

## Selektive Unkrautbekämpfung mittels Lasertechnik

*Selective weed control using laser techniques*

Christian Marx<sup>1,2\*</sup>, Julio Pastrana-Peréz<sup>1</sup>, Michael Hustedt<sup>2</sup>, Stephan Barcikowski<sup>3</sup>, Heinz Haferkamp<sup>2</sup> & Thomas Rath<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Leibniz Universität Hannover, Institut für Biologische Produktionssysteme, Fachgebiet Biosystem und Gartenbautechnik, Herrenhäuser Straße 2, D-30419 Hannover

<sup>2</sup>Laser Zentrum Hannover e.V., Hollerithallee 8, D-30419 Hannover

<sup>3</sup>Universität Duisburg-Essen, Lehrstuhl für Technische Chemie I, Universitätsstraße 7, D-45141 Essen

\*Korrespondierender Autor, marx@bgt.uni-hannover.de/c.marx@lzh.de

DOI: 10.5073/jka.2012.434.026

### Zusammenfassung

In diesem Beitrag werden technische und wachstumsrelevante Aspekte des Einsatzes von Lasertechnik zur Unkrautbekämpfung vorgestellt. In der Erforschung thermischer Unkrautbekämpfung mittels Laser stand zunächst die Wechselwirkung zwischen Laserstrahl und Unkrautpflanze im Vordergrund. Nach Auswahl eines CO<sub>2</sub>-Lasers auf Basis erster Ergebnisse wurde für weitere Studien unter Berücksichtigung der Faktoren Laserenergie, Laserspotfläche, Abdeckung des Meristems, Unkrautart und Unkrautwuchsgröße die letale Schädigung modelliert. Dies wurde für die untersuchte Unkrautpflanze *Amaranthus retroflexus* dargestellt. Das Modell diente der Festlegung der online zu applizierenden Laserenergie. Darüber hinaus wurde die für eine wirksame Schädigung erforderliche Laserstrahlpositionierung untersucht sowie ein Testsystem entworfen. Mithilfe aktueller Bildverarbeitungsalgorithmen zur Unkrauterkenntnis und zur Bestimmung der Zielobjekte wurde eine Laser-Servomotor-Ansteuerung entwickelt. Das Projekt, in dessen Rahmen wesentliche Teile dieses Beitrages durchgeführt wurden, wird unter dem Titel „Untersuchungen zur Laserlichtwirkung auf der Basis von Bildanalysen auf juvenile Pflanzen zur Unkrautregulierung“ von der Deutschen Forschungsgemeinschaft gefördert.

**Stichwörter:** Laser-Applikation, Schädigungsmodell, Unkrautbekämpfung, Zielfindung

### Summary

This contribution discusses technical and growth relevant aspects of using laser techniques for weed control. The research on thermal weed control via laser first focused on the interaction of laser beams and weed plants. Due to preliminary studies, a CO<sub>2</sub>-laser was selected for further studies with regard to the process factors laser energy, laser spot area, coverage of the weeds meristem, weed species (*Amaranthus retroflexus*), and weed growth stage. Thereby, the laser damage was modeled in order to control the necessary laser output power online. Furthermore, the beam positioning leading to an effective damaging of the weeds was investigated and a test device was designed. With the aid of contemporary image processing algorithms for weed recognition and meristem determination, a laser and servo-motor control was developed. Most of the studies presented in this paper were part of the project "Investigations on laser light affected weed control of juvenile plants with the aid of image processing" funded by the Deutsche Forschungsgemeinschaft.

**Keywords:** Damage model, laser application, targeting, weed control

### 1. Einleitung

Alternative Verfahren der Unkrautbekämpfung im Feldanbau sind nach wie vor von Interesse. Mechanische Techniken sind in der Pflanzreihe jedoch meist nicht praktikabel. Konventionell thermisch-wirkende Abflamm-Systeme sind mit relativ hohen Energiekosten verbunden, auch wenn sie effektiv eingesetzt werden können (BERTRAM, 1996; ASTATKIE et al., 2007; RAFFAELLI et al., 2011). Dabei kann die Effizienz der Applikation grundlegend durch eine Erhöhung der Selektivität gesteigert werden. Dies gelingt jedoch nur, wenn die thermische Energie lokal wirkt. Als mögliches Werkzeug steht dafür die Lasertechnik zur Verfügung. Dabei sind Kenntnisse über die schädigende Wirkung von Laserstrahlung auf Pflanzengewebe erforderlich. Es ist bekannt, dass MIR-Strahlung (z.B. CO<sub>2</sub>-Laser-Strahlung) direkt an der Oberfläche absorbiert wird und nach Überschreiten bestimmter Strahlungsenergien oberflächliche Verbrennungen hervorruft. NIR-Strahlung (z.B. von Nd:YAG- oder Diodenlasern) dringt aufgrund geringerer Absorption in tiefere Gewebeschichten ein und ruft dort Schäden hervor. Laserstrahlung kann somit das thermische Gleichgewicht einer Pflanze beeinflussen.

Ab einer bestimmten Intensität wird das Gewebe durch thermodynamische Wärmetransport-Mechanismen partiell zerstört. COUCH und GANGSTAD untersuchten die Wechselwirkungen von Laserstrahlung und Blattgewebe bereits im Jahr 1974. BAYRAMIAN et al. (1992) konnten trotz erheblicher Wachstumsreduktion von Unkräutern nach CO<sub>2</sub>-Laserbestrahlung keine vollständige Bekämpfung realisieren. Die Ergebnisse wurden auch unter Feldbedingungen eruiert (BAYRAMIAN et al., 1993). HOKI (2000) bestrahlte junge Reispflanzen mit Laserstrahlung unterschiedlicher Wellenlängen (532 nm und 1064 nm). Er ermittelte Dosis-Wirkungs-Beziehungen, die jedoch weder einheitlich noch konsistent waren. Daraufhin führten HEISEL et al. (2001, 2002) Experimente durch. Sie bestrahlten die Sprosse von drei Pflanzenarten und ermittelten den Einfluss der Laserenergie und der gewählten Schneidposition. Mit diesen Ergebnissen patentierten CHRISTENSEN et al. (2003) ein System zur Differenzierung und gezielten Laserbestrahlung von Pflanzensprossen zur Hemmung des Unkrautwachstums. Die mit der horizontalen Erkennung und Laserapplikation verbundenen Probleme behinderten jedoch eine praktikable Umsetzung. LANGNER et al. (2006) verwendeten einen CO<sub>2</sub>- und einen Nd:YAG-Laser. Aufgrund einer schlechten Zielgenauigkeit und des fortgeschrittenen Alters der Unkrautpflanzen ermittelten sie eine ungünstige Energiebilanz für eine wirksame Behandlung. MATHIASSEN et al. (2006) führten Untersuchungen mit einem handgeführten Lasersystem durch. Sie bestrahlten die Meristeme von drei dikotylen Unkrautarten (*Brassica napus*, *Stellaria media*, *Tripleurospermum inodorum*) und stellten den Einfluss der Parameter Strahldurchmesser ( $\varnothing$  0,9 bis  $\varnothing$  2,4 mm), Wellenlänge (532 und 810 nm) und Energiedichte (0,6 bis zu 49,7 J/mm<sup>2</sup>) in Dosis-Wirkungs-Beziehungen dar. MATHIASSEN et al. (2006) kamen zu dem Schluss, dass eine Optimierung der Zielgenauigkeit, des Strahldurchmessers und der applizierten Energiedichte die Laser-Anwendung verbessern kann. WÖLTJEN et al. (2008a, 2008b) untersuchten die schädigende Laserwirkung bei weiterhin manueller Positionierung bei einem Strahldurchmesser von  $\varnothing$  6 mm, zwei Wellenlängen (940 und 10600 nm) und Energiedichten bis 10 J/mm<sup>2</sup> an zwei Pflanzenarten (monokotyle Art: *Echinochloa crus-galli*, dikotyle Art: *Nicotiana tabacum*) in drei Wuchsstadien (bis zum 4-Blatt-Stadium). Die notwendige Laserenergie für eine letale Schädigung war demnach abhängig von der Wuchsgröße und der Pflanzenart. Junge Keimlinge konnten mit mindestens 35 J bekämpft werden. NADIMI et al. (2009) untersuchten den Einfluss praxisnaher Bedingungen auf eine Laserapplikation. Auf Förderbändern wurden die Pflanzen unter Stereo-Kameras zur Zielerfassung hindurch bewegt. Ein Laserstrahl sollte auf die empfindlichen Meristeme mittels eines Galvanometer-Spiegelsystems gelenkt werden. Obwohl erste Tests erfolgreich waren, traten Probleme bei der exakten Erfassung der Meristeme und der Positionierung des Laserstrahles auf.

## 2. Zielsetzung

Die Unkrautbekämpfung mittels Lasertechnik ist teilweise erforscht. Die bisherigen Untersuchungen zeigten, dass eine erfolgreiche Laser-Applikation sowohl von pflanzenbaulichen als auch von technischen Parametern abhängt.

Ziel ist es daher,

1. die Wechselwirkung zwischen Laserstrahlung und Unkrautpflanze in einem Schädigungsmodell zu beschreiben und
2. ein Testsystem zur Validierung der Laserapplikation bei beliebigen Unkrautsituationen zu entwickeln und zu validieren.

## 3. Material und Methoden




### 3.1 Entwicklung des Schädigungsmodells

Die Ähnlichkeit zwischen Unkraut- und Kulturpflanze im frühen Wuchsstadium bestimmt die Bedeutung von Unkräutern in landwirtschaftlichen Kulturen. Daher wurde eine häufig vorkommende Unkrautart ausgewählt, um die dikotylen Unkräuter im Intensivanbau zu vertreten. Das Unkraut wurde aus Samen (Herbiseed) mit Potgrond P (Klaasman-Deilmann GmbH) in Töpfen TEKU JP 3040/104 H (Pöppelmann GmbH & Co. KG) angebaut. Das Substratvolumen (20 ml) bot ausreichenden Wurzelraum und ausreichende Nährstoffversorgung für die untersuchten Wuchs-

stadien, was daraus gefolgert wurde, dass sich keine Unterschiede zu Pflanzen im Saatbeet zeigten. Die Unkrautsamen keimten jedoch heterogen, so dass sie in homogene Gruppen (Tab. 1) sortiert werden mussten. Die Pflanzen wurden im Gewächshaus kultiviert. In der kühlen und lichtschwachen Jahreszeit wurde Assimilationsbelichtung angewandt (3 SON-T Lampen à 400 W). An sonnigen, warmen Tagen wurden die Temperatursollwerte im Pflanzenbestand auch unter einem Schattiernetz überschritten. Diese saisonalen Unterschiede wurden durch die Frischmassebestimmung unbehandelter Pflanzen am Tag der Bestrahlung sowie am Tag der Auswertung (14 Tage später) berücksichtigt. Auf diese Weise konnten die Effekte durch die Laserbestrahlung immer auf unbehandelte Pflanzen unter gleichen Wachstumsbedingungen bezogen werden. Um phytopathologische Schäden durch bodenbürtige Pilzkrankheiten zu vermeiden, wurde jeweils 0,25 %iges Previcur N (Bayer CropScience AG) angewendet. Trauermücken und andere Fluginsekten wurden mit Gelbtafeln (Aerixon Insect Control GmbH) erfolgreich bekämpft.

**Tab. 1** Kenngrößen der Versuchspflanzen.

**Tab. 1** *Features of the test plants.*

Unkrautart	<i>Amaranthus retroflexus</i> (AMARE)		
	10	12	14
Wuchsstadium (BBCH, nach MEIER (2001))	10	12	14
Bild (einheitlicher Maßstab)			
Frischgewicht (mg)	8 ± 3	45 ± 12	170 ± 54
Anteil Trockenmasse (%)	9,0 ± 2,7	10,0 ± 2,4	11,9 ± 2,8
Wuchshöhe (mm), ca.	30	40	60

Auf Grundlage von Voruntersuchungen bzgl. der wellenlängenabhängigen, letalen Laserenergie (vgl. WÖLTJEN et al., 2008a) wurde ein CO<sub>2</sub>-Laser DIAMOND K-500 (Coherent Inc.) gewählt. Die Laserleistung wurde mittels Pulsweitenmodulation bei einer festen Pulsperiode von 2000 µs und Pulsbreiten zwischen 5 und 320 µs variiert (siehe Laser-Fluenz in Tab. 2). Verschmutzungen der Laserlinse wurden mittels Stickstoff-Spülgas vermieden. Die rechteckige Form der Pflanztöpfe wurde für eine zufällige Ausrichtung der Pflanzen und ihrer Blattstellung relativ zum Laser genutzt. Mithilfe eines Pilotlasers (HeNe-Laser) wurde jedes Unkraut manuell auf der Verfahrachse (CNC gesteuert) positioniert. Mit der Verfahrachse wurden verschiedene Laserspotpositionen realisiert, indem das Unkraut je nach Spotgröße so verschoben wurde, dass die prozentualen Deckungsflächen konstant blieben (siehe Laserspotposition Tab. 2). Die verschiedenen Laserspotdurchmesser wurden über den Abstand zwischen Pflanzenmeristem und Laserlinse eingestellt (defokussierter Laserstrahl; siehe Laserspotgröße in Tab. 2). Um stabile und reproduzierbare Resultate zur erreichen, wurde eine relativ lange Bestrahlungsdauer von 500 ms gewählt. Es wurden Unkrautpflanzen in unterschiedlichen Wuchsstadien behandelt (Tab. 2). Für jeden Versuchsparameter in Tabelle 2 wurden 10 Wiederholungen durchgeführt.

**Tab. 2** Versuchsparameter.

**Tab. 2** *Experimental parameter.*

Wuchsstadium (BBCH-Code)	Laser-Fluenz	Laserspotgröße (Laserspotfläche)	Laserspotposition
w1 Keimling (10)	d1 frühe Kontrolle	s1 ø 3,0 mm (7 mm <sup>2</sup> )	p1 mittig
w2 2-Blatt Stadium (12)	d2 späte Kontrolle	s2 ø 4,2 mm (14 mm <sup>2</sup> )	p2 49 % Deckung zu p1
w3 4-Blatt Stadium (14)	d3 0,08 J mm <sup>-2</sup>	s3 ø 6,0 mm (28 mm <sup>2</sup> )	p3 8 % Deckung zu p1
	d4 0,31 J mm <sup>-2</sup>		
	d5 0,63 J mm <sup>-2</sup>		
	d6 1,25 J mm <sup>-2</sup>		
	d7 2,50 J mm <sup>-2</sup>		
	d8 5,00 J mm <sup>-2</sup>		

Eine effektive Bekämpfung ist nur bei einer letalen Schädigung der Unkrautpflanzen gegeben. Daher wurden die gemessenen Frischgewichte ins Verhältnis zu den unbehandelten Kontrollen gesetzt. Die Bestrahlung wurde als letal (binär 1) definiert, wenn dieses Verhältnis den Wert 0,1 nicht überschritt, andernfalls galt die entsprechende Bestrahlung als nicht-letal (binär 0). Mit einer Logit-Funktion und einer angenommenen Quasi-Binomial-Verteilung (MCCULLAGH und NELDER, 1989) wurde die dichotome Schädigung auf logarithmischer Skala der Erfolgswahrscheinlichkeit  $p_{\text{Erfolg}}$  beschrieben (Gl. 1), damit ergibt sich die Zielgröße L.

$$\ln \frac{p_{\text{Erfolg}}}{1-p_{\text{Erfolg}}} = L \quad (\text{Gl. 1})$$

Nach  $p_{\text{Erfolg}}$  aufgelöst ergeben sich die Erfolgswahrscheinlichkeiten (Gl. 2).

$$p_{\text{Erfolg}}(L) = \frac{1}{2} * (1 + \tanh \frac{L}{2}) \quad (\text{Gl. 2})$$

Nach statistischer Modellselektion mit der Funktion *variance inflation factor* in der Software R (2011) konnte folgende Modellgleichung aufgestellt werden (Gl. 3).

$$L = a_i + b_{i,j} * \text{Laserenergie (J)} + c * \text{Laserspotposition (\%)} \quad (\text{Gl. 3})$$

mit  $i = \{w1, w2, w3\}$  und  $j = \{s1, s2, s3\}$  für die Abhängigkeiten von der Wuchsgröße und der Laser-spotfläche.

### 3.2 Entwicklung eines Laserapplikations-Testsystems

Bei der Entwicklung des Testsystems wurde zunächst ein leistungsschwacher und somit ungefährlicher Laserpointer verwendet, um die Anforderungen an notwendige Lasersicherheitsmaßnahmen gering zu halten. Da der Laserstrahl in einem zukünftigen Applikationssystem über zwei servomotorisch verstellbare Spiegel (Galvanometer-Scanner) positioniert werden soll, wurde eine vergleichbare 2-Achs-Konstruktion entworfen. Dabei wurden zwei Digital-Servomotoren (HSR-5990TG, Hitec Inc.) verwendet, die über einen Servo-Controller (Mini Maestro 12, Polulu Corp.) mittels USB-Schnittstelle softwaregesteuert wurden (*Maestro Control Center plus* Treiber in der Linux-Version). Die Ansteuerung zur Ausrichtung des Lasers entsprach dabei der Strahlführung eines Scanners. Die Erfassung der mittels LEDs beleuchteten Unkrautsituation erfolgte mit zwei USB-Kameras (Microsoft LifeCam HD-3000), deren Bilder in einer Auflösung von 800 x 448 Pixeln über zwei vernetzte Netbooks (Asus EeePC 1015PN) bereitgestellt wurden. Ein weiterer Rechner diente der Datenverarbeitung hinsichtlich der Stereo-Kamera-Anordnung. Zur Erkennung der Unkrautpflanzen und zur Bestimmung der Zielposition wurden bestehende Algorithmen verwendet, die selbst bei teilweisen Überlappungen der Pflanzenblätter funktionieren (PASTRANA und RATH, 2008). Diese auf *Active-Shape-Modeling* basierenden Algorithmen wurden auf *A. retroflexus* ähnliche Modellpflanzen aus Polymer (PMMA) angepasst. Die Modellpflanzen wurden verwendet, um leicht veränderbare, „pflegeleichte“ und standardisierte Unkrautsituationen bereitzustellen.

## 4. Ergebnisse und Diskussion

### 4.1 Letale Laserbestrahlungen

Die Bestrahlung der Unkrautpflanzen mit einem CO<sub>2</sub>-Laser führte zu signifikanten Wuchshemmungen. Bei den Wuchsgrößen w1 und w2 wurden bei Applikation der Maximalenergie alle Pflanzen letal geschädigt. Bei w3 gelang dies nur zu gut 50 %. Bei w1 und w2 führte die versetzt-positionierte Laserapplikation im Mittel zu einer Reduktion der letal geschädigten Pflanzen um 22 % bei p2 bzw. um 57 % bei p3 im Vergleich zu p1. Die zugrundeliegende Dosis-Wirkungs-Abhängigkeit korrelierte somit mit lasertechnischen und pflanzenbaulichen Einflüssen:

- Hohe Fluenzen führten vermehrt zu letalen Schädigungen. Da bestrahlte Unkrautpflanzen auch bei niedrigen Energiemengen letal reagierten, war bei intensiver Strahlung die Kombination von Schäden am Meristem sowie auch im Wurzelraum effektiv.

- Zentrale Treffer des Meristems begünstigten letale Schädigungen. Hohe Fluenzen kompensierten diesen Einfluss nur bedingt. Zugleich galt, dass ein zentraler Treffer bedeutender war, je größer die Unkrautpflanze war.
- Fortgeschrittenes Pflanzenwachstum erforderte höhere Fluenzen für ein vergleichbares Schädigungsmaß. Anhand der Unkrautpflanzen im 4-Blatt-Stadium zeigte sich, dass die maximal applizierten Energiemengen zu gering gewählt waren.

#### 4.2 Schädigungsmodell

Auf Grundlage der Bestrahlungserfolge an den untersuchten 1620 Einzelpflanzen wurden für den Modellansatz (Gl. 3) mit der Software R die optimalen Modellparameter ermittelt (Tab. 3).

**Tab. 3** Modellparameter zur Unkrautbekämpfung mittels Laserbestrahlung (siehe Gl. 3).

**Tab. 3** Model parameter for weed control using laser irradiation (see Eq. 3).

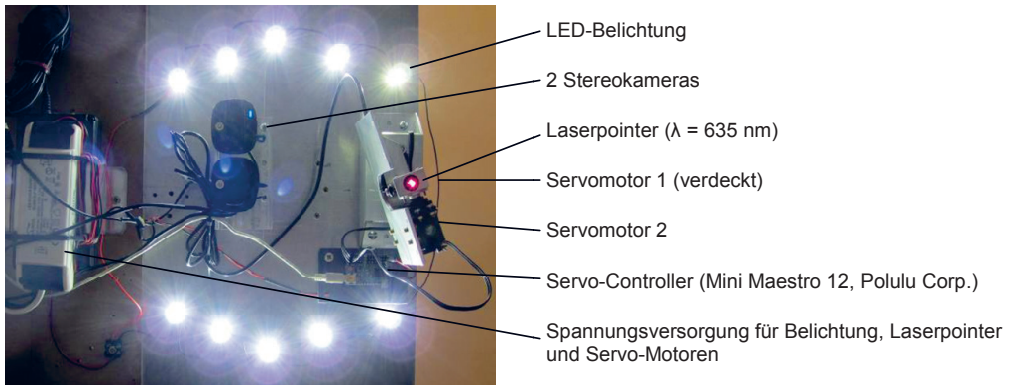
$a_{w1}$	$a_{w2}$	$a_{w3}$	$b_{w1,s1}$	$b_{w2,s1}$	$b_{w3,s1}$	$b_{w1,s2}$	$b_{w2,s2}$	$b_{w3,s2}$	$b_{w1,s3}$	$b_{w2,s3}$	$b_{w3,s3}$	$c$
-2.722	-4.790	-6.725	0.079	0.066	NA	0.043	0.120	0.054	0.028	0.053	0.030	3.713

Mit diesen Werten und mit Gl. 2 konnte die Wahrscheinlichkeit einer letalen Schädigung in Abhängigkeit von den lasertechnischen und pflanzenbaulichen Parametern ermittelt werden. Dies wurde mithilfe einer 10.000fachen Kreuzvalidierung (90 %:10 %, mit Zurücklegen) überprüft. Der mittlere Vorhersagefehler betrug dabei 8,9 % auf der Skala „Wahrscheinlichkeit einer letalen Bestrahlung ( $p_{\text{Erfolg}}$ )“. Aus den Vorhersagemodellen konnten die jeweils erforderlichen Laserenergien in J ermittelt werden, die bei 95 %iger Wahrscheinlichkeit einer letalen Schädigung appliziert werden mussten. Das Minimum lag bei 25 J für eine Applikation mit  $s1 = 7 \text{ mm}^2$  und  $p1 = 100 \%$  auf  $w1 = \text{BBCH } 10$ . Bei einer Applikation mit  $s3 = 28 \text{ mm}^2$  und  $p3 = 8 \%$  auf  $w3 = \text{BBCH } 14$  stieg die notwendige letale Dosis auf 317 J pro Pflanze. Die mittlere Laserspotfläche  $s2$  ( $14 \text{ mm}^2$ ) zeigte eine höhere Effektivität bei größeren Unkrautpflanzen. Die applizierte Energiemenge korrelierte somit mit der Laserspotfläche hinsichtlich des Bestrahlungserfolges. Eine letale Schädigung war abhängig vom Verhältnis des direkt zum indirekt thermisch belasteten Pflanzengewebe: Eine hohe Fluenz bei kleinen Laserspotflächen konnte das Pflanzenmaterial zwar perforieren, jedoch keine systemische Wirkung hervorrufen. Für jede Wuchsgröße gab es also eine optimale Laserspotgröße.

#### 4.3 Entwickeltes Laserapplikations-Testsystem

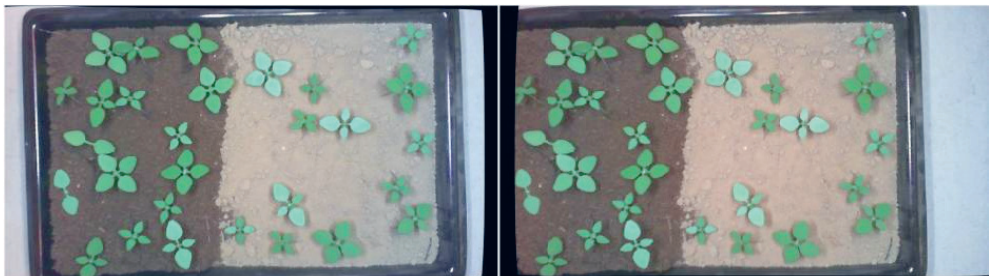
Die Anordnung der Stereo-Kameras zusammen mit dem Belichtungs- und Positioniersystem wurde auf eine stabile Halterung montiert und diese 70 cm über dem Boden befestigt (Abb. 1). Dabei schnitten sich die rechtwinkligen Drehachsen der Servomotoren im Mittelpunkt der Linse des Laserpointers. Die Stereo-Kameras mussten seitlich versetzt montiert werden, um ausreichend Platz für die Drehbewegungen der Servomotoren zu bieten.

Aufgrund realer Abweichungen gegenüber den Sollpositionen (unbekannte Kippwinkel der Kamera-chips auf ihren Platinen) wurden die Kameras mittels Ausgleichsverfahren anhand einer Reihe von Testaufnahmen eines bekannten Schachbrettmusters sphärisch entzerrt und kalibriert (BRADSKI und KAEHLER, 2008). Die Schnittmengen der Stereobilder (Abb. 2) wurden in einer *disparity map* abgebildet, um aus den 2D-Bildern eine 3D-Information zu gewinnen und eine Höhenkorrektur gegenüber der Ebene „Bodenoberfläche“ zu ermöglichen (Abb. 3).



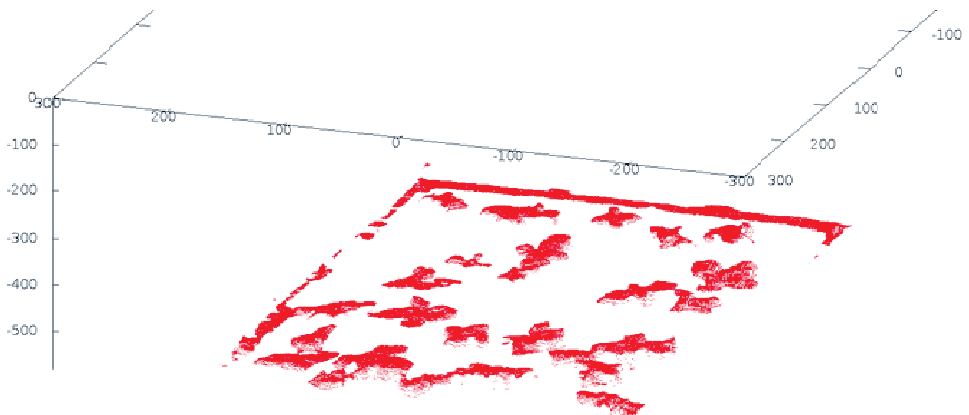
**Abb. 1** Kamera- und Belichtungstechnik sowie Laserstrahlpositionierung via Servomotoren.

**Fig. 1** The camera and lighting construction together with the laser beam positioning via servo motors.



**Abb. 2** Stereo-Kameratechnik mit planaren Bildern.

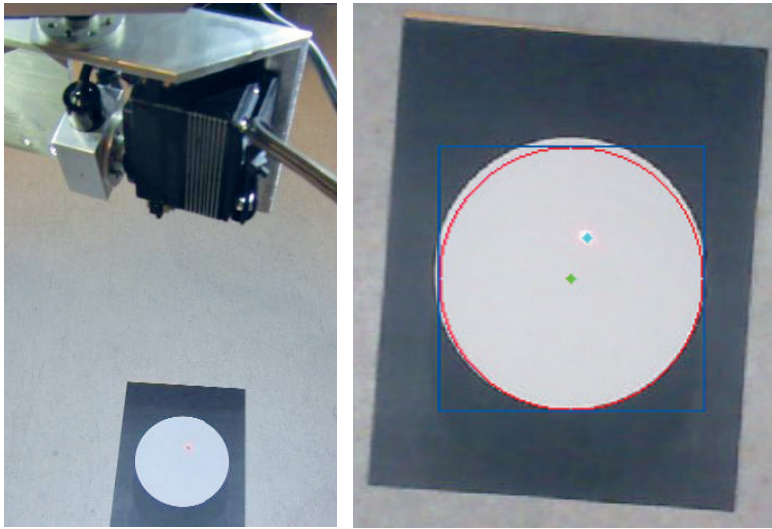
**Fig. 2** Stereo-camera vision with planar images.



**Abb. 3** Errechnete 3D-Szene auf Basis der *disparity map* in Realkoordinaten (mm); der Bildmittelpunkt der linken Stereokamera ist der Bezugspunkt (0;0;0).

**Fig. 3** Computed 3D-scene on the basis of the *disparity map* in spatial coordinates (mm); the principal point of the left stereo camera is the reference point (0;0;0).

Auch das verwendete 2-Achs-Positioniersystem musste aufgrund realer Abweichungen von den Sollpositionen (unbekannt deformierte Achsen, unbekannte Wiederholgüte, Temperatureinflüsse) auf das Stereo-Kamerasystem kalibriert werden. Dies erfolgte mittels einer 3D-Korrekturprozedur, wobei generativ viele Sollpositionen innerhalb eines Kalibrationskreises angesteuert und die wahren Positionen nach Erkennung des Laserspots durch das Stereo-Kamerasystem ausgewertet wurden (Abb. 4). Somit ergaben sich die Korrekturfaktoren für die Translation und Rotation der Relativkoordinatensysteme bzgl. der Globalkoordinaten.



**Abb. 4** Kalibration der Laserstrahlpositionierung zum Stereo-Kamerabild mit Erkennung des Laserspots auf Basis eines Schwellenwertes relativ zum Bildhintergrund.

**Fig. 4** Calibration of the laser beam positioning onto the stereo camera image with the detection of the laser spot based on a threshold relative to the background.

## 5. Schlussfolgerungen und Ausblick

Die Bekämpfung juveniler Unkrautpflanzen (*A. retroflexus*) mittels Lasertechnik konnte in einem Schädigungsmodell abgebildet werden. Die Applikationsenergie ist dabei im Wesentlichen abhängig von einer zur Wuchsgröße des Unkrautes passenden Laserspotfläche in unmittelbarer Nähe zum Meristem. Für eine hohe Erfolgswahrscheinlichkeit einer letalen Schädigung beträgt die minimale Applikationsenergie 25 J. Dieser Wert wird jedoch maßgeblich von der Treffergenauigkeit des Laserstrahls beeinflusst. Mit Hilfe des entwickelten Modells ist es möglich, Lasersysteme entsprechend den Anforderungen an den Bekämpfungserfolg anzusteuern und zu parametrisieren.

Das entwickelte Testsystem ist aufgrund der implementierten Triangulation in der Lage, Laserstrahlen zielgerichtet im 3D-Raum zu positionieren. Durch fortwährend durchgeführte Kalibrierungsalgorithmen ist eine Anpassung an unbekannte und komplexe Umgebungen begrenzt möglich. Das Testsystem stellt somit ein sehr nützliches Hilfsmittel dar, um Laserapplikationen zu bewerten und technisch zu optimieren.

In einem nächsten Schritt sollen das Testsystem und das entwickelte Schädigungsmodell zusammengeführt werden, um in realen Unkrautsituationen Grenzwerte hinsichtlich Applikationsgeschwindigkeit und Unkrautbesatz experimentell zu ermitteln. Dabei werden Untersuchungen zum Einfluss der Bestrahlungsdauer bei konstanter Energiemenge integriert. Abschließend müssen die Systeme im Hinblick auf die praktikable Umsetzung prozess- und kulturtechnisch auf reale Feldbedingungen übertragen werden.

## Danksagung

Die Autoren danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft für die Unterstützung des Forschungsvorhabens „Untersuchungen zur Laserlichtwirkung auf der Basis von Bildanalysen auf juvenile Pflanzen zur Unkrautbekämpfung“ (Förderkennzeichen HE 5989/1 und RA 790/5), in dessen Rahmen große Teile der hier beschriebenen Arbeiten durchgeführt wurden.

## Literatur

- ASTATKIE, T., M.N. RIFAI, P. HAVARD, J. ADSETT, M. LACKO-BARTOSOVA UND P. OTEPKA, 2007: EFFECTIVENESS OF HOT WATER, INFRARED AND OPEN FLAME THERMAL UNITS FOR CONTROLLING WEEDS. *BIOLOGICAL AGRICULTURE AND HORTICULTURE* **25**, 1-12.
- BAYRAMIAN, A., P.K. FAY UND W.E. DYER, 1992: WEED CONTROL USING CARBON DIOXIDE LASERS. *PROCEEDINGS OF THE WESTERN SOCIETY OF WEED SCIENCE* **45**, 55-56. SALT LAKE CITY (UT), USA, 10-12 MARCH 1992.
- BAYRAMIAN, A., P.K. FAY UND W.E. DYER, 1993: WEED CONTROL USING LASERS. *SCIENCE OF FOOD AND AGRICULTURE* **5**, 2.
- BERTRAM, A., 1996: GERÄTE- UND VERFAHRENSTECHNISCHE OPTIMIERUNG DER THERMISCHEN UNKRAUTBEKÄMPFUNG. DISSERTATION, TU MÜNCHEN, INSTITUT FÜR AGRARTECHNIK (FREISING- WEIHENSTEPHAN).
- CHRISTENSEN, S., T. HEISEL UND J. SCHOU, 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. PATENT-NUMMERN: AU9948982-A; WO200003589-A1. INTERNATIONAL PATENT CLASSIFICATION: A01M 021/00.
- BRADSKI, G. AND A. KAEHLER, 2008: LEARNING OPENCV: COMPUTER VISION WITH THE OPENCV LIBRARY. O'REILLY PRESS, 2008.
- COUCH, R. UND E.O. GANGSTAD, 1974: RESPONSE OF WATER-HYACINTH TO LASER RADIATION. *WEED SCIENCE* **22**, 450-453.
- HEISEL, T., J. SCHOU, S. CHRISTENSEN UND C. ANDREASEN, 2001: CUTTING WEEDS WITH A CO2 LASER. *WEED RESEARCH* **41**, 19-29.
- HEISEL, T., J. SCHOU, C. ANDREASEN UND S. CHRISTENSEN, 2002: USING LASER TO MEASURE STEM THICKNESS AND CUT WEED STEMS. *WEED RESEARCH* **42**, 242-248.
- 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**, 98-103.
- LANGNER, H.R., D. EHLERT, M. HEISIG UND A. KIRSTE, 2006: THERMISCHE WIRKUNG VON LASERSTRAHLUNG AUF PFLANZEN. *LANDTECHNIK* **5**, 252-253.
- MATHIASSEN S.K., T. BAK, S. CHRISTENSEN UND P. KUDSK, 2006: THE EFFECT OF LASER TREATMENT AS A WEED CONTROL METHOD. *BIOSYSTEMS ENGINEERING* **95**, 497-505.
- MEIER, U., 2001: ENTWICKLUNGSSTADIEN MONO- UND DIKOTYLER PFLANZEN – BBCH MONOGRAFIE. 2. AUFLAGE, BIOLOGISCHE BUNDESANSTALT FÜR LAND- UND FORSTWIRTSCHAFT, BRAUNSCHWEIG.
- NADIMI, E.S., K.J. ANDERSSON, R.N. JORGENSEN, J. MAAGAARD, S. MATHIASSEN AND S. CHRISTENSEN, 2009: DESIGNING, MODELLING AND CONTROLLING A NOVEL AUTONOMOUS LASER WEEDING SYSTEM. 7TH WORLD CONGRESS ON COMPUTERS IN AGRICULTURE AND NATURAL RESOURCES, 299-303. RENO (NV), USA, 22-24 JUNE 2009.
- PASTRANA-PERÉZ J. AND T. RATH, 2008: VISION BASED PLANT RECOGNITION UNDER OVERLAPPING SITUATIONS. *BORNIMER AGRARTECHNISCHE BERICHTE, HEFT* **62**, 16-23. LEIBNIZ-INSTITUT FÜR AGRARTECHNIK POTSDAM-BORNIM. ISSN 0947-7314.
- R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2011: R: A LANGUAGE AND ENVIRONMENT FOR STATISTICAL COMPUTING. R FOUNDATION FOR STATISTICAL COMPUTING, VIENNA (AUSTRIA), [HTTP://WWW.R-PROJECT.ORG](http://www.R-project.org).
- RAFFAELLI, M., M. FONTANELLI, C. FRASCONI, F. SORELLI, M. GINANNI UND A. PERUZZI, 2011: PHYSICAL WEED CONTROL IN PROCESSING TOMATOES IN CENTRAL ITALY. *RENEWABLE AGRICULTURE AND FOOD SYSTEMS* **26**, 95-103.
- WÖLTJEN, C., H. HAFERKAMP, T. RATH UND D. HERZOG, 2008A: PLANT GROWTH DEPRESSION BY SELECTIVE IRRADIATION OF THE MERISTEM WITH CO2 AND DIODE LASERS. *BIOSYSTEMS ENGINEERING* **101**, 316-324.
- WÖLTJEN, C., T. RATH UND D. HERZOG, 2008B: INVESTIGATIONS ABOUT THE TECHNICAL BASICS OF LASER BEAM USE FOR PLANT MANIPULATION. *PROCEEDINGS OF THE INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON HIGH TECHNOLOGY FOR GREENHOUSE SYSTEM MANAGEMENT. NEAPEL (ITALIEN)*, 4.-6. OKTOBER 2007. *ACTA HORTICULTURAE* **801**, 587-594.