

Jörn Selbeck, Volker Dworak, Matthias Hoffmann und Karl-Heinz Dammer

Vegetationserkennung für landwirtschaftliche Anwendungen mithilfe einer Ein-Chip-Kamera

Durch die Anwendung von Kameras bei der Prozesskontrolle in der Präzisionslandwirtschaft können Dünger, Pestizide, Maschinenzeit und Treibstoff eingespart werden. Trotz der hohen Forschungsaktivitäten auf diesem Gebiet verhindern hohe Preise für geeignete Kamerasysteme die Anwendung in allen Bereichen der Landwirtschaft. Intelligente und kostengünstige Kameras, die für landwirtschaftliche Anwendungen angepasst werden, können diesen Nachteil überwinden. Der normalisierte differenzierte Vegetationsindex (NDVI) ist ein Algorithmus in der Bildanalyse zur Trennung von Pflanze und Boden (Hintergrund) und wird in der hier vorgestellten Untersuchung bei einer kostengünstigen Ein-Chip-Kamera implementiert und angepasst.

eingereicht 7. April 2014

akzeptiert 29. April 2014

Schlüsselwörter

Intelligente Kamera, NDVI, Bildverarbeitung, Pflanzensensor, eingebettetes System

Keywords

Smart camera, NDVI, image processing, plant sensor, embedded system

Abstract

Selbeck, Jörn; Dworak, Volker; Hoffmann, Matthias and Dammer, Karl-Heinz

Vegetation detection in agricultural applications with a single-chip camera

Landtechnik 69(3), 2014, pp. 114–119, 8 figures, 12 references

The application of (smart) cameras for process control as an element of precision farming saves fertilizer, pesticides, machine time and fuel. Although research activities have increased in this topic, high camera prices reflect low adaptation to applications in all fields of agriculture. Smart and low-cost cameras adapted to agricultural applications can overcome this drawback. The normalized difference vegeta-

tion index (NDVI) is an applicable algorithm to discriminate between plant and soil information (background). In this study, the advantage of a smart one-chip camera design with an adapted algorithm for NDVI image performance is demonstrated in terms of low cost and simplified design.

■ Forschungsaktivitäten auf dem Gebiet der Präzisionslandwirtschaft konzentrieren sich auf die Reduzierung von Kohlendioxid, Umweltbelastung und Kosten, indem der Betriebsmitteleinsatz optimiert wird. Um die Effizienz in der Landwirtschaft zu erhöhen, werden verschiedene Informationen oder Datenbanken gebündelt [1; 2; 3]. Pflanzenanzahl, Bedeckungsgrad oder Biomasse sind typische Informationen, die mithilfe von Sensoren ermittelt werden können [4]. Die Informationen können direkt auf der landwirtschaftlichen Maschine verarbeitet werden und beispielsweise eine Feldspritze steuern [5]. Der Bedeckungsgrad kann anhand von NDVI-Bildern auf dem Schlag lokalisiert werden [2]. Der NDVI wird benutzt, um Bildpunkte mit chlorophyllaktivem Pflanzenmaterial von Bildpunkten mit abgestorbenem Pflanzenmaterial und Boden zu unterscheiden. Die Unterscheidung erfolgt dabei mit zwei Wellenlängenbereichen: im roten (620 bis 660 nm) und im nahen Infrarot (NIR, > 780 nm). Hierbei wird der unterschiedliche Reflexionsgrad der aktiven Pflanze im Vergleich zu ihrer Umgebung (Boden) ausgenutzt. Die Pflanze absorbiert überwiegend den roten Anteil und reflektiert den NIR-Anteil im Gegensatz zum Boden und zum inaktiven Pflanzengewebe [6; 7]. Hochwertige Pflanzen- oder NDVI-Kameras verwenden mindestens zwei CCD-Chips (z. B. DuncanTech MS2100 oder MS3100, Redlake Inc., San Diego, CA, USA). Die Justierung der Chips macht die Kameras

allerdings auch so teuer, dass sie nur in der Forschung eingesetzt werden. Im Gegensatz dazu ist bei der Ein-Chip-Kamera, wie sie hier vorgestellt wird, keine Justierung erforderlich. Stattdessen benötigt sie einen Doppelbandpassfilter für das rote und das NIR-Band. Rabatel et al. [8] zeigen die prinzipielle Möglichkeit, Standardkameras mit austauschbaren Filtern für Rot und NIR zu nutzen. Typischerweise besitzen Kamerasysteme Regelkreise für die Belichtungszeit und den Weißabgleich. Durch den Filterwechsel funktionieren diese Regelkreise nicht mehr korrekt, was zu Überbelichtung und Fehlinterpretationen führt [9]. Daher muss auch in die Kamerakontrolle eingegriffen werden und der NDVI-Algorithmus modifiziert werden.

Die hier vorgestellte Ein-Chip-Kamera aus dem Niedrigpreissegment (USB uEye LE Kamera, type UI-1226LE, von Imaging Development Systems GmbH, Obersulm, Germany, ca. 230 €) dient als Basis für ein neues NDVI-Kamerasystem im Vergleich zur 3-Chip-Kamera DuncanTech MS2100. Die Nachteile des Standard-NDVI-Algorithmus für die Ein-Chip-Kamera werden diskutiert und Lösungen in Form von erweiterten NDVI-Algorithmus werden demonstriert. Ziel ist es, eine kostengünstige Feldkamera mit geeigneten Algorithmen auszustatten, die mit typischen Beleuchtungssituationen auf dem Schlag zurechtkommt, ohne dass der Schwellenwert nachgeführt werden muss.

Material und Methoden

Im Folgenden wird kurz die Verwendung des NDVI in einer Multispektral-Kamera (15 000 €) gezeigt, die für wissenschaftliche Zwecke eingesetzt wird. Des Weiteren wird detaillierter auf die Änderungen des NDVI-Algorithmus eingegangen, die für den Einsatz bei einer Ein-Chip-Kamera erforderlich sind. Anstelle des NIR-Cut-Off-Filters einer Ein-Chip-Kamera, der standardmäßig den NIR-Wellenlängenbereich > 650 nm blockt, wurden zwei verschiedene Filter benutzt: ein Low-Pass-Filter mit einer Kantenwellenlänge von 645 nm (RG645, Schott AG, Mainz, Deutschland) und ein Doppelbandpassfilter, der speziell für dieses Projekt angefertigt wurde (ET620_60bp_780_900bp von Chroma Technology GmbH, Olching, Deutschland). Der Low-Pass-Filter lässt Wellenlängen > 645 nm (geringere Energie) passieren und stoppt Wellenlängen < 645 nm (höhere Energie). Der Doppelbandpassfilter besitzt zwei spezifische Bänder mit 620–660 nm und 780–900 nm, in denen Licht mit diesen Wellenlängen den Filter passieren können; alle anderen Wellenlängen werden gesperrt. Diese Änderungen am Ein-Chip-Setup erlaubt nun die Detektion des NIR-Bereichs und blendet den blauen und grünen Bereich aus.

NDVI

Mittels des NDVI lassen sich chlorophyllaktive Pflanzen vom Boden und von totem Pflanzenmaterial unterscheiden. Dies ist mit dem Grünkanal einer RGB-Kamera nicht zu erreichen. Der NDVI nutzt hierbei die große Absorption im roten Wellenlängenband und die große Reflexion im NIR-Bereich chlorophyllaktiver Pflanzen gegenüber der annähernd identischen

Reflexion/Absorption für nicht aktive Pflanzen oder Boden aus Gleichung 1:

$$NDVI = \frac{NIR - Rot}{NIR + Rot} \quad (Gl. 1)$$

Gleichung 1 kann in einer Multispektralkamera direkt auf die Bilder des Rot-Kanals und NIR-Kanals angewendet werden. Mithilfe eines geeigneten Schwellenwerts kann das NDVI-Bild binarisiert werden, wobei im optimalen Fall chlorophyllaktive Pflanzen als weiße Pixel (Wert = 1) und alle anderen Pixel als schwarze Pixel (Wert = 0) dargestellt werden. Hieraus kann dann beispielweise der Bedeckungsgrad berechnet werden.

Ein-Chip-Pflanzenkamera

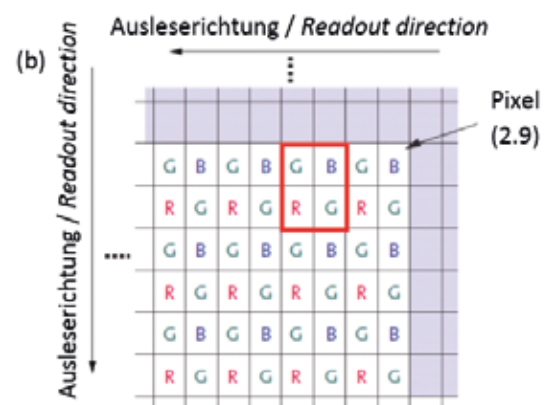
Für das Design der Ein-Chip-Kamera, welche unter Feldbedingungen arbeiten soll, sind die ungünstigsten Bedingungen anzunehmen. Die entwickelten Algorithmen müssen auf den verwendeten RGB-Kamerachip abgestimmt werden, wobei der Weg der Umsetzung bis hin zum Digitalbild einige Hürden enthält [10].

Spektrale Antwort einer RGB-Ein-Chip-Kamera

In der Studie wird eine Ein-Chip-Kamera der Firma IDS mit dem Aptina-Chip MT9V032STC-CMOS-Bildsensor mit 752 H × 480 V Pixel (Aptina Imaging Corporation, San Jose, CA, USA) genutzt. Diese Kamera hat aufgrund ihres Bildsensors den Vorteil, dass nach der Entfernung des NIR-Cut-Off-Filters alle Pixel (rot, grün, blau; **Abbildung 1**) im NIR-Bereich empfindlich sind (**Abbildung 2**) und Informationen aus diesem Wellenlängenbereich detektieren können [11].

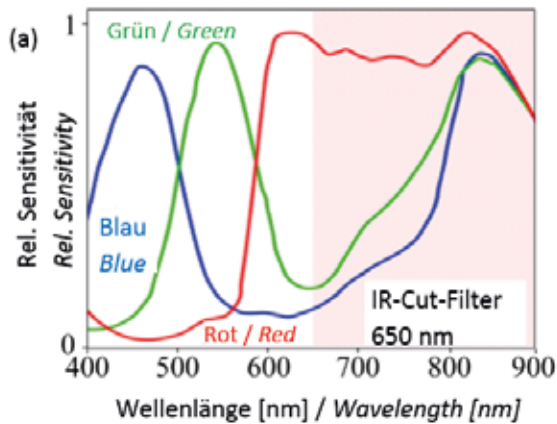
Anstelle des NIR-Cut-Off-Filters kann nun ein Low-Pass-Filter installiert werden. Dieser blendet wie oben beschrieben den blauen und grünen Bereich aus (**Abbildung 3**), sodass neue Informationen generiert werden, die mit den ehemaligen RGB-Pixeln detektiert werden können. Der ehemalige R-Kanal ent-

Abb. 1



Anordnung der Farbpixel gemäß Bayer-Muster
(Quelle: Aptina Datenblatt)
Fig. 1: Bayer pattern (source: Aptina datasheet)

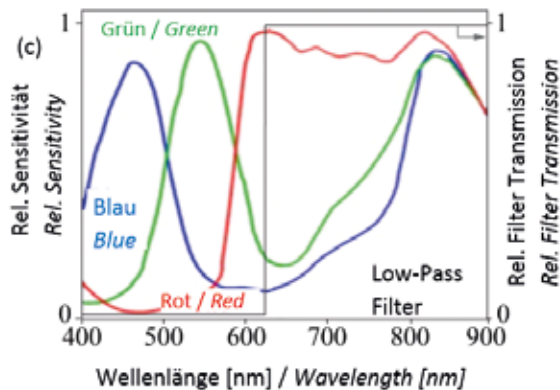
Abb. 2



Spektrale Antwort des CMOS-Kamerachips MT9V032STC (IDS Datenblatt)

Fig. 2: Spectral response of the MT9V032STC CMOS image sensor (IDS datasheet)

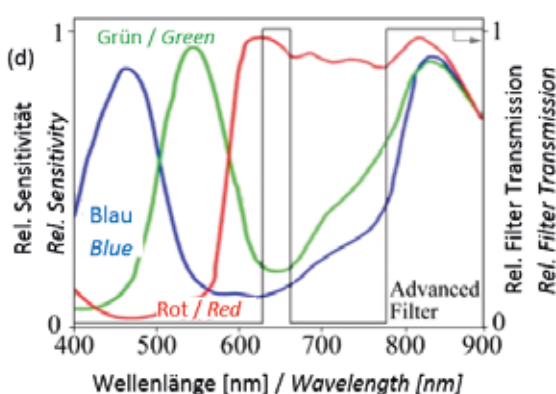
Abb. 3



Aufbau zur Nutzung von Rot- und NIR-Informationen mittels eines idealen Low-Pass-Filters

Fig. 3: Enabling the RGB CMOS chip for red and NIR sensitivity through ideal low-pass filter

Abb. 4



Aufbau zur Nutzung von Rot- und NIR-Informationen mittels eines idealen Doppelbandpassfilters

Fig. 4: Enabling the RGB CMOS chip for red and NIR sensitivity through ideal double band pass filters

Abb. 5



Falschfarbenbild der modifizierten Kamera, Unkraut in Winterweizen (Foto: J. Selbeck, V. Dworak, M. Hoffmann)

Fig. 5: False color image of the modified camera, weed in winter wheat

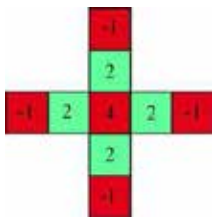
hält nun rote und NIR-Informationen (R+NIR), die Kanäle Blau und Grün enthalten nur NIR-Informationen. Um eine bessere Separation zwischen Rot und NIR zu erreichen, ist der Low-Pass-Filter durch einen Doppelbandpassfilter ersetzt worden (**Abbildung 4**). Durch diesen Filter wird der Übergangsbereich zwischen Rot und NIR ausgeblendet, wodurch der Wellenlängenbereich mit den darin enthaltenen Informationen, die die Pixel repräsentieren, geschärft wird. Die Kamera kann nun als NDVI-Kamera verwendet werden. **Abbildung 5** zeigt ein Falschfarben-NDVI-Bild mit der typischen Rot/Weiß-Färbung. Die Rotfärbung entsteht durch die Empfindlichkeit des Rot-Kanals im roten und NIR-Bereich (**Abbildung 4**). Die Weißfärbung entsteht durch die Empfindlichkeit aller drei Kanäle im NIR-Bereich. Da die Pflanzen das NIR-Licht besonders stark reflektieren, erscheinen sie im Bild weiß.

Das Bild in **Abbildung 5** ist unter Streulichtbedingungen, d. h. mit homogener Ausleuchtung, gemacht worden. Bilder bei direkter Sonneneinstrahlung und die damit verbundene Problematik werden im Folgenden diskutiert.

Demosaikierung oder Debayering

Gemäß dem Bayer-Muster (**Abbildung 1**) kann jedes Pixel einer Ein-Chip-Kamera nur einen Farbbereich detektieren. Das Interpolationsverfahren, das die beiden fehlenden Farbbereiche für das physisch vorhandene Pixel berechnet, wird als Demosaikierung bezeichnet. Aus der Vielzahl von Interpolationsalgorithmen soll hier der von Malvar et al. gezeigt werden (**Abbildung 6**). Diese Algorithmen basieren alle auf einer Szenenannahme, die ein Bild derart interpolieren, dass es für das menschliche Auge der Realität nahe kommt. Das in **Abbildung 6** gezeigte Demosaikierungsbeispiel zeigt, dass verschiedene Farbkkanäle zur Interpolation herangezogen werden. Dies eliminiert allerdings die Information, die in den Kanälen der NDVI-Kamera enthalten ist. Wenn ein Pixelversatz akzeptabel ist, kann das rot umrandete Quadrupel in **Abbildung 1** als ein NDVI-Pixel zusammengefasst werden und der NDVI-Algorithmus kann an diese Kamera angepasst werden.

Abb. 6



Demosaikierungsbeispiel mit Koeffizienten nach Malvar et al. [12]
 Fig. 6: Example of a demosaicing pattern with coefficients corresponding to Malvar et al. [12]

Adaptierter NDVI für eine Ein-Chip-Kamera

Aufgrund des veränderten Informationsgehalts der Kanäle einer Ein-Chip-Kamera muss der NDVI-Algorithmus adaptiert werden. Wie oben bereits erwähnt enthält der R-Kanal der Ein-Chip-Kamera rote und NIR-Informationen, während der G-Kanal und der B-Kanal nur die NIR-Informationen enthalten; somit verändert sich der Algorithmus nach Gleichung 2:

$$NDVI = \frac{NIR-R}{NIR+R} \rightarrow NDVI_{CMOS} = \frac{(B+G)-R}{R} \quad (Gl. 2)$$

Da der verwendete Bildsensor im Bereich um 850 nm für alle drei Farbkanäle nahezu identische Empfindlichkeiten zeigt, ist auf eine individuelle Verstärkungsanpassung je Kanal verzichtet worden.

Verstärkungskontrolle

Für eine korrekte Berechnung des NDVI ist es unerlässlich, dass keine Bildpunkte in Sättigung (übersteuert) sind. Bei Standard-RGB-Kameras wird der Grünkanal für die Belichtungsregelung genutzt. Da bei der Ein-Chip-Kamera jedoch der Rot-Kanal aufgrund der Addition von rotem und NIR-Bereich am ehesten in Sättigung geht, ist ein eigener automatischer Verstärkungskontrollalgorithmus entwickelt worden. Einige Kamerasensoren liefern direkt ein Histogramm der Intensitätsverteilung der Pixel, bei anderen muss es mithilfe einer zusätzlichen Software generiert werden. Wenn es im Histogramm bei höchster Intensität Pixel gibt, muss die Verstärkung herabgesetzt werden. Andererseits kann die Verstärkung heraufgesetzt werden, wenn in der höchsten und in der zweithöchsten Intensität keine Pixel vorhanden sind. Die Verstärkung startet mit einer mittleren Einstellung und wird entsprechend des Histogramms um die Hälfte der Verstärkung erhöht oder erniedrigt, so wie es beispielsweise bei einem Analog-zu-Digital Konverter mit sukzessivem Approximationsregister geschieht. Eine implementierte Hysterese sorgt für die nötige Stabilität der Verstärkung, damit diese nicht um einen Wert schwingt. Die Kamera ist über einen USB-2.0-Port mit einem PC verbunden. Die Kontrolle der Verstärkung und der Bildrate erfolgt mit der Software MatLab (The Mathworks, Natick, Massachusetts, USA).

Messbedingungen

Wie oben angedeutet sind Messungen bei einer homogenen Bewölkung, die reines Streulicht produziert, am besten, da sich keine harten Schlagschatten ausbilden. Dagegen sind strahlender Sonnenschein mit hartem Schlagschatten schwierige Bedingungen für den NDVI-Algorithmus, da der dynamische Bereich deutlich größer sein muss, um eine Quantifizierung zu berechnen. Des Weiteren ändert sich auch das Verhältnis zwischen Rot- und NIR-Anteil, da die Streuung der beiden Wellenlängenbereiche in der Atmosphäre und bei bewölktem Himmel unterschiedlich stark ist. Die Änderung geht mit der vierten Potenz der Wellenlänge ein. Ebenfalls ist das Transmissionsverhalten des Lichts bei beiden Wellenlängenbereichen an Blättern gegenläufig zu den Streueigenschaften in der Atmosphäre. Betrachtet man den NDVI, kann es daher sein, dass Bodenflächen im Schatten heller erscheinen als im Sonnenlicht.

Ergebnisse und Diskussion

Es konnte bereits gezeigt werden, dass die Ein-Chip-Kamera unter idealen Bedingungen gut arbeitet (**Abbildung 5**). Das Problem mit direktem Sonnenlicht wird in **Abbildung 7** verdeutlicht: das Rohdatenbild (a), das Falschfarbenbild nach der Umrechnung (b) das nach Gleichung 2 berechnete NDVI-Bild (c) und das Binärbild (d).

Da beim binarisierten Bild im Schattenbereich fast kein Kontrast zwischen Pflanze und Boden zu sehen ist, enthält dieses Binärbild einen großen Anteil an falsch klassifizierten Pixeln. Dies bedeutet, dass der NDVI-Algorithmus erweitert werden muss, damit auch diese Lichtverhältnisse abgedeckt werden können. Anhand der Minimum- und Maximumwerte der Pixelintensitäten können Rückschlüsse auf den dynamischen Bereich und die Lichtverhältnisse gezogen werden. Folgende Probleme müssen gelöst werden, um eine brauchbare Ein-Chip-Kamera für den Einsatz als Pflanzenkamera zu erhalten:

- Der $NDVI_{CMOS}$ ist aufgrund der Empfindlichkeit des R-Kanals für rote und NIR-Wellenlängen anfälliger für überbelichtete Pixel.
- Der Schwellenwert für die Binarisierung schwankt für Bereiche im direkten Sonnenlicht gegenüber Bereichen im Schatten.
- Selbst unter Streulicht ist der Schwellenwert nicht einfach zu bestimmen, da sich die Werte für Boden und Pflanze überlappen.
- Ein erweiterter Algorithmus sollte einfach gehalten werden, damit dieser auch in eingebetteten Systemen implementierbar ist.

Bereichserweiterter NDVI

Die meisten eingebetteten Systeme haben deutlich weniger Rechenleistung als ein PC. Daher muss bei der Implementierung des NDVI darauf geachtet werden, dass andere wichtige Berechnungen wie die automatische Verstärkungsanpassung ebenfalls in das System integriert werden. Aufgrund der hohen NIR-

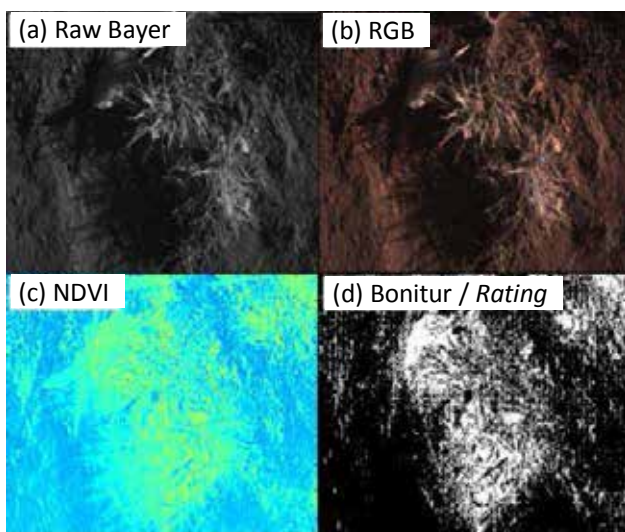
Reflexion bei Pflanzen, kann als erster Schritt die Gleichung durch eine Multiplikation mit dem NIR-Wert erweitert werden:

$$NDVI_{CMOS} = \frac{(B+G)-R}{R} * \frac{B+G}{2} \quad (Gl. 3)$$

Hierdurch wird der Kontrast zwischen Pflanze und Boden erhöht, da die Intensität von Pixeln, die den Boden repräsentieren, reduziert wird. Eine Misklassifizierung (**Abbildung 7**) wird mit Gleichung 3 nahezu vollständig eliminiert. Die Löschung von Einzelpixeln und ein 5x5-Gauß-Filter erhöhen die Klassifizierungssicherheit. Dieser Algorithmus kann problemlos in einem eingebetteten System untergebracht werden. Dieses Gesamtsystem ist für den Einsatz auf Feldspritzen – auch teilbreitenspezifisch – einsetzbar, nicht zuletzt auch aufgrund des geringen Preises. Die Informationen können ebenfalls für die Maskierung genutzt werden, um weitere Analysen von Form und Kontur durchzuführen oder um die NDVI-Information quantitativ auszuwerten. Bei direktem Sonnenlicht ändern sich vor allem der dynamische Bereich, den die Kamera abdecken muss, und – wie bereits beschrieben – die Verhältnisse der Intensitäten. Dabei kann nicht mit einem fixen, auf das Sonnenlicht abgestimmten Schwellenwert operiert werden, weil Schattenregionen dann durchweg unterrepräsentiert sind. Daher ist ein nichtlinearer Verstärkungsfaktor in die Gleichung einbezogen worden:

$$reNDVI_{CMOS} = \frac{(B+G)-R}{R} * \frac{B+G}{2} * f(x) \quad (Gl. 4)$$

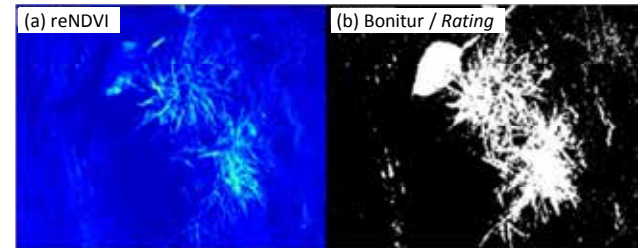
Abb. 7



Rohdatenbild von Gras mit abgefallenen Baumblättern (a), Falschfarbenbild (b), NDVI-Bild in Falschfarben (blau = 0, rot = 256) (c), Binärbild unter direktem Sonneneinfall (d) (Foto: J. Selbeck, V. Dworak, M. Hoffmann)

Fig. 7: Raw image of tufts of grass and leaves added by wind (a), false color image (b), NDVI image in rainbow colors from blue (zero) to red (256) (c), binary image under direct angular sunlight (d)

Abb. 8



Angewandter $reNDVI_{CMOS}$ in Falschfarbendarstellung (blau = 0, rot = 256) (a), binarisiertes Bild nach der Glättung mit einem 5x5-Gauß-Filter (b) (Foto: J. Selbeck, V. Dworak, M. Hoffmann)
Fig. 8: Image of the applied $reNDVI_{CMOS}$ in rainbow colors from blue (zero) to red (256) (a), five-point Gaussian filtered binary result (b)

Dieser bereichserweiterte (range extended) NDVI löst diese Aufgabe, indem die im Schatten liegenden Bereiche verstärkt werden. Die Werte für die Funktion $f(x)$ in Gleichung 4 sind durch Auswertung verschiedener normalisierter Bilder unter verschiedenen Beleuchtungsverhältnissen experimentell ermittelt worden.

Die Kombination des erweiterten NDVI mit der nichtlinearen Verstärkungsfunktion löst das Problem für die hohe Dynamik in den Bilddaten. Die Erweiterung des NIR-Werts (Gleichung 3) erhöht den Kontrast von Pflanze und Boden im Schattenbereich, wie das Blatt oben links in **Abbildung 8**, welches teils direkt beleuchtet, teils im Schatten liegt, zeigt. Die Verstärkungsfunktion des bereichserweiterten NDVI wichtet die Pixel mit niedriger Intensität, sodass die Pflanzen weiterhin mit einem einfachen Schwellenwert vom Boden unterschieden werden können. **Abbildung 8** (b) zeigt eine annähernd ideale Kontur des Blattes nach der Anwendung des $reNDVI_{CMOS}$.

Schlussfolgerungen

Die Ergebnisse zeigen die Einsatzfähigkeit der günstigen Ein-Chip-Pflanzenkamera mit einer neuen Filteranordnung. Der kundenspezifische Doppelbandpassfilter schärft die Trennung von rotem und NIR-Bereich. Durch die Nutzung der Rohdaten in Form des Bayer-Musters, ohne Umrechnung in ein klassisches RGB-Bild wird verhindert, dass sich die Bilddaten um den Faktor 3 vergrößern, was bei eingebetteten Systemen mit begrenztem Speicher und begrenzter Leistung essenziell sein kann. Da die automatische Belichtungssteuerung neu implementiert werden musste, war eine umfassende Kontrolle des Kamerachips respektive der Kamera unabdingbar. Der bekannte NDVI kann allerdings nicht ohne Weiteres in der Ein-Chip-Kamera angewendet werden, ohne dass bekannte und neue Probleme für die Feldanwendung auftreten. Der hier vorgestellte erweiterte NDVI verbessert die Trennung von Pflanze und Boden unter homogenen Lichtbedingungen. Um unter nicht homogenen Lichtverhältnissen ebenfalls gute Ergebnisse zu erzielen, ist der bereichserweiterte NDVI entwickelt worden. Hier können die Bereiche, die im Schlagschatten liegen, in Pflanze und Boden separiert werden. In Bezug auf

die eingebetteten Systeme sind die Erweiterungen der NDVI-Gleichung ohne großen Rechenaufwand umzusetzen und zu bewältigen.

Die nächsten Schritte sind die Implementierung eines automatischen Schwellenwerts für eine autonome Pflanzenkamera, die somit keine Kalibrierung benötigt. Außerdem könnte durch die Erhöhung der Pixelzahl oder eine Kamera mit „High-Dynamic-Range“-Fähigkeit und/oder geringerem Pixelrauschen eine weitere Steigerung der Trennschärfe zwischen Pflanze und Boden und die laterale Auflösung des NDVI erreicht werden. Dies wird sich allerdings direkt auf den Kaufpreis der Kamera auswirken und daher nur für Einzelkameras sinnvoll sein – im Gegensatz zu der Ein-Chip-Kamera, die aufgrund ihres geringen Preises beispielweise für die teilbreitenspezifische Steuerung von Feldspritzen genutzt werden könnte.

Literatur

- [1] Tellaeche, A.; BurgosArtizzu, X.P.; Pajares, G.; Ribeiro, A.; Fernandez-Quintanilla, U. (2008): A new vision-based approach to differential spraying in precision agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture* 60(2), pp. 144–155
- [2] Dammer, K.; Thoele, H.; Volk, T.; Hau, B. (2009): Variable-rate fungicide spraying in real time by combining a plant cover sensor and a decision support system. *Precision Agriculture* 10(5), pp. 431–442
- [3] Lück, E.; Gebbers, R.; Ruehlmann, J.; Spangenberg, U. (2009): Electrical conductivity mapping for precision farming. *Near Surface Geophysics* 7(1), pp. 15–25
- [4] Selbeck, J.; Dworak, V.; Ehlert, D. (2010): Testing a vehicle-based scanning LiDAR sensor for crop detection. *Canadian Journal of Remote Sensing* 36, pp. 24–35
- [5] Dammer, K.H.; Wartenberg, G. (2007): Sensor-based weed detection and application of variable herbicide rates in real time. *Crop Protection* 26, pp. 270–277
- [6] Tucker, C.J. (1979): Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sensing Environment* 8(2), pp. 127–150
- [7] Wang, J.; Chen, G. (2006): Vegetation index and biomass estimation for grassland (In Chinese). *Journal of Yunnan Agricultural University* 21(3), pp. 372–375
- [8] Rabatel, G.; Gorretta, N.; Labbé, S. (2011): Getting NDVI Spectral Bands from A Single Standard RGB Digital Camera: A Methodological Approach. In: *Proceedings of CAEPIA'11 the 14th International Conference on Advances in Artificial Intelligence: Spanish Association for Artificial Intelligence*, La Laguna, Spain, 7–11 November 2011; pp. 333–342
- [9] Ritchie, G.; Sullivan, D.; Perry, C.; Hook, J.; Bednarz, C. (2008): Preparation of a low-cost digital camera system for remote sensing. *Applied Engineering in Agriculture* 24(6), pp. 885–894
- [10] Lebourgeois, V.; Begue, A.; Labbe, S.; Mallavan, B.; Prevot, L.; Roux, B. (2008): Can commercial digital cameras be used as multispectral sensors? A crop monitoring test. *Sensors* 8, pp. 7300–7322
- [11] Dworak, V.; Selbeck, J.; Dammer, K.-H.; Hoffmann, M.; Zarezadeh, A. A.; Bobda, C. (2013): Strategy for the Development of a Smart NDVI Camera System for Outdoor Plant Detection and Agricultural Embedded Systems. *Sensors* 13, pp. 1523–1538
- [12] Malvar, H. S.; He, L.; Cutler, R. (2004): High-Quality Linear Interpolation for Demosaicing of Bayer-Patterned Color Images. In: *Proceedings of the ICASSP International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, Montreal, QC, Canada, 17–21 May 2004, vol. 3, pp. iii – 485-8

Autoren

Dr. phil. Dipl.-Ing. Jörn Selbeck, Dr.-Ing. Volker Dworak und **PD Dr. agr. habil. Karl-Heinz Dammer** sind wissenschaftliche Mitarbeiter, **B.Eng. Matthias Hoffmann** ist technischer Mitarbeiter in der Abteilung Technik im Pflanzenbau am Leibniz-Institut für Agrartechnik Potsdam-Bornim (Wiss. Direktor: **Prof. Dr. Reiner Brunsch**), Max-Eyth-Allee 100, 14469 Potsdam, E-Mail: jselbeck@atb-potsdam.de