

Abschlussbericht zum Vorhaben



GRASSLAND MAINTENANCE WITH ROBOT OPERATED LASER WEEDING

- Grünlandpflege mit robotergesteuerter Unkrautbekämpfung -

im Rahmen der Europäischen Innovationspartnerschaft
„Produktivität und Nachhaltigkeit in der Landwirtschaft“ (EIP Agri)

04.02.2026



Mitglieder der Operationellen Gruppe:

Laser Zentrum Hannover e.V. (LZH)

Permarobotics GmbH

Landwirtschaftsbetrieb Friedel Könecke

Landwirtschaftsbetrieb Heinrich Bätke

Administrative Koordinatorin:

Mandy Patzlaff-Günther

Laser Zentrum Hannover e.V. (LZH)

Hollerithallee 8

30419 Hannover

Fachliche Koordinatorin:

Dr. Merve Wollweber

Laser Zentrum Hannover e.V. (LZH)

Hollerithallee 8

30419 Hannover

Gefördert von der Landwirtschaftskammer Niedersachsen – Geschäftsbereich Förderung – und der Europäischen Union aus dem Europäischen Landwirtschaftsfonds für die Entwicklung des ländlichen Raums (ELER)

Registriernummer: 276032010001437

Projektlaufzeit: 29.06.2023 – 15.02.2026



Inhaltsverzeichnis

1	Kurzdarstellung	2
1.1	Ausgangssituation und Bedarf	2
1.2	Projektziel und konkrete Aufgabenstellung	2
1.3	Mitglieder der OG	4
1.4	Projektgebiet	4
1.5	Projektlaufzeit und Dauer	5
1.6	Budget	5
1.7	Ablauf des Verfahrens	6
1.8	Zusammenfassung der Ergebnisse	7
2	Eingehende Darstellung	9
2.1	Verwendung der Zuwendung	9
2.2	Detaillierte Erläuterung der Situation zu Projektbeginn	12
2.2.1	Ausgangssituation	12
2.2.2	Projektaufgabenstellung	13
2.3	Ergebnisse der OG	13
2.4	Ergebnisse des Innovationsprojektes	16
2.4.1	Zielerreichung	16
2.4.2	Abweichungen zwischen Planung und Ergebnis	30
2.4.3	Projektverlauf	31
2.4.4	Beitrag des Ergebnisses zu förderpolitischen EIP-Themen	39
2.4.5	Nebenergebnisse	40
2.5	Nutzen der Ergebnisse für die Praxis	42
2.6	(Geplante) Verwertung und Nutzung der Ergebnisse	44
2.7	Wirtschaftliche und wissenschaftliche Anschlussfähigkeit	44
2.8	Kommunikations- und Disseminationskonzept	45

Kapitel 1

Kurzdarstellung

1.1 Ausgangssituation und Bedarf

Die Urproduktion auf Dauergrünlandflächen ist auf eine effiziente und ökologisch verträgliche Methode zur Bekämpfung von Problemunkräutern angewiesen. Besonders Arten wie das Jakobskreuzkraut erfordern neue Ansätze, da bisherige Verfahren überwiegend manuelle Arbeit voraussetzen und daher wirtschaftlich kaum tragfähig sind vor allem in Schutzgebieten wie Fauna-Flora-Habitat- (FFH-) oder Wasserschutzarealen. Der daraus entstehende Zielkonflikt zwischen ökonomischen Anforderungen und den gesellschaftlich erwünschten Naturschutz- und Förderzielen des Ökolandbaus macht deutlich, wie dringend eine innovative Lösung benötigt wird. Hinzu kommt, dass viele dieser Problemunkräuter giftig oder futterbaulich wertlos sind und damit eine Gefahr für Tierwohl und Futterqualität darstellen.

Um die Tierhaltung sowie die Futtergewinnung ohne den Einsatz chemischer Pflanzenschutzmittel und mit geringerem Arbeitsaufwand konkurrenzfähig zu halten, müssen neue Wege beschritten werden. Das Konzept des Smart Farming bietet hierfür ein erhebliches Innovationspotenzial - insbesondere der Einsatz autonomer Robotik, automatisierter Arbeitsprozesse und präziser, verschleißfreier Werkzeuge zur selektiven Unkrautkontrolle. Ein solches System könnte sowohl die Wirtschaftlichkeit verbessern als auch Ressourcen schonen und damit einen ökologisch nachhaltigen Ansatz bereitstellen. Die geplante Lösung ist dabei bewusst so ausgelegt, dass auch kleinere Betriebe, beispielsweise Familienbetriebe, von ihr profitieren können.

1.2 Projektziel und konkrete Aufgabenstellung

Grünland bildet die zentrale Grundlage für die Futterversorgung von Wiederkäuern und Pferden und ist damit ein essenzieller Baustein der landwirtschaftlichen Tierhaltung. Besonders anspruchsvoll wird die Bewirtschaftung dort, wo gleichzeitig höchste Naturschutzstandards eingehalten werden müssen – ein Spannungsfeld, das sowohl für Landwirte als auch für die Gesellschaft von großer Bedeutung ist. Um den hohen Anforderungen an Tierwohl, Futter-

qualität und Naturschutz gerecht zu werden, sind praxistaugliche Lösungen gefragt, die den Arbeitsaufwand reduzieren, ohne gegen Schutzauflagen zu verstoßen.

Allein in Niedersachsen wurden im Jahr 2021 rund 693.600 Hektar Dauergrünland bewirtschaftet, was etwa 14,7 % des bundesweiten Dauergrünlandbestandes entspricht. In einigen Regionen des Bundeslandes basiert die gesamte landwirtschaftliche Wertschöpfung nahezu ausschließlich auf Grünlandbetrieben. Diese Betriebe sind auf hochwertiges Futter angewiesen und arbeiten gleichzeitig unter strengen naturschutzrechtlichen Rahmenbedingungen – beispielsweise in FFH-Gebieten, Natura-2000-Flächen oder innerhalb spezieller Vogelschutzprogramme. Dort sind nahezu alle Pflegemaßnahmen wie Mähen, Walzen, Striegeln sowie Düngungs- und Pflanzenschutzstrategien zeitlich oder in ihrer Durchführung stark reglementiert, um Flora und Fauna durch extensive Bewirtschaftung zu schützen.

Ein zentrales Problem besteht darin, dass viele dieser Maßnahmen an feste Termine gebunden sind. So darf die erste Mahd häufig erst ab dem 15. Juni durchgeführt werden. Zu diesem Zeitpunkt haben zahlreiche Problemunkräuter jedoch bereits geblüht oder sogar ausgesamt. Das Mähen kann die Verbreitung dieser Arten weiter begünstigen, da die Pflanzen bei der Bearbeitung zusätzlich ausgeschüttelt werden.

Für die Qualität des Grünlandes sowie den Nährwert des Futters spielt der Bewuchs mit sogenannten Problemunkräutern eine entscheidende Rolle. Besonders kritisch sind hier das giftige Jakobskreuzkraut, der Stumpfbültrige Ampfer und die Acker-Kratzdistel. Durch die limitierte Auswahl an zulässigen Bekämpfungsmaßnahmen führen diese Arten in Schutzgebieten zu erheblichen betrieblichen Herausforderungen. Der Einsatz chemischer Pflanzenschutzmittel ist – ähnlich wie im ökologischen Landbau – meist vollständig verboten oder nur in Ausnahmefällen und mit umfangreichen Genehmigungsverfahren möglich.

Ein geplanter autonomer Roboter soll mit hochmodernen, vollständig kontaktlosen Werkzeugen ausgestattet werden, um den bisher enormen Aufwand an manueller Arbeit spürbar zu verringern und langfristig zu ersetzen. Solche autonomen Systeme sind in der Lage, Arbeitsprozesse äußerst zielgerichtet, bedarfsgerecht und mit gleichbleibender Präzision durchzuführen, unabhängig von Witterung, Tageszeit oder personellen Kapazitäten. Dadurch können sie nicht nur die Effizienz steigern, sondern auch eine kontinuierliche und verlässliche Pflege der betroffenen Flächen gewährleisten.

Im Mittelpunkt steht der Einsatz eines Laserwerkzeugs, das zur Wuchssteuerung oder zur gezielten, letalen Schädigung unerwünschter Pflanzen eingesetzt werden soll. Dieses Werkzeug ermöglicht eine selektive Bekämpfung einzelner Pflanzen, ohne das umliegende Ökosystem zu beeinträchtigen. Der Laser kann äußerst präzise dosiert angewendet werden, sodass die Einwirkung genau auf die jeweiligen Problemunkräuter begrenzt bleibt. Dies reduziert das Risiko, wertvolle Begleitflora oder tierische Organismen in der Umgebung zu schädigen.

Darüber hinaus handelt es sich beim Laser um ein verschleißfreies, vollständig kontaktlos arbeitendes Instrument, das keine mechanischen Bauteile benötigt, die Abnutzung oder Beschädigungen ausgesetzt wären. Dadurch verringert sich nicht nur der Wartungsaufwand, sondern

auch die Betriebssicherheit steigt erheblich. In Kombination mit der autonomen Navigation des Roboters stellt dieses System eine innovative, nachhaltige und ressourcenschonende Möglichkeit dar, Problemunkräuter effizient und umweltfreundlich zu kontrollieren.

1.3 Mitglieder der OG

Landwirtschaftsbetriebe F. Könecke und H. Bätke (LW):

Um die Forschungsarbeiten durchführen zu können, stellten Herr Friedel Könecke (30916 Isernhagen FB) und Herr Heinrich Bätke (30916 Isernhagen FB) Testflächen auf ihren landwirtschaftlichen Betrieben (LB) zur Verfügung und führten Beratungs- und Bearbeitungsmaßnahmen durch.

Permarobotics GmbH (PR):

Das Unternehmen Permarobotics GmbH übernahm die Entwicklung der Softwareanbindung des Laserwerkzeugs per RAL an die Trägerplattform permabot sowie die Etablierung der bidirektionalen Kommunikation zwischen Trägerplattform und Laserwerkzeug.

Laser Zentrum Hannover e.V. (LZH):

Das LZH übernahm die übergeordnete Projektkoordination sowie die Entwicklung und Adaption des Laserwerkzeugs. Zudem erfolgten seitens LZH der Testbetrieb, Evaluation und die abschließende technische Bewertung. Des Weiteren wurden Disseminationsaufgaben vom LZH organisiert.

1.4 Projektgebiet

Das Projektgebiet erstreckt sich auf die Stadt Hannover und die nähere Umgebung. Die Abbildung 1 zeigt die geografische Lage der OG-Mitglieder des Projektes in der Region Hannover. Durch die örtliche Nähe der OG-Mitglieder konnten die Reise- und Transportkosten für den Testbetrieb gering gehalten werden. Darüber hinaus war es durch die kurzen Wege leichter möglich, das Laserwerkzeug sowie den Permabot auch bereits während eines Testbetriebszeitraums technisch zu überarbeiten und die Iterationsschritte kurz zu halten, was eine schnellere Optimierung begünstigte.



Abbildung 1: geographische Lage der OG-Mitglieder im Raum Hannover zum Projektbeginn. Als Referenz ist die Landwirtschaftskammer von Hannover eingezeichnet (Quelle: openstreetmap.org).

1.5 Projektlaufzeit und Dauer

Die Projektlaufzeit für das GROW-Vorhaben begann gemäß Zuwendungsbescheid am 29. Juni 2023 und sollte am 15. August 2025 enden. Die vorgesehene Projektdauer betrug 25 Monate und 17 Tage (778 Tage insgesamt).

Auf Antrag der OG-Mitglieder wurde die Projektlaufzeit des GROW-Vorhabens um ein halbes Jahr verlängert. Somit endete das Projekt am 15. Februar 2026. Die Projektdauer betrug 31 Monate und 17 Tage (962 Tage insgesamt).

1.6 Budget

Mit dem Zuwendungsschreiben vom 13.04.2023 betrug die Bewilligungshöhe 403.391,35€. Die Ausgaben gliederten sich in laufende Ausgaben für die Zusammenarbeit der OG und in Ausgaben der OG für die Durchführung des Innovationsprojektes. In der Tabelle 1 ist die Budgetplanung für GROW aufgeführt.

Tabelle 1: Beantragte Projektgelder der einzelnen OG-Mitglieder für die gesamten Projektlaufzeit

	OG-Mitglied	beantragt €
1	Laser Zentrum Hannover e.V. (Koordination)	58.211,25
2	Laser Zentrum Hannover e.V.	256.696,00
3	Landwirtschaftsbetrieb Friedel Könecke	5.343,80
4	Landwirtschaftsbetrieb Heinrich Bätke	5.343,80
5	Permarobotics GmbH	77.796,50
	Gesamt	403.391,35

1.7 Ablauf des Verfahrens

Mit dem Auftakt des Projektes GROW wurden im Jahr 2023 zunächst die agrarspezifischen Anforderungen gemeinsam mit den beteiligten Landwirten definiert. Diese Anforderungen dienten unter anderem dazu, die technischen Möglichkeiten einzugrenzen und somit die betrieblichen Rahmenbedingungen für die spätere Umsetzung des Vorhabens festzulegen. Auf Basis des praktischen Erfahrungswissens der Landwirte, der Erkenntnisse aus vorangegangenen Projekten sowie ergänzender Recherchen konnte eine fundierte Grundlage für das geplante Versuchsvorhaben geschaffen werden.

Die daraus abgeleiteten technischen Anforderungen an das Gesamtsystem wurden in den ersten Projektmonaten ausgearbeitet. Im letzten Quartal 2023 konnte daraufhin mit der Entwicklung des Laserwerkzeugs begonnen werden. Diese Arbeiten umfassten unter anderem konstruktive Tätigkeiten sowie Beschaffungsprozesse für die elektrische und mechanische Ausstattung des Werkzeugs, ebenso wie dessen physische Umsetzung. Die Fertigung der ersten funktionsfähigen Version des Laserwerkzeugs begann im ersten Quartal 2024 und wurde Ende des zweiten Quartals 2024 abgeschlossen, sodass anschließend die Inbetriebnahme des Permabot-Systems inklusive Laserwerkzeug erfolgen konnte.

Nach erfolgreicher Inbetriebnahme des Gesamtsystems, bestehend aus Permabot und Laserwerkzeug, konnten die praktischen Versuchsreihen starten. Versuche fanden zunächst im Zeitraum von September 2024 bis März 2025 statt. Weitere Versuchsdurchläufe wurden im Winter 2025 durchgeführt. Parallel dazu konnte die Künstliche Intelligenz (KI) des Behandlungssystems durch die Integration einer erweiterten Datenbasis weiter optimiert werden.

Zum Abschluss wurden die im Rahmen der Praxisversuche gewonnenen Erkenntnisse systematisch ausgewertet und bewertet.

Das Projekt GROW wurde der Öffentlichkeit vielfältig zugänglich gemacht. So wurde es im Jahr 2025 unter anderem auf den Ökofelddagen sowie auf der Agritechnica präsentiert. Zudem erschien im August 2025 (Ausgabe 33, Titelseite) ein Beitrag in der Fachzeitschrift Land und Forst. Ein eigener Feldtag zur Vorstellung des Projektes wurde zusätzlich im Spätsommer 2025 durchgeführt.

1.8 Zusammenfassung der Ergebnisse

Im Folgenden sind wesentliche Erkenntnisse aus der OG Arbeit zusammengefasst. Eine ausführlichere Darstellung folgt in Abschnitt 2.

Laserwerkzeug: Eine hochauflösende Kamera erweist sich der 3D-Kamera überlegen, da die Tiefenerfassung bei komplexer Boden- und Grasstruktur schwierig ist. Eine mitfahrende Kamera am Achssystem vereinfacht die Hand-Augen-Kalibration erheblich, stellt jedoch höhere Anforderungen in der praktischen Umsetzung dar. Die Kombination aus Achssystem und Spiegel für die Strahlführung ist sinnvoll, da sie kostengünstig und einfach handhabbar ist.

KI Entwicklung: Frühzeitige Datenerfassung für die Unkräuter ist entscheidend, da Datensatzaufbau und Pflege sehr ressourcenintensiv sind. Für komplexe Grünlandstrukturen ist GPU-Unterstützung bei KI generell vom Vorteil. Labeling ist oft schwierig, da Pflanzen verdeckt sein können. Bounding-Box-Ansätze und Keypoints reichten für das Erkennen des Wachstumszentrums nicht aus. Semantische Segmentierung plus klassische Bildverarbeitung lieferten die präzisesten Ergebnisse.

Durchführung von Feldtests: Kurze Wege erleichterten die Versuchsterminplanung. Werkzeug und Permabot sollten kompakt und leicht sein, um Transport per Kastentransporter zu ermöglichen. Geräte vor Ort würden die Versuchsfrequenz deutlich erhöhen und zu aussagekräftigeren Ergebnissen führen.

Laserbehandlung von Jakobskreuzkraut: Das Entwicklungsstadium des Jakobskreuzkrauts (JKK) sowie der genaue Applikationspunkt an der Pflanze stellen entscheidende Einflussfaktoren für den Behandlungserfolg dar, wobei ein geringeres Wuchsstadium der Pflanzen und eine genaue Applikation ins Wuchszentrum mit einem höheren Behandlungserfolg einhergeht. Die Kombination aus einem definierten Strahlungsmuster und einer punktuellen Laserbestrahlung zeigte im Vergleich zur ausschließlich punktuellen Bestrahlung den signifikantesten Effekt auf das Pflanzenwachstum. Trotz einer messbaren Reduktion des Wuchses konnten bislang keine Parameter identifiziert werden, die eine dauerhafte letale Schädigung der Pflanzen bewirken. Insgesamt lässt sich festhalten, dass die laserbasierte Behandlung von Jakobskreuzkraut anspruchsvoll ist und in hohem Maße von der Treffsicherheit sowie dem jeweiligen Wachstumsstadium abhängt. Darüber hinaus sind weitere Einflussgrößen wie der Zeitpunkt der Bestrahlung, die applizierte Energiedosis und das verwendete Behandlungsmuster zu berücksichtigen. Zur fundierten Bewertung dieser Parameter sind weitere experimentelle Untersuchungen erforderlich.

Key findings of GROW are summarized as follows. For more details, please refer to section 2.

Laser Tool: *A high-resolution camera proves to be superior to a 3D camera as depth detection is difficult with complex soil and grass structures. A camera mounted on the axle system greatly simplifies hand-eye calibration, but is more demanding in terms of practical implementation. The combination of an axle system and mirror for beam guidance is useful because it is inexpensive and easy to use.*

AI Development: *Early data collection for weeds is crucial because data set creation and maintenance are very resource-intensive. For complex grassland structures, GPU support for AI is generally advantageous. Labeling is often difficult because plants can be obscured. Bounding box approaches and keypoints were not sufficient for detecting the center of growth. Semantic segmentation plus classic image processing delivered the most accurate results.*

Organisation of Field Trials: *Short distances made it easier to schedule the trials. The tool and Permabot should be compact and lightweight to enable transport by box truck. On-site equipment would significantly increase the frequency of trials and lead to more meaningful results.*

Laser Treatment of Ragwort: *The developmental stage of ragwort and the exact point of application on the plant are decisive factors influencing the success of treatment, with a lower growth stage of the plants and precise application to the growth center being associated with greater treatment success. The combination of a defined radiation pattern and selective laser irradiation showed the most significant effect on plant growth compared to selective irradiation alone. Despite a measurable reduction in growth, no parameters have yet been identified that cause permanent lethal damage to the plants. Overall, it can be concluded that laser-based treatment of ragwort is challenging and depends to a large extent on accuracy and the respective growth stage. In addition, other influencing factors such as the timing of irradiation, the energy dose applied, and the treatment pattern used must be taken into account. Further experimental studies are necessary to evaluate these parameters in a well-founded manner.*

Kapitel 2

Eingehende Darstellung

2.1 Verwendung der Zuwendung

Die Zuwendungen wurden sachgerecht und zielorientiert zur Erreichung der Projektziele eingesetzt. Dabei kam es zu geringfügigen Abweichungen in der Mittelverwendung gegenüber dem ursprünglichen Geschäftsplan, die in den Zwischenberichten erläutert und im zahlenmäßigen Nachweis nachvollziehbar dokumentiert sind.

Die Kosten für die Zusammenarbeit der OG setzten sich, wie vorgesehen, aus Personalausgaben, den Reisekosten für die Anfahrten zu regionalen Feldversuchen, Feldvorführungen und den zweimal jährlich stattgefundenen Projekttreffen sowie der erhobenen Gemeinkostenpauschale zusammen. Zudem wurden seitens der OG Mitglieder LZH und Permarobotics für die Konstruktion und Montage geplante notwendige Sachmittel für den Roboter und das Laserwerkzeug erworben sowie die Zuwendungen für die Öffentlichkeitsarbeit und zur Dissemination der Projektergebnisse eingesetzt. Die veranschlagten Beraterkosten durch pflanzenbaulich wissenschaftliche Projektbegleitung der Landwirtschaftskammer wurden nicht erhoben.

Im Verlauf der Berichtszeiträume von Juli 2023 bis Juni 2025 erfolgten regelmäßige organisatorische, fachliche und administrative Aktivitäten im Rahmen des Projektes, die durch das LZH koordiniert wurden und die Grundlage für die Beantragung und Auszahlung von Fördermitteln bildeten. Die bereitgestellten Fördermittel wurden dazu gezielt zur Durchführung der projektbezogenen Aufgaben in den Arbeitspaketen AP0 (Projektmanagement) und AP6 (Dissemination) eingesetzt. Ein wesentlicher Teil der Mittel floss dabei in die Organisation, Koordination und administrative Betreuung des Projektes. Dazu zählten die Planung und Durchführung der Projekttreffen, die Erstellung von Protokollen, die Abstimmung der Feldversuche, die Beratung der Projektpartner bei Reisekostenabrechnungen, Stundenzettel und Auszahlungsanträgen sowie die Erarbeitung von Zwischenberichten und Teilauszahlungsanträgen. Darüber hinaus wurden Fördermittel im Rahmen des AP6 für Öffentlichkeitsarbeit und Wissenstransfer verwendet. Dazu gehörten die Erstellung eines Projektsteckbriefs, einer Pressemitteilung und

eines Projektlogos, die Präsentation auf Messen und Fachveranstaltungen (z.B. EIP-Gartenfest, Agritechnica, Woche der Umwelt, Öko-Feldtage) sowie die Produktion von digitalen Beiträgen, Interviews und Videomaterial zur Verbreitung der Projektergebnisse. Im Mai 2025 wurde eine kostenneutrale Laufzeitverlängerung bis zum 15.02.2026 bewilligt, um weitere Feldversuche über einen vollständigen Vegetationszyklus hinweg zu ermöglichen. Die Umsetzung dieser Maßnahmen verlief plangemäß und wurde von den bewilligten Fördermitteln gedeckt.

Im Projektzeitraum beteiligten sich die Landwirte Friedel Könecke und Heinrich Bätke aktiv an der Planung, Durchführung und Dokumentation der Versuchsreihen auf den bereitgestellten Grünlandflächen. Sie stellten Flächen zur Verfügung, auf denen verschiedene Tests, Bonituren sowie Kartierungen – unter anderem mittels Drohne – durchgeführt wurden. Zu Beginn wurde ein Kickoff-Meeting begleitet, bei dem die Eignung der Versuchsflächen und die grundlegende Versuchsplanung abgestimmt wurden. Dabei einigte man sich auf eine optimale zeitliche Abfolge der Bewirtschaftungsmaßnahmen. Dieses Vorgehen konnte bei den nachfolgenden Tests erfolgreich umgesetzt werden. Im weiteren Verlauf des Vorhabens arbeiteten die Landwirte eng mit den Projektpartnern zusammen, um Strategien für die Durchführung und Optimierung der Versuche zu entwickeln. Dabei floss der aktuelle Stand der Technik in die Planung der Behandlungsmaßnahmen ein. Insgesamt trugen die bereitgestellten Flächen, die aktive Mitarbeit sowie die fachliche Unterstützung der Landwirte wesentlich zum erfolgreichen Test- und Entwicklungsverlauf des Projekts bei.

Bei dem OG-Mitglied Permarobotics GmbH wurden die gewährten Zahlungsmittel projektbezogen und zweckentsprechend für die Entwicklung, Erprobung und Dokumentation des Systems eingesetzt, die zur Umsetzung der einzelnen Arbeitspakete notwendig waren. Im ersten Projektabschnitt erfolgte die Einrichtung des Versuchsbetriebs „GROW“, die Anlage der Versuchsflächen sowie die Implementierung der Grundlagen in der SoilDx App (SDx FieldLabs). Mittel wurden hier insbesondere für Personalaufwand, Feldtests und die Erprobung der Kommunikationsinfrastruktur (RALLink) zwischen Roboter, Drohne und Steuerungssystem eingesetzt. Anschließend konzentrierten sich die Aufwendungen auf die mechanische und softwareseitige Integration von Drohne, Roboter und Laser sowie auf erste Funktionstests zur Überprüfung der Systemkommunikation. In den Arbeitspaketen AP4.1 und AP4.3 wurden die KI-Pipeline zur Pflanzen- und Verdachtsfall-Erkennung entwickelt, implementiert und auf den Versuchsflächen unter realen Bedingungen getestet. Ein weiterer Teil der Mittel floss in die Entwicklung präziser Lokalisierungsfunktionen zur Nachverfolgung von behandelten Einzelpflanzen, einschließlich der Kalibrierung des Lasertools, der Erfassung von Pflanzen im openRAL-Format und der Speicherung entsprechender Daten in der Permarobotics Cloud. Im Berichtszeitraum März bis Juni 2025 wurden die verbleibenden Mittel überwiegend für die Erstellung und Finalisierung der technischen, anwenderbezogenen und API Dokumentation des Gesamtprojekts verwendet. Insgesamt wurden die zur Verfügung stehenden Zahlungsmittel effizient

und bestimmungsgemäß eingesetzt. Sie trugen wesentlich zur erfolgreichen technischen Entwicklung, Integration und Dokumentation des Systems bei.

Die dem LZH zur Verfügung gestellten Zahlungsmittel wurden gezielt und zweckentsprechend zur Umsetzung der technischen Entwicklungs-, Integrations- und Erprobungsarbeiten im Rahmen der Arbeitspakete AP2 bis AP4 eingesetzt. Der Mitteleinsatz umfasste vor allem Personal, Sach- und Reisekosten, die unmittelbar der Entwicklung und Weiterentwicklung des Laserwerkzeugs sowie dessen Integration in das Gesamtsystem dienten. In AP3 (Weiterentwicklung und KI-Integration) wurden die Mittel vor allem für die Erfassung, Aufbereitung und Erweiterung von Bilddatensätzen sowie für das Training und die Optimierung der KI-Algorithmen eingesetzt. Im Arbeitspaket AP4 (Feldversuche und Nachverfolgung) wurden Mittel für die Durchführung und Begleitung von Feldexperimenten verwendet. Insgesamt wurden die gewährten Mittel effizient und zielgerichtet eingesetzt. Sie ermöglichten die schrittweise technische Reifung des Laserwerkzeugs, die Integration der KI-Systeme, die erfolgreiche Durchführung der Feldversuche sowie die datenbasierte Nachverfolgung der Behandlungsergebnisse.

Im Rahmen des Projekts wurden keine Investitionsgüter angeschafft (siehe Tabelle 1), die nicht innerhalb der Projektlaufzeit abgeschrieben wurden bzw. werden mussten.

Tabelle 1: Gegenüberstellung der Budgetverteilung nach Geschäftsplan und tatsächlichen Ausgaben

	OG-Mitglied	Budgetverteilung EUR	Verwendete EUR
1	LZH-Koordinator	58.211,25	43.403,06
2	LZH	256.696,00	251.611,67
3	LB Friedel Könecke	5.343,80	1.925,10
4	LB Heinrich Bätke	5.343,80	1.987,20
5	Permarobotics GmbH	77.796,50	81.053,07
	Gesamt	403.391,35	379.980,10

Die größten und bedeutendsten Budgetpositionen entfielen auf die für die Projektaufgaben eingesetzten Personal- und Reisemittel sowie auf die beim LZH und Permarobotics GmbH angefallenen Sachmittel für den Aufbau des autonomen Roboters mit dem Laserwerkzeug. Die angegebenen Zahlen entsprechen dem Stand des finalen Auszahlungsantrags vom 15.02.2026 und stehen unter dem Vorbehalt möglicher Anpassungen im Rahmen der Prüfung durch den Förderträger.

2.2 Detaillierte Erläuterung der Situation zu Projektbeginn

2.2.1 Ausgangssituation

Zu Beginn des Projekts bestätigte sich, dass die Bewirtschaftung von Dauergrünlandflächen insbesondere dort, wo hohe Naturschutzanforderungen gelten, eine zentrale Herausforderung für viele landwirtschaftliche Betriebe darstellt. Darüber hinaus ist festzuhalten, dass auch für die breite Masse an Betrieben, die chemische Bekämpfungsmaßnahmen einsetzen können, großes Interesse an einer Reduktion der Pestizidmaßnahmen und -aufwendungen hat, sodass durchaus ein breiter Bedarf an wirksamen Ansätzen aus dem Bereich des Precision Farming besteht, die allerdings natürlich für die Betriebe wirtschaftlich darstellbar sein müssen. Grünland ist die wesentliche Grundlage für die Futterproduktion in der Schaf-, Rinder- und Pferdehaltung und besitzt damit sowohl ökonomische als auch gesellschaftliche Bedeutung. In Niedersachsen umfasste die landwirtschaftlich genutzte Dauergrünlandfläche im Jahr 2021 rund 693.600 ha, was etwa 14,7 % des bundesweiten Gesamtbestandes entspricht. In einigen Regionen des Bundeslandes basiert die gesamte Futtererzeugung nahezu ausschließlich auf diesen Flächen, sodass eine hohe Futterqualität zwingend erforderlich ist.

Gleichzeitig unterliegen viele dieser Flächen strengen naturschutzrechtlichen Vorgaben, beispielsweise innerhalb von FFH-Gebieten, Natura-2000-Flächen oder speziellen Vogelschutzprogrammen. Zahlreiche Pflegemaßnahmen wie Mähen, Walzen, Striegeln, Düngung oder Pflanzenschutz sind zeitlich klar reglementiert, um den Schutz der dort vorkommenden Flora und Fauna zu gewährleisten. Die Bindung dieser Maßnahmen an feste Termine etwa die erste Mahd ab dem 15. Juni führt jedoch dazu, dass viele Problemunkräuter zu diesem Zeitpunkt bereits Blüh- oder Samenreife erreicht haben. Das Mähen verstärkt dann häufig die ungewollte Verbreitung der Pflanzen.

Besonders problematisch ist der zunehmende Besatz mit Arten wie Jakobskreuzkraut, Stumpfblättrigem Ampfer oder Acker-Kratzdistel. Diese verringern nicht nur den Futterwert, sondern stellen aufgrund eingeschränkter Bekämpfungsmöglichkeiten in Schutzgebieten eine erhebliche Belastung für die Betriebe dar. Chemischer Pflanzenschutz ist in diesen Bereichen entweder vollständig verboten oder nur nach strengem Genehmigungsverfahren zulässig, weshalb eine wirksame Unkrautkontrolle oft nur manuell erfolgen kann. Dieser manuelle Einsatz ist bei hoher Unkrautdichte oder fehlenden Arbeitskräften jedoch kaum realisierbar und mit hohem Kosten- und Zeitaufwand verbunden.

Zwar existieren technische Ansätze wie Spot-Spray-Systeme, doch kommen diese für ökologisch wirtschaftende Betriebe oder geschützte Flächen nicht infrage. Insgesamt zeigte sich zum Projektstart ein deutlicher Handlungsbedarf, um die manuelle Belastung zu reduzieren und gleichzeitig eine nachhaltige, wettbewerbsfähige Grünlandbewirtschaftung unter Berücksichtigung der Naturschutzaufgaben zu ermöglichen.

2.2.2 Projektaufgabenstellung

Vor diesem Hintergrund besteht der Bedarf, alternative und nachhaltige Verfahren zur Unkrautregulierung zu entwickeln. Die zentrale Idee der OG war daher der Einsatz eines autonomen Roboters, der mit einem vollständig kontaktlosen Werkzeug ausgestattet wird, um selbstständig Problemunkräuter zu bekämpfen und so den erheblichen manuellen Arbeitsaufwand dafür deutlich zu reduzieren. Solche Systeme können Arbeitsprozesse zielgerichtet, präzise und bedarfsgerecht ausführen. Insbesondere ein Laserwerkzeug bietet großes Potenzial, da es sowohl zur Wuchssteuerung als auch zur letalen Schädigung unerwünschter Pflanzen eingesetzt werden kann. Die Applikation erfolgt äußerst selektiv und präzise dosiert, ohne die umliegende Flora und Fauna wesentlich zu beeinträchtigen. Gleichzeitig handelt es sich um ein verschleißfreies, kontaktlos arbeitendes Werkzeug, das eine ressourcenschonende und nachhaltige Alternative zu mechanischen oder chemischen Verfahren darstellt.

Ziel der OG war es dementsprechend ein Laserwerkzeug zu entwickeln, es mit dem Roboter Permabot auf Praxisflächen zum Einsatz zu bringen und diese automatisierte chemiefreie Pflanzenschutzmaßnahme im Hinblick auf die Bekämpfung von Jakobskreuzkraut im Grünland zu evaluieren.

2.3 Ergebnisse der OG

Die Zusammenarbeit mit den OGs war durch einen kontinuierlichen und gut abgestimmten Austausch geprägt. Zweimal jährlich fanden gemeinsame Projekttreffen am LZH sowie online statt, bei denen Fortschritte vorgestellt, offene Fragen geklärt und die nächsten Arbeitsschritte im Sinne des Projektes abgestimmt wurden. Die Kommunikation erfolgte offiziell überwiegend per E-Mail, während informelle Absprachen effizient über Messenger-Apps bzw. Telefonate getroffen wurden. Insgesamt wurde die Kommunikation bewusst zielgerichtet und kompakt gehalten, um Entscheidungen zügig treffen zu können. Auch bei der Erstellung von Zwischen- und Abschlussberichten gab es eine enge, fortlaufende Abstimmung, insbesondere dort, wo inhaltliche Schnittstellen bestanden.

Besonders hilfreich bei der Umsetzung in die Praxis waren die kurzen Wege zu den Versuchsfeldern und die direkte Flächenverfügbarkeit durch die landwirtschaftlichen Partner Herr Könecke und Herr Bätke. Dadurch konnten wissenschaftliche Versuche flexibel, kurzfristig und unter realistischen Praxisbedingungen durchgeführt werden. Dies trug zudem spürbar zur Qualität der erzielten Bekämpfungsergebnisse bei. Die räumliche Nähe zwischen Lasertechnik-Partner LZH und Robotik-Partner Permarobotics erleichterte zudem schnelle technische Rücksprachen und kurzfristig geplante Durchführungen auf dem Feld, was den Entwicklungsprozess beschleunigte.

Durch den direkten Austausch zwischen Landwirten und Projektarbeitenden konnte die Erfahrungsbasis im Bereich des Grünlandmanagements deutlich erweitert werden. Einblicke in

praxisnahe Herausforderungen wie Bodenverhältnisse, Bewirtschaftungsrhythmen oder Unkrautdruck lieferten wertvolle Impulse für die Weiterentwicklung der Systemkomponenten. Darüber hinaus entstanden neue fachliche Kontakte über die OG-Struktur hinaus, die zusätzliche Perspektiven und Ideen einbrachten. Das interdisziplinäre Verständnis zwischen Agrarpraxis, Robotik, Sensorik und KI-Entwicklung wurde dadurch nachhaltig gestärkt. Die schnelle Rückmeldung aus der Praxis unterstützte das iterative Testen und Optimieren des Systems, während die OG-Mitglieder zugleich als wichtige Multiplikatoren für Feedback, regionale Vernetzung und Praxiseinschätzungen fungierten.

Die im Projekt erzielten Ergebnisse konnten im Rahmen eines eigenen Feldtags einem fachkundigen Publikum direkt in der Praxis präsentiert werden wie in Abbildung 1, Abbildung 2 und Abbildung 3 zu erkennen. Eingeladen waren Landwirtinnen und Landwirte aus der Region sowie Berufsschülerinnen und Berufsschüler aus landwirtschaftlichen Ausbildungszweigen. Dadurch wurden sowohl erfahrene Praktiker erreicht, die nach konkreten Lösungen für aktuelle Herausforderungen suchen, als auch junge Menschen, die diese Entwicklungen in ihre zukünftige Arbeit mitnehmen und weitertragen können. Der Feldtag fand auf dem Grünland von Herrn Könecke statt und folgte einer klaren Struktur: Zunächst stellten Permarobotics und das LZH die zugrunde liegende Technik in einer gemeinsamen Präsentation vor. Anschließend folgten praktische Demonstrationen, in denen der Permabot seine Navigations- und Kartierungsfunktionen zeigte. Das LZH führte darüber hinaus Live-Behandlungen von Unkräutern im Grünland durch. Auf diese Weise konnte die Leistungsfähigkeit der Systeme unmittelbar erlebt werden und die Rolle der Photonik im Grünlandmanagement wurde deutlich hervorgehoben. Der Feldtag verdeutlichte damit anschaulich, welches Potenzial in dieser Technologie steckt und wie sie zukünftig einen Beitrag zu innovativen Verfahren der Unkrautregulierung auch im Grünland leisten kann.



Abbildung 1: Impressionen vom GROW Feldtag 2025 auf einer Grünlandfläche in Isernhagen.



Abbildung 2: Publikum und OG Mitglieder am GROW Feldtag 2025 in Diskussion.



Abbildung 3: OG-Mitglieder neben dem PermaBot mit Laserwerkzeug beim GROW Feldtag 2025 in Isernhagen. v.l. Dr. Merve Wollweber (LZH), Meik Seedorf (LZH), Andreas Blech (PR), Friedel Könecke (LW), Heinrich Bätke (LW), Mandy Patzlaff-Günther (LZH)

Für die Zeit nach Projektende ist zwar keine direkte Weiterführung der gemeinsamen Arbeit geplant, dennoch wurde im Verlauf deutlich, dass großes Potenzial für eine Fortsetzung besteht, insbesondere, wenn es darum geht, die entwickelten Ansätze weiter in die landwirtschaftliche Praxis zu überführen. Die Zusammenarbeit innerhalb der OGs verlief konstruktiv und wertschätzend, was eine solide Basis für zukünftige Kooperationen bietet. Gleichzeitig hat das Projekt gezeigt, dass die technische Umsetzung hin zu einem wirklich robusten, praxistauglichen und wirtschaftlichen System noch weiteren Entwicklungs- und Abstimmungsbedarf erfordert. Die gewonnenen Erfahrungen verdeutlichen, dass eine erneute oder vertiefte Zusammenarbeit der beteiligten Partner sinnvoll wäre, um diesen Weg weiterzugehen und die Technologie langfristig erfolgreich in der Praxis zu verankern.

2.4 Ergebnisse des Innovationsprojektes

Als Ziel des Projektes galt es eine anwendungsorientierte Lösung zur herbizidfreien, maschinellen Unkrautbekämpfung zu erarbeiten. Unter anderem wurden die folgenden Schwerpunkte definiert:

- Laserwerkzeug adaptieren und auf dem Robotersystem integrieren
- Praxisversuche durchführen und damit Technik entwickeln und Ansatz evaluieren
- automatische Erkennung der Problemunkräuter im Grünland weiterentwickeln (Werkzeug und Roboter bzw. Drohne)
- weit reichende Dissemination von Projekt und Ergebnissen durch Vorträge, Medienbeiträge, Feldvorführungen und Fachmessen.

2.4.1 Zielerreichung

Um in den Praxisversuchen die Behandlung der Problemunkräuter automatisiert durchführen zu können, war es das erste Ziel, das Gesamtsystem (Laserwerkzeug und Permabot) zu entwickeln. Da der Permabot schon existierte, galt es, auf Basis der Vorarbeiten am LZH ein Laserwerkzeug für den speziellen Anwendungsfall zu entwickeln und umzusetzen.



Abbildung 4: Darstellung des Gesamtsystems bestehend aus dem Permabot sowie dem Laserwerkzeug, welches in der Werkzeugaufnahme des Permabots eingeschoben ist.

Im Zuge des Projektes konnte ein funktionsfähiges Laserwerkzeug fertiggestellt werden. Dieses Werkzeug ist fähig sich mit dem Permabot mechanisch verheiraten zu lassen, sodass beide Subsysteme miteinander als Gesamtsystem fungieren können.

Laserwerkzeug

Das entwickelte Laserwerkzeug besteht neben dem eingehausten Laser aus weiteren Komponenten, die in der folgenden Tabelle für einen Überblick aufgelistet werden

- Laser
- Batterie
- Wechselrichter
- Laderegler
- Computer
- Portalsystem
- Kamera

Der verwendete Laser in dem Laserwerkzeug ist ein Thulium-Faser Laser, der vom LZH zu Beginn des Projektes zunächst zur Verfügung gestellt werden konnte. Der Laser selber besitzt einen Kollimator. Dieser cw-Laser (continuous wave laser) hat eine Wellenlänge von 1940 nm bei 100 W optischer Ausgangsleistung. Für die Energiespeicher wurde sich für eine Batterie entschieden. Das Ergebnis der Recherche führte zu einem Lithium Speicher (LiFe₄PO). Die Batterie ist durch ihr Gewicht und ihre Größe eine der größten Komponenten des Laserwerkzeuges. Da der verwendete Laser für Netzbetrieb ausgelegt ist (230 VAC, 50 Hz), wurde ein

Wechselrichter benötigt, um im Batteriebetrieb zu arbeiten. Dies wiederum erforderte den Zusatz eines Ladereglers, um die Batterie nach Verbrauch erneut aufladen zu können.

Um die Strahlführung des Lasers im Laserwerkzeug umzusetzen, wurden Spiegelsysteme verwendet in Kombination mit einem Portalsystem (Achsen). Dafür wurde der Kollimator an einer festen Stelle im Werkzeug montiert und über Silberspiegel, welche an den Endpunkten der Achsen des Portalsystems platziert wurden, mehrmals umgelenkt. Dadurch konnte der Laser orthogonal zum Boden ausgelenkt und in der 2D-Ebene des Bodens bewegt werden, was notwendig für die präzise Behandlung der Unkräuter ist.



Abbildung 5: Verwendetes Portalsystem für das Laserwerkzeug. Die Kollimatorhalterung sowie das Spiegelsystem ist auf den Achsen des Portalsystems angebracht. Zudem ist die 3D-Kamera unterhalb des Schlittens abgebildet (blaues Teil in der Mitte des Bildes).

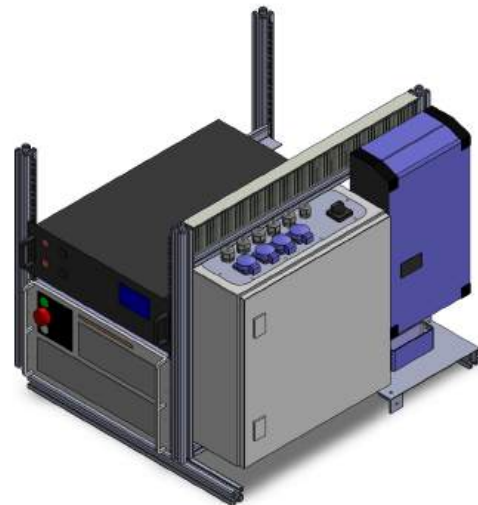


Abbildung 6: Verwendete Hauptkomponenten oberhalb des Werkzeugrahmens. Im Rack-Einschub auf der linken Seite im Bild sind die schwarze Batterie sowie das graue Lasergehäuse darunter abgebildet. Auf der rechten Seite ist der graue Schaltschrank sowie der blaue Wechselrichter/ Ladegerät zu erkennen.



Abbildung 7: Laserwerkzeug in der Konstruktionsumgebung. Die Hauptkomponenten des Laserwerkzeugs liegen oberhalb des Werkzeugrahmens mit Rollen zum Einschub in die Werkzeugaufnahme des Permabot. Darunter liegt der Arbeitsraum des Lasers, der im Hinblick auf die Lasersicherheit eingehaust ist. Zudem kann das Panel mit den externen Schnittstellen zum Laserwerkzeug in der Mitte des Bildes erkannt werden.

Zur Aufnahme der Unkräuter während der Versuche wurden Kameras im Laserwerkzeug installiert. Die verwendeten Kameras waren 3D-Kameras (LiDAR), um die Tiefe der Zielpunkte mitbestimmen zu können. Eine statische Positionierung von solch einer Kamera im Bauraum des Laserwerkzeugs besäße den Nachteil, die Achsen des Portalsystems sowie dessen Schatten im Weg zu haben. Zudem kommt die verwendete Kameratechnologie oftmals mit geringer Farbbildauflösung, was die Detailreichtümer der Bilder verringert und kontraproduktiv für die KI ist. Um wie beim Laser mit den Silberspiegeln auch die 3D-Kamera beweglich zu machen, wurde diese direkt am Schlitten des Portalsystems installiert und fährt daher mit dem Laserstrahl mit. In Abbildung 5 kann das Portalsetup mit Kamera und Silberspiegel betrachtet werden.

Für die Verarbeitung der Bilddaten während der Versuche sowie die Steuerung der Systeme im Laserwerkzeug wurde ein Kompaktcomputer mit dedizierter Grafikkarte eingesetzt. Dieser besitzt neben seinen hohen Leistungen für die Bildverarbeitung einen geringen Stromverbrauch im Vergleich zu anderen Computern und ist daher vorzugsweise geeignet, um im Batteriebetrieb auf dem Feld zu operieren. Neben dieser verarbeitenden Einheit, sind zudem weitere elektrische Systeme eingebaut worden, um das Laserwerkzeug als Ganzes seitens Hardware funktionsfähig zu machen.

Für die mechanische Verbindung aller Komponenten des Laserwerkzeuges wurden üblicherweise Aluminiumkonstruktionsprofile verwendet. Zudem wurden die Komponenten sowie der Arbeitsraum des Lasers mit Blech eingehaust. Dies hatte nicht nur den Grund das Laserwerkzeug witterungsbeständiger zu machen, sondern vor allem den Arbeitsraum des Lasers sicher zu isolieren und somit einen höheren Grad an Sicherheit zu gewährleisten. Um die Bleche mit

dem unebenen Boden abzuschließen, wurden weiche Laser-feste Lamellen an die Bleche angebaut. Für den Servicebetrieb auf dem Feld oder im Labor wurden typische Schnittstellen (Schalter, USB, etc.) an das Außenblech des Laserwerkzeug installiert. Dort befindet sich auch ein Touchscreen für Schnelleinstellungen.

Bilddatensatz

Für die Erkennung der Unkräuter im Grünland und deren Wachstumszentren durch das Laserwerkzeug ist eine Datenbank für die Objekterkennung per KI notwendig. Dafür wurde eine projekteigene Datenbank angelegt, um die KI auf den Anwendungsfall zu trainieren, denn die Qualität der KI variiert stark mit den Feldparametern.

Der Bilddatensatz besteht hauptsächlich aus Bildern, welche manuell von Menschen aufgenommen worden sind. Diese Bilder sind zumeist mit Smartphonekameras gemacht worden und besitzen daher eine sehr hohe Qualität. Die Bilder bestehen aus meist gezielten Aufnahmen der jeweiligen Unkräuter. Das bedeutet, dass dieser Prozess verhältnismäßig aufwendig in der Durchführung war, da Pflanzen gesucht und manuell aufgenommen werden mussten.



Abbildung 8: Gezielte Nahaufnahme einer Jakobskreuzkrautrosette im Grünland aus geringer Distanz. Die Pflanze ist für die Erkennung per Kamera und KI ideal da ein eindeutiges Wachstumszentrum erkennbar ist, welches nicht verdeckt ist.



Abbildung 9: Bodenaufnahme der Kamera vom Grünland mit diversen Pflanzen aus einer Distanz von ca. einem halben Meter. Zu Erkennen sind viele verschiedene Pflanzen. Darunter sind auch zu bekämpfende Zielunkräuter. Aufgrund der Dichte der Pflanzen sind diese nur erschwert zu erkennen.

Mit Fertigstellung des Laserwerkzeugs konnte dann die eingebaute 3D-Kamera während der Fahrt für weitere Bilddatengenerierung genutzt werden. Allerdings ist die Kamera für Bilder in schneller Bewegung eher ungeeignet, was die Qualität der Aufnahmen während der Fahrt

des Permabots ungenügend machte. Nur beim Gieren sowie Stillstehen des Permabots konnten unverschommene Bilder generiert werden. Zudem ist die manuelle Aufnahme schneller und logistisch einfacher ausführbar. Dennoch konnte diese Möglichkeit genutzt werden um den Bilddatensatz zu erweitern.

Als dritte Möglichkeit bot es sich an, die Bilddatengenerierung per Software zu erweitern. Dieser Ansatz wurde ebenfalls verfolgt, ist aber für die Ergebnisse nicht signifikant zum Tragen gekommen, da diese synthetisch generierten Bilddaten für das KI-Training nicht verwendet wurden. Näheres zu den Ergebnissen durch die Verwendung von synthetischen Daten ist in 2.4.5 zu finden.

KI-Algorithmus

Die erzeugte Datenbank ergab eine gute Grundlage für das Training einer zweckgebundenen Künstlichen Intelligenz (KI). Dafür musste die KI antrainiert werden für die besagten Unkräuter. Die KI wurde später in den Feldversuchen genutzt, um die Unkräuter unterhalb des Laserwerkzeuges zu erkennen und somit behandeln zu können.

Es wurden verschiedene Ansätze verfolgt, um das Wuchszentrum von bspw. Jakobskreuzkraut mittels den Daten der Kamera im Laserwerkzeug über die KI zu erkennen. Dies gestaltete sich aber aus verschiedenen Gründen schwieriger als auf typischen Ackerböden. Als Beispiel ist in Abbildung 10 ein typisches Jakobskreuzkraut (JKK) im fortgeschrittenen Stadium für eine potenzielle Behandlung mittels Laser gezeigt. Dazu sind in der Abbildung 11 verschiedene grundlegende Konfigurationen von Pflanzen schematisch dargestellt, um die Komplikationen beim Erkennen des Wachstumszentrums zu verdeutlichen. Der genaue Bereich des Austriebs der Beispieelpflanze aus dem Boden, der vorzugsweise für die Laserbehandlung gewählt wird, ist nicht klar nachzuvollziehen, denn der Austrieb ist von Blättern der eigenen Pflanze sowie von den Blättern benachbarter fremden Pflanzen verdeckt. Dies hat zur Folge, dass die Lichtstärke in der Nähe des Wuchszentrums zu gering ist für die Kamera. Zudem scheint die Pflanze asymmetrisch gewachsen zu sein, was geometrische Rückschlüsse zusätzlich erschwert. Aufgrund dieser realen Bedingungen ist es schon für menschliche Betrachter herausfordernd nur anhand der Bilder und ohne aktives Einwirken in die Vegetation wie händische Blatt- oder Erdbewegung, Aussagen über den Zielpunkt der Pflanze zu treffen. Da diese Aussagen die einzige Grundlage der KI fürs „Lernen“ sind, ist ein Einsatz der KI nicht trivial für das präzise Erkennen des Austriebs von Zielpflanzen wie z.B. JKK.



Abbildung 10: Beispielpflanze (Jakobskreuzkraut) zur Ansicht der verschiedenen Probleme. Obwohl die Pflanze klar zu identifizieren ist, kann ein optimaler Behandlungspunkt nicht eindeutig fest gemacht werden. Die Pflanze ist nicht ideal waagerecht ausgetrieben. Zudem verdecken Blätter die Austriebe der Pflanze aus dem Boden. Letztendlich resultiert daraus auch eine schlechtere Belichtung in Nähe des Bodens.

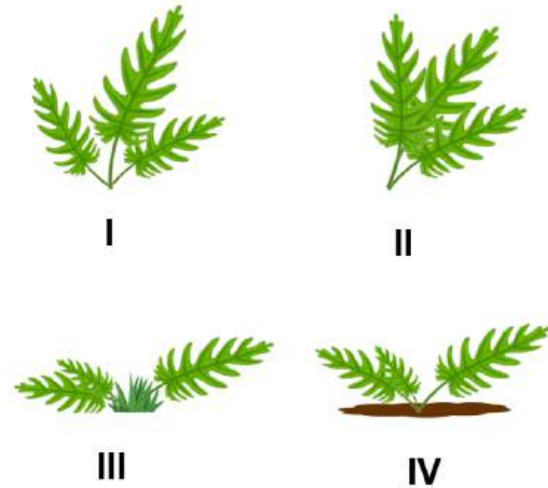


Abbildung 11: Auftreten der Unkräuter auf dem Grünlandboden. Vier grobe Konfigurationen konnten aus Beobachtungen und Pflanzenaufnahmen definiert werden, von denen meistens eine Kombination auftritt. I. Pflanzenblätter verdecken sich selber und somit auch teilweise das Wachstumszentrum. II. Die Pflanze ist seitlich ausgetrieben. Es lassen sich nur erschwert Rückschlüsse ziehen, wo sich das Wachstumszentrum befindet. III. Andere Pflanzen verdecken das Wachstumszentrum des Zielunkrauts. IV. Organisches Material oder Erde verdecken den Austribspunkt der Pflanze im Bodens, was zu keiner eindeutigen Identifikation des Wachstumszentrums führt.

Zunächst wurde ein einfacher Detektions-Algorithmus ("Bounding Box") mittels KI-Modell zur Detektion antrainiert, um Pflanzen erkennen und auch klassifizieren zu können. Dieser gibt aber nur eine Aussage darüber, welche Position und maximale Größe eine Zielpflanze besitzt und keine Aussage über die Form o.ä. Eine anschließende Erkennung zum Auffinden der Zielpunkte (Keypoints) für den Austrieb in dem Bereich der Zielpflanze ergab keine verwendbaren Ergebnisse, da keine wiederkehrenden Informationen in dem erstellten Datensatz der Trainingsbilder auftauchten bzw. erkannt werden konnten.

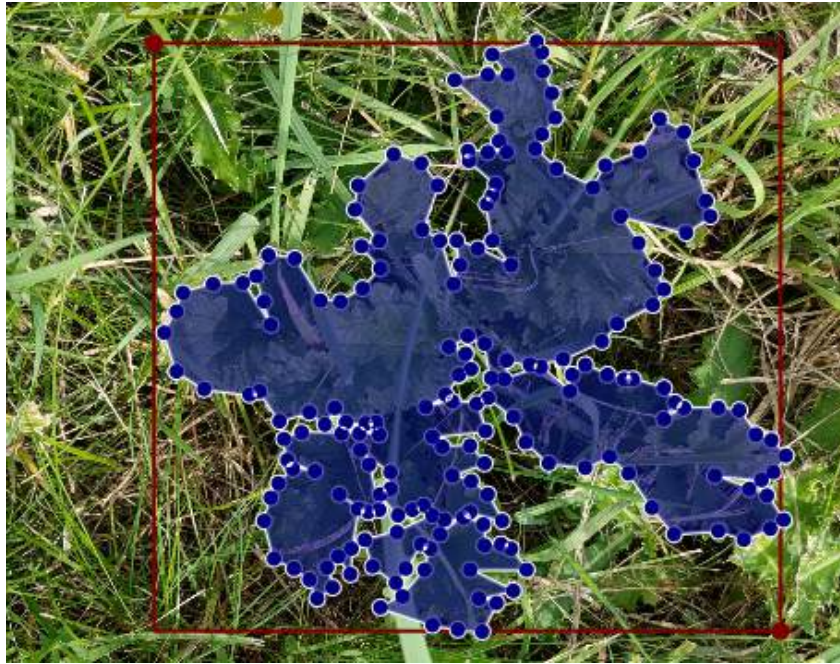


Abbildung 12: Annotiertes Jakobskreuzkraut aus dem Datensatz. Das rot gekennzeichnet Rechteck grenzt die Pflanze mittels "Bounding Box" für das KI-Training ein. Spätere Umsetzungen haben sich auf die semantische Segmentierung gestützt, welches das aufwendigere Annotieren mittels Konturen (blau) erforderte.

Daher wurde der Datensatz erweitert, um eine semantische Segmentierung mittels KI-Modell einzusetzen. Dies besaß den Vorteil Informationen aus der Kontur der erkannten Pflanze zu ziehen und diese zur Findung des Wachstumszentrums zu nutzen. Hierfür musste der Datensatz angepasst werden, welches im Vergleich zum vorher beschriebenen Ansatz im Aufwand wesentlich zeitintensiver war. Die Ergebnisse erschließen jedoch eine größere Menge an Information, was den Mehrwert rechtfertigte.

In Abbildung 13 sind die Erkennungsergebnisse des genutzten KI-Modells zu sehen. Grundlage des Trainings ist der selbst erstellte Datensatz mit eigenen Annotationen für die Zielpflanzen. Wie hier gezeigt, können die Konturen der Zielpflanzen weitestgehend erkannt werden. Allerdings können nicht direkt weitere Aussagen über Wachstumszentrum oder Austribspunkt der Pflanze getroffen werden. Für die weitere Verarbeitung dieser Ergebnisse wurde aufgrund der einfachen und ressourcensparenden Implementierung zunächst auf klassische Bildverarbeitungsalgorithmen zurückgegriffen.

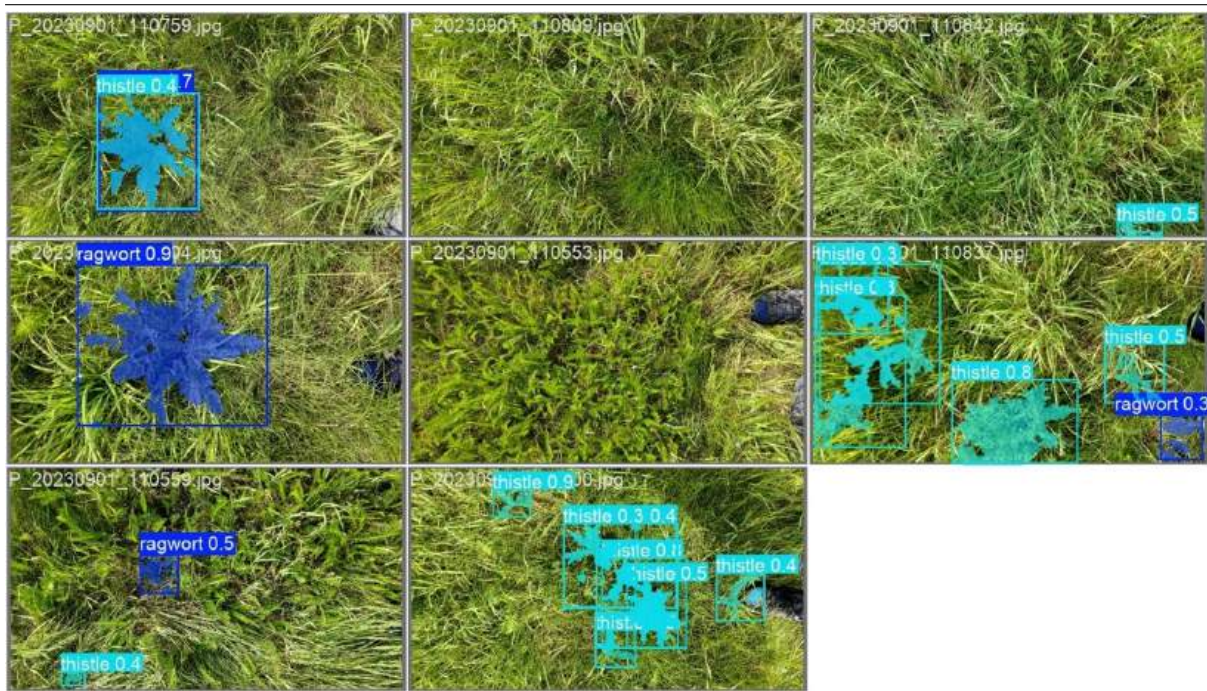


Abbildung 13: Inferenzen der semantischen Segmentierung auf einigen Aufnahmen des Datensatzes. Die KI erkennt unter anderem die Acker-Kratzdistel (hellblau) sowie das Jakobskreuzkraut (dunkelblau) auf einigen Bildern.

In Abbildung 14 wird in der oberen Reihe neben der Beispielpflanze für JKK aus Abbildung 10 die Binärmaske der erkannten Pflanze dargestellt, in der zudem das zu erwartende Wachstumszentrum eingezeichnet ist. In der unteren Reihe ist links der Massenschwerpunkt der weißen Blattfläche in der Bitmaske zu erkennen. Auf der rechten Seite wurde ein Ausdünnungs-Algorithmus verwendet anhand der weißen Blattfläche der Bitmaske. Der Massenschwerpunkt ist irreführend, da die reine Blattfläche irreführend ist. Der Ausdünnungs-Algorithmus erzielt Ergebnisse, die näher am vermuteten Wachstumszentrum der Pflanze ist. Daher wurde dieser Ansatz bevorzugt. Letzteres entspricht auch den Vermutungen aus der Beobachtung des Typ II in Abbildung 11. Daher wird in den folgenden praktischen Versuchen mit dem Ausdünnungs-Algorithmus als finales Zielfindungsverfahren nach der KI Inferenz gearbeitet, da dieser bisher die genauesten Ergebnisse lieferte und es für den Laser wichtig ist, sehr genau zu treffen. Eine bessere Erkennung der Pflanzen auf höher aufgelösten Bildern sowie eine bessere Tiefenerkennung, verspricht ein neueres Kamera-Setup, welches für die KI Anwendung zugeschnitten ist. Aufgrund des zeitlich fortgeschrittenen Projektes im Zusammenspiel mit technischen bzw. witterungsbedingten Einschränkungen konnten Feldversuche damit nicht mehr erfolgen. Allerdings ergaben erste Laborversuche eine höhere Zielgenauigkeit, die bessere Ergebnisse auch bei potentielle Feldversuchen bewirken könnten.

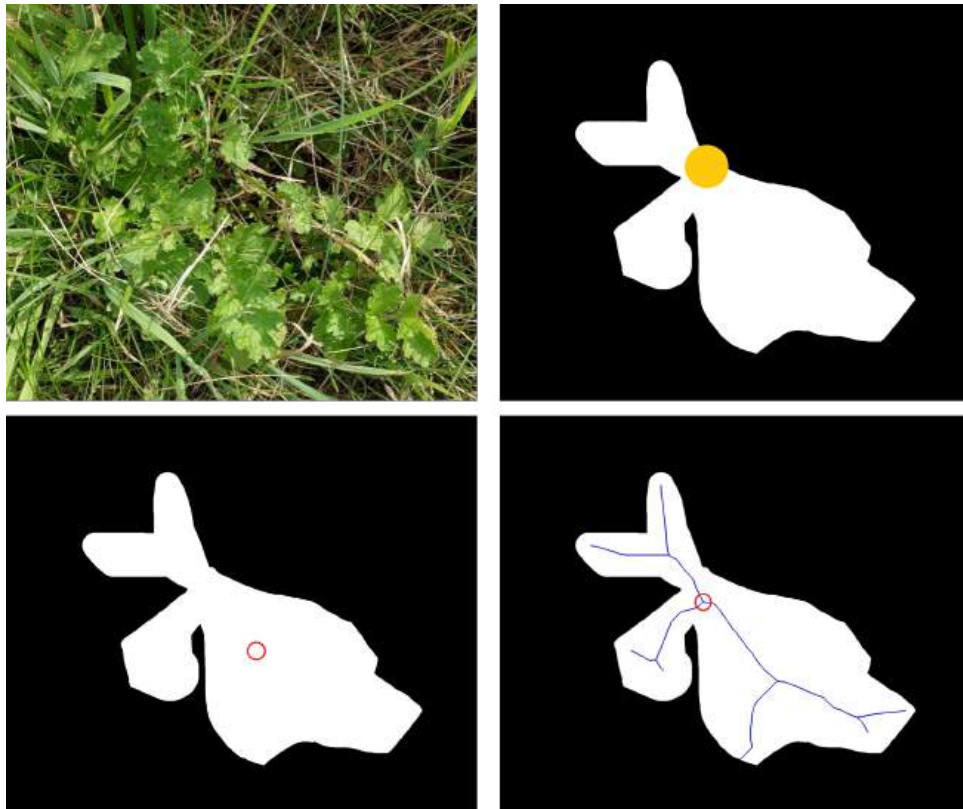


Abbildung 14: Zielerkennung des Wachstumszentrums mit klassischer Bilderkennung. Oben links ist die Beispieelpflanze ohne klar identifizierbares Wachstumszentrum abgebildet. Oben rechts ist gelb die Region markiert, in der nach menschlichem Ermessen das Wachstumszentrum und somit auch das Ziel für den Laser grob vermutet wird. Unten links und unten rechts sind die Ergebnisse der beiden vorgestellten Algorithmen gezeigt.

Pflanzenversuche

Aus pflanzenphysiologischer Sicht erscheint eine möglichst tiefgehende Schädigung der Einzelpflanze bis in den Wurzelbereich sowie ein Abschneiden der Blätter als sinnvoll zur Schwächung der Einzelpflanze. Die vorliegende wissenschaftliche Fragestellung zielte darauf ab, zu ermitteln, ob der Zeitpunkt der Bestrahlung (1. Vegetationsruhe, 2. kurz vor der Vegetationsruhe und 3. in der Blütezeit) einen Einfluss auf den Behandlungserfolg hat. Des Weiteren sollten verschiedene Techniken zur Behandlung von JKK mittels Laser getestet werden.

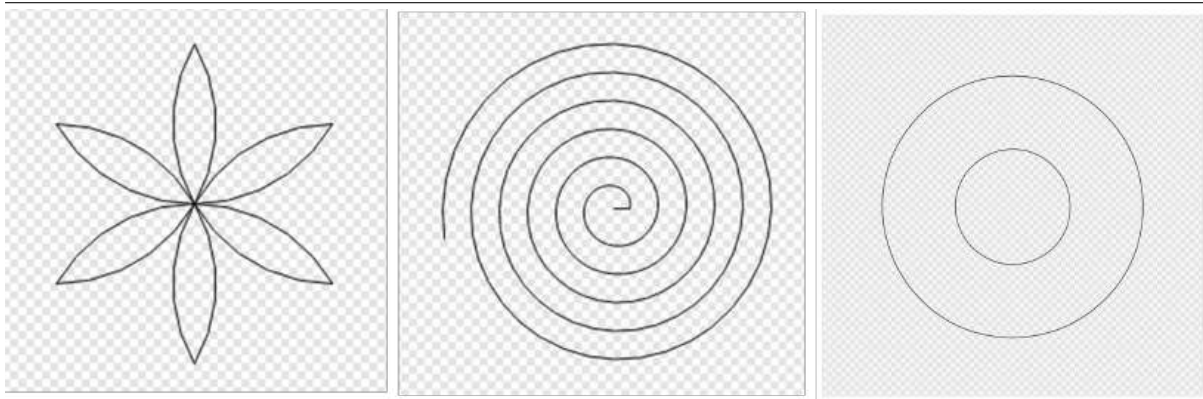


Abbildung 15: Bestrahlungsmuster v.l.: Stern, Spirale, Kreise, die der Laser über dem Wachstumszentrum der jeweiligen Pflanze abfährt. Mittelpunkt des Musters ist jeweils das Wachstumszentrum der Pflanze.

Damit die geplanten Feldversuche im Kalenderjahr 2025 systematisch durchgeführt werden konnten, wurde vorab ein Gewächshausversuch durchgeführt bei dem unterschiedliche Bestrahlungsmuster (Stern, Kreis, Spirale und Punkt, siehe Abbildung 15) getestet wurden. Der Versuch diente dazu, einen Eindruck von der Behandlung zu bekommen und gleichzeitig eine bessere Vorauswahl der Behandlungsdosis auf dem Feld zu treffen.

Für den Versuch wurden insgesamt 90 JKK-Pflanzen im Gewächshaus bis zu einem identischen Wachstadium (siehe t-1 Abbildung 16) herangezogen. Die Behandlung erfolgte im Januar 2025 und umfasste neben den drei Bestrahlungsmustern sowie der punktuellen Bestrahlung auch eine Kontrolle (keine Laserbehandlung). Insgesamt wurden pro Muster 18 Pflanzen behandelt. Die Dosis unterschied sich zwischen den Behandlungsmustern Kreisbewegung (1000 J), Stern (2000 J), Spirale (2000 J) und Punkt (2000 J). Die Unterschiede resultierten aus der Primärbehandlung mittels Kreises, die am Versuchstag als nicht letal eingestuft wurde, weshalb eine Erhöhung auf 2000 J für die weiteren Behandlungsmuster vorgenommen wurde. Nach der Behandlung wurden die Pflanzen wöchentlich bonitiert/fotografiert und nach drei Wochen wurde die Frischmasse der oberirdischen Sprosse bestimmt.

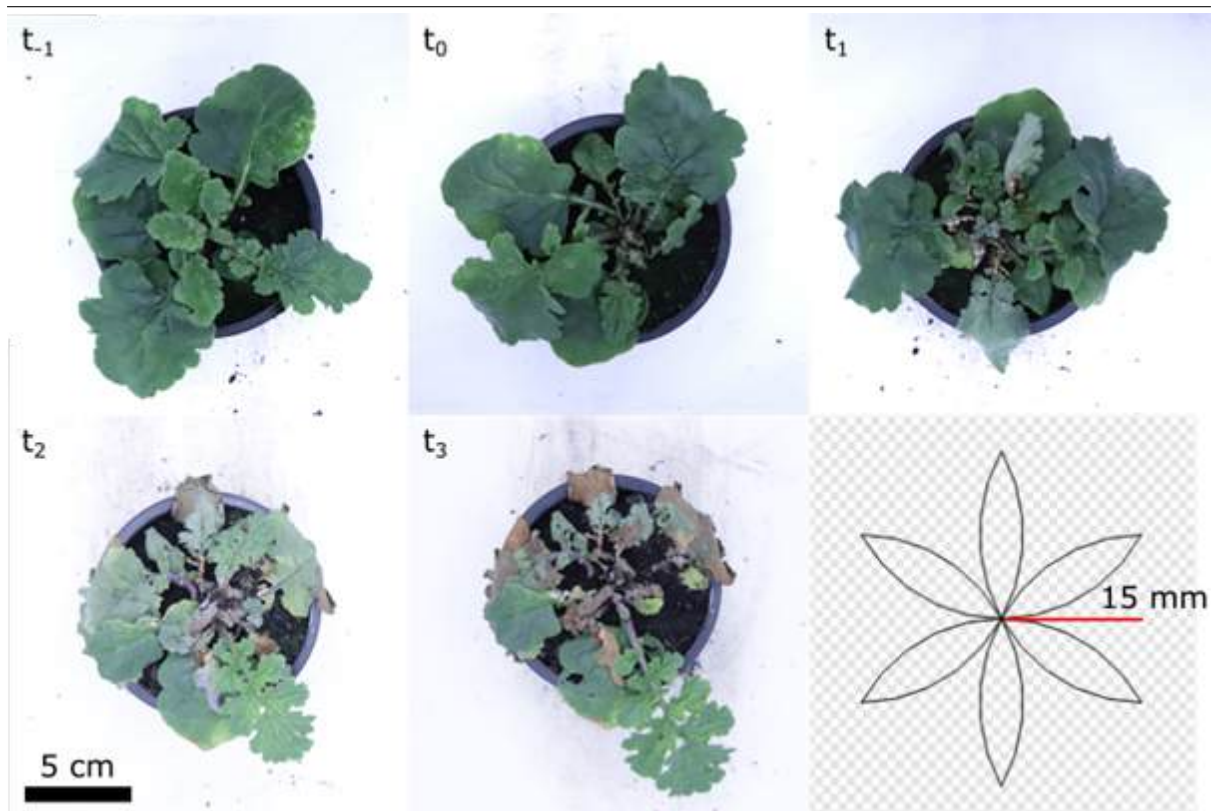


Abbildung 16: Verlauf einer behandelten JKK Pflanze. t-1: vor der Behandlung; t0: direkt nach der Behandlung t1-t3: 1-3 Wochen nach Behandlung. Unten rechts ist das Bestrahlungsmuster aufgezeigt, mit der das Wachstumszentrum der Pflanze mit dem Laser abgefahren wurde.

In Abbildung 16 ist exemplarisch eine behandelte JKK-Pflanze (Behandlungsmuster: Stern) wöchentlich über den gesamten Versuchszeitraum (t-1 bis t3) dargestellt. Es ist erkennbar, dass die betroffenen Pflanzenteile direkt nach der Behandlung (t0) eine deutliche Schädigung in Form von verbrannten Blattorganen erlitten haben. Diese beschädigten Blattorgane sterben im Laufe der Zeit (t1 bis t3) ab, was zu einer Beeinträchtigung des gesamten Pflanzenwachstums führt. Diese Beeinträchtigung ist auch in der Frischmasse in Abbildung 17 ersichtlich.

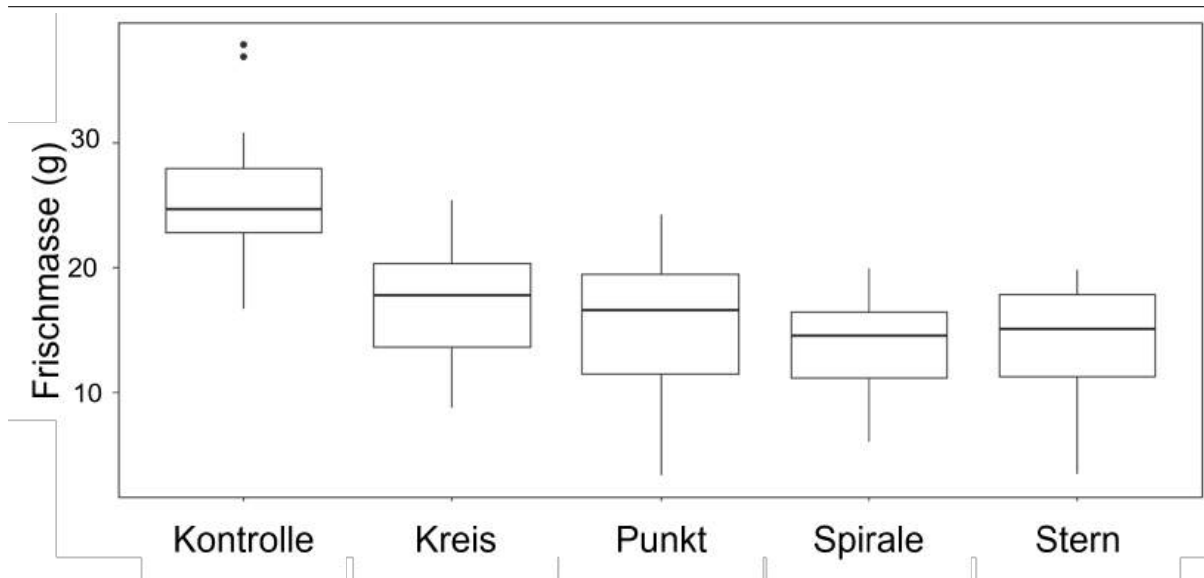


Abbildung 17: Frischmasse von Jakobskreuzkraut in Abhängigkeit vom Behandlungsmuster drei Wochen nach der Behandlung; N=18 pro Behandlungsmuster.

Die Abbildung 17 zeigt Boxplots der Frischmasse (g) für die Kontrollgruppe sowie die vier Behandlungsmuster Kreis, Punkt, Spirale und Stern. Die Kontrollgruppe weist mit ca. 25 g die höchste mittlere Frischmasse auf, während alle weiteren Behandlungsmuster eine niedrigere mittlere Frischmasse von ca. 13–17 g aufweisen. Dies entspricht einer mittleren Reduktion der Frischmasse um 42 %. Die statistische Auswertung ergibt, dass zwischen der Kontrollgruppe und allen Behandlungsmustern ein signifikanter Unterschied besteht ($p < 0,05$). Demgegenüber zeigen sich keine signifikanten Unterschiede zwischen den einzelnen Behandlungsmustern. Dies deutet darauf hin, dass die Art des Musters keinen zusätzlichen Einfluss auf die Frischmasse hat, sondern die Behandlung an sich bereits zu einer Reduktion im Vergleich zur Kontrolle führt. Da bei keiner Pflanze trotz einer erzielten Wuchsreduktion eine letale Schädigung erreicht werden konnte, wurde für die folgenden Feldversuche die Dosis erhöht.

Im Rahmen der ersten Feldstudie im Januar wurden die gleichen Bestrahlungsmuster getestet, wobei die Erhöhung der Dosis mit einer zusätzlichen punktuellen Bestrahlung realisiert wurde. Die Kombination beider Behandlungsmethoden umfasste das Freischneiden des Wuchszentrums durch die Behandlungsmuster sowie die anschließende tiefgehende Schädigung der Pflanzen durch die punktuelle Bestrahlung. Am Versuchsdatum, dem 23.01.2025, wurden insgesamt 30 Pflanzen einer Behandlung unterzogen, während 10 Pflanzen als Kontrollpflanzen dienten. Zur Gewährleistung der Auffindbarkeit der Pflanzen nach mehreren Wochen wurde jede Pflanze mit einem weißen Schild (inkl. Pflanzennummer) und einem Holzstab markiert. Im Rahmen der Studie wurden die Pflanzen nach zwei, fünf und zehn Wochen hinsichtlich ihrer Vitalität und Morphologie evaluiert. Dabei wurde jede Pflanze fotografiert und anhand einer Vitalitätsbewertung in eine entsprechende Kategorie klassifiziert.

Ein Verlauf des Wachstums einer behandelten Pflanze ist exemplarisch in Abbildung 18 dargestellt. In der zehnten Woche (01.04.2025) erfolgte zusätzlich eine Messung des durchschnitt-

lichen Durchmessers der Rosette sowie der Frischmasse bei sämtlichen Pflanzen. Die Resultate der Untersuchung offenbarten keinen signifikanten Unterschied zwischen den behandelten Pflanzen und den Kontrollpflanzen. Als ein möglicher Grund ist die hohe Diversität der Versuchspflanzen am Behandlungstag zu nennen. Es konnte jedoch nachgewiesen werden, dass einzelne Pflanzen einer Schädigung ausgesetzt waren, welches zu einer Verzögerung des Wachstums führte.



Abbildung 18: Entwicklungsverlauf einer behandelten Pflanze (Applikation: Kreismuster). Von links: 1. Nach Bestrahlung, 2. Zwei Wochen nach Behandlung, 3. Fünf Wochen nach Behandlung, 4. Zehn Wochen nach Behandlung.

In der zweiten Feldstudie (19.03.2025) erfolgte eine Integration der zuvor gewonnenen Erkenntnisse in das Versuchsdesign. Es wurde nur noch ein Bestrahlungsmuster ausgewählt und die applizierte Energie erhöht. Zur Gewährleistung der Vergleichbarkeit der Feldversuche wurde eine identische Energie von 4000 J sowie eine doppelt so hohe Energie von 8000 J bei einem Strahldurchmesser von ca. 5 mm appliziert. Des Weiteren erfolgte erneut die Aufnahme von zehn zusätzlichen Pflanzen als Kontrollpflanzen. Die Auswertung des Versuchs erfolgte zwei Wochen nach der Behandlung, da diese zeitlich mit dem ersten Feldversuch koordiniert werden musste. Die auf diese Weise gewonnenen Daten bezüglich der Pflanzen konnten unmittelbar miteinander verglichen werden. Es konnte gezeigt werden, dass die Frischmasse im Vergleich zu den Kontrollpflanzen signifikant reduziert war. Zwischen den beiden Dosisstufen war hingegen kein signifikanter Unterschied erkennbar. Dies deutet darauf hin, dass eine Verdopplung der Energie auf 8000 J keinen Effekt auf das Pflanzenwachstum hat. Zudem wurde erneut festgestellt, dass Pflanzen, die nicht mittig im Wuchszentrum geschädigt wurden, eine größere Frischmasse aufwiesen. Dies lässt den Schluss zu, dass es von essenzieller Bedeutung ist, die Mitte der Pflanzrosette präzise zu treffen. Insgesamt konnte in diesem Feldversuch keine letale Schädigung erreicht werden. Der Vergleich mit dem ersten Feldversuch erfolgte über Pflanzen, die mit 4000 J behandelt wurden. Es zeigte sich, dass zwischen den Behandlungen am 23. Januar 2025 und am 19. März 2025 kein signifikanter Unterschied erreicht wurde. Das bedeutet, dass der Behandlungstermin im Januar oder März keinen Einfluss auf die Behandlungsstrategie hat. Um den Behandlungszeitraum besser bewerten zu können, mussten weitere Feldversuche durchgeführt werden. Da im Sommer die Pflanzenverfügbarkeit durch behandelte

Flächen geringer ausfiel zudem auch weitere Dissemationsaufgaben anstanden, konnten keine auswertbaren Feldversuche durchgeführt werden. Daher wurden weitere Feldversuche erst nach der Vegetationszeit am 09.12.2025 durchgeführt. Dabei wurden erneut die identischen Energien von 4000 J und 8000 J sowie die Kreismuster als Bestrahlungsmuster ausgewählt. Zusätzlich wurde dieses Mal eine sehr hohe Dosis von 16000 J angewandt, um den Effekt der Dosis auf die Letalität weiter auszuschließen. Aufgrund von mehrmaligem Schneefalls und anhaltender Schneedecke konnten die Ergebnisse noch nicht gesichtet werden. Dies wird nach dem Abtauen des Schnees nachgeholt.

2.4.2 Abweichungen zwischen Planung und Ergebnis

Die im Projektzeitraum geplanten Ziele konnten weitgehend erreicht werden, auch wenn einzelne Arbeitsschritte zeitlich angepasst werden mussten. Ein wesentlicher Einflussfaktor waren witterungsbedingte Einschränkungen, die insbesondere die Durchführung der Feldversuche erschwerten. Ungünstige Wetterlagen führten mehrfach dazu, dass Versuchstermine kurzfristig verschoben werden mussten, da bestimmte Boden- und Bewuchsbedingungen nicht gegeben waren oder ein sicherer Betrieb der Technik nicht gewährleistet werden konnte. Hinzu kam, dass sich die Fertigstellung des Laserwerkzeugs verzögerte und dadurch der geplante Start der Versuchsdurchführungen nach hinten verschoben wurde. Diese Verzögerung wirkte sich unmittelbar auf das gesamte Versuchsvorhaben aus, da zentrale Testreihen erst nach der vollständigen Inbetriebnahme des Systems möglich waren. Trotz dieser Herausforderungen konnten die wesentlichen Ziele dennoch umgesetzt werden, wodurch eine solide Grundlage für eine spätere Weiterentwicklung geschaffen wurde.

Eine weitere zentrale Herausforderung ergab sich beim Laserwerkzeug aus der zuverlässigen Erkennung und Lokalisierung der Zielpflanzen. Besonders anspruchsvoll war dabei die präzise Bestimmung des Wachstumszentrums, die für eine wirksame Behandlung zwingend erforderlich ist. Da die unerwünschten Pflanzen optisch stark mit ihrer grünen Umgebung verschmelzen, entstand eine „Grün-auf-Grün“-Problematik, die die visuelle Detektion erheblich erschwerte. Zusätzlich stellte das exakte Anvisieren des Wachstumszentrums mit dem sehr schmalen Laserstrahl hohe Anforderungen an die gesamte Sensorik und Regeltechnik. Unter diesen Bedingungen erwies sich die Aufgabe als äußerst komplex und konnte zu Beginn der Versuchsreihen nicht vollständig gelöst werden. Auch im weiteren Verlauf blieb die zuverlässige Zentrierung des Strahls auf das Wachstumszentrum eine der größten technischen Hürden, die bis zum Ende der Projektlaufzeit nur teilweise überwunden werden konnte. Nichtsdestotrotz gelang es, die Pflanzen zuverlässig zu erkennen und zumindest in der Nähe des Wachstumszentrums regelmäßig zu behandeln. Dies stellt einen wichtigen Zwischenschritt dar und zeigt, dass die grundlegende Funktionskette bereits erfolgreich umgesetzt werden konnte, auch wenn weiteres Optimierungspotenzial besteht.

Die Kommunikation zwischen dem Permabot und dem Laserwerkzeug wurde in den Versu-

chen, entgegen der ursprünglichen Planung, auf ein Minimum reduziert. Hintergrund hierfür war teils der hohe softwareseitige Entwicklungsaufwand. Dieser beanspruchte die verfügbaren Ressourcen so stark, dass keine ausreichenden Kapazitäten verblieben, um parallel eine umfassende Softwareintegration zwischen Permabot und Laserwerkzeug zu realisieren und damit einen höheren Automatisierungsgrad umzusetzen. Zwar wurden erste Protokollentwürfe für den Datenaustausch zwischen Permabot und Laserwerkzeug konzeptionell ausgearbeitet und testweise erprobt, jedoch nicht finalisiert. Dies lag vor allem daran, dass beide Systeme für die Unkrautbehandlung grundsätzlich unabhängig voneinander funktionsfähig waren und ihre jeweiligen Prozesse autonom ausführen konnten. Um die Stabilität und Zuverlässigkeit der einzelnen Komponenten sicherzustellen, wurde im Projektverlauf bewusst priorisiert, zunächst die Kernfunktionen beider Systeme zu optimieren. Die vollständige Kommunikationsschnittstelle rückte daher vorübergehend in den Hintergrund, um die technische Entwicklung nicht zusätzlich zu belasten und die Versuchsdurchführung zu gewährleisten.

2.4.3 Projektverlauf

Den Auftakt des Projekts bildete das Kickoff-Treffen der OG im Sommer 2023 (17.07.) Abbildung 19. Dies wurde auf einer Grünlandfläche von Herrn Friedel Könecke durchgeführt sowie auf der Grünlandfläche von Herrn Heinrich Bätke.



Abbildung 19: Kickoff Meeting im Sommer 2023 mit den OG Mitgliedern. v.l. Dr. Christian Hennig (PR), Meik Seedorf (LZH), Dr. Merve Wollweber (LZH), Malte Worzischek (LZH, ehem.), Heinrich Bätke (LW), Friedel Könecke (LW)

Alle beteiligten OG Mitglieder waren vor Ort in Person anzutreffen, sodass schon früh zum Auftakt des Projektes ein starker Austausch und hoher Wissenstransfer über die Thematiken

des Projektes existierte. Dafür wurde ein erstes Protokoll für die Versuchsplanung erstellt, das wegweisend für die kommenden Entwicklungsschritte war.

Ein weiteres Treffen der gesamten operationellen Gruppe war für das Frühjahr 2024 vorgesehen. Weitere bilaterale Treffen wurden nach Bedarf parallel zu den Arbeitspaketen abgehalten, um die Arbeitspakete gemeinsam zum Ziel zu führen.

Da geplant war, für das Auffinden der genauen Position der Pflanzen KI-gestützte Bildererkennung per Drohne und im Laserwerkzeug einzusetzen, wurden schon sehr früh als nächster Schritt, Bilder von der Bodenfläche der Grünflächen aufgenommen. Dafür galt es in enger Absprache mit den Landwirten einen Termin zu finden für das Mähen der Fläche, um das anschließende Austreiben der Gräser und des Unkrauts für Bildaufnahmen timen zu können. Die Fotoaufnahmen wurden zu einem Zeitpunkt aufgenommen, an dem spätere Laserbehandlungen auch stattfinden würden. Das frühzeitige Training der KI versprach den Vorteil, mit dem KI-Steuerung für das Laserwerkzeug parallel zur Hardwareentwicklung des Laserwerkzeugs seitens des LZH beginnen zu können. Dafür wurden gezielt Bilder von JKK Pflanzen gemacht sowie willkürliche Bilder von der Grünfläche, um den Datensatz zu vergrößern und das KI-Netz dadurch robuster zu trainieren.



Abbildung 20: Gimbal mit Smartphone für die ersten Aufnahmen des Grünlandbodens. Diese Aufnahmen dienen als Grundlage für das erste KI-Training.



Abbildung 21: Beispielaufnahme des Bodens auf dem Grünland. Die Aufnahme erfolgte in der ungefähren Arbeitshöhe des später verwendeten Laserwerkzeugs. Zu erkennen sind beispielhaft verschiedene Unkrautarten.

Um den Permabot und das Laserwerkzeug miteinander funktionieren zu lassen, wurde ebenfalls frühzeitig die physische Schnittstelle definiert. Dafür ist dem LZH seitens Permarobotics der Werkzeugrahmen (siehe Abbildung 23) für den Werkzeugeinschub im Permabot übergeben worden. Dieser Werkzeugrahmen diente als Basis, um das Laserwerkzeug zu entwickeln.

Um den Werkzeugrahmen mit Hardware zu bestücken, musste dieser zuerst auf einen Halter gesetzt werden. Dies war unabdinglich da durch erste Kalkulation schon bekannt war, dass die Gesamtmasse des Laserwerkzeuges zu hoch ist für Transport per Menschenkraft. Da Entwicklung sowie Lagerung im LZH stattfinden würde, jedoch die Versuche auf dem Grünland der Landwirte, war eine weitere Bedingung den Werkzeughalter mobil zu gestalten. Dementsprechend wurde ein passender Werkzeughalter für das kommende Laserwerkzeug vom LZH angefertigt (siehe Abbildung 22).



Abbildung 22: mobiler Werkzeughalter für das Laserwerkzeug. Der Werkzeughalter diente auch zum Transport des Laserwerkzeuges zu den Versuchsfeldern mittels KFZ.



Abbildung 23: freier Werkzeugrahmen für das Laserwerkzeug von Permarobotics. Dieser dient als Verbindungsstück zwischen Permabot und Werkzeug und diente als Grundlage für den Aufbau des Laserwerkzeuges

Um den Laser und andere Systeme in dem Laserwerkzeug mit Energie zu versorgen, wurde eine Batterie in das Laserwerkzeug integriert. Hierfür wurden zuerst Recherchearbeiten und anschließend Evaluationsarbeiten durchgeführt. Das Gewicht und Volumen der Batterie wurden der Kapazität gegenüber gestellt und analysiert. Auf Basis des zu erwartenden Unkrautdrucks auf den Grünflächen musste eine Entscheidung getroffen werden, wie groß die Batterie zu wählen ist. Abhängig von der Batterie des Laserwerkzeuges konnten Wechselrichter gekauft sowie ein Schaltschrank vorbereitet werden, um die einzelnen Systeme elektrisch zu verbinden. Mit der Entscheidung zur Batterie und dem schon vorhandenen Lasersystem des LZHs konnten weitere Konstruktionsfortschritte getätigt werden, die das Design des Werkzeuges grundlegend

definierten.

Für die Umsetzung der KI-gestützten Bildererkennung für die Pflanzen wurde evaluiert, ob ein Computer mit Grafikkarte zu wählen ist. Zudem wurden weitere Recherchen und Überlegungen gemacht einen Computer heranzuziehen, welcher für den mobilen Einsatz auf dem Feld geeignet war und eine kompakte Größe besitzt.

Die erwähnten Komponenten wurden mechanisch zu einer Profilkonstruktion aus Aluminium, die typisch für den Prototypenbau ist, verbunden und somit zu einem Gesamtsystem erstellt. Dies erfolgte im Laufe des Projektes zu verschiedenen Zeitpunkten, abhängig davon, welche Komponenten zur Verfügung standen. Um die Lasersicherheit zu gewährleisten, sind verschiedene Ansätze während der Entwicklung des Laserwerkzeuges erörtert worden. Zu Beginn des Projektes sind vornehmlich die Sicherheitskonzepte entwickelt worden, die in den späteren Schritten wie z.B. in der Konstruktion aber auch in der Deterministik der Arbeitsschritte des Laserwerkzeuges miteingeflossen sind. Diese sind gegenübergestellt und somit verglichen worden. Die Planung des Sicherheitskonzeptes für das Laserwerkzeug hat besonders bei der Auslegung des Laserwerkzeuges eine große Rolle gespielt, um neben der Funktionsweise des Laserwerkzeuges auch die Sicherheit für nebenstehende Menschen zu gewährleisten, gerade wenn das Gesamtsystem in der Praxis zukünftig vollautomatisch operieren soll.

Parallel zu der Entwicklung und Umsetzung des Laserwerkzeuges für den Permabot wurden erste Gewächshausversuche angestrebt. Dafür wurden Soden aus der Grünlandfläche händisch mit dem Spaten abgetragen und in Schalen für den Transport eingebettet. Die Schalen wurden anschließend mit einem Transporter zum LZH gefahren, um dort die Pflanzen weiterhin zu kultivieren und für spätere Versuche im Labor vorzubereiten. Reale Pflanzen vor Ort zu haben, hatte den Vorteil erste Tests von Kamera und Laser im Setup des Laserwerkzeuges durchführen zu können. In Abbildung 24 und Abbildung 25 ist dabei einmal das Vorgehen dieser Tätigkeit teils dargestellt.



Abbildung 24: Suche nach Unkrautherden auf dem Grünland. Nach Findung mehrerer Unkräuter wie Jakobskreuzkraut auf dem Grünland wurden kleinflächig Soden abgetragen und diese in Schalen eingebettet.



Abbildung 25: Transport der Unkrautschalen am LZH für die weitere Kultivierung der Pflanzen. Die Fläche der Pflanzschalen entspricht der möglichen Behandlungsfläche des Laserwerkzeuges.

Sobald alle Hauptkomponenten (Laser, Batterie, Computer) des Laserwerkzeuges dem LZH vorlagen, konnte angefangen werden, das Laserwerkzeug physisch umzusetzen. Der Aufbau erstreckte sich über das erste halbe Jahr 2024 und endete mit der Erstversion des Laserwerkzeuges ca. Mitte des Jahres 2024. Der Aufbau gestaltete sich dabei iterativ, da Optimierungen während des Aufbaus immer wieder vorgezogen wurden, um die Funktionsfähigkeit bei den Versuchen auf den Feldern sicher zu gewährleisten.

Mit Fertigstellung des Laserwerkzeuges konnten Permabot und Laserwerkzeug verheiratet werden. Wie in Abbildung 26 dargestellt, konnte die "Hochzeit" beider Systeme Mitte des Jahres 2024 gefeiert werden, sodass beide Systeme bezüglich ihrer Hardware auf dem Grünland für die Behandlung von Unkräutern mittels Laser operieren konnten.



Abbildung 26: PR- und LZH-Mitglieder um den Permabot mit Laserwerkzeug nach erfolgreichem Abschluss der "Heirat" beider Systeme am LZH. v.l. Dr. Christian Hennig (PR), Dr. Merve Wollweber (LZH), Meik Seedorf (LZH), Mandy Patzlaff-Günther (LZH), Andreas Blech (PR)

Mit dem funktionierenden Gesamtsystem wurden die ersten Versuche im September 2024 gefahren. Diese hatten neben den eigentlichen Pflanzenversuchen besonders die Funktionalität des Laserwerkzeuges und des Permabots im Fokus.

Vorbereitung und Ablauf der Feldversuche ähnelten sich im Projektverlauf grundsätzlich. Es wurden jeweils zuerst mit den Landwirten die verfügbaren Grünlandflächen bewertet. Die Bewertung der Felder beinhaltete neben der reinen Anzahl der Pflanzen auch deren Zustand und Stadium, sodass die daraus folgenden Ergebnisse auch belastbar sein würden. Da im September das Wachstum der Pflanzen auf den Feldern immer noch stark war, ist eine Mahd ein paar Wochen vor den Versuchen von den Landwirten durchgeführt worden. Dies stellte nicht nur sicher, dass die Unkräuter in einem Stadium vorzufinden sind, in denen eine Behandlung mit dem Laser als sinnvoll bewertet wird, sondern auch solche Unkräuter in der dichten Pflanzendecke nicht nur per Auge, sondern auch durch Drohnenüberflug sowie Laserwerkzeug auffindbar sind.

Nach den kollaborativen Versuchsvorbereitungen aller OG-Mitglieder konnte am vorgesehenen Versuchstag der Permabot sowie das Laserwerkzeug separat von Permarobotics und LZH zum Versuchsfeld transportiert werden. Am Feld selber erfolgte anschließend das Abladen beider Geräte sowie die mechanische Einführung und anschließende Verbindung des Laserwerkzeuges in den Permabot per Hand (siehe Abbildung 29), um sie für den anstehenden Versuchstag als Gesamtsystem operieren zu lassen.

Um die Pflanzen global auf dem Versuchsfeld zu lokalisieren und ihre geografische Lage zu speichern, wurden seitens Permarobotics und dem LZH Pflanzen auf dem Feld ausfindig ge-

macht. Dafür wurde das Feld abgelaufen und die Meta-Daten der Unkräuter mit einem RTK eingespeichert. Das Speichern sowie die Dokumentation der Daten auf dem Feld ist in Abbildung 27 und Abbildung 28 dargestellt.



Abbildung 27: Bildaufnahme eines Jakobskreuzkraut auf dem Grünland. Kameraaufnahmen wurden jeweils unmittelbar vor sowie nach der Behandlung durchgeführt.



Abbildung 28: Speicherung der Meta-Daten einer Jakobskreuzkraut Pflanze über ein mobiles RTK-Gerät von Permarobotics.

Nach der Dokumentation der Unkräuter auf dem Versuchsfeld wurden diese Pflanzen für die Behandlungsversuche mit dem Laser genutzt. Hierfür wurde ein Teil der Pflanzen als Kontrolle nicht behandelt, wie es in Unterabschnitt 2.4.1 näher erläutert ist. Für die Behandlung einer Pflanze wurde diese zunächst mit dem Permabot angefahren, sodass das Laserwerkzeug senkrecht grob über der Pflanze positioniert wurde. Anschließend konnte die Pflanze über das Kamerabild und die KI des Laserwerkzeuges ausfindig gemacht werden. Da diese Abfolge noch nicht fehlerfrei zum ersten Feldversuch funktionierte, wurde der Laserstrahl noch manuell vertikal zu der Unkrautpflanze ausgerichtet. Nach präziser Ausrichtung des Laserwerkzeuges wurde die jeweilige Pflanze durch den Laser punktuell behandelt. Nach der Behandlung konnten für den Abbau der Systeme die Aufbauschritte invertiert durchgeführt werden.

Nach den Erstversuchen wurden weitere Evaluationen durch alle OG Mitglieder durchgeführt. Eine baldige Durchführung einer nächsten Laserbehandlung im Winter 24/25 wurde als sinnvoll von den Landwirten bewertet, da in dieser Periode eine Vegetationsruhe herrscht, die die Unkräuter in einem geringeren Wachstumsstadium verbleiben lässt. Weitere Labor- sowie Feldversuche ergaben, dass die Behandlungen der Pflanzen nicht nur punktuell erfolgen sollten, sondern verschiedene Muster über dem Wachstumszentrum mit dem Laser abgefahren werden sollten. Muster wie in Abbildung 15 wurden am LZH entwickelt und in den kommenden Feldversuchen angewendet.

Die Zweitversuche auf dem Grünland im Januar 2025 wurden nach dem gleichen Ablauf durchgeführt wie vorab der Erstversuch. Da diese Versuche im Winter passierten und keine Schneedecke existierte, waren die Unkräuter einfacher zu finden als wie im Spätsommer 2024. Zudem konnten in den Zweitversuchen mehr Pflanzen ausfindig gemacht werden als im Erstversuch, was die folgende Datenanalyse aussagekräftiger machte.

Die dritten Versuche im März 2025 konnten weiteren Aufschluss liefern zu der Wachstumsrate zwischen behandelten sowie unbehandelten Unkräutern mittels Laser. Allgemein erfolgte die Durchführung der Versuche ab den Zweitversuchen immer ähnlich und robust. Des Weiteren konnte erstmalig das Laser-Werkzeug vollautomatisiert testweise eingesetzt werden (aus Sicherheitsgründen bis auf die Triggerung des Lasers).

Zur Kontrolle und Messung der behandelten Pflanzen aus dem Vorversuch wurde infolgedessen im April 2024 die Frischmasse der Pflanzen bestimmt. Eine Impression dieser Tätigkeit gibt Abbildung 30. Hierfür wurden die ausgewählten Pflanzen vom Testfeld händisch ausgegraben und anschließend mit einer Waage ihre Frischmasse bestimmt.



Abbildung 29: Vorbereitung von Laserwerkzeug und Permabot für die mechanische Kopplung beider Systeme. Dafür wird das Laserwerkzeug auf einer möglichst ebenen Fläche positioniert. Der Permabot kann in der Folge den Werkzeughalter samt Laserwerkzeug anfahren. Wenn Einschub des Permabots und Laserwerkzeug fluchten, kann das Werkzeug über Menschenkraft eingeführt werden.



Abbildung 30: Bestimmung der Frischmasse auf dem Grünland ein paar Wochen nach der Behandlung mit dem Laser. Die Pflanzen wurden ausgegraben, von Erde gesäubert und anschließend gewogen sowie dokumentiert.

Während die meisten Entwicklungen in den ersten Quartalen des Projektes zumindest als Erstversion abgeschlossen wurden, wurden im weiteren Projektverlauf weitere Iterationen, Neu- und Weiterentwicklungen und Aufgaben durchgeführt. So wurde eine Datenbank für die Pflege und Organisation der Bilddaten für das Laserwerkzeug angelegt. Dies war notwendig, da sich mit jedem Versuch und durch die synthetischen Bilddaten (siehe Unterabschnitt 2.4.5) die Bilddatenmenge signifikant erhöhte. Diese hatte neben der Verknüpfung der jeweiligen Metadaten zum zugehörigen Bild die weitere Aufgabe, das Annotieren der Bilddaten für das KI-Training zu strukturieren. Aufgrund des hohen Pflegeaufwands solch einer Datenbank wurde diese auf ein Minimum reduziert. Des Weiteren wurden weitere Bemühungen angestrengt in Bezug auf die Automatisierung des Laserwerkzeugs. Dafür wurde das Gesamtsystem in einer Simulationsumgebung simuliert wie in Unterabschnitt 2.4.5 erläutert. Hauptsächlich wurde die Entwicklung der KI vorangetrieben, die einen Teil der Steuerung des Laserwerkzeugs darstellt. Hierfür wurden verschiedene Strategien entwickelt und anhand der Bilddatenbank getestet. Im Zuge der Weiterentwicklung der KI, wurde das Kamerasetup angepasst, sodass die 3D-Kamera mit dem Laserstrahl sich im Bauraum des Laserwerkzeuges mitbewegt. Auch die Belichtung wurde dafür angepasst, um die Szene stärker auszuleuchten. Das Umrüsten der 3D-Kamera, Belichtung sowie Weiterentwicklung der KI für die präzisere Lokalisierung der Unkräuter mit dem Werkzeug beanspruchte einige Zeit, sodass nicht zu jedem Versuch die Funktionalitäten des Werkzeuges gleich auf waren.

2.4.4 Beitrag des Ergebnisses zu förderpolitischen EIP-Themen

Das Projekt GROW konnte umfangreiche Disseminationsarbeit leisten und aufzeigen, dass der Einsatz von Lasertechnologie nicht nur im Ackerbau, sondern auch im Grünland ein erhebliches Potenzial besitzt. Ein besonderer Schwerpunkt lag darauf, die Praxisnähe der Lösung hervorzuheben, da GROW für viele Anwenderinnen und Anwender in Niedersachsen von großem Interesse ist und einen konkreten Beitrag zur Verbesserung der betrieblichen Realität leisten kann. Gleichzeitig wurde klar, welche Gesichtspunkte neben dem möglichen Behandlungserfolg auch wirtschaftlich im Hinblick auf den Einsatz von Robotik und Lasertechnologie zu bedenken sind. Durch GROW wurde hierzu ein reger Diskurs zwischen Forschung, Landwirten und potenziellen Anbietern ausgelöst, der nachhaltig in der Community wirkt, wie unter anderem durch den stetigen Strom von Informations- und Beratungsanfragen abzulesen ist. Ein wirksames Unkrautmanagement von Wurzelunkräutern wie dem Jakobskreuzkraut mittels Lasertechnologie wird am LZH auch für Ackerflächen erforscht, sodass mit Praxispartnern und weiteren Interessenten aus der Praxis rund um die OG GROW ein reger und immer wieder aktualisierter Austausch rund um diese Problematik stattfand und weiter stattfindet. Dies umfasste auch Anfragen und Diskurs mit Herstellern kommerzieller Laserbehandlungsgeräte und natürlich Landwirten und Verbänden, die den Behandlungseinsatz weiter verfolgen bzw. auf ihre Flächen transferieren und weiterentwickeln wollen.

GROW zeigte, dass eine herbizidfreie Unkrautbehandlung von Wurzelunkräutern technisch realisierbar ist, Wirksamkeit und Wirtschaftlichkeit jedoch noch weitere Forschung und Entwicklung benötigen. Dies bedeutet technisch insbesondere die Weiterentwicklung hin zu kostengünstigeren Geräten und das Heben von Synergieeffekten (z.B. Pflanzenkartierung per Drohnenüberflug für anschließende Präzisionsbehandlung der Unkräuter und Nachweis von Zeigerarten). Für die Terminierung und Dosierung der Behandlung bleibt es notwendig, weitere Erfahrungen auf unterschiedlichen Flächen und mit einer längeren Nachverfolgung des Behandlungserfolgs durchzuführen, um Erkenntnisse abzusichern und weitere Fragen, wie die längerfristige Auswirkung der Behandlung abzuklären. (z.B.: Wird die vegetative Vermehrung durch die Behandlung beeinflusst? Welchen Beitrag kann der Konkurrenzdruck des umliegenden Grünlands zum Behandlungserfolg haben?) Auf der Grundlage von GROW lässt sich bereits ein Prozess skizzieren, der Landwirtinnen und Landwirten künftig eine effiziente und nachhaltige Unkrautbekämpfung ermöglichen könnte.

2.4.5 Nebenergebnisse

Für die Entwicklung der Steuerung des Laserwerkzeugs wurde neben der klassischen, hardwarebasierten Softwareentwicklung eine zusätzliche Schnittstelle in Form eines digitalen Zwillings geschaffen. Durch diese Erweiterung konnte der Entwicklungsprozess deutlich beschleunigt und gleichzeitig robuster gestaltet werden. Der digitale Zwilling ermöglicht es, sicherheitsrelevante Effekte sowie komplexe Systemzustände realitätsnah zu simulieren, ohne aufwendige und risikobehaftete Versuchsaufbauten durchführen zu müssen. Zudem erlaubt er eine Entwicklung, die wesentlich näher an den tatsächlichen Einsatzbedingungen im Feld stattfindet und nicht ausschließlich unter Laborbedingungen ohne den Permabot. Dadurch konnte die Steuerung des Laserwerkzeugs effizienter, praxisnäher und zuverlässiger konzipiert werden. Des Weiteren ist eine Parallelisierung der allgemeinen Entwicklungsschritte möglich, da vor der vollendeten Umsetzung des Laserwerkzeugs als Hardware, die Software für dieses schon praxisnah entwickelt werden kann. Natürlich ist die reine Entwicklung anhand des digitalen Zwillings jedoch nicht ausreichend für die Entwicklung der Laserwerkzeugsteuerung.

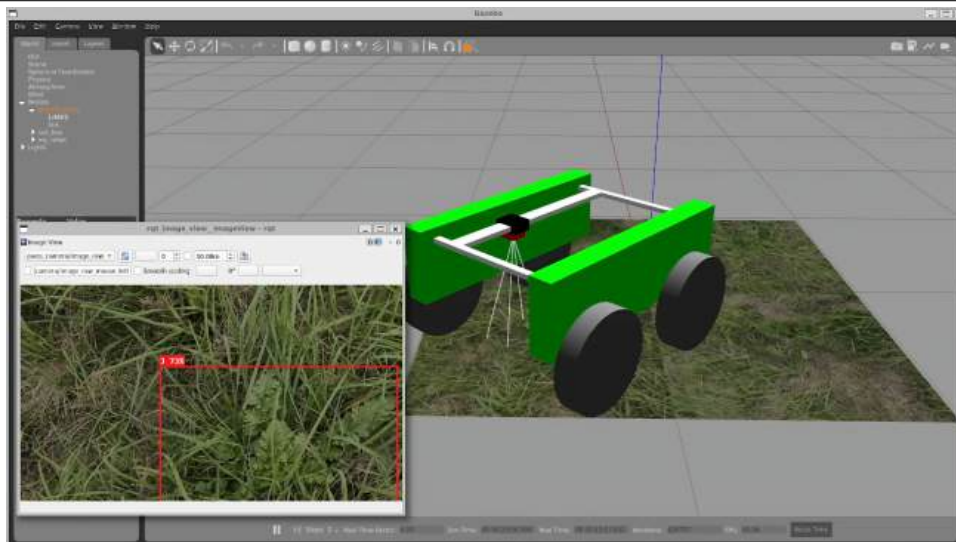


Abbildung 31: simulierte Testumgebung für die Softwareentwicklung der Laserwerkzeugsteuerung. Sie ist grundlegend für die Behandlung von Jakobskreuzkraut in Zusammenarbeit mit dem Permabot. Beide Systeme sind hier simplifiziert modelliert worden. Das Farbbild der 3D-Kamera, welche am Schlitten montierte ist, kann links unten im Bild betrachtet werden. Für die Simulation wurde hier noch der Bounding Box Algorithmus genutzt, welcher für eine höhere Präzision später nicht mehr verwendet wurde.

Des Weiteren wurde der Bilddatensatz, welcher in einer Datenbank gespeichert und gepflegt wurde, um Bilddaten von synthetischen Bilddaten erweitert. Dafür wurden synthetische Daten von Pflanzen generiert, welche den realen Aufnahmen der Unkräuter und der Morphologie der Pflanzen auf dem Grünland nahe kommen sollten. Diese wurden samt der Umgebung zunächst nachmodelliert, wie in Abbildung 34 zu erkennen, und anschließend in ein nahezu real erscheinendes Bild gerendert (siehe Abbildung 32). Die daraus entstandenen Bilder konnten den Bilddatensatz stark erweitern und ergaben die Möglichkeit, Umweltparameter stark manuell anpassen zu können. Die Realbilder, die händisch per Kamera aufgenommen wurden, haben den Nachteil, abhängig von Belichtung durch Wetter, Wachstumsstadium usw. zu sein. Wenn nur diese Realbilder für das Training der KI genutzt werden, bilden sie nur den Zustand zu den jeweils gegebenen Zeitpunkten ab, welche nicht unbedingt dem Zustand zum Zeitpunkt der Versuche entsprechen. In den Versuchen muss dann z.B. Jakobskreuzkraut durch die KI wiedergefunden werden, obwohl diese für das Training ganz andere Aufnahmen bekommen hat, was die Erkennungsrate der KI natürlicherweise verschlechtert. In das Training der verwendeten KI wurde jedoch nur ein sehr kleiner Teil der synthetischen Daten aufgenommen, da die herkömmlichen Bilder für die Robustheit des KI-Netzes ausreichten. Wahrscheinlich, weil das zuvor aufgenommene Bildmaterial die tatsächlichen natürlichen Varianzen zu den Versuchszeitpunkten bereits gut abbildete. Dennoch birgt dieses Vorgehen hohes Potenzial, besonders wenn Grünlandflächen sich stärker unterscheiden.



Abbildung 32: synthetisch generierte Draufsicht auf Grünland mit einer Jakobskreuzkraut Pflanze im Zentrum des Bildes. Das Bild kommt den realen Aufnahmen des Grünlandbodens sehr nahe und kann damit den Datensatz für das KI-Training erweitern.

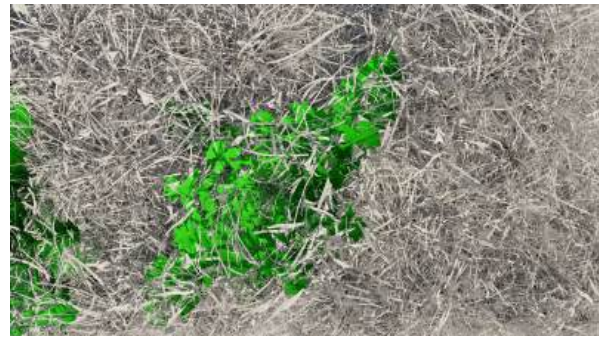


Abbildung 33: Draufsicht auf das synthetisch generierte Bild. Das JKK ist grün und die umliegenden Gräser sind grau gekennzeichnet. In diesem Fall ist das Bild noch nicht gerendert und ist klar von einem real aufgenommenen Bild unterscheidbar.

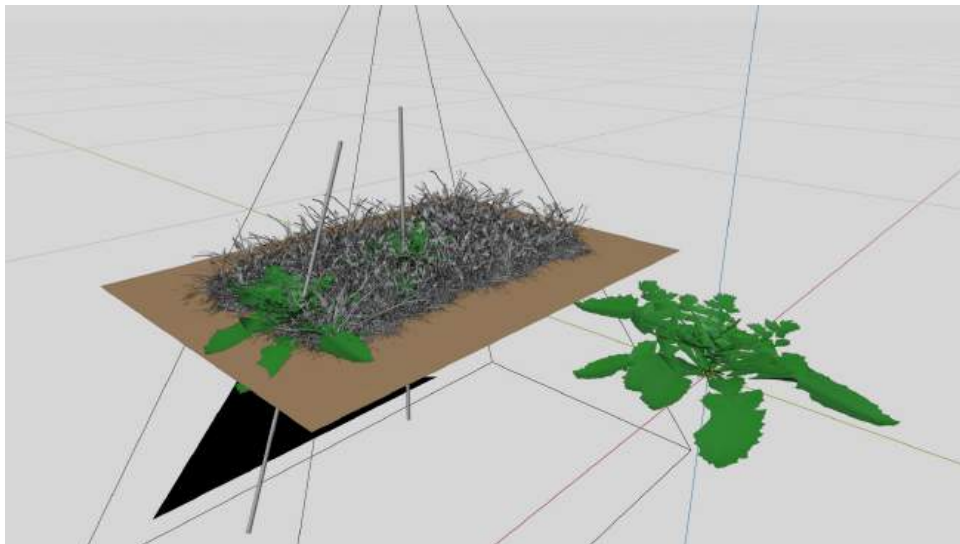


Abbildung 34: modellierte Grünlandfläche als Szenerie für die Erzeugung von synthetischen Daten im Bilddatensatz der Unkräuter. Links ist die Grünlandfläche mit mehreren Unkräutern zu sehen. Rechts auf der Abbildung ist beispielhaft ein modelliertes Jakobskreuzkraut abgebildet.

2.5 Nutzen der Ergebnisse für die Praxis

Im Projektverlauf konnte deutlich gezeigt werden, dass das entwickelte Gesamtsystem aus PermaBot und Laserwerkzeug grundsätzlich funktionsfähig ist und die wesentlichen technischen Komponenten zuverlässig arbeiten. Darüber hinaus wurde der technologische Umfang wesentlich klarer fassbar, da erstmals quantifizierbar wurde, welche technischen Ressourcen sowie Parameter in der Behandlung für den Betrieb des Lasersystems tatsächlich notwendig sind.

Die eingesetzte Photonik zeigt große Stärken, insbesondere hinsichtlich Präzision und Wirksamkeit. Die verwendete Wellenlänge von 2 μm bei einer Ausgangsleistung von 100 W konnte

wie in Unterabschnitt 2.4.1 dargestellt, schon einen starken Energieeintrag in die Pflanze abbilden. Dennoch ist der praktische Einsatz dieses verwendeten Lasers im Vergleich zu Lasertechnologien in anderen Wellenlängenbereichen anspruchsvoller. Das verwendete Lasersystem ist relativ groß, schwer und kostspielig, verglichen zu Lasertechnologien mit anderer Wellenlänge. Dies erschwert ihre Integration in mobile Maschinen, birgt aber großes Potenzial in der Behandlung aufgrund des hohen thermischen Energieeintrags in die Pflanzen. Ein generelles Vorteil der eingesetzten Technologie besteht darin, dass der verwendete Laser fasergeführt eingesetzt werden kann, was die Einbindung in landwirtschaftliche Prozesse gegenüber spiegelgeführten Systemen erheblich erleichtert. Die Kombination aus fester Faseranbindung und einem spiegelführenden System für bewegliche Achsen erwies sich insgesamt als sehr robust für den Außeneinsatz. Für den Einsatz von Bearbeitungslasern in der Landwirtschaft müssen, ähnlich wie bei anderen Technologien, Ressourcen freigemacht werden in Bezug auf Sicherheitsvorkehrungen. So müssen Laserarbeitsräume zum Beispiel durch entsprechende Metallverkleidungen und/oder Laserschutzvorhänge abgeschirmt werden, um einen sicheren Betrieb zu gewährleisten.

Für die Energieversorgung und als Energiespeicher wurde eine ausreichend leistungsfähige Batterie gewählt, die den Energiebedarf des Systems stabil deckt. Während der Versuchsfahrt lag der durchschnittliche Verbrauch bei etwa 25 % der Batteriekapazität. In dieser Zeit konnten rund 8 kJ Laserenergie auf etwa 30 Pflanzen appliziert werden. Ob dieser Energiebedarf typisch für die verwendete Wellenlänge und Zielapplikation in der Praxis ist, muss jedoch mit Vorsicht bewertet werden und Bedarf weiterer Untersuchungen.

Auch die Arbeiten im Bereich der KI lieferten wichtige Erkenntnisse. Die Datenerfassung im Feld stellte sich als äußerst aufwendig heraus, da Bilder nur unter passenden Bedingungen, richtige Tageszeit, Beleuchtung, Feuchte, Pflanzenzustand, verwertbar sind. Um diesen Aufwand zu reduzieren und die Modellrobustheit zu steigern, wurde daher ergänzend mit synthetisch erzeugten Daten gearbeitet, wie in Unterabschnitt 2.4.5 ausführlicher beschrieben. Diese ermöglichen eine vollständige Kontrolle über Variablen wie Pflanzenform, Beleuchtung oder Hintergrund und eignen sich daher gut zur Ergänzung realer Aufnahmen. Für eine robuste KI-Erkennung in der Praxis empfiehlt sich daher eindeutig eine Kombination aus beiden Datenquellen. Besonders herausfordernd erwies sich die Identifikation des Wachstumszentrums der Pflanzen. Die Schwierigkeit liegt weniger in der reinen KI-Leistung, sondern vielmehr in der biologischen Struktur der Pflanzen selbst: Die Morphologie ist stark variabel, das Wachstumszentrum oft verdeckt, und aus der Draufsicht lässt sich das Wachstumszentrum vieler Wurzelunkräuter nicht eindeutig bestimmen. In der Praxis kann dieser Punkt häufig nur durch manuelles Tasten und Prüfen am Feld identifiziert werden, bevor der Erkennungsalgorithmus dies präzise erkennt. Diese Problematik ist daher nicht allein technisch bedingt, sondern strukturell in der Natur der Pflanzen verankert und benötigt für eine Anwendung in der Praxis einen hohen Entwicklungsaufwand, um die Zielfindung der Pflanzen präzise und zuverlässig zu gestalten. Das Laserwerkzeug besitzt ein Gesamtgewicht von rund 300 kg und weist Abmessungen von

etwa 1,5 m × 1 m × 1 m (H×B×L) auf. In seiner gegenwärtigen Form ist das System ausschließlich in Kombination mit dem Permabot voll einsatzfähig. Zwar lässt sich das Lasermodule grundsätzlich auch unabhängig davon betreiben, jedoch fehlt ihm ohne den Roboter die notwendige Mobilität für einen praktischen Feldeinsatz. Aufgrund seines Gewichts und seiner Bauform kann das Gerät problemlos mit einem Transporter oder auf einem Anhänger bewegt werden. Damit stellt es ein technisch funktionsfähiges und praxistaugliches erstes System dar, das zeigt, wie Lasertechnologie perspektivisch in der Grünlandbewirtschaftung eingesetzt werden kann. Sein zukünftiger Anwendungsbereich hängt maßgeblich von der Weiterentwicklung und dem Training der KI ab. Durch die Erweiterung des Modells auf weitere Pflanzenarten ließe sich das Laserwerkzeug in der Praxis perspektivisch auch für andere unerwünschte Pflanzen oder Schadpflanzen nutzen und damit deutlich vielseitiger in verschiedenen Bewirtschaftungssystemen einsetzen.

2.6 (Geplante) Verwertung und Nutzung der Ergebnisse

Das Laser Zentrum Hannover e. V. (LZH) ist eine unabhängige Forschungseinrichtung, die sich darauf spezialisiert hat, neue Einsatzmöglichkeiten für Lasertechnologien zu erschließen. Erkenntnisse aus Projekten wie diesem dienen als Basis für weitere wissenschaftliche Arbeiten, in denen sowohl technische Ansätze verfeinert als auch offene Fragen systematisch untersucht werden. Parallel dazu laufen am LZH verschiedene Forschungsinitiativen, die sich mit der Einbindung von Lasersystemen in landwirtschaftliche Maschinen und Robotik befassen. Auf dieser Grundlage wird aktuell bewertet, in welchem Umfang die erzielten Ergebnisse in zukünftige Entwicklungen einfließen können und ob sich langfristig eine Überführung in ein praxisreifes, kommerzielles Behandlungssystem realisieren lässt.

2.7 Wirtschaftliche und wissenschaftliche Anschlussfähigkeit

Das LZH ist stets bestrebt eine wirtschaftliche Verwertung auch über neue Erfindungen und erteilte Schutzrechte zu erreichen. Diese Schutzrechte werden je nach Erfindung auch als Gemeinschaftspatente mit den Projektpartnern angestrebt und dann verwertet, bevorzugt über eine Auslizenzierung zu marktüblichen Konditionen an die Projektpartner. Im Rahmen des GROW-Projektes konnte bisher keine IP identifiziert werden, die zur Anmeldung von Schutzrechten verwertet werden konnte. Auch nach Projektende werden die Projektergebnisse zur Identifikation von verwertbaren Erfindungen oder anzumeldenden Schutzrechten weiter analysiert. Eine weitere wirtschaftliche Verwertung des gebauten Laserwerkzeugs, z.B. mit einer Weiterentwicklung zu einem kleinserientauglichen Gerät, würde zunächst noch weitere Arbeiten im Hinblick auf eine Verbesserung der Wirksamkeit und letztlich der Wirtschaftlichkeit im Zusammenspiel mit dem Roboter erfordern. Eine Überarbeitung des Geräts auch im Hinblick auf die

Anschlussfähigkeit an andere kommerzielle Roboterplattformen wird derzeit analysiert. Dabei steht zum aktuellen Stand zunächst jedoch eine erweiterte Kompatibilität zur Durchführung aufbauender wissenschaftlicher Arbeiten im Vordergrund.

Wissenschaftlich fließen die Ergebnisse des Projektes GROW in die Durchführung weiterer Forschungsprojekte im Hinblick auf das laserbasierte Unkrautmanagement ein. Hervorzuheben ist hier das vom BMLEH seit Ende 2024 geförderte Projekt STRALAMENSU, das sich mit der Behandlung von Wurzelunkräutern auf Ackerland befasst. Die Erkenntnisse aus GROW zur Behandlungsstrategie konnten hier bereits eine wertvolle Basis liefern und so direkt weiter genutzt werden. Aus wissenschaftlicher Sicht sind wie berichtet insbesondere die Verbesserung der Wirksamkeit von Einzelbehandlungen und auch Wirksamkeitsbetrachtungen zu Mehrfachbehandlungen im Jahresverlauf und unter Berücksichtigung des Konkurrenzdrucks weiter zu verfolgen. Außerdem sollten weitere Optimierungen im Hinblick auf die Investitionskosten für ein solches Laserwerkzeug durchgeführt werden. In STRALAMENSU wird aufbauend auf den GROW-Erfahrungen eine neuartige sägende Lasertechnologie eingesetzt, um nach Möglichkeit höhere Einwirktiefen in den Wurzelapparat zu erreichen. Erkenntnisse aus beiden Projekten sollten und könnten zukünftig in weiteren praxisnahen Forschungsprojekten zum Unkrautmanagement per Laser im Grünland zusammengeführt werden. Dazu gibt es bereits Anfragen und Gespräche insbesondere mit weiteren interessierten Praxispartnern, die gemeinsam mit dem LZH entsprechende Projekte angehen und gemeinsam Fördermittel dafür einwerben wollen.

2.8 Kommunikations- und Disseminationskonzept

Eine erste Präsentationsmöglichkeit des Projekts ergab sich beim EIP-Agri Gartenfest 2023, bei dem das Vorhaben erstmals einem fachkundigen Publikum vorgestellt wurde. Auf der Veranstaltungsfläche des Niedersächsisches Landwirtschaftsministeriums war der Permabot, wie in Abbildung 35 dargestellt, gut sichtbar zu sehen. Obwohl diese Veranstaltung nicht öffentlich zugänglich war, bot sie dennoch eine wertvolle Gelegenheit, das Projekt anderen Interessierten aus dem Bereich der Innovations- und Förderprojekte näherzubringen und erste fachliche Rückmeldungen zu erhalten. Die erste umfassende Vorstellung gegenüber der breiten Öffentlichkeit erfolgte anschließend auf der Agritechnica 2023, der weltweit größten Leitmesse für Landtechnik. Das Laser Zentrum Hannover e. V. präsentierte das Projekt dort in seinem eigenen Ausstellungsbereich auf der Fläche des Agrotech Valley Forums und konnte zahlreiche Besucherinnen und Besucher aus Landwirtschaft, Forschung und Industrie auf GROW aufmerksam machen. Die direkte Rückmeldung des Fachpublikums erwies sich als besonders hilfreich, da Landwirte die Problematik rund um die zu bekämpfenden Unkräuter aus ihrem Arbeitsalltag sehr gut kennen. Dadurch entstanden wertvolle Impulse und praxisnahe Anregungen, die zur Weiterentwicklung des Projekts beitragen konnten und das Potenzial intelligenter, autonomer Lösungen zur Unkrautregulierung noch einmal deutlich machten.



Abbildung 35: Permabot ausgestellt auf dem EIP-Sommerfest 2023 von Permarobotics.



Abbildung 36: GROW Vorhaben vorgestellt auf der Agritechnica 2023 auf dem Stand des LZH.

Unter anderem wurde das Laser Zentrum Hannover e.V. im Jahr 2024 zur „Woche der Umwelt“ eingeladen, einer bundesweit renommierten Veranstaltung, die vom Bundespräsidenten initiiert und im Park von Schloss Bellevue ausgerichtet wird. Auch hier bot sich die Gelegenheit, das Projekt GROW einem ausgewählten und fachkundigen Publikum aus unterschiedlichen Bereichen der Landwirtschaft, Forschung und Politik vorzustellen (siehe Abbildung 37). Die hohe Reichweite des Bundespräsidialamts sorgte dafür, dass zahlreiche Expertinnen und Experten aus verschiedenen Bundesländern auf das Projekt aufmerksam wurden. In diesem Rahmen konnten besonders wertvolle Gespräche geführt werden, die sowohl fachliche Rückmeldungen als auch neue Impulse für die Weiterentwicklung lieferten. Zu diesem Zeitpunkt war das Laserwerkzeug bereits fertiggestellt, auch wenn Feldversuche noch ausstanden. Dadurch war es möglich, bereits sehr spezifisch über geplante Versuchsszenarien, technische Herausforderungen und potenzielle Einsatzstrategien zu diskutieren. Die Veranstaltung erwies sich als besonders gewinnbringend, da sie nicht nur die Bekanntheit des Projekts erhöhte, sondern auch dazu beitrug, fachliche Strategien und mögliche Vorgehensweisen kritisch zu reflektieren und weiter zu schärfen.

Im Rahmen des EIP-Gartenfests 2024 wurde das Projekt GROW erneut präsentiert (siehe Abbildung 38). Anders als im Vorjahr konnte nun das fertiggestellte Laserwerkzeug vorgestellt werden, das vor Ort sogar Demonstrationsbehandlungen an einer dafür vorbereiteten Pflanschale durchführte. Dadurch wurde der technologische Ansatz des Projekts deutlich anschaulicher und für das Publikum unmittelbar nachvollziehbar. Die Live-Demonstration ermöglichte es den Besucherinnen und Besuchern, das Funktionsprinzip des Laserwerkzeugs sowie dessen präzise und kontaktlose Wirkungsweise direkt zu beobachten. Somit konnte das Vorhaben nicht nur theoretisch erläutert, sondern in seiner praktischen Anwendung eindrucksvoll veranschaulicht werden, was zu einem besseren Verständnis und gesteigertem Interesse an den Projektzielen beitrug.



Abbildung 37: Präsentation des GROW Projektes auf der Woche der Umwelt 2024 beim Bundespräsidenten.



Abbildung 38: GROW Vorhaben vorgestellt auf dem EIP-Sommerfest 2024. Hier konnte erstmals die Hardware des Laserwerkzeuges vorgestellt werden. Zudem war eine interaktive Demo für die Laserbehandlung eingebaut worden, um interessierten Besuchern das Konzept des Laserwerkzeuges besser zu verdeutlichen.

Im Sommer 2025 war das Projekt GROW auf den Öko-Feldtagen vertreten und erhielt dort erneut die Möglichkeit, seine Entwicklungen vorzustellen. Das Team des LZH präsentierte das Projekt vor Ort mit dem Poster Abbildung 39. Die Veranstaltung, die als wichtiger Ort für die Präsentation landwirtschaftlicher Innovationen gilt, bot ideale Bedingungen für zahlreiche Fachgespräche. Bei gutem Wetter konnten interessierte Besucherinnen und Besucher umfassend über den bislang einzigartigen Ansatz der laserbasierten Unkrautbehandlung im Grünland informiert werden. Dadurch trug die Teilnahme wesentlich zur weiteren Bekanntmachung des Projekts bei.



Abbildung 39: Präsentation des GROW Vorhabens mittels Roll-Up auf den Öko-Feldtagen 2025.

Im Anschluss an die Öko-Feldtage begleitete die Fachzeitschrift Land & Forst das GROW-Projektteam bei den demonstrativen Feldversuchen im August 2025 (siehe Abbildung 40). Während dieser Termine konnte ein detaillierter Einblick in die praktische Durchführung des Projekts vermittelt werden. Darüber hinaus wurden Interviews mit den Projektbeteiligten geführt, wobei insbesondere die Perspektive der Landwirte hervorgehoben wurde. Dies ermöglichte eine differenzierte und praxisnahe Darstellung der Projektinhalte. Das Projekt GROW wurde zudem auf der Titelseite der entsprechenden Ausgabe präsentiert, wodurch die öffentliche Aufmerksamkeit weiter gesteigert werden konnte. Neben der gedruckten Ausgabe veröffentlichte Land & Forst ergänzende, gekürzte Beiträge in digitaler Form, bestehend aus Text-, Video- und Bildmaterial, um eine noch breitere Zielgruppe zu erreichen.



Abbildung 40: Vorstellung des Projektes GROW in der Zeitschrift Land und Forst Ausgabe 34. Das Projekt hat es auf die Titelseite des Magazins geschafft. Quelle: [instagram.com/landundforst](https://www.instagram.com/landundforst)

Kurz nach dem Zusammenkommen mit Land und Forst wurde ein eigener Feldtag auf einer Fläche von Herrn Könecke ausgerichtet. Diese Aktivität wurde in Abschnitt 2.3 näher erläutert.

Auf der Agritechnica 2025 konnte das Projekt GROW erneut einem internationalen Fachpublikum vorgestellt werden – diesmal jedoch mit einem deutlich weiterentwickelten Stand. Im Gegensatz zur Präsentation im Jahr 2023 stand nun ein vollständig funktionsfähiges System zur Verfügung, inklusive der ersten Versuchsergebnisse aus dem Praxiseinsatz im Grünland. Dies ermöglichte eine wesentlich tiefere Einordnung des technologischen Potenzials. Im Ausstellungsbereich des Laser Zentrum Hannover e. V. wurde das Projekt GROW per Videomaterial (siehe (Abbildung 41) gezeigt und mit bestehenden Technologien zur punktuellen oder mechanischen Unkrautbehandlung verglichen. Diese Gegenüberstellung bot Besucherinnen und Besuchern eine fundierte Grundlage, um Vor- und Nachteile verschiedener Verfahren zu diskutieren. Durch die konkreten Feldergebnisse ergaben sich zahlreiche fachliche Gespräche, die für die Weiterentwicklung von GROW und darüber hinaus äußerst wertvoll waren. Das konstruktive Feedback aus Landwirtschaft, Forschung und Technik bestätigte das Innovationspotenzial des Projekts und zeigte gleichzeitig weitere Anwendungsperspektiven für die Zukunft auf.



Abbildung 41: GROW Vorhaben vorgestellt auf der Agritechnica 2025 im Präsentationsbereich des LZH. Zu erkennen sind der Niedersächsische Wirtschaftsminister Grant Hendrik Tonne und die Geschäftsführung des LZHs vertreten durch Dietmar Kracht.



Abbildung 42: GROW Vorhaben vorgestellt auf dem Pflanzenbautag 2026 des Ostalbkreis. v.l. Meik Seedorf (LZH), Friedel Könecke (LW)

Im Januar 2026 wurden das Projekt auf Anfrage auf dem Pflanzenbautag 2026 des Ostalbkreis (siehe Abbildung 42) vorgestellt. Hierfür haben sich das LZH sowie Landwirt Friedel Könecke einem fachkundigen Publikum gegenübergestellt um den Inhalt und Ergebnisse des Vorhabens zu erläutern.

Abbildungsverzeichnis

1	geographische Lage der OG-Mitglieder im Raum Hannover zum Projektbeginn. Als Referenz ist die Landwirtschaftskammer von Hannover eingezeichnet (Quelle: openstreetmap.org).	5
1	Impressionen vom GROW Feldtag 2025 auf einer Grünlandfläche in Isernhagen.	15
2	Publikum und OG Mitglieder am GROW Feldtag 2025 in Diskussion.	15
3	OG-Mitglieder neben dem Permabot mit Laserwerkzeug beim GROW Feldtag 2025 in Isernhagen. v.l. Dr. Merve Wollweber (LZH), Meik Seedorf (LZH), Andreas Blech (PR), Friedel Könecke (LW), Heinrich Bätke (LW), Mandy Patzlaff-Günther (LZH)	15
4	Darstellung des Gesamtsystems bestehend aus dem Permabot sowie dem Laserwerkzeug, welches in der Werkzeugaufnahme des Permabots eingeschoben ist.	17
5	Verwendetes Portalsystem für das Laserwerkzeug. Die Kollimatorhalterung sowie das Spiegelsystem ist auf den Achsen des Portalsystems angebracht. Zudem ist die 3D-Kamera unterhalb des Schlittens abgebildet (blaues Teil in der Mitte des Bildes).	18
6	Verwendete Hauptkomponenten oberhalb des Werkzeugrahmens. Im Rack-Einschub auf der linken Seite im Bild sind die schwarze Batterie sowie das graue Lasergehäuse darunter abgebildet. Auf der rechten Seite ist der graue Schaltschrank sowie der blaue Wechselrichter/ Ladegerät zu erkennen.	18
7	Laserwerkzeug in der Konstruktionsumgebung. Die Hauptkomponenten des Laserwerkzeugs liegen oberhalb des Werkzeugrahmens mit Rollen zum Einschub in die Werkzeugaufnahme des Permabot. Darunter liegt der Arbeitsraum des Lasers, der im Hinblick auf die Lasersicherheit eingehaust ist. Zudem kann das Panel mit den externen Schnittstellen zum Laserwerkzeug in der Mitte des Bildes erkannt werden.	19
8	Gezielte Nahaufnahme einer Jakobskreuzkrautrosette im Grünland aus geringer Distanz. Die Pflanze ist für die Erkennung per Kamera und KI ideal da ein eindeutiges Wachstumszentrum erkennbar ist, welches nicht verdeckt ist.	20

9	Bodenaufnahme der Kamera vom Grünland mit diversen Pflanzen aus einer Distanz von ca. einem halben Meter. Zu Erkennen sind viele verschiedene Pflanzen. Darunter sind auch zu bekämpfende Zielunkräuter. Aufgrund der Dichte der Pflanzen sind diese nur erschwert zu erkennen.	20
10	Beispielpflanze (Jakobskreuzkraut) zur Ansicht der verschiedenen Probleme. Obwohl die Pflanze klar zu identifizieren ist, kann ein optimaler Behandlungspunkt nicht eindeutig fest gemacht werden. Die Pflanze ist nicht ideal waagrecht ausgetrieben. Zudem verdecken Blätter die Austriebe der Pflanze aus dem Boden. Letztendlich resultiert daraus auch eine schlechtere Belichtung in Nähe des Bodens.	22
11	Auftreten der Unkräuter auf dem Grünlandboden. Vier grobe Konfigurationen konnten aus Beobachtungen und Pflanzenaufnahmen definiert werden, von denen meistens eine Kombination auftritt. I. Pflanzenblätter verdecken sich selber und somit auch teilweise das Wachstumszentrum. II. Die Pflanze ist seitlich ausgetrieben. Es lassen sich nur erschwert Rückschlüsse ziehen, wo sich das Wachstumszentrum befindet. III. Andere Pflanzen verdecken das Wachstumszentrum des Zielunkrauts. IV. Organisches Material oder Erde verdecken den Austribspunkt der Pflanze im Bodens, was zu keiner eindeutigen Identifikation des Wachstumszentrums führt.	22
12	Annotiertes Jakobskreuzkraut aus dem Datensatz. Das rot gekennzeichnet Rechteck grenzt die Pflanze mittels "Bounding Box" für das KI-Training ein. Spätere Umsetzungen haben sich auf die semantische Segmentierung gestützt, welches das aufwendigere Annotieren mittels Konturen (blau) erforderte.	23
13	Inferenzen der semantischen Segmentierung auf einigen Aufnahmen des Datensatzes. Die KI erkennt unter anderem die Acker-Kratzdistel (hellblau) sowie das Jakobskreuzkraut (dunkelblau) auf einigen Bildern.	24
14	Zielerkennung des Wachstumszentrums mit klassischer Bilderkennung. Oben links ist die Beispielpflanze ohne klar identifizierbares Wachstumszentrum abgebildet. Oben rechts ist gelb die Region markiert, in der nach menschlichem Ermessen das Wachstumszentrum und somit auch das Ziel für den Laser grob vermutet wird. Unten links und unten rechts sind die Ergebnisse der beiden vorgestellten Algorithmen gezeigt.	25
15	Bestrahlungsmuster v.l.: Stern, Spirale, Kreise, die der Laser über dem Wachstumszentrum der jeweiligen Pflanze abfährt. Mittelpunkt des Musters ist jeweils das Wuchszentrum der Pflanze.	26
16	Verlauf einer behandelten JKK Pflanze. t-1: vor der Behandlung; t0: direkt nach der Behandlung t1-t3: 1-3 Wochen nach Behandlung. Unten rechts ist das Bestrahlungsmuster aufgezeigt, mit der das Wachstumszentrum der Pflanze mit dem Laser abgefahren wurde.	27

17	Frischmasse von Jakobskreuzkraut in Abhängigkeit vom Behandlungsmuster drei Wochen nach der Behandlung; N=18 pro Behandlungsmuster.	28
18	Entwicklungsverlauf einer behandelten Pflanze (Applikation: Kreismuster). Von links: 1. Nach Bestrahlung, 2. Zwei Wochen nach Behandlung, 3. Fünf Wochen nach Behandlung, 4. Zehn Wochen nach Behandlung.	29
19	Kickoff Meeting im Sommer 2023 mit den OG Mitgliedern. v.l. Dr. Christian Hennig (PR), Meik Seedorf (LZH), Dr. Merve Wollweber (LZH), Malte Worzischek (LZH, ehem.), Heinrich Bätke (LW), Friedel Könecke (LW)	31
20	Gimbal mit Smartphone für die ersten Aufnahmen des Grünlandbodens. Diese Aufnahmen dienten als Grundlage für das erste KI-Training.	32
21	Beispielaufnahme des Bodens auf dem Grünland. Die Aufnahme erfolgte in der ungefähren Arbeitshöhe des später verwendeten Laserwerkzeugs. Zu erkennen sind beispielhaft verschiedene Unkrautarten.	32
22	mobiler Werkzeughalter für das Laserwerkzeug. Der Werkzeughalter diente auch zum Transport des Laserwerkzeuges zu den Versuchsfeldern mittels KFZ.	33
23	freier Werkzeugrahmen für das Laserwerkzeug von Permarobotics. Dieser dient als Verbindungsstück zwischen Permabot und Werkzeug und diente als Grundlage für den Aufbau des Laserwerkzeuges	33
24	Suche nach Unkrautherden auf dem Grünland. Nach Findung mehrerer Unkräuter wie Jakobskreuzkraut auf dem Grünland wurden kleinflächig Soden abgetragen und diese in Schalen eingebettet.	35
25	Transport der Unkrautschalen am LZH für die weitere Kultivierung der Pflanzen. Die Fläche der Pflanzschalen entspricht der möglichen Behandlungsfläche des Laserwerkzeuges.	35
26	PR- und LZH-Mitglieder um den Permabot mit Laserwerkzeug nach erfolgreichem Abschluss der "Heirat" beider Systeme am LZH. v.l. Dr. Christian Hennig (PR), Dr. Merve Wollweber (LZH), Meik Seedorf (LZH), Mandy Patzlaff-Günther (LZH), Andreas Blech (PR)	36
27	Bildaufnahme eines Jakobskreuzkraut auf dem Grünland. Kameraaufnahmen wurden jeweils unmittelbar vor sowie nach der Behandlung durchgeführt.	37
28	Speicherung der Meta-Daten einer Jakobskreuzkraut Pflanze über ein mobiles RTK-Gerät von Permarobotics.	37
29	Vorbereitung von Laserwerkzeug und Permabot für die mechanische Kopplung beider Systeme. Dafür wird das Laserwerkzeug auf einer möglichst ebenen Fläche positioniert. Der Permabot kann in der Folge den Werkzeughalter samt Laserwerkzeug anfahren. Wenn Einschub des Permabots und Laserwerkzeug fluchten, kann das Werkzeug über Menschenkraft eingeführt werden.	38

30	Bestimmung der Frischmasse auf dem Grünland ein paar Wochen nach der Behandlung mit dem Laser. Die Pflanzen wurden ausgegraben, von Erde gesäubert und anschließend gewogen sowie dokumentiert.	38
31	simulierte Testumgebung für die Softwareentwicklung der Laserwerkzeugsteuerung. Sie ist grundlegend für die Behandlung von Jakobskreuzkraut in Zusammenarbeit mit dem Permabot. Beide Systeme sind hier simplifiziert modelliert worden. Das Farbbild der 3D-Kamera, welche am Schlitten montierte ist, kann links unten im Bild betrachtet werden. Für die Simulation wurde hier noch der Bounding Box Algorithmus genutzt, welcher für eine höhere Präzision später nicht mehr verwendet wurde.	41
32	synthetisch generierte Draufsicht auf Grünland mit einer Jakobskreuzkraut Pflanze im Zentrum des Bildes. Das Bild kommt den realen Aufnahmen des Grünlandbodens sehr nahe und kann damit den Datensatz für das KI-Training erweitern.	42
33	Draufsicht auf das synthetisch generierte Bild. Das JKK ist grün und die umliegenden Gräser sind grau gekennzeichnet. In diesem Fall ist das Bild noch nicht gerendert und ist klar von einem real aufgenommenen Bild unterscheidbar. . . .	42
34	modellierte Grünlandfläche als Szenerie für die Erzeugung von synthetischen Daten im Bilddatensatz der Unkräuter. Links ist die Grünlandfläche mit mehreren Unkräutern zu sehen. Rechts auf der Abbildung ist beispielhaft ein modelliertes Jakobskreuzkraut abgebildet.	42
35	Permabot ausgestellt auf dem EIP-Sommerfest 2023 von Permarobotics.	46
36	GROW Vorhaben vorgestellt auf der Agritechnica 2023 auf dem Stand des LZH.	46
37	Präsentation des GROW Projektes auf der Woche der Umwelt 2024 beim Bundespräsidenten.	47
38	GROW Vorhaben vorgestellt auf dem EIP-Sommerfest 2024. Hier konnte erstmals die Hardware des Laserwerkzeuges vorgestellt werden. Zudem war eine interaktive Demo für die Laserbehandlung eingebaut worden, um interessierten Besuchern das Konzept des Laserwerkzeuges besser zu verdeutlichen.	47
39	Präsentation des GROW Vorhabens mittels Roll-Up auf den Öko-Feldtagen 2025.	48
40	Vorstellung des Projektes GROW in der Zeitschrift Land und Forst Ausgabe 34. Das Projekt hat es auf die Titelseite des Magazins geschafft. Quelle: instagram.com/landundforst	49
41	GROW Vorhaben vorgestellt auf der Agritechnica 2025 im Präsentationsbereich des LZH. Zu erkennen sind der Niedersächsische Wirtschaftsminister Grant Hendrik Tonne und die Geschäftsführung des LZHs vertreten durch Dietmar Kracht.	50

42	GROW Vorhaben vorgestellt auf dem Pflanzenbautag 2026 des Ostalbkreis. v.l. Meik Seedorf (LZH), Friedel Könecke (LW)	50
----	---	----

Tabellenverzeichnis

1	Beantragte Projektgelder der einzelnen OG-Mitglieder für die gesamten Projektlaufzeit	6
1	Gegenüberstellung der Budgetverteilung nach Geschäftsplan und tatsächlichen Ausgaben	11