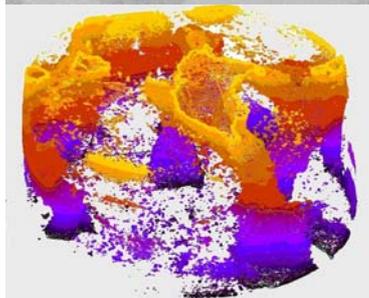
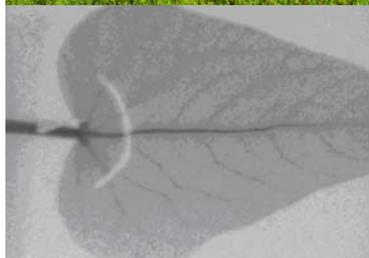


Fachhochschule Osnabrück
University of Applied Sciences

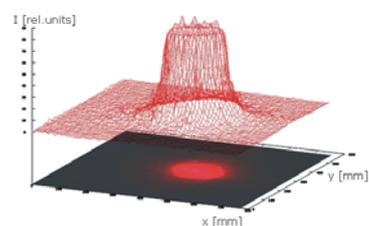
ATB
Agrartechnik Bornim



14. Workshop Computer-Bildanalyse in der Landwirtschaft

Computerised Image Analysis
in Agriculture

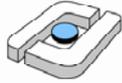
07. Mai 2008
Osnabrück



Bornimer Agrartechnische Berichte

Heft 62

Potsdam-Bornim / Osnabrück 2008



Fachhochschule Osnabrück
University of Applied Sciences

ATB
Agrartechnik Bornim

14. Workshop Computer-Bildanalyse in der Landwirtschaft

07. Mai 2008
Osnabrück

Bornimer Agrartechnische Berichte
Heft 62

Potsdam-Bornim / Osnabrück 2008

Herausgeber:

Leibniz-Institut für Agrartechnik Potsdam-Bornim e.V.
Max-Eyth-Allee 100
14469 Potsdam-Bornim
☎ (0331)-5699-0
Fax.: (0331)-5699-849
E-mail: atb@atb-potsdam.de
Internet: <http://www.atb-potsdam.de>

Juli 2008

Redaktion:

Dr. habil. Manuela Zude
Prof. Dr. Arno Ruckelshausen

Typografische Gestaltung:

Andrea Gabbert

Herausgegeben vom Leibniz-Institut für Agrartechnik Potsdam-Bornim e.V. (ATB) mit Förderung des Bundesministeriums für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz und des Ministeriums für Ländliche Entwicklung, Umwelt und Verbraucherschutz des Landes Brandenburg und gleichzeitig als CD ROM.

Für den Inhalt der Beiträge zeichnen die Autoren verantwortlich.

Eine Weiterveröffentlichung von Teilen ist unter Quellenangabe und mit Zustimmung des Leibniz-Instituts für Agrartechnik Potsdam-Bornim e.V. möglich.

ISSN 0947-7314

© Leibniz-Institut für Agrartechnik Potsdam-Bornim e.V., Potsdam-Bornim 2008

Inhaltsverzeichnis	Seite
	<i>page</i>
Grußwort	5
Beobachtung von Pflanzenbeständen mit schmal- und breitbandigen Strahlungssensoren und mit Farbkameras	7
<i>Monitoring Crop Canopies using Narrow and Broadband Radiation Sensors and Color Cameras</i>	
Martin Kraft, Klaus-Peter Wittich	
Vision Based Plant Recognition under Overlapping Situations	16
<i>Computerbildverarbeitung zur Pflanzenerkennung bei über-lappenden Objekten</i>	
Julio Pastrana, Thomas Rath	
3-D-Bildverarbeitung von röntgentomografischen Bodenanalysen im Mikrometerbereich	24
<i>3-dimensional computer vision of x-ray tomographic images for micro soil structure analysis</i>	
Thomas Rath, Julio Pastrana, Stefan Dultz	
Visualisierung von Wasserflüssen in intakten Pflanzen mit Hilfe der Neutronenradiographie	31
<i>Visualization of Water Flow in Intact Plants by Cold Neutron Radiography</i>	
Uzuki Matsushima, Nikolay Kardjilov, André Hilger, Wolfgang Graf, Werner B. Herppich	
MiniVeg N – Das Auge des Landwirtes	44
<i>MiniVeg N – active plant monitoring</i>	
Wilhelm Lüdeker, J. Schulz	
Analysis of Photon Propagation in Kiwifruit by Means of Backscattering Imaging and Simulation	50
<i>Analyse der Photonenausbreitung in Kiwifrüchten mit Hilfe von bildgebender Rückstreuungsmessung und Simulation</i>	
László Baranyai, Martin Geyer, Manuela Zude	
Nondestructive Pigment Analyses in Carrot Phantoms by Means of Sensor Fusion of Spectroscopic Time-resolved and Continuous Wave Systems	58
<i>Zerstörungsfreie Pigmentanalyse mit zeit- und wellenlängenaufgelöster Spektroskopie am Beispiel von Referenzmaterialien mit ähnlichen optischen Eigenschaften wie Möhren</i>	
Manuela Zude, Alessandro Torricelli	

Intelligente Sensorsysteme für autonome Feldroboter **67***Intelligent Sensor System for Autonomous Field Robots*Arno Ruckelshausen, Ralph Klose, Andreas Linz, Matthias Gebben,
Sebastian Brinkmann**Untersuchung eines automatisierten bildanalytischen Verfahrens zur Erfassung der Unkrautverteilung in landwirtschaftlichen Kulturflächen** **76***Measuring the spatial distribution of weed in agricultural fields by means of automatic imaging technique*

Christoph Gutjahr, Bernhard Huber, Martin Weis, Roland Gerhards

Grußwort

Angesichts der globalen Fragestellungen zur Versorgung der Weltbevölkerung mit Nahrung und Energie nehmen die Themen *Imaging* und *Sensorik* für die moderne Landwirtschaft eine zunehmend bedeutendere Rolle ein. Applikationsfelder sind die Qualitätskontrolle, Automatisierung, Umweltverträglichkeit, Sicherheitstechnik oder die elektronische Dokumentation. Die technische und anwendungsbezogene Komplexität des Einsatzes bildgebender Systeme, spektroskopischer Methoden oder anderer Sensoren in der Landwirtschaft – „Technologie trifft Natur“ - erfordert eine interdisziplinäre Zusammenarbeit zwischen den Fachgebieten und Kooperationen zwischen Wissenschaft und Industrie.

Der seit 1995 stattfindende Workshop COMPUTER-BILDANALYSE IN DER LANDWIRTSCHAFT ist von Beginn an auf diese Rahmenbedingungen fokussiert, die aktuellen Entwicklungen bestätigen die konzeptionelle Ausrichtung der vom Leibniz-Institut für Agrartechnik Potsdam-Bornim e.V. koordinierten jährlich stattfindenden Tagung. Ziel der Workshop-Reihe ist die Vertiefung des Erfahrungsaustauschs zwischen den Forschergruppen und Unternehmen in der Anwendung von bildgebenden und spektroskopischen Methoden in der Landwirtschaft.

Nach 2002 fand der Workshop in diesem Jahr erneut in Osnabrück statt, diesmal im WABE-Zentrum / Klaus-Bahlsen-Haus am landwirtschaftlichen Versuchsbetrieb Waldhof der Fachhochschule Osnabrück. WABE steht als Abkürzung für „Waldhof-Aktion-Bildung-Erleben“ und wurde 2004 als Zentrum für Verbraucherinformation, Ernährung nachhaltige Lebensmittelproduktion und Nacherntetechnologie eingerichtet. Weiterhin hat die Fachhochschule Osnabrück in 2007 den interdisziplinären Forschungsschwerpunkt COALA (Competence in Applied Agricultural Engineering) eingerichtet.

Ca. 40 Teilnehmer aus Hochschulen, Forschungsinstitutionen und Firmen haben an dem Workshop teilgenommen. Etwa die Hälfte der Teilnehmer kam aus Industrieunternehmen der Landtechnik, Bildverarbeitung und Sensortechnik. In neun Vorträgen und Posterausstellungen wurden Arbeiten aus mehreren Themenbereichen vorgestellt. Der Einsatz komplexer Bildverarbeitungssysteme – insbesondere bei überlappenden Pflanzen – stellt nach wie vor eine große Herausforderung dar, unter anderem wurde die Integration von Abstandsinformationen diskutiert. Spezifische Messverfahren und Sensoren von röntgenmikrotomografischen Bodenanalysen im Mikrometerbereich über Neutronenradiographie bis hin zur Rückstreuung von Laserlicht und Fluoreszenz zur Messung von Frucht- und Pflanzeigenschaften waren Gegenstand des Workshops. Die Sensor- und Datenfusion wurde als Lösungsansatz zur Pigmentanalyse von gartenbaulichen Produkten und Navigation autonomer Feldroboter vorgestellt.

Auch der 14. Workshop COMPUTER-BILDANALYSE IN DER LANDWIRTSCHAFT stellte erneut eine Plattform für lebendige Diskussionen, Erfahrungsaustausch und Anknüpfung neuer Kooperationen dar. Auch die Präsentation von Geräten und Technologien (tec5, Amazonen-Werke, Fritzmeier, FH Osnabrück) und ein Rundgang auf dem Versuchsbe-

trieb haben den Workshop bereichert. Für die Vorbereitung und Durchführung des erfolgreichen Workshops danken wir allen Helfern der Fachhochschule Osnabrück und des ATB.

In 2009 wird der 15. Workshop in Potsdam als gemeinsame Veranstaltung mit der Arbeitsgruppe *Image Processing* der CIGR (Commission Internationale du Génie Rural) stattfinden.



Manuela Zude (Leibniz-Institut für Agrartechnik Potsdam-Bornim e.V.)

Arno Ruckelshausen (Fachhochschule Osnabrück)

Potsdam-Bornim und Osnabrück im Juli 2008

Beobachtung von Pflanzenbeständen mit schmal- und breitbandigen Strahlungssensoren und mit Farbkameras

Monitoring Crop Canopies using Narrow and Broadband Radiation Sensors and Color Cameras

Martin Kraft¹, Klaus-Peter Wittich²

¹Institut für Agrartechnologie und Biosystemtechnik; Johann Heinrich von Thünen-Institut; Bundesallee 50; 38116 Braunschweig, Germany

²Agrarmeteorologische Forschung; Deutscher Wetterdienst; Bundesallee 50; 38116 Braunschweig, Germany

E-mail: martin.kraft@vti.bund.de

Kurzfassung: Aus der mit zwei breitbandigen Strahlungssensoren gemessenen Bestandsreflexion lässt sich ein NDVI (*normalized difference vegetation index*) berechnen. Es wird anhand von breit- und schmalbandigen Messungen in Haferbeständen gezeigt, dass dieser mehr dem „grünen“ NDVI als dem verbreiteten „roten“ NDVI entspricht. Im zweiten Teil des Beitrags wird die bildanalytische Bestimmung des Bodenbedeckungsgrads anhand von Raps dargestellt. Diese zerstörungsfreie automatisierte Methode hat das Potenzial für eine genauere Bestimmung des Bedeckungsgrads als die visuelle Schätzung. Allerdings gibt es in bestimmten Situationen noch nicht befriedigend gelöste Probleme bei der Bildsegmentierung durch pixelweise Klassifikation.

Deskriptoren: NDVI, spektrale Reflexion, Bildanalyse, Bodenbedeckungsgrad, Hafer, Mais

Summary: *In order to estimate the NDVI (normalized difference vegetation index), reflectance data have been measured with broadband and narrowband radiation sensors. Comparing these two data sets, it could be shown that the broadband NDVI approximates much more the green NDVI than the common red NDVI. The second part of this article demonstrates the soil cover determination by automatic image analysis of rapeseed fields. This non-destructive automatic method might allow a more precise soil cover determination than visual estimation. However, there are some unsolved practical problems left with the automatic segmentation by pixel classification in certain situations.*

Keywords: *NDVI, spectral reflectance, image analysis, soil cover, oat, maize*

1 Einleitung

Der NDVI (*normalized difference vegetation index*) ist ein Standardwert zur Beschreibung von Vegetation aus spektralen Reflexionsdaten. Er kann mit ganz unterschiedlichen spektralen Sensorsystemen bestimmt werden. Erforderlich ist je ein Spektralband im sichtbaren Rot und im nahen Infrarot. HUEMMRICH *et al.* (1999) führten ein Verfahren zur Berechnung des NDVI aus zwei breitbandigen Strahlungssensoren ein, welche zur Grundausstattung agrarmeteorologischer Strahlungsmesstechnik gehören. Es handelte sich um ein Albedometer und zwei PAR-Sensoren (Photosynthetically active radiation). Diese sind in einem deutlich breiteren Wellenlängenbereich empfindlich als die für die NDVI-Bestimmung üblicherweise eingesetzten Spektroradiometer. Anhand von Haferbeständen wurde der Verlauf des „Breitband-NDVI“ über die Vegetationsdauer untersucht.

In diesem Beitrag wird neben dem Breitband-NDVI ein zweites optisches Messverfahren beschrieben, nämlich die bildanalytische Bestimmung des Bodenbedeckungsgrads und weiterer Zustandsparameter von Rapskulturen. Im pflanzenbaulichen und züchterischen Versuchswesen haben zerstörungsfreie optische Messverfahren zur Bewertung der Pflanzenbestände bisher kaum Eingang gefunden. Dabei bieten diese Messverfahren sowohl gegenüber manuellen Bonituren als auch gegenüber zerstörenden Analyseverfahren wichtige Vorteile. So können sie beliebig oft über demselben Bestand wiederholt werden, liefern in kürzester Zeit quantitative Messergebnisse und sind weitgehend unabhängig von den handelnden Personen.

2 Versuchsbeschreibung und Messverfahren

Die Messung des Breitband-NDVI erfolgte in Haferbeständen in den Jahren 2004 und 2005. Die Bildanalyse erfolgte an einem Sommerrapsbestand (Sorte Heros) im Jahr 2006 und an einem Winterrapsbestand (Sorte Lion) im Vegetationsjahr 2006/2007. Alle Kulturen wurden auf dem Versuchsfeld der agrarmeteorologischen Forschung des DWD in Braunschweig entsprechend der üblichen landwirtschaftlichen Praxis geführt.

Die Bestimmung des Breitband-NDVI geschah mittels eines in 1,10 m Höhe über dem Bestand betriebenen Albedometers (Kipp und Zonen CM 7B, Solarstrahlung 305 nm - 2.800 nm) und mit je einem nach oben und unten gerichteten Quantensensor (Li-COR LI-190 SA, PAR 400 nm - 700 nm). Das Albedometer besteht aus je einem nach oben und unten gerichteten Pyranometer zur Messung der Solarstrahlung SR (solar radiation).

Der Breitband-NDVI ($NDVI_b$) wurde nach HUEMMRICH *et al.* (1999) aus der optischen Infrarot- (OIR) und der PAR-Reflexion ermittelt, wobei sich die optische Infrarotstrahlung für jede Einstrahlungsrichtung gemäß

$$OIR = SR - PAR$$

berechnen lässt. Die PAR-Werte müssen vor der Differenzbildung von der Einheit $\mu\text{mol s}^{-1}\text{m}^{-2}$ in die Strahlungsflussdichte-Einheit W m^{-2} umgerechnet werden (HUEMMRICH *et al.* 1999). Die Umrechnung erfolgte mit $1 \text{ J} \equiv 4,6 \mu\text{mol}$. Der Breitband-NDVI ergibt sich aus den Reflexionswerten R_{PAR} und R_{OIR} zu

$$\text{NDVI}_b = \frac{R_{\text{OIR}} - R_{\text{PAR}}}{R_{\text{OIR}} + R_{\text{PAR}}}$$

Als Referenz diente ein schmalbandiges Reflexionsmessgerät des Typs „FAL II“. Der Messkopf mit einem Öffnungswinkel NDVI_b von 64° wurde in 2,40 m Höhe aufgehängt und vertikal nach unten gerichtet, woraus eine kreisförmige Messfläche mit Durchmesser 3 m resultierte. Ein zweiter (baugleicher) Referenzmesskopf, versehen mit einem Kosinusrezeptor, war nach oben gerichtet. Die Spektralkanäle beider Messköpfe beinhalteten die Wellenlängenbänder $\text{WL}_1 = 550 \text{ nm}$ (Halbwertsbandbreite HWB 9 nm), $\text{WL}_2 = 670 \text{ nm}$ (HWB 11 nm), $\text{WL}_5 = 780 \text{ nm}$ (HWB 11 nm) und $\text{WL}_6 = 1675 \text{ nm}$ (HWB 40 nm). Der praxisübliche „rote“ NDVI_r wurde aus der Bestandsreflexion R_r (670 nm) und R_{NIR} (780 nm) berechnet:

$$\text{NDVI}_r = \frac{R_r - R_{\text{NIR}}}{R_r + R_{\text{NIR}}}$$

Der „grüne“ NDVI_g wurde nach GITELSON *et al.* (1996) aus der Bestandsreflexion R_g (550 nm) und R_{NIR} (780 nm) bestimmt:

$$\text{NDVI}_g = \frac{R_g - R_{\text{NIR}}}{R_g + R_{\text{NIR}}}$$

Für die Bildanalyse wurden Bestandsfotos mit einer handelsüblichen digitalen Farbfotokamera genommen. Die Aufnahmen erfolgten vertikal aus ca. 1,50 m Höhe. Durch ein Beschattungsschild wurde die Aufnahmefläche so abgeschattet, dass keine direkte Sonnenstrahlung auf den aufgenommenen Bestand gelangen konnte. Die Bildauswertung erfolgte zunächst durch pixelweise Klassifikation mit Hilfe eines manuell trainierten *k-Nearest-Neighbour*-Klassifikators. In den Bildern wurden die Objektklassen Boden, grüne Pflanzenteile, gelbe Blütenteile und nicht mehr grüne Pflanzenteile unterschieden. Der Klassifikator wurde anhand manuell ausgewählter Bildausschnitte der genannten Objektklassen trainiert. Beschränkt auf die grünen Pflanzenpixel erfolgte eine gemittelte Farbauswertung. Der mittlere Farbton HUE der grünen Blattpixel wurde aus den Grauwerten r , g und b des Digitalbildes als *CIE 1976, u,v hue-angle* (CIE Publ. 15.2, 1986) berechnet.

Alle optischen Messungen und Aufnahmen fanden zwischen 11:00 Uhr und 13:00 Uhr Ortszeit (mittlere Sonnenzeit) statt.

3 Breitband-NDVI und schmalbandige NDVIs

In **Abbildung 1** ist der zeitliche Reflexionsverlauf für die OIR-, SR- und PAR-Wellenlängenbereiche dargestellt. In **Abbildung 2** erfolgt die Gegenüberstellung der in den Breitband-NDVI ($NDVI_b$) eingehenden Reflexionssignale OIR und PAR mit der Bestandsreflexion in einigen schmalen Wellenlängenbändern. Die PAR-Reflexion, die in etwa den gesamten sichtbaren Wellenlängenbereich umfasst, liegt zu fast allen Terminen zwischen der roten und der grünen Reflexion. Die OIR-Reflexion liegt beim grünen Bestand niedriger als die Reflexion im nahen Infrarot (780 nm) und erstreckt sich während der Vegetationsperiode über einen geringeren Wertebereich. Das lässt sich dadurch erklären, dass das OIR sowohl die Wellenlängen des nahen Infrarots, in dem die lebende Pflanzenbiomasse sehr stark reflektiert, als auch die des mittleren Infrarots mit den Wasserabsorptionsbanden abdeckt. Letzterer Wellenlängenbereich ist in **Abbildung 2** durch die Wellenlänge 1675 nm repräsentiert.

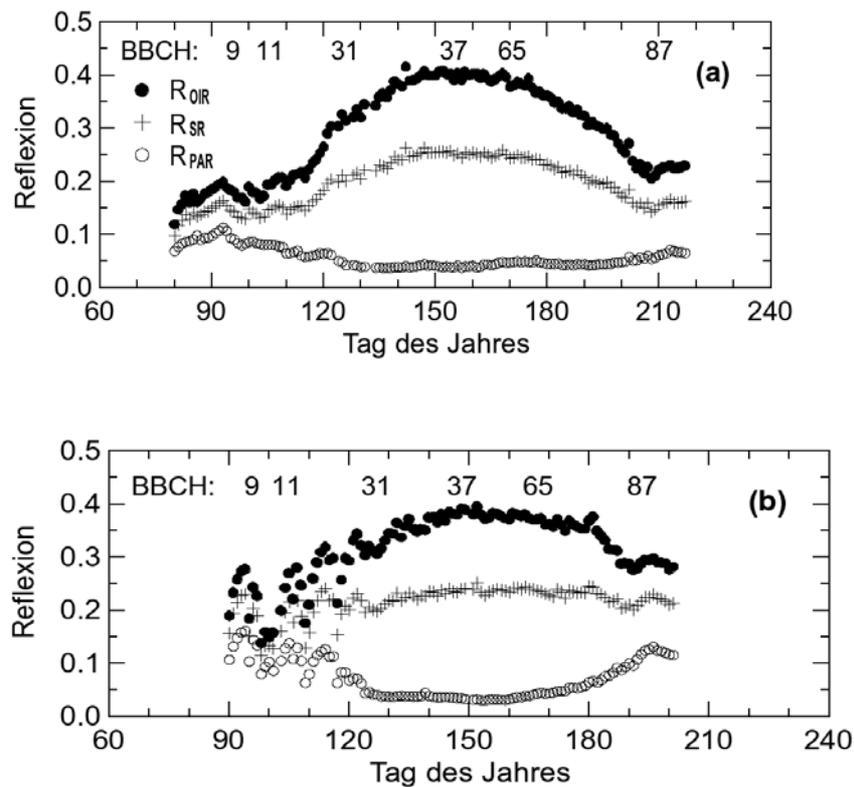


Abbildung 1: Verlauf der Bestandsreflexion von Hafer in den beiden gemessenen breiten Wellenlängenbereichen Solarstrahlung (R_{SR}) und photosynthetisch aktive Strahlung (R_{PAR}) sowie im berechneten optischen Infrarot (R_{OIR}), dargestellt für die Jahre (a) 2004 und (b) 2005

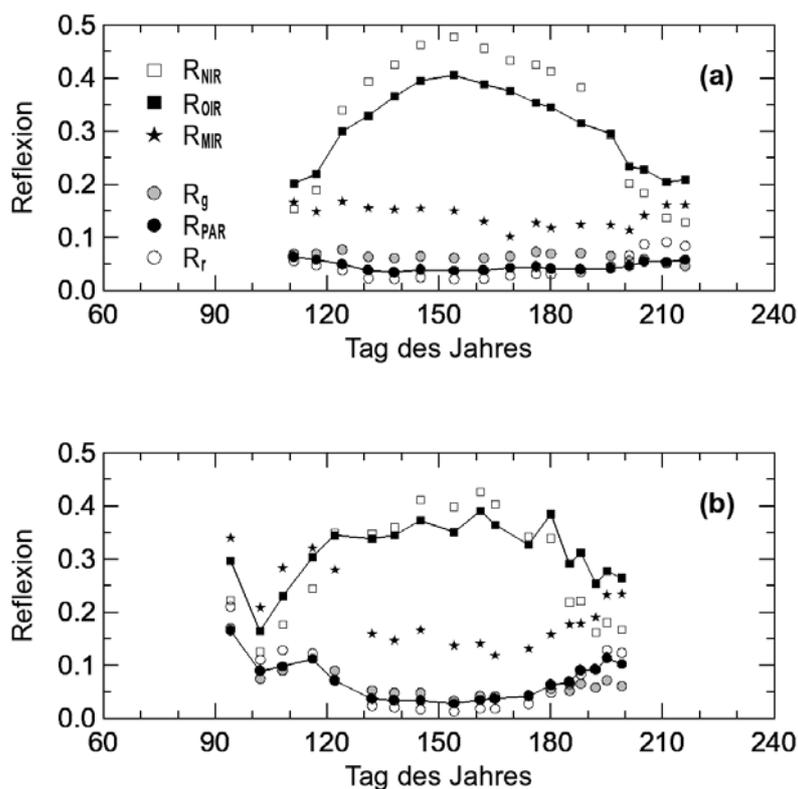


Abbildung 2: Vergleich der mit Breitbandsensoren bestimmten Reflexionswerte R_{PAR} und R_{OIR} mit den schmalbandigen Reflexionssignalen R_r (670 nm; rot), R_g (550 nm; grün); R_{NIR} (780 nm; nahes Infrarot) und R_{MIR} (1675 nm; mittleres Infrarot). Dargestellt für die Jahre (a) 2004 und (b) 2005

Der Verlauf des $NDVI_b$ ist in **Abbildung 3** dem Verlauf des schmalbandigen $NDVI_r$ gegenübergestellt. Zusätzlich wird der „grüne“ $NDVI_g$ gezeigt. Erkennbar ist, dass der $NDVI_b$ im Verlauf der Vegetation auf einen kleineren Wertebereich beschränkt bleibt als der $NDVI_r$. Dieser bereits von HUEMMICH *et al.* (1999) gezeigte Unterschied hat Ursachen sowohl im PAR als auch im OIR. Beide Signale haben über die Vegetation einen geringeren Wertebereich als die schmalen Wellenlängenbereiche Infrarot und Rot. Insbesondere bei sehr geringer grüner Vegetation fällt der $NDVI_b$ deutlich weniger ab als der $NDVI_r$ und verhält sich ähnlich wie der $NDVI_g$. Der $NDVI_g$ spielt in der Beschreibung von Pflanzenbeständen keine wesentliche Rolle. GITELSON *et al.* (1996) zeigten jedoch, dass der $NDVI_g$ bei der spektralen Analyse von Einzelblättern eine hohe Korrelation mit dem Chlorophyllgehalt besitzt.

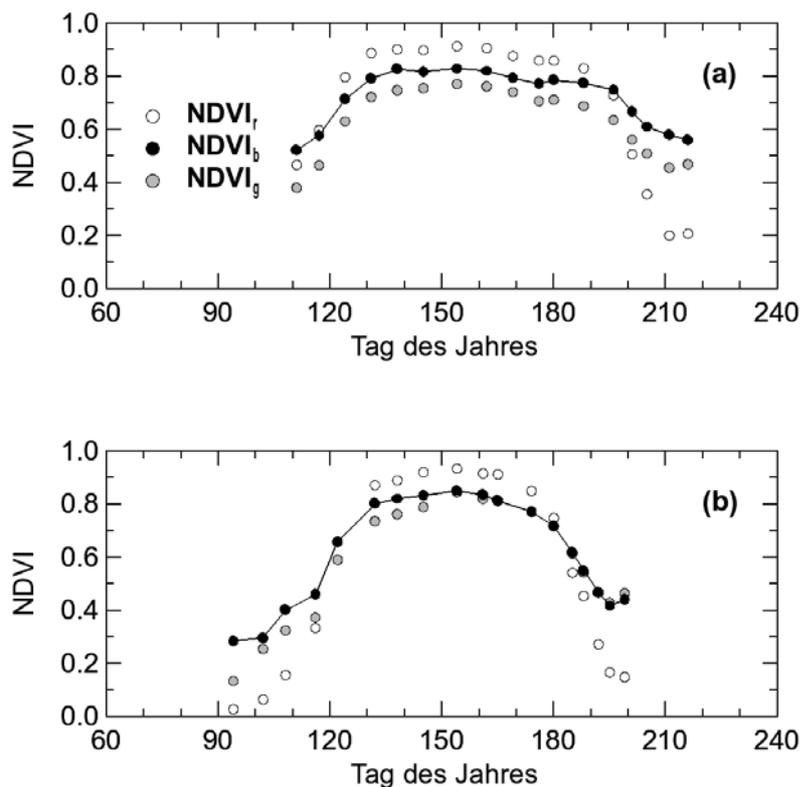


Abbildung 3: Breitbandiger Vegetationsindex NDVI_b im Vergleich zum schmalbandigen roten (NDVI_r) und grünen (NDVI_g), dargestellt für die Jahre (a) 2004 und (b) 2005

Trotz seines geringeren Wertebereichs war der NDVI_b in den hier gezeigten Messungen über Haferbeständen sowohl mit dem NDVI_r ($R^2 = 0,92$) als auch mit dem NDVI_g ($R^2 = 0,94$) sehr deutlich korreliert, so dass von einer Eignung für die Beschreibung des Vegetationszustands ausgegangen werden kann.

4 Bildanalytische Bestimmung des Bodenbedeckungsgrads

Die bildanalytische Bestimmung des Bodenbedeckungsgrads erfolgte in einem Sommerapsbestand (Sorte Heros) 2006 und in einem Winterraps (Lion) im Vegetationsjahr 2006/2007. Die vertikal aufgenommenen Fotos wurden pixelweise in die Bedeckungskategorien klassifiziert:

- a) grüne Pflanzenteile (Blätter, Stängel, Schoten),
- b) gelbe Blüten,
- c) nicht mehr grüne Pflanzenteile (chlorotische, abgereifte oder abgestorbene Blätter, Stängel und Schoten) bzw.
- d) unbedeckter Boden



Abbildung 4: Automatische Segmentierung einer Aufnahme von blühendem Winterraps: Links das Originalfoto. Rechts die Darstellung des Segmentierungsergebnisses: Bodenbildpunkte sind weiß, gelbe Blütenbildpunkte orange dargestellt. Einige bodennahe Blätter sind in der Aufnahme so dunkel, dass eine Farbauswertung nicht möglich ist. Diese Bildteile zählen zwar zum grünen Bedeckungsgrad, werden jedoch von der Farbauswertung ausgeschlossen

In den **Abbildungen 5** und **6** ist der Verlauf der Bodenbedeckung über die Vegetation getrennt nach den drei Bedeckungskategorien dargestellt. Für die grüne Bedeckung wurde der mittlere Farbwert bestimmt und dargestellt. Erkennbar ist beispielsweise, dass die Rapsbestände über einen Zeitraum von ca. 5 Wochen eine fast vollständige Bodenbedeckung aufwiesen (> 94,5%) und dass die gelben Blüten beim Winterraps bis zu 25% der gesamten Bedeckung ausmachten.

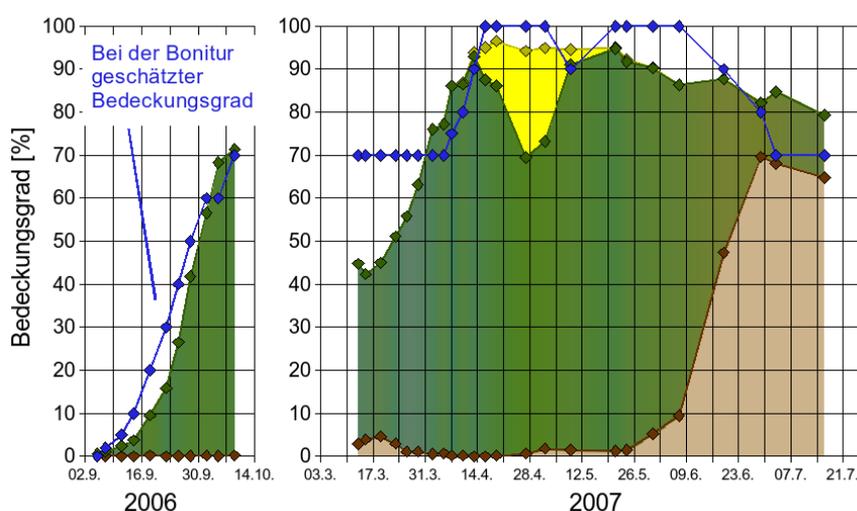


Abbildung 5: Bildanalytisch bestimmter Bedeckungsgrad während der Vegetation eines Winterrapsbestands. Von Mitte Oktober bis Mitte März erfolgten keine Bildaufnahmen. Der Bedeckungsgrad ist aufgeteilt in die Klassen a) grüne Pflanzenteile (mittlere Fläche), b) gelbe Blütenteile (obere Fläche) und nicht mehr grüne Pflanzenteile (untere Fläche.) In der grünen Fläche ist die Durchschnittsfarbe der grünen Bildpunkte durch ihren Farbton und ihre Farbsättigung repräsentiert. Der in der visuellen Bonitur geschätzte Gesamtbedeckungsgrad ist blau dargestellt

Neben der Beobachtung der Bestände durch die Bildaufnahme erfolgte eine regelmäßige Bonitur, in deren Rahmen auch der Bodenbedeckungsgrad ermittelt wurde. Beim Vergleich der visuell geschätzten Werte mit den bildanalytisch gewonnenen Werten zeigte sich, dass die visuelle Schätzung zu Beginn des Wuchses (bis zu einer Bedeckung von ca. 50% bis 60%) über den bildanalytisch bestimmten Werten lag. Im weiteren Wachstumsverlauf bis Erreichen der fast vollständigen Bodenbedeckung lag die visuelle Schätzung dann zunächst unter der bildanalytisch bestimmten. Während der Abreifezeit unterschied sich die geschätzte Bodenbedeckung deutlich von der bildanalytisch bestimmten, wobei sie letztere beim Winterraps unter-, beim Sommerraps aber überschritt. Zu diesen Abweichungen während der Abreifephase muss darauf hingewiesen werden, dass die automatische Bildanalyse gerade in dieser Phase noch mit erheblichen Unsicherheiten behaftet ist, was die Unterscheidung und richtige Klassifikation von abgestorbenen Pflanzenteilen und dem Boden betrifft.

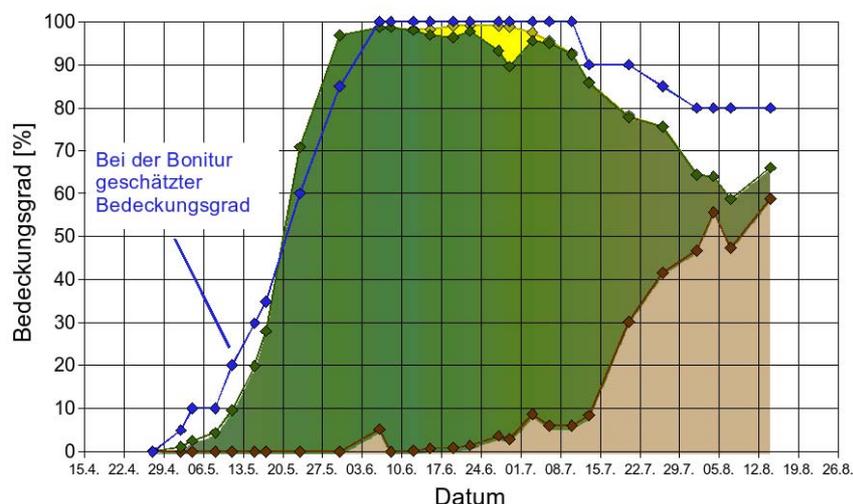


Abbildung 6: Bildanalytisch bestimmter Bedeckungsgrad während der Vegetation eines Sommerapsbestands. Zur Darstellung siehe Abbildung 5

Das am Institut für Agrartechnologie und Biosystemtechnik entwickelte und hier eingesetzte bildanalytische Verfahren weist hinsichtlich der Methodik noch Verbesserungsmöglichkeiten auf, die die Zuverlässigkeit der Segmentierung und Farbauswertung steigern können. So erfolgten bisher die Aufnahmen aus einer Höhe von nur ca. 1,50 m, so dass bei höheren Pflanzen in den Randbereichen des Bildes keine perfekte vertikale Draufsicht, sondern lediglich eine leichte Schrägsicht auf die Pflanzen der Randzone möglich war. Die inhomogene natürliche Beleuchtung beeinflusst die Farbwerte; dieser Effekt kann durch die im Bild mit aufgenommene graue Referenz- und Kalibrierfläche nur teilweise ausgeglichen werden. Das Ergebnis der pixelweisen Klassifikation ist abhängig vom Trainingsdatensatz, der manuell aus den Bildern selbst ausgewählt wurde. Erhebliche Klassifikationsfehler treten u.a. bei der Trennung von tief im Bestand liegenden grünen Blättern

von den dazwischen liegenden algenbewachsenen Bodenflächen sowie bei der Trennung von abgestorbenen Pflanzenteilen vom Boden auf. Bei der „grünen“ Farbauswertung ist zu berücksichtigen, dass während der Blüte neben den Blattflächen auch die Blütenknospen als grün klassifiziert werden, diese aber eine gelblich-grüne Färbung aufweisen.

Die Arbeiten werden fortgesetzt, um das Bildaufnahme- und -analyseverfahren weiter zu verbessern.

5 Literatur

CIE (1986): Colorimetry. 2nd Ed. CIE Publication 15.2, Wien

GITELSON A.A., KAUFMAN Y.J., MERZYLAK M.N. (1996): Use of a Green Channel in Remote Sensing of Global Vegetation from EOS-MODIS. *Remote Sens. Environ.* 58: 289-298

HUEMMRICH K.F., BLACK T.A., JARVIS P.G., MCCAUGHEY J.H., HALL F.G. (1999): High temporal resolution NDVI phenology from micrometeorological radiation sensors. *J. Geophys. Res.* 104: 935-944

KRAFT M. (2003): Bildanalytische Bestimmung des Bodenbedeckungsgrades in Winterweizen. *Bornimer Agrartechnische Berichte* 34: 29-37

KRAFT M. (2004): Potenzial der automatischen Bildanalyse für die Zustandsbestimmung landwirtschaftlicher Kulturen. *Bornimer Agrartechnische Berichte* 37: 159-166

KRAFT M. (2005): Gegenüberstellung bildanalytischer und spektraloptischer Messverfahren für Wachstumsuntersuchungen an Zuckerrüben. *Bornimer Agrartechnische Berichte* 40: 80-87

WITTICH K.P., KRAFT M. (2008): The normalised difference vegetation index obtained from agrometeorological standard radiation sensors: a comparison with ground-based multiband spectroradiometer measurements during the phenological development of an oat canopy. *Int. J. Biometeorol* 52: 167-177

Vision Based Plant Recognition under Overlapping Situations

Computerbildverarbeitung zur Pflanzenerkennung bei überlappenden Objekten

Julio Pastrana, Thomas Rath

Leibniz Universität Hannover, Institute for Biological Production Systems,
Biosystems and Horticultural Engineering Section.
Herrenhäuser Straße 2, D-30419 Hannover, Germany.
E-mail: pastrana@bgt.uni-hannover.de

Summary: A method to detect small plants under overlapping situations is presented. The developed technique is based on detecting single leaves for further grouping into individual plants. The leaf detection is carried out by detecting ellipsoids that best superimpose the shape of the plant, considering that each leaf has to a certain degree an elliptical form. After detecting all possible leaves (ellipses) the next step is to group them into single plants by using an Active Shape Model deformable template.

Keywords: plant image processing, overlapping problem, Hough-transformation, active shape modelling

Kurzfassung: *In dem folgenden Artikel wird ein Verfahren zur Lösung des Überlappungsproblems bei der Computerbildverarbeitung von Pflanzen beschrieben. Das Verfahren basiert auf der Erkennung von Einzelblättern mit Hilfe der Elliptischen-Hough-Transformation. Anschließend erfolgt eine Erkennung von überlappenden Gesamtpflanzen mit Hilfe eines modellgestützten Active-Shape-Model-Verfahrens und spezifischer Clusteralgorithmen.*

Deskriptoren: *Pflanzenbildverarbeitung, Überlappungsproblem, Hough-Transformation, Active-Shape-Modell*

1 Introduction

Using robotic devices to automate horticultural tasks, such as harvesting, sorting, plant trimming, etc. is becoming necessary because of the elevated costs of manual labor. However, much research is still needed to develop robots that can autonomously complete tasks that require the identification of objects that are occluded by other objects. Occlusions are very commonly found in horticulture, for example, when crops, leaves, stems, etc. overlap each other. Therefore, it is very important to develop systems that are not susceptible to occlusions. The goal of this research is to develop a computer vision based system that recognizes small plants under such situations (self overlapping or overlapping by other plants) for later use in a robotic system.

2 Material and methods

The plant selected as a model is the *Nicotiana tabacum*. Images were taken with a camera placed directly above the overlapping plants (**figure 1**). The identification of the plants is performed by developing, combining and modifying several image processing algorithms to achieve the identification of single plants (e.g., Hough transform for ellipse detection, mean-shift clustering, automatic landmarking, Active Shape Model).

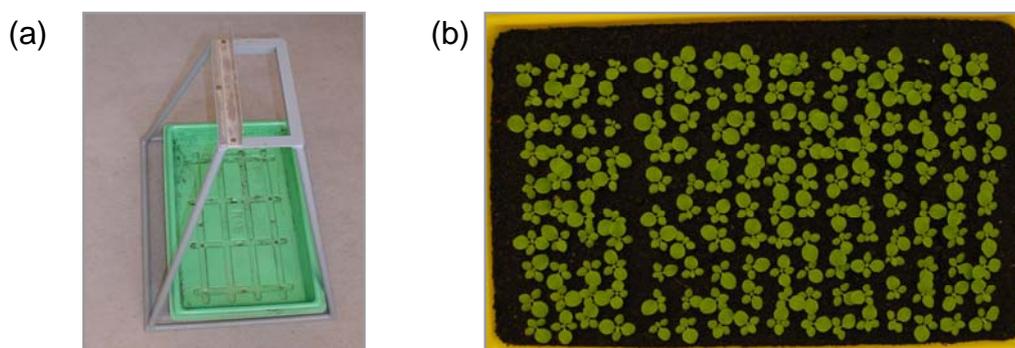


Figure 1: Picture acquisition: (a) Frame to hold the camera, (b) Tray with plantlets

3 Ellipse detection

Before starting the detection of ellipsoids it is necessary to extract the border of the plant(s) that the method is going to work with. This is done by using common color segmentation techniques and border extraction techniques (**figure 2a**). It must be clarified that all the small border islands inside a larger border shape were also considered because they can provide valuable information when performing the detection of the ellipses.

The ellipse detection method is based on a technique that iteratively takes 3 random points of the border shape and generates a possible ellipsoid that may match a leaf (**figure 2b**). This technique was first proposed by YUEN *et al.* (1989) and also used by MCLAUGHLIN (1998) to detect elliptical shapes. The previously mentioned ellipsoid detection technique has several advantages; a very important one is that it can identify ellipses that are overlapping one another. Nevertheless, it also generates a great amount of information including false ellipses.

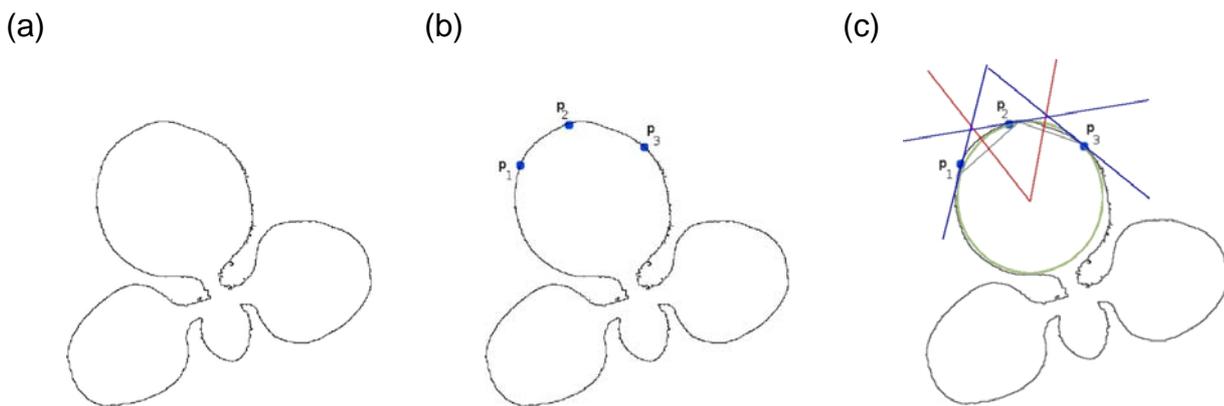


Figure 2: Ellipse calculation by iteratively taking 3 random points, (a) Border extraction, (b) Selection of 3 random points, (c) Ellipse calculation

Filtering out the false detections is necessary because faulty leaves can confuse the plant detection algorithm causing faulty detections. Additionally, the number of leaves that each plant has is unknown. Therefore, it was necessary to find a method that was able to successfully find groups of very similar ellipses without any previous knowledge of the data.

Finding groups of similar elements in a data set is a typical task for clustering algorithms (e.g. k-means, k-nearest neighbours, mean shift, etc.), though, not all of the available algorithms are able to successfully assemble groups of similar items (in this case ellipses) because of the above mention restriction - no prior knowledge of the data.

4 Clustering ellipses using the mean shift algorithm

The mean shift algorithm (COMANICIU & MEER 2002) is a method that satisfactorily fills the previously mentioned requirements to find groups of ellipses. It is a clustering technique that belongs to the so-called non-parametric methods, not having the requirement of needing a prior knowledge of the data. The only parameter that one has to deal with is a window size, which is similar to the region of interest (ROI). The algorithm starts by looking for clusters and iteratively moves the center of the window towards its center of mass until convergence.

In order to create clusters, the mean shift uses the concept of kernel density estimation, also known as Parzen windows (DUDA *et al.* 2001). This procedure is able to estimate the density of a given data set with n elements that belong to a d -dimensional space R^d using a so-called *multivariate kernel density estimator* $K(v)$. One important characteristic of this kernel is that it has to be a bounded function that satisfies:

$$\int_{R^d} K(v) dv = 1 \quad (1)$$

In this research the selected kernel $K(v)$ was a Gaussian kernel, which in its one dimensional form is:

$$K(v) = (2\pi)^{-\frac{1}{2}} \exp\left(-\frac{1}{2} \|v\|^2\right) \quad (2)$$

Of course, the dimensionality of the space of this problem is not one, the algorithm has to work with a five dimensional space. One dimension for each necessary parameter to create an ellipse $v_i = \{x, y, a, b, \theta\}$, where x and y are the coordinates of the center, a and b are the radii of the major and minor axes, and θ is the rotation angle.

In order to look for clusters, the mean shift algorithm takes each one of the elements in the data set and calculates several times a so-called *mean shift vector*. The mean shift vector gives the direction and new position of the *center* of the window, always towards the spots with the highest density. The algorithm will converge when the aforementioned center does not move. The following expression resumes the procedure of how to compute the mean shift vector $m(v)$, (where g is the kernel function, \bar{v} is the current mean, v_i is a vector in the data set and h is the window size).

$$m(v) = \frac{\sum_{i=1}^n v_i g \frac{\|\bar{v} - v_i\|^2}{h}}{\sum_{i=1}^n g \frac{\|\bar{v} - v_i\|^2}{h}} - \bar{v} \quad (3)$$

All the elements that converge to the same point are the ones forming a cluster of ellipsoids, which in this case represent a leaf. Each cluster has a different number of elements, giving hints about the local maxima inside the data set. These local maxima are the places where there is maximum density, meaning that there is a high probability that at that place a leaf can be found. A detailed explanation of the mean shift algorithm can be found in COMANICIU & MEER (2002).

After calculating all the clusters they are sorted according to the number of elements that converge into it. The presented algorithm takes the best ellipsoids, which best superimpose the current shape.

The next step is to identify single plants by using all the information about the calculated ellipses. The presented approach, Active Shape Model, uses deformable templates to match single plant shapes.

5 Active Shape Model (ASM)

“Active Shape Models are statistical methods that use deformable templates to model shapes” (COOTES *et al.* 1999). The idea behind using active shape models is to create a deformable template out of manually selected plantlets without any overlapping and use it to model similar plants in different situations. The aforementioned template was computed by executing a detection of ellipses (leaves) on a set of plantlets. After the ellipse detection on each plant, one can think that every plant has a set of ellipsoids that represent it. Each ellipsoid provides a set points called *landmarks* (**figure 3**) (for automatic landmarking see SAENGDEEJING *et al.* 2003).

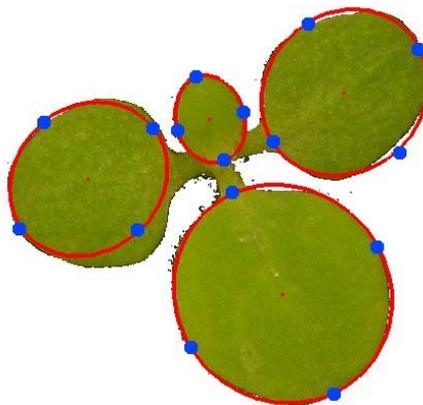


Figure 3: Extracting landmarks on a plant

Four landmarks are extracted for each detected ellipse, these marks represent the furthest points on the major and minor axes of each ellipse. This method is a totally automatic way of performing landmarking on all the plants. Moreover, with these four points it is possible to fully recover the data of each ellipse. The shape template was created using a data set of 50 images containing images of plants with 2, 3 and 4 leaves (**figure 4**).



Figure 4: ASM model plants (no overlapping situations)

The algorithm to produce the mean shape is as follows:

1. Take all the n landmarked plants in the training data set and transform them so they have zero mean.
2. Normalize all the n new zero mean landmarked plants in the dataset.
3. Choose one landmarked plant and select it as the first possible deformable template or mean shape M .
4. Align all n the landmarked plants in the data set to M , so the distance between all the elements is minimized.
5. Re-estimate the mean shape M using all the new aligned landmarks.
6. If there is no change in M stop. Else go to step 4.

In order to be able to create new shapes out of the deformable template, the eigen-vectors and eigen-values of the data set have to be computed using principal component analysis (PCA) (COOTES *et al.* 1992, COOTES *et al.* 1999). After finishing the computation of the eigen-vectors and eigen-values, a new shape can be created by deforming the template as follows:

$$q = M + \Phi b \quad (4)$$

Where q is the new formed shape, M is the mean plant shape, Φ contains the calculated eigen-vectors of the data set and b contains the deformation parameters. Changing these deformation parameters within a certain range allows the alteration of the already calculated plant mean shape into new plant shapes. It is worth noting that the mean shape and the eigen-vectors are calculated just one time and that the method uses different parameters for b to model new shapes.

6 Matching plants with the deformable model

In order to identify single plants in different situations, i.e. with and without occlusions, it is necessary to execute an ellipse detection to identify all possible leaves in the given plant(s) shape. After determining all possible leaves, the use of the shape model is going to group the ellipsoids that belong to a single plant. Since the deformable

template was created by using the information provided by ellipses, it is possible to use it to cluster all the ellipsoids that better represent a plant in a given situation. As might be expected, the aforementioned landmarking scheme is used when grouping the ellipses.

The basic idea to identify single plants can be describes as follows:

1. From the n identified ellipses take one ellipse A and get its neighbors.
2. Use the ellipse A and its neighbors to deform the shape model to create plants with 2, 3 or 4 leaves.
3. Pick the deformation that best fits the model and mark the ellipsoids as grouped.
4. If there are ungrouped ellipses, select a new ellipse A and go to step 2.

Figure 5 summarizes all the steps to overcome the identification of plants under overlapping situations.

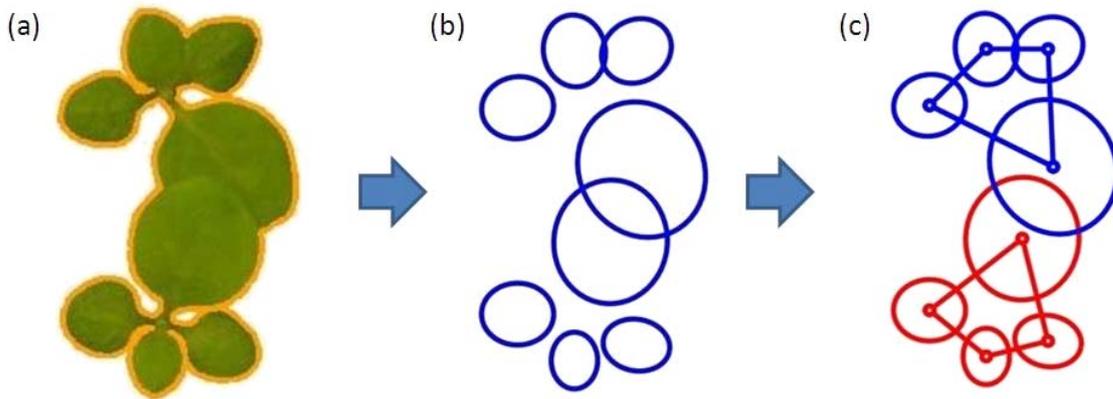


Figure 5: Plant identification example. (a) Plant in overlapping situation, (b) Identifying all possible leaves, (c) Clustering ellipsoids into single plants using an ASM

7 Conclusions

The presented algorithm is able to recognize single plants under overlapping situations by detecting single leaves and then grouping them into single plants. This research is still in progress and the proposed algorithm will be tested with other varieties of plants, e.g. plants whose leaves have elliptical and/or non-elliptical shapes.

Additionally, it is planned to investigate scalable models because the current algorithm is limited to recognize plants with 2, 3 or 4 leaves.

8 References

- COMANICIU D., MEER P. (2002):** Mean shift: A Robust Approach Toward Feature Space Analysis. IEEE Transaction on pattern analysis and machine intelligence 24, No. 5
- COOTES T., TAYLOR C., COOPER D., GRAHAM J. (1992):** Training models of shape from sets of examples. Proc. British Machine Vision Conference. Springer, Berlin. 266-275
- COOTES T., TAYLOR C. (1999):** Statistical models of appearance for computer vision. Available at: http://www.isbe.man.ac.uk/~bim/Models/app_models.pdf
- DUDA R.O., HART P.E., STORK D.G. (2001):** Pattern Classification. 2001. p. 164-172
- MCLAUGHLIN R.A. (1998):** Randomized hough transform: Improved ellipse detection with comparison. Pattern Recognition Letters 19 (3-4): 299–305
- SAENGDEEJING A., QU Z., CHAEROENLAP N., JIN Y. (2003):** 2-D Shape Recognition using Recursive Landmark Determination and Fuzzy ART Network Learning. Neural Processing Letters 18: 81–95
- YUEN H.K., ILLINGWORTH J., KITTLER J. (1989):** Detecting partially occluded ellipses using the hough transform. Image and Vision Computing 7: 31–37

3-D-Bildverarbeitung von röntgentomografischen Bodenanalysen im Mikrometerbereich

3-dimensional computer vision of x-ray tomographic images for micro soil structure analysis

Thomas Rath¹, Julio Pastrana¹, Stefan Dultz²

¹Biosystems Engineering Section, Leibniz University Hannover, Germany

²Institute for Soil Science, Leibniz University Hannover, Germany

E-mail: rath@bgt.uni-hannover.de

Kurzfassung: Mit Hilfe von Synchrotronstrahlung und Mikro-Röntgentomografieverfahren wurden 3-dimensionale Aufnahmen von Bodenstrukturen mit einer Auflösung von 700*700*700 nm/Voxel erstellt. Die ermittelten Daten wurden aufbereitet, analysiert und mit verschiedenen Algorithmen bearbeitet. 3-dimensionale Bodenstrukturen konnten berechnet und gut visualisiert werden.

Deskriptoren: Röntgentomografie, 3-D-Bildverarbeitung, Bodenporen

Summary: *3-dimensional images of soil structures were taken with the help of a synchrotron light source and micro-x-ray tomography, with a resolution of 700*700*700 nm/Voxel. The analysis of the data was carried out with different computational algorithms. Three dimensional soil structures were calculated for a good visualization.*

Keywords: *x-ray tomography, 3-D image processing, soil pores*

1 Einleitung, Zielsetzung

Chemische und physikalische Prozesse innerhalb und zwischen Bodenporen haben großen Einfluss auf die Verfügbarkeit von Wasser und Pflanzennährstoffen. Zur Visualisierung der Porenstrukturen wurden bisher verschiedene Methoden eingesetzt (z.B. Einpresungen von Tracersubstanzen, DULTZ *et al.* 2006). Der große Nachteil dieser Methoden besteht in dem Fehlen von direkt verwertbaren dreidimensionalen Bildinformationen.

Die Erfassung der kleinräumigen 3-D-Struktur (Poren) von Böden ist jedoch wichtig zur

- Validierung von Diffusions- bzw. Transportmodellen in der Bodenphysik und -chemie
- Erfassung von Boden- und Mineralunterschieden
- Bewertung von Substraten und organischen Böden.

Neuere Untersuchungen verwenden hierzu dreidimensionale bildgebende Verfahren. Die Arbeiten haben bisher jedoch eine unzureichende Auflösung oder es erfolgt keine optimale Visualisierung der ausgewerteten Daten (z.B. NUNAN *et al.* 2006, KAESTNER *et al.* 2006).

Ziel der vorliegenden Arbeit war es daher, 3-dimensionale Modelle von Bodenporenverteilungen zu erstellen, wobei auf eine besonders hohe räumlich Auflösung und Visualisierung Wert gelegt wurde.

2 Material und Methoden

Zur Erstellung der 3-dimensionalen Porenmodelle wurde die Röntgen-Mikrotomografie mit Synchrotronstrahlung eingesetzt. Synchrotronstrahlung ist die intensive Vorwärtsstrahlung eines auf eine Kreisbahn gezwungenen Elektrons. Sie ist hochenergetisch, gebündelt, polarisiert und hat ein breites Wellenlängenspektrum. Sie wird in Teilchenbeschleunigern i.d.R. durch kreisende Elektronen erzeugt, bei denen an bestimmten Stellen Strahllinien ausgekoppelt werden.



Abbildung 1: Synchrotron-Beschleuniger am Paul Scherrer Institut (CH) (SLS, 2008)

Die tomografischen Aufnahmen erfolgten am Synchrotron-Beschleuniger des Paul Scherrer Institutes (CH) (**Abbildung 1**). Die Aufnahmen wurden als Schichtaufnahmen von Mikro-Bodenproben aus 3 mineralischen Bodenmineralen und einem organischen Substrat mit Myzel erstellt. Die Messprobe war jeweils ein Würfel von 0,8 mm * 0,8 mm * 0,8 mm Kantenlänge (Sandkorngröße). Das Messsignal war die Rückstrahlaufnahme mit 8 bit Auflösung (256 Graustufen) und einer räumlichen Auflösung von 700 nm pro Pixel in xy-Richtung (1024 * 1024 Pixel). Die Schichtdicke einer Aufnahme betrug ebenfalls 700 nm, welches insgesamt in einer Voxelauflösung von 0,7 µm x 0,7 µm x 0,7 µm resultierte. Um Randeffekte zu minimieren, wurde aus den Aufnahmen jeweils ein zentraler Zylinder mit $d = 900$ Pixel als „Region of Interest“ herausgeschnitten.

Zur Erstellung der 3-dimensionalen Porenmodelle wurde zur besseren Differenzierung ein vorverarbeitender Gaußfilter eingesetzt. Anschließend erfolgte die Porenbinarisierung mit einem herkömmlichen Schwellenwertfilter (**Abbildung 2**). Nach der Schwellenwertfilterung wurden die selektierten Porenpixel der einzelnen Schichten zu Porenvoxeln zusammengeführt. Die Porenmodellierung erfolgte dann mit einem „Flooding-Algorithmus“, der schematisch in **Abbildung 3** dargestellt ist.

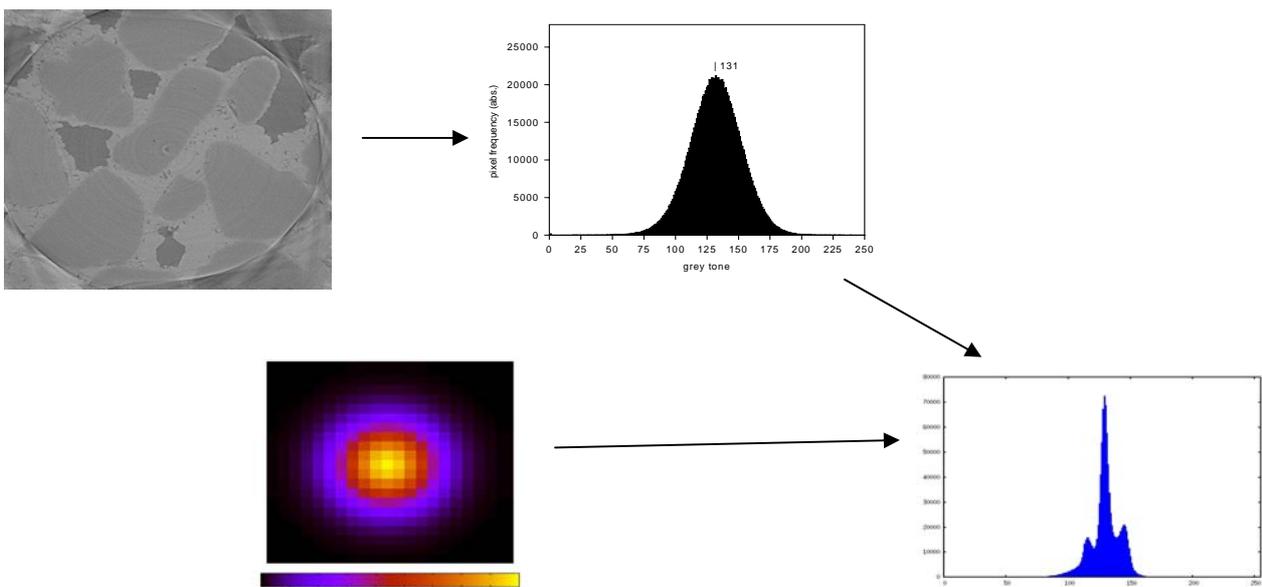


Abbildung 2: Schwellenwertfilterung mit Gaußfilter. Oben: Schichtaufnahme mit unterschiedlichen Fraktionen und dazugehöriges Grauerthistogramm. Unten: Gaußfiltermaske (21*21 Pixel) und resultierendes Histogramm (blau) mit Peaks, welche mit Schwellenwertfilterung den einzelnen Fraktionen zugeordnet werden können

1: Alle Porenpixel analysiert ? → Ja → 6
 → Nein → 2a
 2a: Auswahl eines noch nicht abgespeicherten Pixels
 2b: Auswahl eines noch nicht abgespeicherten Nachbarpixels
 3: Iterative Suche aller benachbarten Porenpixel in der Schicht = Region A
 4: Noch nicht abgespeichertes Nachbarpixel von A in anderer Schicht
 vorhanden? → Ja → 2b
 → Nein 4
 5: Porenvoxel abspeichern (x,y,z,-Koordinaten) → 1
 6: Selektion aller Poren > 27 Voxel (9261 μm^3)

Abbildung 3: Flooding-Algorithmus zur Porenselektion

Zur Visualisierung der Porenverteilungen wurden die ausgewählten Poren als „poröse Substanz“ dargestellt, indem bei der Visualisierung nur ein bestimmter Prozentsatz der Pixel verwendet wurde (**Abbildung 4**). Eine zweite Form der Darstellung wurde durch die Verwendung von morphologischen Operatoren erzielt. Jede Pore wurde im 2-D-Bild durch ihre Umrandung modelliert. Durch Überlagerung aller Umrandungen aller oder ausgewählter Schichtaufnahmen einer Probe konnte eine 3-dimensionale Darstellung der Porenhüllen erfolgen (**Abbildung 4**).

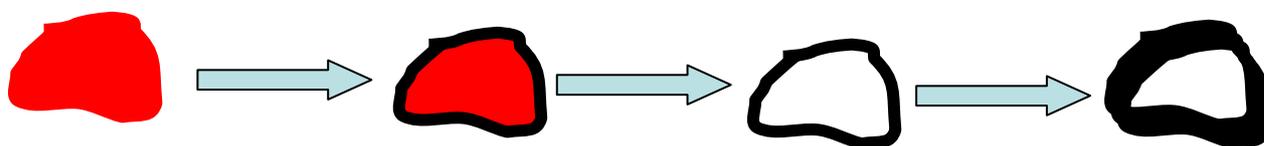


Abbildung 4: Porendarstellung mit Hilfe von morphologischen Hüllen. Von links nach rechts: selektierte Porenregion im 2-D-Bild, Umrandung, Umrandung selektiert, Hüllbildung durch Überlagerung mehrerer Schichtbilder

Die Analyse der aus dem „Flooding-Algorithmus“ resultierenden Mengen von Voxeltripeln konnte je nach Bedarf erfolgen. Somit konnten beliebige Porengrößen extrahiert werden. Genauso konnten Porenverteilungen errechnet werden. Eine besondere Verarbeitungsform wurde durch den Einsatz des Singular-Value-Decomposition-Verfahrens erreicht. Nämlich die Bestimmung der Hauptrichtung der ausgewählten Poren einer Probe. Hierbei bildeten alle ausgewählten Voxel Elemente einer Matrix, für die ein Hauptrichtungsvektor bestimmt wurde. Dieser Vektor minimierte die Abweichungsquadrate der Voxel im Raum. Das Verfahren entspricht in etwa der linearen Regression, wobei es besonders in höherdimensionalen Räumen gut eingesetzt werden kann. Die Berechnung der Richtungsvektoren erfolgte durch konventionelle Matrixoperationen unter Verwendung der Bestimmung der Eigenvektoren, Eigenwerte und der Karhunen-Loeve-Transformation (PCA) der Voxelmatrizen.

3 Ergebnisse

Abbildung 5 zeigt die 3-D-Visualisierung eines Wurzelmyzels in einem organischen Substrat bei 50% Porosität der Visualisierung und die aus den Daten ableitbaren Probenparameter.

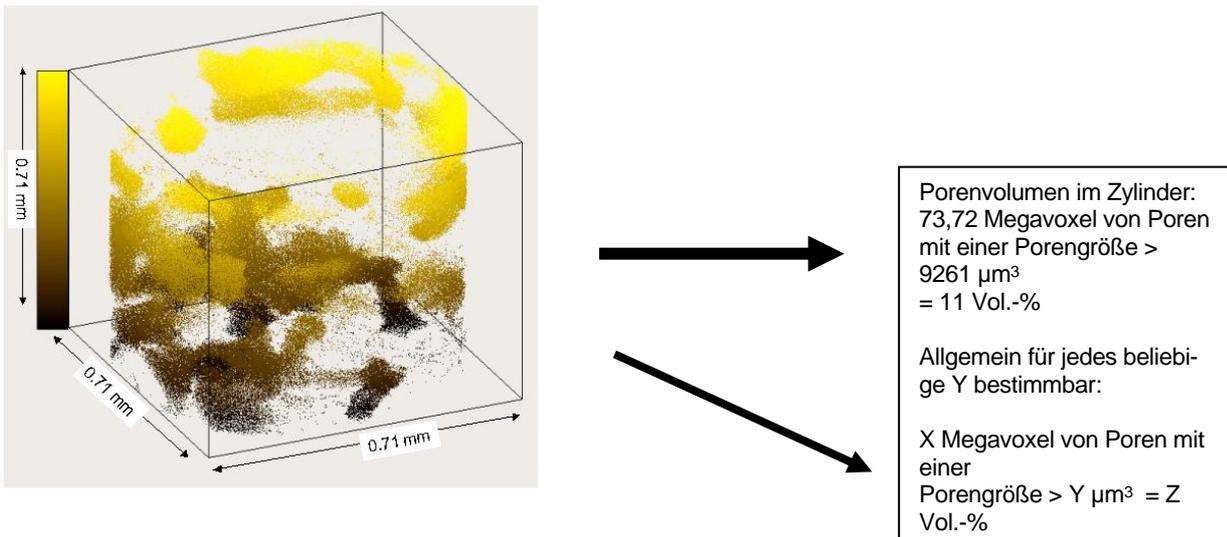


Abbildung 5: Porendarstellung (50% Porosität) und ableitbare Porenparameter

Abbildung 6 zeigt die Porenstruktur eines organischen Substrates nach Hüllbildung und farbiger Maskierung. **Abbildung 7** zeigt die Porenstruktur einer mineralischen Bodenprobe und den Verlauf des Haupttrichtungsvektors der erfassten Poren.

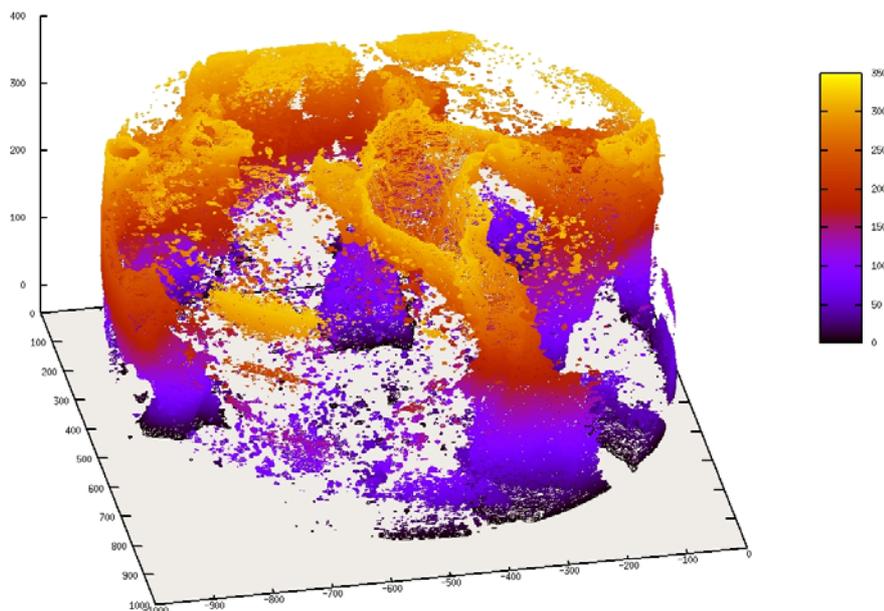


Abbildung 6: Porenstruktur eines organischen Substrates, dargestellt durch farbiger maskierte Porenhüllen

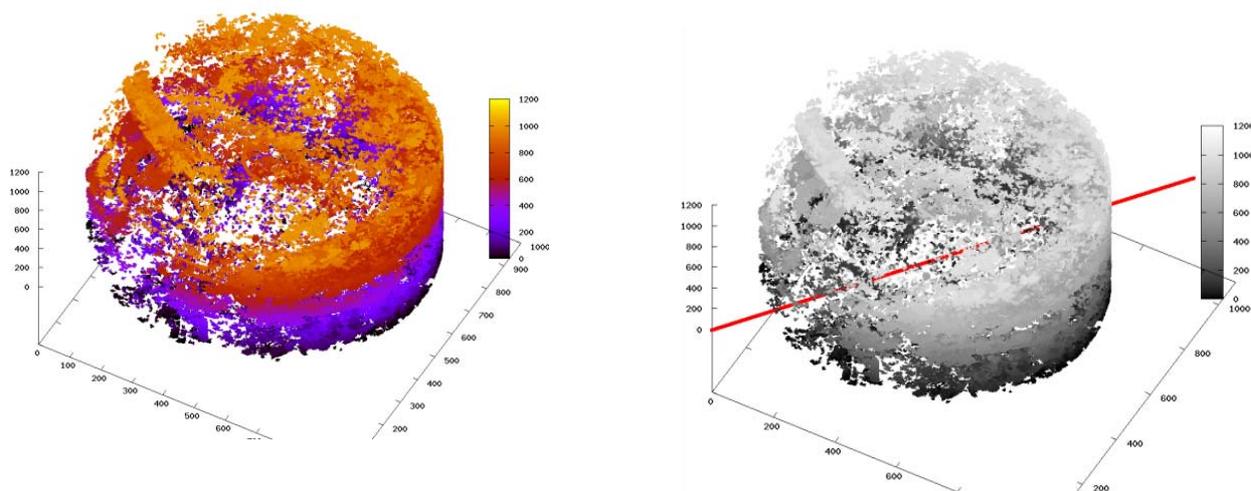


Abbildung 7: Porenverteilungen und berechnete Hauptporenrichtung in einer mineralischen Probe

4 Diskussion und Schlussfolgerungen

Mit der vorgestellten Methodik war eine 3-dimensionale Modellierung der Poren unterschiedlicher Ausgangsproben möglich. Der Einsatz der Gaußfilterung und die Entwicklung des „Flooding-Algorithmusses“ ermöglichte eine optimale Separierung der unterschiedlichen Poren. Durch die poröse Darstellung der Porenvoxel und besonders durch die Reduzierung der Poren auf die Hüllstrukturen konnten sehr gute Visualisierungen erreicht werden, die deutlich über bisherige Möglichkeiten hinausgehen. Hinzu kommt, dass diese Visualisierungsmöglichkeiten auf die jeweiligen Porenverteilungen und -strukturen justierbar sind.

Gleichzeitig bleibt festzuhalten, dass eine sichere Differenzierung zwischen Kleinstporen und Störungen/Rauschen bedingt durch die Aufnahmetechnik und –bearbeitung nicht zu erreichen ist. Damit ist die Validierung der Methodik schwierig, da kein Validierungsnormal besteht. Die Messungen sind sehr aufwendig, damit für breit angelegte konventionelle Untersuchungen eher nicht geeignet. Jedoch ergibt sich aus den Arbeiten ein großes Potential zur Überprüfung bisheriger physikalischer und chemischer Bodentransportmodelle. Eine Übertragung auf andere Problemstellungen ist denkbar

5 Literatur

DULTZ S., BEHRENS H., SIMONYAN A., KAHR G., RATH T. (2006): Determination of Porosity and Pore Connectivity in Feldspars from Soils of Granite and Saprolite. *Soil Science* 171: 675-694

KAESTNER A., SCHNEEBELI M., GRAF F. (2006): Visualizing three-dimensional root networks used computed tomography. *Geoderma* 136: 459-469

NUNAN N., RITZ K., RIVERS M., FEENEY D.S., YOUNG I.M. (2006): Investigating microbial micro-habitat structure using X-ray computed tomography. *Geoderma* 133: 398-407

SLS (2008): Paul Scherrer Institut, Schweiz: <http://sls.web.psi.ch>

Danksagung

X-ray tomography measurements at the Swiss Light Source were supported by the European Commission under the 6th framework programme through the key action: Strengthening the European Research Area, Research Infrastructures. Contract no.: RII3-CT-2004-506008

Visualisierung von Wasserflüssen in intakten Pflanzen mit Hilfe der Neutronenradiographie

Visualization of Water Flow in Intact Plants by Cold Neutron Radiography

Uzuki Matsushima¹, Nikolay Kardjilov², André Hilger², Wolfgang Graf³,
Werner B. Herppich⁴

¹Faculty of Agriculture, Iwate University, 3-18-8 Ueda, Morioka, Iwate 020-8550, Japan

²Bereich Strukturforschung, Neutronentomographie, Hahn-Meitner-Institut, Glienicker Str. 100, 14109 Berlin, Germany

³Arbeitsgruppe Zierpflanzenbau, Institut für Gartenbauwissenschaften, Humboldt Universität Berlin, Lentzeallee 75, 14195 Berlin, Germany

⁴Abteilung Technik im Gartenbau, Leibniz-Institut für Agrartechnik Potsdam-Bornim, Max-Eyth-Allee 100, 14469 Potsdam, Germany

E-mail: wherppich@atb-potsdam.de

Kurzfassung: Wasseraufnahme- und Wassertransportaktivität sind gute Indikatoren der Leistungsfähigkeit bzw. des Gesundheitszustandes von Pflanzen. Konventionelle Wassertransportmesssysteme liefern nur einen groben Überblick oder geben ein detailliertes Bild eines kleinen Teils der Pflanze wieder. Die 3D-Bildanalyse mit kalten Neutronen bietet dagegen eine hohe Auflösung bei relativ großem Bildausschnitt. Untersuchungen mit dieser Methode konnte am Neutronentomographiesystem CONRAD (HMI, Berlin) durchgeführt werden. Junge Tomatenpflanzen wurden alternierend mit H₂O und D₂O versorgt, während regelmäßig neutronenradiographische Aufnahmen der Pflanzen gemacht wurden. Aufgrund ihrer unterschiedlichen Dämpfungskoeffizienten für kalte Neutronen können D₂O und H₂O auf den Radiographiebildern klar unterschieden werden. Durch Vergleich der zeitlichen Dynamik des D₂O-Signals nach dem Austausch kann man die Wasser-Verteilung in Wurzel und Stamm verfolgen und Wasseraufnahmerate bzw. Wassertransportgeschwindigkeit berechnen. Mittels Chlorophyllfluoreszenz wurde gezeigt, dass weder die Neutronenstrahlung noch der H₂O/D₂O-Austausch die physiologische Aktivität der Versuchspflanzen beeinträchtigt. Andererseits erbrachte die Neutronenradiographie verlässliche Informationen über den Wasserzustand der Pflanzen.

Deskriptoren: Chlorophyllfluoreszenzbildanalyse, Neutronenradiographie, Wasserflüsse

Summary: *Water uptake and water transport are good indicators for plants' condition. Conventional methods to measure water transport either offer only a macroscopic image or give a detailed picture of a very small region of the plant. 3D-imaging with cold neutrons*

provides both a high resolution and a relatively large field of view. A series of experiments were performed at HMI's new cold neutron tomography instrument CONRAD. Tomato seedlings were alternately supplied with either H₂O or D₂O and neutron radiograms were taken at regular intervals. Due to their different attenuation coefficients for cold neutrons, D₂O and H₂O can be clearly distinguished in radiographic images. From the D₂O level in the stem at different times after exchange, velocity of water uptake and water flow in the seedling was deduced. Chlorophyll fluorescence imaging was used to prove that cold neutron irradiation or H₂O/D₂O exchange do not harm plant's metabolism. Consequently, neutron radiography provides reliable information on the physiological processes in plants.

Keywords: *Chlorophyll fluorescence imaging analysis, neutron radiography, water flow*

1 Einleitung

Einer der entscheidenden Faktoren für das Leben und das Überleben von Pflanzen ist Wasser. Als Lösungsmittel und auch gleichzeitig als Substrat garantiert Wasser das Funktionieren vieler Stoffwechselmechanismen, wie z. B. der Photosynthese. Wasserverfügbarkeit, Wasserverteilung und Wasserflüsse regulieren verschiedenste physiologische Vorgänge in Pflanzen (VON WILLERT *et al.* 1995, LÖSCH 2001). In der Zukunft kann Wasser aber ein begrenzender Faktor in Landwirtschaft und Gartenbau werden. Die umfassende Kenntnis des Wasserzustandes, vor allem von Wasseraufnahme, Wasserverteilung und Wasserflüssen in den Pflanzen kann helfen, die verschiedenen Probleme, die sich durch Wassermangel ergeben, besser zu verstehen. Durch gezielte Züchtung kann dann die Trockenstresstoleranz erhöht werden (ARAUS *et al.* 2002).

Die Möglichkeiten, den Wassertransport zerstörungsfrei, in-situ zu untersuchen, sind sehr begrenzt. Selbst die moderne Heat-Balance-Technik (VON WILLERT *et al.* 1995, LÖSCH 2001) beeinflusst, zumindest partiell, den Wassertransport selbst. Hier bieten nicht-invasive, bildgebende Methoden, wie die Kernspinn-Tomographie (Magnetic Resonance Imaging, MRI, KUCHENBROD *et al.* 1996) oder die weit weniger bekannte Kalte-Neutronen-Radiographie bzw. -Tomographie (Cold Neutron Radiography, CNR, MATSUSHIMA *et al.* 2005a, b, 2007) einen erfolgversprechenden Ansatz, um den Wasserzustand und den Wassertransport in intakten Pflanzen zu untersuchen.

Neutronen-Radiographie ist ein effektives, bildgebendes System, das die starken Wechselwirkungen zwischen thermischen oder kalten Neutronen und Wasserstoff nutzt, um selbst geringe Mengen von Wasser sehr kontrastreich darzustellen. Da ein Strahl kalter Neutronen andererseits sehr leicht viele Metall, wie z. B. Al, Fe, Cu oder Pb durchdringt, wurde die CNR bisher in erster Linie genutzt, um Wasser oder wasserstoffhaltige organische Substanzen in mechanischen Geräten zu visualisieren (TRABOLD *et al.* 2006).

Eingang in die biologische Forschung fand diese Methode nach 1990. Da auch Sand relative transparent für Neutronenstrahlung ist, erweist sich die CNR als eine elegante Möglichkeit, zerstörungsfrei Pflanzenwurzeln zu untersuchen (NAKANISHI *et al.* 1991, 1992) oder den Austausch von Mineralien zwischen Boden und Wurzeln zu charakterisieren (SAITO *et al.* 1997, OSWALD *et al.* 2005, MANNES *et al.* 2006a). Diese Technik ermöglichte es, die Wasserverteilung um das Wurzelsystem von Sojapflanzen dreidimensional abzubilden (NAKANISHI *et al.* 2005, KIM *et al.* 2006). MATSUSHIMA *et al.* (2005a, b, 2007) untersuchte die Wasserverteilung in Blüten, Blättern und Stängeln unterschiedlicher Zierpflanzen, beispielsweise den lokalen Wasserverlust von Chrysanthemenblätter während der Vakuunkühlung (MATSUSHIMA *et al.* (2005b). In Sämlingen der Japanischen Zeder wiesen YAMADA *et al.* (2005) Gewebeverfärbungen und ausgetrocknete Gewebebereiche, beides Folgen eines Pilzbefalles, zerstörungsfrei nach. Die Neutronenradiographie wurde aber auch verwendet, um den internen Wassergehalt bzw. die Wasserverteilung in Baumstämmen oder Bauholz abzubilden (LEHMANN *et al.* 2005, MANNES *et al.* 2006b).

Neue Entwicklungen der CNR, wie die Verwendung von Neutronen sehr geringer Energie oder monochromatische Neutronenstrahlung, erweitern das Potential der möglichen Anwendung dieser Methode in den angewandten Pflanzenwissenschaften. Diese neuen Entwicklungen bieten bessere räumliche Auflösung und einen höheren Kontrast. Im Folgenden soll die Methode der Neutronenradiographie näher vorgestellt und beispielhaft Ergebnisse eigener Versuche aufgezeigt werden.

2 Material und Methoden

Neutronenradiographie – Grundlagen: Die Neutronenradiographie visualisiert die Abschwächung eines Neutronenstrahls durch das untersuchte Medium. Dabei nutzt man den Effekt, dass die Neutronen von den Kernen der Elemente des bestrahlten Gegenstandes absorbiert oder an diesen gestreut werden können. Während etwa bei der Röntgenradiographie, bei der die Röntgenphotonen mit den Elektronen der Elementhülle wechselwirken, die Abschwächung mit der Zahl der den Kern umgebenden Elektronen und folglich mit der Atomzahl der enthaltenen Elemente zunimmt, scheint bei der Neutronenstrahlung der Zusammenhang mit der Atomzahl eher zufällig zu sein. Auffällig ist, dass speziell einige leichte Elemente wie Bor, Beryllium, Lithium oder Stickstoff vor allem aber Wasserstoff, Neutronen sehr effektiv absorbieren oder streuen. Auf der anderen Seite durchdringen diese Partikel schwere Elemente wie Blei, Titan, Nickel, Kupfer und andere sehr leicht. Elemente mit benachbarten Ordnungszahlen, ja selbst Isotopen des gleichen Elements können deutlich unterschiedliche Absorptions- bzw. Streueigenschaften für Neutronen aufweisen.

Die Wahrscheinlichkeit, mit der Neutronen von einem bestimmten Material gestreut oder absorbiert werden, hängt von seinem sogenannten Gesamtquerschnitt ab, der Summe aus dem Streu- und dem Absorptionsquerschnitt. Aus **Formel 1** ist ersichtlich, wie die Anfangsintensität I_0 eines Neutronenstrahls beim Durchdringen des Materials mit der Dicke x , der Dichte ρ und des Schwächungskoeffizienten μ_m auf den Endwert (I) verringert wird.

$$I = I_0 * e^{-\mu_m * \rho * x} \quad (1)$$

Der Strahl, der nach Durchgang durch einen Gegenstand von einem zweidimensionalen Bildgeber aufgezeichnet wird, ergibt ein Bild, das zur Analyse der makroskopischen Struktur eben dieses Gegenstandes genutzt werden kann. Dies ist möglich, da der Schwächungskoeffizient von der Dichte und von der Elementzusammensetzung abhängt. Das Bild, das die durchdringenden Neutronen aufbauen, liefert also eine Reflexion der Menge und der Anordnung bestimmter Elemente in der Probe.

Wasserstoff ist eines der Elemente, die den größten Schwächungskoeffizienten besitzen. Selbst geringe Mengen ergeben deshalb auch in sehr komplexen Systemen klare, kontrastreiche Radiographiebilder. In pflanzlichen Geweben ist Wasserstoff ein entscheidender

der Baustein, beispielsweise von Wasser, Säuren, Zuckern oder Lipiden. Das bei weitem am häufigste wasserstoffhaltige Molekül lebender Pflanzen ist Wasser. Sein Gehalt oder seine Verteilung in der Pflanze unterliegt sehr häufig deutlichen Änderungen.

Aufgrund seiner hohen Nachweisempfindlichkeit für Wasserstoff bietet sich deshalb gerade die CNR als geeignete Methode an, um die Variation von Wassergehalt und Wasser-
verteilung in intakten Pflanzen zu untersuchen.

Neutronenradiographie – Kalte Neutronen: Nach ihrem Energiegehalt können Neutronen grob als schnelle Neutronen (hoher Energiegehalt), thermische Neutronen, kalte und sehr kalte Neutronen (geringer Energiegehalt) eingeteilt werden. Diese Unterschiede im Energiegehalt beeinflussen auch die Transmission der Neutronen. Die Wahrscheinlichkeit einer Wechselwirkung der Neutronen mit der Probe ist nämlich umgekehrt proportional zum Energiegehalt.

Mit Hilfe von flüssigem Wasserstoff oder Deuterium in der Neutronenquelle lassen sich schnelle Neutronen gut abbremsen und damit ihr Energiegehalt verringern. Dies wiederum erlaubt eine deutliche Vergrößerung des Gesamtquerschnittes und damit eine Verringerung der Transmission. Neutronen mit geringem Energieinhalt, d. h. kalte Neutronen, erzeugen deshalb Radiogramme mit sehr hohem Kontrast und vergrößern damit den Dynamikbereich bei der Beobachtung von Veränderungen im Wassergehalt von Pflanzen. Kalte Neutronen eignen sich auch sehr gut, um Pflanzen mit dünnen Stämmchen oder Blättern sowie kleinen, aber komplexen Strukturen zu untersuchen, da die Auflösung des Radiogramms nur von der effektiven Wasserdicke direkt begrenzt wird.

Wie oben erwähnt, ermöglicht langwelligere und damit energieärmere Strahlung auch kontrastreichere Radiogramme (**Abbildung 1**). Die Wellenlänge des spektralen Peak der Neutronenstrahlung die für die Aufnahmen in **Abbildung 1** genutzt wurden, betrug etwa 0,3 (**Abbildung 1A**) bzw. 6,0 nm (**Abbildung 1B**). In **Abbildung 1B** sind die Blattadern wesentlich klarer erkennbar, da aufgrund der verwendeten höheren Wellenlänge (6,0 nm) und des damit verbundenen höherer Schwächungskoeffizienten für H₂O ein deutlicherer Kontrast in der Neutronenaufnahme möglich ist.

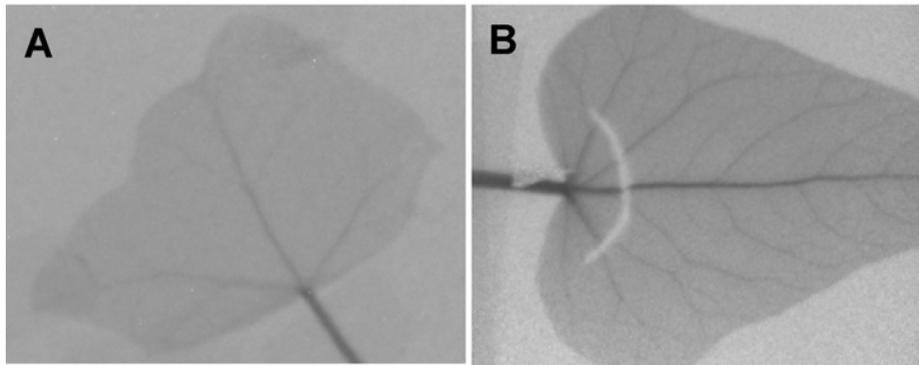


Abbildung 1: Neutronradiographienbilder von Efeublättern, erzeugt mit Neutronenstrahlung unterschiedlicher Wellenlängen; A: etwa 0,3 nm (CONRAD, BER-II), B: ca. 6,0 nm (VCN port, PF2, Institut Laue-Langevin, ILL, France) (verändert nach KAWABATA *et al.* 2005, MATSUSHIMA *et al.* 2005c)

Neutronenradiographie – Bildgebende Systeme: In den letzten Jahren wurden weltweit verschiedene Messplätze für die CNR aufgebaut. Bekannte Systeme sind das CNRF (“Cold Neutron beam for the Radiography Facility” am Forschungsreaktor JRR-3M, Japan Atomic Energy Res. Inst., Ibaraki, Japan), das ICON (“Imaging with Cold Neutrons” an der Swiss Spallation Neutron Source, SINQ, des Paul Scherrer Instituts, Villigen, Schweiz), ANTA-RES (“Advanced Neutron Tomography And Radiography Experimental System” am FRM II der Technische Universität München) und CONRAD (“Cold Neutron Radiography” am BER II des Hahn-Meitner Instituts, Berlin. Die Wellenlänge der kalten Neutronenstrahlung dieser Anlagen liegt bei etwa 0,3 bis 0,4 nm.

Am Beispiel von CONRAD soll der Aufbau einer solchen Anlage kurz erläutert werden. Der Messplatz liegt am Ausgang eines gebogenen, nickelverkleideten Neutronenleiters des Versuchsreaktor BER II. Die Peakwellenlänge des Neutronstrahlspektrums liegt bei etwa 0,31 nm (HILGER *et al.* 2006). Es stehen zwei unterschiedliche Versuchspositionen zur Verfügung. Der Neutronenstrahl an Position 1 hat eine hohe Flussdichte und eine geringe räumliche Auflösung. Im Gegensatz dazu ist die 2. Messposition durch eine optimierte Lochblendegeometrie speziell für eine hohe räumliche Auflösung ausgelegt. Die Strahlgröße an dieser Position beträgt etwa 10 cm x 10 cm, die erreichte Auflösung ist besser als 200 µm (KARDJILOV *et al.* 2005, HILGER *et al.* 2006). Entsprechend ihrer experimentellen Anforderungen können Nutzer die jeweilig günstige Messposition auswählen. Am Ausgang des Neutronenleiters im Bestrahlungsmessraum steht sehr viel Platz für den eigentlichen Messaufbau zur Verfügung.

Die auf einem Szintillatorschirm sichtbar gemachten radiographischen Bilder werden, an einem Spiegel umgelenkt, mit einer Andor DW436N-BV CCD-Kamera (2048x2048 Pixel, jedes 13,5x13,5 µm² groß) mit 50 mm Nikon Kameralinse aufgenommen. Dieses System erlaubt im Moment eine räumliche Auflösung von bis zu 25 µm. Diese Auflösung der CNR-Bilder wurde und wird durch Verringerung der Dicke des bildgebenden Szintillators und durch die gezielte Nutzung energieärmerer Neutronenstrahlung weiter verbessert (FREI & LEHMANN 2006, KÜHNE *et al.* 2006).

Versuchspflanzen und Messdurchführung: Die für die Versuche an CONRAD verwendeten Tomatensetzling (*Solanum lycopersicum* L. cv. Harzfeuer) wurden aus Samen auf Sand in einer Klimakammer (VB 1014, Vötsch Industrietechnik GmbH, Balingen; $T_{\text{Tag/Nacht}} = 22/15^{\circ}\text{C}$, $rF_{\text{Tag/Nacht}} = 40/70\%$; $220 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ photosynthetisch aktive Photonflussdichte für 14 h d^{-1}) gezogen. Die Pflanzen wurden täglich mit Leitungswasser gegossen. Für die Experimente wurden die Pflanzen verwendet nach dem sie das 3. Laubblatt gebildet hatten. Dann wurden die Setzlinge vorsichtig aus dem Sand entnommen und mit den Wurzeln in einen mit feinen Sodaglasperlen und H_2O gefüllten Glaszylinder umgesetzt. Während der Versuche wurden sie mit einer Halogenlampe (Osram, Hamburg) belichtet und mit einem Durchflusswasserfilter aus Plexiglas gegen die Lampenhitze geschützt (**Abbildung 2**). Mit einem PC-kontrollierten System konnten in den Glaszylindern H_2O und D_2O automatisch ausgetauscht werden, ohne die Pflanzen Trockenstress aus zu setzen. Während der Versuche wurden alle 15 Sekunden CNR-Aufnahmen gemacht (10 s Bestrahlung).

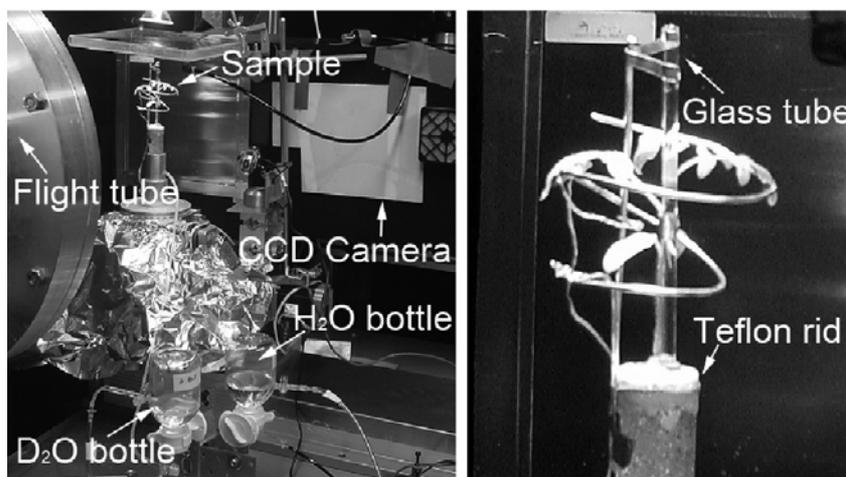


Abbildung 2: Versuchsanordnung für die CNR-Visualisierung des Wassertransportes in Tomatenpflanzen durch den alternierenden Austausch von H_2O und D_2O . Linkes Bild, Gesamtansicht mit CCD-Kamera, $\text{H}_2\text{O}/\text{D}_2\text{O}$ Austauschsystem und Neutronenstrahlausgang (flight tube); rechtes Bild, Detailaufnahme der fixierten Tomatenpflanze

In einigen Versuchsreihen wurden parallel zu den CNR-Messungen alle 15 min mit einem offenen Chlorophyllfluoreszenzbildanalyse-System (FluorCAM 640MF, PSI, Brno, Tschechische Republik) Fluoreszenzuntersuchungen gemacht (NEDBAL *et al.* 2000). Dafür wurden die Pflanzen kurz (2 min) verdunkelt, dann mit einem schwachen (ca. $5 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), gepulsten (50 Hz) Licht, das von zwei LED-Feldern (je 345 orange LED, $\lambda_{\text{max}} = 620 \text{ nm}$) abgegeben wurde, kurz (3 s) belichtet, um die Grundfluoreszenz (F_0 , vgl. VON WILLERT *et al.* 1995) zu messen. Anschließend wurde mit einer Halogenlampe (250 W), die mit einem schnellen elektronisch Verschluss ausgestattet ist, ein kurzer (1 s) Puls sehr hoher Lichtintensität (ca. $2000 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) auf die Pflanze gegeben, um das maximale Fluoreszenzsignal (F_m) auszulösen. Der Quotient $(F_m - F_0)/F_m$ oder F_v/F_m ist ein Maß für die potentielle maximale photochemische Effizienz und damit ein guter Indikator für die mögliche Leis-

tungsfähigkeit und die Integrität der Photosynthese (vgl. VON WILLERT *et al.* 1995, HERPPICH 2002).

Für diese Messungen wurde die FluorCAM rechtwinklig zur Neutronenstrahlenrichtung installiert, um eine direkt Bestrahlung des Gerätes zu vermeiden. Die Glaszylinder mit der Pflanzen waren auf einem beweglichen Teller befestigt, mit dem die Pflanze automatisch um 90° aus der Neutronenstrahlrichtung zur FluorCAM gedreht werden konnte.

3 Ergebnisse und Diskussion

Visualisierung von Wasseraufnahme und Wassertransport: Aufgrund ihrer unterschiedlichen Schwächungskoeffizienten für kalte Neutronen sind H_2O und D_2O auf den radiographischen Aufnahmen sehr gut zu unterscheiden (**Abbildung 3**). Die Aufnahme und die Weiterleitung von Wasser vom Wurzelsystem in den Stängel der Tomatenpflanze ist in diesen Abbildungen, die zu verschiedenen Zeitpunkten nach dem Austausch beider Flüssigkeiten gemacht wurden, durch den positiven Kontrast von D_2O sehr gut zu erkennen. Dies zeigt, dass schweres Wasser gut als Tracer für die CNR geeignet ist. D_2O wird ohne Probleme von den Pflanzen aufgenommen, da die chemischen und physikalischen Eigenschaften von H_2O und D_2O sehr ähnlich sind (HOLLEMANN & WIBERG 1985). Schweres Wasser wurde auch schon in anderen Bereichen der Pflanzenwissenschaften als Indikator für Wasseraustausch und Wassertransportprozesse verwendet (ILVONEN *et al.* 2001, SEKIYA & YANO 2004, ICHMASA *et al.* 2005). Nach unserem besten Wissen sind das hier aber die ersten Versuche, die D_2O als Tracer für CNR nutzen.

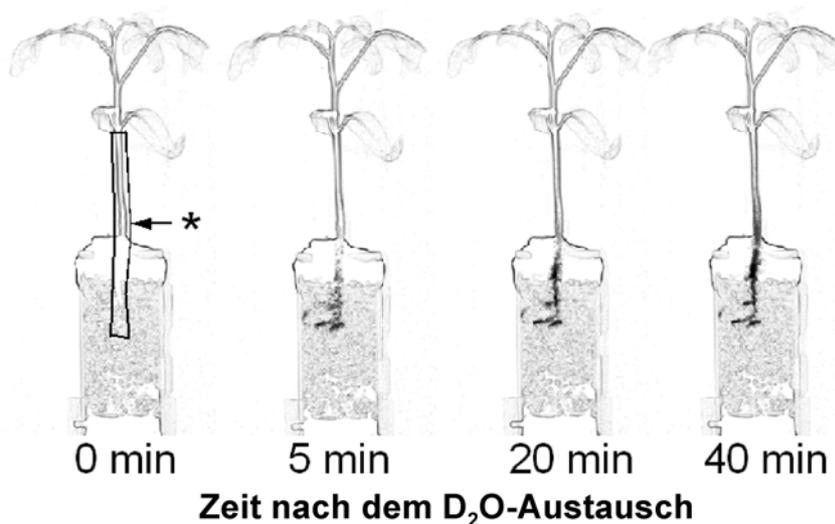


Abbildung 3: Ein Beispiel für eine Bildsequenz zur Visualisierung der Wasseraufnahme und des Wasserflusses in einer jungen Tomatenpflanze. Der Stern bezeichnet den Stängelteil, der zur Analyse der Flussgeschwindigkeit genutzt wurde. Der dunkle Bereich entspricht der Menge an D_2O im Stammchen

Aus der Analyse der zeitlichen Veränderung der Kontrastgrenze in den Aufnahmen der Tomatenpflanzen lässt sich die Flussgeschwindigkeit des Xylemwasser berechnen (**Abbildung 4**). In diesem Experiment wurde eine Flussrate von etwa $2,6 \text{ cm h}^{-1}$ bzw. $0,01 \text{ mm s}^{-1}$ bestimmt. Diese Rate ist deutlich niedriger als die von PEUKE *et al.* (2001) mittels MRI-Analyse an ausgewachsenen Rizinuspflanzen gefunden wurde. Allerdings waren die verwendeten Tomatensetzlinge noch sehr jung und der Xylemfluss aufgrund des nicht vollständig ausdifferenzierten Leitbündelsystems langsamer als bei vollentwickelten Rizinuspflanzen. Außerdem herrschte während der Messung nur ein sehr geringes VPD (ca. 7 kPa MPa^{-1}) und damit eine stark verminderte Transpiration. Gerade solch geringe Flussgeschwindigkeiten sind auch mit modernen Heat-Balance-Systemen praktisch nicht messbar (VON WILLERT *et al.* 1995).

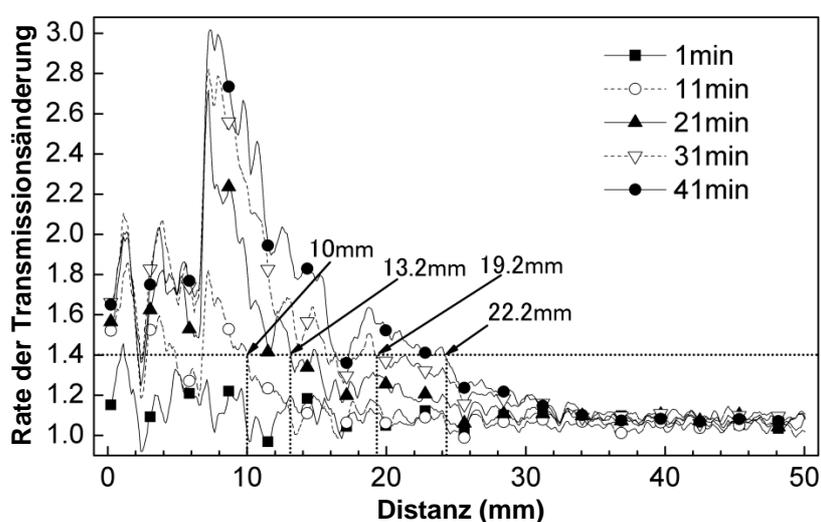


Abbildung 4: Änderung der Kontrastgrenze zwischen H_2O und D_2O im Tomatenstängel zu unterschiedlichen Zeiten nach dem Austausch von leichtem und schwerem Wasser

Kombiniert man die D_2O -Tracer-Technik mit der Neutronentomographie (Neutron Computed Tomography, NCT) ist es möglich, dreidimensionale Karten der Verteilung von D_2O bzw. H_2O zu konstruieren. In **Abbildung 5A** ist die D_2O -Verteilung in einem einzelnen vertikalen tomographischen Schnitt des oberen Stängelabschnittes (Pedunkel) und der Blüte einer Rose dargestellt. Unter der Nutzung mehrerer nahe beieinander liegender horizontaler NCT-Schnitte ist es möglich, eine D_2O -Austauschkarte zu konstruieren. Dies wiederum erlaubt es, die Intensität des Wasseraustausches zwischen Xylem und dem umgebenden Gewebe und letztlich auch die Menge des im Xylem transportierten Wassers zu berechnen (**Abbildung 5B**). Die unterschiedlichen Graustufen kennzeichnen hier die Austauschintensität und damit die Menge an D_2O . Ein Vergleich mit einem lichtmikroskopischen Schnitt (**Abbildung 5C**) zeigt auch, dass der D_2O -Fluss von Leitbündel in den Markbereich stärker war als in die anderen Gewebe.

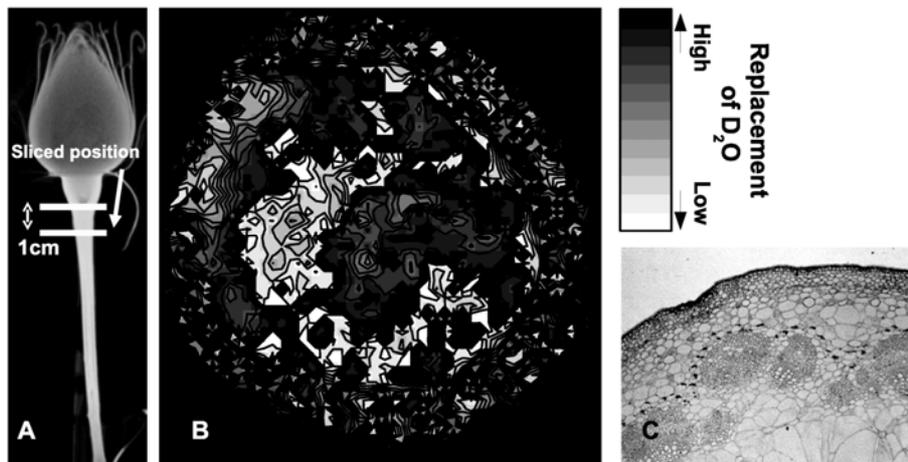


Abbildung 5: D₂O-Karte eines Schnittbildes aus einem Kalte-Neutronen-Tomogramm (CNT) eines Rosenpedunkels. A: Vertikalschnitt einer CNT-Aufnahme. Dies Linien kennzeichnen die Schnittebenen des CNT die zur Konstruktion der D₂O-Austauschkarte (B) genutzt wurden. C: Optische Mikroskopieaufnahme eines Schnittes durch den Pedunkel einer Rose (*Rosa hybrid cv. Akito*)

Einfluss von schwerem Wasser und Neutronenstrahlung auf die Photosyntheseaktivität: Auch wenn D₂O schon vielfach bei intakten Pflanzen als Tracer für den Wasseraustausch verwendet wurde (ILVONEN *et al.* 2001, SEKIYA & YANO 2004, ICHMASA *et al.* 2005), so liegen doch keine gesicherten Ergebnisse vor, dass das schwere Wasser bei längerer Anwendung nicht doch die physiologische Aktivität der Versuchspflanzen beeinträchtigt. Über den Einfluss der Bestrahlung mit kalten Neutronen auf lebendes pflanzliches Gewebe gibt es bisher noch keine Untersuchungen. Deshalb wurde mit Hilfe der Chlorophyllfluoreszenzbildanalysetechnik (VON WILLERT *et al.* 1995, NEDBAL *et al.* 2001) untersucht, ob die Bestrahlung und/oder der Austausch von H₂O und D₂O die photosynthetische Aktivität, ein sensibler Indikator der metabolischen Intaktheit der Versuchspflanzen, beeinträchtigt.

Wie in **Abbildung 6** klar ersichtlich, kann weder D₂O noch die kalte Neutronenstrahlung alleine oder in Kombination die potentielle maximale photochemische Effizienz (F_v/F_m) direkt behindern, zumindest nicht während der verwendeten einstündigen Belastungsdauer. Das belegt, dass unter den verwendeten Versuchsbedingungen die angewandten Methoden für die Versuchspflanzen völlig belastungs- und zerstörungsfrei sind.

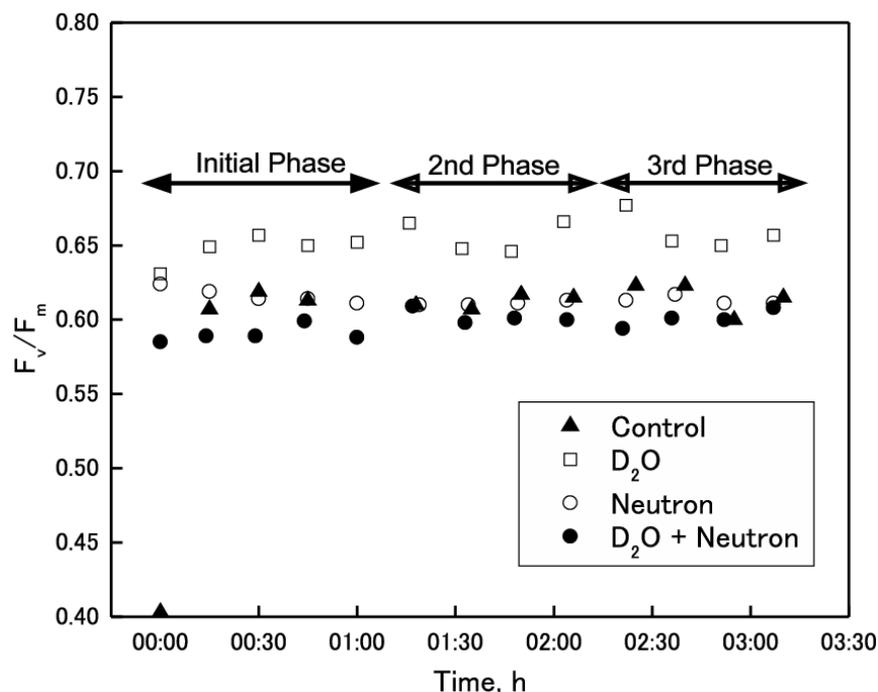


Abbildung 6: Variation der maximalen photochemischen Effizienz (F_v/F_m) in unterschiedlich behandelten Tomatenpflanzen. Kontrolle (▲): Pflanzen wurden während Phase 2 weder Neutronenstrahlung noch schweren Wasser ausgesetzt. D₂O (□): Pflanzen wurden während Phase 2 dem schweren Wasser aber keiner Neutronenstrahlung ausgesetzt. Neutron (○): Pflanzen wurden während Phase 2 nur der Neutronenstrahlung ausgesetzt. D₂O + Neutron (●): die Pflanzen wurden während Phase 2 sowohl der Neutronenstrahlung als auch dem schweren Wasser ausgesetzt. In der initial Phase und Phase 3 waren die Pflanzen völlig unbelastet

4 Schlussfolgerung

CNR und NCT sind in Kombination mit D₂O als Tracer sehr gut für die zerstörungsfreie Darstellung von Wasserflüssen in Pflanzen geeignet. Die Methode ist für Pflanzen unschädlich und ermöglicht die Berechnung von Flussgeschwindigkeit und Flussrate. Sie besitzt eine hohe räumliche Auflösung.

Allerdings ist die Methode auf Proben mit geringem Durchmesser (Wasserdicke) beschränkt. CNR und NCT sind weiterhin sehr aufwendig und an spezielle Forschungsreaktoren gebunden.

5 Literatur

ARAUS J.L., SLAFER G.A., REYNOLDS M.P., ROYO C. (2002): Plant breeding and drought in C₃ cereals: What should we breed for? *Annals of Botany* 89: 925-940

FREI G., LEHMANN E. (2006): Optimization of neutron sensitive imaging scintillators. Book of abstracts, 8th world conference of neutron radiography, 21. National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, USA

- HERPPICH W.B. (2002):** Application potential of chlorophyll fluorescence imaging analysis in horticultural research. In: Zude, M., Herold, B., Geyer, M. (eds), Proceedings of the 6th International Symposium on Fruit, Nut and Vegetable Production Engineering, 609-614. Leibniz Institut für Agrartechnik Potsdam-Bornim e.V., Potsdam
- HILGER A., KARDJILOV N., STROBL M., TREIMER W., BANHART J. (2006):** The new cold neutron radiography and tomography instrument CONRAD at HMI Berlin. *Physica B* 385: 1213–1215
- HOLLEMAN A.F., WIBERG N. (1985):** Lehrbuch der Anorganischen Chemie. Walter de Gruyter, Berlin.
- ICHMASA Y., SASAJIMA E., MAKIHARA H., UDA T., ICHIMASA M. (2005):** Uptake of heavy water and loss by tangerine in the heavy water vapor release experiment in a green house as a substitute for tritiated water. *Fusion Science and Technology* 48: 775-778
- ILVONEN K., PALVA L., PERÄMÄKI M., JOENSUU R., SEPPONEN R. (2001):** MRI-based D₂O/H₂O-contrast method to study water flow and distribution in heterogeneous systems: Demonstration in wood xylem. *Journal of Magnetic Resonance* 149: 36-44
- KARDJILOV N., HILGER A., MANKE I., STROBL M., TREIMER W., BANHART J. (2005):** Industrial applications at the new cold neutron radiography and tomography facility of the HMI. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A* 542: 16–21
- KAWABATA Y., HINO M., NAKANO T., SUNOHARA H., MATSUSHIMA U., GELTENBORT P. (2005):** Application of very low energy neutron radiography with energy selection system using 4QC (4M) super mirror. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A* 542, 61–67
- KIM H.H., SUNG B.J., SIM C.M., LEE S.W., JEON S.J., KIM Y.J. (2006):** Development of techniques for ginseng root growth analysis using neutron radiography. Proceedings of the 8th world conference of neutron radiography, 49. National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, USA
- KUCHENBROD E., LANDECK M., THÜMER F., HAASE A., ZIMMERMANN U. (1996):** Measurement of water flow in the xylem vessels of intact maize plants using flow sensitive NMR imaging. *Botanica Acta* 109: 184–186
- KÜHNE G., VONTOBEL P., FREI G., LEHMANN E., BUHLMANN M., HEINGER K.C., ZWEIFEL B. (2006):** Neutron imaging facilities at the Paul Scherrer Institut and their application for non-destructive testing of abrasive water jet nozzle's. ECNDT 2006 proceedings. <http://www.ndt.net/article/ecndt2006/papers1.htm>, p. Tu.3.5.1
- LEHMANN E., HARTMANN S., WYER P. (2005):** Neutron radiography as visualization and quantification method for conservation measures of wood firmness. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A* 542: 87–94
- LÖSCH R. (2001):** Wasserhaushalt der Pflanzen. Quelle & Meyer, Wiebelsheim, Germany, ISBN 3-8252-8141-8
- MANNES D., LEHMANN E., OSWALD S., NIEMZ P. (2006a):** Investigation of water transport processes in plants by means of neutron imaging techniques. Proceedings of 5th Plant Biomechanics Conference, Stockholm, Aug. 28– Sept. 1, 2006, 393–398
- MANNES D., NIEMZ P., LEHMANN E. (2006b):** Study on the penetration behaviour of water in corner joints by means of neutron radiography. *Wood Research* 51: 1-14
- MATSUSHIMA U., KAWABATA Y., HINO M., GELTENBORT P., NICOLAI B.M. (2005a):** Measurement of changes in water thickness in plant materials using very low-energy neutron radiography. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A* 542: 76–80
- MATSUSHIMA U., KAWABATA Y., HORIE T. (2005b):** Estimation of the volumetric water content in chrysanthemum tissues. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry* 264: 325–328

- MATSUSHIMA U., KAWABATA Y., NAKANO T., HINO M., GELTENBORT P., NICOLAI B.M. (2005c):** High-contrast neutron imaging to observe water distribution in intact plants. Mencarelli, F, Tonutti, P. (eds.), Proceedings of the 5th Int. Postharvest Symposium. Acta Horticulturae 682: 1411-1418
- MATSUSHIMA U., GRAF W., KARDJILOV N., ZABLER S., HERPPICH W.B. (2007):** Investigation of rose bent neck syndrome using neutron and synchrotron X-ray imaging. Proceedings of the 44th Gartenbauwissenschaftlichen Tagung. BHGL Schriftenreihe 25: 131
- NAKANISHI T.M., INAGAWA S., KOBAYASHI H. (1991):** Non-destructive analysis of rape plant pod by neutron radiography. Radioisotopes 40: 126–128
- NAKANISHI T.M., MATSUMOTO S., KOBAYASHI H. (1992):** Morphological change of plant root revealed by neutron radiography. Radioisotopes 41: 638–641
- NAKANISHI T.M., OKUNI Y., HAYASHI Y., NISHIYAMA H. (2005):** Water gradient profiles at bean plant roots determined by neutron beam analysis. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry 264: 313–317
- NEDBAL L., TRTILEK M., HERPPICH W.B. (2000):** Methods and equipment for fluorescence imaging on plant material. Computerised Image Analysis in Agriculture – Workshop 1999/2000. Bornimer Agrartechnische Berichte 25: 127-135
- OSWALD S., MENON M., LEHMANN E. (2005):** Dynamic imaging of water uptake by plant roots via neutron radiography. Conference CD of the Int. workshop on neutron imaging using cold neutrons and related topics. Villingen, Switzerland, Oct. 13-14, 2005
- PEUKE A.D., ROKITTA M., ZIMMERMANN U., SCHREIBER L., HAASE A. (2001):** Simultaneous measurement of flow velocity and solute transport in xylem and phloem of adult plants of *Ricinus communis* over a daily time course by nuclear magnetic resonance spectrometry. Plant, Cell and Environment 24: 491-503
- SAITO K., NAKANISHI T.M., MATSUBAYASHI M., MESHITSUKA G. (1997):** Development of new lignin derivatives as soil conditioning agents by radical sulfonation and alkaline-oxygen treatment. Mokuzai Gakkaishi 43, 669–677
- SEKIYA N., YANO K. (2004):** Do pigeon pea and sesbania supply groundwater to intercropped maize through hydraulic lift? Hydrogen stable isotope investigation of xylem waters. Field Crops Research 86: 167-173
- TRABOLD T., OWEJAN J., JACOBSON D., ARIF M., HUFFMAN P. (2006):** In situ investigation of water transport in an operating PEM fuel cell using neutron radiography: Part 1 - Experimental method and serpentine flow field results. International Journal of Heat and Mass Transfer 49: 4712–4720
- VON WILLERT D.J., MATYSSEK R., HERPPICH W.B. (1995):** Experimentelle Pflanzenökologie: Grundlagen und Anwendungen. Georg Thieme Verlag, Stuttgart
- YAMADA T., AOKI Y., YAMATO M., KOMATSU M., KUSUMOTO D., SUZUKI K., NAKANISHI T.M. (2005):** Detection of wood discoloration in a canker fungus-inoculated Japanese cedar by neutron radiography. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry 264: 329–332

MiniVeg N – Das Auge des Landwirtes

MiniVeg N – active plant monitoring

Wilhelm Lüdeker¹, J. Schulz²

¹Beratung optische Meßtechnik und Systementwicklung; Münchener Str. 32; 86949 Windach, Germany

²Fritzmeier Systems GmbH & Co. KG, Abteilung Umwelttechnik, Dorfstr. 7, 85653 Großhelfendorf, Germany

E-mail: w.luedeker@t-online.de

Kurzfassung: Das MiniVeg N-Sensorsystem regt das Chlorophyll in der Getreidepflanze mit Laser-Licht an. Das von der Pflanze daraufhin unmittelbar ausgesendete Fluoreszenzlicht wird detektiert und auf seinen Informationsgehalt hin analysiert. Die erfassten Vegetationsparameter werden in eine teilflächenspezifische Düngungsempfehlung verrechnet und in Kommandos für den Düngerstreuer umgesetzt.

Die MiniVeg N-Strategie verfolgt den Ansatz, die online-gewonnenen Informationen über die Pflanze für bestimmte Blattetagen statistisch zu analysieren. Damit lässt sich erstmals die tatsächliche Heterogenität des Bestandes, ausgedrückt durch Mittelwerte und Standardabweichungen von z. B. Chlorophyll-Gehalt und / oder Bestandesdichte bestimmen.

Das System ist so ausgelegt, dass es unter fast allen Umgebungsbedingungen einsatzfähig ist. Unterschiedliche Beleuchtungssituationen beeinträchtigen die Messergebnisse nicht. Auch der Einsatz während der Nacht ist damit möglich.

Störeinflüsse, beispielsweise durch benachbarte Pflanzen, Boden, Staub usw. sind dem System, bedingt durch dessen Architektur, fremd. Der Bediener des Systems kann sich auf andere Arbeiten konzentrieren, während das System den Düngerstreuer steuert, bleibt dabei aber in der Einstellung der verwendeten Betriebsparameter immer flexibel.

MiniVeg N ist LBS-fähig (ISO und DIN) und wird mit Standard Traktorterminals bedient. Die Funktion der Signalprozessoreinheit und der peripheren Komponenten werden von einer zentralen Systemsteuereinheit gesteuert und überwacht.

Deskriptoren: LIF, Chlorophyllfluoreszenz, Bestandshöhe, Bestandsdichte, ISO-Bus

Abstract: *Based on the method of laser induced fluorescence crop stands are characterized with respect to their growth stage. The determined vegetation parameters, transformed into fertilizer commands, are taken as input data set for site specific fertilizer application.*

The MiniVeg N strategy is consequently streamlined to determine those parameters on individual plant level and to characterize the entire canopy structure by statistical analysis.

Using this technique it is possible for the first time to measure the actual heterogeneity of vegetation structure expressed by mean values and variances of e.g. chlorophyll content and/or canopy density.

The realised system architecture works operationally under almost all conditions. The measurement method maintains its validity under variable light conditions as well as during night time operation. Environmental conditions as e.g. plant vicinity, visible soil surface, leaf contamination by dust, etc., have no impact on the measurement. The operator's workload is minimized as the system works autonomously during fertilizer application, but keeps maximum flexibility by offline configurable operation parameters.

MiniVeg N comprises a signal sensing and processing unit and a system control unit for process management including surveillance of system integrity and peripheral components. The system is operated via LBS (ISO or DIN) using standard tractor terminals.

Keywords: *LIF, Chlorophyll Fluorescence, Canopy Height, Canopy Density, ISO BUS*

1 Der zukunftsweisende Ansatz in der Präzisionsdüngung - MiniVeg N

Mit dem System MiniVeg N steht ein Sensorsystem zur „online“-Regelung der Stickstoffdüngung in der modernen teilschlagspezifischen Landbewirtschaftung zur Verfügung

- welches kaum Einschränkungen bzgl. der Einsatzbedingungen unterlegen ist
- dessen Regelkreis auf dem Maximum dessen aufbaut was Pflanzen uns an „Online-Informationen“ über sich selbst liefern können
- und welches den Ertragsverlust durch z.B. Über- oder Unterdüngung reduziert und damit erheblichen Beitrag zur sogenannten „nachhaltigen“ Landwirtschaft leistet.

2 Was MiniVeg N bestimmt

Kernstück des MiniVeg N System in der Bewertung des Versorgungszustandes der Pflanzen ist die grüne Blattfärbung und damit die in ihr enthaltene Konzentration an Blattgrün (Chlorophyll). Allein hieraus leitet sich in einem ersten Schritt der in der Pflanze gebundene **Stickstoffgehalt** ab, welcher wiederum entscheidend für den Ernteerfolg ist. Darüber hinaus wird mit dem bestehenden System:

- die **Wuchshöhe** der Pflanzen bestimmt,
- die **Bestandsdichte** erfasst, welche einen nahezu direkten Schluss auf die aufgebauete Biomasse zulässt

3 Das Messprinzip

Laser „beleuchten“ die Blätter der Kulturpflanzen und regen das darin enthaltene Chlorophyll zu sogenannter „Fluoreszenz“ an¹. Mit dem MiniVeg N System wird die Intensität dieses Fluoreszenzlichtes und dessen Zusammensetzung bestimmt. Letztere gibt den entscheidenden Hinweis auf die Konzentration des im getroffenen Pflanzenmaterial enthaltenen Chlorophyll und damit die Schlüsselinformation für MiniVeg N.

Ein entscheidender Vorteil eines solchen sogenannten „aktiven“ Systems ist, dass die Signalbeiträge einzig und allein von chlorophyllhaltigem Material geliefert werden. Es bestehen keine Störungen durch:

- unterschiedliche Sonnenstände (Tageszeit / Jahreszeit),
- Schattenbildung,
- unterschiedliche Bewölkungssituationen,

¹ Im Gegensatz zur allgemein bekannten „Reflexion“, wo z.B. an einer Leinwand das Licht in genau der Farbe zurückgeworfen wird mit welcher sie zuvor beleuchtet wurde, ist bei der Fluoreszenz die Farbzusammensetzung des zurückgeworfenen Lichtes gegenüber dem eingestrahlt Licht verändert. Diese Veränderungen werden durch das Pflanzenmaterial hervorgerufen und erlauben Rückschlüsse auf die an der Veränderung beteiligten Prozesse innerhalb der Pflanze.

- oder gar Reflexionen aus der direkten Nachbarschaft der zu untersuchenden Pflanzen

Ein aktives System, wie MiniVeg N, wird sogar des nachts nicht seinen Einsatz versagen, da es gleichsam seine eigene Sonne mit sich herumträgt.

4 Der Strategische Ansatz – Interpretation der Messdaten

Um den Kulturpflanzenbestand hinreichend zu charakterisieren, muss eine große Zahl von Pflanzen „befragt“ werden um das Problem der Heterogenität mit Methoden der Statistik zu überwinden.

Dieses kann grundsätzlich erfolgen über den Ansatz „**Großer Messfleck, wenig Messungen**“ (Mischsignal) oder den Ansatz „**Kleiner Messfleck, viele Messungen**“ (über eine große Zahl individueller Messungen an individuellen Pflanzen wird gemittelt).

5 MiniVeg N verfolgt aus den folgenden Gründen konsequent die 2^{te} Variante:

1. Eine große Zahl individueller Messungen garantiert, dass das Problem der vorhandenen **Heterogenität** nicht nur überwunden wird, sie **wird „erfasst“**. Die statistische Auswertung wird als Bewertungskriterium zugänglich.
2. Der Messfleck ist eine exakt definierte Position im 3 - dimensionalen Raum. D.h. es wird, insbesondere bei fortgeschrittenen Wachstumsstadien, nicht einfach von oben in den Bestand hinein geleuchtet sondern **es werden „nur“ ganz bestimmte, definierbare Blattebenen** des Bestandes **untersucht**. Daraus ergeben sich die folgenden Konsequenzen:
 - a. Heterogenitäten verursacht durch unterschiedliche Blattstadien bei z.B. allen Getreidesorten werden einfach ausgeblendet
 - b. Bodenbewuchs durch z.B. Unkraut wird einfach ausgeblendet
 - c. Wenn gewünscht, können auch mehrere (bis zu 4) unterschiedliche Blattebenen unabhängig voneinander untersucht werden
 - d. in Bezug auf z. B. Getreide bedeutet dieses, dass sich MiniVeg N auf die Blattebene konzentriert, in welcher der größte Effekt durch Unterversorgung zu erwarten ist (der obersten Blattetage)
3. Durch den sehr kleinen Messfleck des MiniVeg N ist sichergestellt, dass jede aufgezeichnete Messung entweder von einer individuellen Pflanze kommt oder vollkommen ins „Leere“ geht. Es wird festgestellt, ob an der betreffenden Position Pflanzenmaterial vorhanden ist oder nicht. Somit ist ein **direkter Zugang zur Bestimmung der Bestandsdichte** geschaffen.

Die im MiniVeg N System integrierte Höhennachführung erlaubt es, auch bei variabler Bestandsoberkante immer in der definierten Blattebene zu messen. Natürlich ist somit auch die zugehörige **Wachstumshöhe** der Pflanzen mit **erfasst**.

6 Technische Realisierung

Der **Ausleger** setzt sich zusammen aus zwei gegeneinander verschiebbaren Teilen:

Der **fixe Zentralrahmen** ist über den Frontkraftheber mit dem Trägerfahrzeug verbunden. Der **mobile Zentralrahmen** gewährleistet die horizontalen (Scanbreite ± 40 cm) und vertikalen (Höhennachführung ± 25 cm) Bewegungen über das Hydrauliksystem des Trägerfahrzeugs. Sensoren informieren die Steuereinheit permanent über die aktuelle Auslegerposition. Am mobilen Rahmen sind alle Basis Komponenten des MiniVeg N befestigt.

Der **Ausleger** hat eine Breite (eingeklappt im Transportzustand) von 2,2 m. Im Betriebszustand erreicht das MiniVeg N System eine Arbeitsbreite vom 6 m \pm 0,4 m. Die beiden klappbaren Seitenausleger tragen jeweils 2 der Messköpfe, rechts und links der Fahrspur.

Das Sensorpaket besteht aus den 4 Messkammern und dem sog. „Signalprozessor“. Die Messkammern und Signalprozessor sind über Kabelbäume optisch und elektrisch miteinander verbunden. Der Prozessor ist für alle Belange der Signalerfassung, Auswertung und Archivierung zuständig. Das Sensorpaket ist mit einem integrierten Kalibrations- und Überwachungssystem ausgestattet.

Die **Steuereinheit** ist für den gesamten Prozessablauf verantwortlich. Sie setzt die Sensorergebnisse in Regelimpulse / Kommandos für den Düngerstreuer um, sie überwacht das komplette System (Sicherheitsmanagement), steuert das Hydrauliksystem (Höhennachführung, Scan) und kommuniziert mit dem Bedienterminal

Im Normalfall wird das MiniVeg N an einem Standard **Bedienterminal** betrieben (z.B. Vario Terminal). Wenn ein solches nicht vorhanden ist, kann ein eigenes Terminal nachgerüstet werden (u. a. ISOBUS-Standard).

Die notwendigen Anzeigen bzw. Interaktionen zwischen dem Landwirt und dem System beschränken sich auf ein Minimum (z. B. Statusanzeige (OK / nicht OK; ggf. Fehlerstatus), Betriebsmoden- Anzeige bzw. Anwahl, Einstellung der notwendigen Betriebsparameter, einfache Ergebnisanzeige).



Abbildung 1: MiniVeg N-System: Messung von Fluoreszenzsignal, Bestandesdichte und Pflanzenhöhe

7 Literatur

- BREDEMEIER C., SCHMIDHALTER U. (2001):** Laser-induced chlorophyll fluorescence as a tool to determine the nitrogen status of wheat. 3. European Conference on Precision Agriculture, Montpellier, 18-20.6.2001, Vol.2: 899-904
- GÜNTHER K.P., DAHN H.G., LÜDEKER W. (1999):** Laser-induced fluorescence a new method for „precision farming“. In: Sensorsysteme im Precision Farming: 133-144
- KILIAN (2001):** Economic aspects of precision agriculture: An economic assessment of different site-specific N-fertilization approaches. 3. European Conference on Precision Agriculture, Montpellier, 18-20.6.2001, Vol. 2: 521-525
- LÜDEKER W., GÜNTHER K.P., DAHN H.-G. (1997):** Laser induced leaf Fluorescence - A tool for vegetation status- and stress-monitoring and optical aided agriculture. SPIE 3059: 63-75
- ØSTERGAARD H.S., KNUDSEN L. (1996):** Möglichkeiten der räumlich variablen N-Düngung - Erfahrungen aus dänischen Feldversuchen. Landbauforschung Völkenrode 46(3): 141-149
- SPANGLER A., SCHULZ J., AUERNHAMMER H. (2003):** „Outsourcing of Software Development for Product Innovations – Demonstrated by the Creation of the Chlorophyll-Sensor MiniVeg N“, Tagung Landtechnik 2003, Hannover, 7. - 8. November 2003 (VDI-MEG)

Analysis of Photon Propagation in Kiwifruit by Means of Backscattering Imaging and Simulation

Analyse der Photonenausbreitung in Kiwifrüchten mit Hilfe von bildgebender Rückstreuung und Simulation

László Baranyai, Martin Geyer, Manuela Zude

Leibniz Institute for Agricultural Engineering Potsdam-Bornim (ATB),
Max-Eyth-Allee 100, 14469 Potsdam-Bornim, Germany,
E-mail: zude@atb-potsdam.de

Summary: The optical properties of fruit tissue measured in the visible and NIR wavelength range correspond with fruit attributes such as firmness and soluble solids content. Analysis of laser induced diffuse reflectance (backscattering) may offer an inexpensive and non-destructive way to estimate these internal quality parameters of fruits. Kiwifruits of three commercial grades, assigned by a sensory panel, were used in the presented work. Conventional force-deformation analysis and Bayesian thresholding were performed to confirm the classification done by the sensory panel. Backscattering intensity profiles were produced using a laser module emitting at 785 nm with the geometry of 0/15°. Digital images of 768x572 pixel size were captured and processed. The size of the backscattering area and additional statistical parameters extracted from the radial intensity profiles were used in linear discriminant analysis. This analysis resulted in 16.32% classification error (n=98) with leave-one-out cross validation.

Monte Carlo simulation was performed and tissue anisotropy (g) was found to affect the apparent photon propagation the most. The estimated g values of kiwifruits show significant difference between grades of optimum quality and overripe pieces.

Keywords: kiwi quality, imaging, laser-induced light backscattering, nondestructive sensing, Monte Carlo simulation

Kurzfassung: Die optischen Eigenschaften von Fruchtgewebe im sichtbaren und nahinfraroten Wellenlängenbereich sind korreliert mit einigen Fruchtqualitätsparametern wie der löslichen Trockensubstanz und der Fruchtfleischfestigkeit. Die Analyse von laser-induzierter diffuser Reflexion (Rückstreuung) könnte gerade bei den Texturanalysen mit preiswerter zerstörungsfreier Technik wertvolle Daten liefern. In der vorliegenden Arbeit wurden Kiwifrüchte in drei Qualitätssortierungen, zugeordnet entsprechend der mechanischen Eigenschaften durch eine kommerzielle manuelle Sortierung, untersucht. Eine instrumentelle Kraft-Deformationsanalyse wurde zur Objektivierung der sensorischen Bewertung auf der Basis von Bayes

Schwellenwerten durchgeführt. Profile der Intensitätsabnahme ausgehend von der Einkopplungsposition der Laserstrahlung (758 nm) wurden mit einer Kamera in 0/15°-Geometrie aufgezeichnet. Aus den digitalen Bildern (768x572 Pixel) wurden die effektive Rückstreufläche und die mittleren Profile der Intensitätsgradienten mit linearer Diskriminanzanalyse ausgewertet. Dieser Ansatz resultierte in einer fehlerhaften Klassierung von 16,32% der Früchte (n=98) in der Kreuzvalidierung.

Mit Hilfe von Monte Carlo Simulation wurde der Anisotropiefaktor (g) als entscheidender Einflussfaktor auf die effektive Intensitätsabnahme im Gewebe festgestellt. Die geschätzten Werte von g zeigten signifikante Unterschiede bei Früchten optimaler Qualität im Vergleich zu überreifen, weichen Früchten.

Deskriptoren: *Bildverarbeitung; Kiwiqualität; Laserinduzierte Rückstreuung; Monte Carlo Simulation; zerstörungsfreie Sensoren*

1 Introduction

Internal quality parameters, such as soluble solids content (SSC) and flesh firmness, are of outstanding importance in postharvest processing of fruits and vegetables, and also in the management of the logistics of food and raw materials. Digital image processing applications are able to measure the ripeness stage of certain fruits and vegetables on the basis of their visual inspection (BARANYAI & SZEPES 2002). Nondestructive techniques are already used to measure firmness evolution during storage by means of acoustic and impact methods (DIEZMA-IGLESIAS *et al.* 2006). Near-infrared spectroscopy in the wavelength range of 600-1100nm was proved to be able to distinguish between different values of SSC (MILLER & ZUDE 2004). This technique is already built into commercial fruit sorting as well as handheld (ZUDE *et al.* 2008) equipments. The interference pattern of laser light (He-Ne, 632 nm) on the product surface is able to detect mechanical defect of bruising (PAJUELO *et al.* 2003). There are also good results with analysis of laser-induced backscattering images in order to estimate fruit flesh firmness and SSC in apples (PENG & LU 2006, QING *et al.* 2007, PENG & LU 2008). The backscattering area is segmented in this process and the profile of decreasing intensity is investigated. The histogram of intensities (QING *et al.* 2007), the size of the backscattering area (PENG & LU 2006), and the coefficients of the functions fitted to the trend of intensity change in radial directions measured from the centre of the spot (LU 2004, PENG & LU 2006) have good correlation with the reference values measured with standard methods for firmness and SSC.

The objective of the presented work is to analyze laser-induced diffuse reflectance (backscattering) of kiwifruit in order to classify them into commercial grades. It is also a goal of this study to run simulation in order to optimize measurement setup and provide additional information about photon propagation and backscattering in fruit tissue.

2 Materials and methods

Kiwifruit (*Actinidia deliciosa* 'Hayward') pieces of three commercial grades of hard (unripe), premium (optimal for consumption) and soft (overripe) were investigated. The total amount of 60 fruits was qualified by an expert sensory panel and additional 38 pieces were randomly selected from the incoming stream.

Conventional force-deformation analysis was performed using a universal testing instrument (Zwicki 1120, Zwick Materialpruefung Co. Ltd., Germany) with cylindrical probe of Ø4 mm, 15 mm penetration depth and 200 mm/min velocity. The maximal force of deformation was recorded.

The vision system consisting of a 3CCD camera (KY-F50, JVC Ltd., Japan) with zoom lenses mounted and an Optimas grabber board was used to acquire images of 768x572 pixel size. The resolution was adjusted to 27.42 µm/pixel. The laser module emitting at 785 nm with 45 mW (LPM785-45C, Newport Corp., USA) was applied. The image acquisi-

tion took place in a dark-room in order to increase the signal to noise ratio as close to the optimal 24 dB as possible. The geometry of $0/15^\circ$ was chosen so that the images were free from distortion and the direct reflection of the laser light was minimal (3.06% according to the Fresnel equations for $n=1.4$). **Figure 1** shows the computed intensity profile as function of radial distance measured from the incident point of the beam (distance = 0 pixel). The initial 10% of the profile was omitted in the analysis because the signal can be unstable and inconsistent close to the incident point (Lu 2004) due to the specular reflection of the laser beam.

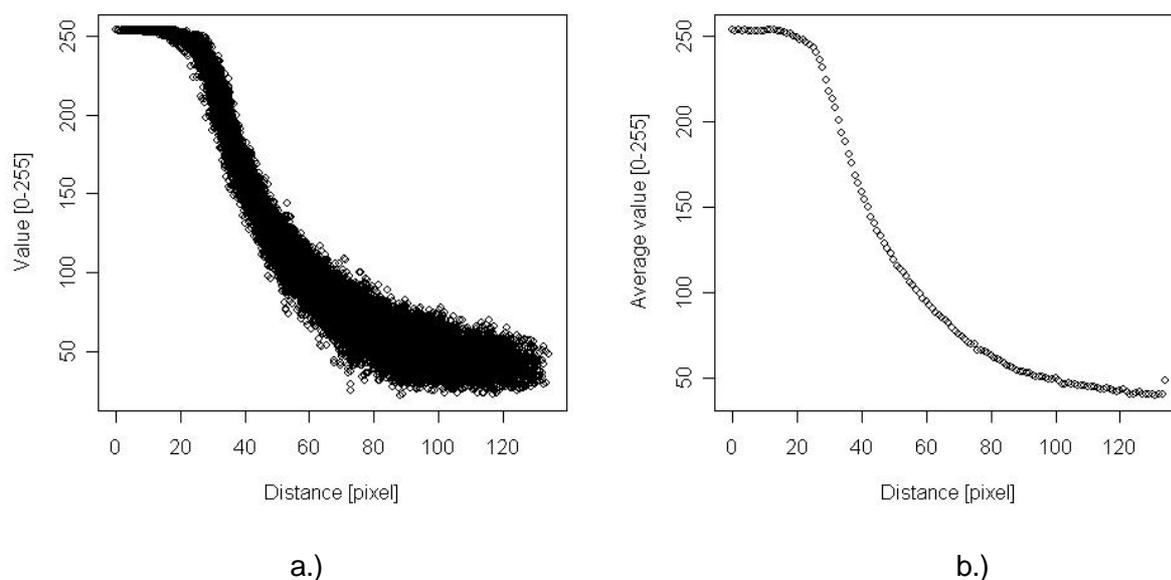


Figure 1: Profile of intensities in radial directions (a) and the average of concentric sectors (b)

Statistical parameters, such as radius at inflection point, coefficients of fitted exponential functions were extracted from the profiles. Additionally, the whole profiles were used in partial least squares regression (PLSR) in order to estimate the firmness of each fruit.

Stochastic simulation based on the Monte Carlo method was performed. The mean values for absorption (μ_a , cm^{-1}) and scattering (μ_s , cm^{-1}) coefficients for kiwifruit were measured during a short term scientific mission in Italy (ZUDE 2006). The refractive index of $n=1.4$ was assumed. The energy of one single photon could be expressed by its velocity and wavelength using the Plank's law:

$$E = h\nu = h \frac{C}{\lambda} = h \frac{C_0}{n\lambda} \quad (1)$$

Where E is the energy of the photon, h is the Plank constant, ν is the frequency, λ is the wavelength, C_0 is the velocity of light in vacuum and n is the refractive index of the media. Applying the Plank's law to the energy of the laser module, the amount of photons in 1 s laser pulse was calculated as 2.49×10^{17} . The simulation followed the individual pathways

until photon weight fell under the limiting value of 10^{-20} or photons left the fruit through the surface.

3 Results and discussion

The evaluation of the maximal force of deformation in the case of commercial grades resulted in overlapped classes (**figure 2a**). Linear discriminant analysis (LDA), with leave-one-out cross validation, obtained 33.33% misclassification in a sample of 60 pieces (20 for each grade). Bayesian thresholds were calculated comparing hard-premium and premium-soft grades, and these limiting values were used to refine grades. The limiting stress values around the grade premium were calculated as 0.1223 N/mm^2 and 0.2532 N/mm^2 . The effect of Bayesian optimization is introduced in **figure 2b**. The optimization resulted in lower variance and maximum values but the median changed less than 1%.

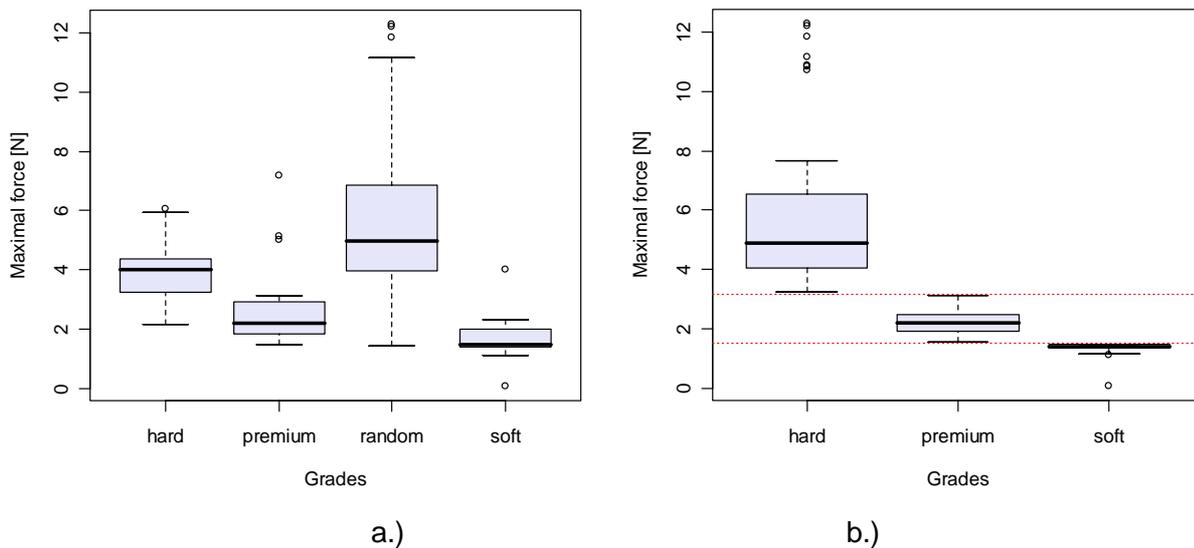


Figure 2: Maximal force of deformation for grades defined by the sensory panel (a) and Bayesian thresholds (b)

Table 1: Classification of commercial grades with non-destructive method (LDA with leave-one-out cross validation)

Classified	Original		
	Hard	Premium	Soft
Hard	45	3	2
Premium	7	28	2
Soft	0	2	9
Total (pieces)	52	33	13

The PLSR prediction resulted in 3.00 N error of estimation, $r=0.3977$ (Pearson correlation) and $RMSECV=64.88\%$ based on the average profiles. This relatively poor estimation is still valuable because it can help detect too hard and too soft pieces. The extracted statistical parameters of the profiles with the PLSR estimate of the maximal force of penetration resulted in 16.32% misclassification (**table 1**).

The Monte Carlo (MC) simulation with time-resolved model revealed the travel of photons in kiwifruit tissue (**figure 3**). The parameters of $\mu_a = 0.9 \text{ cm}^{-1}$, $\mu_s = 4.0 \text{ cm}^{-1}$, $g = 0.0$ and $n = 1.4$ were used. The injected photons exceeded the beam radius of 0.5 mm already at 50 ps. On the other hand, the camera sensitivity (8 bit means the range of 0 - 255) results in a limiting value for decreasing flux. If camera is adjusted to capture the highest intensity (100%) at the incident point, photons will not be perceptible by the CCD array below 0.39%. This may limit the simulation to 1 ns timeframe and automatically decrease the required number of photons to 2.49×10^8 . Such assumption was evaluated and proved by means of phantoms mimicking different optical properties. Resulting, an optimal parameter set of optical coefficients can be adjusted to simulate the amount of photons scattering back into the camera from the surface of kiwifruits.

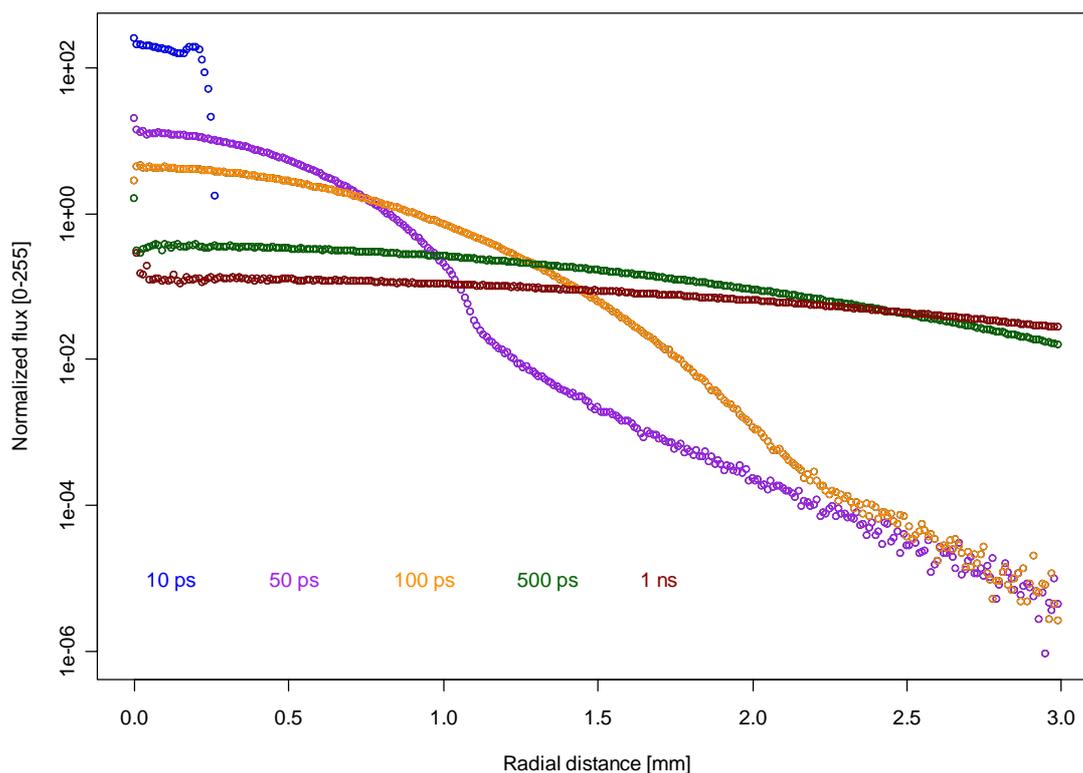


Figure 3: Distribution of photons at 10 ps, 50 ps, 100 ps, 500 ps and 1 ns after injection

The sensitivity of the MC backscattering model was tested with $\pm 20\%$ mistune of three parameters: μ_a (0.72-1.08), μ_s (3.2-4.8) and g (0.64-0.96). An outstandingly high F value was found for anisotropy, which was ten times higher than that of scattering and following absorption coefficients (**figure 4**). The statistical effect on simulated flux means that the

apparent intensity of a fixed location is changing with anisotropy. The statistical effect on distribution belongs to the profile of the gradient of intensity. According to the low values for interactions, the statistical effect of $\mu_a \times \mu_s \times g$ and $\mu_a \times \mu_s$ are negligible. The separated effect of anisotropy resulted in rotation of the backscattering profiles. The observed rotation was monotonous and its tendency followed a quadratic function. The inverse function was used to estimate the anisotropy of the measured kiwifruits (**figure 5**).

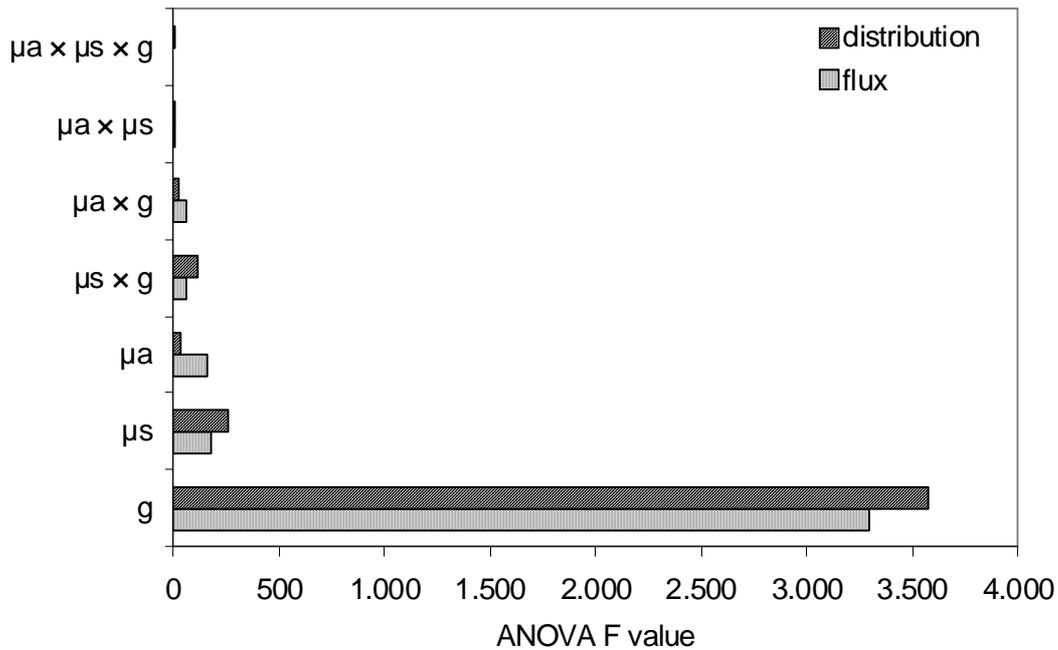


Figure 4: Statistical effect of simulation parameters on photon flux and its distribution

Significant difference was observed between commercial grades of premium and soft. The estimated anisotropy decreased for overripe pieces. The grade hard (unripe) did not follow this trend, what may indicate the different optical behaviour of kiwifruit tissue depending on the ripeness stage.

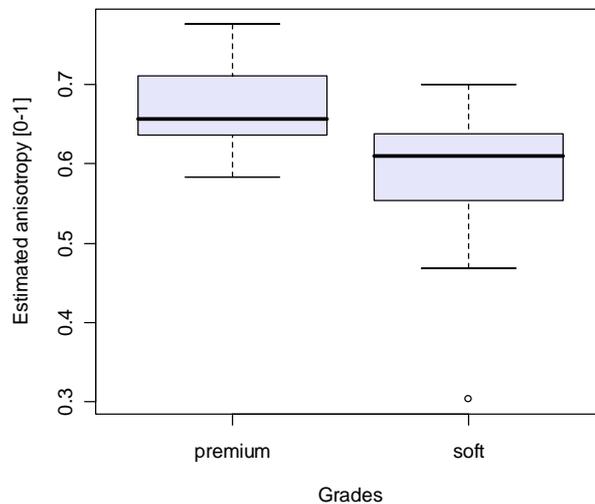


Figure 5: Estimated anisotropy of grades of kiwifruit

4 Conclusions

Kiwifruits were evaluated with image processing technique based on laser induced backscattering at 785 nm. The statistical analysis utilized extracted parameters of the intensity profiles and estimated maximal force of deformation (PLSR). Classification of the refined grades on the basis of the visual attributes with linear discriminant analysis resulted in 16.32% confusion.

The comparison of the results of the time-resolved model and the technical parameters of the applied vision system helped adjust the minimal timeframe to 1 ns and the required number of photons to 2.49×10^8 . The attribute anisotropy was found to contribute the maximal effect on photon flux simulated by Monte Carlo model. The observed monotonous alteration caused by anisotropy was used to estimate its value in kiwifruits and significant difference was observed between soft and premium grades.

The combination of image processing and simulation help understand backscattering and its influencing factors better. The findings provided by such a complex system might be useful for practice and further research as well.

5 References

- BARANYAI L., SZEPES A. (2002):** Analysis of fruit and vegetable surface color. *Machine Graphics and Vision Journal*. 11: 351-361
- DIEZMA-IGLESIAS B., VALERO C., GARCÍA-RAMO F.J., RUIZ-ALTISENT M. (2006):** Monitoring of firmness evolution of peaches during storage by combining acoustic and impact methods *Journal of Food Engineering*. 77: 926-935
- LU R. (2004):** Multispectral imaging for predicting firmness and soluble solids content of apple fruit. *Postharvest Biology and Technology*, 31(2):147-157
- MILLER W.M., ZUDE M. (2004):** NIR-based sensing to identify soluble solids content of Florida citrus. *Appl. Eng. Agric.* 20: 321-327
- PAJUELO M., BALDWIN G., RABAL H., CAP N., ARIZAGA R., TRIVI M. (2003):** Bio-speckle assessment of bruising in fruits. *Optics and Lasers in Engineering* 40: 13-24
- PENG Y.K., LU R.F. (2006):** New approaches of analyzing multispectral scattering profiles for predicting apple fruit firmness and solubles solids content. In: Meeting Presentation of ASABE, Oregon, USA, 9-12 July, Paper N° 066234
- PENG Y., LU R. (2008):** Analysis of spatially resolved hyperspectral scattering images for assessing apple fruit firmness and soluble solids content. *Postharvest Biology and Technology* 48: 52-62
- QING ZS., JI BP., ZUDE M. (2007):** Predicting soluble solid content and firmness in apple fruit by means of laser light backscattering image analysis. *Journal of Food Engineering* 82: 58-67
- ZUDE M. (2006):** Non-invasive sensing of vitamins and provitamins in horticultural products. *Laser-Optik-Berlin Congress* March 23-24, 2006
- ZUDE M., PFLANZ M., KAPRIELIAN C., AIVAZIAN B.L. (2008):** NIRS as a tool for precision horticulture in the citrus industry. *Journal Biosystems Engineering* 99: 455-459

Nondestructive Pigment Analyses in Carrot Phantoms by Means of Sensor Fusion of Spectroscopic Time-resolved and Continuous Wave Systems

Zerstörungsfreie Pigmentanalyse mit zeit- und wellenlängen-aufgelöster Spektroskopie am Beispiel von Referenzmaterialien mit ähnlichen optischen Eigenschaften wie Möhren

Manuela Zude¹, Alessandro Torricelli²

¹ Leibniz-Institut für Agrartechnik Potsdam-Bornim (ATB), Max-Eyth-Allee 100, 14469 Potsdam, Germany

² ULTRAS-INFM-CNR and IFN-CNR, Politecnico di Milano - Dipartimento di Fisica, Piazza Leonardo da Vinci, 32, Milan, Italy

E-mail: zude@atb-potsdam.de

Summary: Non-destructive spectroscopy in the visible wavelength range has been introduced for analysing photon-absorbing pigments in fruit and vegetables. A drawback of the method appears due to the measuring principle, where photons detected in the diffusive tissue are influenced by the sample absorption but also scattering properties leading to variation in the photon pathlength in the tissue. In the present work, distribution of time-of-flight reading was used to calculate the effective pathlength between source and detector. With this information additionally to the spectral intensities obtained using common continuous wave spectroscopy Lambert-Beer law was applied for analyzing absolute pigment contents. The sensor fusion approach was proved for liquid phantoms mimicking the optical properties of fresh fruit and vegetables. Lambert-Beer law using a constant pathlength as well as combined application of the intensity at a specific wavelength and the effective pathlength resulted in low calibration errors with $r^2 > 0.98$. Applying the two calibrations on phantoms mimicking changes in the scattering properties resulted in validation results of $r^2 = 0.47$ and $r^2 = 0.64$, respectively. Resulting, such approach is feasible for correcting varying scattering properties of the sample under question.

Keywords: carotenoids; carrots; effective pathlength; Lambert-Beer law; sensor fusion

Zusammenfassung: Zerstörungsfrei angewandte Spektroskopie im sichtbaren Wellenlängenbereich ist für die Analyse von absorbierenden Pigmenten in Obst und Gemüse beschrieben. Ein Nachteil der Methode resultiert aus dem Messprinzip, wobei die detektierten Photonen in diffusem Probenmaterial zum einen durch die Absorber, aber auch durch streuende Partikel beeinflusst werden. Die elastische Streuung führt zu veränderten

Intensitäten und Unterschieden in der effektiven Weglänge der Photonen. In der vorliegenden Untersuchung wurde die Verteilung der Verweildauer der Photonen (distribution of time-of-flight) und hieraus die effektive Weglänge zwischen Lichtquelle und Detektor mit Hilfe von zeitaufgelösten Messungen ermittelt. Die effektive Weglänge sowie die parallel aufgezeichnete spektrale Intensität wurde mit dem Lambert-Beerschen Gesetzes zur Bestimmung von absoluten Pigmentkonzentrationen genutzt. Die Methode der Sensorfusion wurde an Referenzmaterialien mit ähnlichen optischen Eigenschaften wie Obst und Gemüse verifiziert. Die Anwendung von Lambert-Beer mit der effektiven Weglänge im Vergleich zur Nutzung des geometrischen Abstandes zwischen Lichtquelle und Detektor als konstanter Weglänge zeigte ein erhöhtes Bestimmtheitsmaß von $r^2=0.47$ auf $r^2=0.64$. Die Methode scheint somit geeignet, variierende Streueigenschaften von biologischen Proben zu korrigieren.

Deskriptoren: Carotinoide, effektive Weglänge, Lambert-Beer, Möhren, Sensorfusion

1 Introduction

Native pigments in fruit and vegetables belong mainly to the groups of chlorophylls, carotenoids, and flavanoids. Particularly chlorophylls and carotenoids show characteristic changes during pre- and postharvest development of fresh produce. The carotenoids change is a sensitive parameter for measuring the produce response during storage, but additionally, provide valuable information on its nutritional value for instance in carrots, and tomatoes. Over the past decade numerous research projects worldwide have started to develop suitable methods for non-destructive assessment of product properties in real-time. Continuous wave (cw) spectroscopy in the visible and near infrared wavelength ranges provide a promising technology for non-destructive analyses (BIRTH & HECHT 1987) of pigments (KNEE 1980, ZUDE 2003) and soluble solids content (SSC) (GOLIC AND WALSH 2006) by means of reflectance and remittance readings feasible for product monitoring in processes (ZUDE *et al.* 2006, MILLER & ZUDE 2004).

The major disadvantage of non-destructive remittance spectroscopy results from the measuring principle, where photons detected in the highly diffusive media are not exclusively influenced by absorption, but also by the scattering properties of the sample. The apparent signal appears as a function of the absorption coefficient, μ_a [cm^{-1}], corresponding to the loss of photons and the scattering coefficient, μ_s [cm^{-1}], defined as the inverse to the mean free pathlength (L_s) that the photons travel in the given medium between two scattering events ($\mu'_s=L_s^{-1}$). The common way to reduce the influence of scattering is to apply a pre-processing step on the spectrum such as mean-centering, standard normal variates (SNV) or working on spectrum derivatives to correct the vertical shift. While having the advantage of being an inexpensive and easy to apply means of dealing with the problem, this approach does not characterize the phenomenon itself.

Besides a statistical approach of this kind, the effects were more recently studied in different fruit species by means of time-resolved readings (ECCHER ZERBINI *et al.* 2006, TORRICELLI 2008). Distinct sample information can be obtained on absorption and reduced scattering coefficients of the sample based on time-resolved readings. The time-of-flight measurement is carried out by means of injecting a short laser pulse into the tissue and recording the remitted photons at an adjusted distance. The arrival time of each photon is recorded; a distribution of time-of-flight (DTOF) is obtained. The mean time-of-flight ($\langle t \rangle$) and the time of the DTOF peak (t_{max}) can be calculated from the distribution of incoming photons, if the instrument response function is known.

The present study is aimed at a sensor fusion approach combining DTOF and cw remittance spectroscopy. The approach uses the time-of-flight information, not for directly building calibrations on the molecule under question (TSUCHIKAWA *et al.* 2002, ECCHER ZERBINI *et al.* 2006), but to calculate the effective pathlength (L^*_s) between injection and detector. Using this information the Lambert-Beer law will be applied directly on the remittance intensity (I_R) of a molecule specific single wavelength, $I_R(\lambda)$. The absolute concentration of the analyte (c_i) will be calculated by the wavelength-dependent remittance intensity, the molar extinction coefficient (ϵ_i), and the effective pathlength:

Equation 1
$$\log[100 / I_R(\lambda)] = \sum c_i \varepsilon_i L^* s$$

The target was to analyze absolute contents of the molecule under question by means of the Lambert-Beer law, with respect to the phenomenon occurring in the non-destructive analysis of fresh produce with varying optical properties. The method was evaluated on liquid phantoms with defined quantities of pigments and scattering coefficients as well as carrots. Carrot analysis was referenced conventionally by means of the wet-chemical method after an extraction procedure in respect to the total carotenoids content.

2 Experimental

Material and chemical analysis:

Phantoms were based on water, soymilk (Intralipid 20%, Fresenius Kabi, Italy) providing scatters, and a mixture of orange (ecoline #237, Royal Talens, Holland) and green ink (ecoline #602, Royal Talens, Holland) as absorber. Scattering and absorption coefficients of the liquid phantoms were adjusted in the range appearing in fresh fruit and vegetables (TORRICELLI 2008). The phantoms remained stable for at least 16 hrs.

Optical analyses:

A compact system was used for distribution of time-of-flight (DTOF) measurements, working at 670 nm and 758 nm, based on a pulsed laser diode (PDL800, PicoQuant GmbH, Germany) with 80 MHz repetition frequency, 100 ps duration, and 1 mW average power, with a compact photomultiplier (R5900U-L16, Hamamatsu Photonics, Japan) and an integrated PC board for time-correlated single photon counting (SPC130, Becker&Hickl GmbH, Germany). The typical acquisition time was 1 s per point. Plastic-glass fibers (PCS1000W, Quartz and Silice, France) with 1 mm diameter was used to inject light into the sample and record the remitted photons at a distance of 1.5 cm. Band pass filters tuned at 670 nm and 760 nm were used to cut off the fluorescence signal due to chlorophyll. The width of the instrumental response function (IRF) was <160 ps.

The mean time-of-flight ($\langle t \rangle$) and the time of the DTOF peak (t_{\max}) were calculated for each wavelength (λ) from analysis of the DTOF (**figure 1**).

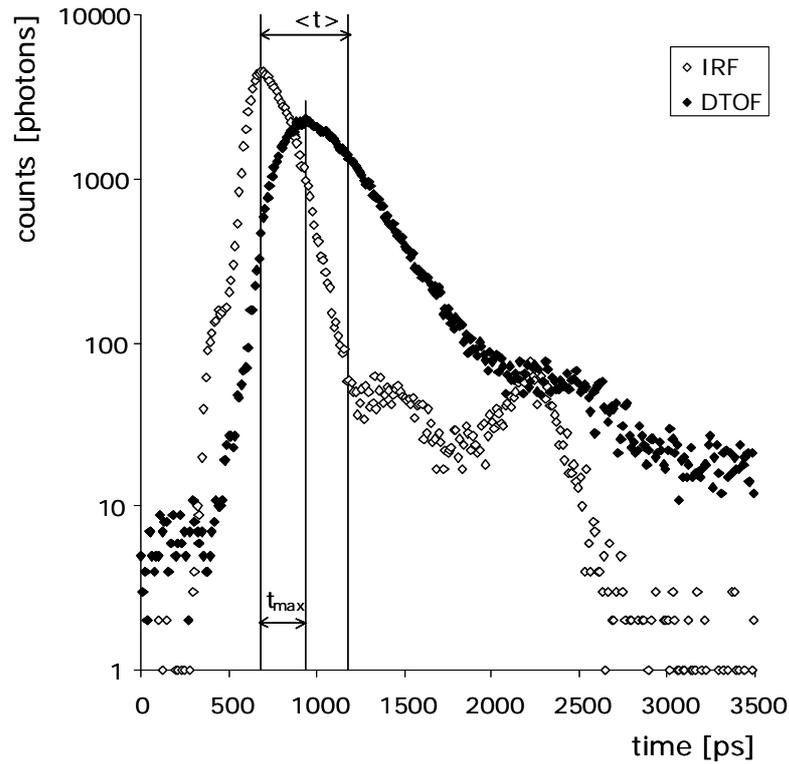


Figure 1: Typical instrument response function, IRF (open diamond) and distribution of time-of-flight, DTOF (closed diamond). Time position of $\langle t \rangle$ and t_{max} are reported

The effective pathlength is calculated as:

$$\text{Equation 2} \quad L^*_{s1}(\lambda) = \langle t \rangle \cdot c / n_r,$$

where c is the speed of light in vacuum ($c \approx 0.03 \text{ cm ps}^{-1}$), and n_r is the refractive index of the medium. For biological tissue $n_r=1.4$ is typically used as an estimation (c.f. LEONARDI & BURNS 1999, TSUCHIKAWA *et al.* 2002). For comparison the effective pathlength was calculated at the DTOF peak as

$$\text{Equation 3} \quad L^*_{s2}(\lambda) = t_{max} \cdot c / n_r.$$

The remittance spectra of phantoms were recorded in the wavelength range 300-850 nm by means of a scanning dual-beam spectrophotometer (Lambda 950, Perkin Elmer, U.S.A.). A xenon flash lamp and monochromator were used as light source, while a second monochromator and photomultiplier served as detector for measuring remittance spectra. The measurements were carried out with a slit width of 0.5 nm in wavelength steps of 2 nm. For calibration, Spectralon (Labsphere Ltd., North Sutton, U.S.A.) was used as the 100% white standard. The sample remittance and white spectra were corrected with a dark spectrum to eliminate temperature influences: $I_R(\lambda) = (\text{sample spectrum} - \text{dark spectrum}) / (\text{white spectrum} - \text{dark spectrum})$.

3 Results and discussion

Remittance readings were carried out on liquid phantoms mimicking the optical properties of carrots. Readings were supported by fiber-optics with 1.5 cm geometric distance between injection and detection, in fruit and vegetable analysis sometimes referred to as partial transmission (BIRTH & HECHT 1987). Photons were detected from a banana-shaped region between injection and detection. The distribution of time-of-flight (DTOF) was recorded time-resolved at 670 nm and 758 nm, while continuous wave spectra were measured in the wavelength range of 300–850 nm. The scattering coefficient of the liquid phantoms determined the photon migration in the matrix by influencing the effective pathlength of photons detected, leading to a vertical shift of the spectrum measured. Spectra of phantoms with different absorption coefficients (**figure 2**) showed expected intensity variation related to the pigment concentration. Intensity variation appeared in similar intensity levels to that found in carrots in the relevant absorption band passes of chlorophyll (660 nm) and carotenoids (480 nm) (ZUDE *et al.* 2007).

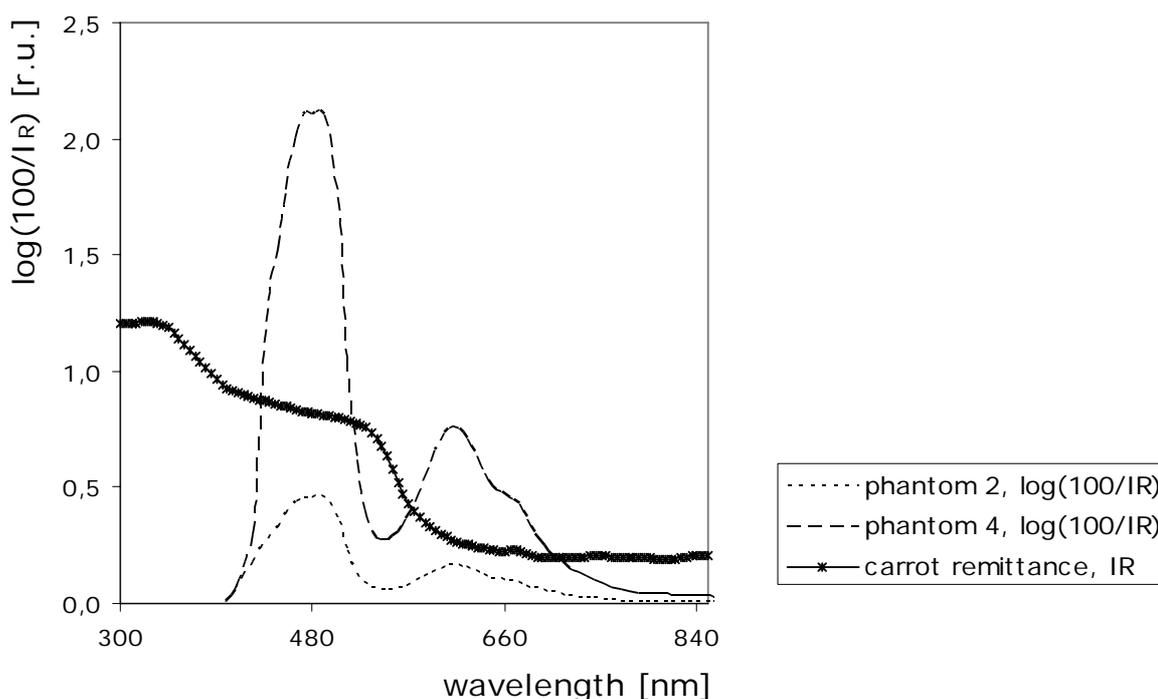


Figure 2: Remittance spectrum measured on diffusive carrot tissue and calculated $\log(100/\text{remittance intensity})$ of carrot and two liquid phantoms, both with a scattering coefficient of 3 cm^{-1} , while the absorption coefficients varied between 0.2 cm^{-1} (phantom 2) and 0.6 cm^{-1} (phantom 4).

The specific extinction coefficient at $\lambda=480 \text{ nm}$ ($\epsilon_i=0.6 \cdot 10^{-6} \text{ ml/l}$) was calculated from the known ink/solvent, v/v, ratio for phantoms with a scattering coefficient of 3 cm^{-1} in 1 cm standard cuvette in transmittance mode. The Lambert-Beer law was applied on ϵ_i , the measured remittance intensity expressed as the $\log(100/I_R(480\text{nm}))$, and the pathlength. The pathlength applied was either constant for all samples at 1.5 cm with respect to the

geometric source-detector distance or the effective pathlength was calculated for each sample by means of DTOF readings. An additional calibration step by means of linear regression (**Table 1**) was carried out regarding the experimental set-up used in the present study.

Table 1: Coefficient of determination (r^2) in the calibration and validation on phantom pigment concentration by means of Lambert-Beer law using the constant geometrical source-detector distance $L=1.5$ cm and the effective pathlengths L^*_{s1} and L^*_{s2} each calculated at 670 nm and 758 nm

	calibration			Validation on individual phantoms			Validation batch-wise		
	rmse [%]	e_b [%]	r^2	rmse [%]	e_b [%]	r^2	rmse [%]	e_b [%]	r^2
$L=1.5$ cm									
$y = 2.1127x - 38.249$	1.77	0.00	1.00	34.14	92.83	0.47	18.57	74.27	0.99
L^*_{s1} at 670 nm									
$y = 0.4315x - 15.84$	2.98	-0.02	0.99	49.23	48.48	0.63	9.70	38.78	0.99
L^*_{s1} at 758 nm									
$y = 0.2718x - 7.7906$	2.53	-0.03	1.00	44.56	43.84	0.64	8.77	35.07	0.99
L^*_{s2} at 670 nm									
$y = 0.3821x - 11.138$	2.47	-0.01	1.00	55.31	54.69	0.60	10.94	43.75	1.00
L^*_{s2} at 758 nm									
$y = 0.3384x - 6.9283$	1.63	0.02	1.00	54.61	53.96	0.58	10.79	43.17	1.00

Derivation of the effective pathlength from DTOF readings was approached by means of two parameters from the DTOF curves. The influence of the sample scattering coefficients on time-resolved DTOF curves depict a broadening and an increasing delay in the temporal distribution of detected photons and a decrease of their number. Absorption affects both, the signal intensity and the slope of the tail of the curves, while leaving the temporal position of the curves unchanged (TORRICELLI 2008, LEONARDI & BURNS 1999, TSUCHIKAWA *et al.* 2002). Therefore, L^*_{s1} (equation 2, figure 1) is affected by both scattering and absorption properties, while L^*_{s2} (equation 3, figure 1) is affected mainly by the reduced scattering coefficient.

An additional comparison was carried out using lasers emitting at 670 nm and 758 nm. At 670 nm high absorption coefficients were adjusted in the phantoms mimicking the plant chlorophyll content. At wavelength 758 nm no absorptions can be expected in horticultural products, the resultant variations appear mainly due to varying scattering properties.

Calibration results for the constant geometrical source-detector distance ($L=1.5$ cm) and application of L^*_{s1} and L^*_{s2} values measured at the two wavelengths are shown in **Table 1**. The calibration by means of linear regression resulted in a bias between -0.03 and 0.02%, while the remaining root mean square error was below 3% for all calibrations. The pigment calibration developed for one scattering level resulted in high measuring uncertainty, however, when applied on samples with different scattering coefficients. Application of the

pigment calibration built for a scattering coefficient of 3 cm^{-1} on phantoms with similar absorption levels but an enhanced effective pathlength due to higher scattering coefficients resulted in an overestimation in the highly diffusive sample. Similar coefficients of determination and errors were found when building the calibration solely on the data set of medium or high scattering level and applying the calibration obtained on the remaining phantoms.

The diffusion error in validation on individual phantoms was higher to a remarkable extent in comparison to the application of a constant pathlength, it is assumed as an effect of the measuring uncertainty of the DTOF method itself as well as decreased signal to noise ratio in the cw spectra at 480 nm in higher absorption levels. In the batch-wise validation by the same means μ_a errors were reduced and appeared mainly as a bias. The rmse in application of a constant pathlength appeared consistently with 18.57%, while the rmse in applications of the effective pathlength calculated as L_{s1}^* at 758 nm were 8.77%. If the constant distance between injection and detection was used as pathlength, the highest total measuring uncertainty ($e_b + \text{rmse}$) of 92.83% due to a bias of 74.26% was found. Applying the effective pathlength at the wavelength recorded regarding L_{s1}^* and L_{s2}^* the bias ranged between 35 and 49%, while the total measuring uncertainty ranged between 44 and 55%.

Lowest values were every time obtained at 758 nm used to calculate L_{s1}^* . Here, the validation errors were consistently lower by 1-6%. At 758 nm no absorptions can be expected in horticultural products, while at 670 nm high absorption coefficients were adjusted in the phantoms mimicking the widely present chlorophyll in horticultural products. This might affect the readings at 670 nm. In further studies on carrots only 758 nm was used for calculating the effective pathlength, since small chlorophyll contents can be expected in carrots. Application of $\langle t \rangle$ instead of t_{max} for the calculation of the effective pathlength might have some technical advantages due to recording the data, when the influence of the instrument response function decreases.

4 References

- BIRTH G.S., HECHT H.G. (1987):** The physics of near-infrared reflectance. In: Williams P; Norris K (Eds.), Near-infrared technology in the agricultural and food industries, St. Paul, Minnesota, American Association of Cereal Chemists: 1-15
- ECCHER ZERBINI P., VANOLI M., GRASSI M., RIZZOLO A., FIBIANI M., CUBEDDU R., PIFFERI A., SPINELLI L., TORRICELLI A. (2006):** A model for the softening of nectarines based on sorting fruit at harvest by time-resolved reflectance spectroscopy. *Postharvest Biol. Technol.* 39: 223-232
- GOLIC M., WALSH K.B. (2006).** Robustness of calibration models based on near infrared spectroscopy for the in-line grading of stonefruit for total soluble solids content. *Analytica Chimica Acta* 555: 286-291
- KNEE M. (1980):** Methods of measuring green colour and chlorophyll content of apple fruit. *Journal of Food Technology* 15: 493-500

- LEONARDI L., BURNS D.H. (1999):** Quantitative multiwavelength constituent measurements using single-wavelength photon time-of-flight correction. *Appl. Spectrosc.* 53 (6): 637-646
- MILLER W.M., ZUDE M. (2004):** NIR-based sensing to identify soluble solids content of Florida citrus. *Applied Engineering in Agriculture* 20: 321-327
- TORRICELLI A. (2008):** Determination of optical properties in turbid media: time-resolved approach. In: *Optical Methods for Monitoring Fresh and Processed Agricultural Crops*. CRC Press, 450 pp.: 55-78
- TSUCHIKAWA S., KUMADA T., INOUE K., CHO R. (2002):** Application of time-of-flight rear-infrared spectroscopy for detecting water core in apples. *J. Am. Soc. Hort. Sci.* 127: 303-308
- ZUDE M. (2003):** Comparison of indices and multivariate models to non-invasively predict the fruit chlorophyll by means of visible spectrometry in apples. *Analytica Chimica Acta* 481: 119-126
- ZUDE M., HEROLD B., ROGER J.M., LANDAHL S., BELLON-MAUREL V. (2006):** Non-destructive tests on the prediction of apple fruit properties at the tree and in shelf life. *J. Food Engineering* 77: 254-260
- ZUDE M., BIRLOUEZ I., PASCHOLD J., RUTLEDGE D.N. (2007):** Nondestructive spectral-optical sensing of carrot quality during storage. *Postharvest Biol. Technol.* 45: 30-37

Intelligente Sensorsysteme für autonome Feldroboter

Intelligent Sensor System for Autonomous Field Robots

Arno Ruckelshausen, Ralph Klose, Andreas Linz, Matthias Gebben, Sebastian Brinkmann

COALA – Competence in Applied Agricultural Engineering / Fachhochschule Osnabrück,
Albrechtstr. 30, 49076 Osnabrück, Germany
E-mail: ruckelshausen.os@t-online.de

Kurzfassung: Die Entwicklung autonomer Feldroboter bietet vielfältige Optionen für zukünftige Applikationen in der Landtechnik und darüber hinaus. Dabei stellt die Robustheit der Systeme hohe Anforderungen an die Systemtechnik und insbesondere die Sensorik. Die Erfassung und Auswertung verschiedenartiger Merkmale ist dabei unerlässlich, so dass der Sensor- und Datenfusion eine wesentliche Rolle zukommt. In Verbindung mit a priori – Informationen sowie GPS-Daten liefern Sensorsysteme Agro- und Navigations-Informationen sowie Daten für Sicherheits- und Kontrollsysteme. Es werden verschiedene Sensorsysteme vorgestellt, die in Entwicklungsstudien autonomer Systeme eingesetzt werden. Insbesondere wird auf den Einsatz eines optischen Maussensors, eines 2D-Laserscanners sowie einer intelligenten Kamera mit Zeilenstatistik eingegangen.

Deskriptoren: Sensorik, Sensorfusion, intelligente Kameras, autonome Feldroboter.

Summary: *The development of autonomous field robots opens future options for applications in agriculture and beyond. Several technological challenges with respect to the system and sensor technologies have to be solved in order to achieve robustness. The detection and analysis of different characteristics is necessary, as a consequence sensor and data fusion are of high importance. Together with a priori information and GPS data sensors supply related to the agricultural environment, navigation, safety and control. Different sensor systems are described, already tested in first studies of autonomous systems. Examples are optical mouse sensors, 2D laser scanner and smart camera using a line statistics.*

Keywords: *Sensors, sensor fusion, smart cameras, autonomous field robots.*

1 Autonome Feldroboter

Die technische Entwicklung der Agrartechnik wird zunehmend durch die Integration der Elektronik und Software beeinflusst. Beispielsweise stellte die Zahl der Innovationen aus diesen Bereichen die größte Gruppe der Neuheitenanmeldungen auf der Agritechnica 2007 dar (www.agritechnica.com). Über die aktuellen Weiterentwicklungen der Fahrerassistenzsysteme und teilautonome Flotten stellt der Einsatz autonomer Feldroboter dabei die nächste Innovationsstufe der zukünftigen Landtechnik dar. Die Landtechnik bietet hierfür eingeschränkte Rahmenbedingungen im Vergleich zum Straßenverkehr oder Gesundheitswesen. Dennoch ist die Komplexität des Einsatzes elektronischer Systeme und Sensoren auf landwirtschaftlichen Flächen erheblich, die Anforderungen an die technische Robustheit der Systeme unter dem Einfluss von Störgrößen wie Sonne, Staub, Feuchtigkeit, Wind, Schwingungen oder Bodenunebenheiten sind erheblich (PEDERSEN *et al.* 2002, RATH & KAWOLLEK 2006). Darüber hinaus spielen anwendungsorientierte Aspekte sowie insbesondere die Kosten eine wichtige Rolle (PEDERSEN *et al.* 2006).

Hieraus ergibt sich, dass die kostengünstige Verfügbarkeit und Interpretation aktueller Informationen zum Umfeld des Roboters –d.h. überwiegend Sensorinformationen - einen wesentlichen Aspekt zur Entwicklung kommerziell verfügbarer autonomer Feldroboter darstellen. Die Sensorik stellt daher eine der Schlüsseltechnologien zur Entwicklung zukünftiger robuster autonomer Feldroboter dar.

2 Sensor- und Datenfusion

Ein autonomer Feldroboter benötigt im Wesentlichen Informationen zur Navigation, zur agrartechnischen Umgebung („Agro-Information“), zur Sicherheit sowie zum Zustand des Roboters (Kontrollsysteme). Neben der Sensorik sind hierfür *a priori* Informationen (z.B. über den Abstand von Reihen) sowie Daten von GPS oder Landmarken von Bedeutung (**Tabelle 1**).

Tabelle 1: Aufgaben und Informationen zum Einsatz autonomer Feldroboter

Aufgabe	Sensorik	<i>A priori</i> -Information	GPS / Landmarken
Navigation	Pflanzen, Boden, Umgebung	Pflanzenbauliche Größen	Online
Agro-Information			Kartierung (online / offline)
Sicherheit	Sicherheitsspezifische Sensorik		Kartierung (online / offline)
Kontrollsysteme	Fahrzeugsensorik		

Die Sensorik zur Navigation und Agro-Information erfordert umfassende Informationen für einen robusten Betrieb des Feldroboters. Wünschenswert sind bildgebende Informationen zum Abstand, zur Morphologie oder zur VIS/NIR-Spektralcharakteristik bis hin zu Temperaturmessungen. Da eine „Superkamera“ zur gleichzeitigen punktwisen Messung aller Parameter (noch) nicht verfügbar ist, werden Methoden der Sensor- und Datenfusion angewendet.

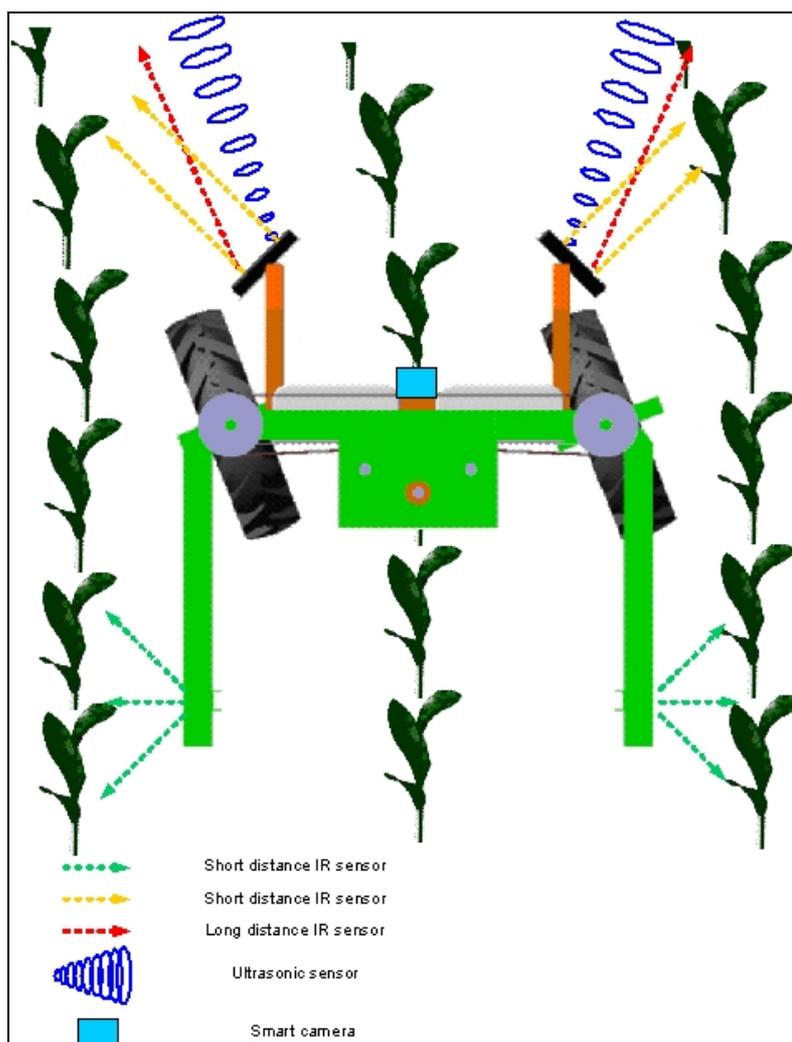


Abbildung 1: Anordnung zur Sensor Fusion am Beispiel des autonomen Feldroboters Weedy (Unkrautregulierung)

Die Autoren haben dieses Prinzip bereits 1999 zur Unterscheidung von Nutzpflanzen und Unkräutern angewendet (RUCKELSHAUSEN *et al.* 1999) und kürzlich zur Navigation autonomer Feldroboter eingesetzt (KLOSE *et al.* 2007). Dabei erzielt insbesondere die Interpretation von Daten optoelektronischer Sensoren eine hohe Selektivität zur Navigation und Agro-Information. Hier zählen Lichtgitter (FENDER *et al.* 2005), CMOS-Kameras (RUCKELSHAUSEN & LINZ 2000), intelligente Kameras (KLOSE *et al.* 2005), Spectral Imaging (IN DER STROTH *et al.* 2003), VIS/NIR-Sensorik (KRONSBELN *et al.* 2006) oder opti-

sche Distanzsensoren (THÖSINK *et al.* 2004). In Verbindung mit einem hochauflösenden GPS-System bieten die Sensoren Optionen zur Bonitur von Einzelpflanzen (FENDER *et al.* 2006). **Abbildung 1** zeigt eine Sensoranordnung für eine Studie zur autonomen Unkrautregulierung in Reihenkulturen (Feldroboter „Weedy“; KLOSE *et al.* 2008).

3 Ausgewählte Sensorsysteme

In diesem Abschnitt wird auf aktuelle Sensorentwicklungen zur Navigation autonomer Feldroboter eingegangen. Die Entwicklungen werden typischerweise auf Plattformen zum Field Robot Event (VAN HENTEN *et al.* 2007) eingesetzt und fließen – im Falle positiver Erfahrungen – in Projektstudien zur Entwicklung autonomer Feldroboter ein. Im Wesentlichen werden dabei kostengünstige Systeme – wie z.B. die intelligente Kamera CMUCam – betrachtet. **Abbildung 2** zeigt den Einsatz eines optischen Maussensors („optiSense“) zur Odometrie und den Einsatz eines 2D-Laserscanners zur Pflanzendetektion.

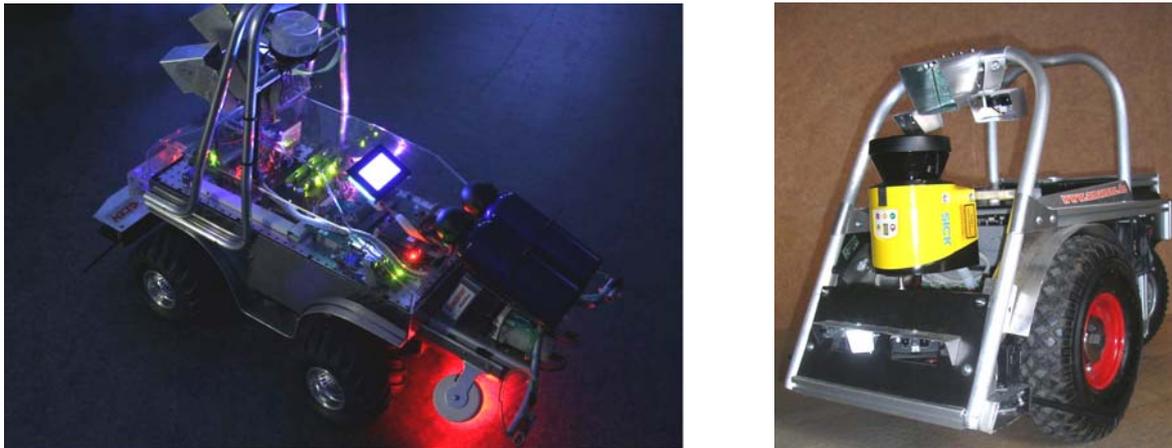


Abbildung 2: Einsatz optoelektronischer Sensorsysteme bei autonomen Feldrobotern: 2D-Laserscanner am Feldroboter NAD (rechts); optische Maus am Feldroboter Amaizeing (links)

3.1 Odometrie: Optischer Maussensor „optiSense“

Die Aufnahme zuverlässiger Weginformationen stellt eine wesentliche Voraussetzung für eine robuste Navigation in landwirtschaftlicher Umgebung dar. Typischerweise werden Drehgeber zur Odometrie eingesetzt, jedoch wird die Interpretation der Daten durch das Auftreten von Schlupf erschwert.

Die weite Verbreitung optischer Mäuse (mit integrierten Kameras) bietet alternative Optionen zum Einsatz solcher Systeme im Feld. Dabei werden niedrig aufgelöste Differenzbilder zur Wegmessung in x- und y-Richtung ausgewertet. Im Rahmen eines studentischen Projektes wurde ein solcher Sensor aufgebaut und erstmals im Roboter Amaizeing (siehe Abbildung 2) erfolgreich getestet. Systematische quantitative Messungen zum Grad der

Schlupfreduktion im Vergleich zu Drehgebern unter verschiedenen Feldbedingungen sind geplant.

Zur Entwicklung von „optiSense“ wurde der optische Mauschip ADNS 3080 des Herstellers AGILENT verwendet, die Optik wurde an die Einbauhöhe im Roboter Amaizeing (siehe Abbildung 2) angepasst, die Beleuchtungsintensität wurde durch die Verwendung eines LED-Clusters erhöht. Die Kommunikation mit dem Mouse Chip, dem PC (zur Entwicklung) sowie dem Roboter erfolgte über einen Mikrocontroller (siehe **Abbildung 3**). Die Kosten aller optiSense-Komponenten liegen bei knapp 100 €

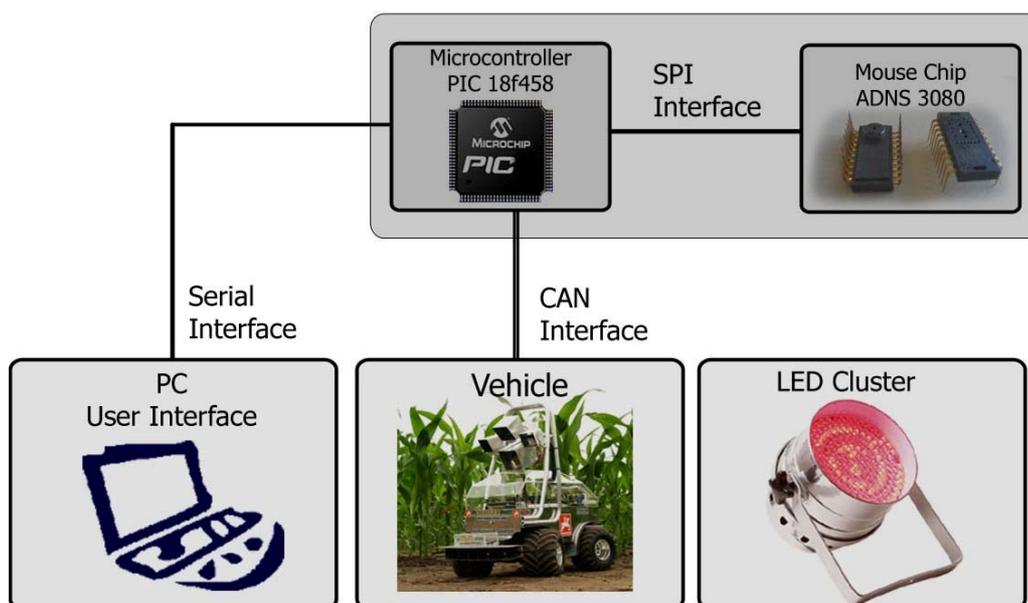


Abbildung 3: Systemintegration des optischen Maussensors optiSense

3.2 Abstandserfassung: Laserscanner

Die Navigation innerhalb von Reihenkulturen, die Erkennung des Vorgewendes oder die Detektion von Hindernissen basiert maßgeblich auf Abstandsinformationen. Bis auf den Einsatz von Ultraschallsensoren für gemittelte Informationen dominieren optoelektronische Systeme. Die Robustheit der Systeme im Hinblick auf Störgrößen (insbesondere Sonnenlicht, Staub, optische Oberflächeneigenschaften) lässt sich häufig durch den Einsatz von Software oder zusätzlicher Hardware (Abschattung, Elektronik, Sensorik) erhöhen.

- **1D:** Punktförmige optoelektronische Distanzsensoren basieren auf Triangulation- oder Laufzeitverfahren. Typischerweise können hohe Taktraten (bis in den kHz-Bereich) erzielt werden, intelligente Sensoren verfügen über eine integrierte Vorverarbeitung und Lichtintensitätsanpassung sowie einen Fehlerausgang zur Interpretation der Daten. Die geringe Informationsdichte kann durch den Einsatz mehrerer Sensoren teilweise kompensiert werden.

- 2D: Hier werden 2D-Laserscanner (siehe unten) eingesetzt, die Abstandsinformationen über eine Zeile mit Taktraten im 10Hz-Bereich liefern. Durch die Verfügbarkeit lichtstarker Laserlinien haben in den letzten Jahren auch Lichtschnittverfahren an Bedeutung gewonnen. Dabei wird eine projizierte Laserlinie mit einer Kamera aufgenommen und der Abstand zu den detektierten Pixeln über Triangulation berechnet.
- 3D: Durch die Bewegung eines 2D-Laserscanners (über Schrittmotoren) werden 3D-Laserscanner realisiert. Vielversprechende Ergebnisse wurden mittlerweile auch von 3D-Kameras geliefert, für die entwickelten Laufzeitsysteme wird erhebliches Potenzial gesehen.

Als Beispiel zum Einsatz von Laserscannern auf Feldrobotern wurde der 2D-Laserscanner S300 (Sick) in den autonomen Feldroboter NAD (modifizierte Plattform des ProfiBot, Fraunhofer-Gesellschaft; siehe Abbildung 2) integriert. Die Messdaten mit einem Scanwinkel von 270° (Auflösung: $0,5^\circ$) werden mit Messzyklen bis zu 12 Hz aufgenommen, der erfasste Abstandsbereich liegt zwischen 5 cm und 30 m. Die Anbindung des Sensors an den Feldroboter erfolgt über einen RS422-USB-Konverter direkt an den PC. Zur Evaluation und Systemintegration wurde eine grafische Benutzeroberfläche entwickelt (siehe **Abbildungen 4 und 5**). Bei einer Anwendung auf dem Feld (Reihennavigation) genügt es, den Abstand zu den beiden Reihen und das Reihenende zu erkennen. Dies kann ohne aufwändige Berechnungen online geschehen. Prinzipiell kann man den Sensor als ein System aus vielen (540) Abstandssensoren betrachten. Eine einfache Navigation kann daher z.B. über das Auswerten einzelner Strahlen oder Strahlenbündel (siehe Abbildung 5). Dabei ist das Umrechnen polarer Koordinaten in kartesische Koordinaten zu beachten. Da der maximale Messbereich des Sensors bei 32 m liegt, können Reihenenden oder Hindernisse (Kollisionsschutz) frühzeitig erkannt werden.



Abbildung 4: 2D-Laserscanner zur Detektion von Reihenkulturen

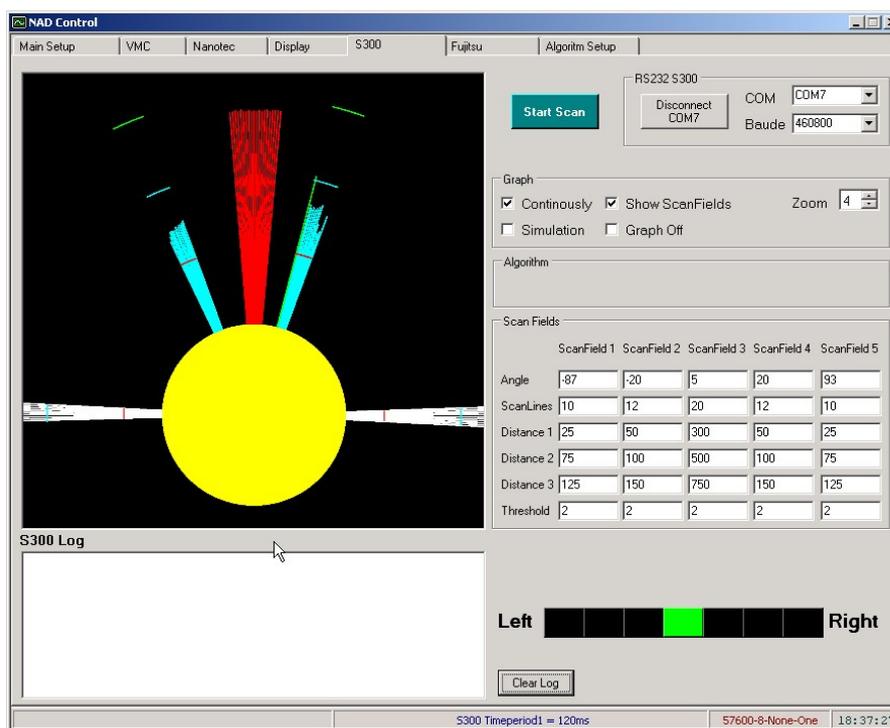


Abbildung 5: Grafische Benutzeroberfläche zum Einsatz eines 2D-Laserscanners mit „Strahlenbündel“

3.3 Color Tracking: Intelligente Kamera mit Zeilenstatistik

Von den Autoren wird seit 2004 die kostengünstige intelligente Kamera CUMCam2 eingesetzt (KLOSE *et al.* 2005). Seit kurzer Zeit ist das Nachfolgemodell CMUCam3 verfügbar, ein programmierbares Embedded System mit einem Bildsensor. Die Kamera wurde nun zur Reihennavigation und als Unkrautindikator eingesetzt (KLOSE *et al.* 2008). Dabei wird das Color-Tracking zur Detektion der „grünen“ Pixel mit einem entsprechenden Farbtoleranzbereich verwendet. Die intelligente Kamera führt eine einfache Bildverarbeitung durch und liefert die reduzierten Daten über die Schnittstelle zum Roboter. Die in die CMUCam3 integrierte Option zur Zeilenstatistik kann für die Navigation und Agro-Information wichtige Daten beitragen: **Abbildung 6** zeigt die Schwerpunktbildung für die grünen Pixel, die als gleitender Mittelwert zur Navigation eingesetzt werden können. Bildet man die Differenzen benachbarter Schwerpunkte, so zeigen diese bei den Nutzpflanzen (Mais) geringe Schwankungen, während die Abweichungen bei Unkraut deutlich größer sind. Diese Informationen können daher als selektive Informationen in das Sensor Fusion Konzept des Roboters zur Unterscheidung von Nutzpflanzen und Unkräutern integriert werden.

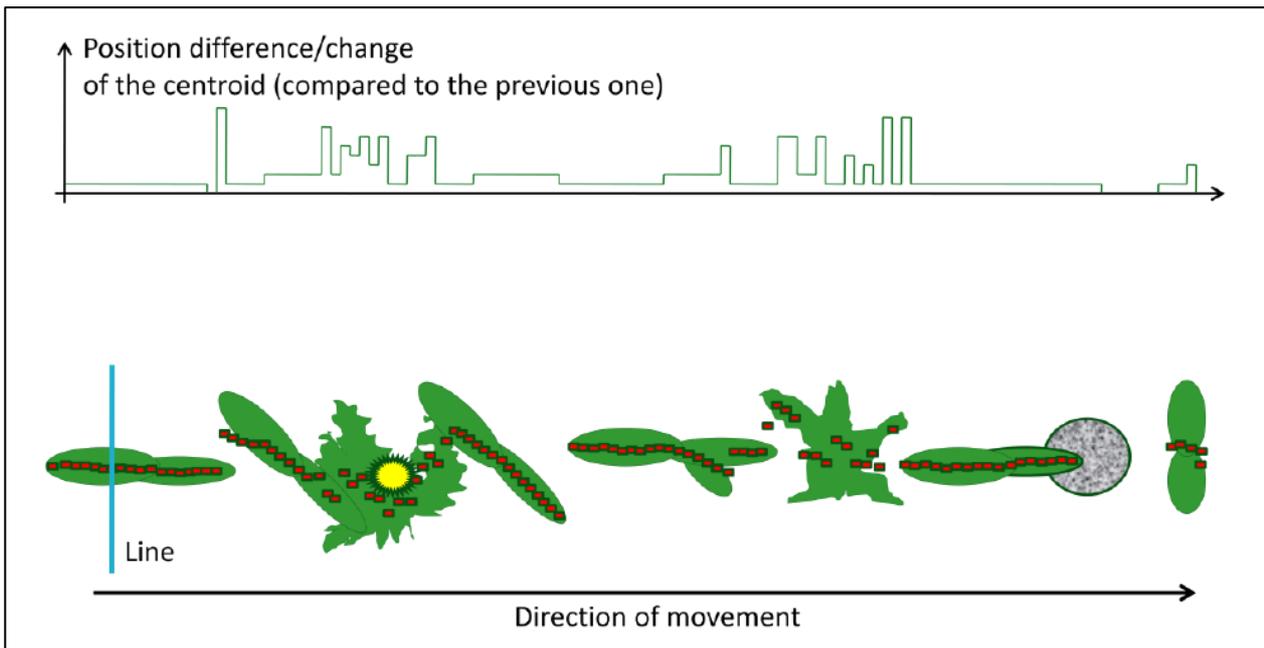


Abbildung 6: Schwerpunktberechnung und Differenzbildung "grüner" Pixel mit der CMUCam3 für eine Pflanzenreihe

4 Ausblick

Die Einsatzmöglichkeiten verschiedener Sensoren zur Navigation und Applikation in landwirtschaftlichen Flächen wurden an den Beispielen optischer Maussensor, 2D-Laserscanner und intelligente Kamera gezeigt. Die Komplexität autonomer Systeme in der Landtechnik stellt hohe Anforderungen an die Robustheit solcher Systeme. Die Sensor- und Datenfusion basiert wesentlich auf der Verfügbarkeit verlässlicher Detail-Informationen. Es entsteht somit zunehmender Bedarf, neben der Vorverarbeitung auch weite Bereiche der Auswertung einzelner Sensoren sensornah zu platzieren. Die technische Verfügbarkeit solcher „intelligenter Sensoren“ steigt kontinuierlich, auch sinken die Kosten. Hierdurch wird eine wichtige Voraussetzung für die intelligente – robuste – Verknüpfung der Informationen zur Entwicklung erster Prototypen autonomer Feldroboter geschaffen.

5 Literatur

FENDER F., HANNEKEN M., LINZ A., RUCKELSHAUSEN A., SPICER M. (2005): Messende Lichtgitter und Multispektralkameras als bildgebende Systeme zur Pflanzenerkennung / Imaging for crop detection based on light curtains and multispectral cameras. Bornimer Agrartechnische Berichte 40: 7-16

- FENDER F., HANNEKEN M., IN DER STROTH S., KIELHORN A., LINZ A., RUCKELSHAUSEN A. (2006):** Sensor Fusion Meets GPS: Individual Plant Detection. Proceedings of CIGR EurAgEng/VDI-MEG
- HENTEN E.J. VAN, HOFSTEE J.W., MÜLLER J., RUCKELSHAUSEN A. (2007):** The Field Robot Event – An International Design Contest in Agricultural Engineering. In: Fountas S., Aggelopoulou A., Gemtos F., Blackmore S. (eds.), 2007. Proceedings of the 6th European Conference on Precision Agriculture, 3-7 June 2007, Skiathos, Greece, Paper nr. 88, 6 pp
- IN DER STROTH S., RAMLER B., LINZ A., RUCKELSHAUSEN A. (2003):** Weed detection based on spectral imaging systems with CMOS cameras. 4th European Conference on Precision Agriculture ECPA
- KLOSE R., MEIER M., LINZ A., RUCKELSHAUSEN A. (2005):** Reihenführung autonomer Roboter mit der Low-Cost-Kamera CMUCam. Bornimer Agrartechnische Berichte, 40: 131-137
- KLOSE R., KLEVER J., LINZ A., NIEHAUS W., RUCKELSHAUSEN A., THIEL M., URRASACO M., WEGNER U. (2007):** Sensor fusion based navigation of the autonomous field robot Maizerati. Bornimer Agrartechnische Berichte, 60: 56-62
- KLOSE R., MARQUERING J., THIEL M., RUCKELSHAUSEN A. (2008):** Weedy – a Sensor Fusion Based Autonomous Field Robot for Selective Weed Control. 66th International Conference Agricultural Engineering, Stuttgart-Hohenheim, to be published
- KRONSBEN C.-F., EGBERS M., RUCKELSHAUSEN A. (2006):** Optoelektronisches Sensorsystem zur Reifegradmessung bei der Maisernte. Bornimer Agrartechnische Berichte, 56: 16-21
- PEDERSEN, T.S., NIELSEN K.M., ANDERSEN P., BAK T., NIELSEN D. (2002):** Development of an Autonomous Vehicle for Weed and Crop Registration. In: Proc. European Society of Agricultural Engineering -AgEng2002- Conf., 22-24. Budapest-Gödöllő, Hungary
- PEDERSEN S.M., FOUNTAS S., HAVE H., BLACKMORE B.S. (2006):** Agricultural robots – system analysis and economic feasibility. Precision Agric 7: 295–308
- RATH, T., KAWOLLEK, M. (2006):** Probleme des Einsatzes von Robotern zur selektiven Ernte von Pflanzen und Pflanzenteilen. Bornimer Agrartechnische Berichte, 56: 67-75
- RUCKELSHAUSEN A., DZINAJ T., GELZE F., KLEINE HÖRSTKAMP S., LINZ A., MARQUERING J. (1999):** Microcontroller-based multisensor system for online crop/weed detection. Proceedings Brighton Conference, Vol.2: 601-606
- RUCKELSHAUSEN A., LINZ A. (2000):** CMOS-Kameras zur online Erfassung spektraler und geometrischer Signaturen von Pflanzen und Pflanzeigenschaften. Bornimer Agrartechnische Berichte, 25: 101-110
- THÖSINK G., PRECKWINKEL J., LINZ A., RUCKELSHAUSEN A., MARQUERING J. (2004):** Optoelektronisches Sensorsystem zur Messung der Pflanzenbestandsdichte. Landtechnik 59: 78-79

Untersuchung eines automatisierten bildanalytischen Verfahrens zur Erfassung der Unkrautverteilung in landwirtschaftlichen Kulturflächen

Measuring the spatial distribution of weed in agricultural fields by means of automatic imaging technique

Christoph Gutjahr, Bernhard Huber, Martin Weis, Roland Gerhards

Fachgebiet Herbologie, Institut für Phytomedizin, Universität Hohenheim, Otto-Sander-Straße 5, 70593 Stuttgart, Germany
E-mail: cgutjahr@uni-hohenheim.de

Kurzfassung: Die heterogene Verteilung von Unkräutern und Ungräsern in landwirtschaftlichen Kulturflächen erfordert die teilflächenspezifische Herbizidapplikation. In diesem Verfahren steckt ein großes Potenzial zur Herbizideinsparung, wodurch ökonomische und ökologische Vorteile entstehen.

Im Fachgebiet Herbologie der Universität Hohenheim wurde ein bildanalytisches Verfahren zur Online-Erfassung von Unkräutern und Kulturpflanzen mit einer bispektralen Kamertechnik und einer Software zur Klassifikation der Pflanzen entwickelt. Dabei erfolgt die Artenerkennung durch die Extraktion von Formmerkmalen der Pflanzen (WEIS & GERHARDS 2007). Mit diesem System wurden 2007 und 2008 in Winterweizen und Zuckerrüben Feldversuche durchgeführt. Die Unkrautverteilung wurde visuell und bildanalytisch im Frühjahr sowie Herbst 2007 und Frühjahr 2008 in einem Raster von 1,5×3 Metern erfasst. Alle Bilddaten wurden mit RTK-GPS georeferenziert. Aus den Bildern wurden Formmerkmale aller Pflanzen automatisch berechnet. Die Klassifikation der Kulturpflanzen und Unkräuter erfolgte anhand dieser Formmerkmale. Zur Überprüfung der Qualität der automatischen Klassifikation wurden die so ermittelten Ergebnisse mit den entsprechenden visuell ermittelten Ergebnissen verglichen. Dabei entsprachen die Ergebnisse der automatischen Klassifikation je nach Kulturpflanze zu 32 – 85% den visuell ermittelten Ergebnissen. Auf Grundlage von Bekämpfungsschwellen wurden so für jede zu bekämpfende Unkrautklasse Herbizidapplikationskarten erstellt, anhand derer dann mit einer Dreikammerspritze eine teilschlagspezifische Herbizidapplikation erfolgte. Die Herbizideinsparungen lagen hierbei zwischen 36 und 48%.

Deskriptoren: Teilflächenspezifische Herbizidapplikation, Bildanalyse, Unkrauterken-
nung, Unkrautkarte

Summary: *The heterogeneous distribution of weeds in agricultural cultivations requires the site specific herbicide application. This procedure leads to enormous saving in herbicides and brings so economical and ecological benefits. In the herbology department at the University of Hohenheim, there has been developed a sensor system to detect weeds in cultural fields. A bispectral camera is used in combination with an image analysing software to identify weeds. Using this sensor system, there have been done field experiments in the year 2007 and 2008 in wheat and sugar beets. In both experiments weeds where detected visually and automatically in a grid of 1.5 x 3 meters. The classification of cultural plants and weeds has been done using feature parameters. To check the quality of automated classification the so determined results were compared with the corresponding results of the visually identification. The agreement between the manual and the automatic classification was depending on the crop between 32 and 85%. Using control thresholds for each weed class there have been generated herbicide application maps. The herbicide application has been done with a multiple spray boom sprayer. The herbicide savings reached from 36 to 48%.*

Keywords: *Patch spraying herbicides, weed detection, image processing, weed map, weed sampling*

1 Einleitung

Informationen über die räumliche Verteilung der Unkräuter in Kombination mit einer präzisen Applikationstechnik ermöglichen es, Herbizide gezielt und teilschlagspezifisch zu applizieren. Verschiedene Untersuchungen haben gezeigt, dass ein solches Verfahren zu einer deutlichen Reduktion der ausgebrachten Herbizidmengen führt und somit ökonomische und ökologische Vorteile aufweist (NORDMEYER *et al.* 1997, GERHARDS & CHRISTENSEN 2003, GERHARDS & SÖKEFELD 2003, TIMMERMANN *et al.* 2003). Die Basis für eine teilflächenspezifische Herbizidapplikation ist somit eine möglichst genaue Information über die Unkrautverteilung innerhalb eines Feldes. Für die Ermittlung der Unkrautverteilung kann aus arbeitswirtschaftlichen, und somit aus ökonomischen Gründen, nur anhand eines automatisierten Boniturverfahrens erfolgen. Ein kameragestütztes Sensorsystem mit integrierter digitaler Bildanalysetechnik erlaubt es, Pflanzenarten in Mischbeständen automatisiert zu erkennen (WEIS & GERHARDS 2007).

Ziel der Untersuchungen war es, unter Feldbedingungen die Arbeitsqualität der automatisierten Unkrautklassifikation zu ermitteln. Die Vorgehensweise und die Ergebnisse dieses Versuches werden im Folgenden beschrieben.

2 Material und Methoden

2.1 Versuchsaufbau

In der Vegetationsperiode 2007/2008 wurden in Winterweizen und Zuckerrüben mit der von SÖKEFELD *et al.* (2007) beschriebenen Bispektralkamera in einem Raster von 2,5 x 3 Metern Bildaufnahmen gemacht. Die Kontrolle der automatisierten Unkrauterkennerung erfolgte dann anhand einer manuellen Bonitur, bei Art und Anzahl aller Pflanzen im Bild bestimmt wurden. Anschließend erfolgte ein Abgleich dieser Daten mit den Ergebnissen der automatisierten Unkrauterkennerung.

2.2 Bildaufnahme und automatisierte Unkrauterkennerung

Die Bildaufnahme erfolgte mit zwei Kameras, die an einem speziellen Trägerfahrzeug befestigt wurden. Um diese Bilder für eine automatisierte Unkrautklassifikation verwenden zu können, ist es wichtig, dass nur Pflanzen auf den Bildern zu sehen sind. Dies bedeutet, dass Hintergrundobjekte wie zum Beispiel Steine oder Ernterückstände aus dem Bild entfernt werden müssen. Das von SÖKEFELD *et al.* (2007) beschriebene Kamerasystem nimmt hierzu an derselben Position im Feld ein Rot- und Infrarotbild gleichzeitig auf. Da rotes Licht von den Pflanzen absorbiert wird, sind die Pflanzen im roten Kanal dunkler als die Hintergrundobjekte. Das infrarote Licht wird von Pflanzen und Hintergrundobjekten ähnlich stark reflektiert, wodurch im Infrarotbild Pflanzen als auch Hintergrundobjekte ent-

halten sind. Durch die Erzeugung eines Differenzbildes, indem das Rotbild von dem Infrarotbild abgezogen wird, erhält man ein Bild, in dem nur grüne Pflanzen zu sehen sind.

Von Winterweizen, Zuckerrüben und deren Leitunkräutern wurden nach dem von WEIS & GERHARDS (2007) beschriebenen Bildverarbeitungsverfahren Formmerkmale ermittelt und in einer Prototypendatenbank gespeichert. Diese Datenbank war Grundlage für die automatische Klassifikation aller Bilder nach einem modifizierten Maximum Likelihood Verfahren. Die Unkrautarten wurden zu Klassen mit ähnlicher Sensitivität zu Herbiziden und Konkurrenzskraft zusammengefasst.

2.3 Kontrolle der automatisierten Unkrauterkenennung

Zur Überprüfung der Qualität der automatischen Klassifikation wurden die so ermittelten Ergebnisse mit den entsprechenden visuell ermittelten Ergebnissen verglichen. Um den Zusammenhang zwischen den beiden Boniturverfahren darzustellen, wurde eine Regressionsanalyse durchgeführt, wobei das Bestimmtheitsmaß R^2 als Maß für die Güte der automatischen Klassifikation galt. Anhand der Regressionsgleichung war es dann möglich, die Ergebnisse der automatisierten Unkrauklassifikation der tatsächlichen Verunkrautungssituation auf dem Feld anzugleichen.

3 Ergebnisse und Diskussion

Nach SOGAARD & HEISEL (2002) und GERHARDS & OEBEL (2006) ist eine teilflächenspezifische Herbizidapplikation aus ökonomischer Sicht nur dann realisierbar, wenn es gelingt, die Unkrautverteilung in landwirtschaftlichen Kulturflächen präzise und schlagkräftig anhand automatisierter Kartierungsverfahren zu erfassen. **Abbildung 1** zeigt, dass es in Winterweizen sehr gut gelungen ist, den Ackerfuchsschwanzbesatz anhand eines automatisierten Boniturverfahrens zu ermitteln. In 85% der Fälle stimmten die Ergebnisse der manuellen und automatisierten Bonitur überein. Somit kann man mit dem kameragestützten Sensorsystem mit integrierter digitaler Bildanalysetechnik automatisiert Ackerfuchsschwanz in einem Mischbestand aus Kulturpflanzen, Ungräsern und Unkräutern erkennen. Das Verfahren erfüllt die von SOGAARD & HEISEL (2002) sowie GERHARDS & OEBEL (2006) beschriebene Grundvoraussetzung für die Durchführung einer wirtschaftlichen teilflächenspezifischen Herbizidapplikation auf landwirtschaftlichen Kulturflächen. **Abbildung 2** verdeutlicht, dass im Gegensatz zur Ungraskartierung in Winterweizen in der Zuckerrübenfläche nur in 35% der Fälle eine Übereinstimmung zwischen der manuellen und automatisierten Unkrautbonitur zu beobachten war. Hier war es nicht das Ziel, die Verteilung einer einzelnen Unkrautart zu erfassen, sondern insgesamt die Verteilung der breitblättrigen Unkräuter zu kartieren. Die Gründe für die geringe Übereinstimmung zwischen manueller und automatisierter Bonitur liegen zu einem gewissen Teil an der Qualität der aufgenommenen Bilder. Eine nicht optimierte Kameraeinstellung führte dazu, dass im Dif-

ferenzbild noch sehr viele Hintergrundobjekte enthalten waren, wodurch es zu Fehlklassifikationen kam.

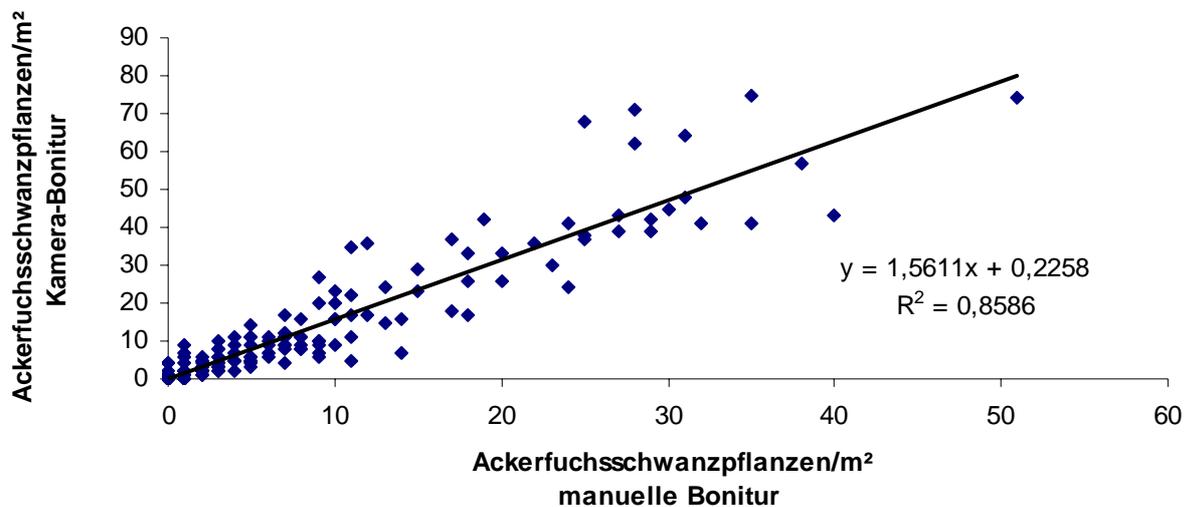


Abbildung 1: Korrelation zwischen der manuellen und automatischen Bonitur. Mit der Funktion $y = 1,5611x + 0,2258$ kann mit einem Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0,8586$ anhand der Ergebnisse der automatischen Bonitur die tatsächliche Ackerfuchsschwanzdichte geschätzt werden

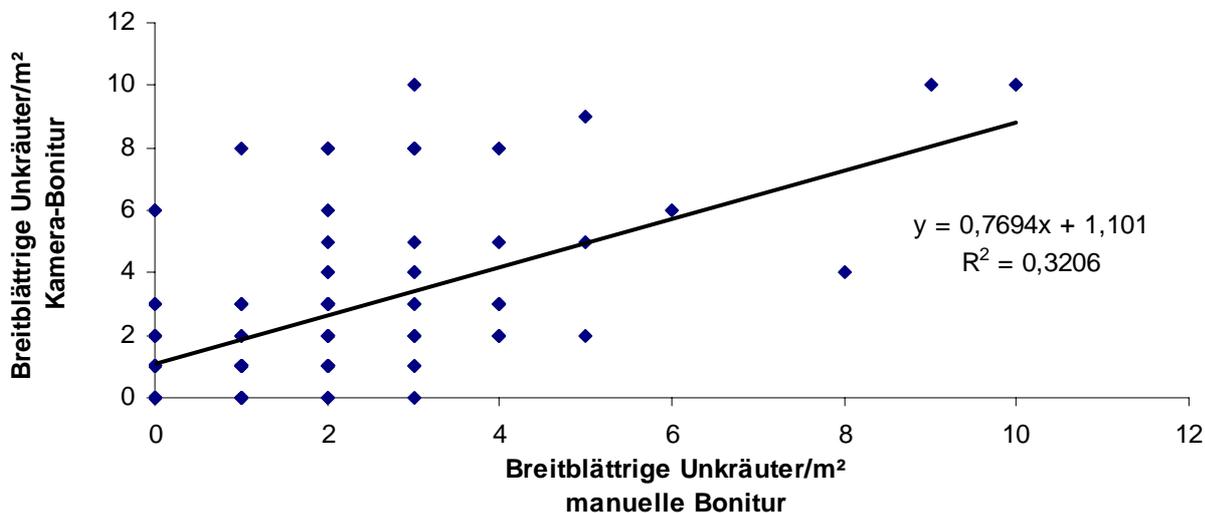


Abbildung 2: Korrelation zwischen der manuellen und automatischen Bonitur. Mit der Funktion $y = 0,7694x + 1,101$ kann mit einem Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0,3206$ anhand der Ergebnisse der automatischen Bonitur die tatsächliche Verunkrautungssituation geschätzt werden

Die **Abbildungen 3 bis 8** zeigen die Herbizidapplikationskarten verschiedener Boniturverfahren. Die Tatsache, dass bei der Erstellung solcher Herbizidapplikationskarten Bekämpfungsschwellen festgesetzt werden, macht deutlich zeigt, dass Fehlklassifikationen unter Umständen keinen großen Einfluss auf die Qualität der Applikationskarte haben. Vor allem

bei niedrigen Bekämpfungsschwellen, und das zeigen die anhand manueller und automatisierter Bonitur erstellten Herbizidapplikationskarten in Zuckerrüben, können Fehlklassifikationen toleriert werden (**Abbildungen 6 und 7**). Obwohl in diesem Fall die Übereinstimmung zwischen manueller und automatisierter Bonitur relativ niedrig war, bestehen zwischen den Herbizidapplikationskarten keine großen Unterschiede. Dies bringt zum Ausdruck, dass bei Bekämpfungsschwellen, die in diesem Falle bei einer Unkrautpflanze m^{-2} lag, nicht jede einzelne Pflanze richtig klassifiziert werden muss, sondern es ausreicht, wenn ein Überschreiten der Bekämpfungsschwelle ermittelt wird. Von großer Bedeutung ist in diesem Falle jedoch, dass die Kulturpflanze von Unkrautpflanzen unterschieden werden kann. Die Tatsache, dass bei der manuellen Bonitur auf 28% und bei automatischer Bonitur auf nur 21% der Fläche eine Herbizidapplikation durchgeführt wird, zeigt dass es recht gut gelungen ist, die Zuckerrüben von den Unkräutern zu unterscheiden.

Die **Abbildungen 5 und 8** zeigen die Herbizidapplikationskarten, bei denen unter Verwendung der entsprechenden Regressionsgleichung die Unkrautverteilung geschätzt wurde. Der Vergleich der **Abbildungen 4 und 5** veranschaulicht, dass es im Weizenversuch gelungen ist, anhand der Regressionsrechnung die Genauigkeit der Herbizidapplikationskarte zur Bekämpfung von Ackerfuchsschwanz zu erhöhen. In diesem Falle stellt die Regressionsrechnung einen Korrekturfaktor dar, der beim Einsatz des Sensors zur Ackerfuchsschwanzkartierung prinzipiell eingesetzt werden könnte. Damit ein solcher Korrekturfaktor in Form einer Regressionsgleichung Allgemeingültigkeit erhält, müssen noch zahlreiche Erfahrungswerte gesammelt und ausgewertet werden. Im Zuckerrübenversuch war zwischen der manuellen und automatischen Bonitur nur eine sehr geringe Übereinstimmung zu beobachten. Auf Grund des niedrigen Bestimmtheitsmaßes war in diesem Fall eine Korrektur der automatischen Bonitur anhand der Regressionsgleichung nicht möglich.

Herbizidapplikation

- ja
- nein

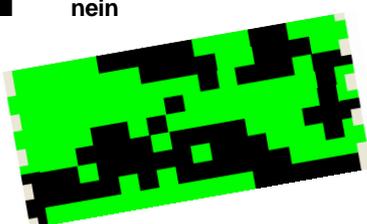


Abbildung 3: Herbizidapplikationskarte zur Bekämpfung von Ackerfuchsschwanz in Weizen bei manueller Bonitur (Bekämpfungsschwelle: 30 Pflanzen/ m^2) Herbizideinsparung: 43%

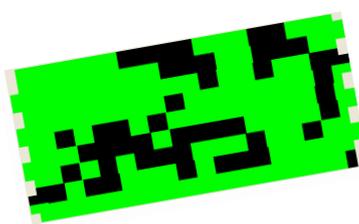


Abbildung 4: Herbizidapplikationskarte zur Bekämpfung von Ackerfuchsschwanz in Weizen bei automatischer Bonitur (Bekämpfungsschwelle: 30 Pflanzen/ m^2) Herbizideinsparung: 30%

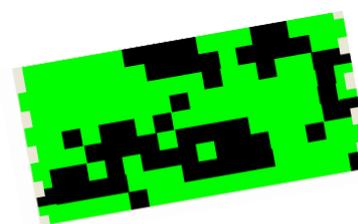


Abbildung 5: Herbizidapplikationskarte zur Bekämpfung von Ackerfuchsschwanz in Weizen nach einer anhand der Regressionsgleichung korrigierten automatischen Bonitur (Bekämpfungsschwelle: 30 Pflanzen/ m^2) Herbizideinsparung: 36%

Herbizidapplikation

- ja
- nein

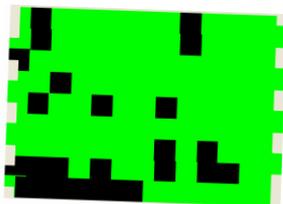


Abbildung 6: Herbizidapplikationskarte zur Bekämpfung von Unkräutern in Zuckerrüben bei manueller Bonitur (Bekämpfungsschwelle: 1 Pflanze/m²)
Herbizideinsparung: 21%

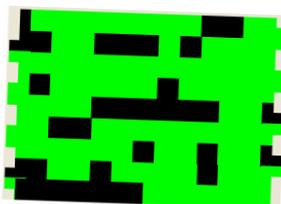


Abbildung 7: Herbizidapplikationskarte zur Bekämpfung von Unkräutern in Zuckerrüben bei automatischer Bonitur (Bekämpfungsschwelle: 1 Pflanze/m²)
Herbizideinsparung: 28%

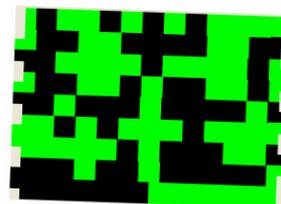


Abbildung 8: Herbizidapplikationskarte zur Bekämpfung von Unkräutern in Zuckerrüben nach einer anhand der Regressionsgleichung korrigierten automatischen Bonitur (Bekämpfungsschwelle: 1 Pflanze/m²)
Herbizideinsparung: 48%

Das Sensorsystem ist die Basis für eine teilflächenspezifische Unkrautbekämpfung im Onlineverfahren. Entscheidend für das Gelingen einer solchen Unkrautbekämpfung sind auch Entscheidungsalgorithmen, anhand derer die entsprechenden Sensorinformationen zur Unkrautverteilung in eine Applikationsentscheidung umgesetzt werden. Da bei einer Herbizidapplikation im Onlineverfahren ein Vorrasschaun nicht möglich ist, muss die Applikationsentscheidung anhand von zurückliegenden und aktuellen Sensorsignalen zur Unkrautverteilung getroffen werden. Dabei sind auch die Konkurrenzkraft und die Verbreitung des detektierten Unkrautes zu berücksichtigen. Neben diesen unkrautbiologischen Aspekten müssen bei der Erstellung solcher Entscheidungsalgorithmen auch ökonomische Aspekte der Unkrautbekämpfung beachtet werden. Die von RITTER *et al.* (2008) und GUTJAHR *et al.* (2008) beschriebenen ökonomisch optimierten Entscheidungsalgorithmen zu teilflächenspezifischen Herbizidapplikation können hierzu verwendet werden. Für den aus ökonomischer als auch pflanzenbaulicher Sicht sinnvollen Einsatz dieser Technik müssen noch weitere Feldexperimente durchgeführt werden.

4 Literatur

- GERHARDS R., CHRISTENSEN S. (2003): Real time weed detection, decision making maize, sugar beet, winter wheat and winter barley. *Weed Res.* 43: 1-8
- GERHARDS R., SÖKEFELD M. (2003): Precision Farming in weed control-system components and economic benefits. *Precision Agriculture* 4: 229-234
- GERHARDS R., OEBEL H. (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 Research* 46(3): 185–193

- GUTJAHR C., WEIS M., SÖKEFELD M., RITTER C., MÖHRING J., BÜCHSE A., PIEPHO H.P., GERHARDS R. (2008):** Erarbeitung von Entscheidungsalgorithmen für die teilflächenspezifische Unkrautbekämpfung. *Journal of Plant Diseases and Protection, Special Issue XXI*: 143-148
- NORDMEYER H., HÄUSLER P., NIEMANN P. (1997):** Patchy weed control as an approach in precision farming. In: *Precision Agriculture '97*, pp. 307-314. BIOS Scientific Publishers, Oxford, UK
- RITTER C., DICKE D., WEIS M., OEBEL H., PIEPHO H.P., BÜCHSE A., GERHARDS R. (2008):** An on-farm research approach to quantify yield variability and to derive decision rules for site-specific weed management. *Precision Agriculture*
- SØGAARD H., HEISEL T. (2002):** Machine vision identification of weed species based on active shape models. Wageningen, pp. 402–403. European Weed Research Society: Grafisch Service Centrum Van Gils BV. 12th EWRS Symposium Wageningen Papendal, Arnhem, The Netherlands 24-27 June 2002
- SÖKEFELD M., GERHARDS R., KÜHBAUCH W. (2000):** Teilschlagspezifische Unkrautkontrolle - von der Unkrauterfassung bis zur Herbizidapplikation. *Zeitschrift für Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz Sonderheft XVII*: 187–194
- TIMMERMANN C., GERHARDS R., KÜHBAUCH W. (2003):** The economic impact of the site-specific weed control. *Precision Agriculture 4(3)*: 249–260
- WEIS M., GERHARDS R. (2007):** Feature extraction for the identification of weed species in digital images for the purpose of site-specific weed control. In: STAFFORD J.V, (ed.): *Precision Agriculture '07*, pp. 537-545. Academic Publishers, Wageningen, The Netherlands

Teilnehmerliste

Baranyai, Laszlo
Leibniz-Institut für Agrartechnik Potsdam-
Bornim e.V. ATB
Max-Eyth-Allee 100
14469 Potsdam-Bornim
E-mail: lbaranyai@atb-potsdam.de

Behnke, Willi
CLAAS Selbstfahrende Erntemaschinen
GmbH
Münsterstr.33
33428 Harsewinkel
E-mail: behnke@claas.com

Buschmeier, Rudolf
Mueller Elektronik GmbH & Co KG
Franz-Kleine-Str. 18
33154 Salzkotten
E-mail: buschmeier@mueller-elektronik.de

Damerow, Lutz
Universität Bonn
Nussallee 5
53115 Bonn
E-mail: damerow@uni-bonn.de

Dzinaj, Timur
CC-ISOBUS / Science to Business GmbH
der FH Osnabrück
Zum Gruthügel 8
49134 Wallenhorst
E-mail: timur.dzinaj@cc-isobus.de

Geyer, Martin
Leibniz-Institut für Agrartechnik Potsdam-
Bornim e.V. ATB
Max-Eyth-Allee 100
14469 Potsdam-Bornim
E-mail: geyer@atb-potsdam.de

Gutjahr, Christoph
Universität Hohenheim
Otto-Sander-Str. 5
70599 Stuttgart
E-mail: cgutjahr@uni-hohenheim.de

Bäumer, Christoph
insensiv GmbH
Heidsiekerheide 114
33739 Bielefeld
E-mail: c.baeumer@insensiv.de

Biskup, Bernhard
Forschungszentrum Jülich GmbH
Stettericher Forst
50425 Jülich
E-mail: b.biskup@fz-juelich.de

Cruse, Carsten
Cruse Leppelmann Kognitionstechnik
GmbH
Mendelstr. 11
48149 Münster
E-mail: cruse@clkgmbh.de

Diekhans, Norbert
CLAAS Selbstfahrende Erntemaschinen
GmbH
Münsterstr.33
33428 Harsewinkel
E-mail: diekhan@claas.com

Gebbers, Robin
Leibniz-Institut für Agrartechnik Potsdam-
Bornim e.V. ATB
Max-Eyth-Allee 100
14469 Potsdam-Bornim
E-mail: rgebbers@atb-potsdam.de

Gieselmann Christian
insensiv GmbH
Heidsiekerheide 114
33739 Bielefeld
E-mail: c.gieselmann@insensiv.de

Herppich, Werner B.
Leibniz-Institut für Agrartechnik Potsdam-
Bornim e.V. ATB
Max-Eyth-Allee 100
14469 Potsdam-Bornim
E-mail: wherppich@atb-potsdam.de

Huber, Bernhard
Universität Hohenheim
Otto-Sander-Str. 5
70599 Stuttgart

Huster, Jochen
CLAAS Selbstfahrende Erntemaschinen
GmbH
Münsterstr.33
33428 Harsewinkel
E-mail: jochen.huster@claas.com

Kämpfe, Tanja
insensiv GmbH
Heidsiekerheide 114
33739 Bielefeld
E-mail: t.kaempfe@insensiv.de

Kraft, Martin
Johann Heinrich von Thünen-Institut (vTI),
Braunschweig
Bundesallee 50
38102 Braunschweig
E-mail: artin.kraft@vti.bund.de

Kronsbein, Christoph
Fachhochschule Osnabrück
Albrechtstr. 30
49076 Osnabrück
E-mail: c.kronsbein@addcom.de

Linz, Andreas
Fachhochschule Osnabrück
Albrechtstr. 30
49076 Osnabrück
e-mail: a.linz@fh-osnabrueck.de

Madsen, Tommy
AGROCOM GmbH & Co. Agrarsystem KG
Potsdamer Str. 211
33719 Bielefeld
E-mail: madsen@agrocom.com

Hummel, Gregoire M.
Forschungszentrum Jülich GmbH
Stettericher Forst
50425 Jülich
E-mail: g.hummel@fz-juelich.de

Junaldy, William
Amazonen-Werke H. Dreyer GmbH & Co.
KG
Postfach 51
49205 Hasbergen
E-mail: william.junaldy@student.sgu.ac.id

Klose, Ralph
Fachhochschule Osnabrück
Albrechtstr. 30
49076 Osnabrück
E-mail: Ralph.Klose@gmx.de

Kroiss, Gerhard
FRITZMEIER Systems GmbH & Co.KG
Dorfstr. 7
85653 Großhelfendorf
E-mail: g.kroiss@fritzmeier.de

Lang, Bernhard
Fachhochschule Osnabrück
Albrechtstr. 30
49076 Osnabrück
E-mail: B.Lang@fh-osnabrueck.de

Lüdeker, Wilhelm
Beratung optische Meßtechnik und Sys-
tementwicklung
Münchener Str. 32
86949 Windach
E-mail: w.luedeker@t-online.de

Möller, Andreas
Grimme Landmaschinenfabrik GmbH &
Co.KG
Hunteburger Str. 32
49401 Damme
E-mail: a.moeller@grimme.de

Pastrana, Julio
Leibniz Universität Hannover
Herrenhäuser Str. 2
30418 Hannover
E-mail: pastrana@bgt.uni-hannover.de

Piotraschke, Hagen
Agri Con GmbH
Im Wiesengrund 4
04749 Jahna
E-mail: hagen.piotraschke@agricon.de

Rath, Thomas
Leibniz Universität Hannover
Herrenhäuser Str. 2
30418 Hannover
E-mail: rath@bgt.uni-hannover.de

Reusch, Stefan
Yara International ASA
Hanninghof 35
48249 Dülmen
E-mail: stefan.reusch@yara.com

Ruckelshausen, Arno
Fachhochschule Osnabrück
Albrechtstr. 30
49076 Osnabrück
E-mail: ruckelshausen.os@t-online.de

Schöttler, Uwe
Maschinenfabrik Bernard Krone GmbH
Heinrich-Krone-Straße 10
48480 Spelle
E-mail: Uwe.Schoettler@Krone.de

Weis, Martin
Universität Hohenheim
Otto-Sander-Str. 5
70599 Stuttgart
E-mail: Martin.Weis@uni-hohenheim.de

Piecha, Steffen
tec5 AG
In der Au 27
61440 Oberursel/Ts.
E-mail: s.piecha@tec5.com

Rahe, Florian
Amazonen Werke H. Dreyer GmbH & Co.
KG
Postfach 51
49205 Hasbergen
E-mail: dr.florian.rahe@amazone.de

Rauch, Norbert
RAUCH Landmaschinenfabrik GmbH
Landstr. 14
76547 Sinzheim
E-mail: nrauch@rauch.de

Rosenauer, Elke
tec5 AG
In der Au 27
61440 Oberursel/Ts.
E-mail: e.rosenauer@tec5.com

Schniederbruns, Bernd
Maschinenfabrik Bernard Krone GmbH
Heinrich-Krone-Straße 10
48480 Spelle
E-mail: bernd.schniederbruns@krone.de

Stöcklin, Volker
RAUCH Landmaschinenfabrik GmbH
Landstr. 14
76547 Sinzheim
E-mail: vstoecklin@rauch.de

Zude, Manuela
Leibniz-Institut für Agrartechnik Potsdam-
Bornim e.V. ATB
Max-Eyth-Allee 100
14469 Potsdam-Bornim
E-mail: zude@atb-potsdam.de

**In der Reihe
Bornimer Agrartechnische Berichte**

sind bisher erschienen:

Heft 1	Technik und Verfahren der Landschaftspflege	1992
Heft 2	Beiträge zur Lagerung und Verarbeitung pflanzenbaulicher Produkte	1993
Heft 3	Technik und Verfahren in der Tierhaltung	1993
Heft 4	Technik und Verfahren der Landschaftspflege und für die Verwendung der anfallenden Materialien	1994
Heft 5	Verfahrenstechnik der Aufbereitung, Lagerung und Qualitätserhaltung pflanzlicher Produkte	1994
Heft 6	Biokonversion nachwachsender Rohstoffe und Verfahren für Reststoffbehandlung	1994
Heft 7	Preußische Versuchs- und Forschungsanstalt für Landarbeit und Schlepperprüffeld in Bornim 1927 bis 1945	1995
Heft 8	Qualitätssicherung und Direktvermarktung	1996
Heft 9	Konservierende Bodenbearbeitung auf Sandböden	1996
Heft 10	Anwendung wärme- und strömungstechnischer Grundlagen in der Landwirtschaft	1996
Heft 11	Computer-Bildanalyse in der Landwirtschaft Workshop 1996	1996
Heft 12	Aufbereitung und Verwertung organischer Reststoffe im ländlichen Raum	1996
Heft 13	Wege zur Verbesserung der Kartoffelqualität durch Verminderung der mechanischen Beanspruchung	1997
Heft 14	Computer-Bildanalyse in der Landwirtschaft Workshop 1997	1997
Heft 15	Technische und ökonomische Aspekte der Nutztierhaltung in großen Beständen	1997
Heft 16	11. Arbeitswissenschaftliches Seminar	1997
Heft 17	Nachwachsende Rohstoffe im Land Brandenburg Stand Aktivitäten und Perspektiven einer zukunftsfähigen und umweltgerechten Entwicklung	1998
Heft 18	Qualität von Agrarprodukten	1998
Heft 19	Computer-Bildanalyse in der Landwirtschaft Workshop 1998	1998
Heft 20	Beiträge zur teilflächenspezifischen Bewirtschaftung	1998
Heft 21	Landnutzung im Spiegel der Technikbewertung – Methoden Indikatoren, Fallbeispiele	1998

Heft 22	Kriterien der Nachhaltigkeit in der Verfahrensentwicklung für die Nutztierhaltung	1999
Heft 23	Situation und Trends in der Landtechnik / Erneuerbare Energien in der Landwirtschaft	1999
Heft 24	Institut für Landtechnik der Deutschen Akademie der Landwirtschaftswissenschaften zu Berlin 1951 bis 1965	1999
Heft 25	Computer-Bildanalyse in der Landwirtschaft Workshop 1999 / 2000	2000
Heft 26	Computer-Bildanalyse in der Landwirtschaft Workshop 2001	2001
Heft 27	Approaching Agricultural technology and Economic Development of Central and Eastern Europe	2001
Heft 28	6 th International Symposium on Fruit, Nut, and Vegetable Production Engineering	2001
Heft 29	Measurement Systems for Animal Data and their Importance for Herd Management on Dairy Cow Farms	2002
Heft 30	Produktion, Verarbeitung und Anwendung von Naturfasern	2002
Heft 31	Computer-Bildanalyse in der Landwirtschaft Workshop 2002	2002
Heft 32	Biogas und Energielandwirtschaft - Potenzial, Nutzung, Grünes Gas TM , Ökologie und Ökonomie	2003
Heft 33	Sozioökonomische Aspekte zu Perspektiven des Offenlandmanagements	2003
Heft 34	Computer-Bildanalyse in der Landwirtschaft Workshop 2003	2003
Heft 35	Energieholzproduktion in der Landwirtschaft Potenzial, Anbau, Technologie, Ökologie und Ökonomie	2004
Heft 36	High-Tech Innovationen für Verfahrensketten der Agrarproduktion. Statusseminar 2003	2004
Heft 37	Computer-Bildanalyse in der Landwirtschaft Workshop 2004	2004
Heft 38	Die Landmaschinenprüfung in der DDR 1951-1991 und ihre Vorgeschichte	2004
Heft 39	Energieverlust und Schimmelpilzentwicklung bei der Lagerung von Feldholz-Hackgut	2005
Heft 40	Computer-Bildanalyse in der Landwirtschaft Workshop 2005	2005
Heft 41	Demonstration der Langzeitwirkung bedarfsorientierter Fungizidbehandlung mit dem CROP-Meter	2005

Heft 42	Biochemicals and Energy from Sustainable Utilization of herbaceous Biomass (BESUB)	2005
Heft 43	Ozontes Waschwasser zur Qualitätssicherung leichtverderblicher Produkte - Entwicklung einer <i>Fuzzy-Logic</i> -Steuerung des Waschprozesses	2005
Heft 44	Messsystem zur Bewertung des Unkrautvorkommens	2005
Heft 45	Anwendung der Thermographie zur Optimierung der Belüftungssteuerung bei der Lagerhaltung landwirtschaftlicher Produkte	2005
Heft 46	Membranbioreaktor zur Aufbereitung von Schlachthofabwässern	
	Prozesssteuerung von Biogasanlagen mit Kofermentation	2005
Heft 47	Verschleißeinfluss auf das Förderverhalten von Drehkolbenpumpen	2005
Heft 48	Qualitätserhaltung und Qualitätssicherung von Bioobst und Biogemüse in der Nachernte	2005
Heft 49	Miniaturisiertes Datenerfassungs-System zum Implantieren in Früchte und zur Messung ihrer mechanischen Belastung durch Ernte- und Nachernteverfahren	2005
Heft 50	Prozesskontrolle der Qualität von frischem Obst und Gemüse mit Hilfe eines Multigas-Sensors	2005
Heft 51	Entwicklung eines Echtzeitsensors für die Stärkebestimmung bei Kartoffeln als funktionaler Bestandteil eines optoelektronischen Verleseautomaten	2005
Heft 52	Optimierte Steuerung von Getreide-Schachttrocknern	2005
Heft 53	Möglichkeiten und Grenzen der energetischen Nutzung von Rizinusöl	2005
Heft 54	Non-Destructive Methods for Detecting Health-Promoting Compounds COST Action 924 Working Group Meeting	2005
Heft 55	4 th IFAC / CIGR Workshop Control Applications in Post - Harvest and Processing Technology (CAPPT 2006) 26th - 29th March 2006, Potsdam, GERMANY	2006
Heft 56	Computer-Bildanalyse in der Landwirtschaft Workshop 2006	2006
Heft 57	Kontrolle der Frische in der Nacherntekette von Ökogemüse	2006
Heft 58	Entwicklung eines innovativen Dekontaminationsverfahrens als Technologieantwort auf zukünftiges Qualitätsmanagement im Nacherntebereich	2006

Heft 59	Experimental Studies and Mathematical Modelling of Solar Drying System for Production of High Quality Dried Tomato	2007
Heft 60	13. Workshop Computer-Bildanalyse in der Landwirtschaft & 4. Workshop Precision Farming	2007
Heft 61	Energiepflanzen im Aufwind Wissenschaftliche Ergebnisse und praktische Erfahrungen zur Produktion von Biogaspflanzen und Feldholz	2007
Heft 62	14. Workshop Computer-Bildanalyse in der Landwirtschaft	2008

Interessenten wenden sich an:

Leibniz-Institut für Agrartechnik Potsdam-Bornim e.V.
Max-Eyth-Allee 100
14469 Potsdam

Tel.: (0331) 5699-820
Fax.: (0331) 5699-849
E-Mail: atb@atb-potsdam.de

Schutzgebühr: 13,- €