

Christian Marx, Julio César Pastrana Pérez, Michael Hustedt, Stephan Barcikowski, Heinz Haferkamp und Thomas Rath

Untersuchungen zur Absorption und Applikation von Laserstrahlung zur Unkrautbekämpfung

Die thermische Unkrautbekämpfung mit Abflämm-, Heißwasser-/Heißdampf- und Heißschaumgeräten ist hinsichtlich eines punktuellen Einsatzes begrenzt. Dies ist insbesondere nachteilig für die Unkrautbekämpfung in Kulturbeständen, weil die thermische Schädigung hier räumlich wirkt. Daher ist ein alternatives Werkzeug erforderlich, z. B. die Lasertechnik. Bei der Laserapplikation können Laserparameter online auf die erkannte Unkrautsituation angepasst werden. Entsprechende Untersuchungen werden kooperativ am Fachgebiet Biosystem- und Gartenbau-technik der Leibniz Universität Hannover sowie am Laser Zentrum Hannover durchgeführt.

Schlüsselwörter

Schädigungsmodell, Laser-Unkrautbekämpfung

Keywords

Damage model, laser-based weed control

Abstract

Marx, Christian; Pastrana Pérez, Julio César; Hustedt, Michael; Barcikowski, Stephan; Haferkamp, Heinz and Rath, Thomas

Investigations on the absorption and the application of laser radiation for weed control

Landtechnik 67 (2012), no. 2, pp. 95–101, 13 figures, 12 references

Thermal weed control with flame-scarfing, hot water/superheated steam, and hot foam devices is limited regarding selective application. This is especially disadvantageous for weed control in crops, as the thermal damage has a spatial effect. Hence, an alternative tool is required; this might be the laser technology. During laser application, the laser parameters can be adjusted on-line to the recognized weed situation. Corresponding investigations are performed cooperatively at the Biosystems and Horticultural Engineering Section of the Leibniz University Hannover together with the Laser Zentrum Hannover.

■ Vor dem Hintergrund des Umweltschutzes werden zunehmend nicht chemische Verfahren in der Unkrautbekämpfung angewendet. Maßnahmen zur thermischen Unkrautbekämpfung spielen dabei aufgrund ihrer Effektivität eine entscheidende Rolle. Jedoch sind sie mit hohen Energiekosten verbunden [1, 2]. Die Effizienz der Methode steigt signifikant bei selektivem Einsatz, d.h. wenn die thermische Energie lokal begrenzt wirkt. Es sollten nur die Wachstumszentren (Meristeme) der Unkrautpflanzen behandelt werden, da diese im Idealfall dann absterben. Die hierfür notwendige hochaufgelöste Selektivität der Wärmebehandlung ist nur durch den gezielten Einsatz von fokussierter Energie zu erreichen, wie sie von Lasern bereitgestellt werden kann.

Eine Laserbestrahlung führt im Pflanzengewebe zu einer Absorption der Energie und meist zu einer Umwandlung in Wärme, durch die das Meristem oberhalb einer Schwellenergie zerstört wird. Der kritische Punkt für einen großtechnischen Einsatz der Lasertechnik zur Unkrautbekämpfung ist die Einkopplung des Lichtes an der richtigen Stelle des Unkrautes. Hierbei sind wichtig: die eingesetzten Laserwellenlängen, die Strahlungsintensitäten, die technisch realisierbaren Zielvorrichtungen sowie die Unkrautarten und ihre Wachstumsstadien [3–8]. Laborversuche zeigen, dass Keimlinge mit mindestens 35 J letal geschädigt werden können [8, 9]. Unter Praxisbedingungen muss der Laserstrahl zudem automatisch positioniert werden, um hohe Einkopplungseffizienzen in das Zielgewebe zu erreichen. Eine Patentanmeldung [10] aus dem Jahr 2003 brachte noch keine praktikable Umsetzung. In weiteren Untersuchungen traten Probleme bei der Zielerfassung auf [11]. Eine effiziente Einkopplung der Laserstrahlung ist die Grundvoraussetzung für eine erfolgreiche Unkrautbekämpfung mit

der Lasertechnik – das haben die bisherigen Versuche gezeigt. Dabei sind die Temperaturwirkungen der Laserstrahlung am Blatt oder an der Pflanze von zentraler Bedeutung. Diese Wirkungen werden in der Praxis zudem durch die realisierbare Treffergenauigkeit limitiert.

Die Ziele der vorliegenden Arbeit waren daher:

1. die Wärmeeinkopplung von Laserstrahlung in pflanzliches Gewebe für unterschiedliche Laser zu untersuchen und
2. ein Prototypsystem zur Laserapplikation (primär: Zielfindungssystem) zu entwickeln.

Material und Methoden

Laserwirkung

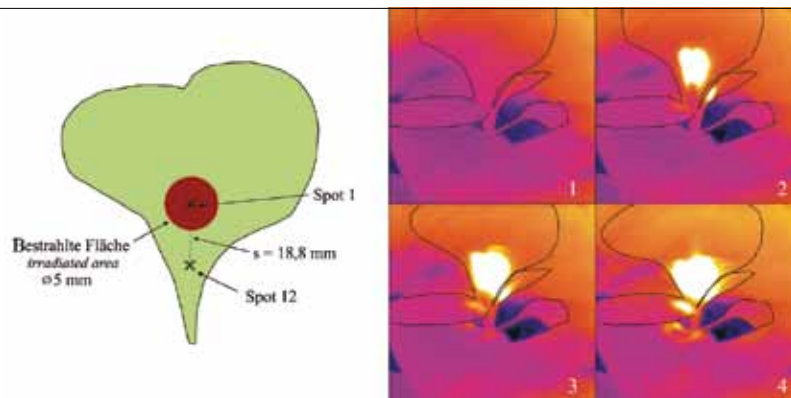
Zur Untersuchung der Strahlungseinkopplung in Unkrautgewebe wurden Versuche an *Amaranthus retroflexus* (dikotyl) durchgeführt. Dabei wurden unterschiedliche Laser und Laserparameter (s. u.) verwendet. Die im Zielspot auftretenden Temperaturerhöhungen durch Wärmeeinkopplung wurden mittels Thermografie (FLIR-Kamera) aufgezeichnet (**Abbildung 1**).

Zur Simulation verschiedener Treffergenauigkeiten wurden darüber hinaus Messungen versetzt zum Zielspot vorgenommen. In **Abbildung 1** (links) ist diese Situation mit „Spot 12“ gekennzeichnet.

Die Absorption von Laserstrahlung in pflanzlichem Gewebe ist stark abhängig von der eingesetzten Wellenlänge. **Abbildung 2** stellt das Absorptionsspektrum eines Blattes im frischen und im trockenen Zustand dar. Deutlich zu erkennen ist die weitgehende Übereinstimmung mit dem Absorptionsspektrum von H_2O , die auf den hohen Wasseranteil im Blatt zurückzuführen ist. Folglich sollten zur Unkrautbekämpfung nur Laser eingesetzt werden, bei denen ein hoher Absorptionsgrad im Pflanzengewebe erreicht wird. Die Untersuchung der Wärmeeinkopplung erfolgte unter Einsatz verschiedener Laserbetriebsarten:

1. Nicht bis schwach gepulster Laser: Die Laserenergie wird in quasi-cw Betrieb (Dauerstrich, cw = continuous wave) als Permanentleistung eines defokussierten Laserstrahls auf die Blattfläche appliziert.

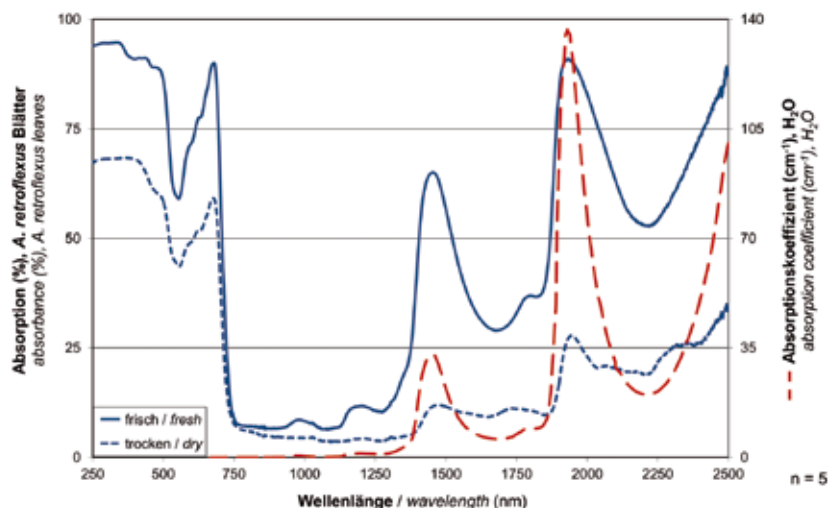
Abb. 1



Bestrahlungsversuche und thermografische Aufnahmen an Blättern von *A. retroflexus*; links: 1 Laser- plus 12 Messspots; rechts: während der Laserbestrahlung mit 11 W (1: vor dem Start, 2: nach 5 s, 3: nach 10 s, 4: nach 15 s) (Zeichnung, Fotos: Ch. Marx)

Fig. 1: Irradiation tests and thermal images of leaves (*A. retroflexus*); left: 1 laser and 12 measure spots; right: during stationary laser irradiation with 11 W (1: before start, 2: after 5 s, 3: after 10 s, 4: after 15 s) (Drawing, photos: Ch. Marx)

Abb. 2



Absorptionsspektren frischer und trockener *A. retroflexus* Blätter sowie dem Absorptionskoeffizienten von Wasser
Fig. 2: Absorption spectra of fresh and dried leaves (*A. retroflexus*) and the absorption coefficients of water

2. Stark gepulster Laser: Die Laserenergie wird in ultrakurzen Pulsen (ns-Bereich) eines Laserrohstrahls auf das Blatt appliziert.
3. Laserstrahl wird auf Pendelbahnen (Wobbeln) geführt: Die Laserenergie wird in quasi-cw Betrieb durch spiralförmiges Abfahren des gewünschten Spots mit einem fokussierten Laser appliziert.

Folgende Systeme kamen zum Einsatz:

zu 1) Diamond K-500 (Coherent Inc.), CO₂-Laser ($\lambda = 10\,600\text{ nm}$)

zu 1) LDF 600-250 (Laserline GmbH), Diodenlaser ($\lambda = 940\text{ nm}$)
zu 2) SpitLight DPSS 250 (InnoLas GmbH), Festkörperlaser ($\lambda = 532\text{ nm}$), 125 mJ pro Puls

zu 3) 48-5 (Synrad Inc.), CO₂-Laser ($= 10\,600\text{ nm}$)

Abbildung 3 gibt den Versuchsaufbau wieder. Die Steuerung erfolgte mithilfe eines USB-Schaltsystems (Labjack U12 und ME-UBRE) und einer Bediensoftware (ProfiLab Expert 4.0) (Schaltung siehe **Abbildung 4**). Alle Versuche wurden mit 5 Wiederholungen durchgeführt.

Die erzielten Gewebeschäden wurden rasterelektronenmikroskopisch erfasst (FEI Quanta 400FE) und visuell ausgewertet.

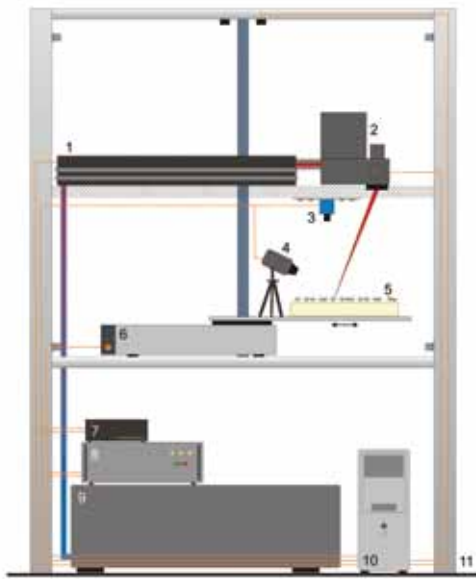
Entwicklung eines Prototyps zur Laserapplikation

Grundlage der Entwicklung eines Applikationsprototyps war der Versuchsstand aus **Abbildung 3**. Die Lasersteuerung erfolgte hierbei jedoch anstatt mit einem Galvanometer-Scanner mit 2 kombinierten Servomotoren (HSR-5990TG, Hitec Inc), die mit einem Positionierungslaser (Laserpointer SML650-01-D, Optlectra GmbH) im sichtbaren Wellenlängenbereich (650 nm) ausgerüstet waren. Die Pflanzendetektion wurde mit einem Stereokamerasystem (Microsoft LifeCam HD-3000, 800 × 448 Pixel), einer 3-D-Triangulation und Active-Shape-Modelling-Algorithmen [12] zur Zielpositionierung durchgeführt. Gesteuert wurde das Gesamtsystem über einen Servomotor-Controller (Mini Maestro 12, Polulu Corp., Maestro Control Center), der mit der Bildverarbeitung über vernetzte Netbooks (Asus EeePC 1015PN) agierte. Die Beleuchtung erfolgte mit 10 Hochleistungs-LEDs (Luxeon Rebel, Philips Lumileds).

Zur Untersuchung der Zielgenauigkeit des Systems wurden Attrappen im Maßstab 1:1 eingesetzt. Hierdurch konnten beliebige Meristemhöhen und Unkrautpositionierungen erzeugt werden. Zur Validierung des Applikationssystems wurden in kleine Töpfe ausgesäte Pflanzen verwendet.

Die Entwicklung und Validierung des Applikationsprototyps erfolgte im Labor und wurde anschließend auf ein Fahrsystem im Gewächshaus übertragen.

Abb. 3



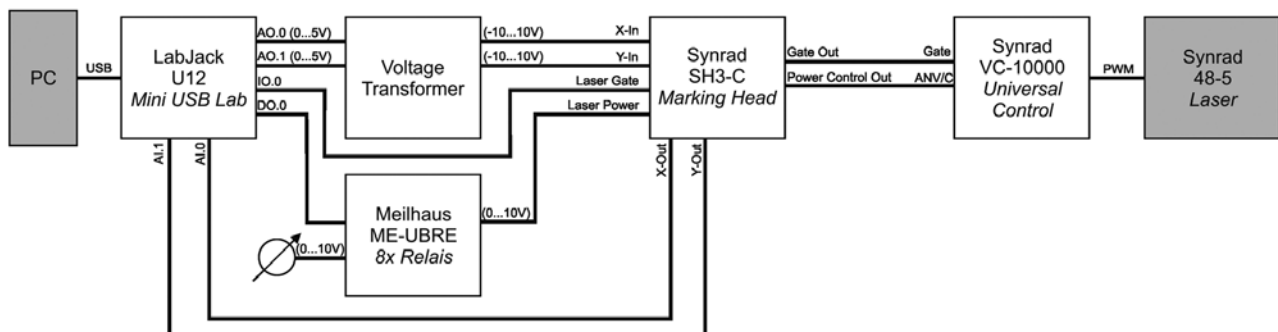
Versuchsstand (Zeichnung: Ch. Marx)

1: Lasersystem, 2: Galvanometer, 3: Kamerasystem mit Belichtung,
4: Thermo-Kamera, 5: Pflanzenmaterial, 6: Linearachse,
7-8: Netzgeräte, 9: Kühlwassersystem, 10: PC-Steuerung,
11: Laserschutzkabine

Fig. 3: Test station (Drawing: Ch. Marx)

1: Laser system, 2: Galvanometer, 3: Camera with exposure,
4: IR camera, 5: Plant material, 6: Linear axis, 7-8: Power supplies,
9: Cooling-water system, 10: PC-based control, 11: Laser protection cabin

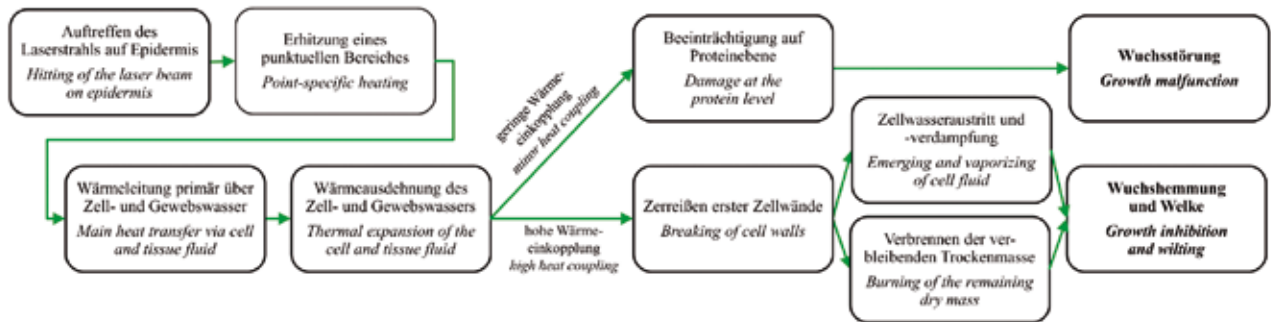
Abb. 4



Schaltskizze zur Steuerung der Galvanometer-Servomotoren (Zeichnung: Ch. Marx)

Fig. 4: Schematic diagram for control of galvanometer-servo motors (Drawing: Ch. Marx)

Abb. 5



Wirkungskette einer Laserbestrahlung
Fig. 5: Causal chain of laser irradiation

Ergebnisse

Wärmeeinkopplung der Laserstrahlung

Als Folge der Bestrahlung mit den verwendeten Lasern entstanden in den Unkrautpflanzen Energieeinkopplungen, die in drei Wirkungskategorien eingeteilt werden konnten: unbeschädigt, letal und wachstumsgestört.

Abbildung 5 gibt die beteiligten thermodynamischen Prozesse modellhaft wieder

Es wird deutlich, dass eine optimale Laserbehandlung exakt die Wirkung der Wuchshemmung und Welke erreichen muss und nicht auf der Ebene der Wuchsstörung stehen bleiben darf. Genauso sind Energieeinkopplungen zu vermeiden, bei denen das Gewebe vollkommen zerstört wird und ein bedeutender Anteil der Laserenergie nur noch durchstrahlt. Ab einer gewissen Bestrahlungsdauer ist keine weitere Steigerung des Energieeintrages realisierbar, da Perforationen und Gewebeerstörungen vorliegen. Dieser Effekt tritt vermehrt mit steigender Treffer-

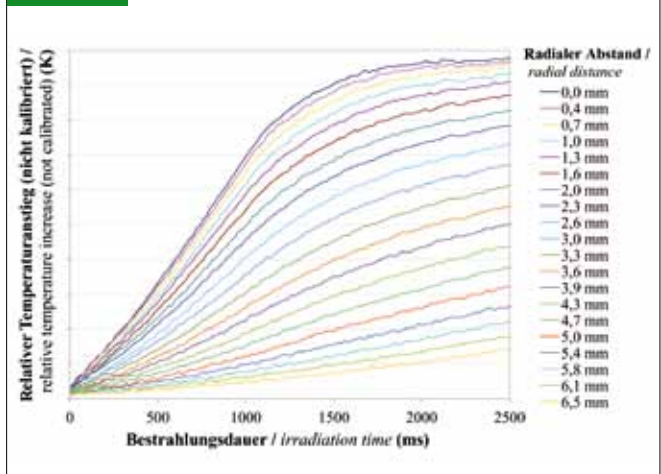
genauigkeit des Applikationssystems auf (siehe verschiedene Spotlinien in Abbildung 6).

Bei konstanter Bestrahlungsdauer ist die eingekoppelte Wärmemenge im Wesentlichen von der Laserenergie und von der Treffsicherheit des Applikationssystems abhängig (Abbildung 7).

Anhand der durchgeführten Messungen konnten folgende Richtwerte bezüglich der notwendigen Temperaturerhöhung durch Energieeinkopplung abgeleitet werden: Eine letale Energieeinkopplung lag vor, wenn die Temperaturerhöhung bei kleinen Pflanzen > 1,0 K/ms in 1 mm Radialabstand zur Zielspotmitte war. Bei großen Pflanzen (4-Blatt-Stadium) ergab sich der notwendige Richtwert zu 2,5 K/ms in 2 mm Radialabstand.

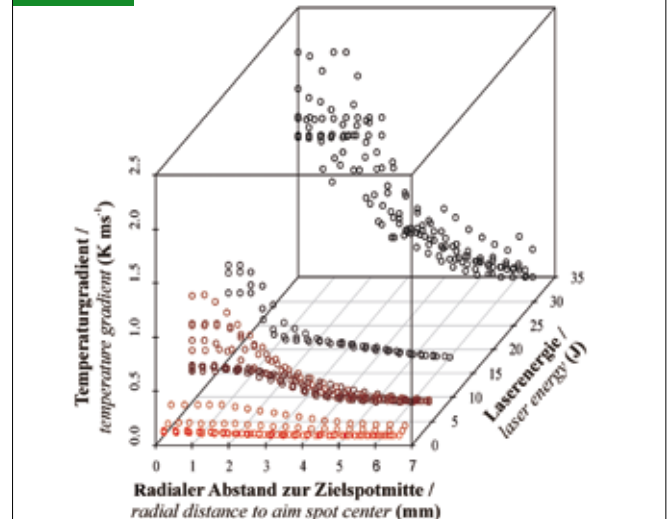
Beim Einsatz von pendelgeführter Laserstrahlung (Wobbeln) konnte durch das „Scannen“ der zu bestrahlenden Zielfläche und die effizientere Energieeinkopplung Energie gespart

Abb. 6



Auswertung der thermografischen Messungen im radialen Abstand zur Zielspotmitte bei statischer Bestrahlung (CO₂-Laser, λ = 10 600 nm, 3,5 W)
Fig. 6: Presentation of thermal measurements with radial distance to the aim spot center during constant irradiation (CO₂-laser, λ = 10 600 nm, 3.5 W)

Abb. 7



Einfluss der applizierten Laserenergie (Gauß-Strahl mit ø 6 mm) auf die Temperaturgradienten relativ zur Zielspotmitte
Fig. 7: Influence of applied laser energy (Gauß-beam with ø 6 mm) on temperature gradient relative to the aim spot center

werden. **Abbildung 8** verdeutlicht diesen Effekt anhand des in Bild 1 und Bild 2 vergleichend aufgezeigten Grades an Perforation. Keine Verbesserung der Einkopplungsergebnisse wurde mit nanogepulster Laserbestrahlung erzielt, die eher eine explosionsartige Wasserverdampfung und somit ein Zerreißen und Perforieren des Gewebes hervorruft (**Abbildung 8**, Bild 3). Bild 4 zeigt zudem den Einfluss der verwendeten Laserwellenlänge und des Strahlprofils. Da beim Diodenlaser abweichend von einem Gauß-Profil ein kammartiges Strahlprofil bei gleichzeitig verminderter Absorption wirkte, führten auch hohe Strahlenergien nur zu einer dezentralen Perforation.

Bei konstanter Laserspotgröße für eine bestimmte Wellenlänge ist die Anwendungsgüte der Laserunkrautbehandlung hauptsächlich von der Treffsicherheit des Applikationssystems abhängig. Für die Zielorte der Laserapplikationen wird deutlich: Bei monokotylen Unkräutern liegt das zu treffende Wuchszentrum geschützt zwischen den Keimblättern, während bei dikotylen Pflanzen das apikale Meristem leicht anvisiert werden kann. Daher ist die Laserbehandlung einkeimblättriger Un-

kräuter meist problematischer als die Behandlung zweikeimblättriger Arten.

Entwicklung eines Applikationsprototyps

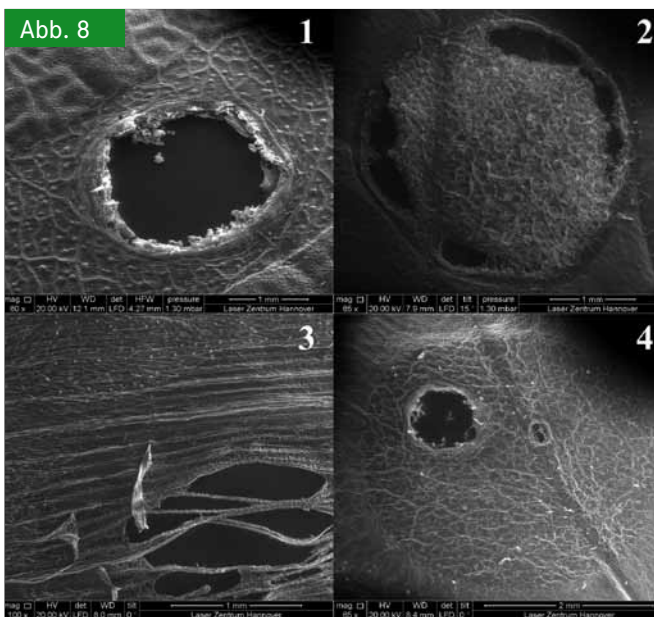
Die Laserstrahlen wurden über Spiegelsysteme in einem bestimmten Winkel auf die Zielpositionen gerichtet. Daher mussten unabhängig von der Unkrautart die 3-D-Koordinaten (also die Zielpositionen inkl. der Höhe) bekannt und anvisierbar sein.

Ziel der Entwicklung des Applikationssystems war daher eine 3-D-Steuerung des Lasers durch optische Systeme. Das System wurde auf der Basis der im Abschnitt Material und Methoden aufgeführten Komponenten entwickelt und innerhalb eines TCP/IP-basierten Netzwerkkonzeptes zusammengeführt (**Abbildung 9**).

Die Stereo-Kameras wurden mit der LED-Belichtung und den Servomotoren 70 cm über der Applikationsebene montiert. Die Drehachsen der Servomotoren schnitten sich im Mittelpunkt der Linse des verwendeten Laserpointers. Die Stereo-Kameras mussten seitlich versetzt montiert werden, um Platz für die Drehbewegungen der Servomotoren zu bieten.

Aufgrund realer Abweichungen gegenüber den Sollpositionen (bspw. unbekannte Kippwinkel, Temperaturabhängigkeiten) wurden die Kameras mit Musterbildern sphärisch entzerrt und kalibriert (OpenCV). Die Stereobilder wurden algorithmisch zusammengeführt, um daraus 3-D-Informationen für eine Höhenkorrektur gegenüber der Bodenoberfläche abzuleiten. Die Servomotoransteuerung wurde auf das Stereo-Kamerasystem kalibriert, indem ein auf einen Sollpunkt fixierter Laserpunkt von den Kameras detektiert und in Korrekturgleichungen überführt wurde (**Abbildung 10**, rechts). Zur Kalibrierung wurden viele Sollpositionen angesteuert und mit den jeweiligen Istpositionen verglichen. Daher konnte für das Testsystem eine Korrekturmatrix (Translation und Rotation) für den Bezug auf Globalkoordinaten erstellt werden.

Die jeweiligen 2-D-Bilder der linken Kamera wurden mit den ASM-Algorithmen analysiert und die Zielposition im 2-D-Raum berechnet. Durch Triangulation wurde gleichzeitig das Höhenprofilbild der Szenarien berechnet (**Abbildung 11**) und mit den Zielpositionen im 2-D-Raum zur Deckung gebracht. Ergebnis waren die Zielpositionen der Unkräuter im 3-D-Raum, die anschließend mit dem Laser abgefahren und auf Richtigkeit überprüft wurden.



REM-Aufnahmen laserbestrahlter Blätter (Fotos: Ch. Marx)

1: Diamond K-500, CO₂-Laser ($\lambda = 10\,600\text{ nm}$), Energie: 8,9 J, Spotdurchmesser: $\varnothing 3\text{ mm}$

2: 48-5 (Synrad Inc.), CO₂-Laser ($\lambda = 10\,600\text{ }\mu\text{m}$), Energie: 7,1 J, Gesamtpottdurchmesser: $\varnothing 3\text{ mm}$ bei $\varnothing 200\text{ }\mu\text{m}$ fokussiertem Laserstrahl

3: SpitLight DPSS 250 (InnoLas GmbH), Festkörperlaser ($\lambda = 532\text{ nm}$), Energie: 1 ns Puls mit 125 mJ, Spotdurchmesser: $\varnothing 6\text{ mm}$

4: LDF 600-250 (Laserline GmbH), Diodenlaser ($\lambda = 940\text{ nm}$), Energie: 70,8 J, Spotdurchmesser: $\varnothing 6\text{ mm}$

Fig. 8: REM images of laser-irradiated leaves (Photos: Ch. Marx)

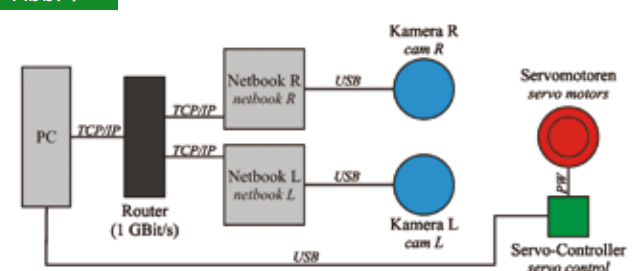
1: Diamond K-500, CO₂-laser ($\lambda = 10\,600\text{ nm}$), energy: 8.9 J, spot diameter: $\varnothing 3\text{ mm}$

2: 48-5 (Synrad Inc.), CO₂-laser ($\lambda = 10\,600\text{ }\mu\text{m}$), energy: 7.1 J, entire spot diameter: $\varnothing 3\text{ mm}$ with $\varnothing 200\text{ }\mu\text{m}$ focused beam

3: SpitLight DPSS 250 (InnoLas GmbH), solid-state laser ($\lambda = 532\text{ nm}$), energy: 1 ns pulse with 125 mJ, spot diameter: $\varnothing 6\text{ mm}$

4: LDF 600-250 (Laserline GmbH), diode laser ($\lambda = 940\text{ nm}$), energy: 70.8 J, spot diameter: $\varnothing 6\text{ mm}$

Abb. 9



Vernetzung der Systemkomponenten

Fig. 9: Linking of the system components

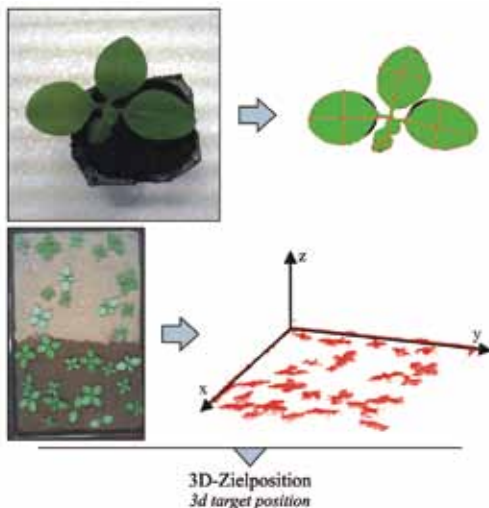
Abb. 10



Kalibrierung der Stereo-Kameras und der Laserpositionierung
(Fotos: Ch. Marx)

Fig. 10: Calibration of the stereo vision and laser positioning
(Photos: Ch. Marx)

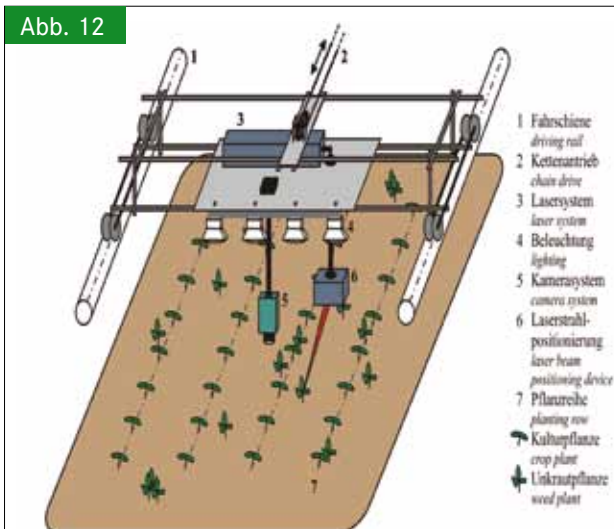
Abb. 11



Anwendung von Active-Shape-Modelling (oben) und Stereo-Vision-Mapping (unten) zur Bestimmung der Zielposition
(Fotos: Ch. Marx)

Fig. 11: Usage of active-shape-modelling (top) and stereo-vision-mapping (bottom) for determination of the target position
(Photos: Ch. Marx)

Abb. 12



Skizze des Schienenversuchsstands

Fig. 12: Schematic diagram of the rail test station

Durch konstruktive Verbesserung der Achsenführungen, Integration von Anfahr- und Stoppalgorithmen sowie sphärischen und linearen Korrekturen konnte mit dem Laborsystem eine Laserapplikationsgenauigkeit von $< \pm 1$ mm realisiert werden. Dabei wurden verschiedene Bahnrouuten des Lasers mit im Raum verteilten Applikationspositionen untersucht.

Das Laborsystem wurde auf einen bestehenden Schienenversuchsstand im Gewächshaus übertragen. Hierbei erfolgte die Bewegung des Lasersystems mit einem Schienenwagen auf Führungsrollen, der mittels Kettentrieb von einem Asynchronmotor bewegt wurde (**Abbildung 12**).

Zur Sicherung des Lasers und zur reproduzierbaren Bewertung durch die Bilderkennungssoftware wurde das System eingehaust. Die Untersuchungen zur Evaluierung des Prototypsystems im Gewächshaus wurden im Stop-and-Go-Modus durchgeführt. Dabei erfolgte die Ansteuerung der Applikationspositionen mittels Frequenzumrichter, LabJack U12 und ProfiLab Expert 4.0.

Ähnlich wie beim Laborsystem wurde das System zunächst durch Autokalibrierung in einen möglichst fehlergeringen Zustand gebracht.

Abbildung 13 stellt die sequenzielle Evaluierung mit 20 frei platzierten Unkrautpflanzen dar, wobei die 20 Einzelergebnisbilder überlagert wurden (links). Bislang konnte mit der automatisierten Erkennung und Strahlpositionierung eine Treffgenauigkeit mit einer mittleren Positionsabweichung von $\pm 3,4$ mm erzielt werden. Die räumliche Schwankung ist im rechten Teil der **Abbildung 13** dargestellt. Es wird ersichtlich, dass die Treffgenauigkeit an den Rändern geringer war. Bei Begrenzung der Applikation auf den Bereich der Bildmitte sinkt die mittlere Abweichung auf ca. 2 mm.

Schlussfolgerungen

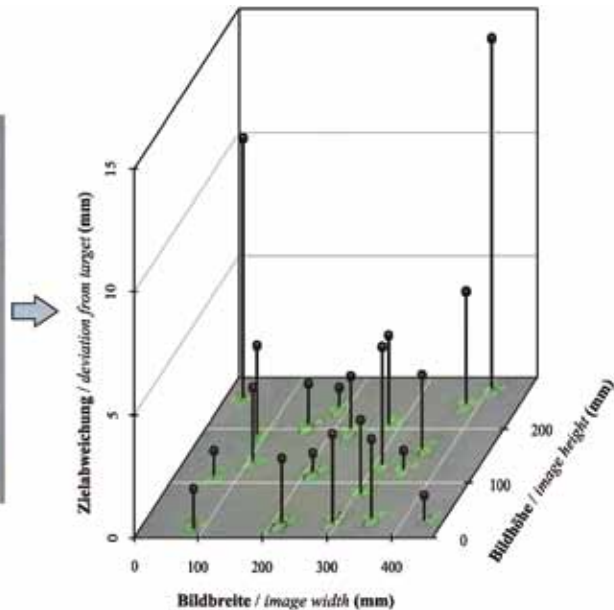
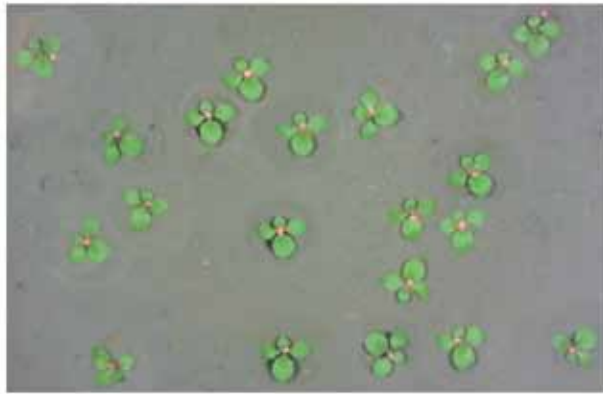
Die notwendige Applikationsenergie für eine letale Schädigung ist hauptsächlich abhängig von der Effizienz der Energieeinkopplung in das Meristem und von der erzielbaren Treffgenauigkeit der Laserapplikation.

Hohe Wirkungsgrade der Energieeinkopplung werden durch folgende Faktoren erzielt:

- Wellenlänge im mittleren Infrarotbereich
- niedrige Leistung und lange Bestrahlungsdauer
- Einsatz von schwach gepulsten oder pendelgeführten Lasern (wobbeln)
- Laserspot nicht größer als das Zielgewebe (Meristem)
- möglichst große Überlappung des Zielspots und des im Betrieb realisierbaren Laserspots

Insbesondere die Punkte 2 und 4 stehen meist im Gegensatz zu den heutigen Anforderungen einer landwirtschaftlichen Unkrautbekämpfung (hohe Flächenleistung und daraus resultierend dynamische Bedingungen beim Betrieb des Systems). Dabei ist zu beachten, dass die Bestrahlungsdauer ein systemimmanenter Faktor ist, der nicht durch schnellere Software/Hardware kompensiert werden kann. Die notwendige Bestrahlungsdauer für eine effiziente Energieeinkopplung (z. B. 500 ms

Abb. 13



Systemtest an 20 Positionierungen einzelner Unkrautpflanzen (Bildverarbeitung und Laserstrahlpositionierung) (Fotos: T. Rath)
 Fig. 13: Test of the system with 20 positioned weed plants (image processing and positioning of the laser beam) (Photos: T. Rath)

pro Pflanze) kann bei hoher Unkrautdichte zu einem Problem werden. Allerdings können stark verunkrautete Flächen ohne Nutzpflanzen effizienter durch mechanische oder thermische Verfahren behandelt werden. Auch ein Zusammenspiel verschiedener Methoden ist denkbar.

Belastbare Untersuchungen bezüglich möglicher Applikationsgeschwindigkeiten und maximaler Unkrautdichten werden momentan auf dem beschriebenen Versuchsstand durchgeführt. Simulationsergebnisse deuten darauf hin, dass schnell fahrende Landmaschinen bei größeren Unkrautdichten höhere Laserleistungen brauchen, welche dann nicht mehr adäquat in das Pflanzengewebe eingekoppelt werden können. Abhilfe können langsam fahrende Feldmaschinen oder autonome Feldroboter im Stop-and-Go-Betrieb schaffen.

Literatur

- [1] Astatkie, T.; Rifai M.N.; Havard P.; Adsett J.; Lacko-Bartosova, M.; Otepka, P. (2007): Effectiveness of hot water, infrared and open flame thermal units for controlling weeds. *Biol. Agric. Hortic.* 25(1), pp. 1-12
- [2] Raffaelli, M.; Fontanelli, M.; Frascioni, C.; Sorelli, F.; Ginanni, M.; Peruzzi, A. (2011): Physical weed control in processing tomatoes in Central Italy. *Renewable agriculture and food systems* 26(2), pp. 95-103
- [3] Bayramian, A.; Fay, P.K.; Dyer, W.E. (1992): Weed control using carbon dioxide lasers. *Proceedings of the Western Society of Weed Science*, vol. 45, 10-12 March 1992, Salt Lake City, USA, pp. 55-56
- [4] Hoki, M. (2000): Fundamental study of laser application for weed and pest control effect of laser emissions on rice plant leaves. *Journal of the Japanese Society of Agricultural Machinery* 62(5), pp. 98-103
- [5] Heisel, T.; Schou, J.; Christensen, S.; Andreasen, C. (2001): Cutting weeds with a CO₂ laser. *Weed Res.* 41(1), pp. 19-29
- [6] Heisel, T.; Schou, J.; Andreasen, C.; Christensen, S. (2002): Using laser to measure stem thickness and cut weed stems. *Weed Res.* 42(3), pp. 242-248
- [7] Langner, H.R.; Ehlert, D.; Heisig, M.; Kirste, A. (2006): Thermische Wirkung von Laserstrahlung auf Pflanzen. *Landtechnik* 61(5), S. 252-253
- [8] Mathiassen, S.K.; Bak, T.; Christensen, S.; Kudsk, P. (2006): The effect of Laser Treatment as a Weed Control Method. *Biosystems Engineering* 95(4), pp. 497-505

- [9] Wöltjen, C.; Haferkamp, H.; Rath, T.; Herzog, D. (2008): Plant growth depression by selective irradiation of the meristem with CO₂ and diode lasers. *Biosystems Engineering* 101(3), pp. 316-324
- [10] Christensen, S.; Heisel, T.; Schou, J. (2003): Severing or damaging apparatus for unwanted plants comprises an optical recognition system that differentiates between different types of plants with a light generating source to expose the plant to electromagnetic radiation. AU 9948982-A; WO 200003589-A1; A01M 021/00.
- [11] Nadimi, E.S.; Andersson, K.J.; Jorgensen, R.N.; Maagaard, J.; Mathiassen, S.; Christensen, S. (2009): Designing, modelling and controlling a novel autonomous laser weeding system. 7th World Congress on Computers in Agriculture and Natural Resources, 22-24 June 2009, Reno, USA, pp. 299-303
- [12] Pastrana-Peréz, J.C.; Rath, T. (2008): Vision based plant recognition under overlapping situations. *Bornimer Agrartechnische Berichte* 62, S. 16-23

Autoren

Prof. Dr. Thomas Rath ist Leiter des Fachgebiets Biosystem- und Gartenbautechnik im Institut für Biologische Produktionssysteme der Leibniz Universität Hannover, Herrenhäuser Str. 2, 30419 Hannover. Dort arbeitet auch **M.Sc. Julio César Pastrana Pérez** als wissenschaftlicher Mitarbeiter im Bereich Bildverarbeitung. **Prof. Dr.-Ing. Stephan Barcikowski** hat den Lehrstuhl Technische Chemie I der Universität Duisburg-Essen inne. **Prof. em. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. mult. Dr. med. h.c. Heinz Haferkamp** hat das Laser Zentrum Hannover e.V., Hollerithallee 8, 30419 Hannover mitgegründet, an dem **Dr. Michael Hustedt** Leiter der Gruppe Sicherheitstechnik ist. **Dipl.-Ing. B.Sc. Christian Marx** ist wissenschaftlicher Mitarbeiter an beiden hannöverschen Institutionen. E-Mail: marx@bgt.uni-hannover.de, c.marx@lzh.de

Danksagung

Die dargestellten Arbeiten wurden im Rahmen des Forschungsvorhabens „Untersuchungen zur Laserlichtwirkung auf der Basis von Bildanalysen auf juvenile Pflanzen zur Unkrautregulierung“ durchgeführt, welches von der Deutschen Forschungsgemeinschaft gefördert wurde.