainings- und Validierungsdaten aufgeteilt.

Um möglichst robuste Ergebnisse zu erzielen, wurden die beiden Störungen „durchhängender Leiter“ und „schiefe Zaunpfosten“ hierbei zu einer einzigen Klasse „Defect“ zusammengefasst, die Klasse für ordnungsgemäßen Zustand wurde als „No_Defect“ bezeichnet. Diese Vorgehensweise erscheint hinsichtlich einer späteren Weiterentwicklung zur Marktreife sinnvoll, weil es für Tierhalter vor allem wichtig ist zu wissen, dass am Zaun überhaupt eine Störung erkannt wurde und weniger die genaue Art der Störung mitgeteilt zu bekommen. Durch Übertragung der Bilder der erkannten Störung über mobile Datennetze können Anwender des Systems in Zukunft sehen, welche Art von Störung vorliegt und wie darauf zu reagieren ist.

Für die Erzeugung von Detektionsmodellen zur Erkennung von Störungen wurde das bewährte DeepLearning Framework „YOLOv6“ genutzt. YOLO (*„You Only Look Once“*) ist ein modernes einstufiges Objekterkennungsmodell, bzw. eine Sammlung von Modellen und Hilfswerkzeugen für unterschiedliche Anwendungen. Um Ressourcen für die ebenfalls DeepLearning basierte Navigation am Zaun, sowie auch für das übrige Betriebsprogramm des Roboters zu schonen, wurden die beiden Detektionsmodelle „YOLOv6-N6“ und „YOLOv6-S6“ untersucht. Beide sind sogenannte „P6“-Modelle, die für größere Bilder von ca. 1280x1280 Pixeln ausgelegt sind. YOLOv6-N6 und YOLOv6-S6 haben nur rund 10.4 bzw. 41.4 Millionen Parameter und sind damit die schnellsten der P6-Modelle, wie auch die offiziellen Benchmarks zeigen [https://github.com/meituan/YOLOv6].

Beide Modelle wurden über 400 Epochen trainiert und der jeweils beste „checkpoint“ (Modell mit angepassten Gewichtungen der jeweiligen Epoche) entsprechend der YOLO-internen Evaluierung ausgewählt und verglichen. Die Ergebnisse der relevanten Metriken „Average Precision“ (AP; sowohl für IoU Wertebereich von 0.5-0.95, als auch für Schwellenwert 0.5), „Average Recall“ (AR) und „Average Inference Time“ (AIT) sind in Tabelle 1 dargestellt.

Tabelle 1: Performance Metriken der Modelle YOLOv6-N6 und YOLOv6-S6 im Vergleich.

Model	**Average Precision** @IoU=0.50:0.95	**Average Precision** @IoU=0.50	**Average Recall** @IoU=0.50:0.95, max. Detections=10	**Average Inference Time** [ms]
YOLOv6-N6	0.589	0.951	0.671	9.73
YOLOv6-S6	0.596	0.952	0.659	25.19

Wie in Tabelle 1 dargestellt, unterscheiden sich die beiden untersuchten Modelle hinsichtlich der Metriken AP und AR nur geringfügig; die durchschnittliche Inferenzzeit ist jedoch mit 9.73ms bei YOLOv6-N6 deutlich schneller als die 25.19ms bei YOLOv6-S6. Weil das größere Modell YOLOv6-S6 mit dem untersuchten Datensatz nur marginal bessere Resultate erzielt, dafür aber fast dreimal so viel Rechenzeit benötigt, erscheint das einfachere und schnellere Modell YOLOv6-N6 für die Erkennung von Störungen am besten geeignet für die Verwendung im Projekt.

Bei der visuellen Untersuchung der erkannten, bzw. nicht erkannten Störungen fällt auf, dass die Erkennbarkeit einer Störung mitunter stark vom Blickwinkel abhängig ist. So können

beispielsweise Zaunpfosten, die in der Blickachse auf die Kamera zu oder davon weg geneigt sind, kaum von gerade stehenden Pfosten unterschieden werden. Auch bei Störungen, die im Bild weiter entfernt sind, ist für menschliche Betrachter mitunter nicht deutlich erkennbar, ob eine Störung vorliegt oder nicht. Das Problem ist beispielhaft in Abbildung 14 dargestellt.

Abbildung 14: Die Erkennbarkeit von Störungen ist abhängig vom Blickwinkel. Der umgedrückte Pfosten vorne rechts wurde korrekt erkannt. Der weitgehend in Sichtachse umgedrückte Pfosten hinten links wurde nicht erkannt und ist auch für einen menschlichen Betrachter aus diesem Blickwinkel nicht eindeutig.Verwendetes Modell: YOLOv6-N6.

Da der Roboter während der Fahrt jedoch mehrere Aufnahmen von jedem Pfosten aus verschiedenen Blickwinkeln macht, werden Defekte überwiegend erkannt, obgleich nicht in jeder Aufnahme. Auch die Wahrnehmung und exakte Abgrenzung von „Defekt“ bzw. „Nicht Defekt“ ist mitunter subjektiv verschieden und insofern ein Stück weit willkürlich. Bei einer Weiterentwicklung zur Marktreife besteht hier weiterer Forschungsbedarf.

Es wurde gezeigt, dass Störungen am Zaun mit Hilfe von ComputerVision und DeepLearning automatisiert erkannt werden können, die selbst moderne Zaungeräte prinzipbedingt nicht erkennen können. **AP 5 wurde damit erfolgreich abgeschlossen.**

Hinsichtlich AP 1 (Server mit Interface) und AP 3 (Nachrüstmodul) sollten im Zuge des Projektes IoT Weidezaungeräte und Zaunsensoren geschaffen werden, welche an die firmeneigene Weboberfläche „HIMPS“ anknüpfen, darüber bedient werden können und mit dem Rover kommunizieren. Zuerst war geplant, eine Nutzeroberfläche zu schaffen, in der auf Basis der alten SMS Geräte neue IoT Weidezaungeräte bedient werden konnten, danach sollten smarte Zaunsensoren folgen. Für die Umsetzung der Weboberfläche wurde ein Startup beauftragt, die Konnektivität wurde über einen Zwischenhändler bei Vodafone eingekauft und die Serverinfrastruktur wurde zwischen den Firmen Horizont und dem Startup aufgeteilt. Mit dem

Beginn der Saison 2021 zeigten sich erste Probleme mit der Oberfläche, ebenfalls gab es negative Erfahrungen mit der Netzabdeckung des Dienstleisters.

Von technischer Seite wurden von Horizont zwei verschiedene Leiterplatten entwickelt, welche IoT Grundfunktionen wie z.B. Kommunikation und GPS bereitstellen konnten und per Schnittstelle universell mit anderen Horizont Weidezaungeräten und Elektroniken verbunden werden können. Die Platinen sind in Abbildung 15 dargestellt.

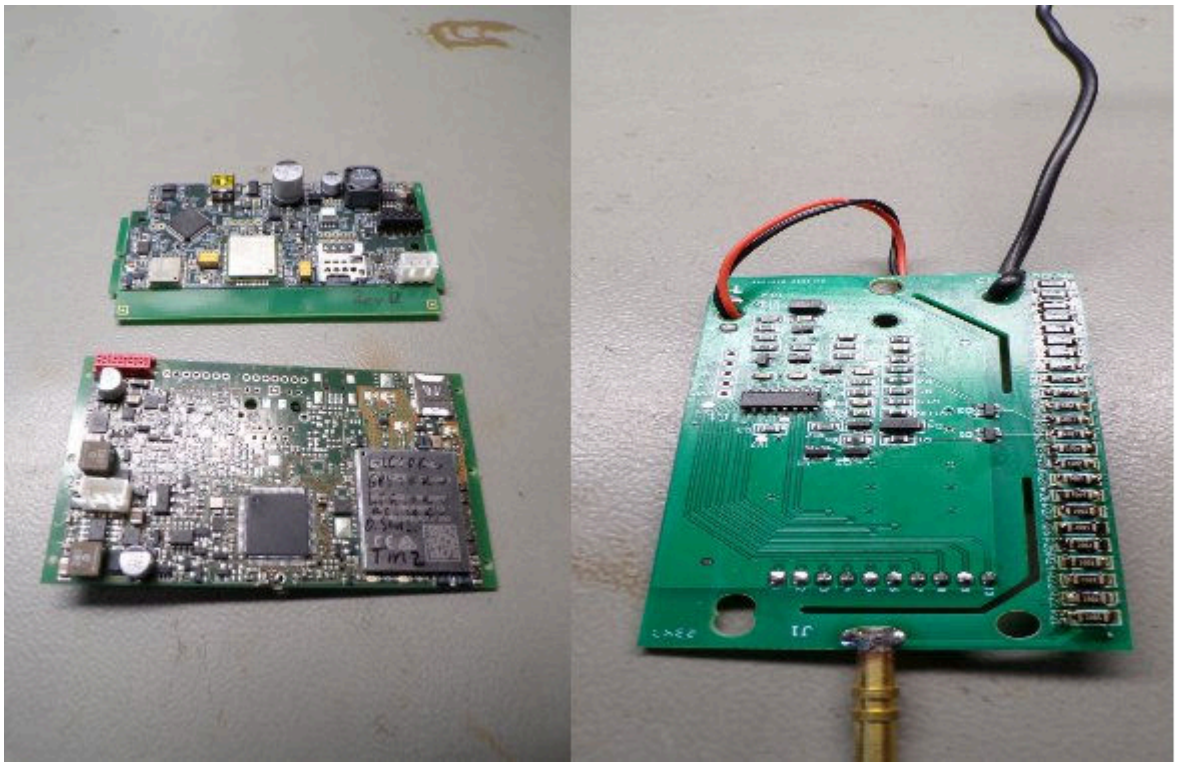

Abbildung 15: Entwickelte Module für Kommunikation und Spannungsmessung (IoT Board links, Spannungsmessmodul rechts).

Eine Messleiterplatte, welche in Verbindung mit der IoT Baugruppe einen Zaunsensor ergeben sollte, wurde in das frühe Prototypenstadium gebracht. Der Zaunsensor sollte sowohl eine Spannungs- als auch eine Strommessung beinhalten. Die Spannungsmessung funktionierte nach der Implementierung einer Korrekturfunktion zufriedenstellend an Prüflasten im Labor. Die Strommessung konnte keine reproduzierbaren Ergebnisse liefern. Mit den entwickelten Leiterplatten können Defekte auch sektionsweise erkannt werden, wenn wie bei Leiterbruch ohne Bodenkontakt unterschiedliche Spannungen in den Sektionen vorliegen.

Im Laufe des Projekts wurden jedoch die Probleme an der bestehenden Himps Oberfläche immer größer, bis schließlich die Server seitens des Startups abgeschaltet und die SIM Karten vom Betreiber deaktiviert wurden. Das Himps System, auf dem auch die in SmartFence entwickelten Komponenten aufbauen sollten, war somit nicht mehr einsatzfähig.

Im Bereich der Verkehrstechnik gibt es bei Horizont ein zweites Telematiksystem mit anderen beteiligten Firmen. Dies ist seitens der Bundesanstalt für Straßenwesen in Deutschland

vorgeschrieben. Dieses seitens der Sparte Verkehrestechnik "HoT 4" genannte System befindet sich im Aufbau. Statt der ursprünglich geplanten Integration der SmartFence Komponenten in das HIMPS System wurde deshalb die Planung zur Integration in das „HoT 4“ System vorangetrieben. Der Systemaufbau dauert allerdings lange, da Teile der Anwendungsbereiche in der Verkehrstechnik sehr komplex sind und unter den Bereich "kritische Infrastruktur" fallen. Die Integration der Komponenten, bzw. die Kommunikation über einen zentralen Server konnte aufgrund der erheblichen unerwarteten technischen Probleme nicht in der Projektlaufzeit realisiert werden. Stattdessen wurden alternative Strategien zur späteren Nutzung der Projektergebnisse durch Anknüpfung an „Hot 4“ verfolgt. **AP 1 (Server mit Interface) konnte daher nicht wie geplant abgeschlossen werden. AP 3 (Nachrüstmodul) wurde erfolgreich abgeschlossen.**

Im Rahmen von Arbeitspaket 9 (Optimierung, Verifizierung und Validierung) wurden die entwickelten Komponenten kontinuierlich einzeln und im Zusammenspiel getestet und verbessert. Zu Beginn wurde viel unter laborartigen Bedingungen gearbeitet, später verlagerten sich die Arbeits- und Testorte zunehmend auf Grünland, also in die spätere Einsatzumgebung. Eine Vielzahl von Fehlern konnten dabei bereits erkannt und behoben werden, an anderen Stellen sind in geplanten Nachfolgeprojekten weitere Arbeiten notwendig. Die Funktion konnte in der Einsatzumgebung nachgewiesen werden. **AP 9 wurde damit erfolgreich abgeschlossen.**

Das Projekt wurde auf den Öko-Feldtagen 2023 bei Stuttgart, auf der Agritechnica 2023 in Hannover, sowie auf dem 1. Echemer Zauntag der LWK Niedersachsen im Juni 2024 einer breiten Öffentlichkeit vorgestellt, sowohl Landwirten/Tierhaltern, als auch Vertretern von Industrie und Behörden. Die vielen Rückmeldungen und das große Interesse an dem System waren überwältigend positiv. Einerseits bringen Tierhalter einen großen Bedarf an einem derartigen System zum Ausdruck, andererseits gibt es angesichts des erfolgreichen Projektverlaufs und der erkennbaren Nachfrage auch reges Interesse seitens der Wirtschaft. Das Projekt „RoboZaun“ befindet sich in der Beantragung über die DIP Agrar, um das System zur Marktreife weiter zu entwickeln. Aspekte des Projekts wurden im Rahmen verschiedener Vorlesungen thematisiert und in die Lehre eingebunden. Eine Dissertation und mehrere Publikationen zu dem Thema sind in Bearbeitung. **Arbeitspaket 10 (Projekt-Management und Öffentlichkeitsarbeit) wurde damit erfolgreich abgeschlossen.**

2.2. Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Den größten Posten stellen hier Personalausgaben dar. Hintergrund ist die Notwendigkeit der Durchführung von Versuchen, Entwurf, Erprobung und iterative Verbesserung von komplexen mechatronischen Systemen einzeln und im Zusammenspiel mit anderen Systemkomponenten und der Umwelt, Herstellung und Aufbereitung von Datensätzen, der Erzeugung und Validierung von modernen DeepLearning-Modellen und anderen algorithmischen Lösungen für verschiedene Funktionen des entwickelten Systems, Kommunikation mit Projektpartner und Förderträger,

sowie der Veröffentlichung und Demonstration der Projektergebnisse. Diese Arbeiten wurden von einem Wissenschaftler und mehreren wissenschaftlichen Hilfskräften durchgeführt.

Weil sich das im Projekt ausgewählte Kamerasystem für die Erkennung und Abstandsmessung mit seilförmigem Leitermaterial als geeignet erwies und entsprechendes Material für weitere Verwendung im Projekt angefertigt werden konnte, reduzierten sich die ursprünglich geplanten Materialkosten für Entwicklung und Testen von aufwändigeren Verfahren zur Regulierung von Bewuchs in anderen Zäunen wie Netzen/Knotengitter etc. entsprechend.

Durch die unvorhergesehene Notwendigkeit der arbeitsintensiven Umstellung auf das DeepLearning basierte Segmentierungsverfahren „SemanticSegmentation“ zur Gewinnung der Abstandsinformation zum Zaun, die wiederholte Beschädigung von Antriebskomponenten und die entsprechende Änderung des Antriebskonzepts, die schlechte Verfügbarkeit und langen Lieferzeiten von Ersatz infolge unterbrochener Lieferketten, sowie durch gestörte Betriebsabläufe infolge der Pandemie kam es zu erheblichen Verzögerungen in der Bearbeitung der Arbeitspakete. Die Projektlaufzeit musste deshalb um sechs Monate verlängert werden, um die Projektziele zu erreichen und das Projekt erfolgreich abzuschließen. Dafür war eine Aufstockung der Personalmittel notwendig; die Sachmittel konnten über den zusätzlichen Zeitraum gestreckt werden.

Die Kostenstruktur ist im zahlenmäßigen Nachweis detailliert aufgeschlüsselt.

2.3. Notwendigkeit und Angemessenheit

Zu Projektbeginn gab es keine Systeme mit vergleichbaren Fähigkeiten wie dem in SmartFence entwickelten System, jedoch bestand und besteht weiterhin sowohl auf Seiten der Landwirtschaft, als auch im Sinne der förderpolitischen Ziele großes Interesse an Lösungen zur Erleichterung und Automatisierung von tier- und umweltgerechten Produktionsverfahren wie der Weidehaltung.

Die hohe Nachfrage von Tierhaltern, wie auch das große Interesse auf Seiten der Industrie drückte sich in vielen Gesprächen bei der Präsentation des Projekts auf Feldtagen und Fachmessen aus und führte zur Beantragung eines Projekts über die DIP Agrar, um das System zur Marktreife weiter zu entwickeln. Die zunehmende Ausbreitung von Wölfen in Deutschland gibt diesem Vorhaben besondere Dringlichkeit. Die Gewährleistung einer robusten, zuverlässigen und sicheren Funktion entsprechend der einschlägigen Normen und Gesetze stellt zur Erreichung der Marktreife eine besondere Herausforderung dar.

2.4. Voraussichtlicher Nutzen

Im Rahmen des Projekts SmartFence konnten wesentliche Vorarbeiten und Lösungsansätze geschaffen werden, um das System in einem weiteren Projekt zur Marktreife weiter zu entwickeln. Die technische Realisierbarkeit konnte in der relevanten Einsatzumgebung nachgewiesen

werden. Auf den Ergebnissen dieses Projekts aufbauend wurde zusammen mit weiteren Partnern aus Wissenschaft und Industrie ein Anschlussprojekt zur Erlangung der Marktreife des Systems beantragt, um darin die weiteren anwendungsbezogenen Problemstellungen bearbeiten und das System auf die Zulassungsprüfungen entsprechend der einschlägigen Normen und Gesetze vorzubereiten.

2.5. Während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Während des Projekts wurden keine Fortschritte auf dem Gebiet Überwachung und Freimähen von Weidezäunen, bzw. überhaupt im Bereich Einsatz von Robotern in der Außenwirtschaft der Tierhaltung bekannt. Allgemein schreitet die Technik gerade in den Bereichen Robotik und KI in hohem Tempo voran und erleichtert insofern auch die Arbeiten in geplanten Anschlussprojekten ein Stück weit. Die bisher gültige „Maschinenrichtlinie“ befindet sich aktuell in der Überarbeitung und soll durch eine neue „Maschinenverordnung“ abgelöst werden, die den sich ändernden Anforderungen der zunehmenden Automatisierung und „Robotisierung“ Rechnung tragen soll. Die konkrete Ausgestaltung ist noch in der Diskussion.

2.6. Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen

Das Projekt wurde auf den Öko-Feldtagen 2023, auf der Agritechnica 2023, sowie auf dem 1. Echemer Zauntag 2024 einem breiten Publikum vorgestellt. Die Vorstellung der Projektergebnisse mit Besuch von Bundeslandwirtschaftsminister Cem Özdemir auf den BLE Innovationstagen im November 2024 ist geplant.

Es wurde eine Masterarbeit mit dem Titel „Anforderungen und Bedürfnisse an einen Weidezaunroboter“ erstellt, in der Anforderungen und Bedürfnisse unterschiedlicher Nutzergruppen an einen Weidezaunroboter qualitativ erfasst und analysiert werden.

Darüber hinaus sind eine Dissertation und drei Publikationen zu den Projektergebnissen in Arbeit.