

Abschlussbericht

zum Projekt

Nichtchemische Unkrautbekämpfung mittels Laserstrahlung in der Pflanzenproduktion

unter dem Akronym

NUBELA

Aktenzeichen 33117/01

Projektleitung: Frau Dr. Merve Wollweber, Laser Zentrum Hannover e.V.

Kooperationspartner

Laser Zentrum Hannover e.V.

Hollerithallee 8, 30419 Hannover

Kontakt: Dr. Merve Wollweber, Tel.: 0511-2788212, E-Mail: m.wollweber@lzh.de

und

LASER on demand GmbH

Lise-Meitner-Str. 9, 31303 Burgdorf

Kontakt: Dr.-Ing. Oliver Meier, Tel.: 05136-8783440, E-Mail: om@laser-on-demand.de

mit Projektbegleitung durch

IPG Laser GmbH

Siemensstraße 7, 57299 Burbach

Kontakt: Berthold Kessler, Tel.: 02736-4420343, E-Mail: bkessler@ipgphotonics.com

Förderzeitraum

01.10.2018 - 31.10.2021

Hannover, 26.01.2022

Projektkennblatt
der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt

Az **33117/01-34**Referat **34**

Fördersumme

314.341 €

Antragstitel **Nichtchemische Unkrautbekämpfung mittels Laserstrahlung in der Pflanzenproduktion – NUBELA**

Stichworte

Laufzeit	Projektbeginn	Projektende	Projektphase(n)
3 Jahre	01.10.2018	31.10.2021	3

Zwischenberichte	Phase 1 Phase 2
------------------	--------------------

Bewilligungsempfänger	Laser Zentrum Hannover e.V. (Abk.: LZH) Geschäftsführung, Herr Dr. Dietmar Kracht Hollerithallee 8 30419 Hannover	Tel +49 511 2788-212 Fax +49 511 2788-100
		Projektleitung Dr. Merve Wollweber
		Bearbeiter M.Sc. Malte Worzischek

Kooperationspartner LASER on demand GmbH (Abk.: LOD)
Geschäftsführung, Herr Dr.-Ing. Oliver Meier
Lise-Meitner-Straße 9
31303 Burgdorf

Projektbegleitung (ohne Förderung) IPG Laser GmbH (Abk.: IPG)
Key Account Manager, Herr Berthold Kessler
Carl-Benz-Str. 28
57299 Burbach

Zielsetzung und Anlass des Vorhabens

Im Projekt sollte ein Modul entwickelt werden, das Verfahren der optischen Unkrauterkenennung mit der laserbasierten Unkrautbekämpfung kombiniert und für eine spätere Integration in Fahrsysteme bereitstellt. Die Motivation zu diesem Projekt war, dass im Unkrautmanagement des konventionellen sowie des biologischen Anbaus Verfahren eingesetzt werden, die insbesondere bei unsachgemäßer oder störbehafteter Anwendung mit direkten Belastungen für Mensch, Tier und Umwelt verbunden sein können. Beispiele sind insbesondere die im konventionellen Anbau angewendete Ausbringung von chemischen Herbiziden sowie der beim biologischen und ökologischen Anbau deutlich erhöhte Bedarf an manueller Arbeitskraft. Daher besteht ein erheblicher Bedarf an alternativen, ressourcenschonenden, umweltverträglichen und nachhaltigen Ansätzen zur Unkrautbehandlung, wie im vorgestellten Vorhaben dargestellt.

Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden

Zur Entwicklung eines felddauglichen Demonstrators für die automatisierte laserbasierte Unkrautbekämpfung sollte zunächst ein passender Versuchsstand konzipiert und aufgebaut werden. Dieser sollte die Belastung der verwendeten Komponenten mit simulierten Umweltbedingungen ermöglichen und notwendige Optimierungen für den Feldeinsatz erlauben. Parallel sollte die Eignung der verwendeten Strahlquelle zur Unkrautbehandlung durch Bestrahlungsversuche an Versuchspflanzen belegt werden.

Im weiteren Verlauf wurden geeignete Verfahren zur automatisierten Pflanzenklassifizierung evaluiert und zusammen mit einer geeigneten Strahlführung in den Versuchsstand integriert. Um die Lasersicherheit im Außeneinsatz zu gewährleisten, wurde ein umfassendes Sicherheitskonzept entwickelt und implementiert. Nach Fertigstellung eines Demonstrators sollten zeitnah Ergebnisse aus der Durchführung erster Feldversuche generiert und zur weiteren Optimierung genutzt werden.

Inhaltsverzeichnis

Projektkennblatt	1
Abbildungsverzeichnis.....	III
1. Zusammenfassung.....	1
2. Anlass und Zielsetzung	2
3. Strahlquelle – Robustheit und Eignung.....	3
3.1. Robustheit - Versuchsstand.....	3
3.1.1. Systembedingungen - Versuchsaufbau	4
3.1.2. Systembedingungen – Versuche	5
3.1.3. Strahlbedingungen - Versuchsaufbau	6
3.1.4. Strahlbedingungen - Versuche	6
4. Pflanzenversuche – Dosis und Schädigung.....	8
4.1. Versuchsaufbau - stationär	8
4.2. Dosis-Wirkungs-Beziehung.....	9
4.3. Schädigungsuntersuchungen	12
5. Felddemonstrator – Konzeptionierung und Aufbau	14
5.1. Applikationstechnik und Elektronik.....	16
5.2. Detektionstechnik	17
5.3. Systemsteuerung.....	18
5.4. Sicherheitskonzept	19
6. Bilderkennung	20
6.1. Data Augmentation	20
6.2. Erkennung von Unkrautpflanze und Meristem	21
7. Feldversuch	23
8. Diskussion.....	24
8.1. Erreichte Ziele.....	24
8.2. Änderungen im Ablauf	24
8.3. Ausblick.....	25
9. Öffentlichkeitsarbeit.....	26

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 - CAD-Rendering des konzipierten Versuchsaufbaus.....	4
Abbildung 2 - Laserleistungen bei randomisierten Bewegungsabfolgen.....	5
Abbildung 3 - Laserleistungen beim Einbringen von feinen Störpartikeln.....	7
Abbildung 4 - Versuchsstand zur stationären Pflanzenbestrahlung	9
Abbildung 5 - Bestrahlte Amaranthpflanzen und Kornblumen.....	10
Abbildung 6 - Einfluss der Laserleistung auf die Vitalität von juvenilen <i>Amaranthus retroflexus</i>	11
Abbildung 7 - Mit Auflichtmikroskop und REM aufgenommene AMARE	12
Abbildung 8 - Megahertz-OCT Aufnahmen einer bestrahlten AMARE	13
Abbildung 9 - Aufsicht des entwickelten Felddemonstrators	14
Abbildung 10 - Foto des entwickelten Felddemonstrators.....	15
Abbildung 11 - Applikationsmodul des entwickelten Felddemonstrators.....	16
Abbildung 12 - RGB-Bilder und zugehörige Höhenprofile.....	17
Abbildung 13 - Graphical User Interface des Felddemonstrators	18
Abbildung 14 - Data Augmentation.....	20
Abbildung 15 - Data Augmentation juvenilen Löwenzahns	21
Abbildung 16 - Ausschnitt einer durchgeführten Erkennung.....	22
Abbildung 17 - Felddemonstrator bei der Unkrautbehandlung in einer Feldsalat-Kultur	23

1. Zusammenfassung

Im Abschlussbericht zum Projekt „Nichtchemische Unkrautbekämpfung mittels Laserstrahlung in der Pflanzenproduktion“ (NUBELA) werden die erarbeiteten Ergebnisse und Ansätze, entstandene Herausforderungen und entwickelte Lösungsansätze dargestellt und beschrieben. Aufgrund der durch die Corona-Pandemie erforderlichen Maßnahmen und bestehender Lieferengpässe mussten die Schwerpunkte im Arbeitsplan in Teilen entsprechend angepasst werden.

Für das Projekt NUBELA stellte der projektbegleitende Partner IPG Laser GmbH eine robuste Strahlquelle in Form eines fasergeführten 100 W Thulium-Lasers mit einer Wellenlänge von 1940 nm zur Verfügung. Um die Eignung der Strahlquelle für einen späteren Außeneinsatz zu untersuchen, wurden in AP 1 und 2 relevante Umgebungsbedingungen identifiziert und im Rahmen umfangreicher Robustheitstests mit einem entsprechenden Versuchsaufbau simuliert. Hierbei zeigten die Ergebnisse eine grundsätzliche Eignung der ausgewählten Strahlquelle für den Außeneinsatz. Eine Eignung der Strahlquelle für die Behandlung von Pflanzen wurde in AP 2 anhand von Bestrahlungsversuchen an juvenilen Unkrautpflanzen in Zusammenarbeit mit der Landwirtschaftskammer Niedersachsen evaluiert. Die Versuche ergaben eine sehr gute Verwendbarkeit der Strahlquelle zur definierten Schädigung (letal oder wachstumshemmend) von Jungpflanzen, welche bereits ab Energien um 10 Joule pro Pflanze erreicht werden konnte. Parallel zu der Ermittlung der Dosis-Wirkungs-Beziehung auf die Pflanzenvitalität wurden im Rahmen von AP 3 detailliertere Untersuchungen zu den lokalen Schädigungsprozessen am Pflanzengewebe durch kurzwellige Infrarot-Laserstrahlung durchgeführt.

Um die Realisierbarkeit eines mobilen Laser-Unkrautmanagements mit der verwendeten Strahlquelle zu belegen, wurde in den AP 3 – 5 ein Felddemonstrator entwickelt und aufgebaut. Zur Erkennung, Zielermittlung und Prozessüberwachung wurde geeignete Detektionstechnik in Form von RGB-Kameras, Lidar-Sensorik und Beleuchtungseinheiten implementiert. Für die dynamische Laserstrahl-Applikation wurde ein Flächenportal in Kombination mit diversen Umlenkspiegeln verbaut und in eine systemumfassende Ansteuerung integriert. Hierbei wurde auf eine möglichst modulare Bauweise geachtet, sodass ein Transfer der Applikations- und Detektionseinheit auf komplexere Fahrsysteme flexibel möglich ist. Zur sicheren Nutzung des Felddemonstrators im Freiland wurde ein Lasersicherheitskonzept entwickelt und entsprechend umgesetzt.

Da ein Laser-Unkrautmanagement lediglich im vollautomatischen Betrieb sinnvoll eingesetzt werden kann, wurde in AP 3 die Machbarkeit einer automatisierten Unkraut- und Wuchszentren-Erkennung erfolgreich demonstriert. Der Ansatz erfolgte unter Verwendung von Deep convolutional neural networks (DCNN), welche mit entsprechenden Bildern der gewünschten Zielpflanzen und -regionen trainiert wurden. Zur Generierung einer umfassenden Bilddatenbank wurden zudem Möglichkeiten zur automatisierten Data Augmentation untersucht und implementiert.

Zum Abschluss des Projektes konnte der entwickelte Felddemonstrator zur Unkrautregulierung in einem landwirtschaftlichen Gemüsebaubetrieb unter Realbedingungen erfolgreich getestet werden. Die im Rahmen des Projektes NUBELA gewonnenen Erkenntnisse zum Außeneinsatz einer fasergeführten 2 µm Laserstrahlquelle sowie der Aufbau eines geeigneten Detektions- und Applikationsmoduls schaffen ideale Voraussetzungen, um die Lasertechnik für ein automatisiertes Unkrautmanagement in unterschiedlichsten Agrar-Fahrzeugen zu integrieren und so zukünftig als Alternative zu herkömmlichen Unkrautbekämpfungsverfahren zu etablieren.

2. Anlass und Zielsetzung

Im Projekt Nichtchemische Unkrautbekämpfung mittels Laserstrahlung in der Pflanzenproduktion (NUBELA) sollte ein Modul entwickelt werden, das Verfahren der optischen Unkrauterkennerung mit der laserbasierten Unkrautbekämpfung kombiniert und für die Integration in Fahrsysteme bereitstellt. Dazu kooperierten die Forschungseinrichtung Laser Zentrum Hannover e.V. (LZH) und das Laser-Anwendung-Dienstleistungsunternehmen LASER on demand GmbH (LOD) in Begleitung von dem Lasersystemhersteller IPG Laser GmbH (IPG).

Die Motivation zu diesem Projekt war, dass im Unkrautmanagement des konventionellen sowie des biologischen Anbaus Verfahren eingesetzt werden, die insbesondere bei unsachgemäßer oder störbehafteter Anwendung mit direkten Belastungen für Mensch, Tier und Umwelt verbunden sein können. Beispiele sind im konventionellen Anbau die Ausbringung von chemischen Herbiziden, deren Dosierung, der Eintrag auf Nicht-Zielflächen durch Abdrift, die Kumulation von toxischen Stoffen (auch Konzentration von Metallionen) in Bodenschichten und Gewässern, der Hautkontakt mit oder die Aufnahme von Stäuben, Sprühnebeln oder Dämpfen in Atem- und Verdauungsorganen sowie die Abgase bzw. die Brandgefahr durch offenes Feuer bei Abflamverfahren. Beim biologischen und ökologischen Anbau führt die Vielzahl alternativ notwendiger manueller Arbeitsschritte zu möglichen Engpässen bei der Ressource Arbeitskraft. Daher besteht ein erheblicher Bedarf an alternativen, ressourcenschonenden, umweltverträglichen und nachhaltigen Ansätzen zur Unkrautbehandlung.

Der Einsatz von Laserstrahlung zur thermischen Schädigung von Pflanzengewebe ist bereits belegt. Ebenso sind verschiedene Verfahren zur Pflanzenerkennung verfügbar. Was bislang für die Entwicklung eines Laser-Unkrautbekämpfungssystems fehlte, sind erstens eine robuste Laserstrahlquelle mit einer stark wasserabsorbierenden Emissionswellenlänge und zweitens ein funktionsfähiger Demonstrator, um die Innovation in landtechnische Unternehmen zu tragen. Das beantragte Projekt fokussierte entsprechend auf die Bereitstellung eines Thulium-Faserlasers (Emission: 2 µm, kurzwelliges Infrarot), auf die Systemintegration hin zu einem mobilen Prototyp sowie auf die umfassende Validierung der Prozesssteuerung.

Die ökologischen Vorteile der optisch geführten und Infrarotlaser-basierten Unkrautbekämpfung sind (1) selektive Bekämpfung der Unkrautpflanzen, (2) optimierte Dosierung der eingesetzten Ressource (einzig elektro-optischer Wirkungsgrad entscheidend), (3) Unabhängigkeit gegenüber klimatischen Störgrößen (bspw. Wind oder hohen Temperaturen, die bei konventionellen Verfahren zu verminderter Wirkung bzw. zu Überdosierung führen), (4) lokale Umweltbelastung auf Bereitstellung der elektrischen Energie begrenzt, (5) keine zusätzlichen Ressourcen benötigt, wie bspw. wässrige Zubereitungen inkl. Lösungsmitteln oder Emulgatoren, (6) rein thermischer Nebeneffekt auf Nicht-Ziele möglich (Kulturpflanzen, Tiere, Insekten), (7) keine Lagerung und kein Transport von konzentrierten Wirkstoffen auf den Betrieben mit den entsprechenden Unfallrisiken, (8) keine erhöhten Einträge in Betriebsabwässer an Waschplätzen, (9) kein direkter Kontakt der Anwender mit der zur Unkrautbekämpfung genutzten Laserstrahlenergie, (10) keine Ausbildung von Resistenzen gegen die thermische Zerstörung möglich, daher keine welche bei konventionellen Verfahren mit hohem Ressourcen-Einsatz für die Entwicklung neuer Wirkstoffe verbunden wäre und (11) keine laufende Produktion von Betriebsmitteln (außer elektrischer Energie).

3. Strahlquelle – Robustheit und Eignung

Im Zentrum der ersten Projektarbeiten standen die Konzeptionierung und der Aufbau eines grundlegenden Versuchsstandes zur Laserunkrautbehandlung und daran durchgeführte Untersuchungen zum Einfluss relevanter Umweltbedingungen auf den Prozess.

Für das Projekt NUBELA stellte der projektbegleitende Partner IPG Photonics eine 1940 nm Strahlquelle in Form eines fasergeführten 100 W Thulium-Lasers mit moduliertem Dauerstrahlbetrieb zur Verfügung. Um die notwendige Feldtauglichkeit des verwendeten Lasersystems zu belegen und gegebenenfalls notwendige Optimierungen an der Soft- und Hardware zu ermöglichen, wurden relevante Umgebungsparameter identifiziert und ein geeigneter Versuchsstand entwickelt und aufgebaut. Der Versuchsstand sollte dabei die Simulation unterschiedlicher Umwelteinflüsse im Labor durch eine kontrollierte Änderung der Umgebungsbedingungen des Lasersystems ermöglichen, mit dem Ziel den Einfluss auf die Systemzuverlässigkeit sowie auf die Stabilität von Laserleistung und Strahlqualität zu bestimmen (Robustheitstests).

Die ermittelten für das System relevanten Umweltbedingungen lassen sich im Wesentlichen in zwei Kategorien aufteilen, zum einen die Bedingungen, die sich auf die Hard- und Software des Lasersystems auswirken (Systembedingungen), zum anderen die Bedingungen, die die emittierte Laserstrahlung außerhalb der Faser, also im Strahlengang, beeinflussen (Strahlbedingungen). Als relevante Systembedingungen wurden die Umgebungstemperatur und die im mobilen Betrieb auftretenden Beschleunigungskräfte festgelegt. Als relevante Strahlbedingungen ergaben sich die relative Luftfeuchtigkeit sowie das Auftreten von Fremdpartikeln im Strahlengang.

3.1. Robustheit - Versuchsstand

Zu Beginn sollte ein Versuchsstand konzipiert werden, der die Integration aller für die Robustheitstests notwendigen Komponenten bei genügender Stabilität ermöglicht und dabei ausreichende Modularität für einen späteren Ausbau zur Verwendung in Außenversuchen bietet.

Um die genannten Anforderungen zu erfüllen, wurden für die Konstruktion des Grundgerüsts Aluminiumprofile der Firma item mit einer Kantenlänge von 40x40 mm ausgewählt. Zur grundlegenden Gewährleistung der Lasersicherheit in der Laborumgebung und um eine Änderung der Bedingungen separat von den Laborbedingungen zu ermöglichen, wurde der gesamte Aufbau mit Aluminiumplatten von 2 mm Dicke eingehaust. Auf der Vorderseite wurde, zur vereinfachten Bedienung der Hauptkomponenten, eine mit Kugelschnäppern fixierte Wartungsklappe implementiert. Eine weitere abnehmbare Klappe wurde an der Rückseite verbaut, um die Änderung der Temperatur im Inneren des Aufbaus mittels eines industriellen Heizlüfters zu realisieren. Um, wie zunächst geplant, eine spätere Behandlung von Pflanzen außerhalb des Versuchsstandes zu ermöglichen, wurde das System im Arbeitsbereich des Lasers durch ein Schutzglas aus Borosilikat (Borofloat33 der Firma Schott) abgeschlossen, welches bei einer Dicke von 3,3 mm und einer verwendeten Wellenlänge von 1940 nm eine Transmission von ca. 92 % zeigt. Zwei unter dem Aufbau montierte Schienen erlaubten eine horizontale Verschiebung des gesamten Aufbaus. Abbildung 1 zeigt ein CAD-Rendering des entwickelten Versuchsaufbaus. Die wesentlichen Komponenten sind beschriftet.

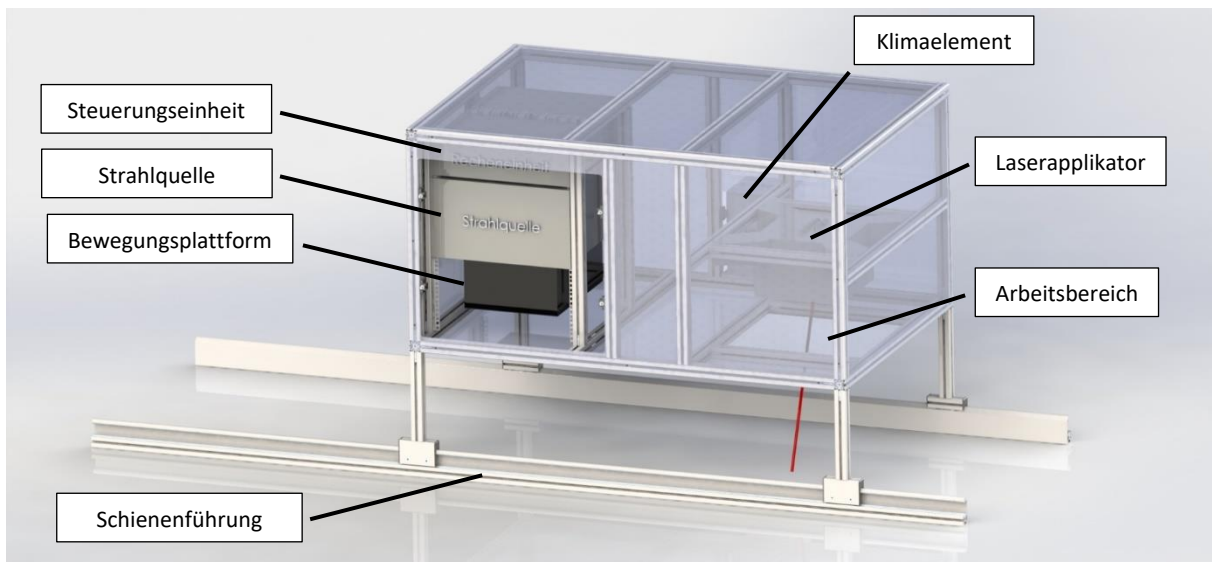


Abbildung 1 - CAD-Rendering des konzipierten Versuchsaufbaus mit den wesentlichen Komponenten

3.1.1. Systembedingungen - Versuchsaufbau

Zur Simulation der genannten Systembedingungen wurden Konzepte zur Umsetzung entwickelt, notwendige Bauteile bestimmt und anschließend in den Versuchstand integriert.

Die Änderung der Umgebungstemperatur innerhalb des Versuchstandes erfolgte mittels eines Klimaelementes, bestehend aus einer von einem Microcontroller gesteuerten Temperaturregelung in Kombination mit einem industriellen Heizlüfter. Das Erfassen der hardwareinternen Temperatur im Lasersystem fand über integrierte Temperatursensoren statt, die über die vorhandene Ethernet-Schnittstelle ausgelesen werden konnten. Zur Simulation der im mobilen Betrieb auftretenden Beschleunigungskräfte war die Strahlquelle auf eine Bewegungsplattform montiert (Seat Mover Pro MP2 der Firma DOF Reality Motion Simulators). Diese ermöglicht eine kontinuierliche Änderung der Verkippung der Strahlquelle in zwei Freiheitsgraden bei definierten Winkelgeschwindigkeiten und über einen festgelegten Zeitraum. Die auftretenden Beschleunigungen wurden über ein auf der Strahlquelle angebrachtes Gyroskop konstant aufgezeichnet und im Anschluss ausgewertet. Alle verbauten Microcontroller sowie die Bewegungsplattform wurden über einen Computer, der die zentrale Steuerungseinheit darstellt, bedient.

Um eine irreparable Beschädigung der verbauten elektronischen Bauteile zu vermeiden, wurde von einer Änderung der Luftfeuchtigkeit innerhalb des Versuchstandes abgesehen. Für einen späteren Außeneinsatz sollte die Luftfeuchtigkeit, beispielsweise durch die Implementierung eines Klimagerätes, entsprechend überwacht und möglichst konstant gehalten werden.

3.1.2. Systembedingungen – Versuche

Die Strahlquelle wurde zunächst in mehreren Versuchsreihen mit einem zuvor zufällig generierten Bewegungsablauf für je 60 Minuten belastet. Dabei wurden höhere Belastungen angenommen als sie bei einer Feldüberfahrt mit für den geplanten Einsatz realistischen Fahrgeschwindigkeiten von 2 - 4 km/h voraussichtlich auftreten würden. Während der Belastung wurden die auf das System wirkenden Beschleunigungen mit Hilfe eines 6-Achsen-Gyroskops (LSM6DS der Firma SEED) und die emittierte Laserleistung mit einem thermischen Messkopf (F150A-SH-V1-ROHS der Firma OPHIR) gemessen und aufgezeichnet. Abbildung 2 zeigt eine exemplarische Messung der emittierten Laserleistung in Bewegung bei 50% und 100% Diodenstrom. Die Bewegungen der Strahlquelle sind in Grad pro Sekunde angegeben, die ermittelten Laserleistungen in Watt. Die gemessene Laserleistung blieb in allen Versuchen konstant, sodass ein Einfluss der auftretenden Beschleunigungen auf die emittierte Laserleistung nicht festgestellt werden konnte.

Parallel wurde die emittierte Strahlqualität im Stillstand und in Bewegung mit einem Strahlprofilmessgerät NanoScan 2s Pyro der Firma Ophir stichprobenartig gemessen. Hierbei konnte kein Einfluss der Versuche auf die emittierte Strahlqualität festgestellt werden.

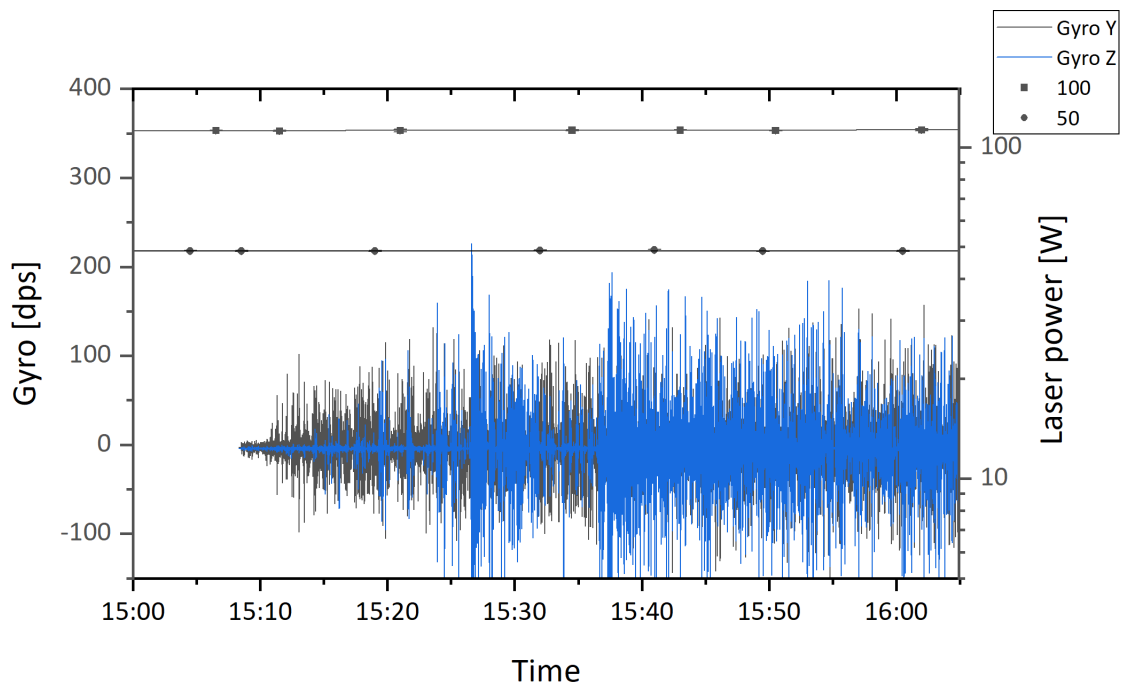


Abbildung 2 – Exemplarische Messung der emittierten Laserleistungen in Watt bei randomisierten Bewegungsabfolgen der verbauten Bewegungsplattform. Die Bewegungen sind in Grad pro Sekunde (dps) angegeben.

Eine konstante Erhöhung der Umgebungstemperatur bis zu einer effektiven Gehäusetemperatur der Strahlquelle von 39,9°C zeigte bei Diodenströmen zwischen 20 % und 100 % eine geringe Abnahme der emittierten Laserenergie zwischen 3% - 5% im relevanten Leistungsbereich von 50 W bis 100 W. Im Feldeinsatz sollten bei schwankenden Temperaturen je nach angestrebter Leistung entsprechende Toleranzen eingeplant werden. Zur Vermeidung nachhaltiger Schäden an den Elektronikkomponenten der Strahlquelle wurde die Messung bei 40°C Gehäusetemperatur abgebrochen, da eine ausreichende Effektivität der aktiven Luftkühlung nicht mehr gewährleistet werden konnte. Für einen späteren Feldeinsatz sollte die Temperatur konstant überwacht und bei Bedarf beispielsweise durch die Implementierung eines Klimagerätes reguliert werden. Aufgrund der bisher erhaltenen Ergebnisse ist davon auszugehen, dass die verwendete Laser-Hardware für einen Betrieb im Außeneinsatz grundsätzlich geeignet ist.

3.1.3. Strahlbedingungen - Versuchsaufbau

Um den Einfluss der relevanten Strahlbedingungen auf die emittierte Laserleistung zu ermitteln, wurde eine separate Versuchskammer konzipiert und aufgebaut. Die Versuchskammer hat eine Größe von 550x550x370 mm und besitzt eine Ein- und eine Austrittsöffnung für den Laserstrahl. Der Abstand der Öffnungen lässt sich zwischen 150 mm und 520 mm variieren. Hierdurch lassen sich eine im Außeneinsatz notwendige Anpassung des Arbeitsabstandes und eine damit verbundene Änderung der Strahlbedingungen simulieren. Der erforderliche Arbeitsabstand wird dabei vor allem durch die Art des jeweiligen Pflanzenanbaus (bspw. Dammanbau), die Pflanzenhöhe im Behandlungszeitraum sowie gegebenenfalls vorhandene Hindernisse wie Steine oder größere Erdbrocken bestimmt. Die relative Luftfeuchtigkeit innerhalb der Versuchskammer wird kontinuierlich gemessen und kann über einen beheizbaren Wasserbehälter eingestellt werden. Mittels eines in der Versuchskammer platzierten Ultraschallzerstäubers kann das Auftreten von Nebel im Strahlengang simuliert werden.

3.1.4. Strahlbedingungen - Versuche

Mit der entwickelten Versuchskammer wurden zunächst Versuche zur Auswirkung unterschiedlicher Luftfechtigkeiten im Strahlengang durchgeführt. Da Wasser bei der Wellenlänge der verwendeten Strahlquelle von 1940 nm eine hohe Absorption aufweist, waren dabei vornehmlich Erkenntnisse zu möglichen Leistungsverlusten bei der Laserbehandlung im Feldeinsatz relevant. Während der Versuche wurde die relative Luftfeuchtigkeit in der Versuchskammer von etwa 50% bis auf 100% erhöht. Der Laser wurde mit 50, 100 und 200 ms bei 50 W gepulst und die eintreffende Laserleistung hinter der Versuchskammer gemessen. Die Messungen ergaben einen maximalen Leistungsverlust von ca. 4% über alle verwendeten Pulsdauern.

Im Anschluss wurden die resultierenden Leistungen beim Einbringen von zerstäubtem, destilliertem Wasser mittels eines Ultraschallzerstäubers ermittelt. Bei steigender Vernebelung der Kammer, die zum Auftreten einer Vielzahl von Wassertröpfchen mit einer Größe von einigen Mikrometern im Strahlengang führt, steigen die Leistungsverluste hierbei auf bis zu 98 % an. Im Feldeinsatz muss bei einer entsprechenden Wetterlage (starker Nebel) folglich ggf. mit höheren Leistungsverlusten gerechnet werden. Neben den Leistungsverlusten ist bei eventuell verringerter Sichtweite durch Nebelbildung von Ungenauigkeiten bei der optischen Pflanzenerkennung auszugehen. Soll der Einsatz dennoch erfolgen, sollten effektiver Leistungsverlust und Zuverlässigkeit der Zielfindung bestimmt werden und, bei kompensierbaren Verlusten, bei der Konfiguration der Behandlungsparameter entsprechend berücksichtigt werden.

Um den Einfluss von Störpartikeln, wie bspw. Staub, im Strahlengang zu überprüfen, wurde trockener Sand in die Versuchskammer gebracht. Um möglichst realistische Bedingungen zu simulieren, wurde hierzu Probenmaterial von einem der vom LZH verwendeten Versuchsfelder entnommen. Der Laser wurde bei einer Leistung von 50 W mit 150 ms gepulst und die eintreffende Leistung hinter der Versuchskammer gemessen. Relevante Leistungsverluste von einigen Prozent konnten dabei lediglich beim direkten Einbringen (rieseln) von Sand in den Strahlengang und beim Aufwirbeln von direkt unter dem Strahlengang befindlichen, feingesiebten Sandproben gemessen werden. Abbildung 3 zeigt exemplarisch eine Leistungsmessung bei eingebrachten Störpartikeln. Während beim direkten Einbringen von Staub in den Strahlengang klare Einbrüche bei den gemessenen Leistungen erkennbar sind (links), zeigen die gemessenen Leistungen bei aufgewirbeltem Staub geringere und gleichmäßigere Verluste (rechts). Bei entsprechenden Witterungs- und Einsatzbedingungen während des Feldeinsatzes sollten auch diese Verluste bei der Konfiguration der Behandlungsparameter entsprechend berücksichtigt werden.

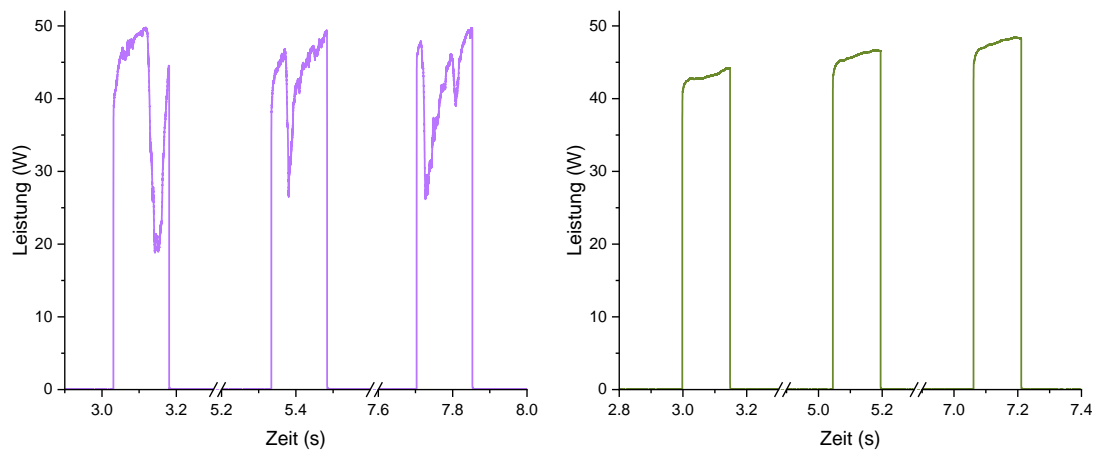


Abbildung 3 – Gemessene Laserleistungen beim Einbringen von feinen Störpartikeln in den Strahlengang auf einer Strecke von ca. 40 cm. Es wurden Einzelpulse von 150 ms Dauer untersucht. Der linke Graph zeigt die gemessenen Leistungen beim direkten Einbringen in den Strahlengang (rieseln), der rechte Graph bei aufgewirbeltem Staub.

4. Pflanzenversuche – Dosis und Schädigung

Die Eignung der verwendeten Laserwellenlänge und -leistung zur Unkrautbehandlung sollte zunächst anhand stationärer Bestrahlungsversuche an Versuchspflanzen belegt werden. Neben der Dosis-Wirkungs-Beziehung wurde zudem der direkte Einfluss der Laserbestrahlung auf das Pflanzengewebe mittels verschiedener optischer Analysemethoden untersucht. Ziel waren hierbei die Ermittlung geeigneter Prozessparameter für den angestrebten Feldeinsatz sowie detaillierte Erkenntnisse zum Einfluss der Bestrahlung auf das Pflanzengewebe, um hieraus mögliche Optimierungspotentiale im Prozessablauf abzuleiten.

4.1. Versuchsaufbau - stationär

Für eine einfachere Handhabung bei der Durchführung der stationären Bestrahlungsversuche wurde, neben dem bereits beschriebenen Versuchsstand zur Robustheit, ein weiterer Versuchsstand entwickelt und aufgebaut sowie ein passendes Interface zur vereinfachten Ansteuerung des Lasersystems programmiert. Da dieser Versuchsstand zudem als Live-Demonstrator für die projektbezogene Öffentlichkeitsarbeit dienen und außerhalb eines Laserlabors betrieben werden soll, wurde hier bereits ein erstes umfassendes Sicherheitskonzept geplant und umgesetzt. Der Versuchsstand ist in Abbildung 4 dargestellt. Im unteren Teil befinden sich die Strahlquelle und ein Schaltschrank mit der verbauten Sicherheitssteuerung. Der obere Teil besteht aus einer zu drei Seiten transparenten Kammer, an deren Oberseite der Strahlausgang (Kollimator) des Faserlasers mittig befestigt ist und die Bestrahlung von darunterliegenden Versuchspflanzen erlaubt.

Im Rahmen des Sicherheitskonzeptes wurde für die transparenten Seiten der Kammer ein auf die verwendete Wellenlänge ausgelegtes Laserschutzglas verwendet. Da das Schutzglas für eine direkte Bestrahlung von maximal 5 Sekunden ausgelegt ist, wird die maximale Bestrahlungsdauer durch ein sicheres Zeitglied limitiert. Der Zustand der Kammertür wird über zwei Magnetkontakte überwacht. Eine Öffnung der Tür im Betrieb führt zu einer sofortigen Abschaltung der Laseremission. Der Status des Lasers wird über LED-Taster an der Kammerseite dargestellt. Die Arbeiten und Erkenntnisse zur Lasersicherheit aus der Entwicklung des Versuchsstandes für stationäre Bestrahlungsversuche konnten zudem für die geplanten Arbeiten zum Lasersicherheitskonzept für einen mobilen Aufbau übernommen werden.

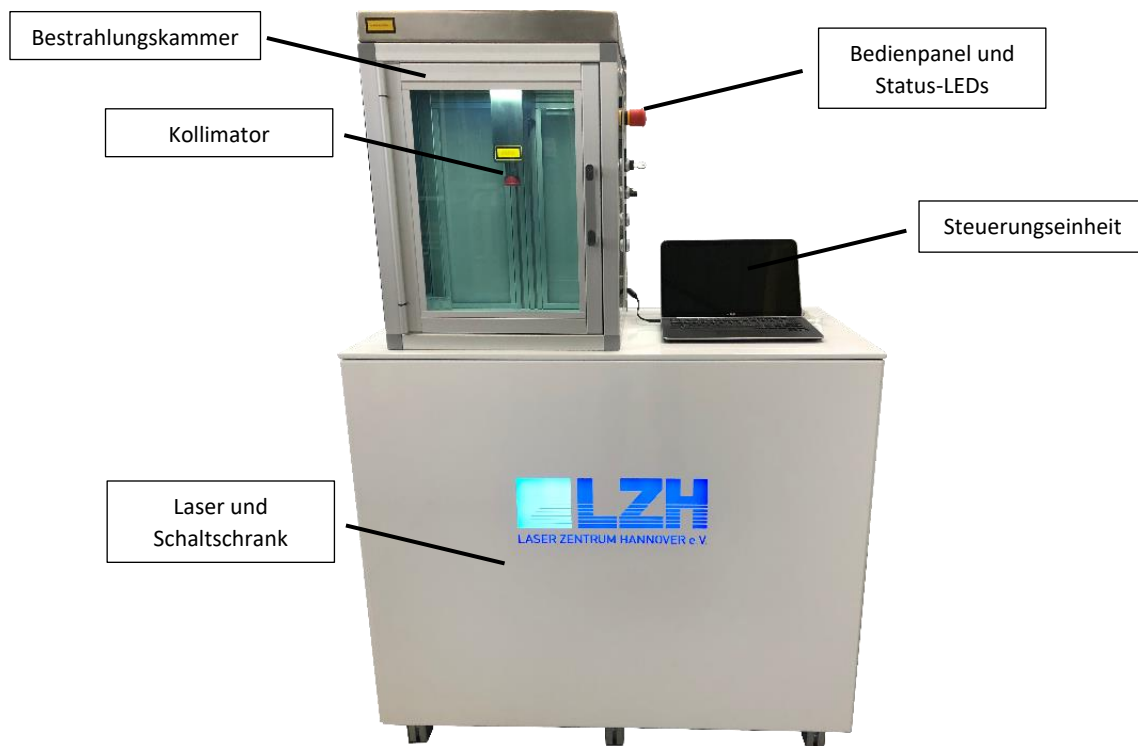


Abbildung 4 - Versuchsstand zur stationären Pflanzenbestrahlung mit effektiver Laserklasse 1

4.2. Dosis-Wirkungs-Beziehung

Um eine erste Abschätzung der zur angestrebten Schädigung benötigten Laserleistungen zu erhalten, wurden zu Beginn Bestrahlungsversuche an einer kleinen Zahl von Versuchspflanzen durchgeführt. Hierzu wurden Kornblumen- (*Centaurea cyanus*) und Amaranthsämlinge (*Amaranthus caudatus*) im Zweiblatt-Stadium (BBCH 12) verwendet und das Meristem bei variierenden Laserleistungen für je 1 Sekunde einmalig bestrahlt. Nach der Bestrahlung wurden je vier Pflanzen im Labor über mehrere Tage kultiviert, wobei die Entwicklung mit regelmäßigen Fotoaufnahmen dokumentiert wurde. Abbildung 5 zeigt die Versuchspflanzen vor der Bestrahlung, direkt nach der Bestrahlung und den Entwicklungsstand nach mehreren Tagen Kultivierung. Die linke Pflanze dient jeweils als unbehandelte Kontrollpflanze. Die mit dem Laser applizierten Energien in Joule sind auf den Bildern unter der jeweiligen Pflanze dargestellt.

Die durchgeführten Versuche ergaben bereits für Energien kleiner 15 Joule bei Amaranth und kleiner 22 Joule bei Kornblumen mögliche letale Schädigungen. Zudem zeigte sich, dass sich das Wachstum nach Behandlung der Pflanzen, über eine passende Dosierung der applizierten Energie, verzögern oder stoppen lässt ohne eine letale Schädigung herbeizuführen. Es ist davon auszugehen, dass bei dynamischer Strahlapplikation, neben der verwendeten Laserleistung, vor allem die Genauigkeit der Energie-Applikation zum Ausmaß der Schädigung des Meristems beiträgt. Für einen Feldeinsatz kann daher, abhängig von der erzielbaren Genauigkeit, eine Anpassung der stationär ermittelten Energien notwendig sein.



Abbildung 5 - Mit unterschiedlichen Laserleistungen bestrahlte Amaranthpflanzen (links) und Kornblumen (rechts). Die Bilder zeigen die Pflanzen jeweils vor (oben) und direkt nach der Bestrahlung (mittig) sowie den Entwicklungsstand nach 31 Tagen (links) und 19 Tagen (rechts)

Für eine detaillierte Untersuchung der Dosis-Wirkungs-Beziehung der Laserbestrahlung auf die Wuchszentren juveniler Pflanzen wurden in Kooperation mit der Landwirtschaftskammer Niedersachsen *Amaranthus Retroflexus* (AMARE) unter Gewächshausbedingungen kultiviert und anschließend nach Wuchsstadium anhand der BBCH-Skala eingeteilt. Für die Versuche wurde die für den Felddemonstrator geplante Laserstrahlquelle TLR-100-AC-Y14 der Firma IPG Laser mit einer Wellenlänge von 1940 nm verwendet. Die Bestrahlung erfolgte im in Abschnitt 4.1 vorgestellten Versuchsstand bei kollimiertem Gaußstrahl mit einem Strahldurchmesser von 5,5 mm und einer Laserleistung von 100 W. In den Wuchsstadien BBCH 10 bis 13 wurden je Stadium Bestrahlungsenergien von 5, 10, 15 und 20 Joule untersucht. Die Variation der applizierten Leistungen erfolgte über eine Änderung der jeweiligen Bestrahlungsdauer zwischen 50 und 200 ms. Da höhere Bestrahlungsenergien aufgrund der limitierten maximalen Laserleistung in immer höheren Bestrahlungsdauern resultieren, bringen Versuche mit höheren applizierten Leistungen für einen praktischen Feldeinsatz mit der verwendeten Laserquelle nur weniger relevanten Erkenntnisgewinn. Nach der Bestrahlung wurden die Pflanzen für 14 Tage im Gewächshaus weiter kultiviert, im Anschluss visuell bonitiert und anhand der Vitalität in vier Kategorien eingeteilt.

Das Diagramm in Abbildung 6 zeigt den Einfluss der unterschiedlichen Laserleistungen auf die Vitalität der Versuchspflanzen bei Bestrahlung in den jeweiligen Wuchsstadien. Die Kategorien 1 – 4 stehen für den Grad der Schädigung. Nach Bestrahlung und 14-tägiger Kultivierung zeigten die Pflanzen bei der visuellen Bonitur in Kategorie 1 keine sichtbaren Schädigungen, in Kategorie 2 leichte Schädigungen oder geringen Wuchsverzug, in Kategorie 3 erhebliche Schädigungen oder starken Wuchsverzug und in Kategorie 4 eine letale Schädigung.

Die Ergebnisse bestätigen die Erkenntnisse aus den vorherigen, weniger umfangreichen Bestrahlungsversuchen. Je geringer das Wuchsstadium und je höher die applizierte Laserenergie, desto höher der Grad der Schädigung auf die Vitalität der Pflanze. Bereits im Wuchsstadium BBCH 13 lassen sich die Pflanzen mit einer Leistung von 20 Joule nicht mehr zuverlässig letal schädigen oder stark im Wuchs verzögern. Neben der zunehmenden Robustheit der Versuchspflanzen spielen hierbei vor allem

mit dem Wuchsstadium zunehmende Verschattungseffekte im Bereich der Wuchszentren eine Rolle. Da der Laserstrahl bei den durchgeführten Versuchen stets senkrecht zu den Pflanzen steht, können die größere Anzahl und Fläche der Laubblätter Teile der eingestrahelten Energie bereits vor den Wuchszentren absorbieren, sodass die effektiv applizierte Energie erheblich verringert wird.

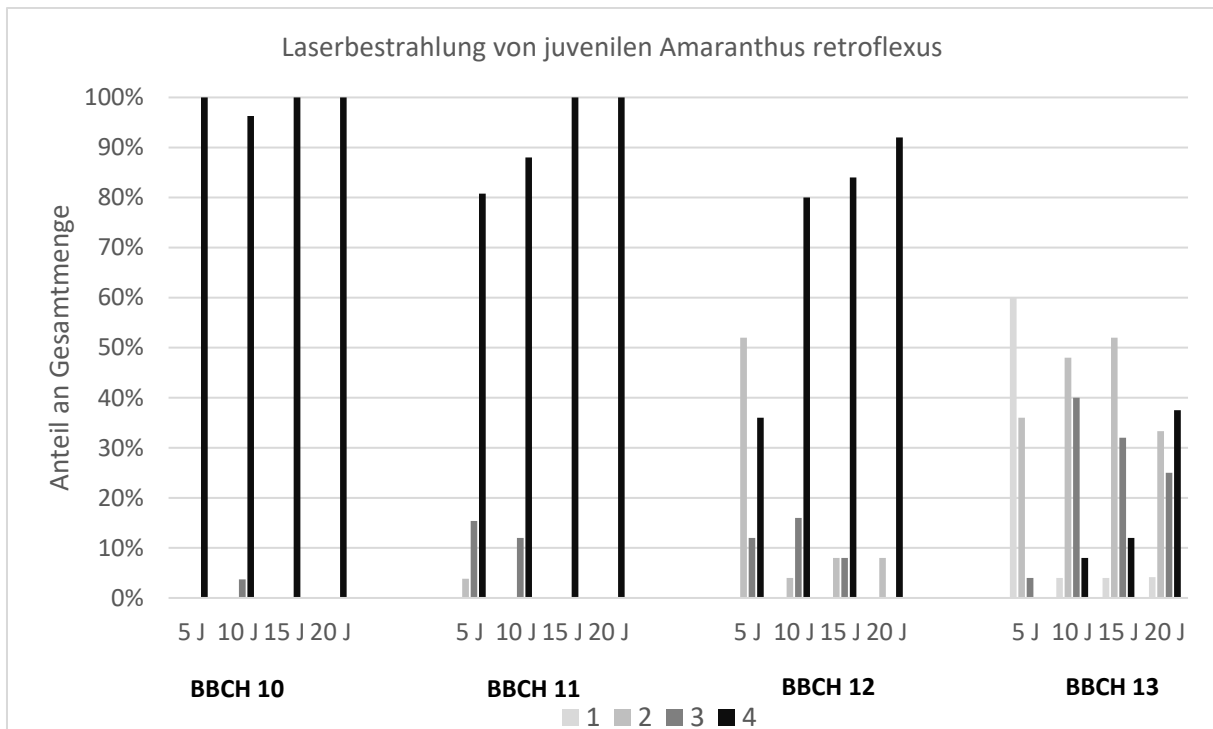


Abbildung 6 – Einfluss der zur Bestrahlung verwendeten Laserleistung auf die Vitalität von juvenilen Amaranthus retroflexus in unterschiedlichen Wuchsstadien.

4.3. Schädigungsuntersuchungen

Um den direkten lokalen Einfluss von Laserstrahlung mit einer Wellenlänge von 1940 nm auf pflanzliches Gewebe besser beurteilen zu können, wurden weitere Bestrahlungsversuche an juvenilen AMARE durchgeführt und im Anschluss mittels unterschiedlicher optischer Untersuchungsmethoden ausgewertet. Von jeder Versuchspflanze wurden hierzu vor und nach einer Bestrahlung jeweils Bilder mithilfe einer Spiegelreflexkamera, eines Auflichtmikroskops sowie eines Rasterelektronenmikroskops (REM) aufgenommen. Des Weiteren erfolgte eine in-situ-Bildgebung während der Bestrahlung des Pflanzengewebes im Einstrahlungsbereich mittels optischer Kohärenztomographie (OCT), welche eine Darstellung des Einflusses der Laserstrahlung im tieferliegenden Gewebe ermöglicht. Abbildung 7 zeigt beispielhaft eine auf einem Kohlesubstrat befindliche AMARE im BBCH 11. Die Bestrahlung erfolgte mit dem im Projekt verwendeten Thulium-Laser bei kollimiertem Strahl mit einem Strahldurchmesser von 5,5 mm und einer Bestrahlungsdauer von 94 ms bei 100 W. Die rechte obere Bildreihe zeigt Wuchszentrum und Stängel der Pflanze vor der Bestrahlung, die untere Bildreihe den jeweiligen Ausschnitt nach der Bestrahlung. Der Bestrahlungswinkel entspricht dabei dem Betrachtungswinkel. Die farbigen Bilder wurden mithilfe eines Auflichtmikroskops, die Graustufenbilder mithilfe eines REM aufgenommen. Durch beide bildgebende Verfahren ist der Einfluss der durch den Laser eingebrachten Energie klar zu erkennen. Neben einer Schrumpfung des Gesamtvolumens kommt es zur teilweisen Zerstörung der äußeren Gewebeschichten. Bei aufrechten Pflanzen war zudem der Verlust der mechanischen Tragfähigkeit bei bestrahltem Gewebe durch ein Abknicken der anliegenden Areale nach der Bestrahlung zu beobachten.

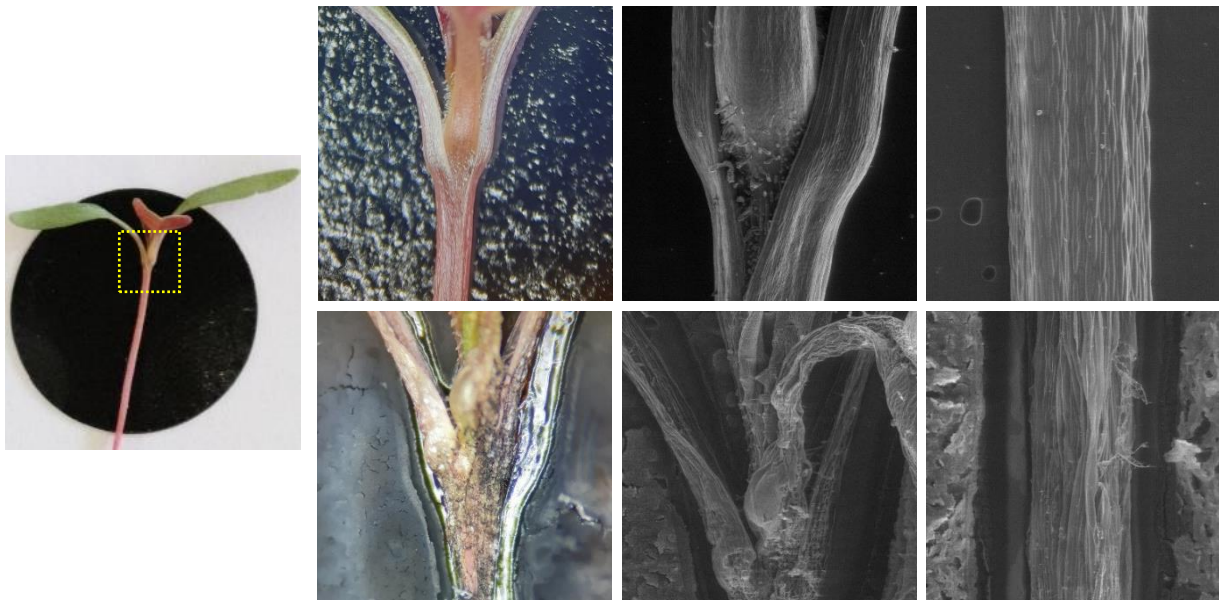


Abbildung 7 – Mit einem Auflichtmikroskop und einem REM aufgenommene AMARE vor (obere Reihe) und nach (untere Reihe) einer Laserbestrahlung. Die Markierung im linken Foto zeigt die aufgenommenen Bereiche der Pflanze.

Um die Vorgänge innerhalb des Gewebes während der Bestrahlung zu erfassen, wurde in weiteren Versuchen ein Megahertz-OCT verwendet. Da die zeitliche Auflösung, im Gegensatz zu den vorher gezeigten bildgebenden Verfahren, bei diesen Versuchen kritisch ist, muss eine geringere räumliche Auflösung in Kauf genommen werden. Abbildung 8 zeigt das Schnittprofil des Stängels einer auf einem Papier liegenden AMARE im BBCH 11 entlang seiner Wuchssachse. Die Bestrahlung erfolgt von oben, senkrecht zur Bildachse. In Abbildung 8b ist zu erkennen, dass es bereits wenige Millisekunden nach Beginn des Behandlungspulses zu einem Aufplatzen der äußeren Gewebeschicht kommt, gefolgt vom Auswurf inneren Gewebematerials. Ebenfalls zu erkennen ist die durch das Aufplatzen induzierte Bewegung der Versuchspflanze in den rechten Bildbereich in Abbildung 8c. Die Ergebnisse zeigen deutlich, dass es bei der Bestrahlung von vitalem Pflanzengewebe zu einer Absorption der applizierten Laserenergie im Volumen kommt und nicht lediglich äußere Gewebeschichten geschädigt werden. Eine mögliche induzierte Bewegung der bestrahlten Pflanzen muss bei der Zielfindung im Feldeinsatz gegebenenfalls berücksichtigt werden.

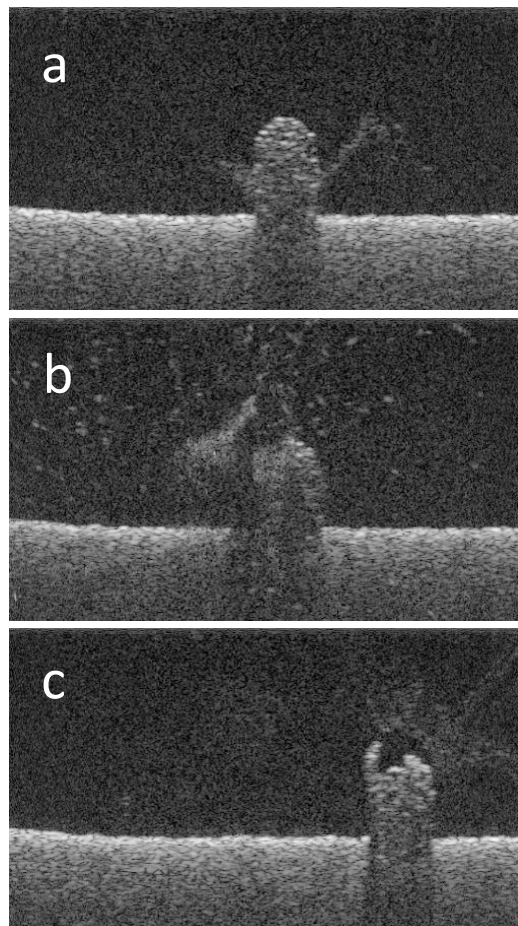


Abbildung 8 – Mittels Megahertz-OCT gewonnene Aufnahmen einer bestrahlten AMARE im Querschnitt entlang der Wuchssachse. Die Abbildungen zeigen den Querschnitt vor (a), während (b) und direkt nach (c) der Bestrahlung.

5. Felddemonstrator – Konzeptionierung und Aufbau

Zur verbesserten Umsetzung der notwendigen Feldtauglichkeit und für einen vereinfachten Transport wurde der im Rahmen der Robustheitstest entwickelte Versuchsaufbau teilweise umkonstruiert und für den tatsächlichen Platzbedarf der später vorhandenen Bauteile optimiert. Um einen flexibleren Einsatz des Demonstrators zu erlauben, wurde die zuvor verbaute Schienenführung durch geeignete Luftreifen ersetzt. Die gesamten Elektronikkomponenten zur Auswertung und Steuerung wurden zusammen mit der Strahlquelle baulich vom Bearbeitungsbereich getrennt. Dies erlaubt zum einen eine größere Variabilität im Aufbau der Bearbeitungseinheit und zum anderen die einfachere Sicherstellung einer für den Außeneinsatz geeigneten Elektroneinheit. Bei der Auswahl der Elektronikkomponenten wurde vornehmlich auf eine hohe Flexibilität in Bezug auf Integrierbarkeit und mögliche Erweiterung geachtet. Die gesamte Elektronik, Sensorik und Spannungsversorgung werden in einem abschließbaren Schaltschrank zusammengeführt. Dies ermöglicht neben einer vereinfachten Wartung und Fehlersuche auch die simple Integration weiterer Komponenten in die Gesamtelektronik des Felddemonstrators. Die Spannungsversorgung des Gesamtsystems wird bei Netzspannung (230 V, 16 A) kabelgebunden über einen herkömmlichen Schuko-Stecker realisiert. Abbildung 9 zeigt eine Aufsicht des entwickelten Felddemonstrators. Die wesentlichen Komponenten sind beschriftet. Abbildung 10 zeigt ein Foto des fertiggestellten Gesamtaufbaus.

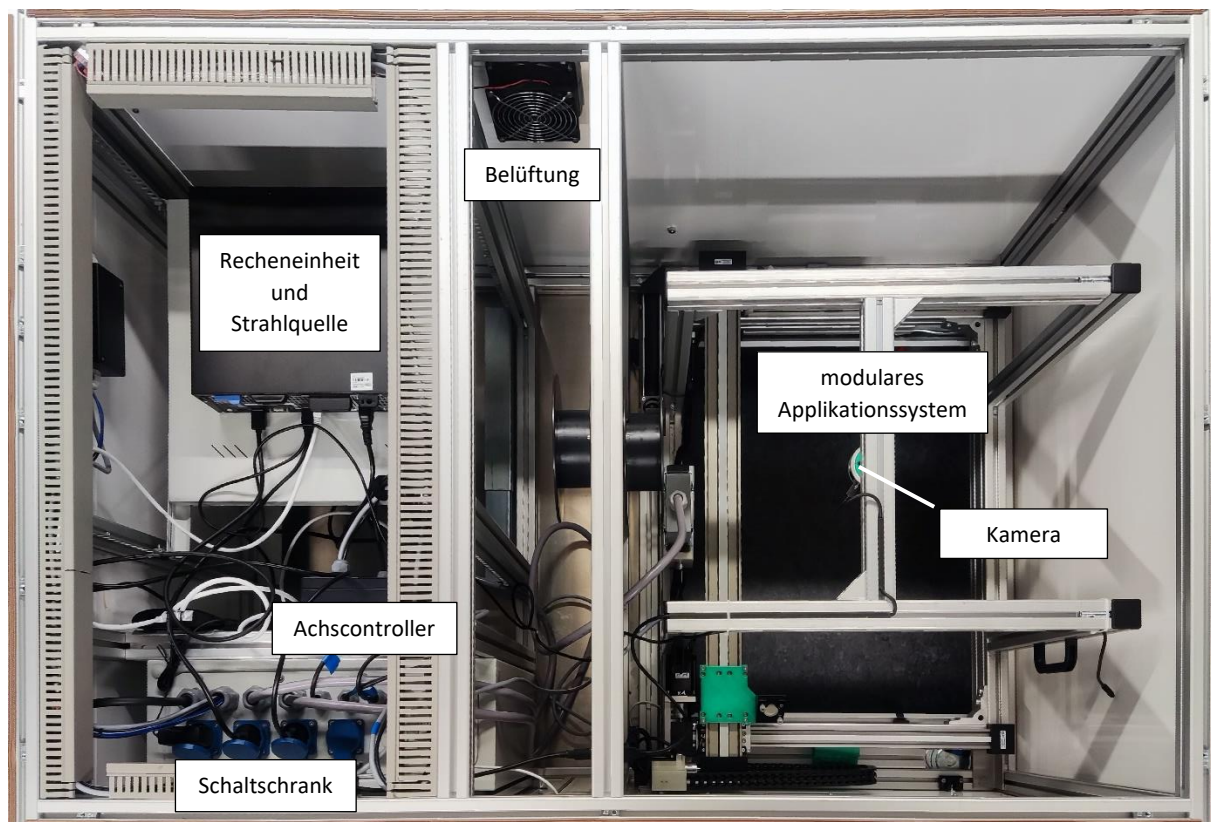


Abbildung 9 - Aufsicht des entwickelten Felddemonstrators inklusive der beschrifteten Kernkomponenten.



Abbildung 10 - Foto des entwickelten Felddemostrators vor einem geplanten Außeneinsatz.

5.1. Applikationstechnik und Elektronik

Zur Ausrichtung und anschließenden senkrechten Applikation des Laserstrahls auf die gewünschten Ziele wurde ein Flächenportal in Gantry-Bauweise der Firma *igus* mit einem effektiven Arbeitsbereich von 400 mm x 647 mm in Kombination mit zwei justierbaren Umlenkspiegeln verwendet. Das Flächenportal besteht im Wesentlichen aus drei Zahnriemenachsen (drylin ZLW) mit je einem Schrittmotor (drylin NEMA 23), die eine erreichbare Positioniergenauigkeit von $\pm 0,3$ mm ermöglichen. Die Einkopplung des Laserstrahls erfolgt über eine mechanische Befestigung des Kollimators (Strahlaustritt des Lasers), welcher so baulich fest mit dem Achssystem verbunden ist. Mittels zweier weiterer justierbarer Umlenkspiegel wird der Laserstrahl im geeigneten Winkel auf die vom Flächenportal bewegten Umlenkspiegel ausgerichtet. Die Anzahl der Umlenkspiegel erlaubt dabei die manuelle Korrektur möglicher auftretender Abweichungen des Strahlengangs. Zur Sicherstellung einer korrekten Positionierung befinden sich an den Achsursprüngen mechanische Endstoppschalter. Die bewegte Kabelführung erfolgt über eine Energiekette entlang der Gantry-Achse. Aufgrund der hochfrequenten Motorströme wird der Anschluss von Elektronik und Sensorik über separate Steckverbinder realisiert. Da das gesamte Flächenportal inklusive Detektionstechnik in Modulbauweise konstruiert wurde, ist der Transfer auf andere mobile Plattformen unkompliziert möglich.

Zur Ansteuerung des Flächenportals und der Strahlquelle wird ein separat eingehautes Duet 3 Main Board 6HC der Firma Duet3D Limited verwendet. Das Mainboard ermöglicht den Anschluss von bis zu sechs Schrittmotoren mit einem maximalen Motorstrom von je 6,3 A sowie die Ansteuerung und Integration umfangreicher Sensorik und Peripherie. Des Weiteren können über die integrierte Firmware herkömmliche Befehle zur Maschinensteuerung in Form von G-Code verarbeitet werden. Ein permanent erreichbares Webinterface ermöglicht eine detaillierte Fehlersuche auch während des Feldbetriebs.

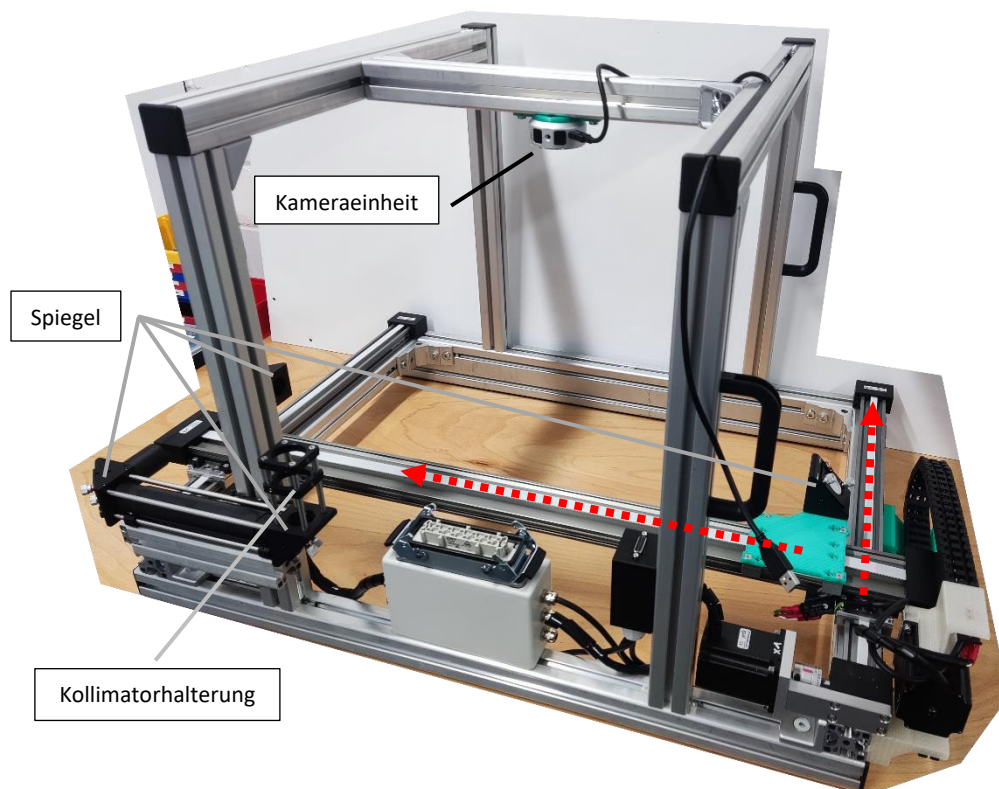


Abbildung 11 – Applikationsmodul des entwickelten Felddemonstrators inklusive Kameraeinheit.

5.2. Detektionstechnik

Da der Bearbeitungsbereich des Felddemonstrators weitgehend vom Tageslicht abgeschirmt ist und um einen tageszeitunabhängigen Betrieb zu ermöglichen, ist zur manuellen und automatisierten Pflanzenerkennung eine ausreichende und möglichst gleichmäßige Ausleuchtung notwendig. Im Felddemonstrator wurden hierzu vier nach innen gerichtete, kaltweiße LED-Leisten mit Diffusor um das Bearbeitungsfeld verbaut. Die Bildgebung erfolgt mittels einer zentral über dem Bearbeitungsbereich positionierten Kamera. Diese ist baulich fest mit dem Flächenportal verbunden, sodass eine Kalibration von Kamera und Flächenportal lediglich nach relevanten baulichen Veränderungen erneut durchgeführt werden muss.

Die zunächst geplante Umsetzung der Bildgebung über eine herkömmliche 2D-RGB-Kamera musste aufgrund der variierenden Bearbeitungshöhen im praktischen Einsatz angepasst werden. Um eine präzise Zielführung in unterschiedlichen Bearbeitungshöhen erreichen zu können, ist die Ermittlung der jeweiligen Abstände von Zielpunkt und Kameraeinheit unabdingbar. Hierzu wurden zwei bereits etablierte und kosteneffiziente Techniken zur Abstandsbestimmung für die Eignung innerhalb des Felddemonstrators evaluiert und bewertet. Abbildung 12 zeigt RGB-Aufnahmen mit den zugehörigen ermittelten Höhenprofilen zweier Kornblumen im Wuchsstadium BBCH 10. Die beiden linken Bilder wurden mit einer D435i (RealSense Depth Camera), die beiden rechten Aufnahmen mit einer L515 (RealSense LiDAR Camera) der Firma Intel aufgenommen. Die Ermittlung der Höhenprofile erfolgt bei der D435i als sogenannte Stereokamera aus den Aufnahmen zweier nebeneinander platzierter RGB-Kameras. Bei der L515 wird das Höhenprofil mittels eines neben der RGB-Kamera platzierten „Light detection and ranging“ (Lidar)-Sensors ermittelt. Der Lidar-Sensor scannt dabei den vor der Kamera befindlichen Bereich mithilfe eines niederenergetischen Laserstrahls ab und berechnet die Abstände der abgescannten Punkte zur Kamera aus dessen zeitlich versetzten Reflexionen. Bauartbedingt ist die L515 aufgrund der im Lidar verwendeten Wellenlänge stömpfindlich auf im Scanbereich gestreutes Sonnenlicht. Da für eine präzise Zielführung des Laserstrahls eine möglichst akkurate Ermittlung der Höhenkoordinaten notwendig ist und die Bearbeitung größtenteils unter Ausschluss von Tageslicht erfolgt, wurde sich aufgrund der besseren Höhenauflösung für die Verwendung einer L515 Lidar-Kamera entschieden. Mit der verwendeten Kamera und dem verbauten Flächenportal konnten Applikationsabweichungen von weniger als 3 mm realisiert werden.

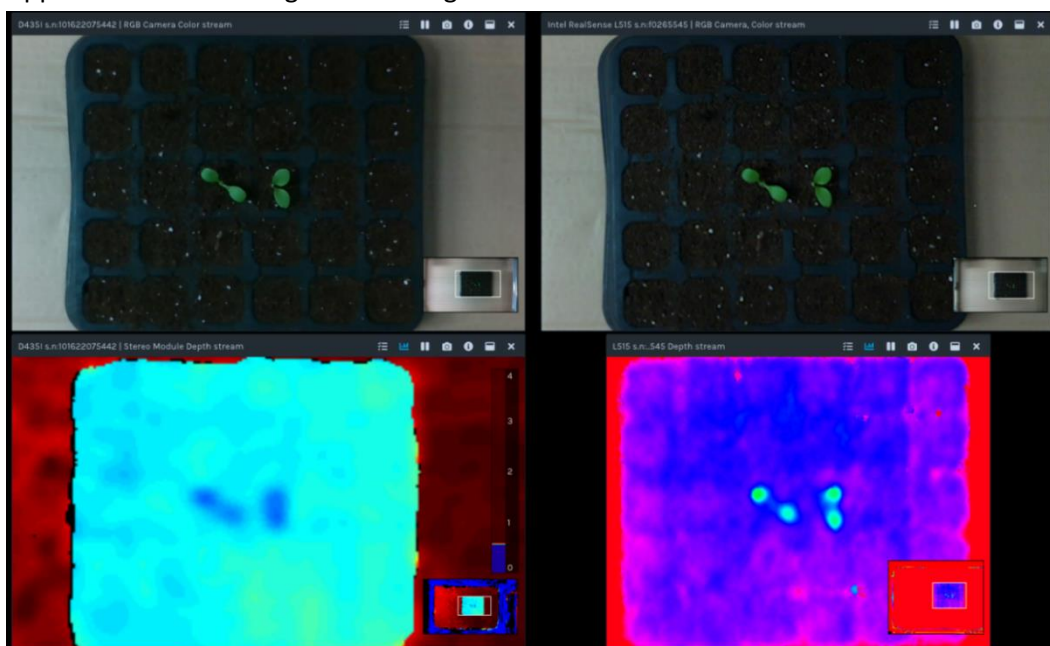


Abbildung 12 – RGB-Bilder und zugehörige Höhenprofile einer Stereokamera (links) und einer Lidar-
Kombination (rechts).

5.3. Systemsteuerung

Zur hardwareseitigen Ansteuerung der Kernkomponenten sind am Gehäuse des Felddemonstrators Kipp-, Druck- und Schlüsselschalter angebracht. Diese erlauben das Schalten von Strahlquelle, Beleuchtung und Belüftung während des Betriebs ohne ein Öffnen der verbauten Wartungsklappen. Neben der hardwareseitigen Schaltung der Kernkomponenten erfolgt die übergreifende Ansteuerung und Überwachung der Systemkomponenten im Wesentlichen softwareseitig. Hierzu wurde eine modulare GUI auf der Basis von Qt unter Verwendung der Programmierschnittstelle PyQt5 entwickelt. Diese ermöglicht eine flexible nachträgliche Änderung und Integration von Komponenten und Funktionen.

Abbildung 13 zeigt das Hauptfenster der entwickelten GUI. Zentraler Bestandteil der Oberfläche ist die Darstellung des RGB- (und optionalen Infrarot-) Livefeeds der verwendeten Kamera, welche über den Button „Marking“ aufgerufen wird. Der Livefeed ermöglicht in Kombination mit den verbauten Beleuchtungseinheiten die Überwachung des Arbeitsbereiches, die Prozessüberwachung sowie die manuelle Markierung und Korrektur zu bestrahlender Ziele. Im linken Fenster befinden sich alle zur Einstellung der Behandlungsparameter notwendigen Schaltflächen. Gegebenenfalls auftretende Ungenauigkeiten bei der Zielfindung können durch die Aktivierung des „Circle-Mode“ kompensiert werden. Hierbei wird die Bestrahlung einer einzelnen Koordinate im Arbeitsbereich durch die Bestrahlung einer oder mehrerer konzentrischer Kreise um die jeweilige Koordinate ersetzt. Über die Schaltfläche „Capture“ kann der aktuelle Frame aus dem Livestream gespeichert werden. Im Anschluss lässt sich mit „Recognition“ durch ein auf den jeweiligen Einsatz trainiertes DCNN eine automatisierte Bilderkennung im gespeicherten Frame durchführen. Die vorgeschlagenen Koordinaten der erkannten Pflanzen und Wuchszentren werden gespeichert und im Anschluss im Livefeed angezeigt. Über „Weeding“ lässt sich die Behandlung der markierten Ziele entsprechend der eingestellten Parameter starten. Zu Beginn der Behandlung wird der aktuelle Frame aus dem Livestream gespeichert und die markierten Koordinaten in einer separaten Datei hinterlegt. Dies erleichtert im Anschluss ein Labeln der im Feldeinsatz aufgenommenen Bilddaten, um diese für das weitere Training neuronaler Netze zu nutzen.

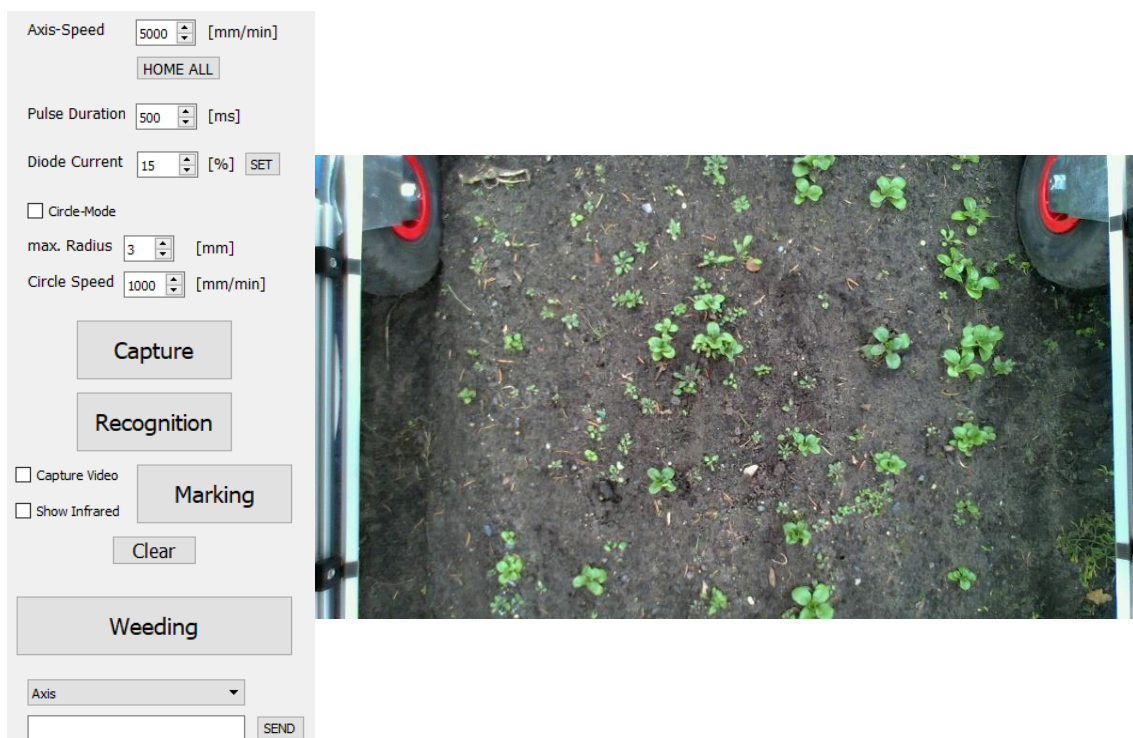


Abbildung 13 - Graphical User Interface zur übergreifenden Ansteuerung des Felddemonstrators

5.4. Sicherheitskonzept

Für den Umfang der Auslegung, Konzeptionierung und Umsetzung eines geeigneten Sicherheitskonzeptes im Feldbetrieb ist eine vorherige Definition des Einsatzbereiches entscheidend. Für den Einsatz des entwickelten Felddemonstrators wurden die Versuchsbereiche als kontrolliert und beschränkt festgelegt. Der Zugang zur näheren Umgebung des Felddemonstrators ist somit während des Betriebs nur ausgewiesenen Personen gestattet. Da bei der senkrecht zum Boden erfolgenden Laserbehandlung auf dem Feld lediglich von diffuser Reflexion auszugehen ist, ist der gesamte Arbeitsbereich unter dem Felddemonstrator mit einem Laserschutzvorhang mit geringem Bodenabstand abgehängt. Entsprechend der maximalen zu erwartenden Laserleistung und der Einsatzbedingungen wurde ein Laserschutztextil mit diffus reflektierender Beschichtung der Firma Transtextil verwendet. Das verwendete Textil besteht aus einem auf PU-Basis beschichteten Modacryl-Baumwoll-Trägermaterial. Der gesamte Aufbau ist mit 2 mm starken Aluminiumplatten eingehaust. Alle Wartungsklappen des Aufbaus können mit berührungslosen Sicherheitsschaltern ausgestattet werden, sodass ein Öffnen während des Betriebs zur Abschaltung des Systems führt. Zur manuellen Not-Abschaltung wurde ein klassischer Not-Halt-Schalter gut zugänglich angebracht.

Zum Auslesen und Verwalten der gesamten Sicherheitssensorik und -schaltung wurde das Sicherheitsmodul PSR-TRISAFE-M der Firma Phoenix Contact im zentralen Schaltschrank verbaut. Das Sicherheitsmodul erlaubt flexibel konfigurierbare und programmierbare Ergänzungen und Änderungen im Sicherheitskonzept, sodass gegebenenfalls notwendige Anpassungen unkompliziert umgesetzt werden können.

6. Bilderkennung

Nachfolgend werden softwareseitige Entwicklungen im Bereich Datengenerierung und Bilderkennung beschrieben und die jeweiligen Ergebnisse vorgestellt.

6.1. Data Augmentation

Für die Integration einer Bilderkennung auf der Basis neuronaler Netze (Deep Convolutional Neural Networks - DCNN) werden umfangreiche annotierte Bilddatensätze benötigt, um das Netz für die benötigte Unkrautklassifizierung und Meristemlokalisierung zu trainieren. Da zunächst nur eine geringe Bilddatenbasis vorhanden ist, kommt den Verfahren zur künstlichen Datenerweiterung (Data Augmentation) eine erhebliche Bedeutung zu. Diese erlauben eine Vervielfältigung bereits vorhandener Daten mit beliebigen, meist randomisierten Änderungen. Für den Ausbau einer Bilddatenbasis im Rahmen des NUBELA-Projektes wurden zwei unterschiedliche Ansätze auf der Basis verschiedener Python-Bibliotheken verfolgt.

Der erste Ansatz soll eine Generierung zusätzlicher Bilddaten durch die automatische und zufällige Kombination unterschiedlicher Hintergründe mit den zu erkennenden Pflanzen ermöglichen. Wesentliche Voraussetzung zur Verwendung dieses Ansatzes sind bereits segmentierte und klassifizierte Bilddatensätze der jeweiligen Pflanzen, auch Ground Truth genannt. Hierzu wurde zu Versuchszwecken ein frei zugänglicher Datensatz der University of Southern Denmark und der Aarhus University (<https://vision.eng.au.dk/plant-seedlings-dataset/>) juveniler Vogelmiere verwendet¹. Die Bildverarbeitung zur Generierung der Daten erfolgt im Anschluss vorwiegend unter Verwendung der Programmbibliothek-OpenCV. Abbildung 14 zeigt Beispiele der aus dem genannten Datensatz generierten Bilder. Während der Generierung wird eine zufällige Anzahl Pflanzen aus den segmentierten Originaldaten ausgeschnitten, in einem zufälligen Maß vergrößert, verkleinert und gedreht und abschließend zufällig auf einem Hintergrundbild platziert. Da für den gezeigten Ansatz ein bereits segmentierter Datensatz benötigt wird und, je nach Ansatz, gegebenenfalls eine erneute Annotation notwendig ist, kann dies einen enormen zusätzlichen Zeitaufwand bedeuten.



Abbildung 14 - Originaldatensatz juveniler Vogelmiere (links), zufällig platzierte und veränderte juvenile Vogelmiere auf unterschiedlichen Hintergründen (mittig und rechts). Quelle der Rohdaten: <https://vision.eng.au.dk/plant-seedlings-dataset/>

In einem zweiten Ansatz wurden Bildeigenschaften wie Sättigung, Rotation oder Bewegungsunschärfe zur Erweiterung des Datensatzes manipuliert. Eine Änderung der tatsächlichen Bildinhalte wie im ersten Ansatz wird hierbei nicht vorgenommen. Daher können bereits vorliegenden Annotationen direkt übernommen werden. In diesem Ansatz erfolgt die Generierung der neuen Bilddaten vornehmlich über die Programmbibliothek *imgaug*. Abbildung 15 zeigt Beispiele von mit der

¹ Giselsson, T. M., Jørgensen, R. N., Jensen, P. K., Dyrmann, M., & Midtiby, H. S. (2017). A Public Image Database for Benchmark of Plant Seedling Classification Algorithms.; <https://arxiv.org/abs/1711.05458>

Verwendung von *imgaug* generierten Bildern juvenilen Löwenzahns im Vergleich zum Original. Die Bildeigenschaften wurden zu Anschauungszwecken stärker verändert als bei einer zum Training üblichen Generierung.

Neben der künstlichen Erweiterung der Datensätze wurden für die geplanten Feldversuche relevante Unkräuter bestimmt und, soweit möglich, in kleineren Mengen kultiviert, um Bilddaten zu generieren. Für Löwenzahn, Vogelmiere und Sauerampfer liegen bereits annotierte Datensätze vor.



Abbildung 15 - Originaldatensatz juvenilen Löwenzahns (links), zufällige Änderungen der Bildparameter des Originalbildes (mittig und rechts)

6.2. Erkennung von Unkrautpflanze und Meristem

Ziel innerhalb des NUBELA-Projektes war die Implementierung einer automatisierten Pflanzen- und Meristem-Erkennung. Bei der Umsetzung wurde sich für einen DCNN-Ansatz entschieden. Als Framework wurde TensorFlow mit der Programmierschnittstelle *Object Detection* verwendet. Um die Effizienz der verwendeten Netze zu steigern und eine größere Auswahl an vortrainierten Modellen zu erhalten, wurde der anfangs verfolgte Ansatz zur pixelgenauen Maskierung von Pflanzen oder Pflanzenteilen durch eine Methode zur Ausgabe von Begrenzungsrahmen (Bounding Boxes) ergänzt.

Zur Umsetzung der Meristem-Erkennung wurde ein Ansatz über die Erkennung mehrerer separater Klassen gewählt. Hierbei werden die Pflanzen und ihr jeweiliges Meristem in den Trainingsdaten einzeln mit den eigenen Klassen *Unkraut* und *Meristem* annotiert. Um eine Verwechslung der Meristeme von Unkraut- und Kulturpflanze zu vermeiden, kann bei der anschließenden Erkennung eine zusätzliche Abfrage implementiert werden, ob die Koordinaten der erkannten Meristeme innerhalb der Koordinaten der Klasse *Unkraut* liegen. Abbildung 16 zeigt einen Ausschnitt aus der Erkennung eines mit dem bereits erwähnten Bilddatensatz zu juveniler Vogelmiere trainierten Modells. Als vortrainiertes Modell wurde das frei verfügbare „Faster RCNN Inception Resnet c2 atrous coco“ verwendet. Die Annotation erfolgte mit dem ebenfalls frei verfügbaren Tool *LabelImg* (Tzutalin. LabelImg. Git code (2015). <https://github.com/tzutalin/labelImg>). Jede Bounding Box erhält während der Erkennung automatisch ein Label mit dem Klassennamen und der ermittelten Erkennungswahrscheinlichkeit in Prozent. Die Schwelle, bei der eine Erkennung als positiv angenommen wird, kann beliebig an die jeweiligen Anforderungen angepasst werden. Um im Anschluss Punktkoordinaten für eine zielgenaue Applikation des Lasers zu generieren, werden die Mittelpunkte der entsprechenden Meristem-Bounding Boxes verwendet. Die dargestellten Ergebnisse zeigen eine grundsätzliche Eignung des verwendeten Ansatzes zur automatisierten Meristem-Erkennung, sind allerdings nicht ohne Weiteres auf den geplanten Feldeinsatz übertragbar, da hierfür individuelle Trainingsdaten benötigt werden. Ein geeigneter und umfangreicher Bilddatensatz kann mit der entwickelten GUI im Rahmen von Feldversuchen aufgebaut und erweitert werden.

Für den entwickelten Erkennungsansatz reicht die Verwendung konventioneller RGB-Aufnahmen in Kombination mit einer entsprechenden Beleuchtungseinheit aus, sodass sich die Auslegung passender Detektionstechnik für den jeweiligen Einsatz, bspw. mit der verbauten Lidar-Kamera L515, kosteneffizient gestalten lässt.

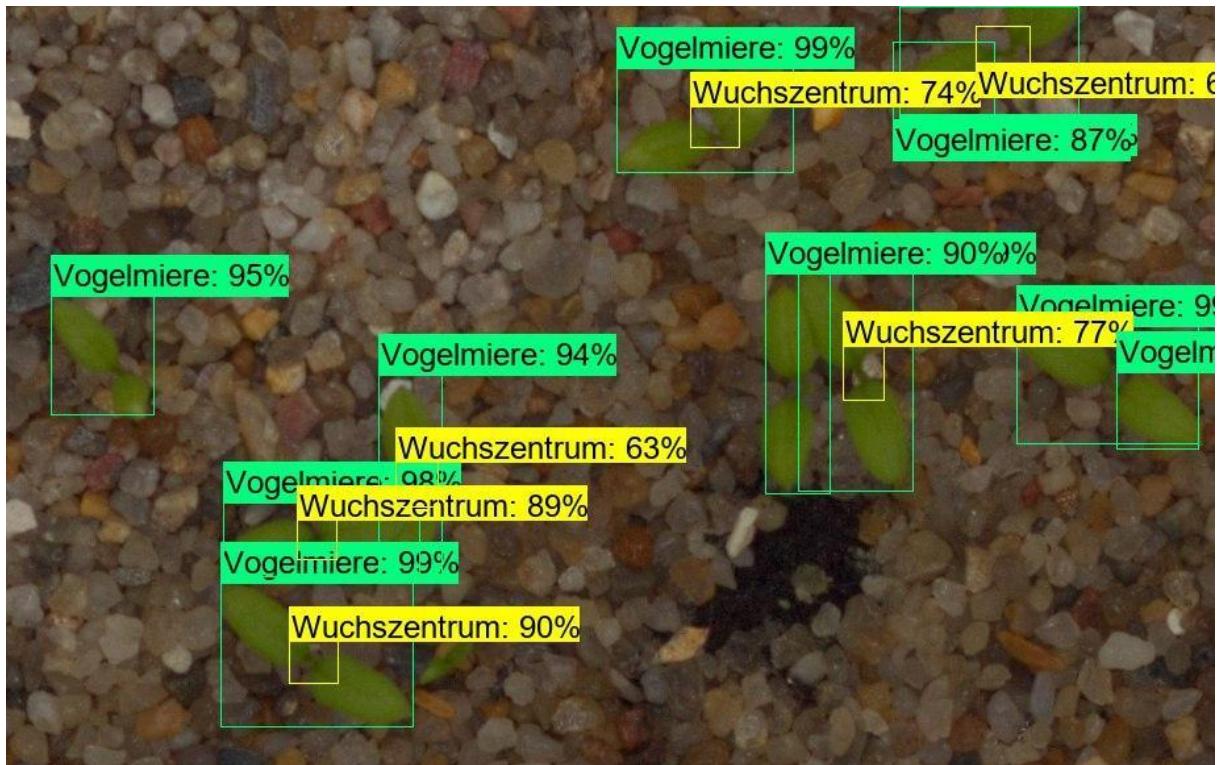


Abbildung 16 - Ausschnitt einer durchgeführten Erkennung mit den Klassen Unkraut (Vogelmiere) und Meristem (Wuchszentrum). Quelle der Rohdaten: <https://vision.eng.au.dk/plant-seedlings-dataset/>

7. Feldversuch

Zum Abschluss des Projektes wurde der entwickelte Felddemonstrator bei einem landwirtschaftlichen Gemüsebaubetrieb im realen Feldeinsatz zur Unkrautbehandlung getestet. Der Feldeinsatz sollte dabei in erster Linie weitere Erkenntnisse in Bezug auf die mechanische Transport- und Felddauglichkeit des Gesamtsystems, die Zuverlässigkeit der Applikations- und Kameraeinheit sowie die Umsetzung der Energieversorgung liefern. Parallel sollten weitere Aufnahmen zum Ausbau der vorhandenen Bilddatensätze gewonnen werden.

Der Transport des Demonstrators zum Versuchsfeld erfolgte straßengebunden mit einem herkömmlichen Kleintransporter. Aufgrund der verwendeten Luftreifen und der stabilen Bauweise des Applikationsmoduls wurde auf eine zusätzliche Dämpfung während des Transports verzichtet. Während der anschließenden Versuche konnte keine Dejustage bei der Strahlauslenkung festgestellt werden. Die Energieversorgung erfolgte planmäßig über einen verfügbaren Zugang zum Netzstrom. Während des Betriebs wurden Messungen der benötigten elektrischen Leistung durchgeführt, um die tatsächlich aufgewendete Energie pro Behandlung zu bestimmen. Im einsatzbereiten Zustand benötigte der Felddemonstrator eine Leistung von ca. 1050 W. Für eine Bestrahlung von 90 Zielen bei Pulsen von 200 ms mit 100 W Laserleistung ergab sich eine durchschnittliche benötigte elektrische Energie des Felddemonstrators von 0,028 kWh.

Für die Versuche wurde entsprechend der vorherrschenden Wuchssituation eine passende Parzelle mit vorwiegend juvenilen Unkrautpflanzen ausgewählt. Abbildung 17 zeigt den Demonstrator in der ausgewählten Feldsalat-Kultur sowie die zugehörige Ansicht des Arbeitsbereichs unterhalb des Aufbaus. Die ausgewählte Parzelle wurde entsprechend der maximal möglichen Arbeitsbreite auf einer Länge von mehreren Metern im halbautomatischen Betrieb behandelt. Da eine detaillierte Bonitur aus zeitlichen und personellen Gründen nicht möglich war, wurde der generelle Behandlungserfolg 14 Tage nach der Behandlung durch den zuständigen Betriebsleiter visuell bewertet. Hierbei zeigte sich im Vergleich zu unbehandelten Bereichen eine klare Reduktion der Unkrautmenge auf den behandelten Flächen.



Abbildung 17 - Felddemonstrator bei der Unkrautbehandlung in einer Feldsalat-Kultur (links). Aufnahme des Arbeitsbereichs inklusive durchgeführter Markierung der Unkräuter (rechts).

8. Diskussion

Nachfolgend wird ein Überblick über die im Projekt erreichten Ziele gegeben. Im Anschluss werden aufgetretene Verzögerung bei der Projektbearbeitung beschrieben. Zum Abschluss werden mögliche Optimierungspotentiale und Weiterentwicklungen auf Basis der erarbeiteten Ergebnisse aufgezeigt.

8.1. Erreichte Ziele

Zu Beginn des Projektes wurde durch den projektbegleitenden Partner IPG Photonics GmbH eine robuste Strahlquelle in Form eines fasergeführten 100 W Thulium-Lasers mit einer Wellenlänge von 1940 nm zur Verfügung gestellt. Im Rahmen umfangreicher Robustheitstest und Bestrahlungsversuche an Versuchspflanzen konnte die Eignung der verwendeten Strahlquelle für eine Unkrautbehandlung im Außeneinsatz belegt werden. Die gewonnenen Erkenntnisse aus einer detaillierten Auswertung der Bestrahlungsversuche bieten dabei weiteres Optimierungspotential für zukünftige Einsatzszenarien.

Um eine vollautomatisierte Behandlung zu ermöglichen, wurden Ansätze zur automatischen Klassifizierung von Unkräutern und Erkennung von Wuchszentren auf der Basis von Deep convolutional neural networks demonstriert und evaluiert. Parallel wurde mit dem Aufbau einer Bilddatenbank für entsprechende Trainingsdaten begonnen und Möglichkeiten zur Data Augmentation etabliert. Eine umfangreiche Bilddatenbank mit relevanten Pflanzen erlaubt dabei zum einen die schnelle und flexible Anpassung des Verfahrens an unterschiedliche Pflanz- und Unkrautsituationen und zum anderen das Training robuster neuronaler Netze.

Für die Durchführung von Feldversuchen wurde ein Felddemonstrator entwickelt und aufgebaut. Hierzu wurde ein Sicherheitskonzept erarbeitet, das eine Nutzung des Felddemonstrators im Freiland erlaubt und zudem auf weitere, zukünftige Anwendungen in der Laserunkrautbehandlung übertragen werden kann. Die Zielerkennung und anschließende Applikation des Laserstrahls erfolgt über ein entwickeltes Applikationsmodul, bestehend aus einem robusten Flächenportal und einer Lidar-RGB-Kamera als Kernkomponenten. Die Kombination aus Lidar-RGB-Kamera und Flächenportal in einem integrierten Modul ermöglicht dabei einen direkten Transfer auf beliebige Fahrsysteme ohne eine erneute Kalibration der separaten Komponenten. Zum Abschluss des Projektes konnte der Felddemonstrator erfolgreich in einem landwirtschaftlichen Gemüsebaubetrieb getestet werden.

8.2. Änderungen im Ablauf

Neben kleineren Änderungen in der zeitlichen Abfolge der geplanten Arbeitspakete kam es durch die Auswirkungen der Corona-Pandemie zu Einschränkungen bei der Durchführung von Laborarbeiten, der Durchführung von Dienstreisen zu Partnerbetrieben sowie zu erheblichen Lieferengpässen bei notwendigen Komponenten. Dies führte teils zu Verzögerungen bei der Bearbeitung von Konstruktions-, Labor- und Feldarbeiten und hatte eine Verschiebung der Gewichtung der Projektarbeiten hin zu softwarelastigen Aufgaben zur Folge. Das geplante Vorziehen der Feldversuche innerhalb des Projektes konnte deshalb nicht realisiert werden, sodass die Komplexität der Versuche aus zeitlichen Gründen verringert werden musste.

8.3. Ausblick

Bereits im Laufe des Projektes konnten potentielle Partner für weiterführende Projekte akquiriert werden. Der Fokus für bereits laufende und zukünftige Projekte liegt dabei auf möglichen Kombinationswerkzeugen zur Erhöhung der Flächenleistung sowie der Implementierung des entwickelten Applikationsmoduls auf komplexeren Fahrsystemen. Um dabei eine Bestrahlung bei unterschiedlichen Fahrgeschwindigkeiten zu ermöglichen, soll der Ansatz der Erkennung über die Verwendung von DCNN, insbesondere in Bezug auf Erkennungszeiten und Tracking der Ziele, weiter ausgebaut werden.

Die Erkenntnisse aus den durchgeführten Bestrahlungsversuchen legen eine Erprobung weiterer alternativer Applikationssysteme nahe. Diese könnten beispielsweise eine Reduzierung der Leistungsverluste durch Verschattungseffekte bei der Bestrahlung der Wuchszentren erlauben, oder die Bestrahlung anderer kritischer Punkte der Unkrautpflanzen zur Verringerung der Gewebestabilität und der Unterbrechung der Wasser- und Nährstoffzufuhr ermöglichen.

Neben solchen primär technologisch orientierten Weiterentwicklungen wird auch der Einsatz der Laserunkrautbehandlung für grundlagenorientierte Forschung im Pflanzenbau verfolgt. So bereitet das LZH derzeit zusammen mit Partnern aus Wirtschaft und Forschung ein Projekt vor, das im Rahmen des Programms zur Innovationsförderung der BLE beantragt werden soll. Hier soll der NUBELA-Demonstrator zur einzelpflanzenselektiven Beikrautbehandlung eingesetzt werden, um Daten zur Parametrisierung eines Konkurrenzmodells für reale Verunkrautung zu erheben. Aus dem von Projektpartnern entwickelte Modell können dann Handlungsempfehlungen zum Unkrautmanagement abgeleitet werden, die nicht auf einen „sauberen“ Acker, sondern nur auf eine Reduktion von Beikraut unter die relevante Schadschwelle für die angebauten Kulturpflanzen. Dies würde sowohl eine Reduktion des Einsatzes von Pflanzenschutzmitteln ermöglichen als auch die Perspektive hin zu einer Erhöhung der Biodiversität auf Ackerflächen eröffnen.

Im Rahmen weiterer Öffentlichkeitsarbeit nach Projektende ist eine Ausstellung des Felddemonstrators auf den Öko-Feldtagen vom 28. bis 30. Juni 2022 geplant. (<https://oeko-feldtage.de>)

9. Öffentlichkeitsarbeit

Im Rahmen der Öffentlichkeitsarbeit wurde das Projekt NUBELA sowie Teile des Projektes auf folgenden Plattformen vorgestellt:

Fernsehbeitrag

ARD – Beitrag in der Fernsehsendung „W wie wissen“

<https://www.daserste.de/information/wissen-kultur/w-wie-wissen/laser-110.html>

Sat.1 Regional – „Laser statt Pflanzengift - Forscher in Hannover arbeiten an umweltfreundlicher Unkrautbekämpfung“

Social Media

Video des projektbegleitenden Partners IPG Laser GmbH via LinkedIn

https://www.linkedin.com/posts/ipg-laser_lzh-laserondemand-deutschebundesstiftungumwelt-activity-6693733488165720064--ISW

Zeitschriftenbeitrag

GIT Laborportal - <https://www.git-labor.de/forschung/umwelt/unkrautmanagement-mit-lasertechnik>

Neue Osnabrücker Zeitung 11.3.2019 - <https://www.noz.de/deutschland-welt/wirtschaft/artikel/setzen-bauern-bald-laser-statt-glyphosat-gegen-unkraeuter-ein-20545910>

LAND&FORST 42/2021, S. 20-21 - „Das Unkraut einfach lasern?“; digitale Ausgabe unter https://www.digitalmagazin.de/marken/landforst/hauptheft/2021-42/pflanzenbau/020_das-unkraut-einfach-lasern?utm_campaign=luf-digitalmagazin-teaser&utm_source=luf-webseite&utm_medium=artikel&utm_content=https%3A%2F%2Fwww.landundforst.de%2Flandwirtschaft%2Fpflanze%2FUnkraut-einfach-lasern-566298

LZH-Pressarbeit

Zur Veranschaulichung im Rahmen der LZH-Pressarbeit wurde eine Animation des grundlegenden Prinzips der Laser-Unkrautbehandlung im Projekt NUBELA erstellt.

<https://www.lzh.de/videos>

Für die Expo Weltausstellung 2020 in Dubai fungierte das LZH als Ideengeber für ein interaktives Spiel, das die laserbasierte Unkrautbekämpfung erklärt.

<https://www.lzh.de/pressemitteilung/2021/lzh-als-ideengeber-auf-expo2020-interaktives-spiel-erklaert-laserbasierte>

Tagungen und Messen

- *LASER World of Photonics 2019, 24.–27. Juni 2019 in München*
Die LASER World of Photonics ist Weltleitmesse und Kongress für Komponenten, Systeme und Anwendungen der Optischen Technologien. Das Laser Zentrum Hannover e.V. ist auf der Messe regelmäßig mit einem eigenen Stand vertreten. Um dem Publikum die Laserunkrautbehandlung näher zu bringen, wurde u.a. ein Exponat mit einem ersten Video zum Behandlungsverlauf präsentiert.
- *Agritechnica 2019, 10.-16. November 2019 in Hannover*
Die Agritechnica ist Weltleitmesse für Landtechnik. Die Laserunkrautbehandlung wurde mit mehreren Exponaten auf dem Niedersächsischen Gemeinschaftsstand vorgestellt. Zur Vorstellung des Themas wurden die Exponate ständig von mehreren LZH-Mitarbeitern betreut. Das Thema „alternative Methoden zur Unkrautkontrolle“ war insgesamt stark nachgefragt und die laserbasierte Unkrautbehandlung stieß beim Publikum auf große Resonanz.