

Hyperspektrale Bildanalyse zur Unterscheidung von *Ambrosia artemisiifolia* und *Tagetes* ssp.

Hyperspectral image analysis for discrimination of Ambrosia artemisiifolia and Tagetes ssp.

Karl-Heinz Dammer*, Joachim Intreß und Anton Ustyuzhanin

Leibniz-Institut für Agrartechnik Potsdam-Bornim (ATB), Max-Eyth-Allee 100, 14469 Potsdam, Deutschland

*Korrespondierender Autor, kdammer@atb-potsdam.de

DOI 10.5073/jka.2013.445.016

Zusammenfassung

Zur Verhinderung der weiteren Verbreitung der Beifußblättrigen Ambrosie müssen Nester und Einzelpflanzen lokalisiert und bekämpft werden. Kamerasensoren, die berührungslos arbeiten und leicht an landwirtschaftliche und kommunale Fahrzeuge anzubringen sind, wären eine geeignete Technik, um große Landschaftsareale zu scannen. In Kleingärten kämen eher preiswerte Handmessgeräte in Betracht.

Effektive Monitoringstrategien auf der Basis optischer Methoden setzen spektrale Unterschiede im Reflexionsverhalten von *Ambrosia artemisiifolia* L. gegenüber anderen Pflanzenarten voraus. Es wurde ein hyperspektraler Scanner entwickelt, um die Reflexionseigenschaften von Pflanzen zu analysieren. Beifuß-Ambrosien- und *Tagetes*-Pflanzen wurden an vier Terminen (bis zur Blüte) gescannt. Aus den Hyperspektralbildern erfolgte die Generierung der Referenzspektren ausgewählter Regionen von Blatt und Stiel beider Pflanzenarten mit der Software ENVI. Eindeutige spektrale Unterschiede in den Blättern beider Pflanzenarten waren an allen vier Messterminen nicht zu erkennen. Unterschiede traten hinsichtlich der Stiele der zwei Pflanzenarten besonders an den zwei ersten Messterminen auf. Die Reflexion der Stiele beider Pflanzenarten nahm im Gegensatz zu den Blättern, mit Ausnahme der *Tagetes*-Stiele am zweiten Termin, vom Grünbereich (550 nm) zum Rotbereich (640 nm) zu. An den beiden letzten Terminen war der Verlauf der Spektren von Blättern und Stielen wieder ähnlich. Eine Unterscheidung der zwei Pflanzenarten unter Verwendung dieser zwei Wellenlängen gelang nicht.

Stichwörter: *Ambrosia artemisiifolia*, hyperspektrale Bildanalyse, Pflanzenerkennung, *Tagetes* spp.

Abstract

To avoid a further spreading of ragweed, patches as well as single plants have to be located and destroyed. Camera sensors can operate contactless and can easily be fixed to farm and urban machines to scan huge landscape areas. In private gardens cheap hand held devices would come into consideration.

Effective monitoring strategies based on optical methods imply spectral differences in the reflection behavior. A hyperspectral line scanner was developed to analyze the reflection properties of plants. Single plants of common ragweed and *Tagetes* were scanned four times (till flowering). With the software ENVI reference spectra for stems and leaves were generated separately. At all four measurement times no unique spectral differences of the leaves of both plant species were visible. But there were differences regarding the stems especially at the first and second measuring. In contrast to the leaves, the reflection of the stems was increasing from green (550 nm) to red (640 nm) with the exception of marigold stems on the second measuring time. At the third and fourth time the spectra of leaves and stems were similar. A discrimination of the two species by using these two wavelengths did not succeed.

Keywords: *Ambrosia artemisiifolia*, hyperspectral image analysis, plant discrimination, *Tagetes* spp.

Einleitung

Die Beifußblättrige Ambrosie (*Ambrosia artemisiifolia* L.) ist eine aus Nordamerika stammende invasive Pflanze, die sich in Europa immer mehr ausbreitet. BOHREN *et al.* (2005) geben einen umfassenden Überblick zur Biologie und Verbreitung als Problempflanze in der Schweiz. BRANDES und NITZSCHE (2007) prognostizieren auf Grund der Klimaerwärmung, dass sich die Pflanze zu einem Mitglied der allgemeinen Flora Zentraleuropas entwickelt. Die Beifußblättrige Ambrosie hat ein hohes Verbreitungspotenzial zur Besiedlung verschiedener Habitats (FUMANAL *et al.*, 2008). In Deutschland kommen vor allem größere Populationen im östlichen Teil Brandenburgs vor. Daher haben Allergieverkrankungen besonders im Osten Deutschlands zugenommen (LÜDKE, 2009).

Mechanische Methoden wie das Mähen und Herbizidanwendungen wurden von BOHREN *et al.* (2008) als wirksame Kontrollmaßnahmen zur Verhinderung der Pollen- und Samenproduktion untersucht. Mögliche biologische Kontrollmaßnahmen für Europa werden von GERBER *et al.* (2011) diskutiert. BUZSAKI *et al.* (2008) und KAZINCZI *et al.* (2008) untersuchten allelopathische Effekte von Pflanzenextrakten, um eine Alternative zu Herbiziden zu finden. Für die aufgeführten Bekämpfungsmaßnahmen wird nur eine Erfolgsaussicht bestehen, wenn Einzelpflanzen bzw. Nester dieser invasiven Pflanze in den jeweiligen Habitaten lokalisiert werden können. Verlässliche Monitoring-Strategien sind daher notwendig.

Die zunehmende Verfügbarkeit von Methoden der Fernerkundung wie Satellitenbilder, Bilder aus bemannten oder unbemannten Flugobjekten verspricht eine mögliche Strategie für ein Monitoring zu sein. Das Problem wurde in Dammer *et al.* (2012) diskutiert und lässt sich wie folgt zusammenfassen: Vom jetzigen Stand der Technik ausgehend sind Luftbilder nicht geeignet, um kleine Nester bzw. Einzelpflanzen einer Pflanzenart zu erkennen. Trotz hoher Vorkommensraten von Beifuß-Ambrosien im Untersuchungsgebiet beobachtete AUDA *et al.* (2008), dass nur 45 % der Pixel der Multispektralbilder des SPOT 5-Satelliten richtig klassifiziert waren. TAMAS *et al.* (2006) fand nur ein Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0,33$ (keine Korrelation) bei der Regressionsanalyse zwischen dem NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), der anhand der Messungen des LANDSAT 5 berechnet wurde, und der am Boden ermittelten Werte des Deckungsgrades von Beifuß-Ambrosie. GIBSON *et al.* (2004) beobachtete eine abnehmende Erkennungsgenauigkeit bei abnehmender Dichte der jeweiligen Pflanzenart. Nach OKIN *et al.* (2001) war es nicht möglich, die jeweilige Pflanzenart zu erkennen, wenn der Deckungsgrad kleiner als 30 % war. Neben diesen Problemen kommen Einflüsse wie Bewölkung oder eine begrenzte Bildauflösung am Boden hinzu. Diese Probleme würden bei Methoden der Nahsensorik von vornherein ausgeschlossen werden. Im Moment gibt es jedoch zur automatischen Erkennung von Beifuß-Ambrosie-Einzelpflanzen keine Forschungsprojekte.

In ihren natürlichen Habitaten ist die Beifuß-Ambrosie mit anderen Pflanzenarten vergesellschaftet. Zum Teil sind diese im Aussehen der Beifuß-Ambrosie sehr ähnlich und dem Betrachter fällt es schwer, diese zu unterscheiden. Zu diesen Pflanzen gehören z. B. Wilde Möhre (*Daucus carota* L.), Rainfarn (*Tanacetum vulgare* L.), Gewöhnliche Besenrauke (*Descurainia sophia* (L.) Webb), Gefleckter Schierling (*Conium maculatum* L.) und Gänsefußarten (*Chenopodium* spp.). Mit dem zur selben Familie der *Asteraceae* gehörenden Gemeinen Beifuß (*Artemisia vulgaris* L.), der oft in natürlichen Habitaten mit Beifuß-Ambrosie vergesellschaftet ist, wurden erste hyperspektrale Messungen zur Unterscheidung dieser beiden Pflanzenarten ausgewertet. Sowohl im sichtbaren als auch im nahen Infrarotbereich des Lichtes gelang eine Trennung der Stiele von Beifuß-Ambrosie gegenüber Blätter und Stiele des Gemeinen Beifußes (DAMMER *et al.*, 2012, 2013).

LOPEZ-GRANADOS (2011) stellte heraus, dass Hyperspektralkameras auf Grund der hohen Operationskosten unter Freilandbedingungen nicht profitabel sind. Idealerweise sollten daher die Anzahl gemessener Wellenlängen in zukünftigen preiswerten und bedienerfreundlichen Kameratechnologien auf zwei reduziert werden, um die Technik für die breite Praxis nutzbar zu machen.

In den urbanen Habitaten ist die Beifuß-Ambrosie unter anderem mit Zierpflanzen vergesellschaftet. Ein Beispiel ist die Studentenblume (*Tagetes* spp.). In Anlehnung an die Untersuchungen zur Unterscheidung von Beifuß-Ambrosie und Gemeinen Beifuß (DAMMER *et al.*, 2012) war das Ziel:

- Charakterisierung der Reflektionsspektren, der Stiele und Blätter beider Pflanzenarten,
- Finden zweier Wellenlängen, die zur Klassifizierung geeignet erscheinen,
- Evaluierung von Verhältnisdiagrammen zweier Wellenlängen,
- Erstellung von Binärbildern mittels Schwellenwertverfahren.

Material und Methoden

Jeweils 20 Samen von Beifuß-Ambrosie und Tagetes wurden in Plastiktöpfen (Durchmesser: 18 cm, Tiefe: 18 cm) in handelsüblicher Anzuchterde am 30.04.2008 ausgelegt. Nach zweimaliger Vereinzeln der Pflanzen verblieb eine gut entwickelte Pflanze (BBCH 28, Einblattstadium) in jedem der 4 Töpfe, die am 26.05.2008 an einem sonnigen Standort im Institutsgelände im Freien aufgestellt wurden. Damit konnte die vegetative Entwicklung entsprechend der natürlichen Bedingungen gewährleistet werden. Bei Bedarf wurde gegossen und dem Gießwasser flüssiger Dünger zugesetzt. Zur hyperspektralen Reflexionsmessung wurde von den jeweils 4 Töpfen ein gut entwickeltes Exemplar jeder Art ausgewählt und im Labor gemeinsam am hyperspektralen Messplatz (400 - 1000 nm) gescannt. Das Gerät besteht aus einem Spectrograph ImSpector V10E (Specim Spectral Imaging Ltd., Oulu, Finland) mit einer spektralen Auflösung von 2,5 nm, einer Pixelfly qe CCD Kamera (PCO AG, Kehlheim, Deutschland) und einem rotierendem Spiegel, der mittels eines Mikrostufenmotors bewegt wird.

Die Pflanzen wurden mit einer 21 V, 150 W direkt stabilisierten Halogenlampe (Zeutec Opto-Elektronik GmbH, Rendsburg, Deutschland) beleuchtet. Der Weißabgleich erfolgte mit einer Referenzplatte WSIR 300 VIS (Spectralon) mit etwa 99 % Reflexionseffizienz (Zeutec Opto-Elektronik GmbH, Rendsburg, Deutschland). Der Schwarzabgleich erfolgte durch Messung unter Abdunkelung des Objektivs durch eine Kappe. Zur Steuerung des Gerätes, zur schwarz-weiß-Kalibrierung und zur Generierung der hyperspektralen Bilder wurde die "HyBiS 1.0" Software unter Anwendung von LabView 8.2 (National Instruments Corporation, Austin, TX, USA) entwickelt. Ein Bild ergab sich aus insgesamt 512 gescannten Linien. Um das Messrauschen zu minimieren, erfolgte das Scannen mit 10 Wiederholungen. Im Anschluss wurde daraus ein Mittelwert des Reflexionswertes je Wellenlänge gebildet. Details des Aufbaues, der Wirkungsweise des Gerätes, der Software sowie des schwarz-weiß-Abgleiches sind in DAMMER *et al.* (2012) beschrieben. Die Messung erfolgte an jeweils der gleichen Pflanze vier Mal während der Vegetationsperiode bis zur Fruchtbildung. Die Wachstumsstadien wurden unter Anwendung der BBCH Skala charakterisiert (LANCASHIRE *et al.*, 1991):

- 17.06.2008 (BBCH 30, Beginn Verlängerung Hauptspross),
- 23.07.2008 (BBCH 31, sichtbar gestrecktes Internodium),
- 04.09.2008 (BBCH 51, Erscheinen der Blüten),
- 18.09.2008 (BBCH 71, Fruchtentwicklung).

Die hyperspektralen Bilder wurden anschließend in die Bildverarbeitungssoftware ENVI (www.exelisvis.com) importiert und ausgewertet. Als erstes erfolgte die Markierung von typischen Stängel- und Blattregionen an beiden Pflanzen. Aus den in diesen Regionen enthaltenen Pixeln erfolgte die Erzeugung der normalisierten mittleren Reflexionsspektren.

Es wurden zwei Wellenlängen gesucht, die für eine Unterscheidung der zwei Pflanzenarten aussichtsreich erschienen. Dazu erfolgte die Berechnung des Spektralwinkels Alpha, welcher die Differenz in der mittleren Reflexion jeweils zweier Wellenlängen i und j zwischen jeweils zwei Gewebeklassen w und z angibt:

$$\alpha = \arccot \frac{refl_w}{refl_j} - \arccot \frac{refl_z}{refl_i}$$

Alle so berechneten Spektralwinkel zwischen jeweils zwei Gewebeklassen wurden in einem Intensitätsdiagramm für jeden der vier Termine gegeneinander aufgetragen. Die Diagramme zeigen die Höhe der Winkeldifferenz und ihre Anhäufung. Große Winkeldifferenzen mit klarer Anhäufung deuten auf eine Wellenlängenkombination hin, mit der eine Klassifizierung möglich erscheint.

In ENVI wurden danach in den Pflanzenbildern wiederum Blatt- und Stielregionen markiert, die nicht mit denen für die Referenzspektren verwendeten identisch waren. Für jeden der vier Messzeitpunkte wurden Verhältnisdiagramme der Reflexion unter Verwendung der zwei anhand der Intensitätsdiagramme vorher ermittelten Wellenlängen erstellt. Diese Diagramme zeigten, ob eine deutliche Gruppierung der vier Gewebeklassen gegeben war.

Für die Erzeugung eines Schwarz-Weiß-Binärbildes erfolgte zunächst die Erstellung eines Verhältnisgraustufenbildes unter Verwendung der gefundenen zwei Wellenlängen in ENVI. Durch die Verwendung eines unteren und oberen Schwellenwertes wurde danach versucht, die Stiele der Beifuß-Ambrosie-Pflanze zu diskriminieren. Alle Pixel im Verhältnisbild, die innerhalb des Schwellenwertbereiches lagen, wurden weiß markiert, alle anderen schwarz.

Ergebnisse

Referenzspektren

Die normierten mittleren Referenzspektren sind in Abbildung 1 dargestellt.

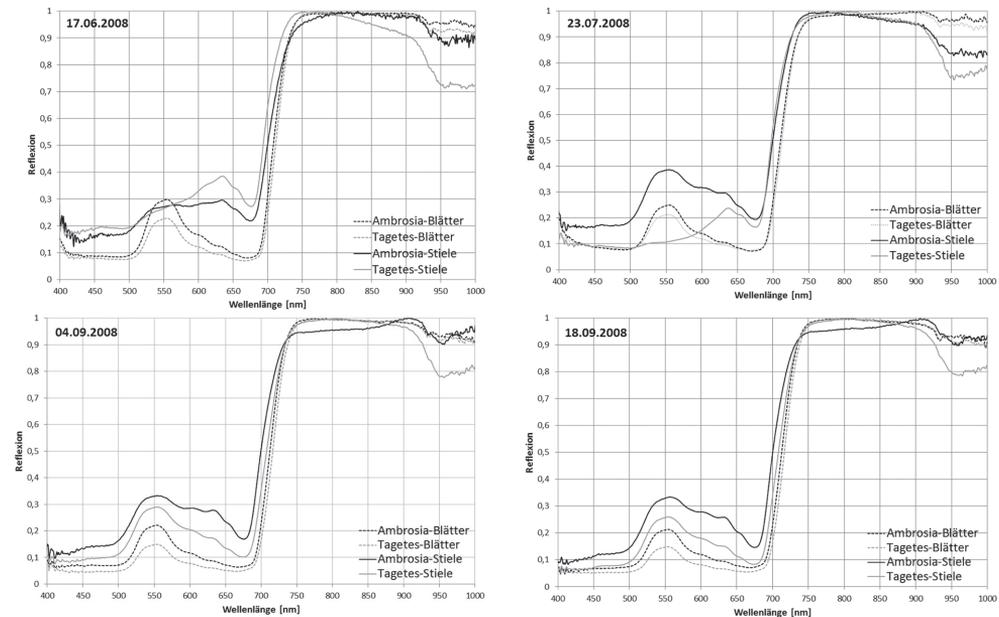


Abb. 1 Normalisierte mittlere Referenzspektren der Stiele bzw. Blätter von Beifuß-Ambrosie und Tagetes an den vier Messterminen.

Fig. 1 Normalized mean reflectance spectra from stems and leaves resp. of common ragweed and marigold at the four measurement times.

Eindeutige spektrale Unterschiede in den Blättern beider Pflanzenarten sind an allen vier Messterminen nicht zu erkennen. Die Reflexion der Beifuß-Ambrosien-Blätter war im Verlauf der Spektren nur unwesentlich höher als die der Tagetes. Unterschiede traten hinsichtlich der Stiele der zwei Pflanzenarten besonders an den zwei ersten Messterminen auf. Die Reflexion der Stiele beider Pflanzenarten nahm im Gegensatz zu den Blättern, mit Ausnahme des Tagetes-Stieles am zweiten Termin, vom Grünbereich (550 nm) zum Rotbereich (640 nm) zu. An den beiden letzten Terminen war der Verlauf der Spektren von Blatt und Stiel wieder ähnlich.

Intensitätsdiagramme

Die Intensitätsdiagramme spiegeln sich an der 1:1-Linie. In Abbildung 2 sind die Spektralwinkeldifferenzen der Gewebevergleiche Beifuß-Ambrosie-Stiel mit Tagetes-Stiel bzw. Beifuß-Ambrosie-Stiel und Tagetes-Blatt an den vier Messterminen dargestellt. Die Spektralwinkeldifferenz nimmt von dunkel zu hell zu.

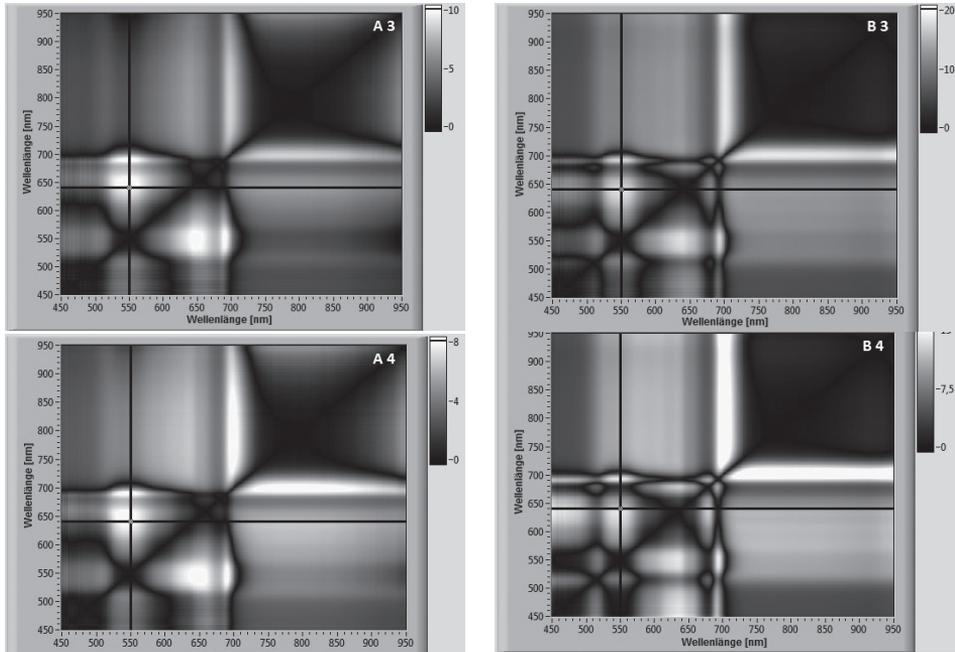


Abb. 2 Intensitätsdiagramme der Spektralwinkeldifferenz von jeweils zwei Gewebeklassen an den vier Messterminen. (A) Beifuß-Ambrosie-Stiel mit Tagetes-Stiel, (B) Beifuß-Ambrosie -Stiel mit Tagetes-Blatt, Index (1) 17.06.2008, (2) 23.07.2008, (3) 04.09.2008, (4) 18.09.2008.

Fig. 2 Intensity graphs of the spectral angle difference of two tissue classes at the four measurement times. (A) common ragweed-stem with marigold-stem, (B) common ragweed-stem with marigold-leaf, index (1) 17.06.2008, (2) 23.07.2008, (3) 04.09.2008, (4) 18.09.2008.

Eine deutliche Häufung hoher Spektralwinkeldifferenzen war in allen acht Gewebeklassen-/Termin-Kombinationen bei etwa 550 nm (x-Achse) und 640 nm (y-Achse) zu erkennen. Die Kreuzung der zwei in den Diagrammen bei 550 nm (x-Achse) und 640 nm (y-Achse) zusätzlich eingezeichneten schwarzen Linien befindet sich etwa in der Mitte dieser Anhäufung.

Verhältnisdigramme Reflexion 550 nm/640 nm

Zur Klärung der Frage, ob die in den Intensitätsdiagrammen gefundenen zwei Wellenlängen zu einer Klassifizierung der vier Gewebetypen führen, erfolgte die Generierung von Verhältnisdigrammen (Abb. 3).

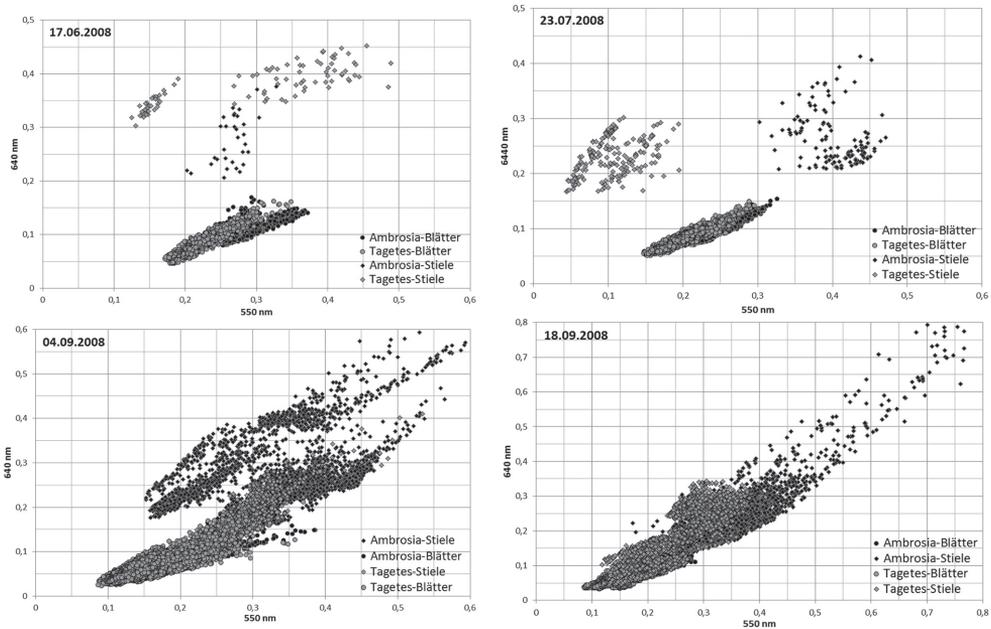


Abb. 3 Verhältnisdiagramme der Reflexion 550 nm/640 nm der Stiel- bzw. Blatt-Pixel von Beifuß-Ambrosie bzw. Tagetes an den vier Messterminen.

Fig. 3 Two-wavelength ratio plots of the reflection 550 nm/640 nm of the stem and leaf pixels of common ragweed and marigold at the four measurement times.

Eine deutliche Klassenbildung ist nur zum zweiten Messtermin am 23.07.2008 zu erkennen, während an den anderen drei Terminen die Pixel der vier Gewebeklassen mehr oder weniger stark zusammenfließen. Beifuß-Ambrosie-Stiel und Tagetes-Stiel sind am 23.07. klar in zwei Klassen geteilt, wobei Beifuß-Ambrosie -Blatt und Tagetes-Blatt zusammen eine Klasse bilden und daher nicht zu trennen sind.

Schwarz-Weiß-Binärbilder

Zunächst erfolgte in ENVI die Erstellung von Graustufenbildern des Reflektionsverhältnisses 550 nm/640 nm. Anschließend wurde als minimaler Schwellenwert des Verhältnisses 0,7 und als maximaler Schwellenwert 1,2 gewählt. In der Prozedur der Binarisierung wurden allen Pixeln innerhalb des Minimums und Maximums der Grauwert für weiß, allen anderen Pixeln der für schwarz zugeordnet. Als Beispiel ist in Abbildung 4 das Original- und Binärbild vom 23.07.2008 dargestellt. Es wurden zwar in der Mehrzahl Stiele erkannt, allerdings für beide Pflanzenarten, so dass keine ausreichende Klassifizierung möglich war.



Abb. 4 Links: Originalbild, rechts: klassifiziertes Binärbild (550 nm/640 nm, Schwellenwert Min.: 0,7, Max.: 1,2) von Beifuß-Ambrosie und Tagetes vom 23.07.2008.

Fig. 4 Left: original image, right: binary image (550 nm/640 nm, threshold min.: 0,7, max.: 1.2) from common ragweed and marigold at 23.07.2008.

Diskussion

Die vorliegenden Untersuchungen bestätigen die bereits in den Arbeiten zur Unterscheidung von Beifuß-Ambrosie und Beifuß erhaltenen Ergebnisse (DAMMER *et al.*, 2012, 2013), dass eine automatisierte spektrale Bestimmung von Beifuß-Ambrosie anhand der Blätter nicht möglich ist. Die Grundfärbung von Blättern aller höheren Pflanzen ist grün mit ähnlichen spektralen Eigenschaften. Dabei kann die spektrale Variabilität innerhalb einer Pflanzenart genauso hoch sein wie die Variabilität zwischen Pflanzenarten. Aus der Literatur sind jedoch auch Berichte bekannt, die in Spezialfällen meist Unkräuter von Kulturpflanzen unterscheiden. So konnten HERRMANN *et al.* (2013) Gräser, breitblättrige Unkräuter, Kulturpflanze und Boden anhand von Hyperspektralbildern klassifizieren. Eine artenspezifische Unterscheidung von Unkräutern allein durch spektrale Eigenschaften wird jedoch aufgrund der Artenvielfalt von ZWIGGELAAR (1998) für nicht möglich angesehen. Als Alternative zur spektralen Unterscheidung von Pflanzenarten anhand der Blätter hat sich die Verwendung von Formenparametern bewährt (GERHARDS und OEBEL, 2006; KLUGE und NORDMEYER, 2009). PETEINATOS *et al.* (2013) beschreiben in einem aktuellen Review-Artikel verschiedene Methoden der sensorbasierten Unkrautdetektion. Die Überlappung der Blätter stellt diese Methoden jedoch vor ein Problem. Eine Alternative kann die Implementierung der spektralen Information der Stiele sein (EL-FAKI *et al.*, 2000). Pflanzen- bzw. Blattstiele besitzen meist eine charakteristische Färbung. In Bezug auf die Klassifizierung von Beifuß-Ambrosie und Beifuß war eine Unterscheidung anhand der Stiele sowohl im sichtbaren Bereich als auch im nahen Infrarotbereich allerdings nur in einem begrenzten Zeitfenster im September zur Zeit der Fruchtbildung möglich (DAMMER *et al.*, 2012, 2013). Zur Absicherung dieser Ergebnisse sollten mehrjährige Untersuchungen an verschiedenen Standorten (licht- und schattenexponiert) erfolgen. Die Detektionszeit im September liegt außerhalb der Bekämpfungsspanne in Kulturpflanzenfeldern. Auf Ödland und an Straßenrändern kann jedoch auch zu diesem Zeitpunkt eine Bekämpfung z.B. mit Totalherbiziden erfolgen.

Im vorliegenden Unterscheidungsproblem Beifuß-Ambrosie gegenüber Tagetes waren gerade in den September-Messterminen die Spektralverläufe von Blättern und Stielen beider Pflanzenarten ähnlich. Zu den zwei ersten Terminen im Juni und Juli waren zwar Unterschiede erkennbar, die jedoch nicht für eine erfolgreiche Klassifizierung ausreichten. Die Pflanzen waren zu dieser Zeitperiode in der vegetativen Phase. Während dieser Periode des Wachstums wurden vor allem Blätter gebildet. Das Längenwachstum trat erst später ein, so dass noch nicht genügend Stängelmasse vorhanden war (siehe Abbildung 4 linkes Bild), was eine mögliche Ursache für eine fehlgeschlagene Klassifizierung sein könnte.

Wie schon bei der Unterscheidung von Beifuß-Ambrosie und Beifuß (DAMMER *et al.*, 2012, 2013) wurde in den vorliegenden Untersuchungen zur Unterscheidung von Beifuß-Ambrosie und Tagetes die Änderung der Referenzspektren während der Vegetationsperiode bestätigt (siehe Abbildung 1). Das Erstellen von spektralen Datenbanken, die das Wachstumsstadium der Pflanze berücksichtigen, ist daher empfehlenswert. Auf diese könnte dann bei einer automatisierten kameragestützten Erfassung von Beifuß-Ambrosie eventuell auch unter Einbeziehung von Textur- und Formenparameter bei der Bilderkennung zurückgegriffen werden.

Literatur

- AUDA, Y., C. DECHAMP, G. DEDIEU, F. BLASCO, D. DUISIT und J.L. PONTIER, 2008: Detection of invasive plants using remote sensing: a case study of ragweed in the Rhone-Alps region, France. *Int J Remote Sens.* 29, 1109-1124.
- BOHREN, C., N. DELABAYS, G. MERMILLOD, C. KEIMER und C. KÜNDIG, 2005: *Ambrosia artemisiifolia* in der Schweiz – eine herbologische Annäherung. *Agrarforschung* 12, 71-78.
- BOHREN, C., G. MERMILLOD und N. DELABAYS, 2008: *Ambrosia artemisiifolia* L.-Control measures and their effects on its capacity of reproduction. *J. Plant Dis. Protect. Special Issue XXI*, 311-316.
- BRANDES, D. und J. NITZSCHE, 2007: Verbreitung, Ökologie und Soziologie von *Ambrosia artemisiifolia* L. in Mitteleuropa. *Tuexenia* 27, 167-194.
- BUZSAKI, K., G. KAZINCZI, I. BERES und E. LEHOCZKY, 2008: The allelopathic effects of yellow nutsedge (*Cyperus esculentus* L.) on cultivated plants and common ragweed *Ambrosia artemisiifolia* L. *J. Plant Dis. Protect. Special Issue XXI*, 327-331.
- DAMMER, K.-H., J. INTRESS, H. BEUCHE, J. SELBECK und V. DWORAK, 2012: Discrimination of *Ambrosia artemisiifolia* L. and *Artemisia vulgaris* L. by hyperspectral image analysis during the growing season. *Weed Res.* 53, 146-156.
- DAMMER, K.-H., J. INTRESS, H. BEUCHE, J. SELBECK und V. DWORAK, 2012: Hyperspektrale Bildanalyse zur Detektion von Beifußblättriger Ambrosie (*Ambrosia artemisiifolia*). In: *Massendatenmanagement in der Agrar- und Ernährungswirtschaft*. CLASEN, M., K. C. KERSEBAUM, A. MEYER-AURICH, A., B. THEUENSEN. Bonn, Köllen Druck und Verlag, 59-62.
- EL-FAKI, M.S, ZHANG, N. und D.E. PETERSON 2000: Factors affecting color-based weed detection. *Transac. ASAE* 43, 1001-1009.
- FUMANAL, B., C. GIROD, G. FRIED, F. BRETAGNOLLE und B. CHAUVEL, 2008: Can the large ecological amplitude of *Ambrosia artemisiifolia* explain its invasive success in France? *Weed Res.* 48, 349-359.
- GERBER, E., U. SCHAFFNER, A. GASSMANN, H.L.HINZ, M. SEIER und H. MÜLLER-SCHÄRER, 2011: Prospects for biological control of *Ambrosia artemisiifolia* in Europe: learning from the past. *Weed Res.* 51, 559-573.
- GERHARDS, R. und H. OEBEL, 2006: Practical experiences with a system for site-specific weed control in arable crops using real-time image analysis and GPS-controlled patch spraying. *Weed Res.* 46, 185-193.
- GIBSON, K.D., R. DIRKS, C.R. MEDLIN und L. JOHNSTON, 2004: Detection of weed species in soybean using multispectral digital images. *Weed Technol.* 18, 742-749.
- HERRMAN, I., SHAPIRA, U., KINAST, A. und D.J. BONFIL, 2013: Ground-level hyperspectral imagery for detecting weeds in wheat fields. *Precision Agric.* 14, 637-659.
- KAZINCZI, G., BERES, I., ONOFRI, A., NADASY, E., TAKACS, A., HORVATH, J. und M. TORMA, 2008: Allelopathic effects of plant extracts on common ragweed *Ambrosia artemisiifolia* L. *J. Plant Dis. Protect. Special Issue XXI*, 335-339.
- KLUGE, A. und H. NORDMEYER, 2009: Automated weed detection in winter wheat by using artificial neural network. *Precis. Agr.* 10, 321-327.
- LANCASHIRE, P.D., H. BLEIHOLDER, P. LANGENLÜDDECKE, R. STAUSS, T. VANDENBOOM, E. WEBER und A. WITZEN-BERGER, 1991: A uniform decimal code for growth stages of crops and weeds. *Ann. App. Biol.* 119, 561-610.
- LOPEZ-GRANADOS, F., 2011: Weed detection for site-specific weed management: mapping and real-time approaches. *Weed Res.* 51, 1-11.
- LÜDKE, H.J., 2009: Ragweed-Allergie in Brandenburg. *Allergologie* 32, 402.
- OKIN, G.S., D.A. ROBERTS, B. MURRAY und W.J. OKIN, 2001: Practical limits on hyperspectral vegetation discrimination in arid and semiarid environments. *Remote Sens Environ.* 77, 212-225.
- PETEINATOS, G.G., WEIS, M., ANDUJA, D., AJALA, V.R. und R. GERHARDS, 2013: Potential use of ground-based sensor technologies for weed detection. *Pest Manag. Sci.*, wileyonlinelibrary.com, DOI 10.1002/ps.3677
- TAMAS, J., P. REISINGER, P. BURAI und I. DAVID, 2006: Geostatistical analysis of spatial heterogeneity of *Ambrosia artemisiifolia* on Hungarian acid sandy soil. *J. Plant Dis. Protect. Special Issue XX*, 227-232.
- ZWIGGELAAR, R., 1998: A review of spectral properties of plants and their potential use for crop/weed discrimination in row-crops. *Crop Prot.* 17, 189-206.