

Abschlussbericht zum Vorhaben

LURU

LASEREINSATZ ZUR UNKRAUTREGULIERUNG BEI RESISTENTEN UNGRÄSERN UND UNKRÄUTERN

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

24.04.2023



Mitglieder der Operationellen Gruppe:

Laser Zentrum Hannover e.V.

Netzwerk Ackerbau Niedersachsen e.V.

Pflanzenschutzamt der Landwirtschaftskammer Niedersachsen - Herbologie

Landwirtschaftsbetrieb Friedel Könecke

Landwirtschaftsbetrieb Bernd Dröse

Fachliche Koordinatorin:

Mandy Patzlaff-Günther

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: 13.02.2020 - 30.04.2023

Inhaltsverzeichnis

| | |
|--|----------|
| A. Kurzdarstellung | 3 |
| I. Ausgangssituation und Bedarf | 3 |
| II. Projektziele und konkrete Aufgabenstellung | 4 |
| III. Mitglieder der OG | 5 |
| IV. Projektgebiet..... | 6 |
| V. Projektlaufzeit und Projektdauer | 6 |
| VI. Budget | 7 |
| VII. Ablauf des Vorhabens..... | 7 |
| VIII. Zusammenfassung der Ergebnisse..... | 7 |
| B. Eingehende Darstellung | 9 |
| I. Verwendung der Zuwendung | 9 |
| III. Ergebnisse der OG | 13 |
| IV. Ergebnisse des Innovationsprojektes..... | 16 |
| V. Nutzen der Ergebnisse für die Praxis..... | 55 |
| VI. (Geplante) Verwertung und Nutzung der Ergebnisse | 58 |
| VII. Wirtschaftliche und wissenschaftliche Anschlussfähigkeit..... | 58 |

A. Kurzdarstellung

I. Ausgangssituation und Bedarf

Vor einigen Jahren noch hauptsächlich in den Fluss- und Küstenmarschen in Niedersachsen vorkommend, breitet sich die Herbizidresistenz von Ackerfuchsschwanz (*Alopecurus myosuroides* - ALOMY) auf Löss- und tonhaltigen Standorten aus. Zudem verbreitet sich der gemeine Windhalm (*Apera spica-venti* - APESV) auf sandigen Böden immer weiter. Hervorgerufen wird der Verlust der Wirksamkeit von Herbiziden u. a. durch die wiederholte, einseitige Anwendung von chemischen Pflanzenschutz-Wirkstoffen derselben Wirkstoffgruppe sowie durch eine fehlende Weiterentwicklung neuer Wirkstoffe. Im Zusammenspiel mit engen Getreidefruchtfolgen und zunehmender pflugloser Bodenbearbeitung hat dies die Resistenzbildung von Ungräsern und Unkräutern gegenüber zahlreichen Herbiziden massiv gefördert.



Abbildung 1 Ackerfuchsschwanz auf einem Feld (Feldfrucht Zuckerrübe).

Neben ackerbaulichen Maßnahmen wie Erweiterung der Fruchtfolgen, Verschiebung der Aussaatzeiten, wieder verstärktem Einsatz des Pflugs, ist der Ansatz dieses Projektes, eine innovative Bekämpfungsmethode von resistenten Ungräsern wie Ackerfuchsschwanz (siehe **Abbildung 1**) und Windhalm mittels mobiler Lasertechnik in die Praxis zu bringen. Unter den Aspekten Nachhaltigkeit (z. B. konservierende Bodenbearbeitung) und Biodiversität/Klimaschutz (Verzicht auf chemische Pflanzenschutzmittel) stellt der Einsatz der Lasertechnik eine zukunftsweisende Alternative dar.

II. Projektziele und konkrete Aufgabenstellung

Die Innovation des LURUU-Projektes liegt in der Anwendung von gezielt auf unerwünschte Pflanzen applizierter Laserstrahlung als alternatives nicht-chemisches, nicht-mechanisches (konservierendes) Verfahren zum Unkraut- bzw. Ungrasmanagement. Die Wirksamkeit des innovativen Ansatzes wurde durch Arbeiten am LZH und andere Gruppen bereits im Labor nachgewiesen, allerdings existierte bei Projektbeginn keine kommerzielle Umsetzung. Ziel der Projektarbeiten war deshalb unter anderem, eine solide Datengrundlage für die zukünftige erfolgreiche Verwertung der Technologie zur Verfügung zu stellen. Dazu mussten im Praxisbetrieb konkrete technische Lösungen erprobt werden und die Wirksamkeit des Verfahrens zur Ungrasbekämpfung insbesondere auch bei bereits vorhandenen Resistenzen gegen Herbizide evaluiert werden, um konkrete Kosten/Nutzen-Rechnungen für die Anwender durchführen zu können. Damit sollte den betroffenen Landwirten eine Bewertungsgrundlage für die innovative Technologie geboten und eine nutzbare sowie attraktive Umsetzung aufgezeigt werden.

Die konkrete Aufgabenstellung bestand darin, die Laserbehandlung im Praxisbetrieb zu untersuchen und anhand der gewonnenen Daten aus ackerbaulicher, technischer und wirtschaftlicher Sicht zu bewerten. Dazu musste ein praxistaugliches Laserbehandlungsgerät entwickelt werden, das sowohl Ackerfuchsschwanz als auch Windhalm effektiv und nachhaltig bekämpft, um den Einsatz von Herbiziden zu reduzieren oder gänzlich zu vermeiden. Auf einer betroffenen Fläche sollten hierzu drei unterschiedliche Bekämpfungsstrategien bei bereits auftretenden, vereinzelt Resistenzen gegenüber Wirkstoffgruppen untersucht werden.

Die Projektplanung sah für die erfolgreiche Umsetzung des Vorhabens das Erreichen der folgenden Ziele vor:

- Aufbau eines für den Einsatz im Winterweizen angepassten Laserapplikators
- Entwicklung einer automatischen Zielerkennung von Unkräutern und Ungräsern
- Durchführung von Feldversuchen mittels drei Bekämpfungsstrategien:
 1. Pflanzenschutzmittel
 2. Laserbestrahlung
 3. Pflanzenschutzmittel + Laserbestrahlung
- Bewertung der Laserunkrautbehandlung mittels Feldversuchen

III. Mitglieder der OG

Landwirtschaftsbetriebe F. Könecke und B. Dröse:

Um die Forschungsarbeiten durchführen zu können, stellten Herr Friedel Könecke (30916 Isernhagen FB) und Herr Bernd Dröse (31319 Klein Lobke) Testflächen auf ihren landwirtschaftlichen Betrieben (LB) zur Verfügung und führten Beratungs- und Bearbeitungsmaßnahmen durch.

Landwirtschaftskammer Niedersachsen, Pflanzenschutzamt (PSA):

Das Pflanzenschutzamt der Landwirtschaftskammer Niedersachsen bonitierte im Rahmen der durchgeführten Feldversuche und bewertete die Ergebnisse im Hinblick auf die Problemstellung.

Netzwerk Ackerbau Niedersachsen e.V. (NAN):

Das Netzwerk Ackerbau Niedersachsen e.V. übernahm die Bewertung des entwickelten Verfahrens im übergeordneten ackerbaulichen Kontext sowie die Dissemination der Ergebnisse.

Laser Zentrum Hannover e.V. (LZH):

Das LZH übernahm die übergeordnete Projektkoordination sowie die Entwicklung des Laserbehandlungssystems, den Testbetrieb und die abschließende technische Bewertung.

IV. Projektgebiet

Das Projektgebiet umfasste die Region Hannover. Durch die örtliche Nähe der OG-Mitglieder, v. a. zwischen dem LZH und den LB, konnten die Reise- und Transportkosten für den Testbetrieb geringgehalten werden. Durch die unterschiedliche Unkrautsituation an beiden LB-Standorten standen während des Projektverlaufs jederzeit Flächen zur Verfügung, die die Problemstellung des Projekts gut abbildeten.

Darüber hinaus war es durch die kurzen Wege leichter möglich, das Laserbehandlungssystem auch bereits während eines Testbetriebszeitraums technisch zu überarbeiten. Die **Abbildung 2** zeigt die geografischen Lagen der OG-Mitglieder des Projektes.

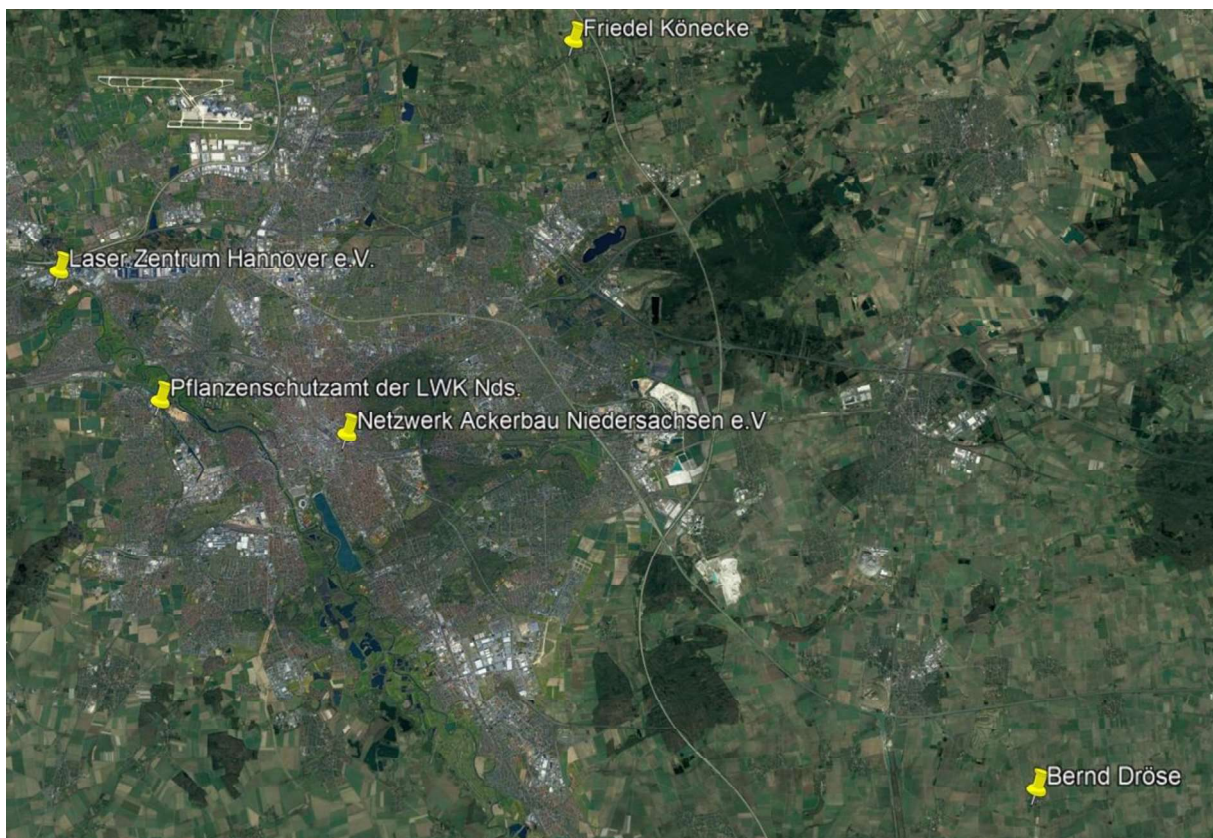


Abbildung 2 Projektgebiet Hannover – Lokalisierung der Mitglieder OG-LURUU zu Projektbeginn

V. Projektlaufzeit und Projektdauer

Die Projektlaufzeit für das LURUU-Vorhaben begann gemäß Zuwendungsbescheid am 13. Februar 2020 und endete am 30. April 2023. Die Projektdauer betrug damit 38 Monate und 17 Tage.

VI. Budget

Mit dem Zuwendungsschreiben vom 12.02.2020 betrug die Bewilligungshöhe 480.899,76 €. Die Ausgaben gliederten sich in laufende Ausgaben für die Zusammenarbeit der OG und in Ausgaben der OG für die Durchführung des Innovationsprojektes. Nachfolgend ist die Budgetplanung für LURUU aufgeführt:

| | OG-Mitglied | Beantragt EUR |
|---------|--------------------|----------------------|
| 1 | LZH-Koordinator | 52.231,80 |
| 2 | LZH | 279.406,76 |
| 3 | NAN | 36.475,00 |
| 4 | PSA | 105.786,20 |
| 5 | LB Friedel Könecke | 3.500,00 |
| 6 | LB Bernd Dröse | 3.500,00 |
| Gesamt: | | <u>480.899,76</u> |

VII. Ablauf des Vorhabens

Im Jahr 2020 wurden die ackerbaulichen Anforderungen durch Feldbegehungen evaluiert. Zudem wurden Pflanzenversuche zur Ermittlung der Zerstörschwelle bzw. der notwendigen Laserleistung durchgeführt und ein erster Entwurf für eine Feldapplikation erstellt. Im Jahr 2021 wurde die technische Ausführung des Applikators durchgeführt. Die technische Ausführung beinhaltete Konstruktionsarbeiten, Beschaffung und Integration. Parallel wurde eine eigene Versuchsanlage mit zugehörigem Gewächshaus am LZH aufgebaut, da sich das kontinuierliche Vorhalten geeigneter Pflanzen und Testflächen für Bestrahlungsversuche und das Training der automatischen Erkennung im Projektverlauf als notwendig erwies, um eine praxisnahe Entwicklung zu ermöglichen. Im Laufe des Projektvorhabens wurde die technische Umsetzung der Laserbehandlung von zwei separaten Applikatoren auf einen Applikator mit zwei Funktionalitäten geändert. Die Einsatzbereitschaft eines geeigneten Applikators wurde 2022 erreicht. Parallel wurden Bilddaten gesammelt und eine geeignete Softwareumsetzung der automatischen Zielerkennung entwickelt. 2022 wurden mehrfach Feldversuche durchgeführt. Zudem wurde 2022 das Vorhaben LURUU mit zugehörigem Demonstrator auf den Ökofeldtagen vorgestellt. 2023 wurden ein abschließender Feldversuch in Klein Lobke sowie eine Abschlussveranstaltung durchgeführt.

VIII. Zusammenfassung der Ergebnisse

Das Forschungsvorhaben hatte das Ziel den Lasereinsatz zur Unkrautregulierung bei resistenten Ungräsern und Unkräutern zu untersuchen. Dafür wurde zunächst ein Applikator entwickelt, der eine Laserbehandlung bspw. in Winterweizen erlaubt. Dabei wurde die

Behandlung auf Kontrollflächen mit der konventionellen Unkrautbekämpfung und einer Kombination aus beiden Verfahren verglichen.

Im Ergebnis steht ein einsatzbereiter Laserapplikator für senkrechte Bestrahlung oder Bestrahlung mit statisch schrägem Einfall zur Verfügung, vgl. **Abbildung 3** links. Die Stromversorgung erfolgt mittels Stromgenerator. Die Geländegängigkeit ist auf trockene Witterung beschränkt. Die Erkennung der Zielpflanzen erfolgt teilautomatisiert. Es werden Vorschläge durch das automatische Erkennungssystem gemacht, welche manuell nachbearbeitet werden können. Der Bestrahlungsvorgang ist automatisiert.

Behandlungsversuche zum Unkrautmanagement mittels Lasertechnik sind in dreifacher Wiederholung erfolgt. In jedem Versuch wurden Laserbehandlung, konventionelle Behandlung sowie eine kombinierte Behandlung direkt verglichen. Die Versuchsergebnisse belegen einen signifikanten Einfluss der Laserbestrahlung auf den Unkrautbestand. Zudem belegen die Ergebnisse, dass auf die Wirksamkeit der Laserbehandlung angepasste Parameter für Behandlungszeitpunkt und Wiederholungsanzahl geeignet sind, um eine erfolgreiche Unkrautkontrolle zu erreichen, vgl. **Abbildung 3** rechts.

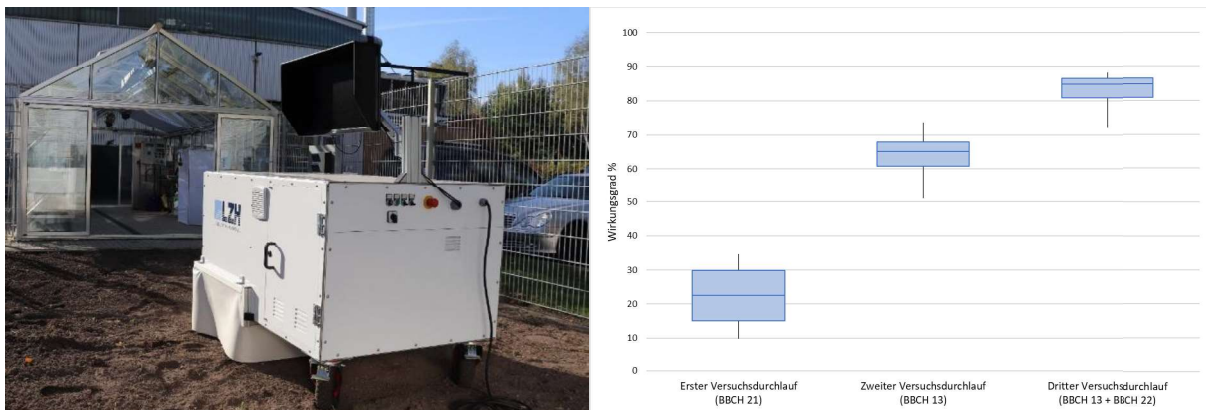


Abbildung 3 Ergebnisse des Vorhabens LURUU. Links, betriebsfähiger Applikator auf der Versuchsfläche am Laser Zentrum Hannover. Rechts, Ergebnisse der Laserbehandlung für jeden einzelnen Versuchsdurchlauf auf dieser Versuchsfläche.

Weiterführende Erkenntnisse sind:

- sowohl Laser mit der Wellenlänge 1940 nm als auch bei 450 nm sind zur Behandlung von Unkraut geeignet.
- Ein Bestrahlungswinkel von 0 bis 20° gegen die Senkrechte zum Boden hat sich im Weizenanbau als praktikabel herausgestellt.
- Bestrahlungsversuche belegen eine Abhängigkeit der Zerstörschwelle von Pflanzenart und Wuchsstadium. Die Dosis variiert von 0,25 – 2 J/mm². Praktikable Strahldurchmesser sind 1-6 mm (1/e²).
- Die automatische Zielerkennung kann mittels Neuronalen Netzen ermöglicht werden. Kritisch für den Erfolg sind umfassende und geprüfte Datensätze.

B. Eingehende Darstellung

I. Verwendung der Zuwendung

Die Zuwendungen wurden bestimmungsgemäß zum Erreichen der Projektziele eingesetzt, wobei es in der Verteilung leichte Abweichungen im Vergleich zum ursprünglichen Geschäftsplan gab, die im Detail in den Zwischenberichten begründet sowie im zahlenmäßigen Nachweis dokumentiert wurden.

Die Kosten für die Zusammenarbeit der OG setzten sich wie geplant aus Personalkosten für die Koordination der OG und Maßnahmen zur Dissemination der Projektergebnisse zusammen. Im Projektverlauf wurden die Mittel dafür durch die OG gegenüber dem ursprünglichen Ansatz leicht verstärkt, um zusätzlichen Mittelbedarf für die Präsentation des Projektes auf den Öko-Feldtagen 2022 zu ermöglichen und eine Abschlussveranstaltung mit größerer Reichweite zu organisieren.

Die Landwirte Friedel Könecke und Bernd Dröse stellten Flächen für Versuche und Praxistests zur Verfügung und brachten mit ackerbaulichen Vorgaben, konstruktiver Kritik und zielführenden Diskussionen ihren praktischen Erfahrungsschatz in die Projektentwicklung ein.

Das LZH führte die Arbeiten zur Entwicklung des Laserbehandlungsgerätes und gemeinsam mit den anderen OG Mitgliedern die zugehörigen Feldversuche und Evaluationen durch. Die dafür vorgesehene Stelle des wissenschaftlichen Mitarbeiters konnte erst einige Monate nach Projektbeginn besetzt werden. Da ab Projektmitte verstärkt Freilandversuche am LZH stattfanden, wurden mehr Mittel für wissenschaftliche Hilfskräfte zur Versuchsanlage und -pflege eingesetzt als ursprünglich geplant.

Das Pflanzenschutzamt der Landwirtschaftskammer betreute und plante die Versuche aus pflanzenbaulicher Sicht und führte Bonituren und die Evaluation durch. Die dafür vorgesehene Stelle konnte erst im Verlauf des Projektes besetzt werden.

Das NAN setzte sein umfangreiches Netzwerk zur Dissemination der Projektergebnisse ein. Unter anderem durch die Einschränkungen aufgrund der Corona-Pandemie, den zwischenzeitlichen Wechsel in der Geschäftsführung und den Umzug des NAN ans Ackerbauzentrum auf Burg Warberg konnten nicht alle geplanten Personalaufwendungen realisiert werden. Nichtsdestotrotz konnten in Zusammenarbeit mit den anderen OG Mitgliedern die wesentlichen Disseminationsziele erreicht werden.

Im Rahmen des Projekts wurden keine Investitionsgüter angeschafft, die nicht innerhalb der Projektlaufzeit abgeschrieben wurden bzw. werden mussten.

| | OG-Mitglied | Budgetverteilung EUR (mit Umwidmungen) | Verwendet EUR |
|---------|--------------------|---|----------------------|
| 1 | LZH-Koordinator | 61.231,80 | 58.810,74 |
| 2 | LZH | 279.406,76 | 272.624,98 |
| 3 | NAN | 27.475,00 | 16.238,40 |
| 4 | PSA | 105.786,20 | 66.798,60 |
| 5 | LB Friedel Könecke | 3.500,00 | 1.221,10 |
| 6 | LB Bernd Dröse | 3.500,00 | 3.108,00 |
| Gesamt: | | <u>480.899,76</u> | <u>418.801,82</u> |

Die wichtigsten und umfangreichsten Positionen des Budgets waren jeweils die für die Projektaufgaben eingesetzten Personalmittel sowie am LZH-Sachmittel zum Aufbau des geplanten Demonstratorgeräts. Die angegebenen Zahlen stellen den Stand gemäß finalem Auszahlungsantrag zum 30.4.2023 dar und verstehen sich vorbehaltlich etwaiger Änderungen im Zuge der Prüfung durch den Projektträger.

II. Detaillierte Erläuterung der Situation zu Projektbeginn

Situation zu Projektbeginn

Vor einigen Jahren noch hauptsächlich in den Fluss- und Küstenmarschen in Niedersachsen vorkommend, breitet sich die Herbizidresistenz von Ackerfuchsschwanz (*Alopecurus myosuroides* - ALOMY) auf Löss- und tonhaltigen Standorten immer weiter aus. Zudem verbreitet sich der gemeine Windhalm (*Apera spica-venti* - APESV) auf sandigen Böden. Hervorgerufen wird der Verlust der Wirksamkeit von Herbiziden u. a. durch die einseitige wiederholte Anwendung von chemischen Pflanzenschutz-Wirkstoffen derselben Wirkstoffgruppe sowie durch eine fehlende Weiterentwicklung neuer Wirkstoffe. Im Zusammenspiel mit engen Getreidefruchtfolgen und zunehmender pflugloser Bodenbearbeitung hat dies die Resistenzbildung von Ungräsern und Unkräutern gegenüber zahlreichen Herbiziden massiv gefördert.

Vor allem betroffen sind die Wirkstoffgruppen der ACCase-Hemmer und der Photosynthesehemmer, aber auch immer häufiger die ALS-Hemmer. Aus zahlreichen Untersuchungen (vgl. Warnecke-Busch et al. 2018) wurde beispielsweise deutlich, dass der ALS-Hemmer Atlantis WG seinen Wirkungsgrad vollkommen verloren hat und vielfach zur Bekämpfung nicht mehr eingesetzt werden kann. Insbesondere bei einseitigen Fruchtfolgen mit hohem Anteil an Winterweizen ist die Verunkrautung mit Ungräsern sehr hoch (Voßheinrich et al. 2018). Ackerfuchsschwanz ist nicht nur durch sein besseres Längenwachstum dem Weizen überlegen, sondern zeigt auch oftmals eine schnellere Keimung und verschafft sich somit einen deutlichen Vorsprung bei selben Auflaufverhalten (Balgheim 2006).

Neben ackerbaulichen Maßnahmen wie Erweiterung der Fruchtfolgen, Verschiebung der Aussaatzeiten und verstärktem Einsatz des Pflugs, ist der Ansatz dieses Projektes, eine innovative Bekämpfungsmethode von resistenten Ungräsern wie Ackerfuchsschwanz (siehe **Abbildung 1**) und Windhalm mittels mobiler Lasertechnik in die Praxis zu bringen. Unter den Aspekten Nachhaltigkeit (z. B. konservierende Bodenbearbeitung) und Biodiversität/Klimaschutz (Verzicht auf chemische Pflanzenschutzmittel) stellt der Einsatz der Lasertechnik eine zukunftsweisende Alternative dar.

Einschätzung der Situation zum Projektabschluss

Seit Beginn der Projektlaufzeit im Jahr 2020 hat sich die Situation noch einmal deutlich verschärft. Das Samenpotential von Ackerfuchsschwanz hat sich in den letzten Jahren regional enorm aufgebaut, so dass in Niedersachsen kaum noch sensitive Flächen zu finden sind. Besonders nehmen die Mischverunkrautungen nach mehrjährigem überbetrieblichen Maschineneinsatz von schwer bekämpfbarem Ackerfuchsschwanz mit Windhalm aber auch Jährige Rispe, Weidelgras und Trespen zu. Auf Böden, auf denen früher nur leicht bekämpfbarer Windhalm vorzufinden war, ist heute zunehmend auch schwer bekämpfbarer Ackerfuchsschwanz festzustellen. Gleichzeitig nimmt die Zahl an zugelassenen Pflanzenschutzmitteln mit ausreichendem Wirkungsgrad durch die voranschreitende Resistenzentwicklung stetig ab. Während vor wenigen Jahren in Deutschland eher metabolische Resistenzen (Non-Target-Site Resistance, kurz NTSR) vorherrschten, finden wir in der Gegenwart zunehmend Zielort-Resistenzen (Target-Site Resistance, kurz TSR). Insbesondere die multiplen Resistenzen (NTSR + TSR) gegenüber mehreren Wirkstoffgruppen haben deutlich zugenommen, was massive Probleme bei der Bekämpfung von Ungräsern zur Folge hat. Bereits heute sind die resistenzgefährdeten Nachauflaufprodukte oftmals wirkungslos und eine Bekämpfung von Ackerfuchsschwanz ist ohne Bodenwirkstoffe praktisch nicht mehr möglich. Wie lange diese jedoch noch zur Verfügung stehen, ist derzeit nicht abzusehen. Viele Wirkstoffe stehen in diesem Jahr zur Wiederzulassung und könnten möglicherweise wegfallen – und neue Wirkstoffgruppen zum Einsatz gegen Unkräuter und Ungräser sind nicht in Sicht. Hinzu kommen aktuelle Probleme in der Verfügbarkeit sowie steigende Preise bei der Beschaffung von Pflanzenschutzmitteln. Nicht zuletzt ist auch politisch und gesellschaftlich ein Wandel beim Einsatz von Pflanzenschutzmitteln gewollt. Im Rahmen des „Niedersächsischen Weges“ haben sich die niedersächsische Landesregierung, Umweltverbände und Vertreter aus der Landwirtschaft auf eine verbindliche Pflanzenschutzmittelreduktionsstrategie geeinigt. Konkret soll der Einsatz von chemisch-synthetischen Pflanzenschutzmitteln in Niedersachsen bis zum Jahr 2030 um mindestens 25 % verringert werden. Erreicht werden soll dieses Ziel unter anderem durch die Ausweitung von Wasserschutzgebieten, Verschärfung der Auflagen in Naturschutzgebieten und dem Ausbau des ökologischen Landbaus. Der Bedarf an alternativen

Bekämpfungsmethoden ist heute somit so hoch wie nie zuvor, um zum einen die wenigen noch zur Verfügung stehenden Pflanzenschutzmittel zu schonen und zum anderen um die Erträge auch in Situationen, in denen der Herbizideinsatz künftig nicht mehr möglich ist, zu sichern.



Abbildung 4 Gegenüberstellung Ackerfuchsschwanz (links) zu Winterweizen (rechts).

Projektaufgabenstellung

Im Rahmen des Vorhabens LURUU (Lasereinsatz zur Unkrautregulierung bei resistenten Ungräsern und Unkräutern) sollte ein Gerät zur Laserbehandlung von zu Resistenzen neigenden Problemunkräutern, insbesondere Ackerfuchsschwanz, entwickelt, auf Versuchsflächen mit Getreideanbau erprobt und als eine nicht-chemische Lösung zur Unkrautregulierung, für die eingangs beschriebene Problemstellung bewertet werden. Dabei wird die Methode auf Kontrollflächen mit der konventionellen Unkrautbekämpfung und einer Kombination aus beiden Verfahren verglichen.

Um das Vorhaben LURUU erfolgreich abzuschließen, wurden folgende Ziele abgeleitet:

1. Realisierung eines mobilen Applikators für die Laserunkrautbehandlung im Winterweizen
 - 1.1. Bestimmung der ackerbaulichen Anforderungen
 - 1.2. Eingrenzung der Laserparameter für eine erfolgreiche Laserbehandlung in Laborversuchen
 - 1.3. Geräteentwicklung
2. Realisierung einer automatische Zielerkennung und Zielführung für die selektive Behandlung

- 2.1. Sammlung von Bilddaten
- 2.2. Training des Erkennungssystems
3. Vergleichende Feldversuche zur Evaluation und Entwicklung der Laserbehandlungsstrategie:
 - 3.1. Pflanzenschutzmittel
 - 3.2. Laser
 - 3.3. Pflanzenschutzmittel +Laser
4. Evaluation der Methode

Die Ziele einen mobilen Laserapplikator und eine automatische Zielerkennung zu entwickeln, setzen fundiertes Wissen zu ackerbaulichen Anforderungen und eine umfangreiche Reihe an Vorversuchen zur Laserbestrahlung relevanter Ungräser voraus. Da die automatische Zielerkennung auf umfassenden und fehlerfrei beschrifteten Trainingsbildern (labeled images) für das Training eines Neuronalen Netzes basiert, werden zudem große Mengen an relevanten Pflanzen zur Anfertigung entsprechender Datensätze benötigt. Nachdem ein funktionaler Laserapplikator in Betrieb genommen ist, können praxisnahe Feldversuche durchgeführt werden, anhand derer die neue Methode für den Praxiseinsatz evaluiert werden kann.

III. Ergebnisse der OG

Die OG-LURUU arbeitete während der gesamten Projektlaufzeit in enger Abstimmung, um alle relevanten Expertisen adäquat in die jeweiligen Arbeitspakete einfließen zu lassen.

In einem ersten gemeinsamen Treffen (Kickoff) wurden Handlungsfelder definiert, Erfahrungen interdisziplinär ausgetauscht sowie konkrete Arbeitsaufträge der jeweiligen Partner festgehalten. Beispiele für besonders intensive bilaterale oder multilaterale Zusammenarbeit im Projekt sind:

- agrartechnischen Spezifikation – Landwirte, Herbologie, LZH
- Abnahme des Laserapplikators – Landwirte, LZH
- Versuchsdesign/-durchführung – Herbologie, LZH
- Versuchsflächen Laserbehandlung/Kontrolle – Herbologie, LZH
- Bewertung des Unkrautmanagements – Landwirte, Herbologie, LZH
- Erzeugung von Trainingsbilddatensätzen - Landwirte, LZH
- Öffentlichkeitsarbeit – NAN, LZH

In zweimal jährlich stattfindenden gemeinsamen Treffen am LZH und online wurden die Projektfortschritte in den jeweiligen Arbeitspaketen erläutert und diskutiert sowie weitere geplante Arbeiten für den folgenden Projektverlauf abgestimmt. Die Inhalte aus den Sitzungen wurden in entsprechenden Protokollen festgehalten. Zusätzlich erfolgten bilaterale Abstimmungen – zumeist per Telefon. Trotz pandemiebedingter Einschränkungen konnte ein kontinuierlicher interner Austausch gewährleistet werden.

Es wurden Möglichkeiten zur verstärkten Dissemination des Projektes gemeinsam erarbeitet. Zudem erfolgten Feldbegehungen auf den landwirtschaftlichen Betrieben sowie Rundgänge durch das LZH. Die Projektpartner wurden durch den Projektkoordinator hinsichtlich der Bearbeitung von Stundenzetteln und Reisekostennachweisen umfangreich unterstützt. Organisatorische Hinweise der Landwirtschaftskammer Niedersachsen wurden an die OG-Mitglieder weitergetragen. Bei der Erstellung der Zwischenberichte und des Abschlussberichtes erfolgte eine gegenseitige Absprache zu den Inhalten.

Auf der durch die OG organisierten LURUU-Abschlussveranstaltung am 07.03.2023 im LZH konnten die Projektpartner zum Ende des Vorhabens gemeinsam mit interessierten Gästen über die Projektergebnisse, die bisher gesammelte Erfahrungen, die Chancen des Lasereinsatzes im Pflanzenbau und den weiteren Forschungsbedarf erfolgreich diskutieren (siehe **Abbildung 5**).



Abbildung 5 Präsentation des LURUU-Vorhabens auf der Abschlussveranstaltung der OG im LZH (links). OG-Mitglieder des LURUU-Vorhabens (rechts) von links nach rechts: Hilmar Freiherr von Münchhausen (Geschäftsführer NAN), Landwirt Bernd Dröse, Mandy Patzlaff-Günther (LZH-Koordinatorin), Matthias Lautenschläger (LZH), Landwirt Friedel Könecke, Dr. Dirk Wolber (Leiter Sachgebiet Herbologie, PSA), Dr. Merve Wollweber (Leiterin der Gruppe Food & Farming des LZH).

Der Mehrwert des OG-Formates im Rahmen des EIP-Projektes bestand vor allem in dem direkten Wissenstransfer der Forschung in die Praxis und umgekehrt. Durch die Vernetzung der heterogenen Gruppe, bestehend aus Praktikern und Wissenschaftlern, konnten die Wege zum Erreichen der Projektziele fortlaufend optimiert werden. Alle OG-Mitglieder arbeiteten gleichwertig und auf einer Ebene konstruktiv zusammen. Jeder Projektteilnehmer konnte dadurch von den Erfahrungen und Kompetenzen der anderen profitieren. Die Regionalität und die starke Praxisorientierung bedeuteten einen hohen Mehrwert für die OG LURUU.

Darüber hinaus konnten auch projektübergreifende Einblicke in weitere Technologien gewonnen werden, aus denen sich zukunftsweisend neue Ideen und weitere Forschungsvorhaben realisieren lassen können.

Eine weitere Zusammenarbeit der Mitglieder ist im Rahmen des PACC (Photonics Agrifood Connection Center, <https://netzwerk-ackerbau.de/pacc/>) vorgesehen. Ziel des PACC ist es,

die Photonik mit dem Agrar- und Lebensmittelbereich zu vernetzen und so die Basis für die Entwicklung optischer Anwendungen und Lösungen im Agrarsektor zu setzen.

Die OG Mitglieder haben vor auch zukünftig im Austausch zu bleiben und ggf. sogar weitere Projekte gemeinsam durchzuführen. Konkret ist z. B. ein aufbauendes EIP-Projekt (OG GROW) zur Förderung vorgesehen, in dem unter anderem Friedel Könecke und das LZH zur Realisierung eines mit Lasertechnik ausgerüsteten Roboters zur Grünlandpflege zusammenarbeiten und auch das Pflanzenschutzamt der Landwirtschaftskammer wieder mit einbezogen werden soll.



Abbildung 6 Impressionen der Kooperation innerhalb der OG LURUU.

IV. Ergebnisse des Innovationsprojektes

Vorstellung Ackerfuchsschwanz und Windhalm:

Ackerfuchsschwanz und Windhalm sind Leit-Ungräser für den Getreidebau, vgl. **Abbildung 7**. Problematisch ist die zunehmende Resistenz gegen bspw. ALS-Hemmer. Die Nutzpflanze steht in direkter Konkurrenz um Licht, Wasser und Nährstoffe. So kommt es bei Besatz mit Ungräsern zu Ertragsausfällen und einer erschwerten Ernte. Problematisch sind folgende Aspekte dieser Ungräser: 1. eine frühe Getreideaussaat begünstigt das Auflaufen von Ackerfuchsschwanz und Windhalm. 2. Die zunehmende Resistenzentwicklung erzeugt eine zunehmende Verbreitung. 3. Das Vermehrungspotential der Ungräser Ackerfuchsschwanz sowie Windhalm macht eine wirkungsvolle Behandlung essenziell.



Abbildung 7 Ausgereifter Ackerfuchsschwanz (großes Bild), Ackerfuchsschwanz Keimling (kleines Bild).¹

¹ https://www.myadama.com/blog/steckbrief_ackerfuchsschwanz-und-windhalm

Das Acker-Fuchsschwanzgras oder kurz Ackerfuchsschwanz (*Alopecurus myosuroides*, EPPO-Code: ALOMY) ist eine einjährige Pflanze und gehört der Familie der Süßgräser an. Ackerfuchsschwanz ist unter anderem in Westeuropa beheimatet. In Niedersachsen ist der Ackerfuchsschwanz bereits seit langem beheimatet und häufig vertreten. Ackerfuchsschwanz bevorzugt mittlere bis schwere sowie kalkhaltige Böden und gilt als Lehmzeiger. Ackerfuchsschwanz tritt in verschiedenen Kulturen wie Wintergetreide, Raps und Grasvermehrung auf. Die Ertragsverluste durch sein Vorkommen können in Beständen bis zu 30-50 % betragen. Die Bekämpfungsschwelle liegt bei 15-30 Pflanzen/m² im Wintergetreide, das Vermehrungspotential bei etwa 400 Samen mit einer Lebensfähigkeit von bis zu 10 Jahren. Die Keimphase ist witterungsabhängig und erfolgt im Herbst und Winter. Die Keimruhe kann primär bis zu 6 Wochen betragen und sekundär bis zu mehreren Jahren. Die Keimtiefe beträgt typischerweise bis zu 5 cm und kann 8 cm erreichen. Die Hauptblütezeit ist von Mai bis Juli.



Abbildung 8 Ausgereifter Windhalm (großes Bild), Windhalm Keimling (kleines Bild).²

² https://www.myadama.com/blog/steckbrief_ackerfuchsschwanz-und-windhalm

Der gemeine Windhalm (*Apera spica-venti*, EPPO-Code: ASPEV) ist eine einjährige Pflanze und gehört der Familie der Süßgräser an, vgl. **Abbildung 8** Windhalm ist in Europa und Niedersachsen alteingebürgert und häufig vertreten. Windhalm bevorzugt leichte, schwach saure sowie kalkfreie Böden und gilt als Indikator für die Entkalkung des Bodens. Windhalm tritt häufig im Wintergetreide und bei der Grasvermehrung auf. Die resultierenden Verluste im Bestand können bis zu 20-30 % betragen. Die Bekämpfungsschwelle liegt bei 10-30 Pflanzen/m² im Wintergetreide. Das Vermehrungspotential liegt bei über 10.000 Samen. Die Keimphase ist witterungsabhängig und erfolgt fast ausschließlich im Herbst. Die Keimung erfolgt häufig direkt nach der Ernte. Mit einer Keimtiefe von bis zu 1 cm gilt der Windhalm als Flachkeimer. Die Hauptblütezeit ist von Juni bis Juli.

Ackerbauliche Anforderungen - Vegetation und Bodenbeschaffenheit:

Aus mehrfachen Begehungen der Schläge in Klein Lobke sowie Isernhagen konnten folgende Erkenntnisse gesammelt werden:

- Die Befahrbarkeit des Bodens ist witterungsabhängig. Lehmböden zeigen bereits nach geringem Niederschlag hohe Anforderungen bezüglich der Befahrbarkeit. Das Zeitfenster für die Applikation ist auf lehmhaltigen Böden besonders stark witterungsabhängig. Der Geräteträger für die Laserbehandlung muss möglichst gut auf die zu erwartenden Bodenverhältnisse zum Behandlungszeitpunkt angepasst werden.
- Die Rückstände aus Vorfrüchten und Fremdkörper wie Steine müssen für den Geräteträger und die Erkennung der zu behandelnden Pflanzen berücksichtigt werden.
- Ungräser keimen im gesamten Bestand: innerhalb der Pflanzreihe, verdeckt unter Kluten oder aus Rissen im Boden.
- In der Draufsicht ist, je nach Unkrautsituation, ein schrägerer Betrachtungswinkel wichtig, um eine Pflanze zu erkennen
- Geringe Bodenbearbeitung kann massive Kluten zurücklassen

Die **Abbildungen 9 bis 14** zeigen einige Eindrücke der durchgeführten Begehungen:



Abbildung 9 Steine und Rückstände der Vorfrucht.



Abbildung 10 Kluten verdecken teilweise den Ursprung der Pflanzen.



Abbildung 11 Ackerfuchsschwanz keimt aus Rissen bei Trockenheit.



Abbildung 12 Draufsicht auf einen Referenzabschnitt mit einem Reihenabstand von 12,5 cm zur Feststellung der zu erwartenden Pflanzenverteilung und Sicht- bzw. Zielverhältnisse.



Abbildung 13 Dokumentation von Kluten mit ALOMY. Vergleichbare Kluten brechen im Frühjahr auf. Ebenso bilden sich im Frühjahr Bodenrisse durch Trockenheit. Kluten und Risse im Boden ermöglichen ein erneutes Auflaufen von ALOMY.



Abbildung 14 Versuchsfeld Klein Lobke, 28.10.2020: Der abgesteckte Bereich dient zur Bonitur und zeigt den angestrebten Arbeitsbereich des Applikators. Die Perspektive entspricht der der kamerabasierten Unkrautererkennung. Durch Bodenbehandlung und Unkrautmanagement ist der Weizen weiter in der Entwicklung als ALOMY.

Im direkten Austausch mit den Landwirten Dröse und Könecke, vgl. **Abbildung 15**, wurden zudem folgende für die Laseranwendung und Versuchsplanung wesentliche Fakten festgehalten:

- Winterweizen wird im Reihenabstand von 10,5-15 cm gedreht
- Drillen ist witterungsabhängig ab Ende September möglich
- Winterweizen kann mit bis zu 5 Wochen Verzögerung auflaufen
- Zeitfenster bis zur Bestockung des Winterweizens beträgt ca. 4 Wochen
- Beikraut läuft kontinuierlich auf
- Herbizid sensitives Beikraut wird i.d.R. zu 98% wirksam bekämpft
- Winterweizen hat im Februar eine Wuchshöhe von etwa 13-15 cm



Abbildung 15 Feldbegehungen in Isernhagen und Klein Lobke mit den beteiligten Landwirten und Mitarbeitern von PSA und LZH.

Laborversuche zur Laserbehandlung

Für die Untersuchung der Zerstörschwelle wurden Versuchspflanzen in den Wachstumsstadien BBCH 10 - 14 angezogen und untersucht. Kernfragen waren, welche Dosis eine letale Wirkung auf die Pflanzen hat und welches Pflanzengewebe bzw. welcher Zielpunkt für die Behandlung gewählt werden sollte.

Nachfolgend ist eine Versuchsreihe aus dem Jahr 2020 mit ALOMY im Wachstumsstadium BBCH 10-14 dargestellt. Nach der Bestrahlung wurden die Pflanzen in definierten Zeitabständen visuell bonitiert. Der Ackerfuchsschwanz ALOMY wurde im Wuchsstadium BBCH 10 mit 10 J, BBCH 12 mit 15 J und im Wuchsstadium BBCH 14 mit 20 J an der Sprossachse in Höhe des Substrates bestrahlt. **Abbildung 16** zeigt den visuellen Eindruck unmittelbar nach der Bestrahlung mit 10 J.



Abbildung 16 Ackerfuchsschwanz BBCH 11. Links vor der Bestrahlung; in der Mitte und rechts als Draufsicht und Seitenansicht unmittelbar nach der Bestrahlung mit 10 J.

Exemplarisch für dikotyle Pflanzen wurde Zurückgebogener Amarant (*Amaranthus retroflexus*, EPPO-Code: AMARE) untersucht, vgl. **Abbildung 17**.



Abbildung 17 Exemplarische Darstellung der Laborversuche an einer Pflanze AMARE. Der Bestrahlungspunkt der dikotylen Pflanze ist primär das Apikalmeristem (beleuchtet in Blau).

Die Proben wurden im Anschluss an die Bestrahlung nach 7 Tagen, nach 14 Tagen und zum Abschluss der Versuchsauswertung nach 30 Tagen visuell bonitiert. Die Bonitur erfolgte in vier Kategorien: letal geschädigt, stark wuchsverzögert, gering wuchsverzögert und unbeschädigt. **Abbildung 18** zeigt exemplarisch die Boniturergebnisse der Behandlung von ALOMY in BBCH 10 mit 10 J. Nach 7 Tagen zeigte sich überwiegend eine starke Wachstumsverzögerung der Pflanzen. Nach 14 Tagen ist die Gruppe der letal geschädigten Proben am häufigsten vertreten. Zum Abschluss der Versuchsauswertung sind 94% der Proben entweder stark im Wachstum verzögert oder letal geschädigt. Die applizierte Dosis von 10 Joule ist zur effektiven Unkrautbehandlung folglich ausreichend.

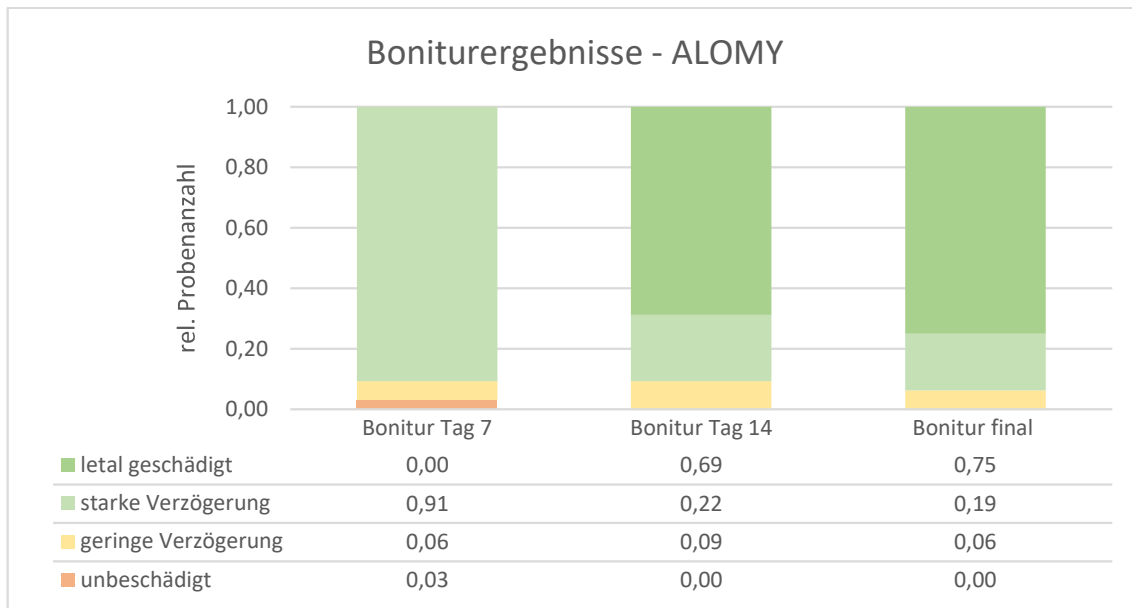


Abbildung 18 Ergebnisse der visuellen Bonitur der Proben ALOMY nach 7 Tagen, 14 Tagen und final nach 30 Tagen. Die Proben werden visuell in vier Kategorien von unbeschädigt bis letal geschädigt eingestuft. Nach 7 Tagen wird häufig eine starke Wachstumsverzögerung bonitiert. Nach 14 Tagen werden 69% der Proben als letal geschädigt eingestuft. Zudem steigt der Anteil an geringer Verzögerung z.T. durch Wiederaustrieb. Zum Abschluss der Bonitur sind 94% der Proben letal geschädigt oder stark im Wachstum verzögert.

Voraussetzung für eine erfolgreiche Bestrahlung ist die Behandlung des Apikalmeristems oder unterhalb des Meristems. Gräser mit eindeutig verdecktem Meristem wurden bis BBCH 12 dennoch wirksam behandelt. Eine mögliche Ursache für dieses Verhalten ist geringe Resilienz juveniler Pflanzen gegen abiotische Stressoren und somit ein Ausbleiben von Wiederaustrieb.

Die Bestrahlung der Sprossachse erzeugt, abhängig von der Dosis, ein Welken bis hin zur Desintegration des Pflanzengewebes, vgl. **Abbildung 19**.

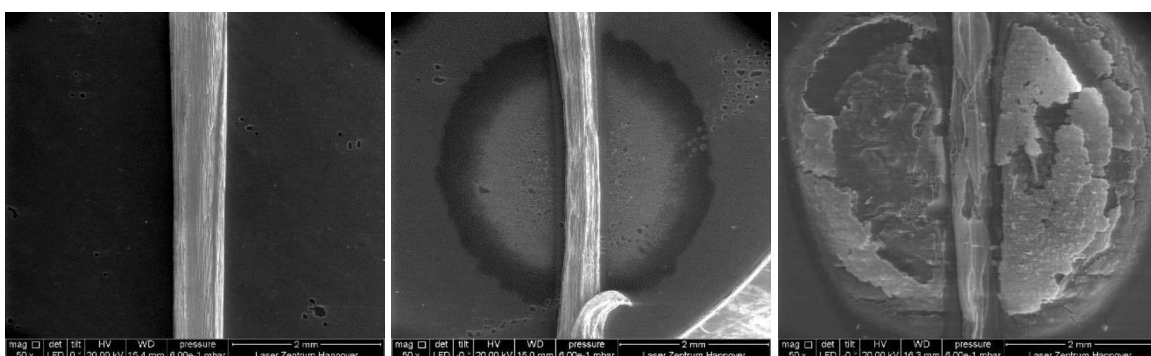


Abbildung 19 Ackerfuchsschwanz ALOMY aufgenommen im Rasterelektronenmikroskop. Links: unbestrahlt, Mitte: bestrahlt mit geringer Dosis 1 J, Rechts: bestrahlt mit moderater Dosis 10 J. Die kreisförmige Struktur markiert den Bereich der Lasereinwirkung.

Zusammenfassend wurden aus diesen Laborergebnissen Bestrahlungsparameter (Dosis bzw. Bestrahlungsdauer bei gegebener Laserleistung) als Ausgangswerte für die Feldversuche in Abhängigkeit vom Unkrauttyp (dikotyl, monokotyl) und dem Entwicklungsstadium (BBCH)

abgeleitet. Bei Behandlung von Gräsern ist die seitliche Laserapplikation auf die Sprossachse der Behandlung senkrecht von oben insbesondere für Pflanzen in fortgeschrittenen Wuchsstadien (ab BBCH13/14) vorzuziehen.

Entwicklung des Laserapplikators

Der erste Prototyp des Trägerfahrzeugs inklusive eines ersten Entwurfs für ein Lasermodul wurde 2020 in Klein Lobke getestet. Ziel des Praxisversuchs war es schnellstmöglich Praxiserfahrungen zu sammeln, um kritische Parameter frühzeitig zu erkennen. Mit den Erkenntnissen aus der Feldbegehung konnte schnellstmöglich ein Laserapplikator entwickelt werden.

Der erste Prototyp ist in **Abbildung 20** auf dem Versuchsfeld in Klein Lobke zu sehen. Das Trägerfahrzeug wird an der Vorderachse mit einem Elektromotor inklusive Batterie angetrieben. Die Antriebsräder an der Vorderachse sind mit Ackerschlepperprofil ausgestattet und ermöglichen Traktion auch bei widrigen Bedingungen. Die zwei Hinterräder sind einzeln drehbar gelagert und ermöglichen ein manuelles Steuern des Trägerfahrzeugs. Die Steuerung des Motors sowie die Bremse werden über die Handgriffe auf der Rückseite bedient.

Das Lasermodul ist mittig auf dem Trägerfahrzeug verbaut (vgl. **Abbildung 21**). Die wesentlichen Komponenten des Laserapplikators sind eine Kamera zur Unkrautdetektion, ein Lasermodul zur Unkrautbestrahlung und ein 2D-Achssystem zur Positionierung des Lasermoduls. Sowohl die Steuerung des Lasers als auch die des Achssystems erfolgt über den in **Abbildung 20** gezeigten Computer. Bei dem in diesem Entwicklungsstadium verbauten Laserapplikator handelte es sich um eine herunterskalierte Version mit nur sehr geringer Laserleistung.

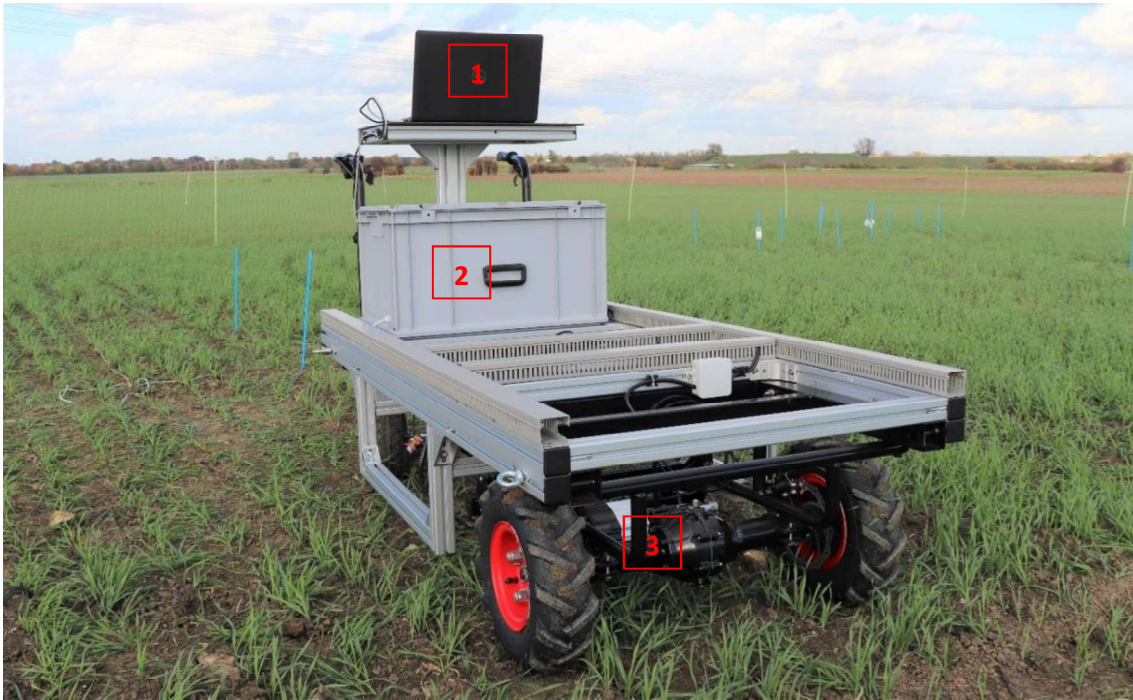


Abbildung 20 Erste Feldbegehung mit dem Trägerfahrzeug inklusive Laserapplikator. Das Trägerfahrzeug beinhaltet u. a.: Eine Steuereinheit für den Laserapplikator (1), eine sichere Einhausung von Steuerungselektronik und Energieversorgung (2) sowie ein 2D-Achssystem (3).

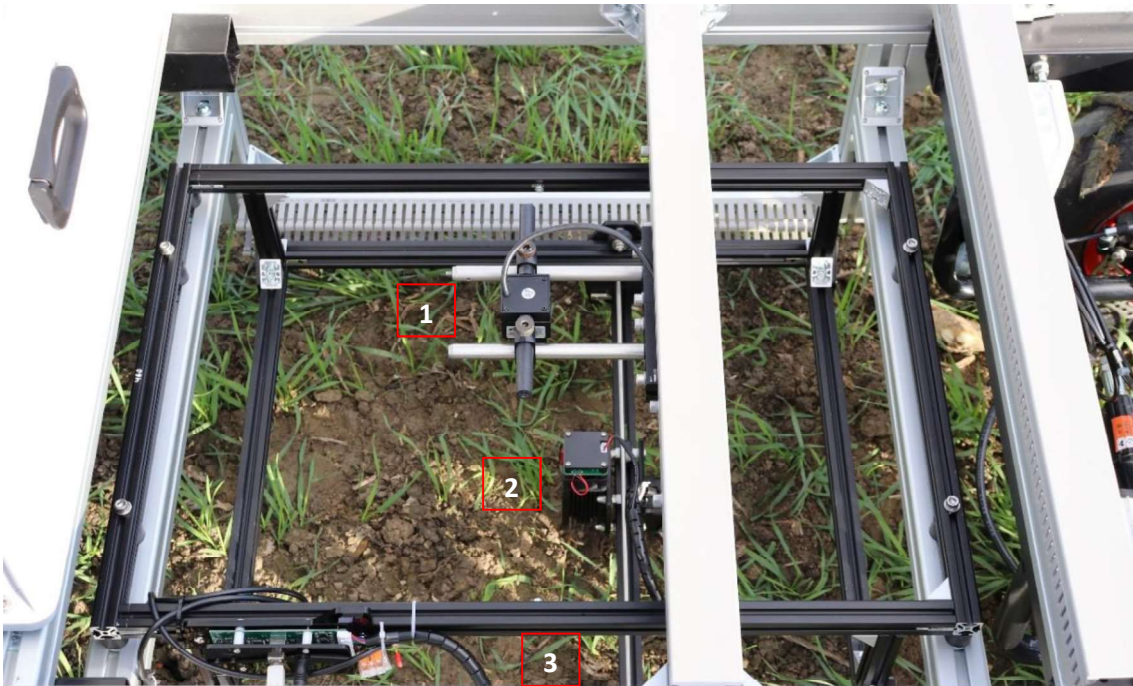


Abbildung 21 Der im Trägerfahrzeug verbaute Laserapplikator während des ersten Praxistest. Der Laserapplikator besteht aus: Kameramodul (1), Lasermodul (2) und Achssystem (3).

Basierend auf den Erkenntnissen aus den Praxisversuchen und den bis dahin vorliegenden Ergebnissen des Forschungsvorhaben NUBELA (AZ 33117/01-3 DBU) wurde der Laserapplikator weiterentwickelt und LURUU und NUBELA-Aufbau zusammengeführt, sodass ein Gerät für die Feldversuche entstand (vgl. **Abbildung 22**). Der Laserapplikator besteht aus

einem Rollwagen als Aluminiumkonstruktion, die mit zwei schwenkbaren Rädern, einem Laserschutzvorhang, einem Versorgungsbereich (Lasersystem, Computertechnik und Elektronik) sowie einem Arbeitsraum (Strahlumlenkung und Achssystem) ausgestattet ist, vgl. **Abbildung 23**. Als Peripherie dienen Eingabetasten zum partiellen Starten einzelner Module und ein Bildschirm zur Überwachung der Zielfindung sowie der Behandlung. Das integrierte Lasersystem ist ein Faserlaser mit der zentralen Wellenlänge 1940 nm und einer nominellen optischen Leistung von 100 W. Der emittierte Strahldurchmesser ist gemäß Herstellerangabe 5,0 mm im Durchmesser ($1/e^2$) am Kollimator. Die emittierte Strahlung ist nicht fokussiert, sondern kollimiert. Die vorliegende Divergenz ist mit 0,52 mrad bemessen. Der resultierende Strahldurchmesser auf Bodenhöhe beträgt etwa 5,2-5,5 mm ($1/e^2$). Der Lasercontroller ist gekoppelt an den Achscontroller und wird mittels analogem Steuersignal moduliert. Die Modulation der Emission wird am Lasercontroller innerhalb von unter 130 μ s durchgeführt. Die elektrische Leistungsaufnahme bei maximaler optischer Ausgangsleistung beträgt 920 W. Unter Berücksichtigung von Ablaufzeiten für die Bewegung des Laserapplikators, der Zielerkennung sowie der Stellzeiten des Achssystems zu den einzelnen Zielpunkten kann eine mittlere elektrische Last von etwa 500 W angenommen werden.



Abbildung 22 Laserapplikator des Laser Zentrum Hannover basierend auf einem handgeführten Rollwagen ausgestattet mit Lasermodul, Achssystem, Kameratechnik, Beleuchtung, Computertechnik und in einem Schaltschrank verbauter Sicherheitssteuerung und Energieversorgung.

Die verwendete Kameratechnik besteht aus einer 3D Auswertung mittels LIDAR Technologie, der 2D Objekterkennung mittels 2MP RGB-Kamera sowie einer Weißlicht LED-Beleuchtung (Farbwiedergabe: CRI größer 90) und stellt so einen günstigen und praktikablen Lösungsansatz zur Erkennung von Zielpflanzen dar. Die Einschränkung der verwendeten Kameratechnik liegt im Wesentlichen in der beschränkten Ortsauflösung von kleiner 4 px/mm im RGB-Farbbild und 2 px/mm in der LIDAR Tiefenaufnahme. Identische Technologien mit höherer Auflösung sind in der Anschaffung bedeutend teurer. Alternative Technologien zur Zielpflanzenerkennung, wie beispielsweise Profilsensoren, konnten aufgrund der Komplexität, des Preises und der coronabedingt eingeschränkten Marktverfügbarkeiten nicht innerhalb des Vorhabens LURUU untersucht werden.

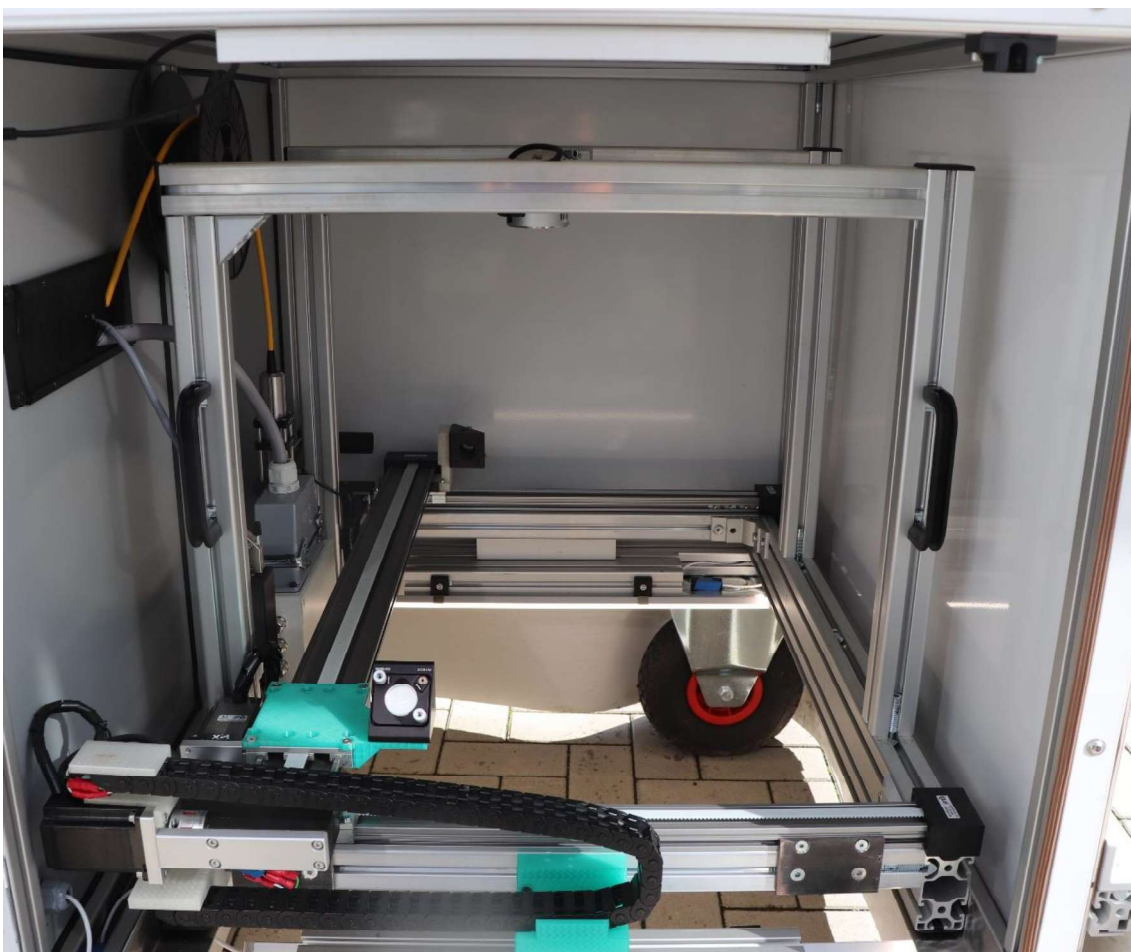


Abbildung 23 Arbeitsraum des Laserapplikators bestehend aus Achssystem, Strahlumlenkung mittels Spiegeln, LED-Beleuchtung sowie einer LIDAR-RGB Kamera.

Weiterentwicklung der Strahlführung

Im Rahmen der Praxisversuche bestätigte sich die Notwendigkeit einer Laserbestrahlung, die nicht senkrecht von oben, sondern unter einem leichten Winkel auf die Zielbereiche der Unkrautpflanzen gerichtet ist. Während sich die Ansteuerung der Zielkoordinaten bei einer senkrechten Bestrahlung zuverlässig realisieren lässt, stellt sich eine direkte Bestrahlung der Sprossachse oder Stielbasis bei monokotyledonen Pflanzen durch vorhandene Blätter als

problematisch dar. Damit eine direkte und somit unverdeckte Bestrahlung erfolgen kann, wurden Laborversuche unter verschiedenen Bestrahlungswinkeln durchgeführt, vgl. **Abbildung 24**. Die unverdeckte Erkennung und Bestrahlung wird im Folgenden als „clear sight“ bezeichnet.

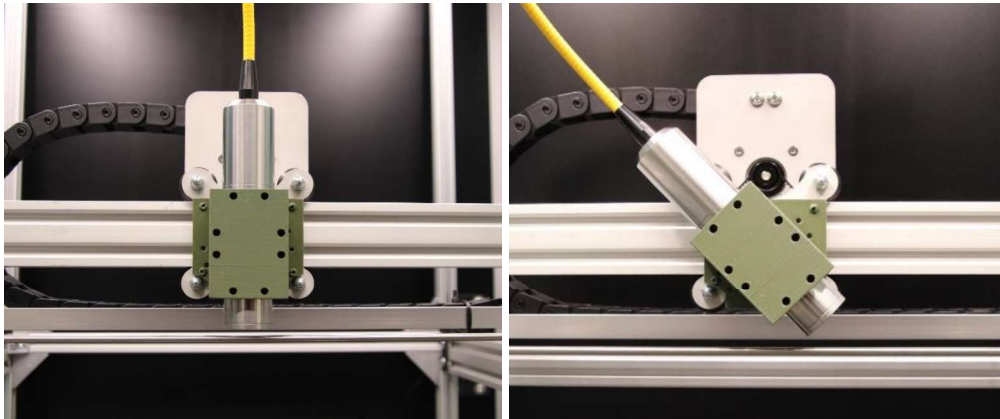


Abbildung 24 Laborversuche zur Bestrahlung von Gräsern unter verschiedenen Winkeln. Hier exemplarisch senkrecht unter 0° (links) und unter 45° (rechts).

Zur Visualisierung der clear sight wurden Bildaufnahmen unter verschiedenen Winkel durchgeführt., vgl. **Abbildung 25**. Die senkrechte Betrachtung und Bestrahlung wird häufig durch Blätter eingeschränkt. Dies können nicht nur Blätter der Unkrautpflanze sein, sondern insbesondere im dichten Getreidebestand auch Blätter der Nutzpflanzen. Die Betrachtung bei zunehmendem Winkel kann, abhängig von der Szene, zu einer freien Sicht auf die Sprossachsen der Unkrautpflanzen führen und somit den Bestrahlungserfolg erhöhen.

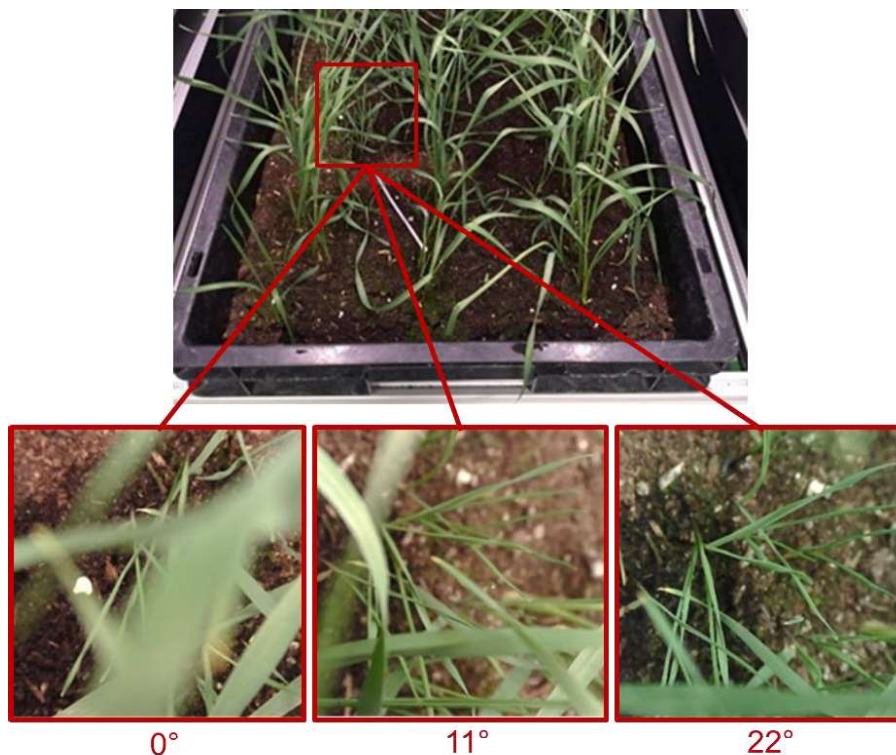


Abbildung 25 Visualisierung verschiedener Sicht bzw. potenzieller Bestrahlungswinkel um eine unverdeckten Sicht (clear sight) auf die Zielpunkte der Pflanzen zu erreichen.

Die Versuchsergebnisse zeigen eine Woche nach Keimung eine mittlere Wuchshöhe des Winterweizens von 5 cm, 2 Wochen nach Keimung von 15 cm und drei Wochen nach Keimung von 20 cm. Dieses Wuchsverhalten ist abhängig von Temperatur und Witterungsverhältnissen. In dieser Versuchsreihe können die Pflanzreihen mit einem Pflanzabstand von 15 cm nicht unter 45° bestrahlt werden, ohne die Blattspitzen der angrenzenden Pflanzreihe zu beschädigen. Folglich sind kleinere Winkel für den typischen Pflanzabstand von Winterweizen notwendig, wenn im Applikationsaufbau auf eine dritte Linearachse (Höheneinstellung) verzichtet wird. Die Versuchsergebnisse zur Bestrahlung unter Winkeln zwischen 0° bis 45° ergaben hinreichende Verbesserungen hinsichtlich Erkennung und Bestrahlung für Winkel zwischen 10° und 20°. Der im Rahmen von LURUU entwickelte Applikator erlaubt es einen festen Anstellwinkel in diesem Bereich für die Laserbehandlung einzustellen. Zukünftig könnten Galvo-Scansysteme eine Behandlung unter flexiblem, jeweils optimalem Anstellwinkel ermöglichen. Bei Galvo-Scansystemen wird der Laserstrahl über bewegliche Spiegel auf das Ziel gelenkt. So wird flexibel die Bestrahlung bei entsprechenden Winkeln ermöglicht, sodass diese eine sinnvolle Integration in einem entsprechenden Feldapplikator darstellen. Allerdings werden durch die Integration eines Galvo-Scansystems die Kosten des Applikators erhöht und der Scanner muss für optimale Anstellwinkel je Reihe evtl. sogar je Zielpflanze mit einer Linearachse verschoben werden. Der Vorteil eines erhöhten Bestrahlungserfolges wird dementsprechend erst durch eine deutliche Zunahme an Komplexität in der Mechatronik und Steuerungstechnik ermöglicht. Zudem ist die seitliche Bestrahlung ohne die dritte Dimension der Linearachsen weiterhin auf Behandlungsperiode bis zur Bestockung beschränkt.

Entwicklung der automatischen Zielerkennung

Die Entwicklung einer automatischen Zielerkennung wird in diesem Forschungsvorhaben mittels Kamertechnik und nachgelagerter Software zur Informationsverarbeitung umgesetzt. Das Ziel einer automatischen Zielerkennung für das laserbasierte Unkrautmanagement ist die Erkennung und Unterscheidung relevanter Pflanzen in unterschiedlichen Wuchsstadien und die Ermittlung entsprechender Zielkoordinaten für die Bestrahlung. Die optimalen Zielkoordinaten sind das Apikalmeristem der Unkrautpflanze oder ein tieferliegender Punkt auf der Sprossachse. Bei monokotyledonen Pflanzen mit verdecktem Meristem wird der niedrigste sichtbare Punkt auf der Sprossachse bestrahlt.

Die typischen allgemeinen Herausforderungen bei der Pflanzenerkennung in der Landwirtschaft sind:

- wechselnde Lichtverhältnisse
- wechselnde Bodenverhältnisse (Erscheinungsbild und Topografie)
- eine Vielzahl an Pflanzen in diversen Wuchsstadien

- teilweise verdeckte Pflanzen
- Variationen im Erscheinungsbild abhängig von biotischen und abiotischen Stressoren
- Fremdkörper (z. B. durchgewachsene Pflanzen aus vergangenen Pflanzperioden)

Typische hardwareseitige Herausforderungen bei der Pflanzenerkennung sind:

- Ausreichende Ortsauflösung, um juvenile Pflanzen mit hoher Sicherheit zu erkennen
- Auswertung von Spektralinformationen zur Unterscheidung von Farbmerkmalen
- Integration von Tiefeninformationen zur Bestimmung der Zielkoordinaten

Die typischen Randbedingungen bei der Pflanzenerkennung zur Laserbestrahlung auf dem Feld stellen eine besondere Herausforderung an die Software dar. In kontrollierten Umgebungsbedingungen können Pflanzenerkennung, -unterscheidung und Zielkoordinatenfindung mittels klassischen Bildverarbeitungsoperatoren realisiert werden³. Im Praxiseinsatz bringt die Varianz der Bildinformationen die klassische Bildverarbeitung jedoch an ihre Grenzen. Dazu gehört die Varianz der Bodenverhältnisse, das Vorhandensein diverser Fremdkörper sowie die Änderung des Erscheinungsbildes der Pflanzen abhängig von Wuchsstadium und Stressoren.

Als vielversprechender Lösungsansatz wurde im Projekt der Einsatz von Methoden des maschinellen Lernens, genauer von Convolutional Neural Networks (CNN), gewählt. Für das Training der CNN werden umfangreiche Bilddatensätze benötigt, welche umfassend die Varianzen im Pflanzenbau abbilden und durch das Markieren und Benennen aller relevanten Bildbereiche präzise vorbereitet wurden (Labeling). Um entsprechende Trainingsdaten zu erzeugen, wurde ein mobiles Bildaufnahmesystem für LURUU realisiert (**Abbildung 26**).

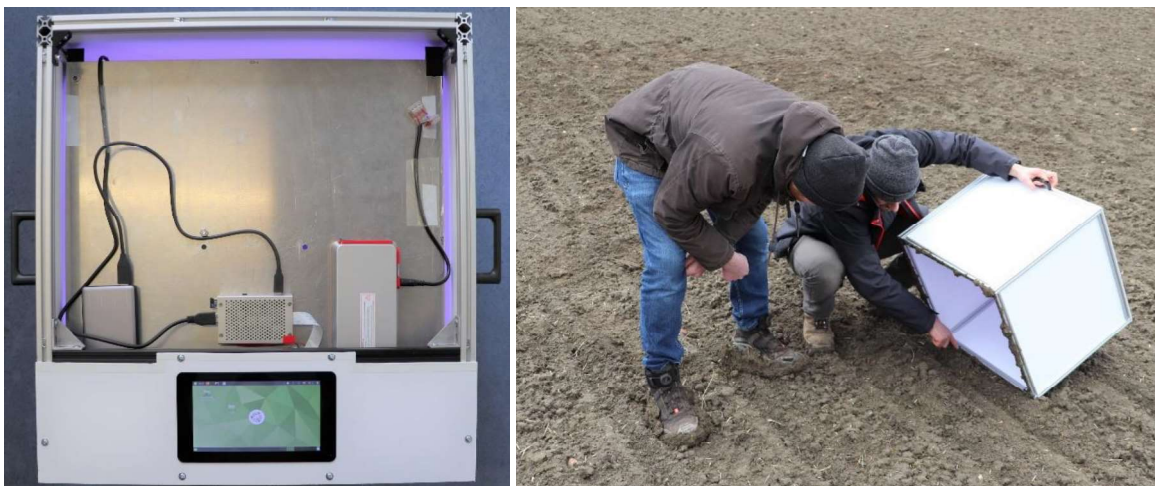


Abbildung 26 Mobile Fotobox zur Datensammlung für die automatische Zielerkennung. Links: Fotobox (Version 1) bestehend aus RaspberryPi, Display und Batterien, sowie LEDs zur Beleuchtung der Feldfläche und Kamera auf der Unterseite. Rechts: Praxiseinsatz der Fotobox V1.

³ Rath & Pastrana 2012: <https://www.repo.uni-hannover.de/bitstream/handle/123456789/1423/291-413-1-PB%20eng.pdf?sequence=2>

Der Einsatz des laserbasierten Unkrautmanagements erfordert eine sicherheitstechnische Abschirmung der Laserstrahlung gegen die Umwelt. Damit wird automatisch auch Umgebungslicht, das die Pflanzenszene natürlicherweise beleuchtet, abgeschirmt. Zudem werden über die technische Spezifikation des Laserapplikators eine maximale Arbeitsbreite und ein typischer Arbeitsabstand definiert. Unter Berücksichtigung dieser applikationstechnischen Vorgaben wurde eine mobile Fotobox V1 entwickelt, die die Aufnahmen passenden Bildmaterials erlaubt. Die Fotobox V1 besteht aus einem RaspberryPi, einem Display mit Batterien, sowie LEDs und einer Kamera auf der Unterseite. Die verwendete Kameratechnik besteht aus einer Intel Realsense 435i (3D Auswertung mittels Stereotechnologie, 2D Objekterkennung mittels 2MP RGB-Kamera) sowie einer Weißlicht LED-Beleuchtung. Die Komponenten wurden in einem Würfel aus Aluminium-Strangpressprofilen integriert. Die Einhausung wurde mit weißen, diffus reflektierenden Wabenplatten realisiert vgl. **Abbildung 27**.



Abbildung 27 Praxisversuche von Hendrik Hillebrand (LWK-Pflanzenschutzamt) mit der entwickelten mobilen Fotobox.

Erste Praxisversuche mit dieser Fotobox ergaben, dass mobile Fotobox für den Praxiseinsatz selbsttragend sein muss (z. B. auf Rollen montiert) und dass die Farbwiedergabe der Beleuchtung eine größere Farbreinheit gewährleisten muss.

Die Weiterentwicklung der Fotobox (Fotobox V2) wurde daher auf einem Rollwagen montiert, siehe **Abbildung 28**. Zur vereinfachten Bedienung wurde die Eingabekonsolle zum Handstück verlegt. Zudem wurde ein schwarzer Vorhang ergänzt, damit ein bodennahes Abschirmen

gegen Umgebungslicht erhalten bleibt. Das Kamerasystem wurde auf eine LIDAR-RGB-Kamera L515 gewechselt, da diese eine verbesserte Erfassung von Tiefeninformationen für juvenile Pflanzen erlaubt. Die Bildfeldbreite beträgt 500 mm und die Ortsauflösung etwa 4 px/mm. Eine Prüfung der Farbwiedergabe der Fotobox V2 zeigte zufriedenstellende Ergebnisse.

Die Mobilisierung sowie die Implementierung eines abnehmbaren Handstücks führten zu einer deutlich vereinfachten Handhabung der Fotobox im Vergleich zur Vorgängerversion. Insgesamt genügt die Fotobox V2 ackerbaulichen Anforderungen in der Handhabung.

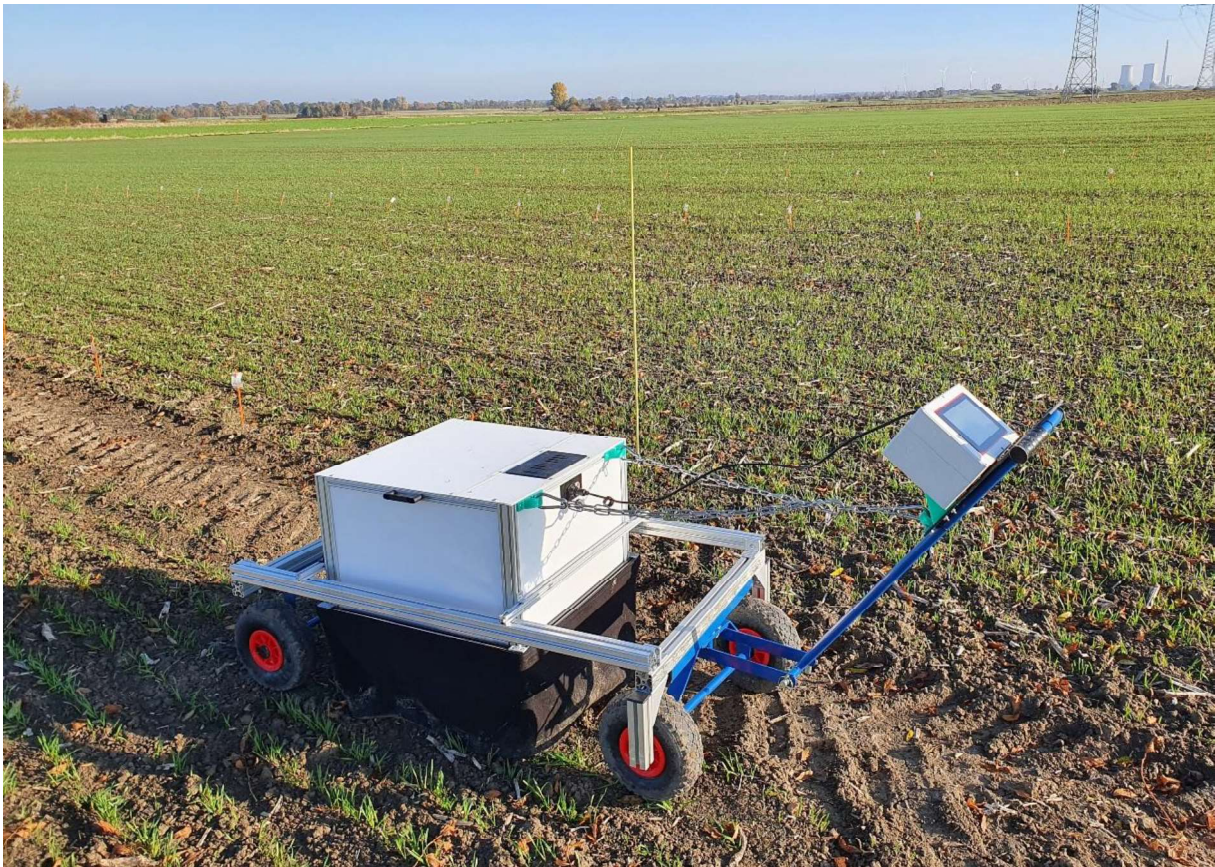


Abbildung 28 Weiterentwicklung der Fotobox im Praxiseinsatz – Fotobox V2.

In **Abbildung 29** sind exemplarisch Bilddatensätze wie sie mit der Fotobox V1 und Fotobox V2 erstellt wurden dargestellt. Die generierten Bilddaten sind qualitativ geeignet, um Trainingsdaten aus der ackerbaulichen Praxis zu erzeugen.



Abbildung 29 Exemplarische Darstellung von Bilddaten, die mit der Fotobox V2 erstellt wurden.

Die manuelle Markierung der Datensätze, auch „Labeling“ genannt, erfolgte mittels Softwarelösungen, wie bspw. „labelme“, vgl. **Abbildung 30**. Ziel des Labelings ist es, relevante Objekte wie Nutzpflanzen und Beikraut sortenspezifisch zu markieren und zu benennen. Die hier verwendete Methode zur Markierung ist ein Rechteck (Bounding Box), in der die benannte Pflanze zu sehen ist. Alternativ können konturspezifische Segmentierungen durchgeführt werden (semantische Segmentierung). Jede Pflanze wird manuell markiert und benannt. Die manuelle Pflanzenbestimmung aus einem 2D Bild in einer Bildszene bestehend aus einer Vielzahl von Pflanzen stellt eine besondere Herausforderung dar.



Abbildung 30 Manuelle Markierung jeder einzelnen Pflanze mit zugehöriger Benennung als Trainingsgrundlage für die automatische Pflanzen- und Zielerkennung mittels „labelme“.

In diesem Vorhaben wurde das neuronale Netz zunächst mit in Pflanzschalen kultivierten sortenreinen Szenen trainiert. Diese Herangehensweise hat sich als zielführend erwiesen. Ziel ist es, einen allgemeinen Detektor auf die Erkennung einzelner Pflanzenarten weiterzuentwickeln, sodass komplexe und praxisnahe Szenen zum Großteil selbständig markiert werden und nur wenig manuelle Nachbereitung benötigt wird, vgl. **Abbildung 31**. Die Pflanzschalen können bspw. Pflanzreihen mit Winterweizen in typischen Pflanzabständen beinhalten. Weitere Pflanzschalen können in variabler Dichte mit einzelnen Pflanzsorten bepflanzt sein und wieder andere bspw. abhängig vom Wuchsstadium der Pflanzen aufgenommen werden, siehe **Abbildung 32**.



Abbildung 31 Pflanzschalen mit standardisierten Szenen für das Training der automatischen Erkennung.

In Szenen mit nur einer Pflanzensorte können alle detektierten Pflanzen mit identischen Labels markiert werden. Nachdem einzelne Pflanzenarten reproduzierbar erkannt werden, können Szenen mit mehreren trainierten Pflanzenarten verwendet werden. Hier markiert der Detektor alle erkannten Pflanzen und die Markierungen werden im Nachgang manuell geprüft, gegebenenfalls korrigiert und partiell ergänzt. Mit diesem Verfahren kann die Komplexität der Szene schrittweise gesteigert werden.



Abbildung 32 Winterweizen und Ackerfuchsschwanz in einer Pflanzschale markiert mit unterschiedlichen Bounding Boxen.

Für das automatische Erkennungssystem wurden zunächst vortrainierte Modelle aus dem TensorFlow Model Zoo verwendet und evaluiert, vgl. **Abbildung 33**.

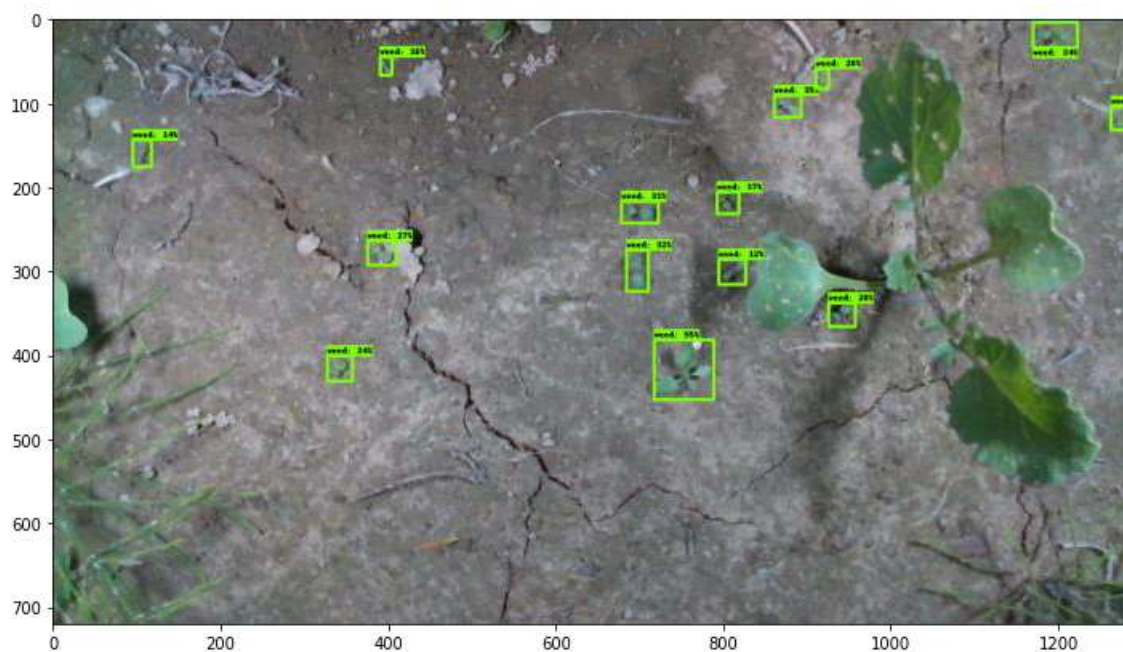


Abbildung 33 Ein exemplarisches Ergebnis der automatischen Zielerkennung basierend auf dem CenterNet Modell. Dieses Szenario zeigt hinreichende Ergebnisse für kleine Beikrautpflanzen und schlechte Ergebnisse für große Nutzpflanzen sowie partiell verdeckte Pflanzen.

Mit Stand Projektabschluss wird die Datenverarbeitung über ein YOLO-Netz am besten bewertet. Die rasante Weiterentwicklung im Bereich der Algorithmenentwicklung macht eine laufende Überprüfung und gegebenenfalls Aktualisierung der Netzwerkarchitektur sinnvoll und sogar notwendig. Neben Verbesserungen in der Genauigkeit profitiert die Anwendung insbesondere von Beschleunigungen in der Prozessierung. Mit Durchlaufzeiten von unter 10 ms ist YOLO als single stage detector für diesen Einsatzzweck geeignet. Nachdem eine Objektunterscheidung erfolgt ist, erfolgt ein zweiter Durchlauf, in dem die erkannten Unkrautpflanzen erneut untersucht werden, um den Bestrahlungspunkt zu ermitteln. **Abbildung 34** zeigt exemplarische Ergebnisse des automatischen Erkennungssystems auf Basis des YOLO-Modells zum Abschluss des Projekts. Der Entwicklungsstand muss in Zukunft weiterentwickelt werden, um die benötigte Präzision von mehr als 95% erkannter Unkräuter zu erreichen.



Abbildung 34 Links: Aufnahme einer zufälligen Testfläche durch die Kamera im Laserapplikator. Rechts: Detektierte Pflanzen markiert mit einem roten Kreis. Detektion basierend auf einem YOLO-Modell.

Versuche auf der Freilandfläche am LZH

Im Zeitraum März bis Oktober 2022 fanden drei praxisnahe Versuche mit dem Laserapplikator auf der Freilandfläche am LZH statt. Im Rahmen von Feldversuchen mit Sommerweichweizen wurde hier die Wirksamkeit der Laserunkrautbehandlung mit einer praxisüblichen Herbizidstrategie verglichen. Zudem wurde der kombinierte Einsatz von Lasertechnik und Herbiziden untersucht. Ziel dieser Versuche war in erster Linie das Sammeln von Praxiserfahrung und die Evaluierung der notwendigen Parameter für einen bestmöglichen Behandlungserfolg.

Der erste Versuch startete am 31.03.2022 und endete am 31.05.2022. Der zweite Versuch fand vom 08.06.2022 bis 21.07.2022 statt und der dritte Versuch lief in der Zeit vom 17.08.2022 bis 05.10.2022.



Abbildung 35 Zeitlicher Ablauf der Feldversuche auf der Freilandfläche am LZH.

Versuchsdesign:

Bei dem Versuchsaufbau (**Abbildung 36**) handelte es sich um eine randomisierte Blockanlage mit vierfacher Wiederholung. Einschließlich der Kontrolle gab es vier Behandlungsvarianten:

- nur Herbizidbehandlung
- nur Laserbehandlung
- Laser- und Herbizidbehandlung
- unbehandelte Kontrolle

Die Größe der Versuchsfläche lag bei ca. 60 m² (6,9 m x 8,7 m). Die Größe der Versuchspartellen wurde an die Arbeitsbreite des Laserbehandlungsgerätes angepasst und

betrug $0,45 \text{ m}^2$ ($0,45 \text{ m} \times 1 \text{ m}$). Die randomisierte Zuordnung der Behandlungen zu den Parzellen erfolgte in jedem Versuch neu. Das Versuchsdesign war für alle drei Versuche identisch. Unterschiede bestanden lediglich in der Versuchsdauer (angepasst an das witterungsbedingte Pflanzenwachstum) und dem Zeitpunkt der Laserbehandlung (siehe Abschnitt: Laserbehandlung).

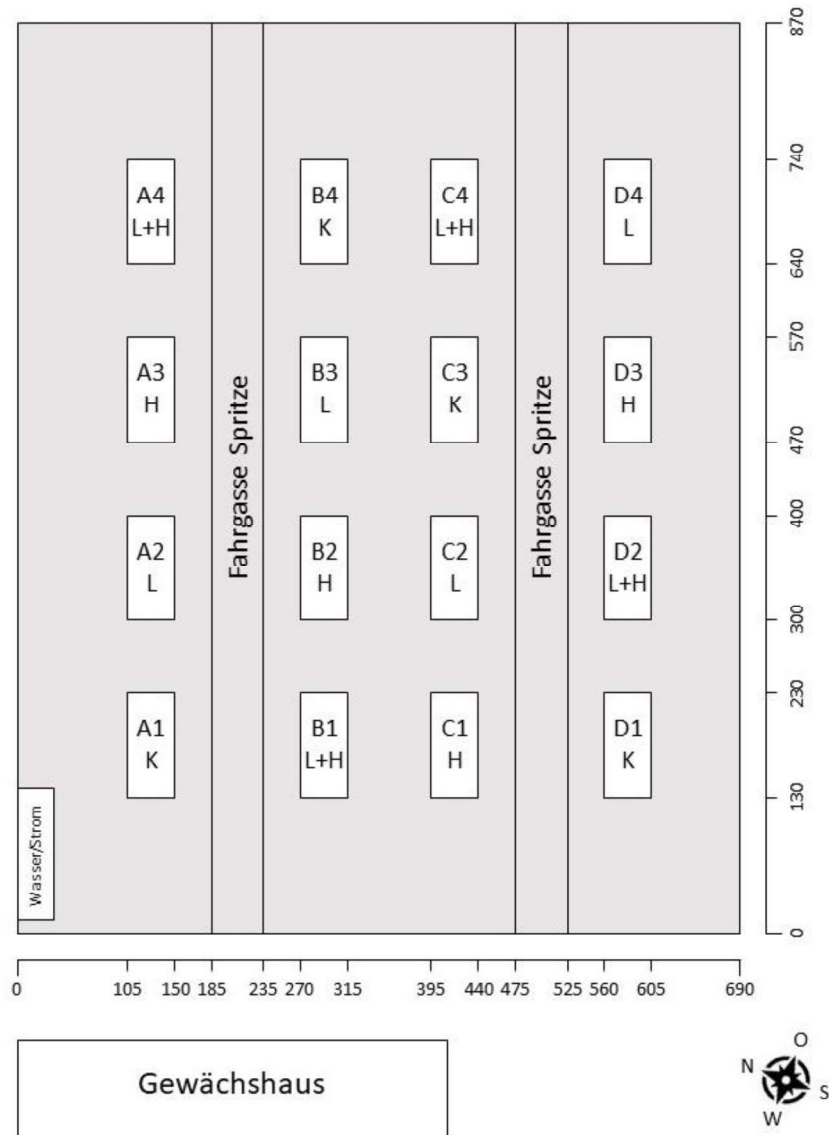


Abbildung 36 Anordnung der Versuchspartellen (A1-D4) auf der Freifläche am LZH. Die Versuchsvarianten sind innerhalb der Blöcke (A-D) vollständig randomisiert und werden in jedem Versuchsdurchlauf neu zugewiesen. (L=Laser, H=Herbizid, L+H=Laser+Herbizid, K=Kontrolle).

Arbeiten auf der Versuchsfläche:

Vorbereitend zu den Versuchen wurden auf der Versuchsfläche Bodenproben entnommen und auf Nährstoffgehalt, pH-Wert und Humusgehalt untersucht (Bodenanalyse durch die LUFA Nord-West). Die Ergebnisse zeigten, dass es sich um einen humosen Sandboden mit einem Humusgehalt von 3 % und einem pH-Wert von 7 handelt. Bei der Nährstoffanalyse wurden sowohl bei den Makro- als auch bei den Mikronährstoffen überwiegend hohe Gehalte

festgestellt. Der Boden ist somit grundsätzlich für die Durchführung von pflanzenbaulichen Versuchen geeignet.

Vor der Aussaat wurde der Boden auf der Versuchsfläche mit einer Einachsfräse gelockert und mit einer Harke begradigt, um mögliche Verdichtungen im Boden aufzulösen und ein gleichmäßiges Saatbett zu schaffen. Zusätzlich wurde die Fläche vor jedem Versuch entsprechend den Ergebnissen der Bodenanalyse und des zu erwartenden Entzugs durch die Kultur mit ca. 70 kg N/ha, 40 kg P₂O₅/ha und 5 kg K₂O/ha gedüngt. Als Dünger wurde ein organischer Mehrnährstoffdünger (Oscorna Animalin) verwendet. Als Kultur wurde Sommerweichweizen (*Triticum aestivum* L. ‚QUINTUS‘) ausgewählt, welcher in einer Dichte von ca. 480 Körner/m² und einem Reihenabstand von 15 cm ausgesät wurde.



Abbildung 37 Arbeiten auf der Versuchsfläche. Links oben: Vorbereitung der Saatreihen mit einem Rillenzieher. Rechts oben: In die Saatreihen ausgebrachtes Saatgut. Links unten: Sommerweichweizen nach dem Auflaufen. Rechts unten: Mit roter Nylonschnur abgesteckte Versuchsparzelle.

Die Aussaat erfolgte per Hand mit Hilfe eines Reihenziehers und einer Särolle. Im Anschluss wurde die Saat mit einer Walze angedrückt und bewässert, um eine schnelle Keimung zu gewährleisten. Da es sich um die ersten pflanzenbaulichen Versuche auf der Freilandfläche handelte und somit das zu erwartende Unkrautauftreten so wie die vorkommenden Unkrautarten nicht abgeschätzt werden konnten, wurde vor dem ersten Versuchsdurchlauf großflächig Acker-Fuchsschwanz (*Alopecurus myosuroides*, Appel Wilde Samen GmbH) auf der Fläche ausgesät, um dessen Auftreten in den Versuchen sicher zu stellen. Nachdem der Weizen aufgelaufen war und die Pflanzreihen deutlich zu erkennen waren, wurden die Versuchspartellen entsprechend des oben beschriebenen Versuchsdesigns mit Heringen und roter Nylonschnur abgesteckt. Während der Versuche wurde die Versuchsfläche je nach Bedarf über einen Viereckregner bewässert.

Herbizidbehandlung:

Die Herbizidbehandlung der Versuchspartellen erfolgte je nach Versuch zwischen drei und fünf Wochen nach der Aussaat. Die Entwicklung des Weizens befand sich zu diesem Zeitpunkt in der Bestockung (BBCH 21-23) und ein breites Spektrum an Unkräutern in verschiedenen Entwicklungsstadien war auf der Fläche vorhanden.



Abbildung 38 Einsatz der Feldspritze zur Herbizidausbringung (oben). Beispielfotos der Verunkrautung zum Zeitpunkt der Behandlung (unten).

Für die Herbizidbehandlung kam eine Kombination von Axial 50 (Syngenta) und Omnera LQM (FMC) zum Einsatz. Axial 50 enthält den Wirkstoff Pinoxaden (50 g/l) und ist in Sommerweichweizen unter anderem für den Einsatz gegen Acker-Fuchsschwanz und Windhalm zugelassen. Bei Omnera LQM handelt es sich um eine Kombination der Wirkstoffe Metsulfuron (4,82 g/l), Iodosulfuron-Methyl (6 g/l) und Fluroxypyr (135 g/l) mit einem breiten Wirkungsspektrum gegen dikotyle Unkräuter. Die Mittel wurden mit einer Aufwandmenge von 1,2 l/ha (Axial 50) und 1,0 l/ha (Omnera LQM) ausgebracht. Die Ausbringung erfolgte mit einer speziell für die Behandlung von Feldversuchen ausgelegten Feldspritze.

Laserbehandlung:

Die Laserbehandlung erfolgte je nach Versuch zu unterschiedlichen Zeitpunkten. Im ersten Versuch wurde die Laserbehandlung zeitlich synchronisiert mit der Herbizidbehandlung durchgeführt. Zu diesem Zeitpunkt befand sich der Weizen bereits in der Bestockung und auch das Unkrautwachstum war bereits recht weit fortgeschritten. Im zweiten Versuchsdurchlauf wurde die Laserbehandlung um eine Woche vorgezogen, sodass der Weizen zum Zeitpunkt der Behandlung noch nicht mit der Bestockung begonnen hatte und sich die meisten Unkräuter in einem Entwicklungsstand befanden, in welchem sie gut durch den Laser zu bekämpfen waren. Im dritten Versuch fanden zwei Laserbehandlungen statt. Die erste Behandlung fand kurz nach dem Auflaufen des Weizens statt, so dass keine Unkräuter von der Kultur verdeckt wurden und eine einfache Detektion der Unkräuter möglich war. Die zweite Behandlung erfolgte ca. fünf Wochen nach Aussaat, um auch nachträglich aufgelaufenes Unkraut zu erfassen.

Die Laserbehandlungen wurden mit einem Thulium Faserlaser (Optische Leistung 100 W, Strahldurchmesser 5,2 mm) durchgeführt. Die Strahlführung wurde mit einem Linearachssystem realisiert (60.000 mm/min, 100% Power und 6 mm Kreisbahn).

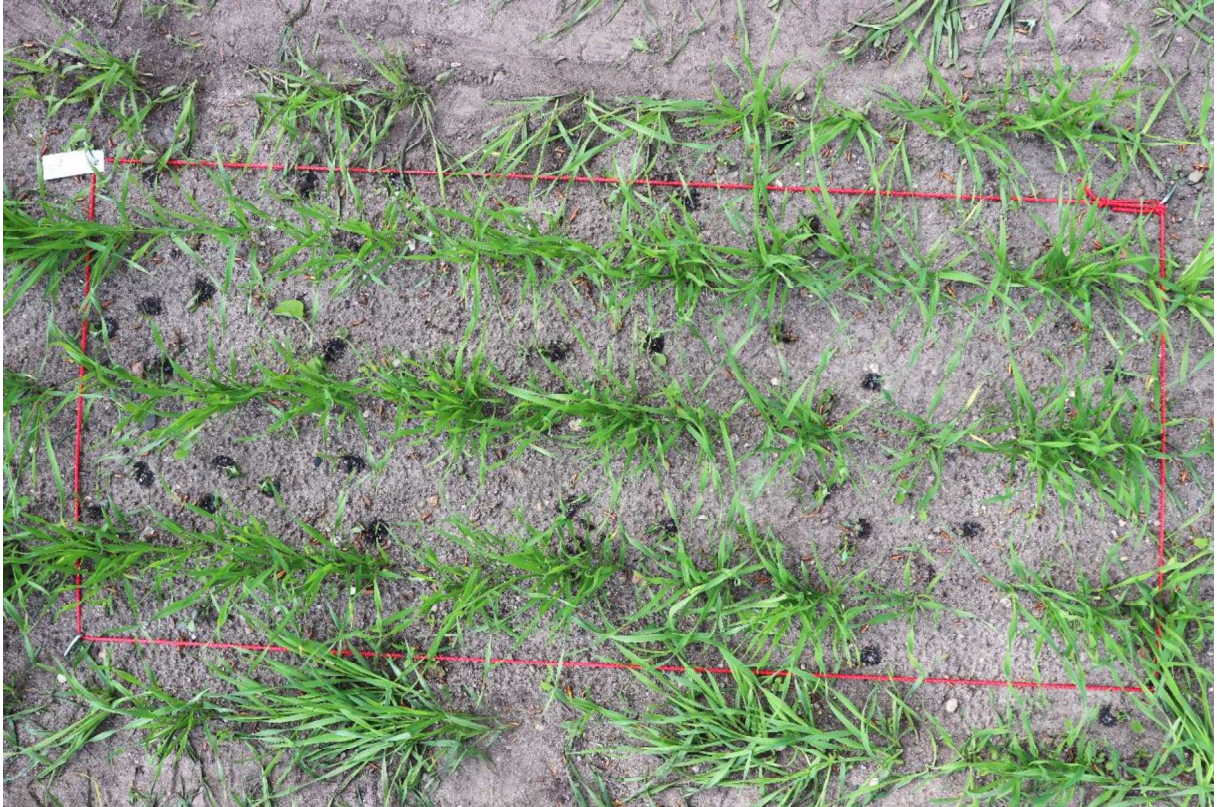


Abbildung 39 Versuchspartelle unmittelbar nach der Laserbehandlung.



Abbildung 40 Weißer Gänsefuß (*Chenopodium album*) unmittelbar nach der Laserbehandlung.

Bonitur:

Die Bonitur fand in allen drei Versuchen 21 Tage nach der Herbizidbehandlung statt. Zu diesem Zeitpunkt befand sich der Weizen in den Entwicklungsstadien BBCH 33-51. Um die Versuchspartellen zuverlässig bonitieren zu können, wurde der Weizen außerhalb der Partellen vor der Bonitur entfernt und alle Weizenpflanzen innerhalb der Partellen wurden bodennah abgeschnitten. Im Anschluss wurden alle in den Versuchspartellen vorkommenden Unkrautarten bestimmt und je Partelle ausgezählt.



Abbildung 41 Bonitur einer Versuchspartelle. Alle Unkrautarten wurden bestimmt und ausgezählt.

Das Unkrautauftreten unterschied sich in den drei Versuchen zum Teil deutlich voneinander. Im ersten Versuch war das Unkrautauftreten in den Kontrollpartellen mit 313 Pflanzen/m² am höchsten. Mit 28 verschiedenen Unkrautarten, war auch die Artenvielfalt im ersten Versuch am größten. Im zweiten Versuch lag das Unkrautauftreten bei 96 Pflanzen/m² verteilt auf 14 Arten und im dritten Versuch wurden 118 Pflanzen/m² und 18 verschiedene Arten erfasst (**Abbildung 43 - Abbildung 45**). Zusätzlich konnte beobachtet werden, dass die Unkräuter im ersten Versuch zum Versuchsende klein waren, während im zweiten und dritten Versuch deutlich größere Einzelpflanzen mit hohem Konkurrenzpotenzial vorhanden waren. Das hohe Unkrautauftreten im ersten Versuch lässt auf ein anfänglich hohes Samenpotential im Boden schließen, welches zusammen mit der großen Vielfalt an unterschiedlichen Unkrautarten auf die unbekannte Herkunft des Bodens zurückzuführen ist.



Abbildung 42 Versuchspartellen zum Zeitpunkt der Bonitur mit blühendem Acker-Senf im Weizen.

Sowohl im ersten als auch im zweiten Versuch war Weißer Gänsefuß das am häufigsten auftretende Unkraut, während im dritten Versuch Acker-Fuchsschwanz dominierte. Generell ließ sich eine Veränderung in der Zusammensetzung der Unkrautarten über die drei Versuche hinweg feststellen. Während die Unkrautzusammensetzung aufgrund des hohen Samenpotentials im ersten Versuch sehr vielfältig war, dominierten im zweiten Versuch aufgrund des veränderten Klimas im Juni und Juli vor allem wärmeliebende Unkräuter wie Blut-Fingerhirse, Hühnerhirse und Schwarzer Nachtschatten. Im dritten Versuch, welcher bis Anfang Oktober ging, war Acker-Fuchsschwanz als typischer Herbstkeimer die vorherrschende Unkrautart.

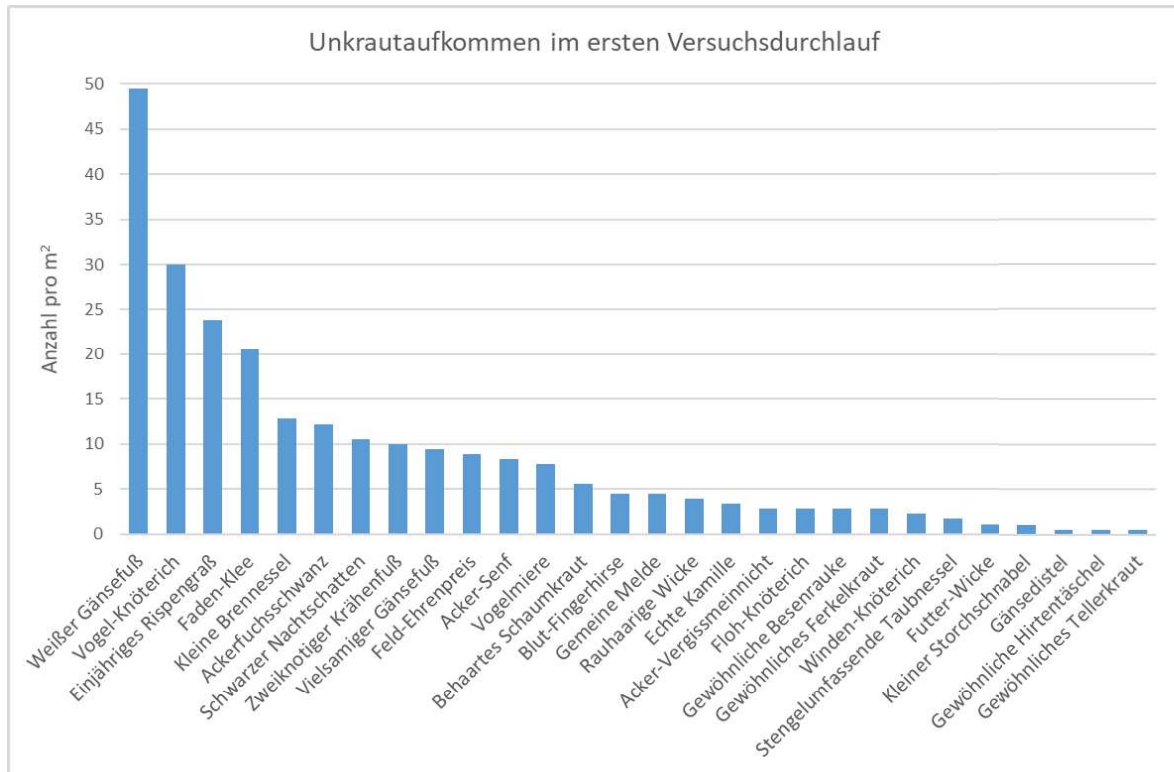


Abbildung 43 Aufkommen verschiedener Unkrautarten in den Kontrollparzellen zum Zeitpunkt der Bonitur im ersten Versuchsdurchlauf. Das Gesamtaufkommen lag bei 313 Pflanzen/m² und es wurden 28 verschiedene Unkrautarten identifiziert.

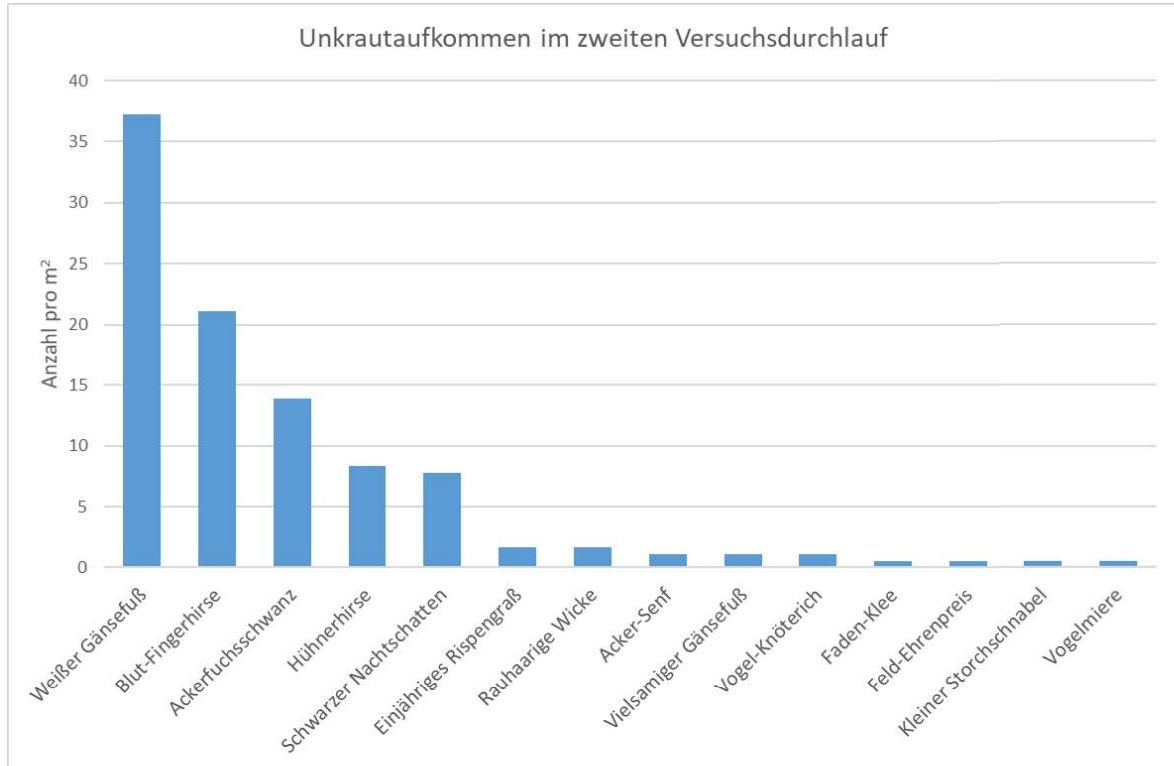


Abbildung 44 Aufkommen verschiedener Unkrautarten in den Kontrollparzellen zum Zeitpunkt der Bonitur im zweiten Versuchsdurchlauf. Das Gesamtaufkommen lag bei 96 Pflanzen/m² und es wurden 14 verschiedene Unkrautarten identifiziert.

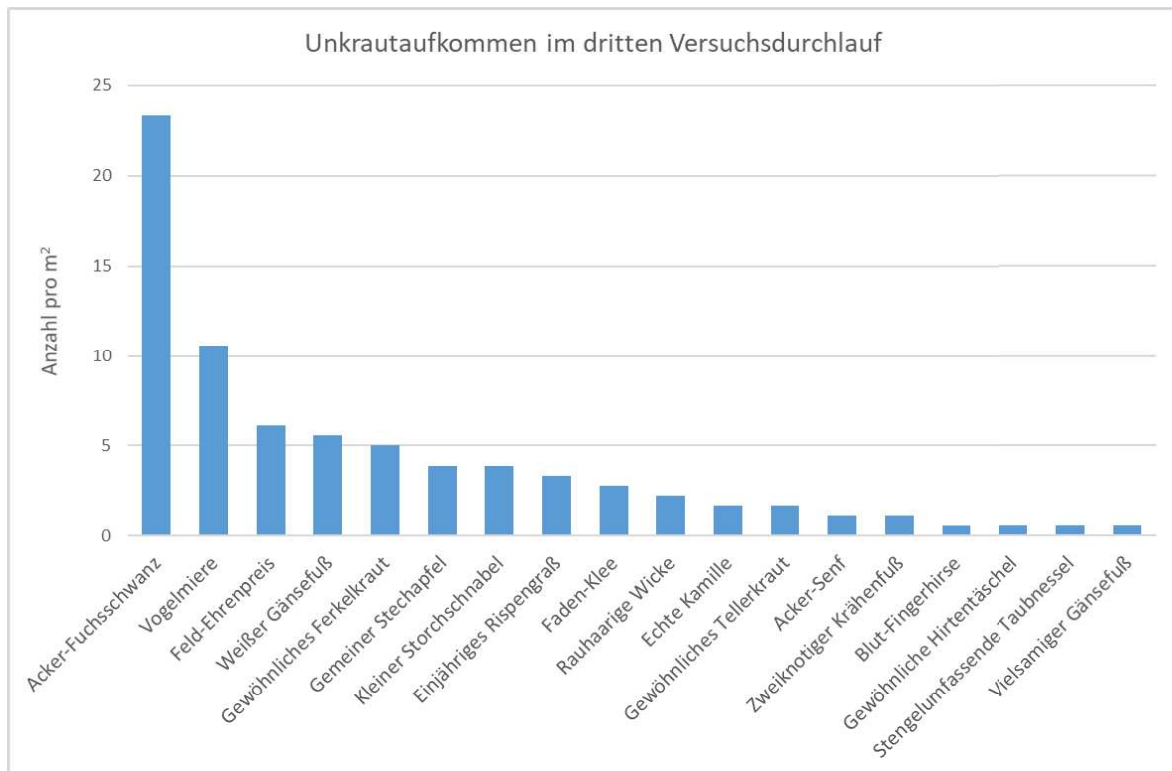


Abbildung 45 Aufkommen verschiedener Unkrautarten in den Kontrollparzellen zum Zeitpunkt der Bonitur im dritten Versuchsdurchlauf. Das Gesamtaufkommen lag bei 118 Pflanzen/m² und es wurden 18 verschiedene Unkrautarten identifiziert.

Vergleich der Behandlungsvarianten:

Der visuelle Vergleich der Versuchspartellen zu Versuchsende (**Abbildung 46 – Abbildung 48**) lässt bereits erste Rückschlüsse auf den Behandlungserfolg der einzelnen Versuchsvarianten zu. So unterschieden sich alle mit Herbizid und/oder Laser behandelten Partellen in ihrer Verunkrautung optisch deutlich von den Kontrollpartellen. Unter den behandelten Partellen ist die visuelle Verunkrautung in den nur mit Laser behandelten Partellen tendenziell am höchsten gewesen.

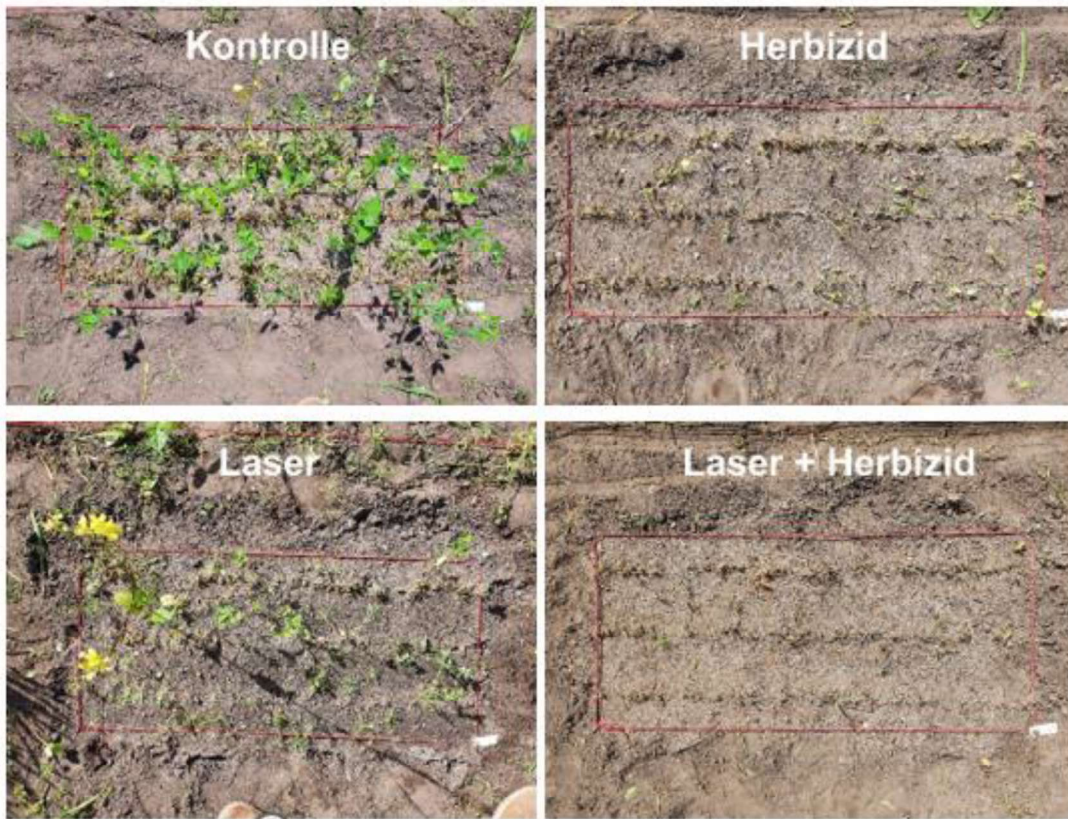


Abbildung 46 Visueller Vergleich der Behandlungsvarianten zum Ende des ersten Versuchsdurchlaufs.



Abbildung 47 Visueller Vergleich der Behandlungsvarianten zum Ende des zweiten Versuchsdurchlaufs.



Abbildung 48 Visueller Vergleich der Behandlungsvarianten zum Ende des dritten Versuchsdurchlaufs.

Die Ergebnisse der Bonitur bestätigen den visuellen Eindruck der Versuchspartellen. Die erzielten Wirkungsgrade lagen bei Betrachtung der Gesamtheit aller vorhandenen Unkräuter und über alle Behandlungen und Versuchsdurchläufe hinweg zwischen 22 % und 93 %, mit den geringsten Wirkungsgraden bei ausschließlicher Laserbehandlung (**Abbildung 49**).

Die Bekämpfung der einkeimblättrigen Unkräuter (**Abbildung 50**) bereitete die größten Schwierigkeiten bei der Unkrautbekämpfung. Der durch den alleinigen Herbizideinsatz erzielte Wirkungsgrad lag hier bei durchschnittlich 50 %. Der Behandlungserfolg der Laserbehandlung lag bei den Ungräsern im ersten Versuch bei einem Wirkungsgrad von 9 %. Im zweiten und dritten Versuch lag die Wirksamkeit der Laserbehandlung auf einem ähnlichen Niveau wie die Herbizidbehandlung. Durch die Kombination von Herbizid- und Laserbehandlung konnte der Wirkungsgrad hier um bis zu 30 % gesteigert werden (**Abbildung 52**).

Bei den zweikeimblättrigen Unkräutern (**Abbildung 51**) lag der Wirkungsgrad der Herbizidvariante bei bis zu 99 %, weshalb hier durch einen kombinierten Lasereinsatz keine signifikante Steigerung mehr erzielt werden konnte. Bei ausschließlicher Laserbehandlung lagen die Wirkungsgrade bei den dikotylen Unkräutern zwischen 26 % und 89 %.

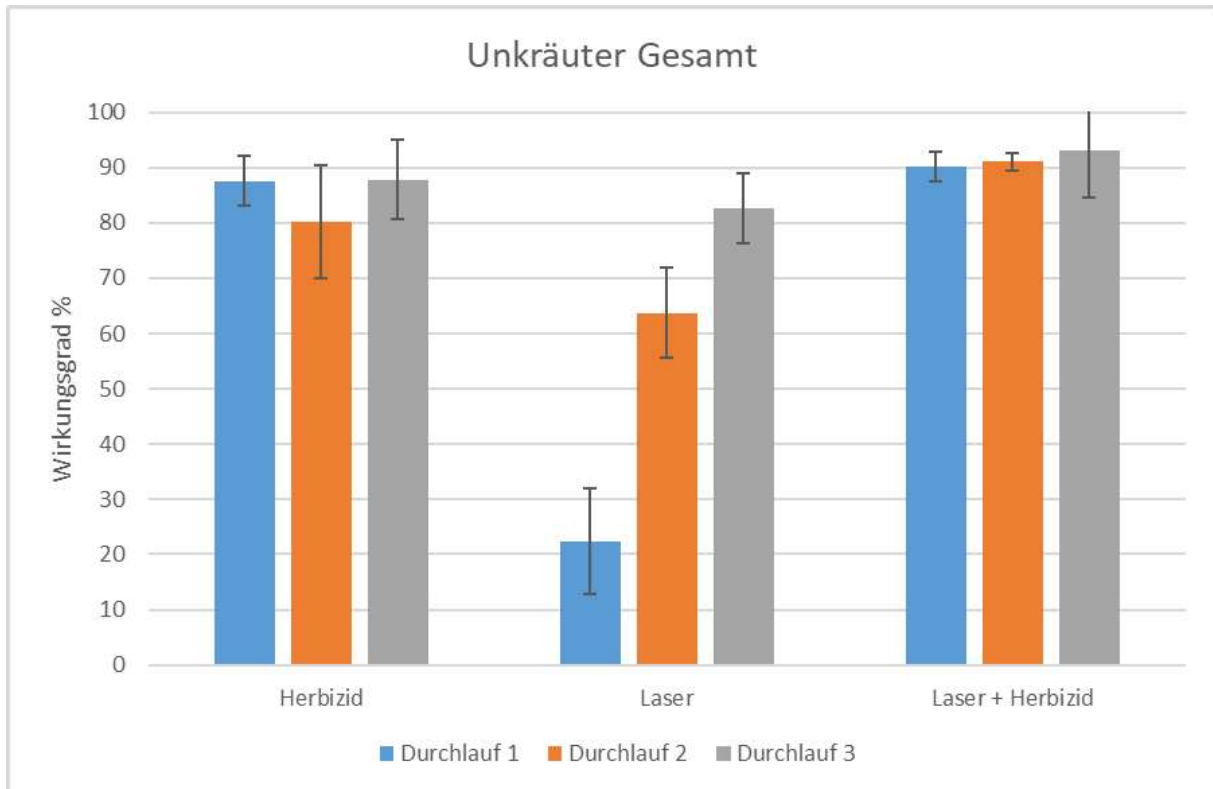


Abbildung 49 Wirkungsgrad (%; MW ± SD) der unterschiedlichen Behandlungen in den drei Versuchsdurchläufen bezogen auf alle erfassten Unkräuter. (n=4)

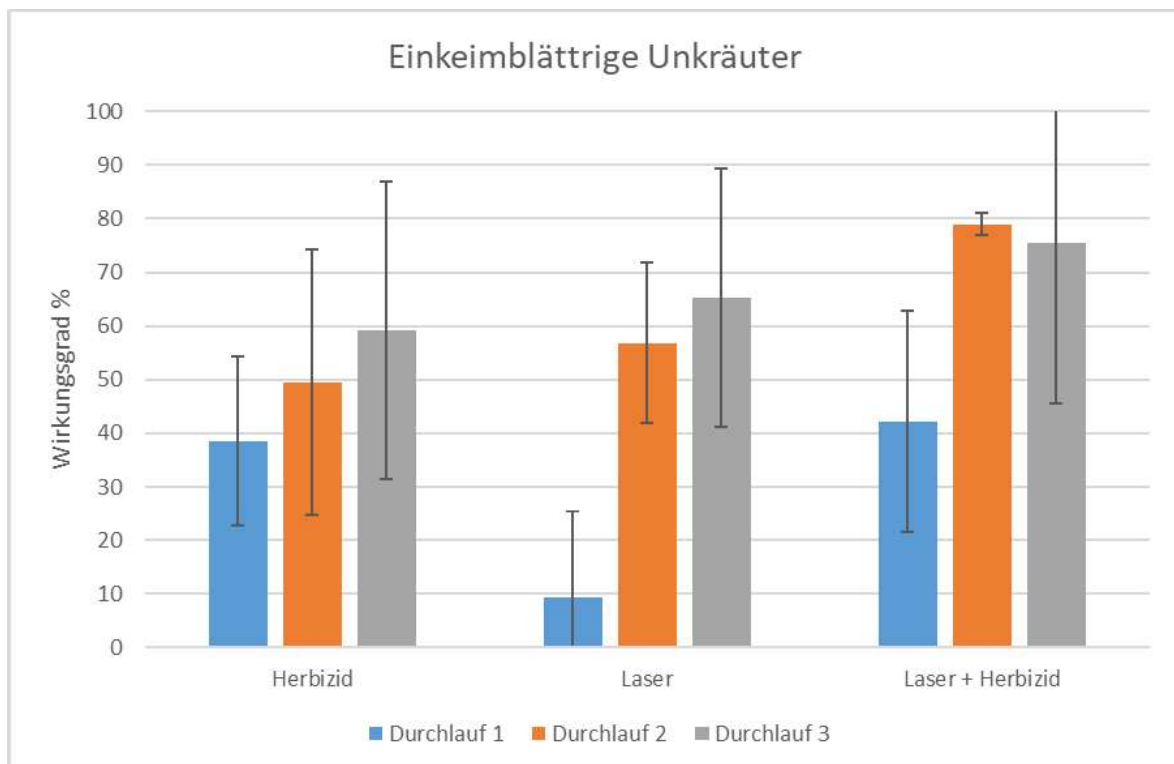


Abbildung 50 Wirkungsgrad (%; MW ± SD) der unterschiedlichen Behandlungen in den drei Versuchsdurchläufen bezogen auf alle einkeimblättrigen Unkräuter. (n=4)

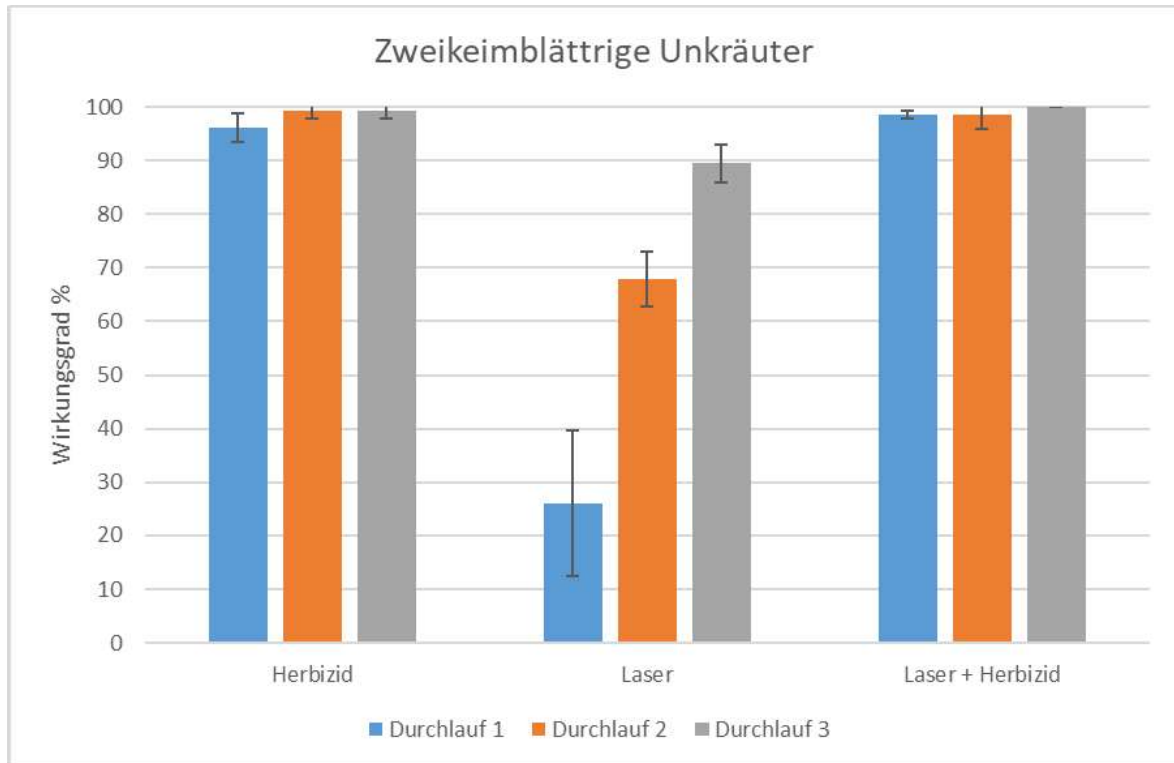


Abbildung 51 Wirkungsgrad (%; MW ± SD) der unterschiedlichen Behandlungen in den drei Versuchsdurchläufen bezogen auf alle zweikeimblättrigen Unkräuter (n=4).

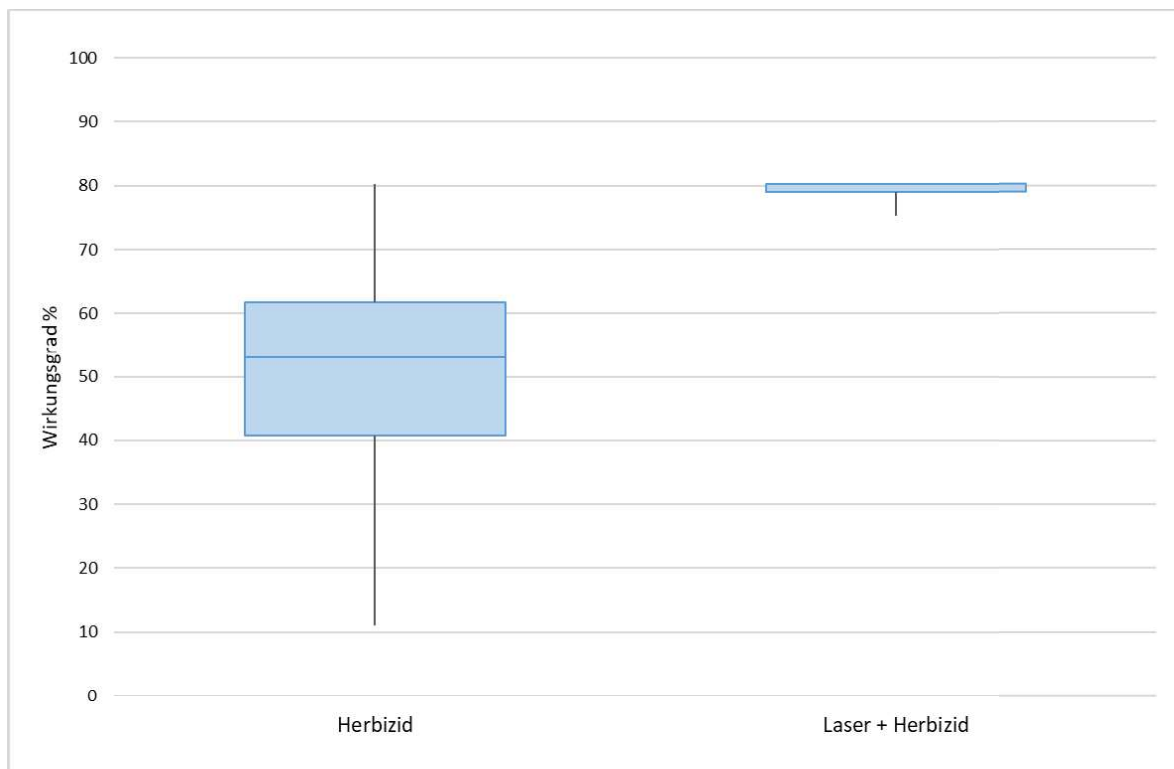


Abbildung 52 Kombination von Herbizid- und Laserbehandlung bei einkeimblättrigen Unkräutern. (n=4, Daten aus zweitem Versuchsdurchlauf).

Der geringe Effekt der Laserbehandlung im ersten Versuchsdurchlauf ist auf einen zu späten Behandlungszeitpunkt zurückzuführen. Der Weizen war zum Zeitpunkt der Behandlung bereits

in der Bestockung, wodurch die Reihenzwischenräume größtenteils vom Weizen bedeckt waren, was die Detektion der Unkrautpflanzen erheblich erschwerte. Zudem war ein Großteil der Unkräuter bereits zu groß, um eine nachhaltige Schädigung durch den Laser mit den verwendeten Leistungen erreichen zu können. Durch die Optimierung des Einsatzzeitpunktes im zweiten Versuchsdurchlauf sowie durch die zweite Laserbehandlung im dritten Versuchsdurchlauf konnte die Effektivität des Lasers deutlich gesteigert und Wirkungsgrade von 64 % und 83 % erzielt werden (**Abbildung 53**). Dies verdeutlicht die große Bedeutung des optimalen Behandlungszeitpunktes für die laserbasierte Unkrautbekämpfung. So muss bei der Wahl des Behandlungszeitpunktes sowohl die Größe des Unkrautes als auch der Entwicklungsstand der Kultur berücksichtigt werden. Hinzu kommt, dass der Laser nur bereits aufgelaufene Unkräuter erkennt und nachträglich auflaufendes Unkraut nicht erfasst wird. Dies macht unter Umständen eine mehrmalige Behandlung zu unterschiedlichen Zeitpunkten notwendig.

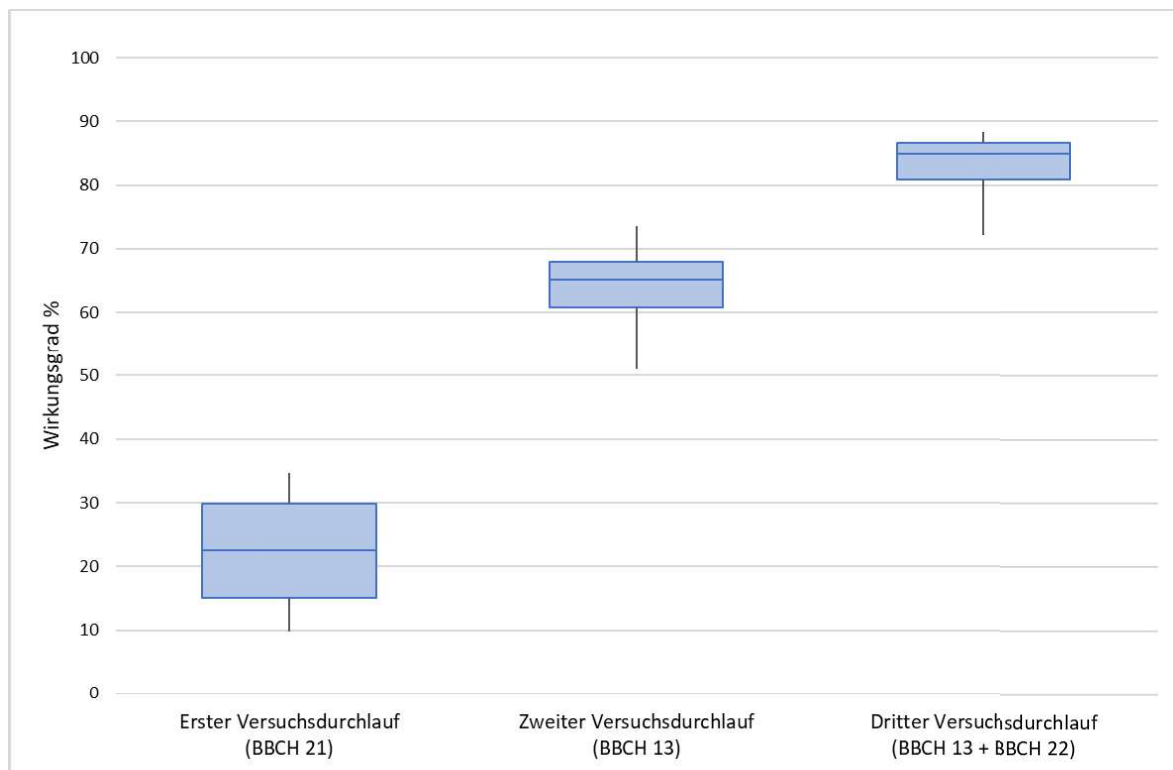


Abbildung 53 Einfluss des Behandlungszeitpunktes auf den Wirkungsgrad (%) der Laserbehandlung bezogen auf alle erfassten Unkräuter (n=4).

Eine weitere Erkenntnis aus den Versuchen ist der Einfluss des Unkrauttyps auf den Erfolg der Laserbehandlung (**Abbildung 54**). Während die zweikeimblättrigen Unkräuter bereits recht zuverlässig vom Laser erfasst wurden, unterlagen die in den Versuchen erzielten Wirkungsgrade gegen einkeimblättrige Unkräuter zum Teil großen Schwankungen. Hier besteht noch Optimierungsbedarf bei der sicheren Erkennung der Ungräser und der

Lokalisierung des optimalen Bestrahlungspunktes. Im Gegensatz zu dikotylen Pflanzen liegt das Wuchszentrum bei Ungräsern an der Sprossbasis und wird oftmals vom Boden oder von anderen Pflanzen verdeckt, wodurch die Bekämpfung maßgeblich erschwert wird.

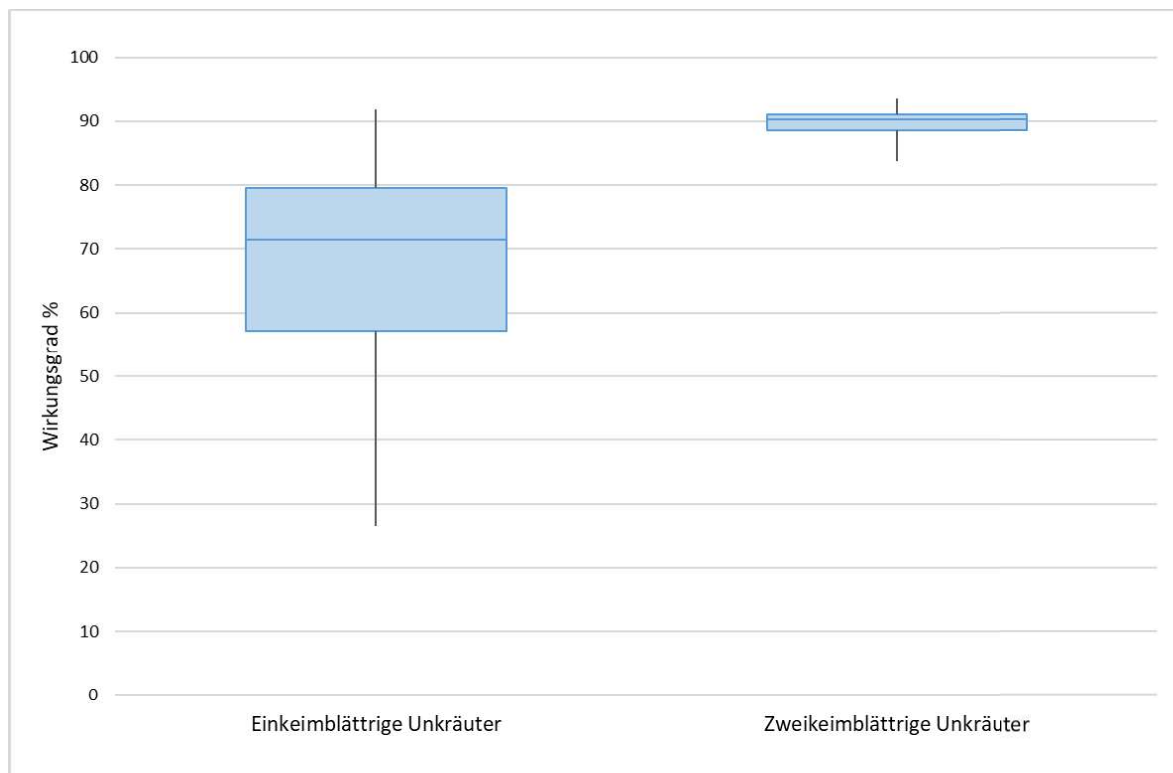


Abbildung 54 Einfluss des Unkrauttyps auf den Wirkungsgrad (%) der Laserbehandlung. (n=4, Daten aus drittem Versuchsdurchlauf).

Abweichungen zwischen Projektplan und Ergebnissen

Zu Projektbeginn war geplant, zwei Applikationseinheiten aufzubauen: Eine Applikationseinheit zur ausschließlichen seitlichen Bestrahlung und eine zur senkrechten Bestrahlung. Weiterhin war geplant, die Feldversuche im Herbst 2020 zu beginnen und jede weitere Kulturphase weitere Versuche durchzuführen. Davon wurde wie folgt begründet abgewichen.

Die Position des Entwicklungsingenieurs am Laser Zentrum Hannover konnte erst im Juni 2020 besetzt werden. In der Folge zeichnete sich bereits früh eine notwendige Umorganisation der Feldversuchskampagnen und der technischen Entwicklungsschritte ab. 2020 wurden die ackerbaulichen Anforderungen durch Feldbegehungen evaluiert. Zudem wurden Pflanzversuche zur Ermittlung der Zerstörschwelle durchgeführt und ein erster Entwurf für eine Feldapplikation erstellt. 2021 wurde die technische Ausführung des Applikators durchgeführt. Diese beinhaltete Konstruktionsarbeiten, Beschaffung und Integration. Parallel wurde eine eigene Versuchsanlage mit zugehörigem Gewächshaus am LZH aufgebaut, da sich das kontinuierliche Vorhalten geeigneter Pflanzen und Testflächen für Bestrahlungsversuche und das Training der automatischen Erkennung im Projektverlauf als notwendig erwies, um eine

praxisnahe Entwicklung zu ermöglichen. Im Laufe des Projektvorhabens wurde die technische Umsetzung der Laserbehandlung von zwei separaten Applikatoren zur Vereinfachung und damit Beschleunigung der Entwicklung auf einen Applikator mit zwei Funktionalitäten geändert. Die Einsatzbereitschaft eines geeigneten Applikators wurde 2022 erreicht. Parallel wurden Bilddaten gesammelt und eine geeignete Softwareumsetzung der automatischen Zielerkennung entwickelt. 2022 wurde eine Reihe von Feldversuchen durchgeführt. Zudem wurde 2022 das Vorhaben LURUU mit zugehörigem Demonstrator auf den Öko-Feldtagen in Villmar-Aumenau vorgestellt. 2023 wurden ein abschließender Feldversuch auf dem Betrieb des OG Mitglieds Bernd Dröse in Klein Lobke sowie eine Abschlussveranstaltung durchgeführt.

Durch den Wissenstransfer innerhalb der OG, die technische Auslegung der Komponenten und die Entwicklung einer Umsetzungsstrategie ist die Komplexität dieses Forschungsvorhabens präzisiert worden. Im Gegensatz zu den Annahmen zu Projektbeginn konnte nicht unmittelbar ein vorentwickelter Applikator für den spezifischen Einsatzzweck innerhalb des Projektes LURUU verwendet werden. Zusammen mit dem durch die späte Stellenbesetzung verzögerten Start der Entwicklungsarbeiten musste der Plan für die Feldversuche und die Entwicklungsschritte des Applikators angepasst werden, um die Projektziele dennoch bestmöglich zu erreichen. Im Jahr 2022 konnte schließlich der Laserapplikator auch unter Einbeziehung der Vorarbeiten des Forschungsvorhabens „NUBELA“ verwendet werden.

Beitrag der Ergebnisse zu förderpolitischen EIP-Zielen

In dem Vorhaben LURUU konnte die OG durch unmittelbaren Austausch das Praxiswissen direkt vermitteln und somit einen Innovationstransfer beschleunigen. Im Vorhaben LURUU haben Praktiker aus der Landwirtschaft mit Experten aus der Herbologie sowie Entwicklern aus dem Maschinenbau gemeinsam an einem Problem der Landwirtschaft gearbeitet. Das Vorhaben LURUU kann damit einen Beitrag zur zukünftigen Wettbewerbsfähigkeit sowie einer nachhaltig wirtschaftenden Landwirtschaft leisten. Der Beitrag zur Wettbewerbsfähigkeit liegt dabei in der innovativen Laseranwendung für die Sanierung von Flächen, die mit herbizidresistenten Beikräutern belastet sind als Alternative zum angepassten Mähen des Befalls. Der Beitrag zur nachhaltigen Landwirtschaft liegt in dem Potential der erforschten Lasertechnologie den Einsatz von Herbiziden sowie den Einsatz mechanischer Verfahren für die Unkrautkontrolle zu reduzieren. Zudem konnte ein Erfahrungsaustausch mit dem EIP-Projekt „Antago Senecio“ (Uni Gießen) die Vernetzung über das Bundesland Niedersachsen hinaus ermöglichen.

Nebenergebnisse

Durch den Besuch der Ökofeldtage 2022 ist der Kontakt zum EIP-Vorhaben „Antago Senecio“ entstanden. Die Projektmitarbeiterin Johanna Lill beschäftigt sich mit der Forschungsfrage eine naturverträgliche und integrierte Bekämpfungsstrategie von Kreuzkräutern zu entwickeln. Im Rahmen des Kontaktes wurden in 2022 und 2023 bereits erste Voruntersuchungen zur Behandlung von Jakobskreuzkraut (*Jacobaea vulgaris*) in verschiedenen Wuchsstadien durchgeführt. Die Versuchsergebnisse variieren von unbeschädigten Pflanzen, über Wuchsverzögerungen hin zu letaler Schädigung der bestrahlten Pflanzen. Die zugehörigen Versuche werden aktuell noch ausgewertet. Vorläufige Ergebnisse deuten darauf hin, dass Keimlinge des Jakobskreuzkrautes letal bestrahlt und einjährige Pflanzen massiv im Wuchs verzögert werden können.

Arbeiten, die zu keiner Lösung geführt haben

Die Integration des Raumportals von ISEL sowie die Strahlablenkung von Laserline steht noch aus. Um eine Integration der Komponenten in den im Projekt genutzten Applikator zu ermöglichen, müssen einige Anpassungen in der Steuerelektronik sowie beim zur Verfügung stehenden Bauraum vorgenommen werden.

V. Nutzen der Ergebnisse für die Praxis

Im Projekt konnten wesentliche Grundlagen für eine zukünftige Nutzung der Projektergebnisse in der Praxis gelegt werden. Insbesondere konnten praxisnahe Versuche durchgeführt werden, anhand derer die Landwirte die Laserbehandlung für die Sanierung von Ackerflächen mit Nestern von resistentem Umkraut – insbesondere Ungras wie Ackerfuchsschwanz – bewerten und konkrete Perspektiven für die zukünftige Nutzung des Verfahrens aufzeigen konnten. Dies umfasst auch konkrete Umsetzungsvorschläge für eine Verwertung der Projektergebnisse im Hinblick auf die Entwicklung eines kommerziellen Gerätes, das dann in der breiten landwirtschaftlichen Praxis eingesetzt werden kann und wirtschaftlich attraktiv ist (siehe auch Abschnitt VII zur wirtschaftlichen Anschlussfähigkeit). Die für die zukünftige Nutzung der Projektergebnisse in der Praxis wesentlichen Erkenntnisse sind im Folgenden nochmals zusammengefasst.

Lasertechnik: Die Laserbehandlung mit IR-Strahlung der Wellenlänge 1940 nm sowie sichtbarer Strahlung der Wellenlänge 450 nm sind für die Unkrautbehandlung geeignet.

Die hier verwendete Laserquelle mit einer Wellenlänge von 1940 nm ist ein mittels Dioden gepumpter Faserlaser. Ein Faserlaser erzeugt die Laserstrahlung innerhalb der Faser und ermöglicht mit der Lichtleitfaser eine Entkopplung von der Versorgungseinheit und dem Behandlungsraum. Die Strahlführung mittels Lichtleitfaser ist zuverlässig und sicher. Da der Faserlaser die relevante Strahlung in der Faser erzeugt, ist die Faser ein kritisches Bauteil und nicht einfach auszutauschen. Die ebenfalls getestete Laserquelle mit einer Wellenlänge von

450 nm ist ein Diodenlaser, welcher in eine Lichtleitfaser eingekoppelt wird. Im direkten Vergleich der hier verwendeten Laserquellen ermöglicht der Diodenlaser einen höheren Wirkungsgrad.

Strahlführung: Die Bestrahlung unter einem Winkel von 10-20° ist praktikabel, um einerseits in der Pflanzreihe behandeln zu können und andererseits Gräser leichter erkennen bzw. behandeln zu können. In der Praxis hat sich die Rotation des Bestrahlungspunktes in einer Kreisbahn als nützlich erwiesen.

Bestrahlungsversuche: Die Bestrahlungsversuche belegen eine vergleichbare Zerstörschwelle beider Wellenlängen (1940 nm und 450 nm). Die Zerstörschwelle wurde pflanzenspezifisch und abhängig vom Wuchsfortschritt ermittelt. Als Empfehlung kann für kleine Ungräser 0,25 J/mm², für mittlere Ungräser 1 J/mm² und für große Ungräser 2 J/mm² angegeben werden. Hierbei wird eine optimale Treffgenauigkeit angenommen. Ein praktikabler Strahldurchmesser für die Laserbehandlung sind 5,5 mm (1/e²). Der Strahldurchmesser sollte so klein wie möglich sein, um energieeffizient zu arbeiten und so groß wie nötig, um das Zielgewebe vollflächig zu treffen. Der minimale Strahldurchmesser entspricht dem Querschnitt der Pflanze am Bestrahlungspunkt. Für kleine hier untersuchte Ungräser beträgt der minimale Strahldurchmesser 1 mm, Ungräser in fortgeschrittenen Wuchsstadien benötigen mindestens einen Strahldurchmesser von 2 mm.

Kameratechnik: Die verwendete Kameratechnik besteht aus einer 3D Auswertung mittels LIDAR Technologie, der 2D Objekterkennung mittels 2MP RGB-Kamera sowie einer Weißlicht LED-Beleuchtung (Farbwiedergabe: CRI größer 90) und stellt so einen günstigen und praktikablen Lösungsansatz zur Erkennung von Zielpflanzen dar. Die Einschränkung der verwendeten Kameratechnik liegt im Wesentlichen in der beschränkten Ortsauflösung von kleiner 4 px/mm im RGB-Farbbild und 2 px/mm in der LIDAR Tiefenaufnahme. Identische Technologien mit höherer Auflösung sind im Verkaufspreis nicht vergleichbar und bedeutend teurer. Alternative Technologien zur Zielpflanzenerkennung, wie beispielsweise Profilsensoren, konnten aufgrund der Komplexität, des Preises und der coronabedingt eingeschränkten Marktverfügbarkeiten nicht innerhalb des Vorhabens LURUU untersucht werden.

Die Pflanzenunterscheidung und Identifikation des Bestrahlungspunktes kann mit Hilfe von Neuronalen Netzen automatisiert werden. Lernende Systeme sind aufgrund der Komplexität der Szene notwendig. Detektoren können bspw. mit YOLO-Modellen aufgebaut werden. Die größte Herausforderung stellt die Erzeugung von Trainingsdaten dar. Dies beinhaltet das Generieren geeigneter Bilder sowie das manuelle Markieren und Benennen der Pflanzen.

Trainingsdaten für die automatische Erkennung: Das Trainieren der automatischen Erkennung kann durch isolierte Szenen ermöglicht werden und stellt einen robusten Trainingsbeginn dar.

In diesem Vorhaben hat sich der Trainingsanfang mit in Pflanzschalen kultivierten sortenreinen Szenen als zielführend erwiesen. Das weiterführende Training kann mittels mobiler Fotoboxen im Feldeinsatz skaliert werden. Das Training muss Unterschiede der Bodenstruktur, der Witterung, der Tageszeit und des Wuchsstadiums umfassen, um eine robuste Erkennung zu ermöglichen. Die Erkennung sollte zumindest die Nutzpflanze in der Pflanzreihe mit hoher Sicherheit erkennen. Anschließend kann das Unkraut von der Nutzpflanze unterschieden werden. Eine Unterscheidung in Monokotyledone und Dikotyledone sowie eine vereinfachte Gruppierung der Wuchsstadien ist für eine angepasste Behandlung empfehlenswert.



Abbildung 55 Laserapplikator auf Versuchsfeldfläche am Laser Zentrum Hannover.

Behandlungsprozess: Die initiale Laserbehandlung sollte, entsprechend der guten fachlichen Praxis thermischer Unkrautbekämpfung, stattfinden bevor die Nutzpflanze bestockt. Zudem wird eine mehrfache Behandlung von mindestens zwei Anwendungen empfohlen. Die Mehrfachbehandlung ist besonders relevant, da Keimlinge kleiner BBCH 10 während einer Behandlung nicht erkannt werden und somit nicht behandelt werden können.

Es steht ein einsatzbereiter Laserapplikator für senkrechte oder Bestrahlung bei statisch schrägem Einfall zur Verfügung, vgl. **Abbildung 55**. Die Stromversorgung erfolgt mittels Stromgenerator. Die Geländegängigkeit ist auf trockene Witterung beschränkt. Die Erkennung der Zielpflanzen erfolgt teilautomatisiert. Es werden Vorschläge durch das automatische Erkennungssystem gemacht, welche manuell nachbearbeitet werden können. Der Bestrahlungsvorgang ist automatisiert.

VI. (Geplante) Verwertung und Nutzung der Ergebnisse

LZH: Das Laser Zentrum Hannover e.V. ist eine gemeinnützige Einrichtung mit dem Ziel, Anwendungsfelder für die Lasertechnik zu erforschen. Dazu werden die erarbeiteten Lösungen in folgenden Forschungsprojekten weiterentwickelt und offene Forschungsfragen evaluiert, siehe wissenschaftliche Anschlussfähigkeit. Im Zusammenspiel mit den derzeit in anderen Projekten am LZH erarbeiteten Ergebnissen zur Integration der Lasertechnik in landwirtschaftliche Fahrzeugtechnik (Agrarroboter, Anbaugerät) wird geprüft, ob und wie zukünftig eine Verwertung in ein kommerzielles Behandlungsgerät erfolgen kann.

PSA LWK: Eine direkte Verwertung der Ergebnisse ist aktuell nicht geplant. Hierzu ist zunächst eine Weiterentwicklung der Lasertechnik sowie eine Implementierung in landwirtschaftlich erprobte Fahrzeugtechnik notwendig. Indirekt fließen die Erfahrungen, die während des Projektzeitraums gesammelt wurden und die Erkenntnisse aus den Projektergebnissen in die tägliche Arbeit, wie Beratungsgespräche oder die Entwicklung von neuen Fragestellungen für Feldversuche, mit ein.

VII. Wirtschaftliche und wissenschaftliche Anschlussfähigkeit

Wirtschaftliche Anschlussfähigkeit

Die Wirtschaftlichkeit des Lasereinsatzes zur Unkrautregulierung kann unter zwei verschiedenen Annahmen beurteilt werden. Szenario 1 beschreibt die Substitution des Herbizideinsatzes. Szenario 2 beschreibt die Ergänzung etablierter Methoden durch den Lasereinsatz zur Vermeidung von Resistenzbildung oder zur Sanierung von Schlägen mit Nestern resistenter Pflanzen.

Szenario 1: Für eine vollständige Substitution des Herbizideinsatzes und eine geringe Hürde für die Prozessintegration kann eine Umsetzung ähnlich einer Pflanzenschutzspritze verwendet werden, bspw. als Anbaugerät an einem Traktor, der gleichzeitig als Energiequelle dient. Das Anbaugerät kann ein- oder zweiachsig ausgeführt sein. Zusätzlich kann durch hydraulisch klappbare Gestänge die Arbeitsbreite für den Einsatz vergrößert werden. Der Schlepper fährt die Fahrgassen wie gewohnt ab. Vom Auflaufen bis zur Bestockung sind mehrere Arbeitsgänge notwendig. Der Anwendungszeitraum wäre Oktober bis Dezember. Die Kosten für Pflanzenschutzmittel mit Wirkung gegen ALOMY, Herbizid plus Technik inkl. MwSt. betragen nach Erfahrungswerten des OG Mitglieds Bernd Dröse im Herbst 70,00 €/ha und im Frühjahr 80,00 €/ha. Folglich sollten die Kosten für eine mehrmalige Laserbehandlung 150 €/ha nicht überschreiten.

Bei geschätzten 60 Einsatztagen und einer geschätzten Tagesleistung von 30 ha ergibt sich eine Gesamtleistung von 1.800 ha. Bei einer Gesamtleistung von 1.800 ha und einer Reduktion der Betriebsmittel um 100 €/ha ergibt sich ein maximaler Aufwand von 180.000 €

pro Anbausaison für den Lasereinsatz. Für die Nutzung einer zweiten Anbausaison kann sich der maximale Aufwand für den Lasereinsatz auf bis zu 360.000 € verdoppeln. Daraus ergeben sich maximale Einsatzpreise von 1.080.000 € für die einfache Anbausaison und 2.160.000 € für die doppelte Anbausaison unter Berücksichtigung einer verkürzten Abschreibungsdauer von 6 Jahren statt der üblichen 12 Jahre. Unter Berücksichtigung eines wirtschaftlichen Anreizes der Lasertechnologie im Vergleich zu Pflanzenschutzmitteln sollte die Anwendung um mindestens 10% günstiger sein. Darüber hinaus sollten die genannten Preise die Wartung und Ersatzteile beinhalten, die derzeit auf 30% der Gesamtkosten geschätzt werden. Daraus ergibt sich eine Empfehlung für einen maximalen Maschinenpreis von 648.000 € bis 1.296.000 €. Zur optimalen Ausnutzung der Gesamtleistung wird ein überbetrieblicher Einsatz empfohlen.

Für eine Arbeitsbreite von 30 m ergibt sich bei einer Lösungsvariante mit einem Lasermodul je 33 cm eine Umsetzung mit 90 Teilmodulen, vergleichbar mit Pflanzenschutzspritzen. Bei 90 Lasermodulen und einem maximalen Maschinenpreis von 1.296.000 € ergibt sich ein maximaler Preis eines Lasermoduls von 14.400 €. Die Auslegung eines Lasermoduls pro 33 cm Arbeitsbreite ist nicht absolut. Eine Realisierung des maximalen Modulpreises ist mit handelsüblichen Industrieprodukten derzeit nicht erreichbar. Die Integration der notwendigen Komponenten inklusive einer Vereinfachung der Spezifikation für diese Anwendung sowie die Produktion in größeren Stückzahlen können eine Realisierung ermöglichen. Hierzu zählen insbesondere der Einsatz von Diodenlasern sowie die Eigenentwicklung von Scanningsystemen zur Strahlablenkung.

Szenario 2: Für die Erweiterung bestehender Pflanzenschutzmaßnahmen zur Vermeidung von Resistenzbildung oder zur Sanierung belasteter Schläge kann die Umsetzung als Anhängengerät oder als selbstfahrendes Robotersystem konzipiert werden. In diesem Szenario wurden Pflanzenschutzmittel bereits im Vorfeld und damit insgesamt mindestens einmal appliziert. Daher ist das Auftreten von Durchwuchs deutlich geringer als ohne Behandlung. Für einen solchen Anwendungsfall kann die Arbeitsgeschwindigkeit deutlich geringer sein als in Szenario 1. Aus diesem Grund ist hier die Umsetzung mit selbstfahrenden Robotersystemen vorteilhaft. Die Kombination von Drohnen zur Fernerkundung und mobilen Robotersystemen zur flexiblen Behandlung ist insbesondere bei der Sanierung von verstreuten Nestern besonders effizient.

Dies ist das wahrscheinlichere Verwertungsszenario zumindest für den ersten Schritt in Richtung Kommerzialisierung.

Wissenschaftliche Anschlussfähigkeit

Die Ergebnisse des Projektes LURUU fließen in die Durchführung weiterer Forschungsprojekte ein. Beispielhaft seien hier die am LZH laufenden Projekte WeLASER, LUM und zukünftig auch das EIP Projekt GROW genannt. Hierbei findet auch eine Vertiefung der Kooperation Partnern aus der Wirtschaft statt, die auch eine wirtschaftliche Verwertung der Ergebnisse im Blick hat. Die Ergebnisse wurden z. T. bereits projektbegleitend in studentischen Arbeiten vertieft und werden insbesondere in der Promotionsarbeit von M.Sc. Matthias Lautenschläger Eingang finden. Am LZH findet weiterhin ein gruppenübergreifender kontinuierlicher Austausch insbesondere zur Steuerung von Laserprozessen mittels künstlicher Intelligenz statt, über den LURUU Ergebnisse auch in angrenzende Wissensgebiete übertragen werden.

Im Projekt zeigte sich weiterer Forschungsbedarf zu konkreten Bereichen, auf den in der Zukunft verstärkt in Forschungs- und Entwicklungsprojekten eingegangen werden soll. Zentrale Themen sind hier:

- Weiterentwicklung der Energiequelle
- Weiterentwicklung der automatischen Bilderkennung
- Adaption auf autonome Geräteträger mit geeigneter Mobilität für den Ackerbau

Energiequelle: Aufbauend auf den Entwicklungen und Erprobungen im Projekt LURUU kann die Energiebereitstellung mittels Generatoren oder Energiespeichern konzipiert werden. Von besonderem Interesse ist dabei die Integration von Energiespeichern für den mobilen Robotereinsatz. Als Energiespeicher haben sich Batteriespeicher auf Lithiumbasis als robust, kompatibel und kommerziell verfügbar erwiesen. Solche LiFePO₄-Batteriespeicher sind auch als Solarspeicher bekannt. Batteriespeicher können leicht in ein 48 VDC-System integriert werden. Mit Kapazitäten von typischerweise bis zu 5 kWh, einem maximalen Entladestrom von bis zu 120 A, einem 19"-Format und einem Gesamtgewicht von ca. 44 kg sind solche Batteriespeicher ideal geeignet und kommerziell verfügbar. Laseranwendungen mit 50 W Lasermodulen können mittels Diodentechnologie mit ca. 300 W elektrischer Leistung betrieben werden. Zusammen mit Peripherie und EDV sind maximale Lasten von ca. 800 W zu erwarten. Unter Berücksichtigung einer Einschaltdauer von weniger als 50 % für den Laser und die zugehörige Kühlung ergibt sich eine mittlere zu erwartende elektrische Last von 500 W. Mit dem eingangs beschriebenen 5 kWh Batteriespeicher kann ein Dauerbetrieb von ca. 10 Stunden gewährleistet werden. Dieser Energiespeicher kann durch moderne Solarmodule ergänzt werden. Moderne Solarmodule mit einer Größe von ca. 2,3 m x 1,3 m können bis zu 670 Wp erzeugen und somit unter idealen Bedingungen ausreichend Energie für den Tagesbetrieb liefern. Somit kann mit einer Ladestation inklusive Schnellladetechnik und einem

Solarmodul mit geringem technischem Aufwand ein 24/7 Betrieb von mobilen Robotersystemen gewährleistet werden.

Automatische Zielerkennung: Basierend auf den Entwicklungen im Projekt LURUU kann einerseits die Methode zum Einlernen neuer Anlagen weiterverwendet werden, andererseits kann aus den Erkenntnissen des Projektes LURUU abgeleitet werden, dass eine Erkennung aus mehreren Perspektiven sowie idealerweise ein Blickwinkel von mindestens 10° zum Zielobjekt vorteilhaft ist. Eine mögliche Umsetzung dieser Anforderungen kann die Platzierung von 2 oder 4 Kamerasystemen über dem Arbeitsbereich sein. Die Sensordaten z. B. des Intel LIDAR L515 können zu einer umfassenden Darstellung der vorliegenden Szene verknüpft werden. Durch die Erweiterung der Perspektiven können bisher verborgene Pflanzen besser erkannt werden.

Zusätzlich empfiehlt sich die Implementierung einer Hand-Augen-Koordination, d. h. die spezifische Positionskorrektur des Endeffektors durch eine eigene optische Kontrollinstanz. Diese optische Kontrolle kann durch eine Kamera erfolgen, die den Endeffektor permanent im Blickfeld hat oder mit dem Endeffektor gekoppelt ist und eine konstante Relation zu den Zielkoordinaten hat. Eine permanente Lagekorrektur entlastet die Anforderungen an die Objekterkennung und segmentiert die Aufgabe dahingehend, dass die zweite Kamera oberhalb der bereits erkannten Zielpflanze ausschließlich den Bestrahlungspunkt im Detail anvisiert.

Mobile Applikation: Basierend auf den Entwicklungen und Erfahrungen im Projekt LURUU können die Anforderungen an eine mobile Anwendung spezifiziert werden. Der Geräteträger für die mobile Anwendung sollte mindestens vier Räder mit AS-/Terra-Profil oder Kettenantrieb haben. Andernfalls ist das Arbeiten auf lehmigen Böden schon bei geringster Feuchtigkeit nicht möglich. Die Tragfähigkeit des Geräteträgers sollte bis zu 250 kg betragen. Die Stabilisierung und Dämpfung des Gerätes kann teilweise an der Radaufhängung und teilweise am Geräteträger erfolgen. Eine ideale Stabilisierung ist nicht verhältnismäßig. Eine ausreichende Stabilisierung kompensiert latente Vibrationen und reduziert außergewöhnliche Impulse, die z. B. durch große Steine und Löcher verursacht werden. Weitere relevante Merkmale einer mobilen Anwendung sind die Bahnplanung mittels GPS, die Hinderniserkennung sowie ein genereller Fernzugriff auf den gesamten Applikator. Mit diesen Erweiterungen kann die mobile Laserapplikation hinreichend automatisiert werden. Die notwendigen Kompetenzen sind bei verschiedenen Roboterherstellern vorhanden.

VIII. Nutzung des Innovationsbüro (Innovationsdienstleister, IDL)

Das Innovationszentrum Niedersachsen unterstützte das Projekt insbesondere durch konstruktive Beratung in der Projektvorbereitung und in ersten Disseminationstätigkeiten. So konnte das Projekt bereits im Oktober 2019 einem großen Publikum insbesondere aus Wirtschaft und Politik vorgestellt werden. Auch die vom IDL organisierten Netzwerktreffen, waren nützlich insbesondere für die Erweiterung des agrarbezogenen Netzwerks.

IX. Kommunikations- und Disseminationskonzept

Vor dem Hintergrund seines Innovationspotentials bot das Projekt LURUU gute Ansatzpunkte zu seiner medialen Vermarktung. Nach einer ersten Kommunikation rund um den Projektstart fiel es allerdings in der ersten Projektphase zunehmend schwer, Berichtsanlässe zu schaffen, da noch keine Ergebnisse vorlagen. Daher ist es eine der Empfehlungen des Projektteams, die Öffentlichkeitsarbeit bei derartigen Projekten nach dem Projektstart zunächst wieder herunterzufahren und dafür aber länger als das eigentliche Projekt laufen zu lassen. Denn die mediale Verwertung des Projektes LURUU wird nicht am Projektende zum Erliegen kommen, da insbesondere durch die Abschlussveranstaltung neues Interesse geweckt wurde.

Instrumente zur Öffentlichkeitsarbeit waren a) die Website, b) Roll up/ Poster, c) Pressemeldungen und d) Präsentationen auf Feldtagen und Vortragsveranstaltungen.

1. Projektjahr 2020

Das erste Projektjahr war davon geprägt, dass sich die OG trotz der Pandemie zusammenfand und Strategien für die Öffentlichkeitsarbeit entwickelte. Auf der LZH Website wurde ein Projektsteckbrief veröffentlicht und am 23. Juli 20 erschien eine erste Pressemeldung, die das Projekt und seine Akteure beschrieb (Link: [Alternative: Laser – Neue Strategie im Umgang mit resistenten Unkräutern](#)) und u. a. von idw – online aufgenommen wurde. Eine Kurzdarstellung des Projektes wurde auch auf der Homepage der Landwirtschaftskammer Niedersachsen veröffentlicht. (Link: [LURUU – Lasereinsatz zur Unkrautregulierung bei resistenten Ungräsern und Unkräutern : Landwirtschaftskammer Niedersachsen \(lwk-niedersachsen.de\)](#)) Zusätzlich wurde die Idee des Projektes in einem kleinen Animationsfilm dargestellt, der auf der Website des NAN zu finden ist. Schließlich stellte sich die LURUU OG auf dem vierten bundesweiten EIP-Workshop, der am 12. August 2020 online stattfand, mit einem Poster vor. Da im Jahr 2020 Präsenzveranstaltungen wegen der Pandemie zum Erliegen gekommen waren, ergaben sich keine weiteren Möglichkeiten der Projektpräsentation.

2. Projektjahr 2021

Eine umfassendere erste Projektdarstellung erfolgte am 17. Juni 2021 im Rahmen einer Festveranstaltung zur Eröffnung des Ackerbauzentrums Niedersachsen auf der Burg Warberg (Landkreis Helmstedt). Vor rund 100 Gästen aus Landwirtschaft und Agrarbranche erläuterte

das LZH das gestartete Projekt LURUU (Link: [Laser statt Herbizide: LZH stellt Ansätze bei Eröffnung des Ackerbauzentrum Niedersachsen vor](#)). Im Folgenden wurde auf der Website des Netzwerk Ackerbau Niedersachsen e.V. (NAN) eine Projektseite aufgebaut, die im September 2021 online ging und seitdem kontinuierlich gepflegt wurde (<https://netzwerk-ackerbau.de/luruu/>). Die Projektinhalte wurden im Rahmen eines Vortrags auf der „Jahrestagung 2021 des Pflanzenschutzamtes und des Fachbereiches Pflanzenbau, Saatgut der Landwirtschaftskammer Niedersachsen“ vom 15.-17.12.2021 vorgestellt.

Schließlich erfolgte in enger Zusammenarbeit der OG Mitglieder die Planung für öffentliche Auftritte im Jahr 2022.

3. Projektjahr 2022

Im Jahr 2022 wurde das Projekt LURUU auf der 30. Deutschen Arbeitsbesprechung über Fragen der Unkrautbiologie und -bekämpfung vom 22. - 24. Februar 2022 in Form eines Kurzvortrags inkl. Poster vorgestellt (online Veranstaltung). Die Präsentation findet sich in einem Fachbeitrag im entsprechenden Tagungsband (Julius-Kühn-Archiv 468, DOI: 10.5073/20220124-075927) ab S. 438: Link: [Julius-Kühn-Archiv](#).) Über das Projekt und die ersten Projektfortschritte wurde auch mit einem Poster auf der Tagung des Ackerbauzentrums Niedersachsen „Landwirtschaft 2030 – die Strategien der Agrarpolitik und die Zukunft des Ackerbaus“ am 21. April 2022 auf der Burg Warberg berichtet. Wenig später, am 24. und 25. Mai 2023 beteiligte sich das LURUU Projektteam an der Regionalkonferenz des digitalen Experimentierfeldes FarmerSpace in Göttingen und auf dem begleitenden Feldtag auf dem Versuchsgut der Universität Göttingen Reinshof. Als drittes Event im Jahr 2022 war das LURUU Projekt bei den bundesweiten Öko- Feldtagen vom 28. bis 30. Juni auf dem Gladbacherhof in Villmar (Hessen) präsent. Schließlich wurde neben anderen Projekten auch das Vorhaben LURUU auf dem Landeserntedankfest am 2. Oktober 2022 in Hildesheim einer breiten Öffentlichkeit vorgestellt. Neben diesen Veranstaltungen wurde kontinuierlich bei Vorträgen des Ackerbauzentrums Niedersachsen über das Projekt als Teil des Arbeitsprogramms des NAN berichtet.

Schließlich wurden finanziert über das Büro Oldenburg von Europe Direkt zwei Kurzfilme über das Projekt LURUU konzipiert und gedreht. Sie wurden in den social media Kanälen und auf der Projekt-Website zum download angeboten. Zielgruppe ist dabei nicht die Fachwelt, sondern die breite Öffentlichkeit. Europe Direct Oldenburg ist die lokale Kontaktstelle der EU-Kommission für die Bürger vor Ort und hat als maßgeblichen Auftrag die Bürger über die EU und ihre Politiken zu informieren. Neben dem Film fand am 25. Juli 2022 ein ausführliches Interview mit dem Radiosender SWR2 zum Thema „Pflanzenschutzmittelreduktionsstrategien“ statt. Der halbstündige Podcast wurde im September gesendet. Ein Highlight im Bereich der Printmedien war ein umfangreicher Fachartikel im Getreide Magazin mit dem Titel „Mit dem

Lasereinsatz gegen resistente Ungräser und Unkräuter“ (Ausgabe 06/2022 (28. Jg.), DLG AgroFood Medien, S. 20-22).

4. Projektjahr 2023

Die letzten Monate des LURUU Projektes im Jahr 2023 waren von der Vorbereitung der Abschlussveranstaltung geprägt. Darüber hinaus konnte das Projekt am 26. Januar 23 auf dem Ackerbautag der Landberatung e.V. in Bad Fallingbostal vorgestellt werden sowie auf der 55. Gartenbauwissenschaftlichen Jahrestagung (01. – 04. März 2023) in Osnabrück (Link: [55. Gartenbauwissenschaftliche Jahrestagung](#)).

Am 07. März 2023 fand dann in den Räumen des LZH mit rund 70 Teilnehmern die Abschlussveranstaltung statt, bei der die Projektergebnisse vorgestellt, diskutiert und in einen agrar(umwelt)politischen Kontext gestellt wurden. Zusätzlich unterstrichen Vorträge aus weiteren Projekten zum Einsatz des Lasers im Pflanzenbau die Potentiale dieser Technik. U.a. die Fachzeitschrift Land & Forst berichtet ausführlich über die Veranstaltung (Link: [Strategie gegen resistente Unkräuter](#)).

Fazit

Das Projekt LURUU konnte trotz widriger Umstände wegen der Corona Pandemie und der Tatsache, dass maßgebliche Ergebnisse erst gegen Projektende vorlagen sowohl der interessierten Öffentlichkeit wie auch der Landwirtschaft vorgestellt werden. Politische Entscheidungsträger wurden über das Projekt ebenso informiert wie die wissenschaftlichen Akteure. Dabei nutzte das Team alle on- und offline Kanäle der Kommunikation von social media bis zum „klassischen“ Poster. Auch wenn dies nicht vollends evaluiert werden kann, ist der Eindruck der OG, dass insbesondere Vorträge auf wissenschaftlichen Tagungen, die Poster- und Roll up Präsentationen auf Veranstaltungen und die Website ganz wesentlich dazu beigetragen haben, das Projekt bekannt zu machen. Damit wurde ein wesentlicher Beitrag dazu geleistet, Innovationen in der Landwirtschaft zu kommunizieren und Lösungen für hochaktuelle pflanzenbauliche Fragen (u.a. Herbizidresistenz) zu thematisieren. Der Erfolg des Projektes spiegelt sich auch darin wider, dass der Lasereinsatz im Pflanzenbau zunehmend Gegenstand weiterer, neuer Projekte geworden ist.

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

| | |
|--|----|
| ABBILDUNG 1 ACKERFUCHSSCHWANZ AUF EINEM FELD (FELDFRUCHT ZUCKERRÜBE)..... | 3 |
| ABBILDUNG 2 PROJEKTGEBIET HANNOVER – LOKALISIERUNG DER MITGLIEDER OG-LURUU ZU PROJEKTBEGINN | 6 |
| ABBILDUNG 3 ERGEBNISSE DES VORHABENS LURUU. LINKS, BETRIEBSFÄHIGER APPLIKATOR AUF DER VERSUCHSFLÄCHE AM LASER ZENTRUM HANNOVER. RECHTS, ERGEBNISSE DER LASERBEHANDLUNG FÜR JEDEN EINZELNEN VERSUCHSDURCHLAUF AUF DIESER VERSUCHSFLÄCHE. | 8 |
| ABBILDUNG 4 GEGENÜBERSTELLUNG ACKERFUCHSSCHWANZ (LINKS) ZU WINTERWEIZEN (RECHTS). | 12 |
| ABBILDUNG 5 PRÄSENTATION DES LURUU-VORHABENS AUF DER ABSCHLUSSVERANSTALTUNG DER OG IM LZH (LINKS). OG-MITGLIEDER DES LURUU-VORHABENS (RECHTS) VON LINKS NACH RECHTS: HILMAR FREIHERR VON MÜNCHHAUSEN (GESCHÄFTSFÜHRER NAN), LANDWIRT BERND DRÖSE, MANDY PATZLAFF-GÜNTHER (LZH-KOORDINATORIN), MATTHIAS LAUTENSCHLÄGER (LZH), LANDWIRT FRIEDEL KÖNECKE, DR. DIRK WOLBER (LEITER SACHGEBIET HERBOLOGIE, PSA), DR. MERVE WOLLWEBER (LEITERIN DER GRUPPE FOOD & FARMING DES LZH)..... | 14 |
| ABBILDUNG 6 IMPRESSIONEN DER KOOPERATION INNERHALB DER OG LURUU. | 15 |
| ABBILDUNG 7 AUSGEREIFTER ACKERFUCHSSCHANZ (GROßES BILD), ACKERFUCHSSCHWANZ KEIMLING (KLEINES BILD)..... | 16 |
| ABBILDUNG 8 AUSGEREIFTER WINDHALM (GROßES BILD), WINDHALM KEIMLING (KLEINES BILD). | 17 |
| ABBILDUNG 9 STEINE UND RÜCKSTÄNDE DER VORFRUCHT..... | 19 |
| ABBILDUNG 10 KLUTEN VERDECKEN TEILWEISE DEN URSPRUNG DER PFLANZEN. | 19 |
| ABBILDUNG 11 ACKERFUCHSSCHWANZ KEIMT AUS RISSEN BEI TROCKENHEIT. | 20 |
| ABBILDUNG 12 DRAUFSICHT AUF EINEN REFERENZABSCHNITT MIT EINEM REIHENABSTAND VON 12,5 CM ZUR FESTSTELLUNG DER ZU ERWARTENDEN PFLANZENVERTEILUNG UND SICHT- BZW. ZIELVERHÄLTNISSE.. | 20 |
| ABBILDUNG 13 DOKUMENTATION VON KLUTEN MIT ALOMY. VERGLEICHBARE KLUTEN BRECHEN IM FRÜHJAHR AUF. EBENSO BILDEN SICH IM FRÜHJAHR BODENRISSE DURCH TROCKENHEIT. KLUTEN UND RISSE IM BODEN ERMÖGLICHEN EIN ERNEUTES AUFLAUFEN VON ALOMY. | 21 |
| ABBILDUNG 14 VERSUCHSFELD KLEIN LOBKE, 28.10.2020: DER ABGESTECKTE BEREICH DIENT ZUR BONITUR UND ZEIGT DEN ANGESTREBTEBEN ARBEITSBEREICH DES APPLIKATORS. DIE PERSPEKTIVE ENTSpricht DER DER KAMERABASIERTEBEN UNKRAUTERKENNUNG. DURCH BODENBEHANDLUNG UND UNKRAUTMANAGEMENT IST DER WEIZEN WEITER IN DER ENTWICKLUNG ALS ALOMY. | 21 |
| ABBILDUNG 15 FELDBEGEHUNGEN IN ISERNHAGEN UND KLEIN LOBKE MIT DEN BETEILIGTEN LANDWIRTEN UND MITARBEITERN VON PSA UND LZH. | 22 |
| ABBILDUNG 16 ACKERFUCHSSCHWANZ BBCH 11. LINKS VOR DER BESTRAHLUNG; IN DER MITTE UND RECHTS ALS DRAUFSICHT UND SEITENANSICHT UNMITTELBAR NACH DER BESTRAHLUNG MIT 10 J. | 23 |
| ABBILDUNG 17 EXEMPLARISCHE DARSTELLUNG DER LABORVERSUCHE AN EINER PFLANZE AMARE. DER BESTRAHLUNGSPUNKT DER DIKOTYLEN PFLANZE IST PRIMÄR DAS APIKALMERISTEM (BELEUCHTET IN BLAU)..... | 23 |
| ABBILDUNG 18 ERGEBNISSE DER VISUELLEN BONITUR DER PROBEN ALOMY NACH 7 TAGEN, 14 TAGEN UND FINAL NACH 30 TAGEN. DIE PROBEN WERDEN VISUELL IN VIER KATEGORIEN VON UNBESCHÄDIGT BIS LETAL GESCHÄDIGT EINGESTUFT. NACH 7 TAGEN WIRD HÄUFIG EINE STARKE WACHSTUMSVERZÖGERUNG BONITIERT. NACH 14 TAGEN WERDEN 69% DER PROBEN ALS LETAL GESCHÄDIGT EINGESTUFT. ZUDEM STEIGT DER ANTEIL AN GERINGER VERZÖGERUNG Z.T. DURCH WIEDERAUSTRIEB. ZUM ABSCHLUSS DER BONITUR SIND 94% DER PROBEN LETAL GESCHÄDIGT ODER STARK IM WACHSTUM VERZÖGERT. | 24 |
| ABBILDUNG 19 ACKERFUCHSSCHWANZ ALOMY AUFGENOMMEN IM RASTERELEKTRONENMIKROSKOP. LINKS: UNBESTRAHLT, MITTE: BESTRAHLT MIT GERINGER DOSIS 1 J, RECHTS: BESTRAHLT MIT MODERATER DOSIS 10 J. DIE KREISFÖRMIGE STRUKTUR MARKIERT DEN BEREICH DER LASEREINWIRKUNG. | 24 |
| ABBILDUNG 20 ERSTE FELDBEGEHUNG MIT DEM TRÄGERFAHRZEUG INKLUSIVE LASERAPPLIKATOR. DAS TRÄGERFAHRZEUG BEINHÄLTET U. A.: EINE STEUEREINHEIT FÜR DEN LASERAPPLIKATOR (1), EINE SICHERE EINHAUSUNG VON STEUERUNGSELEKTRONIK UND ENERGIEVERSORGUNG (2) SOWIE EIN 2D- ACHSSYSTEM (3). | 26 |
| ABBILDUNG 21 DER IM TRÄGERFAHRZEUG VERBAUTE LASERAPPLIKATOR WÄHREND DES ERSTEN PRAXISTEST. DER LASERAPPLIKATOR BESTEHT AUS: KAMERAMODUL (1), LASERMODUL (2) UND ACHSSYSTEM (3). .. | 26 |

| | |
|--|----|
| ABBILDUNG 22 LASERAPPLIKATOR DES LASER ZENTRUM HANNOVER BASIEREND AUF EINEM HANDGEFÜHRTEM ROLLWAGEN AUSGESTATTET MIT LASERMODUL, ACHSSYSTEM, KAMERATECHNIK, BELEUCHTUNG, COMPUTERTECHNIK UND IN EINEM SCHALTSCHRANK VERBAUTER SICHERHEITSTEUERUNG UND ENERGIEVERSORGUNG. | 27 |
| ABBILDUNG 23 ARBEITSRAUM DES LASERAPPLIKATORS BESTEHEND AUS ACHSSYSTEM, STRAHLUMLENKUNG MITTELS SPIEGELN, LED-BELEUCHTUNG SOWIE EINER LIDAR-RGB KAMERA. | 28 |
| ABBILDUNG 24 LABORVERSUCHE ZUR BESTRAHLUNG VON GRÄSERN UNTER VERSCHIEDENEN WINKELN. HIER EXEMPLARISCH SENKRECHT UNTER 0° (LINKS) UND UNTER 45° (RECHTS)..... | 29 |
| ABBILDUNG 25 VISUALISIERUNG VERSCHIEDENER SICHT BZW. POTENZIELLER BESTRAHLUNGSWINKEL UM EINE UNVERDECKTEN SICHT (CLEAR SIGHT) AUF DIE ZIELPUNKTE DER PFLANZEN ZU ERREICHEN. | 29 |
| ABBILDUNG 26 MOBILE FOTOBOX ZUR DATENSAMMLUNG FÜR DIE AUTOMATISCHE ZIELERKENNUNG. LINKS: FOTOBOX (VERSION 1) BESTEHEND AUS RASPBERRYPI, DISPLAY UND BATTERIEN, SOWIE LEDs ZUR BELEUCHTUNG DER FELDFLÄCHE UND KAMERA AUF DER UNTERSEITE. RECHTS: PRAXISEINSATZ DER FOTOBOX V1. | 31 |
| ABBILDUNG 27 PRAXISVERSUCHE VON HENDRIK HILLEBRAND (LWK-PFLANZENSCHUTZAMT) MIT DER ENTWICKELTEN MOBILEN FOTOBOX. | 32 |
| ABBILDUNG 28 WEITERENTWICKLUNG DER FOTOBOX IM PRAXISEINSATZ – FOTOBOX V2. | 33 |
| ABBILDUNG 29 EXEMPLARISCHE DARSTELLUNG VON BILDDATEN, DIE MIT DER FOTOBOX V2 ERSTELLT WURDEN. | 34 |
| ABBILDUNG 30 MANUELLE MARKIERUNG JEDER EINZELNEN PFLANZE MIT ZUGEHÖRIGER BENENNUNG ALS TRAININGSGRUNDLAGE FÜR DIE AUTOMATISCHE PFLANZEN- UND ZIELERKENNUNG MITTELS „LABELME“. | 34 |
| ABBILDUNG 31 PFLANZSCHALEN MIT STANDARDISIERTEN SZENEN FÜR DAS TRAINING DER AUTOMATISCHEN ERKENNUNG. | 35 |
| ABBILDUNG 32 WINTERWEIZEN UND ACKERFUCHSSCHWANZ IN EINER PFLANZSCHALE MARKIERT MIT UNTERSCHIEDLICHEN BOUNDING BOXEN. | 36 |
| ABBILDUNG 33 EIN EXEMPLARISCHES ERGEBNIS DER AUTOMATISCHEN ZIELERKENNUNG BASIEREND AUF DEM CENTERNET MODELL. DIESES SZENARIO ZEIGT HINREICHENDE ERGEBNISSE FÜR KLEINE BEIKRAUTPFLANZEN UND SCHLECHTE ERGEBNISSE FÜR GROßE NUTZPFLANZEN SOWIE PARTIELL VERDECKTE PFLANZEN. | 36 |
| ABBILDUNG 34 LINKS: AUFNAHME EINER ZUFÄLLIGEN TESTFLÄCHE DURCH DIE KAMERA IM LASERAPPLIKATOR. RECHTS: DETEKTIERTE PFLANZEN MARKIERT MIT EINEM ROTEN KREIS. DETEKTION BASIEREND AUF YOLO-MODELL. | 37 |
| ABBILDUNG 35 ZEITLICHER ABLAUF DER FELDVERSUCHE AUF DER FREILANDFLÄCHE AM LZH. | 38 |
| ABBILDUNG 36 ANORDNUNG DER VERSUCHSPARZELLEN (A1-D4) AUF DER FREIFLÄCHE AM LZH. DIE VERSUCHSVARIANTEN SIND INNERHALB DER BLÖCKE (A-D) VOLLSTÄNDIG RANDOMISIERT UND WERDEN IN JEDEM VERSUCHSDURCHLAUF NEU ZUGEWIESEN. (L=LASER, H=HERBIZID, L+H=LASER+HERBIZID, K=KONTROLLE). | 39 |
| ABBILDUNG 37 ARBEITEN AUF DER VERSUCHSFLÄCHE. LINKS OBEN: VORBEREITUNG DER SAATREIHEN MIT EINEM RILLENZIEHER. RECHTS OBEN: IN DIE SAATREIHEN AUSGEBRACHTES SAATGUT. LINKS UNTEN: SOMMERWEICHWEIZEN NACH DEM AUFLAUFEN. RECHTS UNTEN: MIT ROTER NYLONSCHNUR ABGESTECKTE VERSUCHSPARZELLE. | 40 |
| ABBILDUNG 38 EINSATZ DER FELDSPRITZE ZUR HERBIZIDAUSBRINGUNG (OBEN). BEISPIELFOTOS DER VERUNKRAUTUNG ZUM ZEITPUNKT DER BEHANDLUNG (UNTEN). | 41 |
| ABBILDUNG 39 VERSUCHSPARZELLE UNMITTELBAR NACH DER LASERBEHANDLUNG. | 43 |
| ABBILDUNG 40 WEIßER GÄNSEFUß (CHENOPODIUM ALBUM) UNMITTELBAR NACH DER LASERBEHANDLUNG.. | 43 |
| ABBILDUNG 41 BONITUR EINER VERSUCHSPARZELLE. ALLE UNKRAUTARTEN WURDEN BESTIMMT UND AUSGEZÄHLT..... | 44 |
| ABBILDUNG 42 VERSUCHSPARZELLEN ZUM ZEITPUNKT DER BONITUR MIT BLÜHENDEM ACKER-SENF IM WEIZEN. | 45 |
| ABBILDUNG 43 AUFKOMMEN VERSCHIEDENER UNKRAUTARTEN IN DEN KONTROLLPARZELLEN ZUM ZEITPUNKT DER BONITUR IM ERSTEN VERSUCHSDURCHLAUF. DAS GESAMTAUFKOMMEN LAG BEI 313 PFLANZEN/M ² UND ES WURDEN 28 VERSCHIEDENE UNKRAUTARTEN IDENTIFIZIERT. | 46 |
| ABBILDUNG 44 AUFKOMMEN VERSCHIEDENER UNKRAUTARTEN IN DEN KONTROLLPARZELLEN ZUM ZEITPUNKT DER BONITUR IM ZWEITEN VERSUCHSDURCHLAUF. DAS GESAMTAUFKOMMEN LAG BEI 96 PFLANZEN/M ² UND ES WURDEN 14 VERSCHIEDENE UNKRAUTARTEN IDENTIFIZIERT. | 46 |
| ABBILDUNG 45 AUFKOMMEN VERSCHIEDENER UNKRAUTARTEN IN DEN KONTROLLPARZELLEN ZUM ZEITPUNKT DER BONITUR IM DRITTEN VERSUCHSDURCHLAUF. DAS GESAMTAUFKOMMEN LAG BEI 118 PFLANZEN/M ² UND ES WURDEN 18 VERSCHIEDENE UNKRAUTARTEN IDENTIFIZIERT. | 47 |

| | |
|---|----|
| ABBILDUNG 46 VISUELLER VERGLEICH DER BEHANDLUNGSVARIANTEN ZUM ENDE DES ERSTEN VERSUCHSDURCHLAUFS..... | 48 |
| ABBILDUNG 47 VISUELLER VERGLEICH DER BEHANDLUNGSVARIANTEN ZUM ENDE DES ZWEITEN VERSUCHSDURCHLAUFS..... | 48 |
| ABBILDUNG 48 VISUELLER VERGLEICH DER BEHANDLUNGSVARIANTEN ZUM ENDE DES DRITTEN VERSUCHSDURCHLAUFS..... | 49 |
| ABBILDUNG 49 WIRKUNGSGRAD (% , MW \pm SD) DER UNTERSCHIEDLICHEN BEHANDLUNGEN IN DEN DREI VERSUCHSDURCHLAUFEN BEZOGEN AUF ALLE ERFASSTEN UNKRÄUTER. (N=4)..... | 50 |
| ABBILDUNG 50 WIRKUNGSGRAD (% , MW \pm SD) DER UNTERSCHIEDLICHEN BEHANDLUNGEN IN DEN DREI VERSUCHSDURCHLAUFEN BEZOGEN AUF ALLE EINKEIMBLÄTTRIGEN UNKRÄUTER. (N=4)..... | 50 |
| ABBILDUNG 51 WIRKUNGSGRAD (% , MW \pm SD) DER UNTERSCHIEDLICHEN BEHANDLUNGEN IN DEN DREI VERSUCHSDURCHLAUFEN BEZOGEN AUF ALLE ZWEIKEIMBLÄTTRIGEN UNKRÄUTER (N=4)..... | 51 |
| ABBILDUNG 52 KOMBINATION VON HERBIZID- UND LASERBEHANDLUNG BEI EINKEIMBLÄTTRIGEN UNKRÄUTERN. (N=4, DATEN AUS ZWEITEM VERSUCHSDURCHLAUF)..... | 51 |
| ABBILDUNG 53 EINFLUSS DES BEHANDLUNGSZEITPUNKTES AUF DEN WIRKUNGSGRAD (%) DER LASERBEHANDLUNG BEZOGEN AUF ALLE ERFASSTEN UNKRÄUTER (N=4). | 52 |
| ABBILDUNG 54 EINFLUSS DES UNKRAUTTYPUS AUF DEN WIRKUNGSGRAD (%) DER LASERBEHANDLUNG. (N=4, DATEN AUS DRITTEM VERSUCHSDURCHLAUF)..... | 53 |
| ABBILDUNG 55 LASERAPPLIKATOR AUF VERSUCHSFLÄCHE AM LASER ZENTRUM HANNOVER..... | 57 |