

Unkrauterkenung mit Hilfe unbemannter Luftfahrzeuge

Weed detection using unmanned aircraft vehicles

Michael Pflanz*, Dominik Feistkorn und Henning Nordmeyer

Julius Kühn-Institut (JKI)

Bundesforschungsinstitut für Kulturpflanzen

Institut für Pflanzenschutz in Ackerbau und Grünland, Messeweg 11-12, 38104 Braunschweig

*Korrespondierender Autor, michael.pflanz@jki.bund.de



DOI 10.5073/jka.2014.443.050

Zusammenfassung

Für eine teilflächenspezifische Applikation von Pflanzenschutzmitteln ist es notwendig die räumliche Variabilität einer landwirtschaftlichen Kulturfläche zu identifizieren. Hierfür können Satellitenbilder oder Aufnahmen von bemannten Befliegungen genutzt werden. Flexibler und kostengünstiger ist jedoch der Einsatz unbemannter Fluggeräte zur Fernerkundung. Besonders die stabilen Flugeigenschaften von Multirotorfliegern sind für Luftaufnahmen mit einfachen optischen Systemen geeignet.

Ein kompakter Multikopter (unmanned aircraft vehicle) wurde mit einer modifizierten RGB Kamera (Sony alpha NEX-5N) ausgestattet und es erfolgten Testflüge über verunkrauteten Ackerflächen. Der verwendete Hexakopter (sechs Rotoren) verfügt über einen GPS-gesteuerten Autopiloten und operiert in vorgegebener geringer Flughöhe (5 bis 10 m). Bezüglich der Flughöhe, der Bildauflösung und des Entwicklungsstandes von Unkraut und Kulturpflanze wurden verschiedene Szenarios von photogrammetrischer Unkrauterkenung (Feldversuche und Halbfreiland) durchgeführt.

Die bisherigen Versuche mit dem Kopter deuten auf ein hohes Potential für eine räumlich aufgelöste Unkrautkontrolle hin. Durch die Analyse der georeferenzierten Einzelbilder und ihrer spektralen Segmentierung konnten Unkrauthäufungen im Gesamtbestand identifiziert werden. Diese raumbezogenen Informationen werden bei der Applikation von Herbiziden auf ausgewählten Standorten berücksichtigt.

Stichwörter: Herbizidapplikation, Präzisionslandwirtschaft, teilflächenspezifische Unkrautbekämpfung, UAV, Unkräuter, Unkrautverteilung

Abstract

In contrast to agricultural remote sensing technologies, which are based on images from satellites or manned aircrafts, photogrammetry at low altitude from unmanned aircraft vehicles lead to higher spatial resolution, real-time processing and lower costs. Moreover multicopter aircrafts are suitable vehicles to perform precise path or stationary flights. In terms of vegetation photogrammetry this minimises motion blur and provide better image overlapping for stitching and mapping procedures. Through improved image analyses and through the recent increase in the availability of powerful batteries, microcontrollers and multispectral cameras, it can be expected in future that spatial mapping of weeds from low altitudes will be promoted.

A small unmanned aircraft vehicle with a modified RGB camera was tested taking images from agricultural fields. A microcopter with six rotors was applied. The hexacopter in particular is GPS controlled and operates within predefined areas at given altitudes (from 5 to 10 m). Different scenarios of photogrammetrically weed detection have been carried out regarding to variable altitude, image resolution, weed and crop growth stages.

First experiences with microcopter showed a high potential for site-specific weed control. Images analyses with regards to recognition of weed patches can be used to adapt herbicide applications to varying weed occurrence across a field.

Keywords: Herbicide application, precision Farming, UAV, site specific weed control, weed distribution, weeds

Einleitung

Eine präzise Applikation von Pflanzenschutzmitteln (PSM) trägt dazu bei, Pflanzenschutzmaßnahmen auf das notwendige Maß zu begrenzen. Insbesondere die Applikation von Herbiziden bietet bei einem Auftreten von Unkrautnestern Möglichkeiten für teilflächenspezifische Anwendungen. Voraussetzung dafür ist die Erfassung und Analyse raumbezogener Unkrautinformationen. Dazu gehören die Erkennung von Unkrautarten und deren Dichte sowie

ihre räumliche Verteilung auf einer Fläche (HÄUSLER und NORDMEYER, 1999; NORDMEYER, 2006; LÓPEZ-GRANADOS, 2011). Während manuelle Bonituren zu kostenintensiv und folglich unwirtschaftlich sind (OEBEL, 2006), kann die Unkrauterfassung stattdessen automatisiert in online bzw. offline-Verfahren erfolgen (KLUGE, 2012).

Online-Verfahren arbeiten zeitlich integrierend, d.h. die sensorische Unkrauterfassung erfolgt kontinuierlich und unmittelbar vor einer Applikation. Da bei diesen Verfahren Aufwandmengen an PSM im Voraus nicht kalkulierbar sind, verbleiben bei gängiger Applikationstechnik PSM-Restmengen. Darüber hinaus ist die maximale Fahrgeschwindigkeit bei Online-Verfahren von der Rechenkapazität des Auswertesystems abhängig.

Offline-Verfahren der Unkrauterfassung entkoppeln die sensorische Erkennung und die Herbizidapplikation. Zwar ist hierbei mit zusätzlichem Aufwand durch mehrmalige Befahrung oder Befliegung zu rechnen, in der Regel können die Kosten jedoch kompensiert werden, da Aufwandmengen genauer kalkulierbar sind und folglich weniger Restmengen verbleiben (KLUGE, 2011). Für einen nachhaltigen Pflanzenschutz ist es desweiteren möglich, die Unkrautausbreitung über größere Zeiträume zu dokumentieren und in Modellrechnungen für die künftigen Herbizidapplikationen einzubeziehen.

Bereits seit mehreren Jahrzehnten werden Offline-Verfahren zur Vegetationsfernerkundung genutzt. Häufig werden Satellitenbilder (ROUSE *et al.*, 1974; BANNARI *et al.*, 1995; JOHNSON *et al.*, 2001; SIMS und GAMON, 2003) oder Aufnahmen aus bemannten Befliegungen analysiert, um die räumliche Variabilität einer landwirtschaftlichen Kulturfläche zu identifizieren und Kulturmaßnahmen teilflächenspezifisch anzupassen. Die photogrammetrische Flächenleistung ist bei diesen Verfahren auf Grund der Flughöhe sehr groß. Allerdings müssen die verwendeten Kamerasysteme bezüglich der Abbildungsleistung hohe Anforderungen erfüllen (Tab. 2). Von Nachteil sind darüber hinaus die geringe zeitliche Verfügbarkeit von Rohdaten, die hohen Kosten und die relativ geringe räumliche Auflösung.

Alternativ wecken der technologische Fortschritt bei der Entwicklung von Systemen zur autonomen Flugsteuerung und die verbesserte Bildverarbeitung ein stark gestiegenes Interesse an unbemannten Fluggeräten. In einer Gewichtsklasse bis 5 kg können in Deutschland Aufstiegsgenehmigungen entweder pauschal oder mit geringen Auflagen erteilt werden (LuftVG und LuftVO, 2012). Die Nutzkapazitäten der Fluggeräte reichen aus, um Kompakt- oder hochwertige Systemkameras zu transportieren. Besonders die stabilen Flugeigenschaften von Multirotorfliegern sind für Luftaufnahmen mit einfachen optischen Systemen geeignet. Die Flächenleistung eines UAV (Unmanned Aircraft Vehicles) ist im Wesentlichen abhängig von der Flugzeit, der Flughöhe und der Brennweite der Kamera (NIEMEYER, 2013). UAVs können zur Fernerkundung sehr flexibel eingesetzt werden (GOMEZ-CANDON *et al.*, 2011; LEBOURGEOIS, 2012) und ihr Potential für praktische Anwendungen in der Landwirtschaft wurde bereits beschrieben (LELONG *et al.*, 2008; SCHMALE *et al.*, 2008; HARDIN und JENSEN, 2011; LALIBERTE *et al.*, 2011; XIANG und TIAN, 2011). Im Zusammenhang mit photogrammetrischen Methoden zur Unkrauterfassung mit UAVs aus geringen Flughöhen gibt es bislang nur wenige wissenschaftliche Untersuchungen. In einzelnen Versuchen wurden Flughöhen zwischen 2 und 100 m zur Erkennung von Unkrautnestern gewählt (PENA-BARRAGAN *et al.*, 2012; RASMUSSEN *et al.*, 2013).

Material und Methoden

Für die Befliegung der Versuchsflächen wurde ein Multikoptersystem mit sechs Rotoren (Hexakopter) eingesetzt. Das Basisgerät entspricht einem Hexa XL (HiSystems GmbH Moormerland, Deutschland), wobei die Flugsteuerung und das GPS-Interface modifiziert wurden (CIS GmbH, Rostock-Bentwisch, Deutschland). Die maximale Nutzlast beträgt etwa 1500 g. Mit Hilfe des GPS-gesteuerten Autopiloten kann der Kopter seine Position automatisch halten und einer vordefinierten Flugroute folgen (Weg-Punkte-Flug). Der Start des Kopters erfolgt manuell bzw. halbautomatisch mit Hilfe einer handelsüblichen Fernsteuerung aus dem Modellbereich (Graupner SJ MX-16, Deutschland). Die Landung wird durch eine automatische Abstandsmessung

zum Boden (Ultraschall-Sensor) abgesichert. Das Gesamtgewicht des Kopters (mit Kamera) beträgt etwa 3200 g inklusive zwei leistungsstarken Lithium-Eisen-Polymer-Akkus mit einer Kapazität von 6600 mAh. In Abhängigkeit zur Nutzlast kann eine Flugzeit von 10-15 Minuten erreicht werden. Die Flugsteuerung enthält neben einem GPS-Modul weitere Sensoren für die Beschleunigung und ein Kreiselinstrument.



Abb. 1 Hexakopter auf den Versuchsflächen des JKI.

Fig. 1 Hexakopter on field trials.

Kamera

Die Aufnahme von Einzelbildern aus geringer Flughöhe erfolgte mit einer modifizierten RGB Kompaktkamera (NEX 5N, Sony, Japan). Die maximale Auflösung beträgt 4912 x 3264 Bildpunkte (23,5 x 15,6 mm APS-C Sensor). Das verwendete Objektiv hat eine Brennweite von 16 mm (Sony alpha NEX-5N, Japan). Im Rahmen von Feldversuchen erfolgten Aufnahmen aus 10 m Flughöhe. Der Kopter folgte hierzu einer vorgegebenen Route (Routenplanung). In einem Zeitintervall von vier Sekunden wurden kontinuierlich Bilder der Versuchsfläche aufgezeichnet. Ein Weg-Punkte-Flug befindet sich in der Erprobungsphase. Im Anschluss an die Messungen auf dem Feld wurden die Bilder mit Hilfe der Koptersoftware UAVmobile/UAV-Gis (CIS GmbH, Rostock-Bentwisch, Deutschland) zusammengesetzt (Mosaiking) und georeferenziert.

Freilandversuch

Für die Identifizierung von Unkrautnestern (Spätverunkrautung) wurde eine Winterweizenfläche in einer Höhe von 10 m überflogen. Die Fläche befindet sich im Norden Braunschweigs (52°22'14.37" N, 10°35'44.49" E, Abb. 2a). Der Weizen befand sich zum Zeitpunkt der Aufnahmen im Entwicklungsstadium größerer BBCH 71. Von der photogrammetrisch aufgenommenen Gesamtfläche (Abb. 2b) wurde eine Teilfläche von 525 m² gewählt (Abb. 2c) und pixelbasiert segmentiert (Abb. 2d). Die erkannten Distelnester wurden anschließend manuell markiert (Abb. 2e und f) und als potentielle Behandlungsfläche bezogen auf die Gesamtfläche berechnet (Image Processing Toolbox V8.2, Matlab 8.1, The Mathworks, USA).

Halbfreilandversuche

Zur Abschätzung der Bildauflösung der Kopterkamera aus einer realen Flughöhe von 5 bis 10 m wurden weitere Versuche unter Halbfreilandbedingungen durchgeführt. Es wurden typische Ackerunkräuter wie *Chenopodium album* L. (CHEAL), *Matricaria inodora* L. (MATIN) und *Veronica hederifolia* L. (VERHE) in flachen Pflanzschalen (400 x 600 x 10mm) ausgesät und aus einer fest eingestellten Höhe von 8,15 m manuell fotografiert. Die Aufnahmen wurden zu unterschiedlichen Terminen im 1 bis 4-Blattstadium der Unkräuter erstellt.

Getestet wurden unterschiedliche Brennweiten (Tab. 1) verschiedener Objektive. Hierzu wurden die Kopterkamera und eine Spiegelreflexkamera (EOS 400D, Canon, Japan) mit Objektiven

unterschiedlicher Brennweite getestet (Canon EF-S 1:3.5-5.6, 18-55 mm, Japan und Voigtländer Skopar 1:4.5-5.6, 70-300m, Sigma, Deutschland).

Tab. 1 Auflistung der getesteten Brennweiten und Objektive in einer fest eingestellten Höhe über dem Pflanzenbestand.

Tab. 1 List of focal distances and lenses studied in terms of low altitudes.

Objektiv	Kamera	Brennweite in mm
Sony	Sony	16
Canon	Canon	18, 24, 35, 55
Voigtländer	Canon	70, 100, 135, 200, 300

Bildanalyse

Die Analyse der Bilder zur Errechnung der Unkrautverteilung erfolgte mit Hilfe der Web-Applikation „Imaging Crop Response Analyser“ (<http://imaging-crops.dk>, Department of Plant and Environmental Sciences, University of Copenhagen). Diese Methode bestimmt die Anzahl grüner Pixel (Pflanzen) im Bild und gibt das Verhältnis zur Gesamtpixelanzahl als Pflanzendeckungsgrad an. Basierend auf einer gewichteten Farbsegmentierung der Kanäle rot (R), grün (G) und blau (B) und einer automatischen Schwellwertfindung im Graustufenbild werden grüne Pflanzenteile von der Bodenoberfläche, Schatten, Steinen und totem Pflanzenmaterial segmentiert (Rasmussen, 2007).

Ergebnisse

Die in 10 m Höhe mit Hilfe des Hexakopter photogrammetrisch aufgenommene Gesamtfläche beträgt $285 \times 75 \text{ m} = 21375 \text{ m}^2$ (Abb. 2b) und wurde aus Einzelaufnahmen mosaikiert. Auf der ausgewählten Teilfläche von 525 m^2 (Abb. 2b und c) wurde die Häufung und die Verteilung von Distelnestern bestimmt. Hier liegt der Anteil bei 0,28 % der Anzahl an Gesamtpixel bzw. $1,47 \text{ m}^2$ der untersuchten Fläche (Abb. 2d). In den manuell festgelegten Flächensegmenten ergibt sich für eine teilflächenspezifische Herbizidbehandlung ein Anteil von 12,8 % bzw. $67,2 \text{ m}^2$ Disteln an der untersuchten Teilfläche (Abb. 2f). Eine Unterscheidung nach Unkrautarten konnte auf Grund der geringen Bildauflösung nicht erfolgen.

Um die Erkennung von Einzelpflanzen in künftigen Befliegungen zu verbessern, wurde der Zusammenhang zwischen Flughöhe, Bildauflösung und Brennweite des verwendeten Kamerasystems in einem Halbfreilandversuch untersucht. Hieraus ergibt sich, dass bei einer Brennweite von 16 mm eine Flughöhe von etwa 1,80 m erforderlich wäre, um einen Quadratmeter reelle Fläche abzubilden. Dies ist mit dem zurzeit verwendeten Autopiloten nicht umzusetzen. In einer bisher vom Autopiloten einzuhaltenden Flughöhe von 10 m ist eine Brennweite von 55 mm zu empfehlen.

Dies konnte durch Untersuchungen in einem Halbfreilandversuch und einer festgelegten Höhe bestätigt werden. Hierbei zeigte sich, dass bei einer simulierten Flughöhe von 8,15 m ausreichende Auflösungen ab einer Brennweite von mindestens 55 mm erreicht wurden. Bei einer realen Auflösung von etwa 30 Pixeln pro inch (Abb. 3c) ermöglichte dies eine zuverlässige Berechnung des Pflanzendeckungsgrades und eine eindeutige Unterscheidung von Unkräutern unterschiedlicher Entwicklungsstufen.

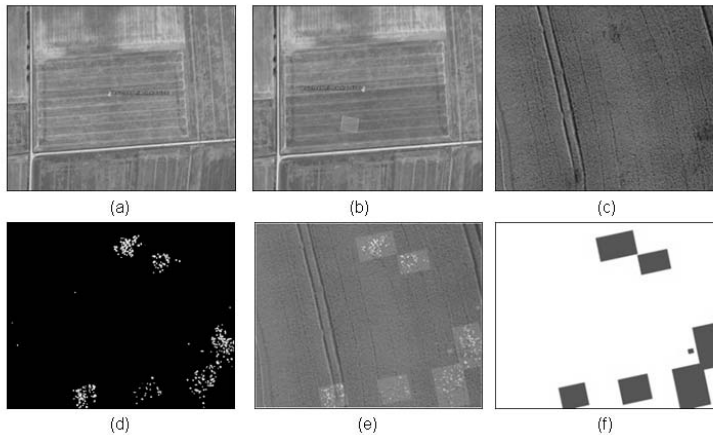


Abb. 2 (a) und (b) Satellitenbilder (google earth, 2013) der Versuchsfläche mit gekennzeichnete Gesamtfläche (rot) und Teilfläche (grün); (c) Georeferenzierte Aufnahmen eines abreifenden Bestandes von Winterweizen mit Distelnestern; (d) Ergebnis der Segmentierung mit Hilfe des Algorithmus von Rasmussen (2007); (e) und (f) manuell markierte Flächen einer möglichen teilflächenspezifischen Herbizidapplikation parallel zur Fahrspur.

Fig. 2 (a) and (b) Satellite images (google earth, 2013) of total sample area (red) and reference surface (green); (c) Georeferenced images of thistle clusters in maturing wheat; (d) Results of color segmentation by using the approach of Rasmussen 2007; (e) and (f) manually labeled area of potentially site-specific herbicide application.

Tab. 2 Zusammenhang zwischen Flughöhe, Bildauflösung und Bestandesfläche bei einer Brennweite von 16 mm.

Tab. 2 Relation between altitude, spatial image resolution and surface area by means of 16 mm focal length.

Flughöhe cm	gemessene Pixel / 5 cm	mm / pixel	pixel/inch	reelle Fläche (m ²)
109,7	156,5	31,3	79,50	0,05
128	134	26,8	68,07	0,17
151	113	22,6	57,40	0,43
171,9	99,5	19,9	50,55	0,89
190	89,5	17,9	45,47	1,64
200,1	84,5	16,9	42,93	2,23
300	56	11,2	28,45	3,14
400	42	8,4	21,34	4,05
500	33,5	6,7	17,02	5,00
600	28	5,6	14,22	5,61
700	23,5	4,7	11,94	12,78
800	21	4,2	10,67	22,72
900	18,5	3,7	9,40	35,72
1000	17	3,4	8,64	51,12
1100	15	3	7,62	72,58

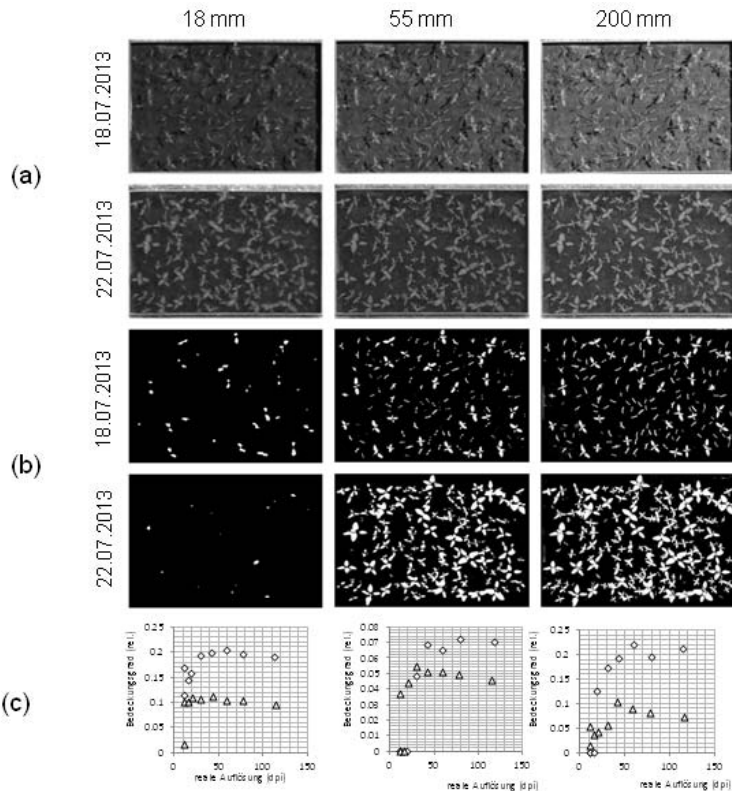


Abb. 3 (a) Aufnahmen von CHEAL fotografiert aus einer Höhe von 8,15 m mit verschiedenen Objektiv-Brennweiten und in unterschiedlichen Entwicklungsstufen der Pflanzen, (b) das Ergebnis der Berechnung des Pflanzendeckungsgrades nach Rasmussen 2007 und (c) der Zusammenhang zwischen Abbildungsleistung und Bedeckungsgrad. Ab einer realen Auflösung von mehr als 30 dpi ist eine zuverlässige Berechnung des Pflanzendeckungsgrades unabhängig von der Entwicklungsstufe der Pflanzen möglich.

Fig. 3 (a) Original images of CHEAL, shot from an altitude of 8.15 m using different focal lengths, (b) Image processing results of CHEAL from a altitude of 8.15 m in comparison of different focal length (Algorithm by RASMUSSEN et al., 2007) and (c) the relation between spatial resolution and leaf cover. A resolution of more than 30 dpi provides reliable calculation of leaf cover, which is than independent from the stage of plant development.

Diskussion

In den Laborversuchen zeigte sich, dass das verwendete Sony-Objektiv mit einer fest eingestellten Brennweite von 16 mm hohe Lichtdurchlässigkeit besitzt. Dadurch kann eine Bewegungsunschärfe vermieden werden, die bei einer photogrammetrische Unkrauterfassung aus geringer Flughöhe häufig auftritt. Bezüglich des Öffnungswinkels bei 16 mm Brennweite und des verwendeten APS-C Sensors der Sony-Kamera geht aus den Versuchen allerdings hervor, dass bereits ab einer Flughöhe von 1,80 m annähernd 1 m² Grundfläche aufgenommen wird. Die Ergebnisse der Halbfreilandversuche deuten darauf hin, dass für die Analyse der Bilder bezüglich des Pflanzendeckungsgrades einen Auflösung von 30 dpi erforderlich ist. Ausgehend von der verwendeten Festbrennweite ist dieser Wert nur bis zu einer Flughöhe von 3 m zu erreichen.

Solch geringe Flughöhen können durch den eingesetzten Autopiloten des Kopter jedoch nicht stabil gehalten werden. Während die GPS-Navigation in x und y-Richtung besser als +/- 5 m ist, kann eine Flughöhe (z) unter 5 m nicht automatisch gehalten werden. Aus diesem Grund sollten Objektive mit größerer fester Brennweite (z. B. 60 mm) verwendet werden. Versuche aus fest

eingestellter Höhe von 8,15 m haben gezeigt, dass sich Aufnahmen ab 55 mm mit Hilfe des Algorithmus von RASMUSSEN (2007) gut segmentieren lassen. Größere Brennweiten bringen nur noch geringe Verbesserungen bei der Bildverarbeitung. In den Feldversuchen zeigte sich, dass durch Analyse der georeferenzierten Einzelbilder und ihre farbliche Segmentierung Unkrautnester im Getreidebestand identifiziert werden können. Diese raumbezogenen Informationen sollen bei der Applikation von Herbiziden auf ausgewählten Standorten berücksichtigt werden. Insgesamt deuten die bisherigen Erfahrungen mit dem Kopter auf ein hohes Potential für eine räumlich aufgelöste Unkrauterfassung hin.

Danksagung

Wir danken den Mitarbeitern des Instituts für Pflanzenschutz in Ackerbau und Grünland am JKI Braunschweig für ihre Hilfe bei der Umsetzung der Versuche. Der Dank gilt insbesondere Frau Annika Behme und Herrn Arno Littmann.

Literatur

- BANNARI, A., D. MORIN, F. BONN und A.R. HUETE, 1995: A review of vegetation indices. *Remote Sensing Reviews* **13**, 95-120.
- BUNDESMINISTERIUM FÜR VERKEHRSWESEN, 2012: Luftverkehrs-Ordnung (LuftVO).
- GOMEZ-CANDON, D., F. LOPEZ-GRANADOS, J. J. CABALLERO-NOVELLA, M. GOMEZ-CASERO, M. JURADO-EXPOSITO und L. GARCIA-TORRES, 2011: Geo-referencing remote images for precision agriculture using artificial terrestrial targets. *Precision Agriculture* **12**, 876-891.
- HARDIN, P. J. und R. R. JENSEN, 2011: Introduction-Small-Scale Unmanned Aerial Systems for Environmental Remote Sensing. *Giscience and Remote Sensing* **48**, 1-3.
- HÄUSLER, A. und H. NORDMEYER, 1999: Characterizing spatial and temporal dynamics of weed seedling populations. *Precision agriculture'99*, Part 1. Papers presented at the 2nd European Conference on Precision Agriculture, Odense, Denmark, 11-15 July 1999, 463-472.
- JOHNSON, L. F., D. F. BOSCH, D. C. WILLIAMS und B. M. LOBITZ, 2001: Remote sensing of vineyard management zones: Implications for wine quality. *Applied Engineering in Agriculture* **17**, 557-560.
- KLUGE, A., 2011: Methoden zur automatischen Unkrautererkennung für die Prozesssteuerung von Herbizidmaßnahmen. Dissertation Technische Universität Braunschweig, S. 214.
- KLUGE, A. und H. NORDMEYER, 2012: Verfahren der Bildanalyse zur Unkrautererkennung in Getreide. *Julius-Kühn-Archiv* **434**, 235-242.
- LALIBERTE, A. S., M. A. GOFORTH, C. M. STEELE und A. RANGO, 2011: Multispectral Remote Sensing from Unmanned Aircraft: Image Processing Workflows and Applications for Rangeland Environments. *Remote Sensing* **3**, 2529-2551.
- LEBOURGEOIS, V., A. BEGUE, S. LABBE, M. HOULES und J. F. MARTINE, 2012: A light-weight multi-spectral aerial imaging system for nitrogen crop monitoring. *Precision Agriculture* **13**, 525-541.
- LELONG, C. C. D., P. BURGER, G. JUBELIN, B. ROUX, S. LABBE und F. BARET, 2008: Assessment of unmanned aerial vehicles imagery for quantitative monitoring of wheat crop in small plots. *Sensors* **8**, 3557-3585.
- LOPEZ-GRANADOS, F., 2011: Weed detection for site-specific weed management: mapping and real-time approaches. *Weed Research* **51**, 1-11.
- NIEMEYER, F., R. SCHIMA und A. NEISER, 2013: Konzept und Kalibrierung eines Mehrkameranensystems mit schrägblickenden Kameras für den UAV-Einsatz. 19. Workshop Computer-Bildanalyse in der Landwirtschaft und 2. Workshop Unbemannte Autonom fliegende Systeme (UAS) in der Landwirtschaft, Berlin.
- NORDMEYER, H., 2006: Patchy weed distribution and site-specific weed control in winter cereals. *Precision Agriculture* **7**, 219-231.
- OEBEL, H., 2006: Teilschlagspezifische Unkrautbekämpfung durch raumbezogene Bildverarbeitung im Offline- und (Online-) Verfahren (TURBO). Dissertation Universität Hohenheim.
- PEÑA-BARRAGAN, J. M., M. KELLY, A. I. DE CASTRO und F. LOPEZ-GRANADOS, 2012: Object-based approach for row characterization in UAV images for site-specific weed management. *Proceedings of the 4th GEOBIA, Rio de Janeiro, Brazil*, 426-430.
- RASMUSSEN, J., J. NIELSEN, F. GARCIA-RUIZ, S. CHRISTENSEN und J. C. STREIBIG, 2013: Potential uses of small unmanned aircraft systems (UAS) in weed research. *Weed Research* **53**, 242-248.
- RASMUSSEN, J., M. NORREMARK und B. M. BIBBY, 2007: Assessment of leaf cover and crop soil cover in weed harrowing research using digital images. *Weed Research* **47**, 299-310.
- ROUSE, J. W., R. H. HAAS, J. A. SCHELL, D. W. DEERING und J. C. HARLAN, 1974: Monitoring the vernal advancement and retrogradation (greenwave effect) of natural vegetation. NASA/Goddard Space Flight Center Final Report.
- SCHMALE, D. G., B. R. DINGUS und C. REINHOLTZ, 2008: Development and application of an autonomous unmanned aerial vehicle for precise aerobiological sampling above agricultural fields. *Journal of Field Robotics* **25**, 133-147.
- SIMS, D. A. und J. A. GAMON, 2003: Estimation of vegetation water content and photosynthetic tissue area from spectral reflectance: a comparison of indices based on liquid water and chlorophyll absorption features. *Remote Sensing of Environment* **84**, 526-537.

26th German Conference on weed Biology an Weed Control, March 11-13, 2014, Braunschweig, Germany

XIANG, H. T. und L. TIAN, 2011: Development of a low-cost agricultural remote sensing system based on an autonomous unmanned aerial vehicle (UAV). *Biosystems Engineering* **108**, 174-190.