

16. Workshop Computer-Bildanalyse in der Landwirtschaft

Computerised Image Analysis in Agriculture

**04. Mai 2010
Braunschweig**

Bornimer Agrartechnische Berichte

Heft 73

Potsdam-Bornim / Braunschweig 2010

16. Workshop Computer-Bildanalyse in der Landwirtschaft

*Computerised Image Analysis
in Agriculture*

04. Mai 2010
Braunschweig

Bornimer Agrartechnische Berichte
Heft 73

Potsdam-Bornim / Braunschweig 2010

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 2010

Redaktion:

Prof. Dr. habil. Manuela Zude
Dipl.-Inform. Martin Kraft

Typografische Gestaltung:

Andrea Gabbert

Herausgegeben vom Leibniz-Institut für Agrartechnik Potsdam-Bornim e.V. (ATB) mit Förderung durch den Bund (Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz BMELV) und das Land Brandenburg (Ministerium für Infrastruktur und Landwirtschaft MIL) 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 2010

Inhaltsverzeichnis	Seite
	<i>page</i>
Grußwort	5
Phänotypisierung von <i>Arabidopsis thaliana</i> mit GROWSCREEN FLUORO	7
<i>Phenotyping of Arabidopsis thaliana with GROWSCREEN FLUORO</i> Jansen Marcus, Frank Gilmer, Bernhard Biskup, Uwe Rascher, Silvia Braun, Georg Dreissen, Andreas Fischbach, Achim Walter, Hanno Scharr, Ulrich Schurr	
Biomass Estimation from Images for Greenhouse Experiments	13
<i>Schätzung der Biomasse im Gewächshausversuch mit Hilfe der Bildverarbeitung</i> Martina Keller, Martin Weis, Roland Gerhards	
Methodik zur Untersuchung von Laserlichtwirkung auf der Basis von Bildanalysen auf juvenile Pflanzen zur Unkrautregulierung	21
<i>Methodology for investigations on the effect of laser applications on juvenile plants for weed control basing on image analysis</i> Christian Marx, Thomas Rath, Stephan Barcikowski	
Erstellen von Binärbildern zur Erfassung von <i>Fusarium</i>-Symptomen in Winterweizenfeldern	32
<i>Generation of binary images for detection of Fusarium symptoms in winter wheat fields</i> Karl-Heinz Dammer, Jörn Selbeck, Volker Dworak, Bernd Möller, Joachim Intreß, Bernd Rodemann	
Kameragestützte Lahmheitsbewertung bei Milchkühen	40
<i>Lameness assessment of dairy cows by means of imaging</i> Kristin Pils, Jörg Hoffmann	
Hyperspektrale Bildanalyse zur frühzeitigen Detektion von Taubährigkeit	54
<i>Hyperspectral imaging for early detection of Fusarium infection in wheat</i> Elke Bauriegel, Antje Giebel, Uwe Schmidt, Martin Geyer, Werner B. Herppich	
Röntgen-Synchrotron Computer-Tomographie zur zerstörungsfreien Analyse der funktionellen Pflanzenanatomie	64
<i>Synchrotron x-ray computer tomography to non-invasively analyse the functional plant anatomy</i> Uzuki Matsushima, Wolfgang Graf, Simon Zabler, Ingo Manke, Martin Dawson, Gerard Choinka, Werner B. Herppich	

Anwendung automatischer Verfahren zur Erfassung von Wurzeln in Minirhizotron-Bildern	72
<i>Application of automatic methods for the detection of roots in minirhizotron images</i>	
Maik Veste	
Intelligenter optischer Sensor für den teilflächenspezifischen Herbizideinsatz im Online-Verfahren (H-Sensor)	79
<i>Smart vision sensor for site-specific herbicide spraying in real-time operation (H-Sensor)</i>	
Hagen F. Piotraschke	
Breeding by Design™: Sensorbasierte Phänotypisierung für eine Kaskadennutzung von Triticale unter Low-Input-Bedingungen	83
<i>Breeding by Design™: Sensor based phenotyping for a cascade use of energy Triticale under low-input conditions</i>	
Kim Möller, Katharina V. Alheit, Lucas Busemeyer, Volker Hahn, Andreas Linz, Hans Peter Maurer, Daniel Mentrup, Florian Rahe, Arno Ruckelshausen, Elmar A. Weissmann, Tobias Würschum, Jochen C. Reif	
Bodengestützte Erfassung räumlich hochaufgelöster Hyperspektraldaten. Das Penta-Spek System	86
<i>Acquisition of high resolution ground-based hyperspectral data. The Penta-Spek System</i>	
Holger Lilienthal, Ewald Schnug	
Die Erfassung organischen Kohlenstoffs des Oberbodens mittels Hyperspektraldaten	94
<i>Detection of top soil organic carbon by hyperspectral datasets</i>	
Thomas Jarmer, Holger Lilienthal, Manfred Ehlers, Pablo Rosso	
Erfahrungen mit berührungslosen Messverfahren für den Wasserversorgungszustand von Pflanzenbeständen	104
<i>Experiences with contactless measurement methods for the crop water state of agricultural crops</i>	
Martin Kraft, Siegfried Schittenhelm, Klaus-Peter Wittich	
Ocean Optics	115
Teilnehmerliste am 4. Mai 2010 in Braunschweig	116
In der Reihe Bornimer Agrartechnische Berichte	120
sind bisher erschienen:	

Grußwort

Die Leistungsfähigkeit und Wettbewerbsfähigkeit der heutigen landwirtschaftlichen Produktion basiert zu einem wesentlichen Teil auf dem hohen Stand der landtechnischen Mechanisierung. Die Landtechnik der Zukunft wird von einer zunehmenden Automatisierung gekennzeichnet sein. Dies gilt sowohl für die Tier- als auch für die Pflanzenproduktion.

Automatisierung erfordert die automatische Messung und Bewertung unterschiedlichster Größen im Stall und auf dem Feld. Solche Messungen sollen bevorzugt berührungs- und zerstörungsfrei erfolgen. In der Landwirtschaft wie auch im Gartenbau müssen biologische Objekte unter teils widrigen Bedingungen gemessen werden. Für viele Mess- und Automatisierungsaufgaben sowie für viele Fragestellungen der Züchtung und Agrarforschung gibt es heute noch keine geeigneten automatischen Messverfahren.

Im vorliegenden Tagungsband werden aktuelle wissenschaftliche Entwicklungslinien und Projekte vorgestellt, welche Grundlagen für die Messverfahren von morgen und für die Anwendungen von übermorgen sein können.

Der Band dokumentiert die Arbeit des 16. Workshops Computer-Bildanalyse am 4. Mai 2010 im Johann Heinrich von Thünen-Institut in Braunschweig. Nachdem der 15. Workshop 2009 gemeinsam mit der CIGR-Arbeitsgruppe Image Analysis for Agricultural Processes and Products veranstaltet wurde, fand der 16. Workshop wieder in der traditionellen Form und in deutscher Sprache statt. Unter den knapp 30 Teilnehmern waren auch mehrere Vertreter der landtechnischen Industrie und unterstrichen mit ihrer Teilnahme das Interesse der Industrie an den Ergebnissen der Wissenschaft.

Beispielhaft für das Fachgebiet wie auch für die Serie des Workshops Computer-Bildanalyse in der Landwirtschaft sei die Anwendung Unkrautbekämpfung anhand Unkraut erkennender optischer Sensoren erwähnt: Das Problem der automatischen Unkrauterkenennung und -bekämpfung durchzieht die Workshop-Serie seit vielen Jahren. Auf dem aktuellen Workshop demonstrierte ein Dienstleistungsunternehmen seine Anstrengungen, die automatische Unkrauterkenennung in einem System zur teilflächenspezifischen Herbizidanwendung zur Anwendungsreife zu führen. Ein Vortrag aus der Wissenschaft zeigte die Perspektiven der Zerstörung von Unkrautpflanzen mit Hilfe von Laserlicht auf. Beide Beiträge verdeutlichten, dass sowohl auf der Sensorseite als auch auf der aktorischen Seite der automatischen Unkrautbekämpfung noch ein erheblicher Forschungs- und Entwicklungsbedarf besteht.

Ein weiterer Schwerpunkt des Workshops waren Modellierungs- und Messverfahren, welche in erster Linie für die Pflanzenzüchtung und das pflanzenbauliche Versuchs- und Beratungswesen interessant sind. Diese Bereiche waren dieses Mal anwenderseitig kaum im Teilnehmerkreis vertreten. Den potenziellen Anwendern aus der Züchtung und dem Versuchs- und Beratungswesen möchten wir die kommenden Workshops Computer-Bildanalyse in der Landwirtschaft besonders empfehlen.

Nur ein einziger Beitrag befasste sich mit dem hoch interessanten Gebiet des Monitorings der Tiergesundheit in der Tierhaltung. Auch hier können die zukünftigen Workshops den einschlägigen Forschungsgruppen als attraktive wissenschaftliche Plattform für Messverfahren in den Bereichen Tiergesundheit, Tierverhalten und Tierphysiologie sehr empfohlen werden.

Der vorliegende Tagungsband erscheint in bewährter Weise in der Reihe „Bornimer Agrartechnische Berichte“ des Leibniz-Instituts für Agrartechnik, Potsdam-Bornim. Gleichzeitig tragen wir erstmals dem zunehmenden Bedürfnis Rechnung, die Beiträge dauerhaft und mit einem zitierfähigen URL im Internet direkt zur Verfügung zu stellen.

Wir danken dem Johann Heinrich von Thünen-Institut, dem Leibniz-Institut für Agrartechnik, der der Staatsbibliothek und allen mitwirkenden Personen für die Unterstützung bei der Veranstaltung des Workshops und bei der Erstellung und Veröffentlichung des Tagungsbands.

Braunschweig und Potsdam-Bornim im Juli 2010



Martin Kraft



Prof. Dr. Manuela Zude

Phänotypisierung von *Arabidopsis thaliana* mit GROWSCREEN FLUORO

Phenotyping of Arabidopsis thaliana with GROWSCREEN FLUORO

Marcus Jansen, Frank Gilmer, Bernhard Biskup, Uwe Rascher, Silvia Braun, Georg Dreissen, Andreas Fischbach, Achim Walter, Hanno Scharr, Ulrich Schurr

Forschungszentrum Jülich GmbH, Institut für Chemie und Dynamik der Geosphäre, ICG-3: Phytosphäre, Wilhelm-Johnen-Straße, 52428 Jülich, Germany

E-mail: M.Jansen@FZ-Juelich.de

Kurzfassung: In Land- und Gartenbau sowie in der Natur sind Pflanzen Umweltfaktoren ausgesetzt, die Stress verursachen können. Das Genom einer Pflanze und die Umweltfaktoren haben Auswirkungen auf den Phänotyp der Pflanze. Stresstolerante Nutzpflanzen sind daher ein zentrales Züchtungsziel. Die Pflanzenphänotypisierung benötigt Sensoren, die mit hoher Empfindlichkeit Entwicklungen von Phänotypen erfassen können. GROWSCREEN FLUORO erlaubt die Phänotypisierung von Wachstum, Morphologie und Photosynthese von *Arabidopsis thaliana* mit einem Durchsatz von 60 Pflanzen pro Stunde. Die von einem bildgebenden Chlorophyllfluorometer aufgenommenen Bilder werden per Computer analysiert. Die projizierte Blattfläche wird als Maske dargestellt. Innerhalb der Maske werden die Fluoreszenzparameter räumlich aufgelöst erfasst. Sie werden als integrierte Zahlenwerte sowie als farbcodierte Bilder ausgegeben. Die Maskenbilder dienen zur Berechnung morphologischer Faktoren. Die Analyse von Umwelteinflüssen auf Pflanzenpopulationen und der Vergleich von Linien mit unterschiedlichen genetischen Eigenschaften sind mit dieser Methode möglich, so dass ökophysiologische Fragen der Grundlagenforschung untersucht werden können. In der Züchtung können im *Arabidopsis*-Modell Screenings von genetischen Linien (Mutanten oder Transgene) durchgeführt werden, um eine Vorauswahl für die Entwicklung verbesserter Nutzpflanzenlinien zu treffen.

Deskriptoren: Phänotypisierung, *Arabidopsis thaliana*, Chlorophyllfluoreszenz, Bildverarbeitung, Grundlagenforschung, Züchtungsforschung

Summary: *In agri- and horticulture as well as in nature plants are exposed to environmental factors that may cause stress. Both, the genome of a plant and the environmental factors, have impact on the phenotype of a plant. Therefore, stress tolerant crop plants are a central aim of breeding. Plant phenotyping needs sensors that can capture developments of phenotypes with high sensitivity. GROWSCREEN FLUORO enables*

phenotyping of Arabidopsis thaliana growth, morphology and photosynthesis at a throughput of 60 plants per hour. Images acquired by an imaging chlorophyll fluorometer are analysed with a computer. The projected leaf area is shown as a mask image. Within the mask, fluorescence parameters are captured with spatial resolution. They are displayed as integrated numerical values and colour-coded images. Furthermore, the mask images serve to calculate morphological factors. With this method, it is possible to analyse the impact of environmental factors on plant populations and to compare lines with different genetic properties. This allows the analysis of ecophysiological questions in basic research. In plant breeding, it is possible to do screenings of genetic lines (mutants or transgenics) in the Arabidopsis-model as a pre-selection in the process of the development of improved crop plant lines.

Keywords: *Phenotyping, Arabidopsis thaliana, chlorophyll fluorescence, image analysis, basic research, breeding research*

1 Das Jülich Plant Phenotyping Centre (JPPC)

Das JPPC ist Teil des Instituts für Chemie und Dynamik der Geosphäre, ICG-3 – Phytosphäre. Es bündelt die Phänotypisierungsaktivitäten der Forschungsbereiche Ökosystem-Dynamik, Transport, Wachstum und Metabolismus sowie Enabling Technologies. In JPPC werden diverse wissenschaftliche und technische Fachrichtungen kombiniert und auf die Pflanzenbiologie ausgerichtet. Hierzu zählen Mathematik, Bildverarbeitung, Computerwissenschaften, Ingenieurwissenschaften, Gartenbau, Chemie, Biochemie, Molekularbiologie, Physik und Robotik. Diese Werkzeuge werden genutzt, um pflanzliche Phänotypen zu analysieren. Das Phänotypisierungsdreieck beschreibt das Zusammenspiel von pflanzlichem Genom, der Umwelt und den zur Phänotypisierung eingesetzten Sensoren. Der Phänotyp einer Pflanze umfasst die Dynamik ihrer Morphologie und Physiologie und unterliegt genetischen Einflüssen und Umwelteinflüssen. Das Genom beschreibt das Potential, das die Pflanze hat, während die Umwelt die Rahmenbedingungen stellt, in der die Pflanze ihr Potential entfalten kann. Geeignete Sensoren müssen in der Lage sein, die dynamischen Entwicklungen zu erfassen, ohne dass sie selbst zu Umweltfaktoren werden, weshalb in JPPC möglichst nicht-invasive Sensoren genutzt werden. Die Phänotypisierungsaktivitäten des JPPC umfassen Modellsysteme für Grundlagenforschung und Methoden zur Verbesserung der Pflanzenzüchtung. Es werden Untersuchungen zur Stresstoleranz und Ressourcen-Nutzungseffizienz durchgeführt. Dabei werden Einzelpflanzen detailliert analysiert („deep phenotyping“) und große Populationen mit automatisierten Systemen untersucht. Detailanalysen zeigen z.B. Wachstums- oder Transportvorgänge mit hoher zeitlicher und räumlicher Auflösung. Es können Tagesgänge in einzelnen Organen untersucht werden, wodurch Informationen über die Organfunktion an sich gewonnen werden können, aber auch Vergleiche zwischen Pflanzenlinien oder Pflanzen in verschiedenen Umweltsituationen

möglich sind. Bei den automatisierten Screeninganlagen wird ein hoher Pflanzendurchsatz erreicht, so dass Populationen, die sich genetisch unterscheiden, oder in verschiedenen Umweltszenarien kultiviert werden, verglichen werden können.

2 Phänotypisierung von *Arabidopsis thaliana* mit GROWSCREEN FLUORO

GROWSCREEN FLUORO ist ein Gerät zur Messung von Photosynthese, Wachstum und Morphologie von *Arabidopsis thaliana* (JANSEN *et al.* 2009). Es besteht aus einem bildgebenden Chlorophyllfluorometer (Maxi-PAM, Walz GmbH), das mit Verschiebetischen von einer Pflanze zur nächsten transportiert wird. Das Gerät ist in eine Kiste eingebaut, die sowohl durch einen Vorhang verdunkelt, als auch mit LED-Paneelen beleuchtet werden kann. Hierdurch sind Messungen an dunkel- oder lichtadaptierten Pflanzen möglich. Bei jeder Aufnahme startet die in Jülich entwickelte Steuersoftware die Fluorometer-Software der Fa. Walz und fragt nach der Aufnahme die gemessenen Werte aus der Fluorometer-Software ab. Die Werte werden anschließend analysiert, wobei zunächst ein Maskenbild erstellt wird, indem mittels Schwellenwerten die fluoreszierenden Pixel von den Hintergrund-Pixeln getrennt werden. Die Anzahl der Pixel in der Maske stellt die projizierte Blattfläche dar, die zur Berechnung des Pflanzenwachstums verwendet wird. Innerhalb dieser Maske werden die Fluoreszenzwerte für jeden Pixel berechnet und farbcodiert dargestellt. Über die Fläche integrierte Chlorophyllfluoreszenzdaten werden als Zahlenwerte ausgegeben. Die Maskenbilder werden mit Hilfe von Algorithmen analysiert, um so morphologische Werte der Pflanze zu berechnen. Diese umfassen die Umfanglinie der Pflanze, ihre konvexe Hülle, sowie lokale Schwerpunkte, die zur Bestimmung der Blattzahl genutzt werden. Die berechneten Werte stellen die Flächenbedeckung, den Durchmesser, die Blattzahl und Verhältnisse der Blattfläche zur Umfanglinie dar, so dass die Kompaktheit der Pflanze quantifiziert wird. Bei jeder Messung werden somit zahlreiche Daten für jede Pflanze aufgenommen. Bei einem Durchsatz von 60 Pflanzen pro Stunde kann ein Überblick über Pflanzenpopulationen gewonnen werden. Aufeinanderfolgende Messungen von Populationen ermöglichen die Aufnahme von Zeitreihen für jedes Individuum der Population. Als Weiterentwicklung des Einzelplatzaufbaus wurden GROWSCREEN FLUORO Geräte in Klimakammern integriert, wo die Pflanzen mittels Transportrobotern zu den Messplätzen gebracht werden.

3 Phänotypisierungsexperimente mit GROWSCREEN FLUORO

Anhand von einigen Beispielen wird gezeigt, wie GROWSCREEN FLUORO eingesetzt werden kann. Einsatzgebiete sind Phänotypisierung von Pflanzen mit verschiedenen genetischen Eigenschaften, unter Trocken- und Kältestress, bei verschiedenen Be-

leuchtungs- und Bewässerungssituationen, in unterschiedlichen Kultursubstraten und bei Behandlung mit Chemikalien.

In einer Studie zur Verbesserung der Toleranz von Pflanzen gegen abiotischen Stress wurde ein PARP-silencing vorgenommen. PARP ist ein Kern-lokalisiertes Protein, das an DNA-Synthese und Reparatur beteiligt ist (SATOY *et al.* 1994, SCHREIBER *et al.* 2006) und in Stress-Situationen verstärkt aktiviert wird, wobei der Energieverbrauch der Pflanze stark steigt (RONGVAUX *et al.* 2003). PARP-silencing verbessert die Energie-Homöostase und steigert die Stresstoleranz (DE BLOCK *et al.* 2005, VANDERAUWERA *et al.* 2007). Die gesteigerte Trockenstresstoleranz der transgenen Pflanzen mit verminderter PARP-Produktion wurde phänotypisch analysiert (JANSEN *et al.* 2009). Hierzu wurden Pflanzen, die in austrocknender Erde wuchsen, mit gut gewässerten Pflanzen verglichen. Während einer Evaluierungsphase wurden die Wachstumsraten der gestressten Pflanzen ins Verhältnis zu denen der nicht gestressten Pflanzen gesetzt. Die trockengestressten transgenen Pflanzen hatten eine deutlich gesteigerte Wachstumsleistung im Vergleich zu den nicht transgenen Pflanzen. Die durch PARP-silencing vermittelte Stresstoleranz resultierte in einer verbesserten Leistungsfähigkeit im Trockenstress.

Pflanzen können allelopathische Monoterpene emittieren, die Phänotypen benachbarter Pflanzen modulieren können. Beispielsweise bewirkt Campher Veränderungen in der Wachsschicht auf *A. thaliana*-Blättern und steigert die Transpiration (SCHULZ *et al.* 2007). Durch GROWSCREEN FLUORO-Messungen von Campher-behandelten *A. thaliana* Pflanzen wurde analysiert, ob die Behandlung auch Wachstum, Morphologie und Photosynthese beeinflussen kann. Es zeigte sich, dass bei der verwendeten Campher-Menge Wachstum und Photosyntheseleistung vermindert wurden. Die behandelten Pflanzen wuchsen deutlich kompakter als die nicht behandelten und wiesen eine exzentrische Form auf (KRIEGS *et al.* in press).

Darüber hinaus wurde GROWSCREEN FLUORO zur Analyse von natürlicher Variabilität in *A. thaliana* Phänotypen und von Phänotypen unter variablen Klima- und Bewässerungsbedingungen in Klimakammern eingesetzt.

4 Phänotypisierungssysteme, die auf Bildverarbeitung basieren

Ein weiteres System, das auf Bildverarbeitung basiert, ist GROWSCREEN ROOT, womit bei Pflanzen, die in Agar-gefüllten Petrischalen wachsen, das Wurzelsystem analysiert werden kann. Aus den Fotoaufnahmen der Wurzeln werden die Länge der Haupt- und Seitenwurzeln sowie die Verzweigungswinkel vermessen (NAGEL *et al.* 2009). GROWMAP-Techniken basieren ebenfalls auf der Bildverarbeitung und dienen der detaillierten Untersuchung von einzelnen Pflanzen bzw. Organen. GROWMAP LEAF analysiert das Wachstum von Blättern mittels DISP (digital image sequence analysis) im

Tagesgang. Aus den Bildern kann außerdem die räumliche Verteilung der Wachstumszonen innerhalb der Blattfläche bestimmt werden (WIESE *et al.* 2007). GROWMAP ROOT führt entsprechende Vermessungen in der Wurzel aus, so dass Tagesgänge und räumliche Verteilungen des Wachstums bestimmt werden können (WALTER *et al.* 2002).

Die Phänotypisierung von Nutzpflanzen wird mit einer Bildaufnahme-Station durchgeführt, die in ein Gewächshaus integriert ist. Die Pflanzen werden mit einem computer-gesteuerten Kran zur Aufnahmestation transportiert und dort fotografiert, thermografiert und gewogen. Die Aufnahmen werden danach per Computer ausgewertet. Ein automatisiertes Screeningsystem zur präzisen Positionierung nicht-invasiver Sensoren im Freiland erlaubt die Phänotypisierung von Pflanzen in Kleinparzellen. In diesen Parzellen können ökologische Fragestellungen untersucht werden, aber auch Versuche mit Nutzpflanzen gemacht werden.

Mit den vielfältigen technischen Möglichkeiten ist das Jülich Plant Phenotyping Centre in verschiedene Forschungsverbünde (Cropsense, GABI, Promics) ein gebunden und kooperiert mit akademischen und industriellen Partnern.

Literatur

- DE BLOCK M., VERDUYN C., DE BROUWER D., CORNELISSEN M. (2005):** Poly(ADP-ribose) polymerase in plants affects energy homeostasis, cell death and stress tolerance. *Plant Journal* 41: 95-106
- JANSEN M., GILMER F., BISKUP B., NAGEL K.A., RASCHER U., FISCHBACH A., BRIEM S., DREISSEN G., TITTMANN S., BRAUN S., DE JAEGER I., METZLAFF M., SCHURR U., SCHARR H., WALTER A. (2009):** Simultaneous phenotyping of leaf growth and chlorophyll fluorescence via GROWSCREEN FLUORO allows detection of stress tolerance in *Arabidopsis thaliana* and other rosette plants. *Functional Plant Biology* 36: 902-914
- KRIEGS B., JANSEN M., HAHN K., PEISKER H., SAMAJOVA O., BECK M., BRAUN S., ULBRICH A., BALUSKA F., SCHULZ M. (in press):** Cyclic Monoterpene Mediated Modulations of *Arabidopsis thaliana* Phenotype: Effects on the Cytoskeleton and on the Expression of Selected Genes. *Plant Signal Behav*
- NAGEL K.A., KASTENHOLZ B., JAHNKE S., VAN DUSSCHOTEN D., AACH T., MUHLICH M., TRUHN D., SCHARR H., TERJUNG S., WALTER A., SCHURR U. (2009):** Temperature responses of roots: impact on growth, root system architecture and implications for phenotyping. *Functional Plant Biology* 36: 947-959
- RONGVAUX A., ANDRIS F., VAN GOOL F., LEO O. (2003):** Reconstructing eukaryotic NAD metabolism. *Bioessays* 25: 683-690
- SATOH M.S., POIRIER G.G., LINDAHL T. (1994):** Dual Function for Poly(Adp-Ribose) Synthesis in Response to Dna Strand Breakage. *Biochemistry* 33: 7099-7106
- SCHREIBER V., DANTZER F., AME J.C., DE MURCIA G. (2006):** Poly(ADP-ribose): novel functions for an old molecule. *Nature Reviews Molecular Cell Biology* 7: 517-528

SCHULZ M., KUSSMANN P., KNOP M., KRIEGS B., GRESENS F., EICHERT T., ULBRICH A., MARX F., FABRICIUS H., GOLDBACH H., NOGA G. (2007): Allelopathic Monoterpenes Interfere with *Arabidopsis thaliana* Cuticular Waxes and Enhance Transpiration. *Plant Signal Behav* 2: 231-9

VANDERAUWERA S., DE BLOCK M., VAN DE STEENE N., VAN DE COTTE B., METZLAFF M., VAN BREUSEGEM F. (2007): Silencing of poly(ADP-ribose) polymerase in plants alters abiotic stress signal transduction. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 104: 15150-15155

WALTER A., SPIES H., TERJUNG S., KUSTERS R., KIRCHGESSNER N., SCHURR U. (2002): Spatio-temporal dynamics of expansion growth in roots: automatic quantification of diurnal course and temperature response by digital image sequence processing. *Journal of Experimental Botany* 53: 689-698

WIESE A., CHRIST M.M., VIRNICH O., SCHURR U., WALTER A. (2007): Spatio-temporal leaf growth patterns of *Arabidopsis thaliana* and evidence for sugar control of the diel leaf growth cycle. *New Phytologist* 174: 752-761

Biomass estimation from images for greenhouse experiments

Schätzung der Biomasse im Gewächshausversuch mit Hilfe der Bildverarbeitung

Martina Keller, Martin Weis, Roland Gerhards

*Department of Weed Science, University of Hohenheim, 70593 Stuttgart, Germany
E-mail: Martina.Keller@uni-hohenheim.de, Martin.Weis@uni-hohenheim.de,
Roland.Gerhards@uni-hohenheim.de,*

Abstract: Chemical weed control is a common practise in agriculture. A reduction of the amount of herbicides can be achieved using site-specific applications. To develop models for an optimized herbicide use on a sub-field level, dose-response relations between herbicides and weed species need to be derived. Whole-plant bioassays were conducted in the greenhouse with several weed species to determine the response to different herbicides. The tested herbicides were applied at different rates and the response was measured. Above-ground dry matter is usually measured at the end of such experiments to quantify the overall effect of the herbicides on plant growth. In our experiments, additionally red and infrared images of the plants were taken before harvest. From difference images, generated by subtracting red from infrared channel, the coverage of the green/photosynthetically active plant parts could be calculated using image processing techniques. Coverage was correlated with the dry matter values, resulting in significant correlations. Dose-response curves were fitted to the measured dry matter and coverage. The conducted experiments confirm that this technique can be used to sample data for bioassays and dose-response experiments. Such automation eases bioassay experiments compared to classical dry matter measurements.

Keywords: Image processing, bioassay, dry matter, bi-spectral images, greenhouse experiments

Kurzfassung: Chemische Unkrautkontrolle ist gängige Praxis in der Landwirtschaft. Eine Reduktion der Herbizidaufwandmengen kann mittels teilschlagspezifischer Ausbringung erreicht werden. Um Modelle für den optimierten Einsatz von Herbiziden auf Teilschlägen zu entwickeln, müssen die Dosis-Wirkungsbeziehungen zwischen Herbiziden und Unkräutern bekannt sein. Biotests wurden mit verschiedenen Unkrautarten im Gewächshaus durchgeführt, um diese Dosis-Wirkungs-Beziehungen zu bestimmen. In den Versuchen wurden Herbizide in unterschiedlichen Konzentrationen appliziert und ihre Wirkung gemessen. Die oberirdische Trockenmasse der Versuchspflanzen wird normalerweise bei Versuchsende bestimmt, um die Wirkung der verschiedenen

Herbiziddosen auf die Pflanzenwachstum zu bestimmen. Bei unseren Versuchen wurden zusätzlich Rot- und Infrarotbilder von den Pflanzen kurz vor dem Trockenmasseschnitt des Versuchs gemacht. Anhand von Differenzbildern, die aus der Subtraktion von Infrarot- und Rotkanal errechnet wurden, konnten mit Bildanalysetechniken die Bedeckungswerte der grünen/photosynthetisch aktiven Pflanzenteile bestimmt werden. Die berechneten Bedeckungswerte korrelierten signifikant mit den gemessenen Trockenmassen. Dosis-Wirkungs-Kurven wurden aus der gemessenen Trockenmasse und Bedeckung bestimmt. Die durchgeführten Versuche bestätigen, dass das hier vorgestellte Verfahren für Biotests zur Bestimmung von Dosis-Wirkungs-Kurven geeignet ist. Eine Automatisierung vereinfacht Biotests gegenüber der klassischen Trockenmassebestimmung.

Deskriptoren: Bildanalyseverfahren, Biotest, Trockenmasse, bispektrale Bilder, Gewächshausexperimente

1 Introduction

Weeds cause considerable yield losses in agricultural production. The application of herbicides to control weeds is the most common practice. In integrated plant protection thresholds were defined for the number of tolerable weeds, allowing to spray only, if these thresholds are exceeded (COBLE & MORTENSEN 1992). This approach does not take into account the heterogeneity of weed distribution within fields, if these thresholds are applied to an average weed infestation measure of a field. Since the herbicides are uniformly applied across a whole field, but the weeds are non-uniformly distributed, there are considerable amounts of herbicide savings possible (OEBEL 2006). Such an approach requires to measure the varying weed infestation within the field to adapt the treatment according to a decision component. The former is tackled by automated weed detection systems (BROWN & NOBLE 2005, WEIS & SÖKEFELD 2009), the latter is subject to weed-crop interaction research. A system to measure the weed infestation was developed (WEIS & GERHARDS 2007, 2009). It computes the number of crop and weed plants as well as the coverage of each species. The decision component relies on the information about the actual weed infestation and will use a model to derive the type and quantities of herbicides, which should be applied. The latter issue, which quantities of herbicides should be applied, could be addressed by dose-response experiments as proposed by GUTJAHR & GERHARDS (2009). In dose-response experiments different doses of herbicides are applied and the plant response is measured (STREIBIG 1988). Response is often measured as fresh or dry weight absolute or relative to control plants and visual rating as summarized by KNEZEVIC *et al.* (2007). Dry matter was claimed to be the most objective measure for herbicide dose-response curves as it is a reliable indicator for plant growth. With these experiments the effective or necessary dose for an effective treatment can be estimated (STREIBIG 1988, KNEZEVIC *et al.* 2007). Because the coverage will be used to estimate yield loss in the field, the relationship between coverage and biomass and the suitability of coverage estimates for dose-response

experiments was analysed. In addition, if the correlation is high and significant, the results from previously published dose-response experiments can be used for modelling, even if these are based on dry matter measurements. Therefore, the aim of this work was to determine the correlation between biomass estimated as dry matter of various weeds and their coverage determined by bi-spectral cameras in the greenhouse. Furthermore, dose-response curves were fitted to a selected dataset and the estimated parameters were compared.

2 Materials and methods

2.1 Bioassays, experimental setup

Bioassay experiments were conducted in the greenhouse under controlled growing conditions. Seeds of *Alopecurus myosuroides* Huds. (ALOMY), *Echinochloa crus-galli* (L.) P.Beauv. (ECHCG) and *Galium aparine* L. (GALAP) were germinated in vermiculite. Seedlings were transplanted to 8x8 cm Jiffy pots filled with a mixture of silt, sand and compost soil by 3:1:2 parts of each. Plant density was two plants per cavity for ALOMY and ECHCG. For GALAP plant density varied depending on the experiment and was two or four plants per cavity. Growing conditions were for ECHCG: 25/20°C and 12/12 hours day/night respectively. For ALOMY and GALAP: 20/10°C and 14/10 hours day/night respectively. The grown weeds were part of regularly executed dose-response experiments. For GALAP four repetitions per dose were set up, whereas for ALOMY and ECHCG the experiments were preliminary range finding tests and thus only one replicate per dose was realized. Weeds were sprayed earliest two weeks after transplantation with different herbicides, their dose was varied between an 8-fold and $\frac{1}{256}$ -fold dose registered for field use. Unsprayed control plants were included in the experiments. The dose range was chosen to cover plant reaction from unaffected to completely dead.

At the end of the experiment images of the plants were taken with the bi-spectral camera and above ground plant parts were harvested and plant coverage was calculated from the images. Harvested plant parts were dried at 80°C for two days and dry matter was recorded as a measure of biomass.

2.2 Imaging principle and processing

Bi-spectral cameras were used to measure the coverage of each plant before treatment and at the end of the experiments. Two images were taken: one of the red, the other of the infrared spectrum of the light (in **Figure 1**: left two images). Since the living plant parts absorb red light for the photosynthesis, these appear dark in the red image. The material of the background and dead plant parts reflect the light in both red and infrared

spectrum. These images can be subtracted from each other, resulting in a difference image with bright plant parts and dark background. A gray level threshold can be used to generate a binary image, segmenting foreground (white, plant) and background (black) as shown in **Figure 1** (right). This image is used to determine the coverage area from the number of white pixels multiplied by the size of one pixel on the ground (0.25 mm^2 per pixel).

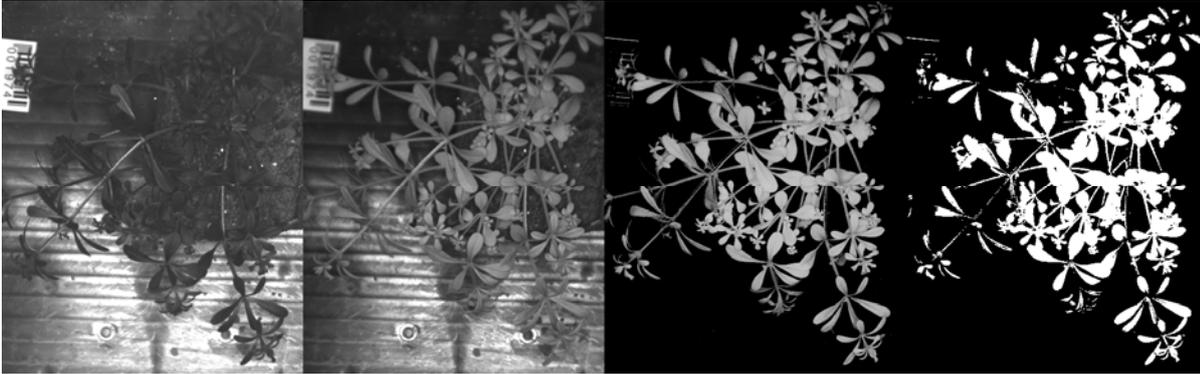


Figure 1: Red, infrared, difference and thresholded image. The coverage was derived from the number of white pixels of the thresholded image

2.3 Statistical analysis

Linear regression between dry matter and coverage was calculated using function `lm` of the statistics software R (R DEVELOPMENT CORE TEAM 2008). Correlation was calculated for each species and each experiment separately. The regression was forced through the origin and R^2 was calculated as a measure of correctness for the linear model. The relationship between dose and dry matter and dry matter estimated by coverage through linear regression was modeled by a four-parameter log-logistic function, given in equation 1 for one experiment with GALAP.

$$Y = C + \frac{D - C}{1 + e^{b(\ln(z) - \ln(ED_{50}))}} \quad (1)$$

z in equation 1 is the input variable (dose) and Y the resulting response, D denotes the response of the untreated control (upper limit), C the response at an infinite high dose (lower limit). ED_{50} corresponds to the dose at which 50% response is observed. Parameter b is the relative slope around ED_{50} (STREIBIG *et al.* 1993, KNEZEVIC *et al.* 2007). The applied herbicide was Artus (Carfentrazone Ethyl and Metsulfuron Methyl), with a recommended dose of 50 g/ha. The model was fitted to the data set using R with the add-on package `drc` (RITZ & STREIBIG 2005). The model was fitted to the data set using R with the add-on package `drc` RITZ & STREIBIG (2005). Before fitting, the different doses were tested for significance on response using a standard ANOVA (analysis of variance) procedure. Parameter C was excluded (set to zero), if it was not significantly different from 0.

3 Results

Bi-spectral images were of high quality and segmentation could be easily performed (Figure 1).

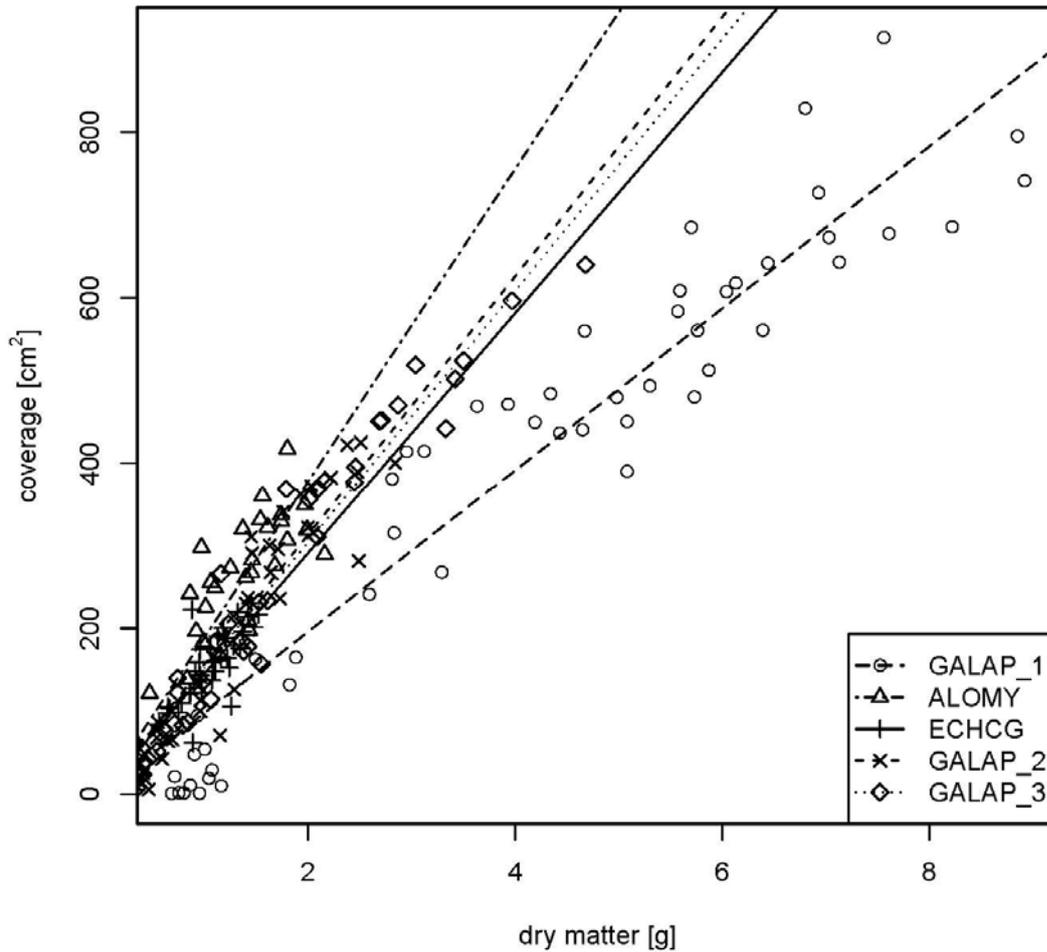


Figure 2: Linear regression for the three tested weeds. GALAP: *Galium aparine*, ALOMY: *Alopecurus myosuroides*, ECHCG: *Echinochloa crus-galli*

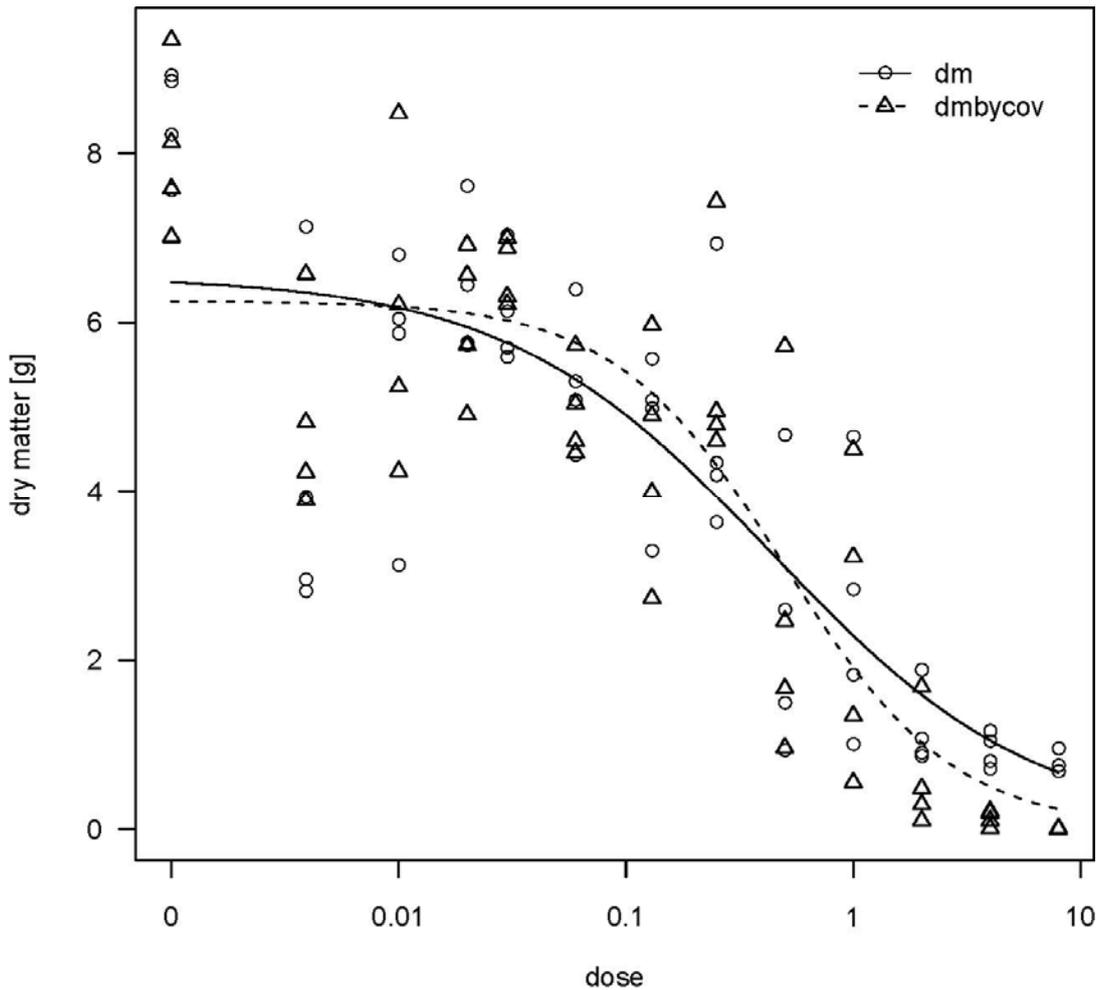


Figure 3: Dose-response curve for GALAP treated with Carfentrazone Ethyl and Metsulfuron Methyl with dry matter (dm) as response and dry matter estimated by coverage (dmbycov) as response. Dose relative to recommended field dose

Individual regressions for every experiment were highly significant and resulted in following R^2 : ALOMY (0.96), ECHCG (0.96), GALAP_1 (0.97), GALAP_2 (0.96) and GALAP_3 (0.98). GALAP_1 to GALAP_3 were different experiments so different herbicides were applied. The estimated slopes varied between 97.9 (GALAP_1) and 188.9 (ALOMY). The differences were well in accordance with the growth habit of the different weeds: GALAP_1 had very thick, packed branches and leaves whereas ALOMY exhibited a typical grass growth habit. ECHCG was already in the generative phase at the end of the experiment and some plants were rather high (up to 45 cm plant height). Thus the good correlation was somewhat surprising. In **Figure 2** one can note that the linear regressions tend to overestimate coverage at the very low range and the very high range of dry matter which was also confirmed by the model checking plots. The former can be explained by the fact that in dose-response experiments the whole above ground plant biomass is harvested also completely dead plant material. In such cases coverage will be zero because dead plant material is not and shall not be detected by the bi-spectral cameras. The latter can be explained by increasing overlapping of leaves.

Dose-response curves were fitted for dry matter (**Figure 3**) and for dry matter estimated from coverage (**Figure 3**). For the two fitted curves all estimated parameters were highly significant (apart from parameter C) and the curves have a comparable parameterization. Estimated ED_{50} was reached at a dose of 0.42 (dry matter) and 0.49 (dry matter estimated by coverage), parameter D was very similar for both dry matter (6.25) and dry matter estimated from coverage (6.57). The slope (b) of the two curves differed: 0.73 (dry matter) and 1.16 (dry matter estimated by coverage), leading to different estimates for the ED_{50} values (90% response): 8.52 (dry matter) and 3.29 (dry matter estimated by coverage). Nevertheless the estimated parameters were not significantly different between the curves. The high ED_{50} is not surprising as the tested herbicide is only partially effective against GALAP (GEHRING & THYSSEN 2005).

4 Conclusion

The results showed good correlations between biomass and coverage determined by our bi-spectral cameras for important weed species. The fitted curves with dry matter as response and dry matter estimated by coverage were similar. For the modelling this means that published dose-response relationships can be used, as they are found in the literature parametrised with dry matter measures. A big advantage of determining coverage is the fact that it is a non-destructive sampling method. Thus, it could potentially replace dry matter sampling in dose-response experiments. Another option is to use cameras to monitor the plant reaction to herbicides during dose-response experiments. A big problem in dose-response experiments is often the variability between single weed plants. To monitor individual plants and to correct for variation present before spraying, both could increase the power of such experiments. In addition the cameras can be easily handled and coverage calculation is straight forward, allowing to automate the dry matter estimation and plant growth measurement during the experiment.

Acknowledgements This work was partially funded by: Carl Zeiss Foundation and BLE (Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung).

References

- BROWN R., NOBLE S. (2005):** Site-specific weed management: sensing requirements – what do we need to see? *Weed Science*, 53(2), pp. 252–258
- COBLE H., MORTENSEN D. (1992):** The threshold concept and its application to weed science. *Weed Technology*, pp. 191–195

- GEHRING K., THYSSEN S. (2005):** Wirkungspotential verschiedener Getreideherbizide gegenüber Klettenlabkraut
- GUTJAHR C., GERHARDS R. (2009):** Precision Crop Protection, chapter Decision rules for site-specific weed management. In Oerke et al. (2009). in press
- KNEZEVIC S.Z., STREIBIG J.C., RITZ C. (2007):** Utilizing r software package for dose-response studies: The concept and data analysis. *Weed Technology*, 21(3), pp. 840–848
- OEBEL H. (2006):** Teilschlagspezifische Unkrautbekämpfung durch raumbezogene Bildverarbeitung im Offline- und (Online-) Verfahren (TURBO). PhD thesis, Universität Hohenheim, Fakultät Agrarwissenschaften
- OERKE E.-C., GERHARDS R., MENZ G., SIKORA R.A. editors, (2009):** Precision Crop Protection. Springer Verlag. in press
- R DEVELOPMENT CORE TEAM (2008):** R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. ISBN 3-900051-07-0
- RITZ C., STREIBIG J.C. (2005):** Bioassay analysis using R. *Journal of Statistical Software*, 12(5), pp. 1–22
- STAFFORD J. editor, (2007):** Precision agriculture '07, volume 6, The Netherlands. 6th European Conference on Precision Agriculture (ECPA), Wageningen Academic Publishers
- STREIBIG J., RUDEMO M., JENSEN J. (1993):** Herbicide Bioassays, chapter Dose-Response Curves and Statistical Models, pp. 29–57. CRC Press Inc.
- STREIBIG J.C. (1988):** Herbicide bioassay. *Weed Research*, 28(6), pp. 479–484
- 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 (2007), pp. 537–545
- WEIS M., GERHARDS R. (2009):** Detection of weeds using image processing and clustering. In Zude (2009), pp. 138–144. 15. Workshop Computer-Bildanalyse in der Landwirtschaft, 27–28 August 2009
- WEIS M., SÖKEFELD M. (2009):** Precision Crop Protection, chapter Detection and identification of weeds. In: Oerke et al. (2009). in press
- ZUDE M. ed., (2009):** Image Analysis for Agricultural Products and Processes, volume 69 of Bornimer Agrartechnische Berichte, Potsdam-Bornim. CIGR, ATB - Leibniz-Institut für Agrartechnik Potsdam-Bornim e.V., Leibniz Institute for Agricultural Engineering (ATB). 15. Workshop Computer-Bildanalyse in der Landwirtschaft, 27–28 August 2009

Methodik zur Untersuchung von Laserlichtwirkung auf der Basis von Bildanalysen auf juvenile Pflanzen zur Unkrautregulierung

Methodology for investigations on the effect of laser applications on juvenile plants for weed control basing on image analysis

Christian Marx^{1,2}, Thomas Rath¹, Stephan Barcikowski²

¹ Leibniz Universität Hannover, Institut für Biologische Produktionssysteme, FG Biosystem- und Gartenbautechnik, Herrenhäuser Str. 2, 30419 Hannover, Germany
E-Mail: marx@bgt.uni-hannover.de

² Laser Zentrum Hannover e.V., Hollerithallee 8, 30419 Hannover, Germany

Kurzfassung: In der vorliegenden Arbeit werden Verfahren zur Unkrautbekämpfung mit Lasern beschrieben. Wesentlicher Unterschied zu bisherigen Arbeiten ist die Fokussierung auf die Entwicklung eines Schädigungsmodells. Dabei soll grundlegend der thermische Effekt der Laserstrahlung auf Pflanzengewebe mit der Abhängigkeit von Dosis-Wirkungs-Beziehungen eruiert werden. Es werden 10 wichtige Unkräuter und -gräser unterschiedlicher Wuchsgröße in die Versuche integriert. Neben der Wahl der Laserwellenlänge, Laserstrahlkonditionierung und -positionierung ist der Prozess der Wärmeeinkopplung in das Pflanzengewebe zu beleuchten. Unter dynamischen Bedingungen (Verwackelung von Kamera- und Lasersystem) stellt sich zudem die Frage, wie groß der Laserspot gewählt und welche Treffgenauigkeit für eine effektive Behandlung im Sinne letaler Dosen erreicht werden muss.

Da das Projekt in der Startphase ist, werden zunächst die Zielsetzungen, erste Schritte sowie eine Einführung in die Methodik diskutiert.

Deskriptoren: Laser, Unkrautbekämpfung, Schädigungsmodell

Summary: *The objective of this work is a selective, automatic, thermal weed control application technique. On-board camera systems, image processing algorithms, and laser technology including necessary process controls are used as main tools. The important difference to previous experiments is the development of a laser damage model. Though, the thermal effect of laser radiation on plant tissue according to dose-response-relations should be investigated fundamentally. Ten important weeds in different growth stages are used for the experiments. Beside the choice of the laser wavelength, the necessary laser beam conditioning as well as positioning, the process of heat injection into the plant tissue is to be examined. Concerning dynamic conditions*

resulting in a blurring of camera and laser system, questions come up what laser spot size is to be selected and which accuracy is needed for an effective weed control regarding lethal doses.

As the project just started, only the objectives, first steps, and an introduction into the set-up methodology are presented here.

Keywords: laser, weed control, damage model

1 Einleitung

Nicht-chemische Unkrautbekämpfung ist wesentlicher Teil einer ökologischen und nachhaltigen Pflanzenproduktion. Diverse technische Ansätze sind derzeit bereits verfügbar. Diese können im Wesentlichen in die Bereiche mechanische (bspw. Hacken) und thermische Verfahren (bspw. Abflammen) unterteilt werden. Die Unkrautkontrolle gelingt dabei bereits sehr gut zwischen Pflanzreihen, jedoch bestehen wegen ihrer Unspezifität Probleme für Unkrautvorkommen „in der Reihe“. Hier setzt das von der DFG geförderte Projekt „Untersuchungen zur Laserlichtwirkung auf der Basis von Bildanalysen auf juvenile Pflanzen zur Unkrautregulierung“ an. Ziel ist eine selektive, automatisierte, thermische Unkrautkontrolle. Als Werkzeuge werden Kamerasysteme, Bildverarbeitungsalgorithmen und Lasertechnologie inkl. der notwendigen Prozesssteuerung eingesetzt.

Zum Einsatz von Lasertechnik in der Unkrautbekämpfung wurden bereits verschiedene Kenntnisse gesammelt. Dazu gehören Arbeiten zur Auswirkung unterschiedlicher Wellenlängen auf Gewebestrukturen (SLINEY & WOLBARSH 1980), Modellierung der Wärmeströme in Pflanzen beim Abflamm-Prozess (BERTRAM 1996, ASTATKIE 2007) sowie der Wechselwirkung von Laserstrahlung mit Pflanzengewebe zur Unkrautbekämpfung (COUCH & GANGSTADT 1974, BAYRAMIAN *et al.* 1992, 1993, HOKI 2000, HEISEL *et al.* 2001, 2002, CHRISTENSEN *et al.* 2003, LANGNER *et al.* 2006). Differenzierte Untersuchungen führten MATHIASSEN *et al.* (2006) durch. Mit einem handgeführten System bestrahlten sie mittels verschiedener Strahldurchmesser (\varnothing 0,9 bis \varnothing 2,4 mm), Wellenlängen (532 und 810 nm) und Energiedichten ($0,6$ bis $49,7 \text{ J mm}^{-2}$) die Meristeme von drei Pflanzenarten (monokotyl und dikotyl), wobei sich mehrfache Wechselwirkungen der Versuchsparameter auf die festgestellten Dosis-Wirkungs-Beziehungen zeigten. Die Laserbehandlung apikaler Meristeme zur Wuchshemmung ist demnach möglich, jedoch bisher nicht mit selektiven, optischen Methoden und automatisierter Bestrahlung umgesetzt worden. MATHIASSEN *et al.* (2006) kamen zu dem Schluss, dass letztendlich eine Optimierung von Zielgenauigkeit, Laser-spotgröße und Energiedichte den Lasereinsatz verbessert. Auch folgerten sie, dass weitere Untersuchungen und Entwicklungen notwendig sind.

Vorstudien mit zwei Lasersystemen (CO₂-Laser, $\lambda = 10.600$ nm und Diodenlaser, $\lambda = 940$ nm), einem Laserfokussdurchmesser ($\varnothing 6$ mm), zwei Pflanzenarten (dikotylen *N. tabacum* und monokotylen *E. crus-galli*), drei Wuchsstadien (BBCH 10, 12, 13) konnten den Einfluss der Versuchsparameter auf Dosis-Wirkungs-Beziehungen belegen (WÖLTJEN *et al.* 2008). Darüber hinaus konnte die notwendige elektrische Energie für eine wirksame Laserapplikation abgeschätzt werden: 565 MJ ha⁻¹. Im Vergleich dazu beträgt der Energiebedarf beim Abflammen von Unkräutern ca. 1.800 MJ ha⁻¹.

Da die notwendige Bestrahlungszeit abhängig von der verfügbaren Laserleistung ist, welche wiederum die Anschlussleistung bestimmt, sind weiterführende Untersuchungen zur Bestimmung minimaler Laserdosen bei maximaler Unkrautbekämpfungseffizienz notwendig. Daraus ergibt sich zunächst die Notwendigkeit zur Erstellung eines Schädigungsmodells. Dabei lässt sich die erforderliche Laserleistung hinsichtlich der nachhaltigen Zerstörung des Meristems optimieren und durch Anwendung auf gängige Unkräuter und –gräser verschiedener Wuchsgrößen verallgemeinern.

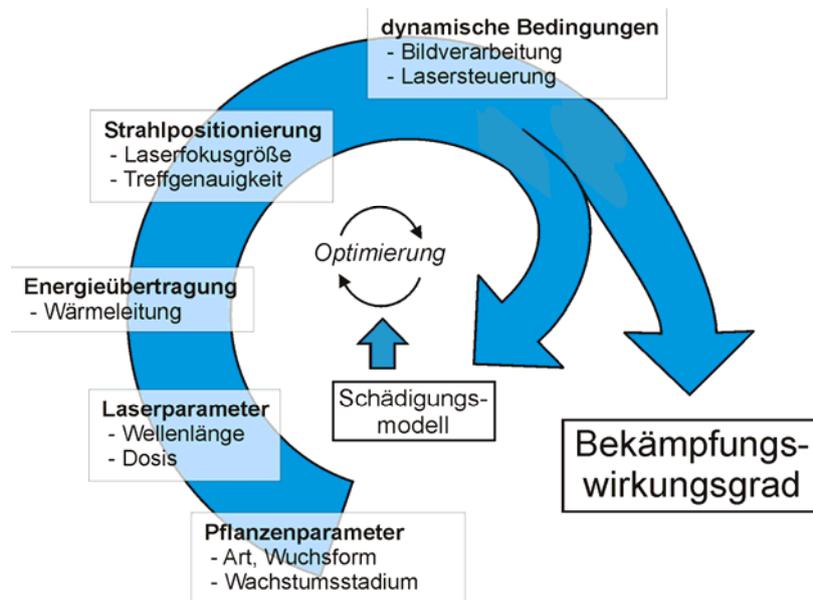


Abbildung 1: Projektschwerpunkte

In das Schädigungsmodell fließen Vorkenntnisse sowie technische und pflanzenbauliche Parameter ein. Mit der Untersuchung des Prozesses „Energieeintrag in das Pflanzenmaterial“ im Hinblick auf Wärmeleitung und wirksamer Beeinflussung des apikalen Meristems ergeben sich neben einer Wechselwirkung der Parameter auch Anforderungen bzgl. Strahlpositionier- und Treffgenauigkeit. Für die Kombination mit bildgebenden Verfahren sind diese Anforderungen entscheidend (siehe **Abbildung 1**). Grundlage der Erkennung bilden dabei spezifische Bildanalysealgorithmen, die auf einfachen Formparametern, spezifischen Transformationsverfahren und morphologischen Bildanalyseoperatoren aufbauen. Verschiedene Systeme haben mittlerweile

einen praxiseinsetzbaren Status erreicht (siehe z.B. WEIS & GERHARDTS 2007). Jedoch ist eine Adaption besonders für dynamische Bedingungen erforderlich. Dies betrifft sowohl die Erkennung der Pflanzen auf einer spezifischen Teilfläche und damit der Festlegung der Zielpositionen für die Laserapplikation sowie der Überprüfung des Behandlungsergebnisses. Besonders in Kombination mit ortsauflösenden Informationen zu Reihenabstand, Reihenorientierung und Pflanzabständen soll die spezifische, selektive Erkennung auch in der Reihe ermöglicht werden.

2 Untersuchungsmethoden und -materialien

2.1 Pflanzenmaterial und Schädigungsdokumentation

Die Erstellung des Schädigungsmodells erfolgt auf der Basis von Parameterstudien. **Abbildung 2** zeigt die zu berücksichtigenden Unkrautpflanzen. Bei der Auswahl der Pflanzen spielen das reale Unkrautvorkommen und die damit verbundene Relevanz sowie die Auswahl von Vertretern für dikotyle und monokotyle Pflanzen eine Rolle. Die besondere Widerstandsfähigkeit von Wurzelunkräutern wird durch *Cirsium arvense* und *Urtica urens* repräsentiert. Diese Unkräuter lassen sich jedoch nur schlecht durch Samen vermehren, sodass Versuche mit Wurzelabschnitten notwendig sind. Für die Untersuchungen sind Pflanzen erforderlich, die gemäß der Vielzahl der angewendeten Versuchsparameter rückverfolgbar identifiziert werden müssen. Deswegen wurde ein qualitativ- quantitatives Auswertesystem entwickelt, welches Etiketten und Unkräuter mit entsprechender Schädigungswirkung bis zur destruktiven Frisch- und Trockenmassenbestimmung bildanalytisch erfasst (siehe **Abbildung 3**).

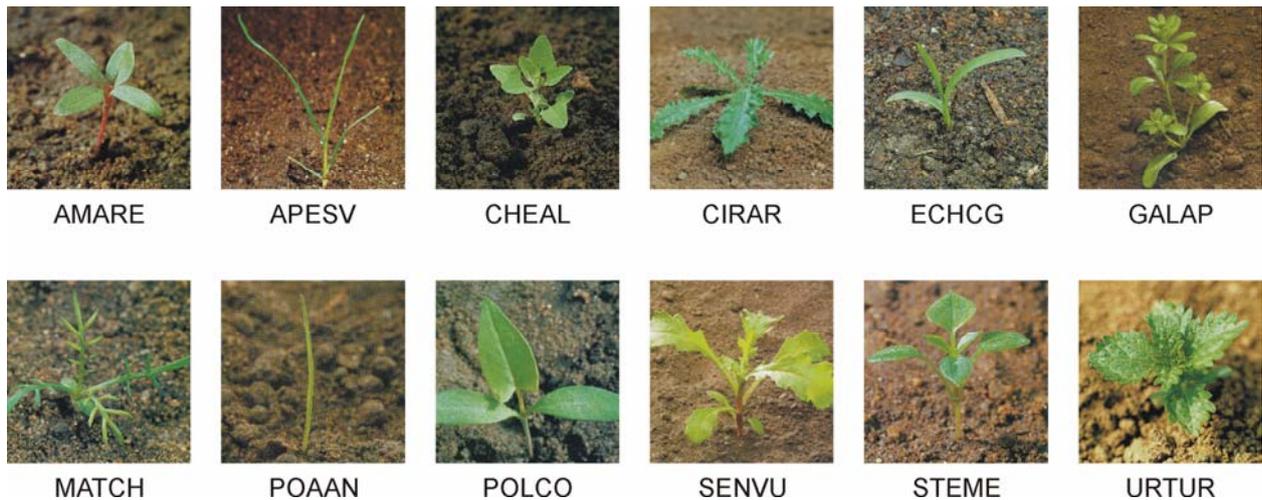


Abbildung 2: Unkrautauswahl, Bilder verändert nach KLAABEN & FREITAG 2004

AMARE: *Amaranthus retroflexus* – zurückgeb. Amaranth

APESV: *Apera spica-venti* – Gem. Windhalm

CHEAL: *Chenopodium album* – Weißer Gänsefuß

CIRAR: *Cirsium arvense* – Acker-Kratz-Distel

ECHCG: *Echinochloa crus-galli* – Gem. Hühnerhirse

GALAP: *Galium aparine* – Kletten-Labkraut

MATCH: *Matricaria recutita* – Echte Kamille

POAAN: *Poa annua* – Einjährige Rispe

POLCO: *Fallopia convolvulus* – Gem. Windenknöterich

SENVU: *Senecio vulgaris* – Gem. Kreuzkraut

STEME: *Stellaria media* – Vogelmiere

URTUR: *Urtica urens* – Kleine Brennnessel



Abbildung 3: vereinzelte Pflanze mit Identifizierungsetikett

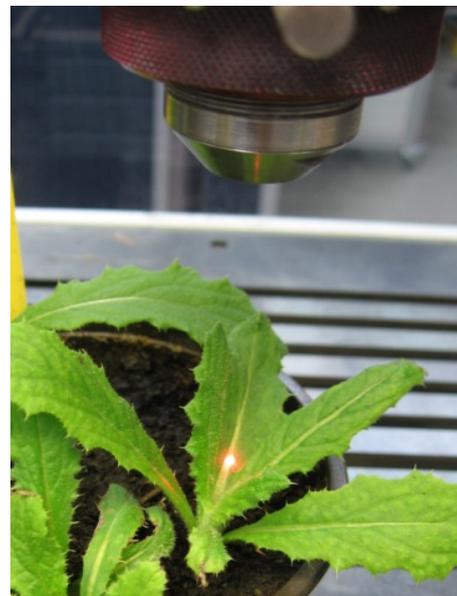


Abbildung 4: manuelle Positionierung einer Versuchspflanze unter dem CO₂-Laserstrahl mithilfe eines sichtbaren He-Ne-Pilotlasers; hier am Bsp. eines Blattes der Acker-Kratz-Distel

Die Kultivierung erfolgt in zerteilbaren Multitopfplatten unter entsprechenden Licht- und Temperaturregelstrategien, sodass eine Terminkultur erzielt werden kann.

2.2 Erfassung des Wärmetransports im Pflanzengewebe

Besondere Bedeutung kommt der Wechselwirkung zwischen Laserstrahl und Pflanzengewebe zu (Entwicklung eines Schädigungsmodells). Ein Ansatz zur qualitativen Bewertung der Wärmeeinflusszone der thermischen Strahlung auf Pflanzengewebe ist der Einsatz von Thermografie mittels Infrarot-Kamera. Zur Auswertung der mit 20 Hz aufgenommenen, thermografischen Falschfarbenbilder werden, wie in **Abbildung 5** skizziert, 12 Messpunkte (Spots) am Blatt über die gesamte Bestrahlungszeit erfasst. Dabei liegt Spot 1 direkt im Zentrum der bestrahlten Fläche während Spot 12 um 18,8 mm verschoben ist. Der Abstand zwischen den Spots beträgt daher 1,7 mm.

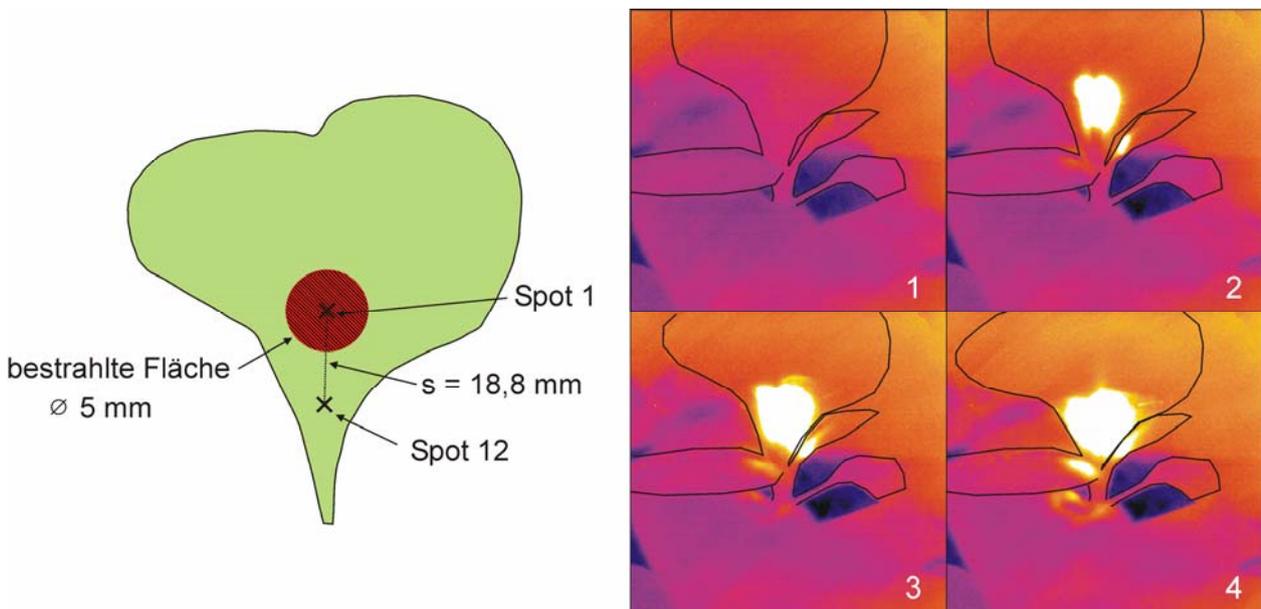


Abbildung 5: links: Skizze zur Messung der relativen Temperaturerhöhung im Blattgewebe; rechts: IR-Thermographie-Aufnahmen während der Laserbestrahlung mit 11 W (1: vor dem Start, 2: nach 5 s, 3: nach 10 s, 4: nach 15 s)

Abbildung 6 stellt die Messung der relativen Temperaturerhöhung am Blatt in Abhängigkeit der Bestrahlungszeit als Folge unterschiedlicher Laserbehandlungen dar. Dabei repräsentiert je ein Messsignal einen vom Zentrum der laserbestrahlten Fläche entfernten Spot.

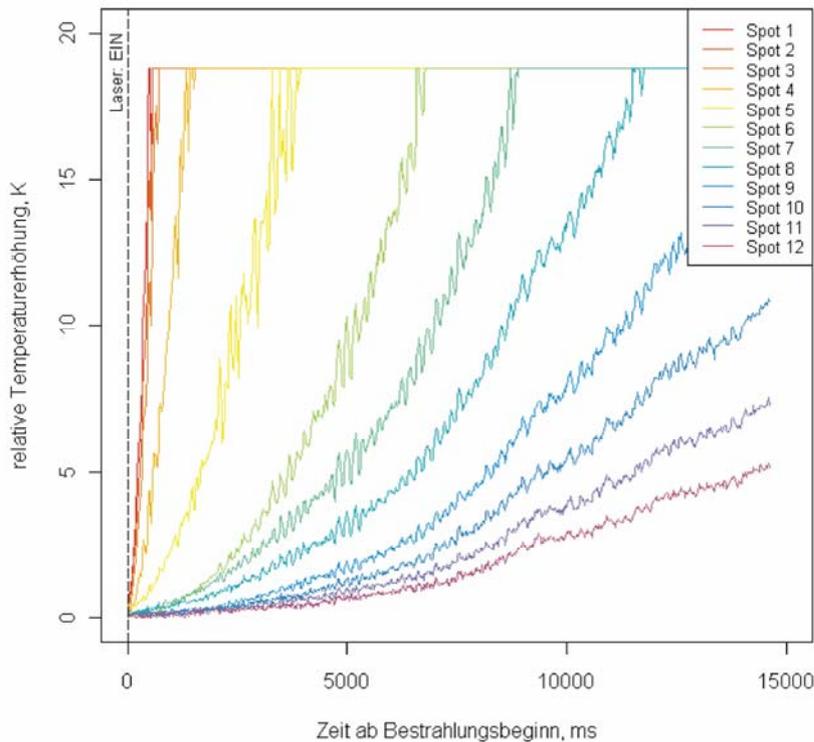
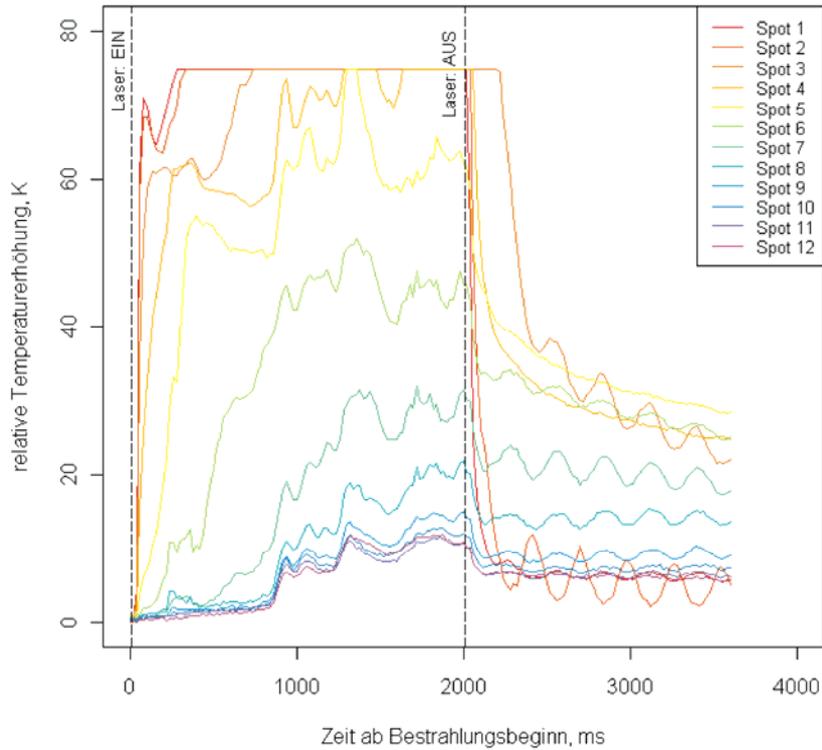


Abbildung 6: relative Temperaturerhöhung in einem Blatt bei Bestrahlung mit einem CO₂-Laser; links: Bestrahlungsdauer 2 s, Leistung 42 W; rechts: Bestrahlungsdauer 30 s, Leistung 11 W

Abbildung 6 verdeutlicht, dass die Impulsantworten auf die Energieeinkopplung abhängig von der Laserleistung sowie der Pulsdauer sind und zudem für verschiedene

Arten multivariat erfasst werden müssen. Auf Basis dieser Ergebnisse lassen sich pflanzenspezifische Laserapplikations-Wirkungsmodelle erstellen.

2.3 Erfassung der Lasertreffgenauigkeit und des Schädigungspotentials

Nach der Bestrahlung muss einerseits die Treffgenauigkeit sowie andererseits die Effektivität im Sinne einer wirksamen Unkrautregulierung nachgewiesen werden. Dazu bietet sich eine rein qualitative Chlorophyllfluoreszenz-Analyse mittels FluorCAM (Fa. PSI) an. Dabei werden Fluoreszenzbilder vor und nach der Behandlung aufgenommen, um allein eine Veränderung der Vitalität nachzuweisen.



Abbildung 7: Chlorophyllfluoreszenz-Bilder zur Ermittlung der Vitalität; v.l.n.r.: FluorCAM-Aufnahme der unbestrahlten Pflanze, RGB-Bild der mehrfach bestrahlten Acker-Kratz-Distel, FluorCAM-Aufnahme der bestrahlten Pflanze

In **Abbildung 7** ist die Auswirkung einer mehrfachen Laserbestrahlung auf die Chlorophyllfluoreszenz dargestellt. Die Aufnahmen zeigen verminderte bis keine Fluoreszenz an den getroffenen Stellen. Teilweise ist die Bestrahlung so stark gewesen, dass hier das Pflanzengewebe ganz fehlt. Jedoch zeigt sich auch, dass die behandelte Distel-Pflanze lebensfähig geblieben ist. Eine letale Dosis wurde nicht erreicht. Weitere Untersuchungen zur Eignung der FluorCam zur qualitativen Überprüfung der Behandlungseffizienz sind demnach notwendig.

2.4 Laserapplikation und -positionierung

Für die Laserapplikation werden drei verschiedene Lasersysteme eingesetzt: Festkörperlaser ($\lambda = 532 \text{ nm}$), Hochleistungs-Diodenlaser ($\lambda = 940 \text{ nm}$) und CO_2 -Laser ($\lambda = 10600 \text{ nm}$).

Die Behandlung der Pflanzen mit dem Laser erfolgt aufeinander aufbauend von der manuellen Applikation mithilfe eines Positionierungslasers (**Abbildung 4**) über eine automatische Positionierung mit fixierten Kamera- und Lasersystemen (**Abbildung 8**) bis hin zu bewegten Systemen über randomisierten Pflanzenbeständen (**Abbildung 9**).

Dabei steigen die Anforderungen an Bildverarbeitung und Lasersteuerung hinsichtlich der Strahlpositionierung. Für das dritte Projektjahr sind nach Folgeantrag darüber hinausgehende Feldversuche vorgesehen.

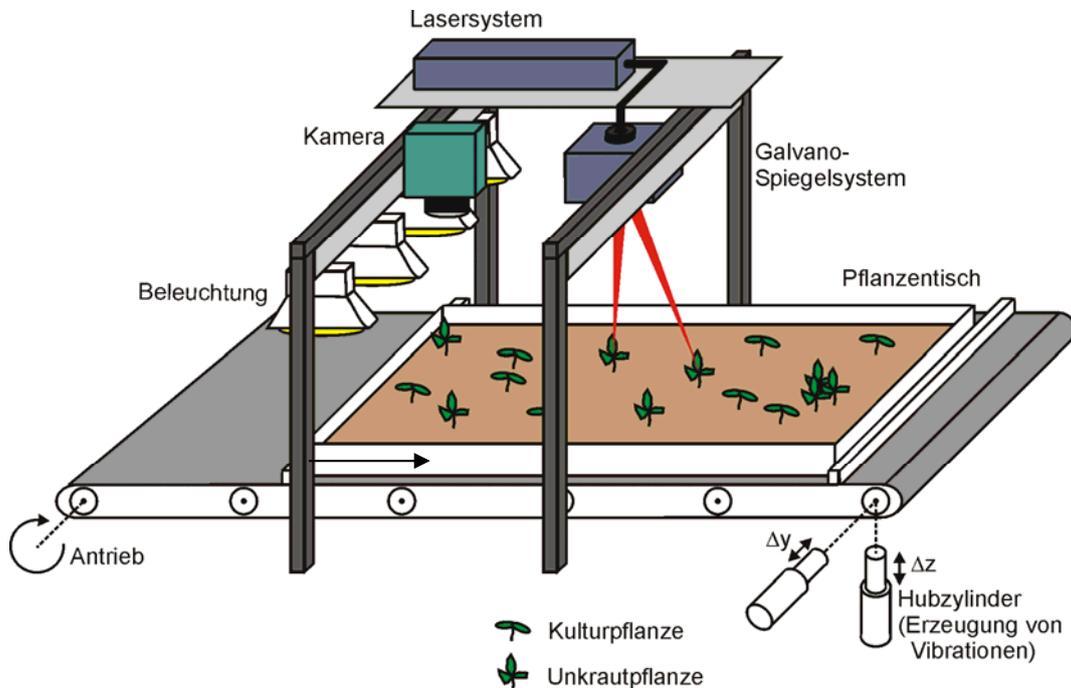


Abbildung 8: Versuchsaufbau unter kontrollierten Bedingungen (ortsfestes Sensor- und Aktorsystem)

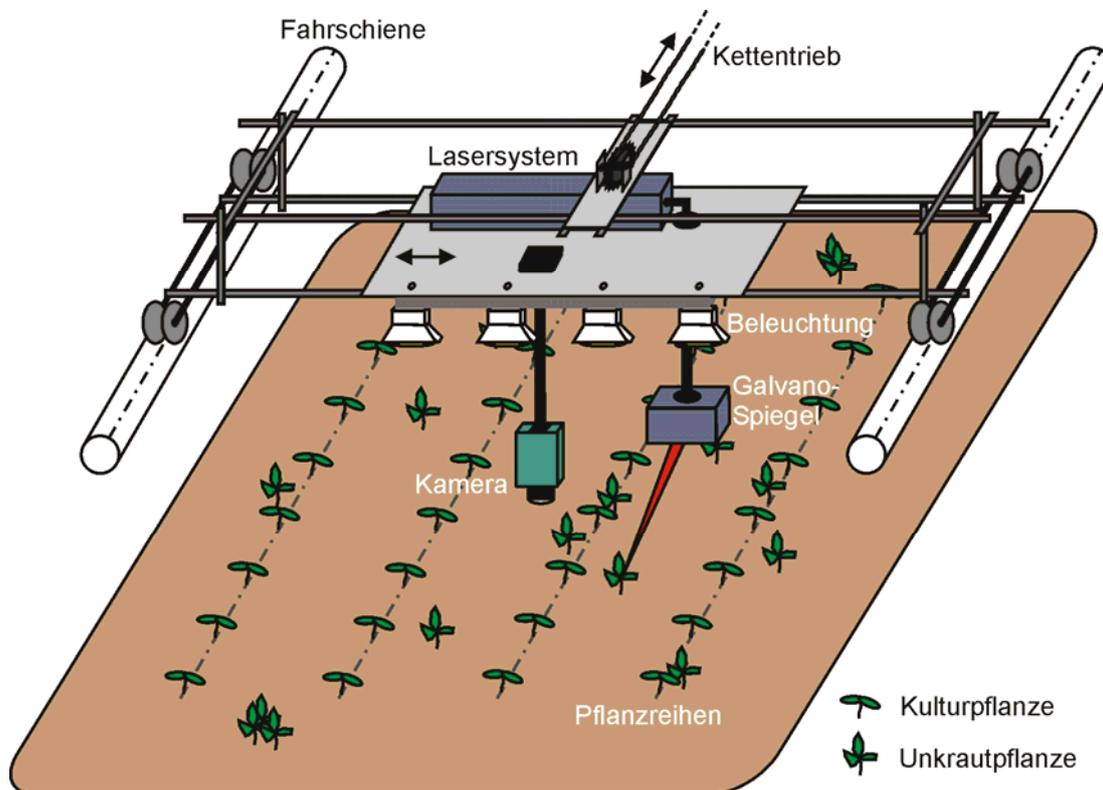


Abbildung 9: Versuchsaufbau im Gewächshaus (bewegtes Sensor- und Aktorsystem)

3 Fazit

Bezüglich der methodischen Konzeption werden folgende Schlussfolgerungen ermittelt. Erstens: Die Pflanzenauswahl muss auf der Basis typischer Unkrautarten erfolgen, wobei ein besonderer Schwerpunkt auf die Unterscheidung zwischen monokotylen und dikotylen Arten gelegt werden muss. Zweitens: Bezüglich der Modellerstellung ist die Messtechnik besonders auf die Erfassung der Kurzzeitprozesse zu fokussieren. Dies umfasst auch eine nicht-destruktive Erfassung im μm -Maßstab. Drittens: Anfänglich können die Versuche zur Überprüfung der Treffgenauigkeit mit sichtbaren Positionierungslasern und Hochgeschwindigkeitskameras durchgeführt werden. Soll die Positionierung des Laserstrahls exakt erfasst werden, haben sich Chlorophyllfluoreszenzbasierte Methoden als adäquat erwiesen. Viertens: Hinsichtlich der Laserapplikation müssen Vibrationen und Verwackelungen bestmöglich in den Steuerungsprozess integriert werden. Dies erfordert eine echtzeitnahe Verarbeitung der Bild- und Steuerungsdaten. Grenzwerte bezüglich der maximalen Applikationsgeschwindigkeit bei gegebener Fahrgeschwindigkeit müssen systemspezifisch (Lasertyp, Pflanzenart, Randbedingungen) ermittelt werden.

Danksagung

Das Projekt wird von der Deutschen Forschungsgemeinschaft, Bonn finanziert. Wir danken dem Julius-Kühn-Institut, Braunschweig für die Unterstützung bei unkrautspezifischen Fragestellungen.

Literatur

- ASTATKIE T., RIFAI M.N., HAVARD P., ADSETT J., LACKO-BARTOSOVA M., OTEPKA P. (2007):** Effectiveness of hot water, infrared and open flame thermal units for controlling weeds. *Biological Agriculture and Horticulture* 25 (1), pp. 1-12
- BAYRAMIAN A., FAY P.K., DYER W.E. (1992):** Weed control using carbon dioxide lasers. *Proceedings of the Western Society of Weed Science, Salt Lake City, Utah, USA*, 45: 55-56
- BAYRAMIAN A., FAY P.K., DYER W.E. (1993):** Weed control using lasers. *Science of food and agriculture*, 5(2), pp. 2
- BERTRAM A. (1996):** Geräte- und verfahrenstechnische Optimierung der thermischen Unkrautbekämpfung. Dissertation TU München, Institut für Landtechnik, Freising- Weihenstephan
- CHRISTENSEN S., HEISEL T., SCHOU J. (2003):** Severing or damaging apparatus for unwanted plants comprises an optical recognition system that differentiates between different types of plants with a light generating source to expose the plant to electromagnetic radiation. Patent Number(s): AU9948982-A; WO200003589-A1. International Patent Classification: A01M 021/00

- COUCH R., GANGSTAD E.O. (1974):** Response of water-hyacinth to laser radiation. *Weed Science*, 22 (5), pp. 450-453
- HEISEL T., SCHOU J., CHRISTENSEN S., ANDREASEN C. (2001):** Cutting weeds with a CO₂ laser. *Weed Research*, 41 (1), pp. 19-29
- HEISEL T., SCHOU J., ANDREASEN C., CHRISTENSEN S. (2002):** Using laser to measure stem thickness and cut weed stems. *Weed Research*, 42 (3), pp. 242-248
- HOKI M. (2000):** Fundamental study of laser application for weed and pest control effect of laser emissions on rice plant leaves. *Journal of the Japanese Society of Agricultural Machinery*, 62 (5), pp. 98-103
- KLAAßEN H., FREITAG J. (2004):** Ackerunkräuter und Ackergräser rechtzeitig erkennen. Landwirtschaftsverlag GmbH, Münster-Hiltrup und BASF Aktiengesellschaft, Limburgerhof
- LANGNER H.R., EHLERT D., HEISIG M., KIRSTE A. (2006):** Thermische Wirkung von Laserstrahlung auf Pflanzen. *Landtechnik* 5/2006, S. 252-253, KTBL, Landwirtschaftsverlag GmbH, Münster
- MATHIASSEN S.K., BAK T., CHRISTENSEN S., KUDSK P. (2006):** The effect of Laser Treatment as a Weed Control Method. *Biosystems Engineering*, (95) 4, pp. 497-505
- SLINEY D., WOLBARSH T. M. (1980):** Safety with Lasers and Other Optical Sources. Plenum Press, New York
- WEIS M., GERHARDTS R. (2007):** Qualitative und quantitative Messung der Verunkrautung in Kulturpflanzenbeständen mittels Bildanalyse. *Bornimer Agrartechnische Berichte*, 60, S. 67-74
- WÖLTJEN C., HAFERKAMP H., RATH T., HERZOG D. (2008):** Plant growth depression by selective irradiation of the meristem with CO₂ and diode lasers. *Biosystems Engineering*, 101 (3), pp. 316-324

Erstellen von Binärbildern zur Erfassung von *Fusarium*-Symptomen in Winterweizenfeldern

Generation of binary images for detection of Fusarium-symptoms in winter wheat fields

Karl-Heinz Dammer¹, Jörn Selbeck¹, Volker Dworak¹, Bernd Möller¹, Joachim Intreß¹, Bernd Rodemann²

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

E-mail: kdammer@atb-potsdam.de

² Julius-Kühn-Institut, Pflanzenschutz in Ackerbau und Grünland, Messeweg 11/12, 38104 Braunschweig, Germany

Kurzfassung: Kamerasysteme bieten den Vorteil einer zerstörungsfreien Erfassung von Pflanzenzuständen. In Winterweizenfeldern mit natürlicher *Fusarium*-Infektion und in Sortenversuchen mit künstlicher Infektion (*Fusarium culmorum*) wurden Versuche mit digitaler Farbbild- und Multispektralbildanalyse durchgeführt. Ziel war es die Symptome der Partiellen Taubährigkeit an Weizenähren in Binärbildern kenntlich zu machen. Des Weiteren wurden die Ergebnisse der digitalen Bildanalyse mit denen der visuellen Symptombonitur verglichen.

Mit beiden Kamerasystemen konnten in natürlich infizierten Weizenfeldern die Symptome detektiert werden. Die Ergebnisse der Bildanalyse korrelieren mit den visuellen Schätzungen des Pilzbefalls in den künstlich infizierten Versuchspartellen. Die Binarisierung der Hyperspektralbilder mittels Vegetationsindex ($NDVI = (IR - R) / (IR + R)$) war robuster als die Binarisierung der Farbbilder mittels Grenzwertsetzung der R-, G-, B-Graustufenwerte. Während die Multispektralbildanalyse in den nichtinfizierten Kontrollpartellen richtigerweise keinen Befall anzeigte, versagte die Farbbildanalyse, die fälschlicherweise Befall in diesen Partellen anzeigte.

Anhand von Hyperspektralbildern im Wellenlängenbereich von 900 bis 1700 nm der künstlich infizierten Freilandähren im Labor, konnten mit der SAM-(Spectral Angle Mapper) Klassifizierung erkrankte und gesunde Ährenbereiche kenntlich gemacht werden.

Deskriptoren: Hyperspektraler Bildscanner, Winterweizen, Partielle Taubährigkeit, *Fusarium*, Bildverarbeitung

Summary: As advantage of camera systems for detection of plant parameters the measurements can be done without destroying the measured object. Cameras can easily be attached to vehicles or tractors for on-the go measurements.

In winter wheat with natural and artificial Fusarium-infection digital colour and multispectral images were taken. Aim was the identification of head blight symptoms of this fungus by binarisation of the images. The results were compared with the visual estimated disease severity at the ears.

With both camera systems the symptoms of the fungal infection, the chlorophyll defect, could be detected. There was a linear correlation between the percentage of detected diseased area of the binary image and the visual estimated disease severity. The binarisation of the multispectral images by using the $NDVI=(IR+R)/(IR-R)$ was more robust compared with the binarisation of the colour images by setting lower and upper thresholds of the gray scale values in the red, green and blue channel. In the non-infected control plots the measurements with the multispectral system resulted in zero disease level. In contrast the digital colour system detected in the control pots too much disease infection.

Keywords: *Hyperspectral image scanner, winter wheat; head blight; Fusarium, image analysis*

1 Einleitung

Die mycotoxin-bildende Pilzgattung *Fusarium* ist für die Getreide verarbeitende Industrie die wichtigste Ährenkrankheit des Getreides. Stoffwechselprodukte des Pilzes können im infizierten Getreidekorn verbleiben. Bei Weiterverarbeitung befallener Getreidepartien zu Nahrungs- und Futtermitteln kann sich daraus eine Gefahr für die Gesundheit von Mensch und Tier ergeben.

Direkte und indirekte Bekämpfungsmethoden im Getreide, als die wichtigste Kulturpflanze mit dem höchsten Anbauumfang weltweit, sind mit Problemen behaftet. Eine weite Fruchtfolge zur Reduktion der Infektionsgefahr mit *Fusarium* spp. ist auf Grund dieses hohen Anbauumfangs kaum möglich. Die zunehmend praktizierte reduzierte Bodenbearbeitung, zur Einsparung von Energie und damit der Verbesserung der CO₂-Bilanz, hinterlässt infizierte Ernterückstände auf dem Boden, die im Folgejahr die Infektionsgrundlage für die Folgefrucht ist. Auch Maßnahmen des chemischen Pflanzenschutzes, wie der Einsatz von Fungiziden bis zur Blüte, können den Pilz nicht völlig zurückdrängen. In infektionsgünstigen Jahren kann Ährenbefall zu Ertrags- und Qualitätseinbußen führen. Dies hat Erlöseinbußen für den Landwirt und eine steigende Gefahr für den Verbraucher zur Folge.

Der Einsatz automatischer Erfassungs- und Dokumentationssysteme zur Einschätzung von Ort und Stärke eines Befalles bereits auf dem Feld wäre in vielerlei Hinsicht von Nutzen:

- Der Landwirt könnte die Information nutzen, befallene Partien schon vor dem Drusch z.B. zur Biogaserzeugung zu ernten.

- Das Ernteprodukt von befallenen Feldpartien könnte in der Lagerwirtschaft gezielte selektive gelagert und z.B. für Biomasseheizungen vermarktet werden.
- Für chemische Analysen zur Bestimmung des Mykotoxingehaltes wären eine gezielte Stichprobennahme und dadurch eine Effizienzsteigerung der äußerst kostenintensiven Kontrollmethoden im Labor möglich.

Optische Messverfahren eignen sich besonders für den Einsatz auf Landmaschinen, da diese berührungslos und zerstörungsfrei arbeiten. Ziel der Untersuchungen des Teilprojektes des vom BMBF finanziell unterstützten Verbundprojektes "ProSenso.net2" war es zu testen, ob die Symptome einer *Fusarium*-Infektion an Winterweizenähren im Feld, trotz auftretender natürlicher Störeinflüsse, mittels Farbbild- und Multispektralanalyse detektiert werden können. Ein Trägerfahrzeug-gestütztes Messwerterfassungssystem (Prototyp) für Feldmessungen wurde entwickelt. Die Firma SYMACON Bildverarbeitung GmbH übernahm die Aufgabe einen Algorithmus zur Bildverarbeitung zu entwickeln und unter der Windows-Oberfläche ein computergestütztes Auswerteprogramm (Prototyp) zu erstellen.

Im Labor sollte getestet werden, ob sich Befallsstellen natürlich infizierter Ähren aus dem Freiland im Infrarotbereich von 900 bis 1700 nm, klassifizieren lassen.

2 Material und Methoden

In Getreidefeldern tritt nicht jedes Jahr *Fusarium*-Befall an der Ähre auf. Aus diesem Grund und zur Bereitstellung von Befall unterschiedlicher Stärke wurden Kameraaufnahmen in künstlich infizierten Sortenversuchen durchgeführt. Im letzten Projektjahr 2009 wurden 15 Winterweizensorten mit unterschiedlichen *Fusarium*-Anfälligkeiten und Abreife in 4 facher Wiederholung angebaut. In jeweils 2 Wiederholungen in einem Block erfolgte eine künstliche Infektion. Auf der einen Seite des Feldes waren jeweils 2 Wiederholungen als nicht infizierte Kontrolle. Die Parzellengröße betrug 3 m x 2 m. Als Füllparzelle am Anfang und Ende sowie als Umrandung von Wiederholung 1 und 3 bzw. 3 und 4 wurde Winterweizen gedreht.

Die Farbbild- und Multispektralaufnahmen erfolgten von der Parzellenmitte. Visuelle Bonituren wurden an 20 zufällig ausgewählten Ähren durchgeführt. Der Anteil Symptome (Chlorophylldefekt) an der Gesamtährenfläche wurde geschätzt und anschließend der Mittelwert aus den 20 Werten gebildet. Der Zusammenhang des mit Hilfe der Bildanalyse ermittelten Anteils Symptome wurde mit der bonitierten mittleren Befallsstärke mittels linearer Regression analysiert.

Für die Hyperspektralaufnahmen im Bereich von 900 nm bis 1700 nm im Labor wurden jeweils 2 Ähren aus jeder Parzelle entnommen und in eine Vorrichtung hängend eingeklemmt. Die gescannten Hyperspektralbilder wurden mit Hilfe des Spectral Angle Mappers klassifiziert.

3 Ergebnisse und Diskussion

Binarisierung von Farbbild- und Multispektralbildern zur Befallsquantifizierung von infizierten Winterweizenähren

Für die Freilandversuche wurde ein höhen- und winkelverstellbarer Kameraträger, der an einem Heege-Geräteträger angebracht wurde konstruiert (**Abbildung 1**). Auf phänotypische Unterschiede der Sorten wie z.B. Wuchshöhe konnte so reagiert werden.



Abbildung 1: Farbbild- und Multispektralkamera an einem variabel einstellbaren Kameraträger für Bildaufnahmen in den Parzellenversuchen

Zum Zeitpunkt der Bildaufnahmen waren die Weizenpflanzen im Wachstumsstadium BBCH 75 und 85. Die unterschiedliche Symptomausprägung bei den unterschiedlich anfälligen Sorten ist beispielhaft in **Abbildung 2** zu erkennen.

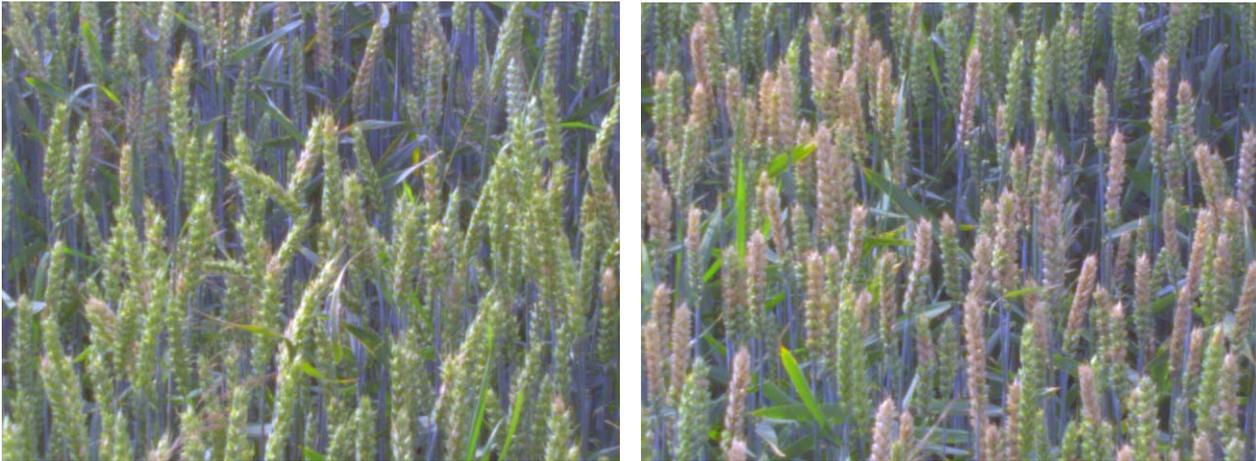


Abbildung 2: Farbbildaufnahmen der *Fusarium*-Symptome an Weizenähren, links: gering anfällige Sorte rechts: hoch anfällige Sorte

Von den Aufnahmen der Multispektralkamera wurde aus den zwei Graustufenbildern des Rot- und Infrarotkanals über die pixelweise Berechnung des NDVI ein Graustufenbild dieses Vegetationsindexes berechnet. Durch die Auswahl eines NDVI-Grenzwertes und eines Grenzwertes „minimale Fläche“ wurde ein Binärbild erzeugt (**Abbildung 3**). Dadurch wurden kleine Flächen zusammenhängender weißer Pixel, die meist durch Überbelichtungen verursacht werden und eine ähnliche spektrale Signatur wie Befallsymptome aufweisen, aus dem Binärbild entfernt.

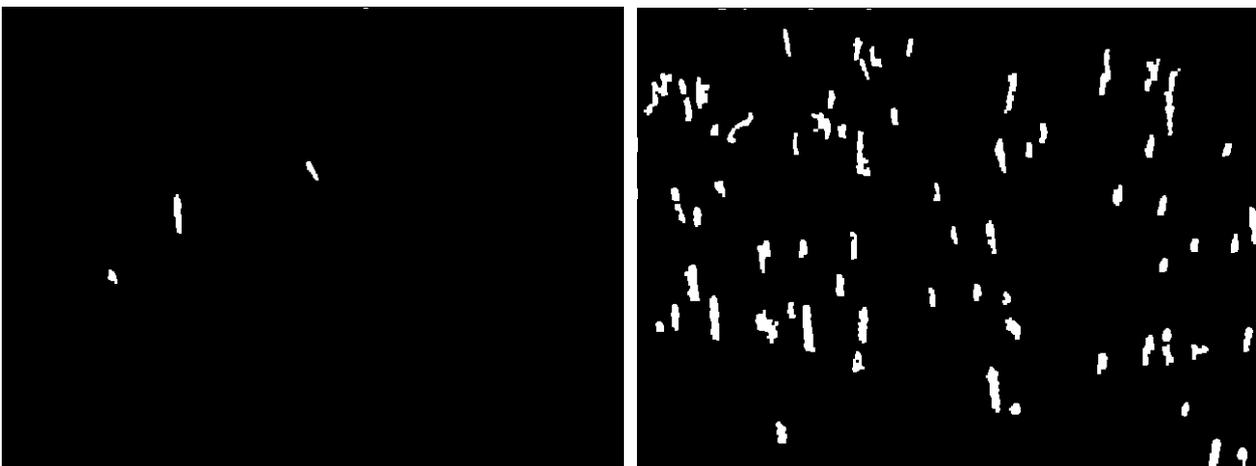


Abbildung 3: Binärbild des NDVI nach Grenzwertsetzung „minimale Fläche“ der Sorten von **Abbildung 2**, links: gering anfällige Sorte, rechts: hoch anfällige Sorte

Sowohl für die Farbbildaufnahmen (auf eine Darstellung wird aus Platzgründen verzichtet) als auch Multispektralaufnahmen erbrachte die Binarisierung einen engen linearen Zusammenhang zu der visuell ermittelten Symptomstärke. Wie zu erwarten, waren die Werte der visuellen Bonitur immer höher, da eine Ähre visuell von allen 4 Seiten bewert-

tet wurde, dagegen in den Bilder nur eine Seite. Nach Binarisierung der Multispektralbilder der nicht befallenen Kontrollparzellen wurde korrekt kein Befall angezeigt. Die Binarisierung der Farbbilder ergab jedoch fälschlicherweise Befall. Die Multispektralanalyse war die robustere Methode.

Laborversuche

Die **Abbildung 4** zeigt den hyperspektralen Labormessplatz mit Halogenstablampe und Drehspiegel mit Mikroschrittmotor. Im oberen Bereich ist die Spektraleinheit (Schwarz-Weiß-Kamera und Spektrograph) von 400 bis 1000 nm und im unteren Bereich von 900 bis 1700 nm zu sehen.

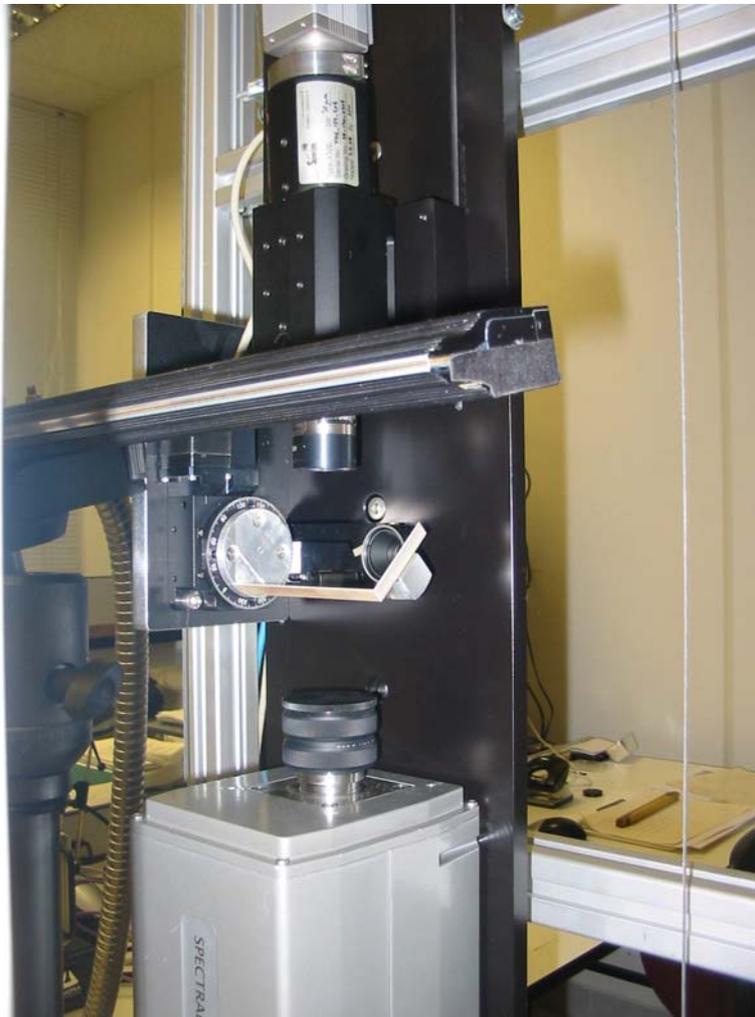


Abbildung 4: Labormessplatz hyperspektrale Bildscanner, oben: Sichtbarer Bereich, unten: Naher Infrarotbereich, mittig: Drehspiegel

In **Abbildung 5** sind typische Spektren kranker Bereiche der infizierten Ähren und gesunder Bereiche der nichtinfizierten Ähren der Kontrolle dargestellt.

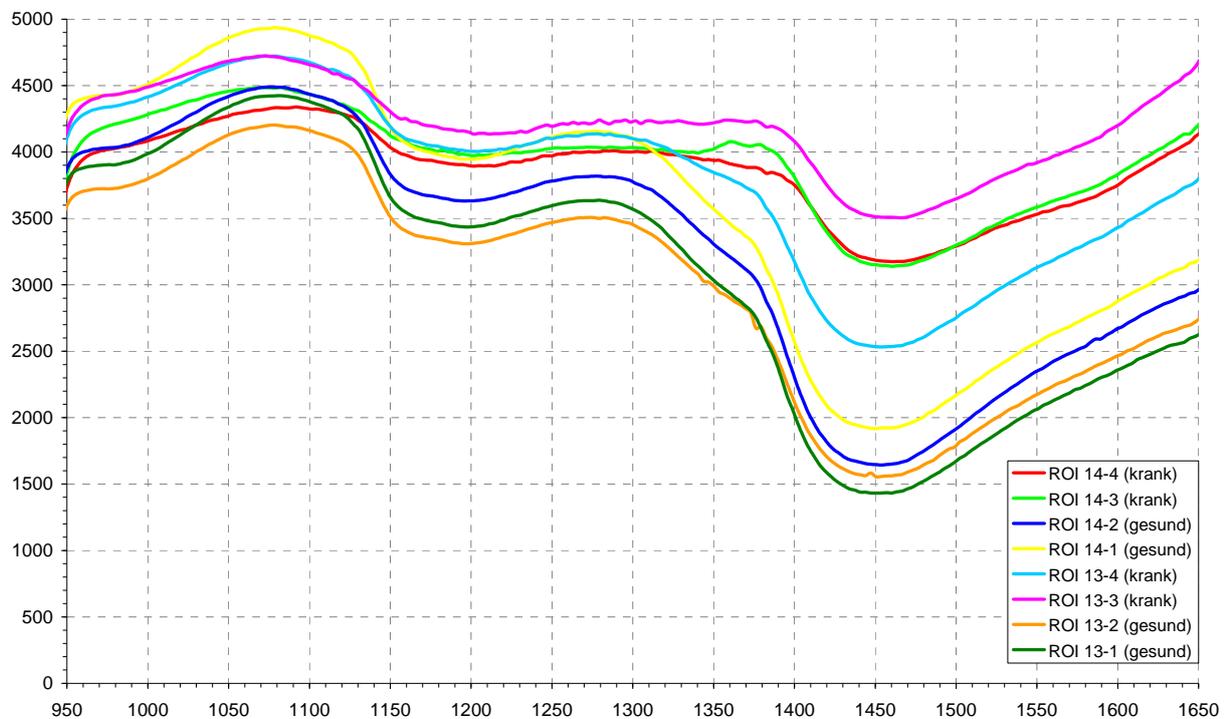
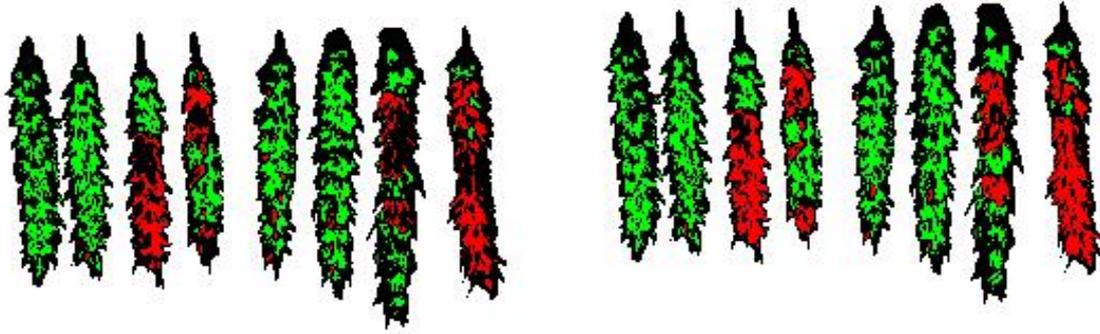


Abbildung 5: Spektren kranker (infizierte Ähren) und gesunder (Kontrollähren) ROI (region of interest) im Infrarot-Wellenlängenbereich

Es sind deutlich Unterschiede im Spektrenverlauf zwischen kranken und gesunden Ähren zu erkennen.

Auf Basis der ermittelten Spektren wurden die Aufnahmen mit dem Spectral Angle Mapper aus der ENVI-Software klassifiziert. Das Ergebnis der Klassifizierung im visuellen Bereich ist in **Abbildung 6** dargestellt.

Die vom *Fusarium*-Pilz verursachten Chlorophylldefekte der infizierten Ähren wurden erkannt. In den gesunden Ähren sind nur in der Sorte 14 anhand der Referenzspektren der Sorte 13 einige kleinere Regionen als krank klassifiziert worden.



e) Klassifizierung nach Sorte 13

f) Klassifizierung nach Sorte 14

Abbildung 6: Klassifizierung in krank (rot), gesund (grün) und unklassifiziert (schwarz) anhand der Spektren im Nahen Infrarot Bereich

Danksagung

Die Arbeiten wurden durch das BMBF-Projekt „ProSenso.net2 (Nr. 0339992) finanziert.

Kameragestützte Lahmheitsbewertung bei Milchkühen

Lameness assessment of dairy cows by means of imaging

Kristin Pils, Jörg Hoffmann

*Fachhochschule Osnabrück, Fakultät Ingenieurwissenschaften und Informatik, Albrechtstraße 30, 49076 Osnabrück, Germany
E-mail: Kristin.Pils@fh-osnabrueck.de*

Kurzfassung: Die Gesundheit von Milchkühen ist ausschlaggebend für ihre Wirtschaftlichkeit. Bei einer Erkrankung treten Ertragsverluste und Kosten für Tierarzt sowie Medikamente auf. Zudem verzögert sich die Fortpflanzung. Im schlimmsten Fall kann eine Kuh nicht mehr zur Milchproduktion eingesetzt werden. Deshalb ist es wichtig Krankheiten früh zu erkennen.

Bedingt durch die hohen Anforderungen an Milchkühe treten Erkrankungen der Gliedmaßen auf, welche zu Lahmheit führen. Mit einem Bewertungsschema von Dr. Sprecher und Mitarbeitern kann Lahmheit beurteilt und ihr Schweregrad in Kategorien eingestuft werden. Das Schema beruht auf Beobachtung der Körperhaltung im Stehen und beim Laufen. Zur Automatisierung dieser Bewertung werden die Kühe eines Versuchsbetriebes mit einer WebCam aufgezeichnet. Die Aufnahmen werden mit Hilfe des Programms Vision Builder verarbeitet. Die Rückenlinie wird durch eine polynomi-sche Ausgleichsline von ermittelten Punkten dargestellt. Anhand der ersten Ableitung dieses Polynoms kann die Steigung jedes einzelnen Punktes bestimmt werden, woraus sich der maximale Krümmungsgrad ergibt. Abschließend wird eine fachmännische Bewertung der Kühe zur Einteilung der Krümmungsgrade in Kategorien herangezogen.

Deskriptoren: Milchkuh, Lahmheit, Krümmungsgrad, Bewertungsschema, Früherkennung, Bildauswertung

Abstract: *The health of dairy cows is decisive for their economic efficiency. With a disease profit losses and costs for the veterinarian appear as well as for drugs. Moreover the reproduction is delayed. In the worst case a cow cannot be used anymore to the milk production. Therefore it is important to recognise illnesses early. Caused by the high demands for dairy cows illnesses of the limbs occur, which lead to lameness. With an assessment pattern of Dr. Sprecher and co-operators lameness can be judged and the severity can be classified in categories. The pattern is based on observation of the posture in the standing position and in the running. For the automation of this assessment the cows of a pilot plant are recorded with a WebCam, the exposures are proc-*

essed with the help of the programme Vision Builder. The back line is shown with a polynomial balance line of the ascertained points. With the help of the derivation of this polynomial the gradient of every single point can be determined. This is what the maximum bend degree arises from. Finally a professional assessment of the cows is pulled up for the division of the bend degrees in categories.

Keywords: Dairy cow, lameness, bend degree, assessment categories, early detection, image analysis

1 Einleitung

Lahmheit bei Milchkühen kann ihre Wirtschaftlichkeit erheblich beeinträchtigen. Sie ist eine Folge von unterschiedlichen Ursachen. Dazu zählen Ernährung und Haltungsbedingungen genauso wie infektiöse Krankheiten und Stoffwechselstörungen. Faktoren, welche die Gesundheit und Leistungsfähigkeit der Kühe beschränken, müssen möglichst gering gehalten werden, um Ertragsverluste und Kosten für Tierarzt und Medikamente zu vermeiden. Dies ist nicht immer vollständig erreichbar. Um die Verluste dennoch in engen Grenzen zu halten, ist es notwendig, auftretende Lahmheiten schnellstmöglich zu erkennen und zu behandeln und durch regelmäßige Klauenpflege vorzubeugen.

Zur Erkennung von Lahmheit kann das Bewertungsschema von Dr. Sprecher und Mitarbeitern eingesetzt werden. Bei diesem System erfolgt eine regelmäßige Bewertung der Kühe auf einer ebenen Fläche mit einer Einteilung in fünf Stufen, von „normal“ bis „schwer lahm“. Hauptkriterium ist die Körper- bzw. Rückenhaltung sowohl im Stehen als auch beim Laufen, die von einer gleich bleibenden Person beurteilt wird.

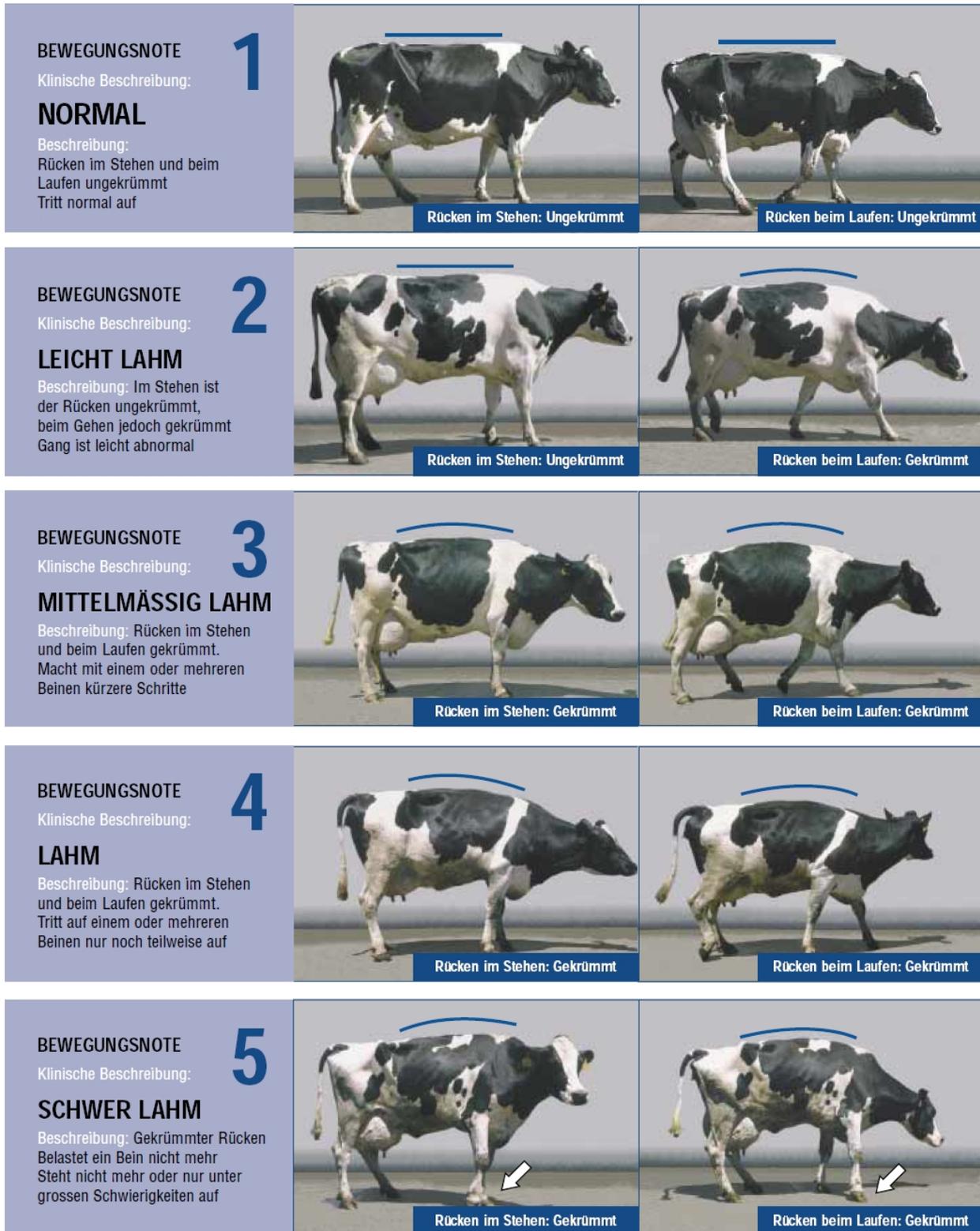


Abbildung 1: Bewertung der Lahmheit bei Kühen, modifiziert nach www.de.availa4.com, (Februar 2010)

Dieses Schema soll mit Hilfe einer WebCam automatisiert werden.

2 Bedingungen für die Aufnahmen der Messreihen

2.1 Aufnahmeort im Stehen und beim Laufen

Um Bilder der Kühe aufnehmen und auswerten zu können, muss ein geeigneter Ort sowohl für die Betrachtung im Stehen als auch beim Laufen bestimmt werden. Diese Stelle muss ein sicheres Stehen bzw. Laufen auf einer ebenen Fläche ermöglichen. Es muss eine gleich bleibende Position der Kühe erzielt werden, um vergleichbare Bilder aufzunehmen. Für eine fortlaufende Dokumentation muss der gewählte Ort regelmäßig von allen Kühen besucht werden.

Der Versuchsbetrieb für diese Arbeit, welcher auf die Zucht von schwarzbunten Holstein-Friesian Rindern und Milchproduktion spezialisiert ist, verfügt über einen Melkroboter. Dieser bietet die gleich bleibende Position der Kühe beim Melken mit wenigen Möglichkeiten zur Bewegung auf einer ebenen Fläche. Die Kühe bekommen während der Melkung Krafftutter und nehmen dadurch beim Fressen eine einheitliche Haltung ein. Die Bilder beim Laufen entstehen am Ausgang des Roboters. Die Kühe werden durchschnittlich dreimal täglich gemolken. So kann eine kontinuierliche Aufnahme der Kühe erfolgen. Durch den Melkroboter ist ebenfalls eine Identifizierung der jeweils betrachteten Kuh möglich.

2.2 Position der Kamera

Die WebCam zur Aufnahme der Bilder wird an der Balkenkonstruktion des Boxenlaufstalles befestigt. Für die Bilder im Stehen wird sie in einer Höhe von 2,25 m und im Abstand von 2,70 m zum Melkroboter angebracht, beim Laufen befindet sie sich 2,10 m über dem Spaltenboden und 3,10 m vom Hintergrund entfernt. In dieser Höhe ist die Rückenlinie trotz des Winkels gut erkennbar und gleichzeitig von den Kühen nicht mehr erreichbar.

2.3 Beleuchtung und Hintergrund

Für eine ausreichende Beleuchtung des Aufnahmeortes sorgt ein 500 Watt Strahler. Die Aufzeichnung der Bilder muss vor einem definierten Hintergrund erfolgen, um bei der Bearbeitung eine Trennung der Kuh vom übrigen Bildinhalt zu gewährleisten und somit die Rückenlinie erkennen zu können. Es muss sich dabei um ein Material mit glatter, aber nicht reflektierender Oberfläche handeln, um eine gleichmäßige Ausleuchtung zu erzielen. Für erste Tests wird eine Tapete sowohl mit orangefarbiger als auch mit blauer Abtönfarbe angestrichen und mit Klebeband im Roboter befestigt. Beide Farben stellen einen ausreichenden Kontrast zu den schwarzbunten Kühen dar. Um auch die Beurteilung von Fleckvieh zu ermöglichen, wird die Farbe blau gewählt, die sich mehr vom Rotbraun der Kühe unterscheidet als das Orange.

Da eine Tapete für eine dauerhafte Verwendung im Boxenlaufstall aufgrund von Wasserunbeständigkeit und Materialstärke nicht geeignet ist, werden stattdessen Kunststoffplatten eingesetzt. Deren Oberfläche wird mit feinkörnigem Schleifpapier aufgeraut, dadurch wird eine Reflektion des Lichts ausreichend gemindert.

Für den Hintergrund der Aufnahmen beim Laufen werden weitere Kunststoffplatten auf einer Holzwand angebracht. Dieser Aufbau befindet sich mitten im Stall und ist jederzeit von den Kühen zugänglich. Beim Erkunden dieser Neuerung werden die Platten durch die Hörner einiger Kühe beschädigt. Für eine dauerhafte Nutzung muss also ein anderes Material oder ein anderer Aufnahmeort, der die Zerstörung der Kunststoffplatten nicht zulässt, gewählt werden.



Abbildung 2: Aufzeichnungsort im Stehen und beim Laufen

2.4 Tieridentifizierung

Die Erkennung der Kuh im Melkroboter erfolgt mit Hilfe eines RFID-Systems. Die Kühe tragen Halsbänder, an denen Transponder mit einer Kennung befestigt sind. Das Lesegerät befindet sich unter der Abdeckung des Futtertroges. Die Daten der Kuh werden mit Datum und Uhrzeit sowie Dauer der Melk- und Anmelkzeit vom Roboter gespeichert. Diese Informationen dienen später zur Zuordnung ermittelter Krümmungswerte zur betreffenden Kuh.

2.5 Anforderungen an die Kühe

Größe

Der Melkroboter ist seitlich durch das Ein- und Ausgangstor begrenzt. Die oberste Querstange befindet sich auf einer Höhe von 1,52 m über dem Boden der Melkbox. Durch die Betrachtung von schräg oben ist für diese Versuchsanordnung eine Mindestgröße von ca. 1,42 m (gemessen am Kreuz) erforderlich, um die Darstellung der gesamten Rückenlinie zu gewährleisten (**Abbildung 3**).

Anatomische Anomalien

Die Kuh in **Abbildung 4** hat eine Veränderung an der Wirbelsäule. Dadurch wird das Ergebnis der Auswertung verfälscht, eine realistische Bewertung ist nicht möglich. Diese Kuh ist nicht geeignet für eine automatische Beurteilung.



Abbildung 3: Zu kleine Kuh



Abbildung 4: Anomalie

Verhalten im Melkroboter

Es kann vorkommen, dass eine Kuh während des Melkvorganges Kot absetzt. Dabei ist der Rücken durch eine veränderte Beinstellung stärker gekrümmt, die Stellung verfälscht das Ergebnis. Allerdings kommt dies nur selten vor (**Abbildung 5**)

Neugierde

Eine Kuh kann aufgrund von Neugierde den Kopf heben oder ihn unter der seitlichen Begrenzung hindurch aus der Melkbox herausbewegen, um die Umgebung zu erforschen. Dadurch verändert sich die Rückenhaltung und es kommt zu einem verfälschten Ergebnis. Dies geschieht zum Beispiel wenn das Krafftutter bereits aufgefressen wurde (**Abbildung 6**).



Abbildung 5: Absetzen von Kot



Abbildung 6: Neugierige Kuh

2.6 Störfaktoren

Verschmutzung

Durch das Beschnuppern der Hintergrundplatten hinterlassen die Kühe Reste vom Kraftfutter. Aber auch Kot bleibt daran haften. Diese Verschmutzungen sind auf den Aufnahmen zu sehen. Da es nicht möglich ist die Tiere an diesem Verhalten zu hindern, müssen die Platten häufig gereinigt werden. Für ein autonomes System ist das sehr unzweckmäßig.

Fliegen

Wo Tiere sind, befinden sich auch Fliegen. Sie verdecken die Linse der Kamera durch ihren Körper oder verschmutzen sie durch ihren Kot. Der Störfaktor wird durch die Nutzung eines Gehäuses für die Kamera verringert. Trotzdem muss die Glasscheibe des Gehäuses gereinigt werden. Dieses Problem wirkt sich abhängig von der Jahreszeit unterschiedlich stark aus.

3 Aufnahmen im Stehen

Die Aufnahmen der Bilder im Stehen erfolgt während des Melkvorganges. Dieser beginnt mit dem Eintritt in den Melkroboter und der Identifizierung der Kuh. Es folgt die Reinigung der Zitzen und das Anmelken. Die Prozedur beträgt im Mittel zwei Minuten. Die Dauer der nun folgenden Melkung ist abhängig von der Milchmenge, dem durchschnittlichen Minutengemelk und der Melkfrequenz der Kuh. Sie beträgt im derzeitigen Melkbetrieb im Schnitt fünf Minuten. Die Aufnahme der Bilder darf erst nach vollständigem Ansetzen des Melkgeschirrs erfolgen, um eine Beeinflussung des bewegten Roboterarms auf den Stand der Kuh zu minimieren. Während einer Melkung werden aufgrund der durchschnittlichen Dauer bis zu 4 Bilder aufgenommen, pro Minute eines. Die Auslösung erfolgt per Hand. Daraus wird der Mittelwert der Krümmungsgrade bestimmt, denn schon eine kleine Bewegung, wie zum Beispiel die Verlagerung des Körperschwerpunktes, bedingt eine Veränderung der Rückenlinie.

Das aufgenommene Bild wird mit dem Programm Vision Bilder von National Instruments bearbeitet. Die Bearbeitung erfolgt in zwei Abschnitten. Zuerst wird die Aufnahme modifiziert, um die Erkennung des Rückens vor dem Hintergrund zu gewährleisten. Dabei wird der Helligkeitsanteil der grünen Farbebene extrahiert, in dieser Ebene unterscheidet sich die Kuh am stärksten vom Hintergrund. Anschließend wird im Bereich des Rückens eine Filterung vorgenommen, durch die die Umrisse in Graustufen sichtbar werden. Diese Darstellung wird in eine Schwarz-Weiß-Ansicht umgewandelt.



Abbildung 7: Ermittlung der Rückenpunkte

Im zweiten Abschnitt werden die einzelnen Punkte der Rückenlinie ermittelt. Links beginnend wird im Bereich der Filterung eine senkrechte Linie als Betrachtungsbereich festgelegt. Von oben nach unten wird der erste Schwarz-Weiß-Übergang detektiert. Liegt der gefundene Punkt oberhalb der obersten Querstange des Melkroboters, wird der Punkt in einer CSV-Datei gespeichert.

Für den nächsten Punkt wird der Betrachtungsbereich um einen Pixel nach rechts verlagert und erneut der erste Übergang bestimmt. Liegt dieser oberhalb der Querstange und weicht außerdem nicht um einen festgelegten Wert ab, wird er gespeichert. Dieser Vorgang wiederholt sich solange bis das Ende des Filterbereichs erreicht ist.

Die ermittelte Rückenlinie einer Kuh besteht je nach Größe der Kuh aus 290 bis 390 Punkten bei einer Rückenlänge von etwa 1,50 m bis 1,90 m. Dies entspricht zirka 0,5 cm des Tieres pro Punkt.

4 Bestimmung des zu bewertenden Rückenbereichs

Beim Bewertungsschema von Dr. Sprecher ist zu erkennen, dass nicht der gesamte Rücken sondern lediglich der Bereich von der Schulter bis zur Lende. Um diesen Bereich beschreiben zu können, wird anhand der Bilder, auf denen der Hüfthöcker deutlich zu erkennen ist, eine prozentuale Bestimmung der Hüfthöckerplatzierung durchgeführt. Dazu werden der erste und der letzte Punkt sowie der höchste Punkt des Hüfthockers der gespeicherten Daten benötigt. Dies ergibt bei 34 Kühen auf 89 Bildern einen durch-

schnittlichen Wert von 71,8% für die Spitze des Höckers. Der geringste Prozentsatz beträgt 67,7%. Um einen gewissen Sicherheitsabstand einzuhalten, wird die oberste Grenze bei 60% festgelegt. Die Schulter befindet sich bei zirka 15% der aufgezeichneten Rückenpunkte und bestimmt damit die untere Grenze der Betrachtung.



Abbildung 8: Zu bewertender Rückenbereich

5 Berechnung der Rücken-Ausgleichslinie

Die Datendatei der aufgenommenen Rückenpunkte wird in Excel geöffnet. Aus den x- und y-Werten wird ein Punkt-Diagramm erzeugt. Der absolute Nullpunkt ist hier unten links angelegt, während er im Programm Vision Builder oben links positioniert ist. Dadurch erfolgt eine an der Horizontallinie gespiegelte Darstellung. Dies ist für den weiteren Verlauf nicht relevant, da sowohl die maximale positive als auch die maximal negative Steigung der Rückenlinie ermittelt wird.

Die Rückenlinie wird durch das Aussparen der Stangen und des Schattens nicht vollständig aufgenommen. Außerdem ist bei manchen Kühen der Hüfthöcker sichtbar, bei anderen nicht. Deshalb wird die Rückenlinie durch ein Ausgleichspolynom 6. Grades approximiert.

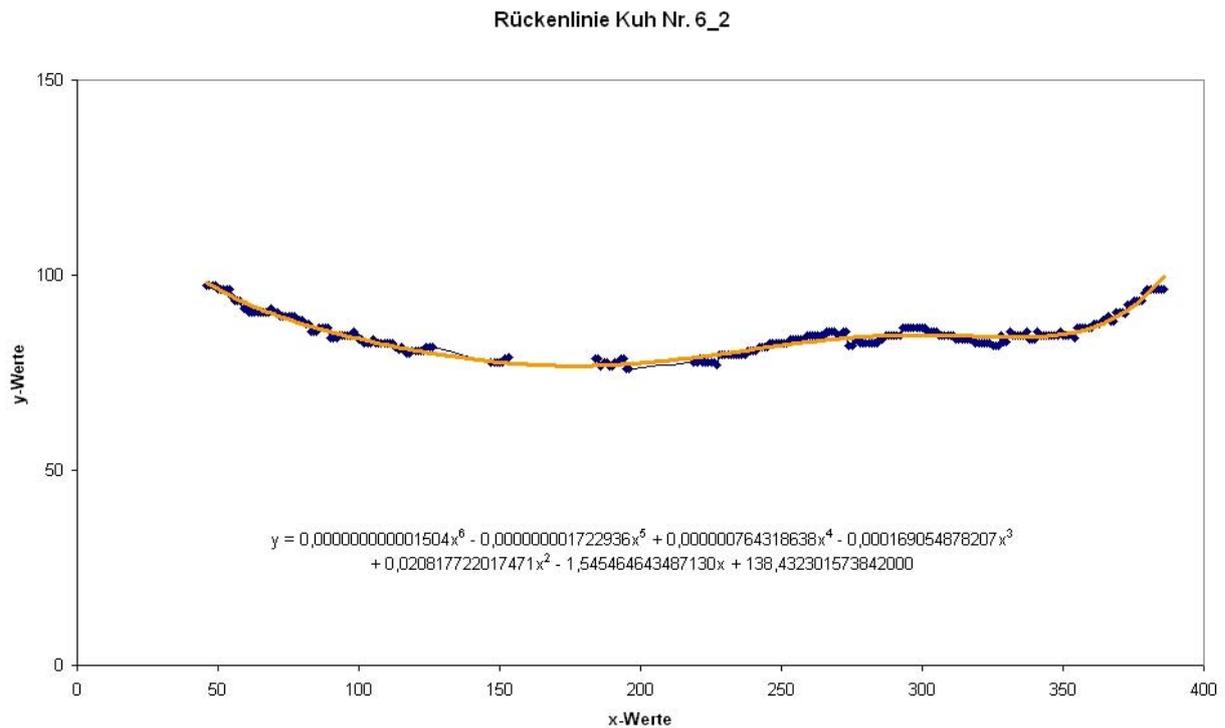


Abbildung 9: Excel-Diagramm der ermittelten Rückenpunkte

Da die im Diagramm angezeigte Gleichung der polynomischen Trendlinie nicht weiter verwendbar ist, werden die Koeffizienten des Polynoms nach der Methode der kleinsten Quadrate im Excel-Arbeitsblatt ermittelt.

6 Krümmungsgrad des Rückens

Um den Krümmungsgrad des Rückens zu ermitteln, wird die erste Ableitung des Polynoms bestimmt. Mittels Excel erfolgt die Bestimmung des zu bewertenden Rückenabschnitts aus den ermittelten Punkten. Zu jedem x-Wert dieses Bereichs wird die Steigung bestimmt. Die Differenz des maximal positiven und negativen Winkels ergibt den Krümmungsgrad des Rückens.



Abbildung 10: Überlagerung mit Ausgleichspolynom

Abbildung 11: Maximale Steigungswinkel

7 Aufnahmen beim Laufen

Die Aufnahmen der Kühe beim Laufen erfolgt am Ausgang des Melkroboters. Die Laufrichtung ist hier nicht so eindeutig vorgegeben wie die Position in der Melkbox. Dadurch ergeben sich Abweichungen der Rückenpositionen, die das Ergebnis verfälschen. Um geeignete Werte zu erzielen muss ein anderer Aufnahmeort gewählt werden, zum Beispiel ein Selektionsgang. Da dieser im Versuchsbetrieb nicht zur Verfügung steht, fließen die Werte beim Laufen nicht in die Bewertung der Kühe ein.

8 Belastung der Gliedmaßen

Die Noten 4 und 5 des Bewertungsschemas beinhalten das Erkennen von geringerer Belastung einer oder mehrerer Gliedmaßen. Tritt eine Lahmheit bei einer Kuh auf, so entlastet sie das erkrankte Bein. Die Gewichtsverteilung verändert sich. Dies soll über die vier Wiegezellen des Melkroboters sichtbar gemacht werden.

Dabei ist zu erkennen, dass eine Entlastung grundsätzlich zu erkennen ist, jedoch kann auch eine schwer lahme Kuh eine normale Gewichtsverteilung erreichen und eine gesunde Kuh zum Beispiel durch Gewichtsverlagerung bei einem Schritt eine scheinbare Entlastung aufweisen. Auch diese Werte fließen nicht in die Bewertung ein.

9 Auswertung der Messreihen und Überprüfung der Messergebnisse

Um eine Klassifikation der ermittelten Krümmungsgrade im Vergleich zur fachmännischen Bewertung vornehmen zu können, werden die im Melkbetrieb befindlichen Kühe

von drei Personen beurteilt. Dies sind neben mir der Landwirt des Versuchsbetriebes und ein Klauenpfleger.

Beim Vergleich der vergebenen Bewegungsnoten ist zu erkennen, dass im Einzelfall eine Abweichung von bis zu zwei Noten in der Einschätzung zwischen dem Klauenpfleger und dem Landwirt auftreten kann. Durch geringere Erfahrung tritt eine entsprechende Spanne zwischen mir und einem der erfahrenen Betrachter dreimal auf. Bei den restlichen Bewertungen beträgt der Unterschied höchstens eine Note. Dies unterstreicht die Aussage, dass die Bewertung regelmäßig von einer gleich bleibenden Person durchgeführt werden sollte.

Zum Vergleich werden nun die durchschnittliche Bewegungsnote und das Mittel der Krümmungswerte im Stehen betrachtet. Zur besseren Zuordnung sind die Noten in unterschiedlichen Farben markiert. Es ist zu erkennen, dass sich bei den Krümmungsgraden der Kühe eine Tendenz andeutet. Die Tiere mit der Bewegungsnote 1 weisen einen Krümmungsgrad von minimal 2,55° und maximal 11,35° auf. Bei der Note 2 handelt es sich um den Bereich von 5,94° bis 11,39° und Note 3 wird durch die Werte 9,68° bis 21,82° repräsentiert. Die Note 4 ist nur einmal vergeben mit einem Wert von 15,18°. Eine Kuh mit der Note 5 tritt aufgrund der guten Gesundheit im Versuchsbetrieb nicht auf.

Tabelle 1: Ausschnitt aus der Ergebnistabelle

Kuh Nr.	Klauen-Pfleger Note	Landwirt Note	Kristin Pils Note	Note Ø	Krümmungsgrad Ø
1	1	1	1	1	5,13
5	1	1	1	1	4,50
6	3	3	3	3	14,00
8	1	1	1	1	3,46
10	3	3	4	3,33	21,82
11	2	2	3	2,33	10,66
12	1	1	1	1	6,06
13	1	1	2	1,33	4,76
23	3	3	4	3,33	9,68
24	1	2	3	2	6,73
30	2	1	2	1,67	10,33
31	1	2	2	1,67	9,47
34	1	2	1	1,33	3,44
35	1	1	1	1	5,99
37	4	3	3	3,33	12,21
39	1	1	1	1	4,64

10 Einteilung der Krümmungsgrade in Kategorien

Ordnet man nun die ermittelten Krümmungsgrade im Stehen den durchschnittlichen Bewegungsnoten der drei Bewertenden zu, so ergibt sich die folgende Tabelle.

Tabelle 2: Einteilung nach Noten

Bewegungsnote 1		Bewegungsnote 2		Bewegungsnote 3		Bewegungsnote 4	
Kuh Nr.	Ø						
1	5,13	11	10,66	6	14,00	74	15,18
5	4,50	14	10,18	10	21,82		
8	3,46	24	6,73	23	9,68		
12	6,06	30	10,33	37	12,21		
13	4,76	31	9,47	42	12,24		
21	5,85	43	10,76	61	10,59		
34	3,44	45	9,03	80	13,09		
35	5,99	60	10,61	89	14,61		
39	4,64	63	10,67	90	12,29		
41	8,75	72	11,39				
48	8,92	88	5,94				
49	6,58						
55	8,73						
57	11,35						
70	8,52						
78	8,41						
82	8,70						
84	8,70						
85	2,55						

Zieht man zwischen den Noten 1 und 2 eine Grenze bei 9°, zwischen Note 2 und 3 bei 12° und zwischen Note 3 und 4 bei 15°, so ergibt sich eine Übereinstimmung bei 34 von 40 Kühen. Dies entspricht 85%. Von den sechs Kühen, die nicht ins diese Einteilung passen, stimmt bei vier Kühen die Note mit einem der Bewertenden überein. Eine weitere Kuh ist trotz intensiver Behandlung seit langen Pfliegeresistent. Lediglich Kuh Nr. 23 passt gar nicht ins Schema.

11 Betrachtung des Verlaufs der Krümmungsgrade

Eine weitere Nutzungsmöglichkeit der ermittelten Krümmungswerte ist die Betrachtung ihres Verlaufs. Dazu dient die Darstellung der Werte unterschiedlicher Zeitpunkte. Es sind deutliche Verschlechterungen und Verbesserungen der einzelnen Kühe sowohl auf den Bildern als auch an den zugehörigen Krümmungswerten zu erkennen. Bei einer

Kuh ist mit bloßem Auge jedoch noch keine Veränderung zu erkennen, obwohl ihr Krümmungsgrad sich verschlechtert hat. Laut **Tabelle 2** hätte sie immer noch eine Bewegungsnote 1. Allerdings lahmt diese Kuh zwei Wochen nach der Ermittlung des Krümmungswertes. Hier könnte man anhand der Tendenz zur Verschlechterung im Vergleich zu vorigen Werten eine Lahmheit frühzeitig erkennen und behandeln um damit auftretende Verluste möglichst gering zu halten.

12 Zusammenfassung

Die Gesundheit des Tierbestandes ist maßgebend für die Wirtschaftlichkeit eines Milchproduktionsbetriebes. Die Erkennung von Lahmheit als Folge von erkrankten Gliedmaßen zur Vermeidung von Ertragsverlusten und zusätzlichen Kosten spielt dabei eine wichtige aber auch zeitaufwendige Rolle.

Die Arbeit zeigt, dass die Aufzeichnung und Auswertung der Rückenhaltung einer Kuh im Stehen mit Hilfe einer WebCam Aufschluss über den Schweregrad der Lahmheit gibt. Dazu wird die Rückenlinie des Tieres detektiert und durch ein Ausgleichspolynom beschrieben. Die Bestimmung der ersten Ableitung in jedem Punkt des zu bewertenden Rückenabschnitts führt zur maximalen positiven und negativen Steigung, deren Differenz den Krümmungsgrad des Rückens ergibt.

Der Vergleich der ermittelten Krümmungswerte mit einer fachmännischen Bewertung zeigt eine deutlich sichtbare Tendenz. Kühe, die mit einer Note 1 bewertet wurden, weisen Krümmungsgrade bis 9° auf, zwischen den Noten 2 und 3 kann eine Grenze bei 12° gezogen werden, Note 4 beginnt bei einem Wert von 15° . Die Übereinstimmung von fachmännischer Bewertung und ermittelten Krümmungsgraden beträgt 85%.

Eine weitere Möglichkeit der Betrachtung ist der Verlauf der ermittelten Krümmungsgrade, bei der die Änderung des Wertes zu einem vorigen Zeitpunkt betrachtet wird.

Die Ergebnisse der Arbeit zeigen, dass eine Weiterentwicklung zu einem System führen kann, welches Zeit- und Kostenersparnis vor allem für Großbetriebe bedeuten würde. Dabei ist es vor allem zur Unterstützung des Landwirts, jedoch nicht als Ersatz einer Beobachtung der Tiere, einzusetzen.

Hyperspektrale Bildanalyse zur frühzeitigen Detektion von Taubährigkeit

Hyperspectral imaging for early detection of Fusarium infection in wheat

Elke Bauriegel¹, Antje Giebel¹, Uwe Schmidt², Martin Geyer¹, Werner B. Herppich¹

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

E-mail: ebauriegel@atb-potsdam.de

² Humboldt-Universität zu Berlin, Landwirtschaftlich-Gärtnerische Fakultät, Fachgebiet Biosystemtechnik, Lentzeallee 55/57, 14195 Berlin, Germany

Kurzfassung: *Fusarium*-Infektionen sind ein ernstzunehmendes Problem im Weizen-, Roggen- und Haferanbau, da die ausgeschiedenen Mykotoxine der Pilze sowohl für die tierische als auch menschlichen Ernährung gesundheitsschädlich sind. Die Krankheitszeichen der durch *Fusarium ssp.* hervorgerufenen Partiellen Taubährigkeit sind durch bildanalytische Methoden im Vorfeld der Ernte deutlich erkennbar. Der Produzent könnte mit den Informationen der Bildanalyse den *Fusarium*-Befall frühzeitig erkennen und das Getreide gegebenenfalls anderen Verwertungsformen zuführen.

In der vorgestellten Arbeit wurden Weizenpflanzen unter Laborbedingungen mit einem hyperspektralen Bildanalysesystem im Spektralbereich von 400-1000 nm untersucht. Unterschiede in distinkten Wellenlängenbereichen lassen die Erkennung kranker Ähren in einem Zeitfenster von BBCH 71 bis BBCH 85 zu. Die bildanalytische Klassifizierung mittels des „Spectral Angle Mapper“ liefert gute Ergebnisse, ist aber aufgrund der Einbeziehung aller spektralen Bänder und dem notwendigen Aufbau von Referenzspektren zur Klassifizierung zeitaufwändig. Die gezielte Verwendung von drei distinkten spektralen Teilbereichen könnte eine gute Klassifizierungsalternative sein. Der abgeleitete head blight-Index (HBI) nutzt die spektralen Unterschiede im Bereich 665-675 nm und 550-560 nm und kann eine feldtaugliche Klassifizierungsmöglichkeit zur Erkennung von Partieller Taubährigkeit sein.

Deskriptoren: *Fusarium culmorum*, Reflexionsmessungen, Spectral Angle Mapper, PCA

Summary: *Fusarium infections are a serious problem in wheat, rye and oat production. Mycotoxins, synthesised by the fungi, are toxic and harmful in both human and animal nutrition. The symptoms of this so-called head blight disease caused by Fusarium ssp. are easily recognizable by various image analysis methods prior to harvest. Using this information farmer could readily utilize affected cereals differently if necessary.*

In the present study healthy and artificially infected wheat plants were analyzed with a hyper-spectral imaging system in the spectral range of 400 to 1000 nm under laboratory conditions. Spectral differences in distinct wave length ranges between affected and unaffected ears of the wheat plants allow recognition of Fusarium infection in a time frame from BBCH 71 to BBCH 85. Imaging classification using "Spectral Angle Mapper" achieves good results. However, this analysis is time-consuming due to the inclusion of all spectral bands and the setting of reference spectra necessary for classification. The specific application of three spectral sub-ranges could be a promising alternative. A derived head blight index (HBI) uses spectral differences in the wave length ranges of 665 to 675 nm and 550 to 560 nm and can be a suitable outdoor classification method for the recognition of head blight.

Keywords: Head blight, *Fusarium culmorum*, reflection measuring, Spectral Angle Mapper, PCA

1 Einleitung

Partielle Taubährickeit, hervorgerufen durch verschiedene Spezies von *Fusarium*-Pilzen, ist ein ernstzunehmendes Problem im Getreideanbau, da die von den Pilzen ausgeschiedenen Mykotoxine sowohl für die tierische als auch menschlichen Ernährung gefährlich sind. Könnten die Krankheitszeichen der Partiellen Taubährickeit (head blight) durch bildanalytische Methoden im Vorfeld der Ernte erkannt werden, könnte der Produzent mit diesen Informationen das Getreide getrennt beernten und gegebenenfalls anderen Verwertungsformen zuführen. Zudem könnten die serologischen Untersuchungen gezielt auf die „taubährickeitskranken“ Gebiete angewandt werden, um dort die tatsächlichen Gehalte an den Mykotoxinen DON, Zealenon und Fumosin zu bestimmen.

Das durch die Krankheit veränderte äußere Erscheinungsbild der Ähre bzw. der Pflanzen lässt sich aufgrund der Veränderung der spektralen Eigenschaften abbilden. Somit wäre die spektrale Bildanalyse für die Erkennung von Partieller Taubährickeit gut geeignet, da sie schnell und nicht-invasiv anzuwenden ist sowie prozesstechnisch keinen weiteren Arbeitsschritt erfordern würde.

Spektrale Untersuchungen dienen seit langem als Hilfsmittel zur Erkennung physiologischer Zustände und zur Chlorophyllbestimmung (LICHTENTHALER 1994) und finden auch in der Fernerkundung Einsatz (BECKER *et al.* 2007). In der Gegenwart ist es eine oft angewandte Methode zur Bestimmung der Nährstoffversorgung bei Pflanzen (LIEBLER 2003), zur Qualitätsbestimmung bei Lebensmitteln insbesondere von Obst und Gemüse (POLDER *et al.* 2002, QUILTZSCH & HOBERG 2003, QUILTZSCH *et al.* 2005, WULF *et al.* 2008) sowie zur Erkennung von Krankheiten (NIELSSON 1995).

Infektionen der Pflanzen verursachen oft Stoffwechselstörungen verbunden mit einem Chlorophyllabbau. Dies führt zu einem veränderten Erscheinungsbild, beispielsweise zu

Läsionen an Blättern, was mittels spektraler Methoden nachweisbar ist. DEVADAS *et al.* (2009) und FRANKE *et al.* (2005) konnten im Bereich bis 1000 nm Rostinfektionen analysieren. MUHAMMED & LARSOLLE (2003) nutzten den Bereich von 360-900 nm, um Blattdürre bei Weizen zu erkennen.

Eine Kombination verschiedener Aufnahmemethoden (spektrale und Fluoreszenzmes- sung) führt bei Gelbrost von Winterweizen zu einer erhöhten Erkennungsgenauigkeit mit nur 5-6% Fehlerquote (BRAVO *et al.* 2004).

In dieser Studie sollte auf der Pflanzenebene mithilfe bildanalytischer Methoden frühzei- tig eine *Fusarium*-Infektion erkannt werden. Ziel war es, herauszufinden, welche Wel- lenlängenbereiche zur Diskriminierung von head blight relevant sind und in welchen Entwicklungsstadien die Krankheitserkennung möglich ist. Mit Kenntnis bzw. Beantwor- tung vorangestellter Fragen sollten Klassifikationsabfolgen und –wege entwickelt wer- den.

2 Material und Methoden

2.1 Pflanzenmaterial

Für die Untersuchungen wurden sowohl Weizenpflanzen genutzt, die unter kontrollier- ten Bedingungen angezogen und künstlich mit *Fusarium culmorum*-Sporen infiziert wurden als auch im Feld durch Besprühung infizierte Pflanzen.

Die Gewächshauspflanzen (Sorte „Taifun“) wurden in Töpfen ausgesät und angezogen (18 cm x 18 cm, je 16 Weizenkörnern, je 4 Töpfe für Kontrollen und inokulierte Weizen- pflanzen). Die Pflanzen wurden mit einem Erregergemisch des Stammes *Fusarium culmorum* mit einer Sporendichte von 250 000 Sporen ml⁻¹ an drei aufeinanderfolgen- den Tagen mit Beginn der Blüte besprüht. Um den Inokulationserfolg zu garantieren, wurden die Pflanzen bei 20 ± 2°C, hoher Luftfeuchte (70%) und einer Beleuchtungszeit von 12 h (Natrium-Hochdruck-Dampflampe, SON-T Plus 400 W, Philips GmbH, Ham- burg, Germany) gehalten. Die Messungen starteten unmittelbar nach der Inokulation.

Im Feldversuch wurden Pflanzen der Sortenresistenzversuche des JKI Braunschweig genutzt, die durch künstliche Sprühinfektion mit dem Stamm *Fusarium culmorum* typi- sche head blight Symptome zeigten.

2.2 Hyperspektraler Messplatz

Unter Laborbedingungen wurde mittels eines hyperspektralen Messplatzes das Reflexi- onsspektrum in einem Wellenlängenbereich von 400–1000 nm aufgenommen. Die Hy- perspektralkamera besteht aus dem Spektrographen (ImSpector V10E der Fa. Specim, Oulu, Finnland) einer s/w-Kamera (Pixelfly qe, PCO, Kelheim, Germany), einem zuge- hörigen Rotationsspiegel (ansteuerbar mit einem microstep Motor) und der Software

HyBiS 1.0. Die Spektren aller Pixel eines Bildes wurden zeilenweise mit einer spektralen Auflösung von 2,5 nm aufgenommen. HyBiS 1.0 wurde mittels LabView 8.2 (Fa. National Instruments, Austin, Tex.) entwickelt. Das Programm steuert das Kamerasystem und dient der Vorverarbeitung der Daten incl. des s/w-Abgleichs der Spektren. Die Proben wurden mit einer stabilisierten Halogenlampe mit 150 W belichtet (3900 Lichtquelle mit 9155 CL Linienbeleuchtung, 16“ Linienlicht, Zeutec Opto-Elektronik GmbH, Rendsburg, Germany).

2.3 Versuchsdurchführung

Der Entwicklungszustand und der Befallsgrad der Weizenpflanzen wurde nach WALTHER *et al.* (2000) bonitiert.

Zur spektralen Messung wurden die Pflanzen im Abstand von ca. 50 cm vor der Kamera platziert. Die Ähren wurden an einem schwarzen Mousepad fixiert, um diese unverdeckt und geschützt vor Verwacklungen aufzunehmen.

Die Messungen wurden unmittelbar nach Inokulation (BBCH-Stadium 65) dreimal wöchentlich bis zur Reife (BBCH-Stadium 89) durchgeführt. Zusätzlich wurden Digitalfotos gemacht, um den Verlauf der Erkrankung zu dokumentieren.

2.4 Datenauswertung

Die weitere Analyse der Aufnahmen erfolgte im Softwareprogramm ENVI (Research Systems Inc., Boulder, CO, USA). Zunächst wurden in ENVI die Spektren gesunder und kranker Gewebebereiche pixelweise ermittelt und in einer spektralen Bibliothek abgelegt. Dort gingen sowohl Spektren der Labor- als auch der Feldpflanzen ein, um die Variabilität der Pflanzen zu berücksichtigen.

Aus den hyperspektralen Bildaufnahmen mit dem oben angegebenen Pflanzenmaterial wurden schließlich 104 Einzelspektren extrahiert, die für die Bewertung der relevanten Wellenlängenbereiche genutzt werden konnten. Zur Einschätzung der Trennbarkeit der Spektren in der Zeitreihe wurden 292 Spektren kranker und 80 Spektren gesunder Gewebebereiche erfasst. Diese wurden getrennt zu jedem der 8 Messtermine an Trainingsbildern erhoben.

Die Spektren wurden geglättet, d. h. die Werte wurden verdichtet, verdünnt und eine zentrierte gleitende Mittelwert-Glättung über 11 Werte berechnet. Danach wurden daraus summenkorrigierte Spektren erzeugt. Anschließend wurde die erste Ableitung gebildet. Alle Berechnungsschritte wurden mit SAS 9.13 (SAS Institute Inc., Cary, NC, USA) durchgeführt.

3 Ergebnisse und Diskussion

3.1 Ermittlung relevanter Wellenlängenbereiche zur Erkennung partieller Taubährigkeit

Aus den 104 Einzelspektren gesunder und kranker Gewebereiche lassen sich typische mittlere Spektren darstellen. Spektren der gesunden Pflanzen bzw. Gewebereiche haben aufgrund des Chlorophyllgehaltes ein Reflexionsminimum im Bereich zwischen 670-700 nm. In diesem Bereich absorbiert Chlorophyll besonders viel Licht. Geschädigte Pflanzen zeigen aufgrund des abgebauten Chlorophylls hingegen eine erhöhte Reflexion im Bereich der Chlorophyll-Absorptionsbanden. Das flächenanteilig gering auftretende rote Pilzmyzel an der Oberfläche der kranken Ährchen wurde als separates Spektrum aufgenommen. Dieses Spektrum zeigt einen starken Anstieg im Bereich 525-560 nm, verläuft aber ab 610 nm fast parallel zu den Spektren kranker Pflanzen.

Um die Frage zu klären, welche Wellenlängen für die Unterscheidung head blight erkrankter Gewebereiche relevant sind, wurden alle 104 Einzelspektren nach Vorverarbeitung einer Hauptkomponentenanalyse (PCA) unterzogen. Von den vorgegebenen maximal fünf Hauptkomponenten trennt die erste (PC1) gesunde und kranke Objekte in zwei Gruppen und erklärt 50% der Varianzen der Daten (**Abbildung 1**).

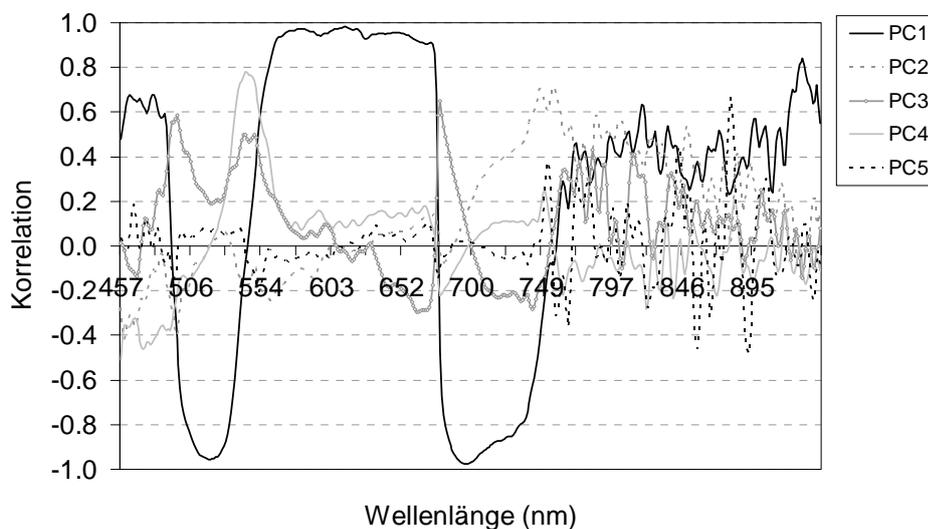


Abbildung 1: Die Komponente PC 1 zeigt von allen Komponenten die höchsten Korrelationen

Aus den mittels PCA gewonnenen Faktorladungen der PC 1 konnten mithilfe eines sehr hoch festgelegten Faktorladungswert von $>0,8$ die speziellen Wellenlängenbereiche: 500-533 nm, 560-675 nm und 682-733 nm für die Unterscheidung gesunder und kranker Ährenbereiche identifiziert werden. Für den Bereich 927-931 nm ist die Aussage mit Unsicherheiten behaftet, da der Kamerasensor des hyperspektralen Bildscanners in diesem Wellenlängenbereich nicht mehr sensitiv genug ist.

Die Unterscheidung kranker und gesunder Gewebebereiche ist möglich, da die gesunden, chlorophyllhaltigen Gewebeteile, im Gegensatz zu den befallenen, eine deutlich ausgeprägte spektrale Signatur besitzen. Auch die Ausprägung des roten Pilzmyzels auf der Oberfläche der abgestorbenen Ährchen wurde durch die PCA den kranken Gewebebereichen zugeordnet.

3.2 Verwendung relevanter Wellenlängenbereiche zur Klassifizierung von head blight

Um den Klassifizierungsalgorithmus möglichst einfach zu gestalten, wurden nun die vier gefundenen Wellenlängenbereichen untersucht, wo die größten Unterschiede in der spektralen Kurve liegen. Der Wellenlängenbereich zwischen 570-680 nm zeigt bei gesunden Pflanzen einen fallenden, bei kranken Pflanzen einen ansteigenden Spektrenverlauf.

Bei dem gebildeten head blight-Index wurde die Differenz der Anfangs- (665-675 nm) und Endpunkte (550-560 nm) gebildet. Dadurch werden die *Fusarium*-erkrankten Ähren sowohl von den gesunden Ähren als auch vom Hintergrund sehr gut getrennt.

Alle Hintergrundpixel besitzen einen Grauwert von ca. 0. Die gesunden Gewebebereiche besitzen Grauwerte von <0 bis ca. -8000, die kranken Gewebeteile erscheinen weiß und unterscheiden sich sowohl vom Hintergrund als auch von den gesunden Gewebebereichen mit einem Grauwert >0. Alle kranken Bereiche werden somit bei einem Grauwert >0 identifiziert, wobei ein Schwellenwert -500 gesetzt wurde, um kleinere fehlklassifizierte Pixel auszuschalten.

In Auswertung aller Bilder werden die bonitierten head blight-Befallsraten bis BBCH-Stadium 79/81 akkurat getroffen bzw. eher überbewertet. Mit zunehmender Reife (BBCH 81/85) wird der Befallsgrad bei der Klassifizierung eher unterbewertet und differierte an zwei Aufnahmetagen um mehr als 20%.

Bei der Klassifizierung der Kontrollen wurden sehr gute Ergebnisse erreicht. Hier wurde max. 2% als krank eingestuft, was auch die tatsächliche Realität widerspiegelt. Die Kontrollen zeigten teilweise leichte Entwicklungsstörungen.

BAURIEGEL *et al.* (2009) konnten mit dem Klassifizierungsalgorithmus SAM sehr gute Detektionsergebnisse erzielen. Dennoch, feldtauglich ist die Aufnahme und bildanalytische Verarbeitung von 512 Bändern nicht.

Ziel war es, mit einem schnelleren Algorithmus möglichst nahe an die sehr guten Klassifizierungsergebnisse des SAM zu kommen. Während der SAM alle 512 Bänder berücksichtigt, kommt der HBI mit nur 20 nm Berechnungsgrundlage aus (665-675 nm und 550-560 nm).

In **Abbildung 2** wurden die bonitierten Befallsgrade und die mittels HBI bzw. SAM klassifizierten Befallsgrade aufgetragen.

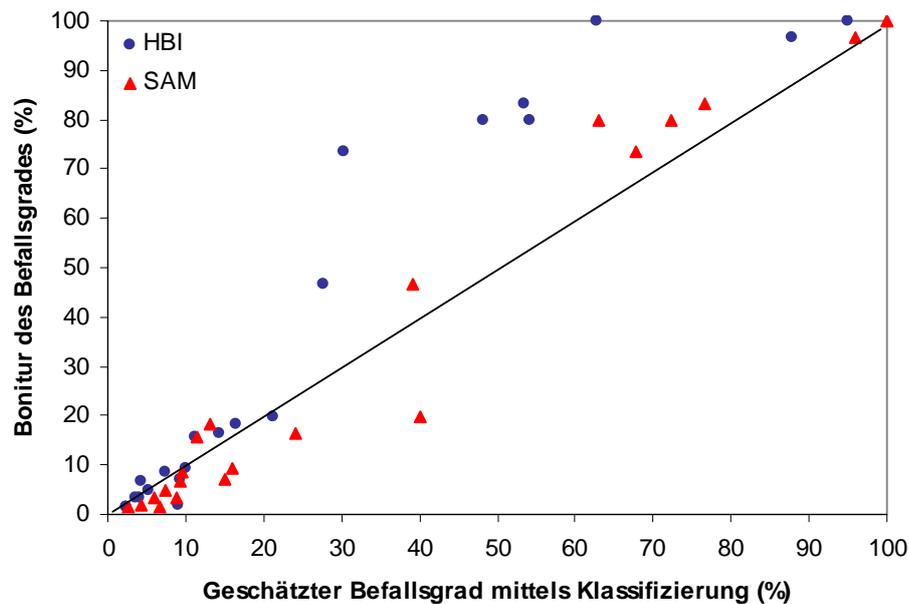


Abbildung 2: Übereinstimmung der bonitierten Befallsraten mit zwei Klassifizierungsansätzen: HBI und SAM

Mithilfe der Berechnung der Residuen wurde die Güte der zwei Klassifizierungsmethoden bestimmt (**Abbildung 3**). 68% (HBI-Methode) bzw. 87% (SAM-Methode) liegen im Bereich der $\pm 10\%$ Abweichung. Die größten Abweichungen treten in den stärkeren Befallsgraden jenseits 50% auf.

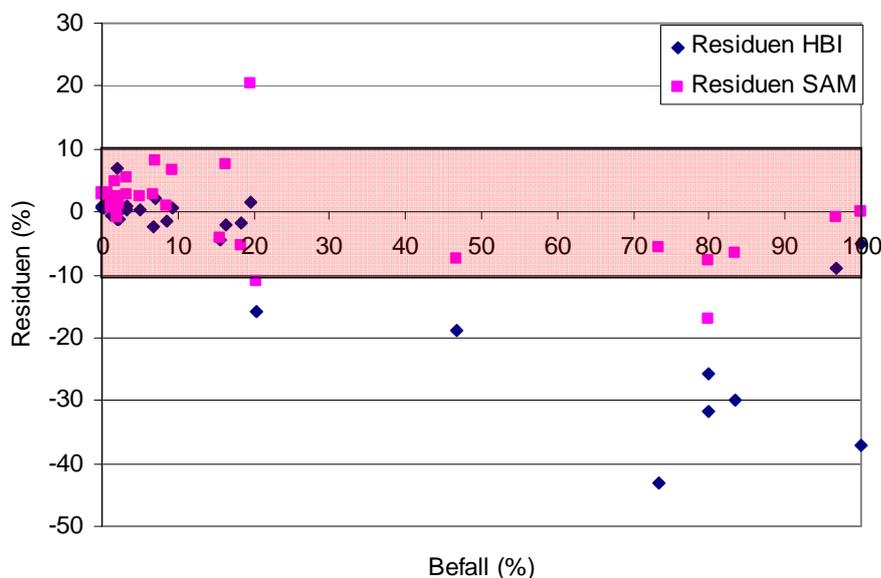


Abbildung 3: Güte der Klassifizierungsergebnisse von HBI und SAM mittels Analyse der Residuen

3.3 Klassifizierung von head blight in verschiedenen Entwicklungsstadien der Weizenpflanzen

In diesem Zeitreihenversuch wurden zu jedem der 8 Messtermine Spektren der gesunden und kranken Areale erhoben. Diese 292 Spektren kranker und 80 gesunder Ährenbereiche wurden, wie im Kap. Material und Methoden beschrieben, vorverarbeitet und anschließend einer PCA unterzogen. Auch hier reicht zur Unterscheidung von kranken und gesunden Gewebebereichen die PC1.

Krankes und gesundes Gewebe sind in den Entwicklungsstadien 71-85 gut trennbar. Es gibt aber zwei Zeitpunkte, wo keinerlei Trennung zwischen gesundem und krankem Gewebe möglich ist. Kurz nach Infektion (BBCH 65) ist die Unterscheidung aufgrund des noch nicht sichtbaren Befalls nicht gegeben. Auch im BBCH-Stadium 89 (Reife) kommt es zur Angleichung der Spektren. Allerdings werden jetzt die gesunden Bereiche aufgrund des mit der Reife verbundenen Chlorophyllabbaus als krank eingestuft.

4 Zusammenfassung

Der aufgenommene Bereich zwischen 400-1000 nm ist für die Erkennung Partieller Taubährigkeit ausreichend. Mittels Prinzipieller Komponentenanalyse (PCA) konnten die Wellenlängenbereiche 500-533 nm, 560-675 nm, 682-733 nm bzw. 927-931 nm zur Unterscheidung von Spektren kranker und gesunder Ährenbereiche gefunden werden.

Eine Erkennung der *Fusarium*-Infektion kurz nach Blüte (BBCH 65) bzw. in der Vollreife (BBCH 89) ist nicht möglich. Es bleibt aber ein Zeitfenster vom BBCH-Stadium 71 bis 85, in dem die Erkennung aufgrund spektraler Unterschiede zwischen gesunden und kranken Gewebebereichen möglich ist. Der beste Erkennungszeitpunkt ist das BBCH-Stadium 75.

Mittels Bildanalysemethode „Spectral Angle Mapper“ (SAM) wird der Befallsgrad unter Berücksichtigung eines Boniturfehlers von 10% zu 87% richtig klassifiziert. Wegen des hohen zeitlichen und Rechenaufwandes mit 512 Bändern sowie Setzung der richtigen Objektklassen (ROIs) ist diese Methode aber z. Zt. nicht praxistauglich.

Basierend auf statistischen Analysen wurden Wellenlängenbereiche gefunden, die zwischen gesunden und erkrankten Ährenbereichen verschieden sind. Daraus wurde ein spezieller Index (HBI, Head Blight Index) erstellt, der zur Erkennung der Partiellen Taubährigkeit an Weizenähren nur 20 nm benutzt und damit gute Klassifizierungen erreicht. Die Trefferquote im gesamten Zeitraum (BBCH 65 bis 89) liegt bei 67%. Unter Berücksichtigung des optimalen Klassifizierungszeitpunktes kann die Genauigkeit der Detektion mit diesem Index um ein Vielfaches erhöht werden.

Literatur

- BAURIEGEL E., BEUCHE H., DAMMER K.H., GIEBEL A., HERPPICH W.B., INTREß J., RODEMANN B. (2009):** Detection of head blight (*Fusarium spp.*) at ears of winter wheat using hyperspectral and chlorophyll fluorescence imaging. In: VAN HENTEN, E. J., GOENSE, D., LOKHORST, C. (Eds.), Precision Agriculture '09. Proceedings of the Joint International Agricultural Conference. Academic Publishers, Wageningen, pp. 203-210
- BRAVO C., MOSHOU D., OBERTI R., WEST J., MCCARTNEY A., BODRIA L., RAMON H. (2004):** Foliar disease detection in the field using optical sensor fusion. Agricultural Engineering International: the CIGR Journal of scientific research and development. Manuscript FP 04 008. Vol. 6, 14 p. Proceedings of the Joint International Agricultural Conference. Wageningen, NL: Academic Publishers
- BECKER B.L., LUSCH D.P., QI J. (2007):** A classification-based assessment of the optimal spectral and spatial resolutions for Great Lakes coastal wetland imagery. Remote Sensing of Environment 108: 111-120
- DELWICHE S.R. (2003):** Classification of scab- and other mold-damaged wheat kernels by near-infrared reflectance spectroscopy. Transactions of the ASAE 46(3): 731-738
- DEVADAS R., LAMB D.W., SIMPFENDORFER S., BACKHOUSE D. (2009):** Evaluating ten spectral vegetation indices for identifying rust infection in individual wheat leaves. Precision Agriculture 10(6): 459-470, DOI 10.1007/s11119-008-9100-2
- DOWELL F.E., RAM M.S., SEITZ L.M. (1999):** Predicting scab, vomitoxin, and ergosterol in single wheat kernels using near-infrared spectroscopy. Cereal Chemistry 76(4): 573-576
- ENVI TUTORIAL:** Selected Hyperspectral Methods. www.creaso.com
- FRANKE J., MENZ G., OERKE E.-C., RASCHER U. (2005):** Comparison of multi- and hyperspectral imaging data of leaf rust infected wheat plants. In OWE, M. & D'URSO, G. (Eds.), Remote sensing for agriculture, ecosystems and hydrology VII. Proceeding of SPIE Vol. 5976, pp. 349-359
- LICHTENTHALER H.K. (1994):** Spektroskopische Eigenschaften von Pflanzen und ihre Nutzung zur Fernerkundung der Vegetation. Fridericiana 49: 25-45
- LIEBLER J. (2003):** Feldspektroskopische Messungen zur Ermittlung des Stickstoffstatus von Winterweizen und Mais auf heterogenen Schlägen. Verlag Utz, Herbert
- MUHAMMED H.H., LARSOLLE A. (2003):** Feature vector based analysis of hyperspectral crop reflectance data for discrimination and quantification of fungal disease severity in wheat. Biosystems Engineering 86: 125-134
- NILSSON H.-E. (1995):** Remote sensing and image analysis in plant pathology. Annual Review of Phytopathology 15: 489-527
- PEIRIS K.H.S., PUMPHREY M.O., DOWELL F.E. (2009):** NIR absorbance characteristics of deoxynivalenol and of sound and *Fusarium*-damaged wheat kernels. Journal of Near Infrared Spectroscopy 17: 213-221
- POLDER G., VAN DER HEIJDEN G.W.A.M., YOUNG I.T. (2002):** Spectral image analysis for measuring ripeness of tomatoes. Transactions of the ASAE 45(4): 1155-1161
- POLDER G., VAN DER HEIJDEN G.W.A.M., WAALWIJK C., YOUNG I.T. (2005):** Detection of *Fusarium* in single wheat kernels using spectral imaging. Seed Science and Technology 33: 655-668
- QUILITZSCH R., HOBERG E. (2003):** Fast determination of apple quality by spectroscopy in the near infrared. Journal of Applied Botany 77: 172-176

- QUILITZSCH R., BARANSKA M., SCHULZ H., HOBERG E. (2005):** Fast determination of carrot quality by spectroscopy methods in the UV-VIS, NIR and IR range. *Journal of Applied Botany and Food Quality* 79: 163-167
- WALTHER U., FLATH K., MOLL E., PROCHNO J., SACHS E. (2000):** Methodische Anleitung zur Bewertung der partiellen Resistenz von Sorten bzw. Linien unter Berücksichtigung epidemiologischer Aspekte. *Mitteilungen der Biologischen Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft* 374: 9-25
- WIWART M., KOCZOWSKA I., BORUSIEWICZ A. (2001):** Estimation of *Fusarium* head blight of Triticale using digital image analysis of grain. In: SKARBEK W. (Ed.): *Computer Analysis of Images and Patterns 2124*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, pp. 563-569
- Wulf J.S., Rühmann S., Regos I., Puhl I., Treutter D., Zude M. (2008):** Nondestructive application of laser-induced fluorescence spectroscopy for quantitative analyses of phenolic compounds in strawberry fruits (*Fragaria x ananassa*). *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 56: 2875-2882

Röntgen-Synchrotron Computer-Tomographie zur zerstörungsfreien Analyse der funktionellen Pflanzenanatomie

Synchrotron x-ray computer tomography to non-invasively analyse the functional plant anatomy

Uzuki Matsushima¹, Wolfgang Graf², Simon Zabler³, Ingo Manke⁴, Martin Dawson⁴, Gerard Choinka⁴, Werner B. Herppich⁵

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

² Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V., Bartningstraße 49, 64289 Darmstadt, Germany

³ Technische Universität Berlin, Werkstofftechnik, EB 13, Straße des 17. Juni 135, 10623 Berlin, Germany

⁴ Institut für Angewandte Materialforschung Helmholtz-Zentrum Berlin für Materialien und Energie GmbH, Hahn-Meitner-Platz 1, 14109 Berlin, Germany

⁵ Leibniz-Institut für Agrartechnik Potsdam-Bornim e. V., Abteilung Technik im Gartenbau, Max-Eyth-Allee 100, 14469 Potsdam, Germany
E-Mail: wherppich@atb-potsdam.de

Kurzfassung: Das "Bent-neck"-Syndrome verursacht bei Schnittrosen jedes Jahr hohe ökonomische Verluste. Es ist möglicherweise auf eine Störung der Wasserversorgung und/oder strukturelle Schwächen des Festigungsgewebes im Blütenstiel zurückzuführen. Um die zugrunde liegenden Mechanismen vollständig verstehen zu können, ist die genaue Kenntnis der funktionellen Pflanzenmikroanatomie wichtig. Die Phasenkontrast Röntgen-Synchrotron Computer-Tomographie erlaubt derartige Untersuchung bei hoher Auflösung bis auf die Einzelzellebene, ohne das Objekt vorbehandeln zu müssen. An drei Schnittrosensorten (*Rosa hybrida* L.), die sich ausgeprägt in ihrer „Bent-neck“-Empfindlichkeit unterscheiden ('Akito', hoch; 'Milva', moderat; 'Red Giant', gering), wurden an der BAMline von BESSY (Helmholtz-Zentrum Berlin für Materialien und Energie) Röntgen-Synchrotron Computertomographie Messungen durchgeführt. Die Rosen wurden mit Röntgenstrahlung unterschiedlicher Energie (30, 40, 50 bzw. 60 keV) bestrahlt, um die Qualität der Aufnahmen bzw. den Grad der Gewebebeeinflussung durch die Strahlung zu bewerten. Mit Chlorophyllfluoreszenz-Bildanalyse und optischer Mikroskopie wurden allerdings zum Teil beträchtliche Beschädigungen des bestrahlten Gewebes nachgewiesen.

Deskriptoren: Bent-neck" Syndrom, Chlorophyllfluoreszenzanalyse, Mikroanatomie, Phasenkontrast

Summary: *"Bent-neck" syndrome, a postharvest problem of cut roses that causes enormous economic losses every year, probably results from disturbance of water supply and/or structural weakness of vascular bundles of peduncle tissues. To better understand the mechanisms underlying bent-neck, phase-contrast synchrotron x-ray CT was successfully applied on three rose (Rosa hybrida L.) cultivars largely differing in bent-neck susceptibility ('Akito', high; 'Milva', moderate; 'Red Giant', low). Synchrotron x-ray CT enables the non-invasive in-situ analysis of functional micro structures of peduncles at high spatial resolutions. To optimize the quality of measurement roses were treated with monochromatic x-ray radiation of different energy. Nevertheless, chlorophyll fluorescence analysis and optical microscope imagery revealed serious damage of the irradiated regions by synchrotron x-rays.*

Keywords: *Bent-neck syndrome, chlorophyll fluorescence analysis, micro anatomy, phase contrast*

1 Einleitung

Die Mikrostrukturen pflanzlicher Gewebe verändern sich während Entwicklung und Seneszenz. Die genaue Kenntnis dieser Veränderungen ist wichtig, um die diesen Prozessen zugrunde liegenden Mechanismen vollständig zu verstehen. Dies wiederum ist essentiell, da diese Veränderungen die Qualität und die Haltbarkeit von gartenbaulichen Produkten beeinflussen können (GRAF *et al.* 2006). Entsprechend ist eine kontinuierliche, zerstörungsfreie Analyse pflanzlicher Mikrostrukturen wünschenswert. Phasenkontrast Synchrotron-Röntgenmikrotomographie kann für diese Zwecke eine geeignete Methode sein, da deren hohe Auflösung die Untersuchung der Produktstruktur bis auf die Einzelzellebene erlaubt, ohne das Objekt vorbehandeln zu müssen (LEE & KIM 2008, MENDOZA *et al.* 2007, MATSUSHIMA *et al.* 2009a).

Die Röntgen-Synchrotron Computer-Tomographie wurde genutzt, um bei 3 Rosensorten mit deutlich unterschiedlicher „Bent-neck“-Empfindlichkeit die Blütenstielgewebestruktur zu untersuchen. Das „Bent-neck“-Syndrom ist bei Schnittrosen ein wichtiges Nachernteproblem, das jedes Jahr hohe Verluste für die Produzenten von Schnittrosen bedeutet. Bei empfindlichen Pflanzen biegt sich der Blütenstiel direkt unter der Blüte wodurch die Rose frühzeitig ihre Qualität verliert. Wie Untersuchungen von hydraulischer Leitfähigkeit und Transpiration zeigten, beruht dieser Effekt möglicher Weise auf einer unzureichenden Wasserversorgung und/oder strukturellen Schwächen der Leitbündelgewebe der Blütenstiele (GRAF *et al.* 2009, MATSUSHIMA *et al.* 2009b).

Mit Hilfe der Synchrotron-Mikrotomographie konnten in-situ hoch aufgelöste 3-D Abbildungen der intakten Innenstruktur der Rosenblütenstiele erhalten werden. Die hier erarbeiteten Ergebnisse zeigen deutlich, dass die Auflösung der Synchrotron-Aufnahmen groß genug ist, um die komplexe Gewebestruktur der Rosenblattstiele zu untersuchen.

So konnte die Verteilung und das Volumen der luftgefüllten Gewebebereiche rasch und exakt erhalten werden. Allerdings führt die hohe Röntgenstrahlendichte während der Messungen zeitverzögert zu Gewebeerstörung, wie mittel Chlorophyllfluoreszenz-Bildanalyse und mikroskopischer Untersuchung gezeigt werden konnte. Für eine weitgehend zerstörungsfreie Analyse muss die Anwendung der Röntgen-Synchrotron Technik weiter optimiert werden.

2 Material und Methoden

Synchrotron-Röntgenmikrotomographie Messungen wurden an der BAMline von BESSY (Elektronenspeicherring BESSY II, Helmholtz-Zentrum Berlin für Materialien und Energie, Berlin, Adlershof) durchgeführt. Der experimentelle Aufbau ist in **Abbildung 1** aufgezeigt. Es wurde das Phasenkontrastverfahren genutzt, das Messungen bei hohen Energien und gleichzeitig niedrigen Gesamtstrahlungsdosen erlaubt. Der Kantenverstärkungseffekt, der auf die teilweise Kohärenz der Synchrotronstrahlung beruht, ermöglicht die deutliche Unterscheidung der verschiedenen pflanzlichen Gewebe, obwohl diese nur geringe Dichteunterschiede aufweisen.

Für die *in-situ* Untersuchungen der relevanten sortenspezifische Mikrostrukturen wurden drei Schnittrosensorten (*Rosa hybrida* L.) genutzt, die sich ausgeprägt in ihrer Bent-Neck-Empfindlichkeit unterscheiden ('Akito': hohe Empfindlichkeit, 'Milva': moderate empfindlich; 'Red Giant': geringe Empfindlichkeit; Graf *et al.* 2006). Die Pflanzen wurden in einem Gewächshaus des Institutes für Gartenbauwissenschaften der Humboldt Universität zu Berlin unter kontrollierten Bedingungen (20°C Lufttemperatur, 50-80% rF; 140 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ minimale Photonenflussdichte für 18 h; Tröpfchenbewässerung) angezogen (GRAF *et al.* 2009).

Zur Vermeidung von Aufheizung und starker Wasserverluste der bestrahlten Gewebebereichen wurden die untersuchten Stängelabschnitte während der Experimente in wassergefüllten Glasbehältern aufbewahrt (**Abbildung 1**). Die Rosen wurden mit monochromatischer Röntgenstrahlung unterschiedlicher Energie (30, 40, 50 bzw. 60 keV) bestrahlt, um die Qualität der Aufnahmen zu optimieren bzw. den Grad der Gewebebeeinflussung durch die Strahlung zu minimieren. Die genutzte CCD-Kamera (Nikonobjektiv 1:18, f = 180 mm) hatte eine Auflösung von 2048 x 2048 Pixel bzw. eine räumliche Auflösung von $20 \cdot (50/180) \mu\text{m}$.

Ein Chlorophyllfluoreszenz Bildanalyse-System (FluorCAM MF 740, PSI, Brno, Tschechische Republik; MATSUSHIMA *et al.* 2008) wurde genutzt, um direkt parallel zu den Synchrotron-Röntgenmikrotomographie Messungen die möglichen Gewebeerstörungen zu erfassen. Die Chlorophyllfluoreszenzanalyse erlaubt nicht-invasiv Aussagen über die Effizienz und Integrität der Photosynthese der untersuchten Pflanzen zu gewinnen. Speziell der Faktor F_v/F_m ist in diesem Zusammenhang ein guter Indikator (VON

WILLERT *et al.* 1995). Nach Abschluss der Messungen wurden außerdem Frischschnitte der bestrahlten Stängelbereiche unter dem Lichtmikroskop untersucht.

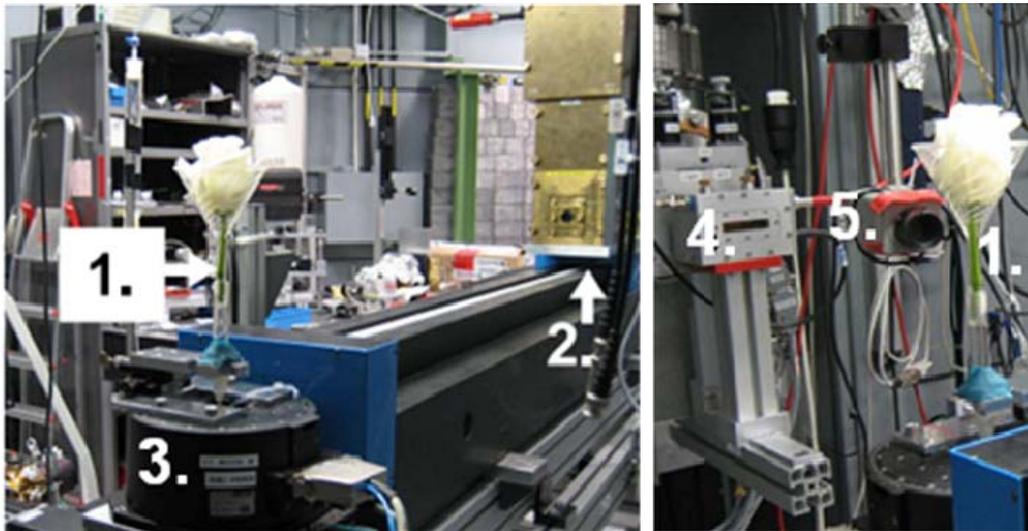


Abbildung 1: Genereller Aufbau des Synchrotron-Röntgenmikrotomographiemessplatzes an der BAMline von BESSY II (HZB, Berlin). 1) wassergefüllter Behälter mit Probe, 2) CCD Kamera für Röntgenbildanalyse 3) Rotationstisch, (4 Spalt, 5) CCD-Kamera für Chlorophyllfluoreszenzanalyse.

3 Ergebnisse und Diskussion

Wie in **Abbildung 2** ersichtlich, ermöglicht die Synchrotron-Röntgenmikrotomographie klare und deutliche hochaufgelöste Aufnahmen der Strukturen der Leitbündelelemente und der Markparenchymzellen des Blütenstiels einer Rose der Sorte 'Akito'. Dies belegt, dass diese Methode sehr gut geeignet ist, um mit ausreichend hoher räumlicher Auflösung in-situ auch komplexe Pflanzengewebe zu untersuchen.

Dementsprechend wurde die Synchrotron-Röntgenmikrotomographie für die Analyse der Hypothese eingesetzt, dass das spezifische Auftreten bzw. der Mechanismus des Bent-Neck-Syndroms bei den verschiedenen Rosensorten von strukturellen Unterschieden in den Leitbündeln abhängig ist (MATSUSHIMA *et al.* 2010). Wohl zum ersten Mal konnte mit der Synchrotron-Röntgenmikrotomographie die Verteilung und das Volumen von Embolien bzw. luftgefüllter Gewebereiche im Mark (**Abbildung 3 A-1**) von 'Akito' bzw. im Xylem von 'Milva' (**Abbildung 3 A-2**) direkt visualisiert und näher untersucht werden. Bei diesen beiden Sorten ist die unterschiedliche Embolieempfindlichkeit eine wichtige, die Bent-Neck-Empfindlichkeit bestimmende Eigenschaft, die sich auch unmittelbar auf den Wasserzustand des Blütenstielgewebes auswirkt (MATSUSHIMA *et al.* 2010).

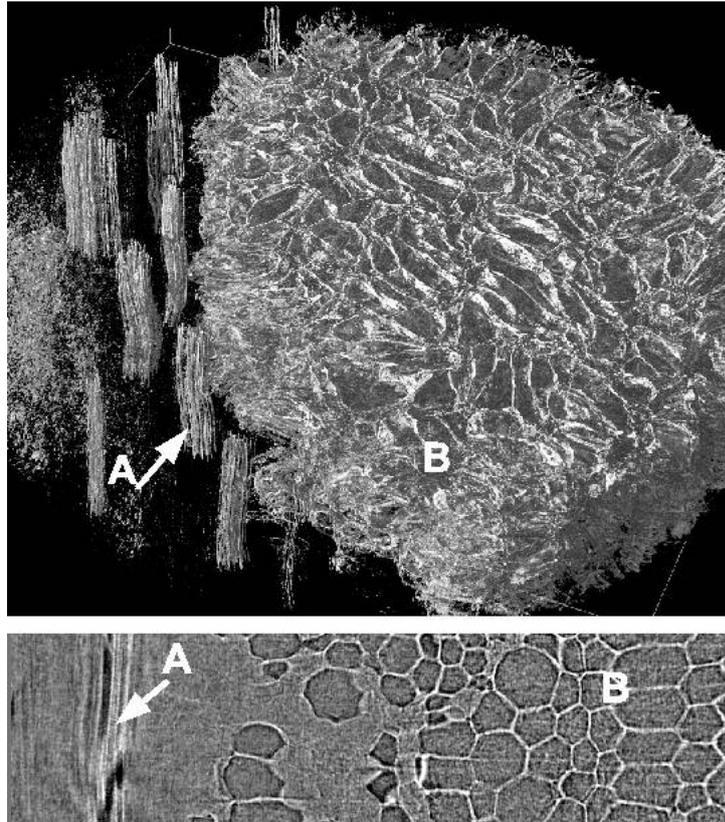


Abbildung 2: 3D-Synchrotron-Röntgenmikrotomographie-Aufnahme und vertikaler Teilschnitt des Blütenstiels einer Rose der Sorte 'Akito'. A: Leitbündel, B: Parenchymzellen

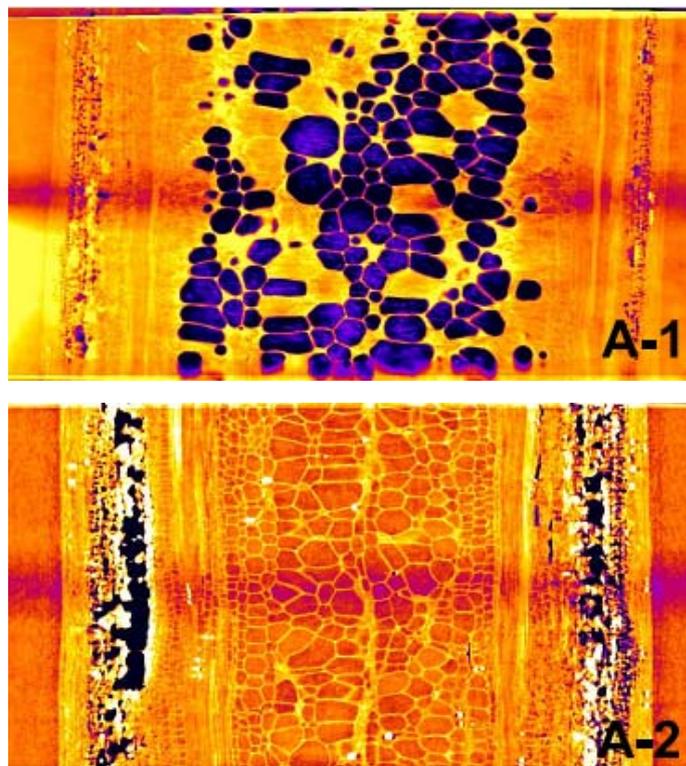


Abbildung 3: Visualisierung von Embolien. Verteilung und Volumen luftgefüllter Gewebebereiche (dunkel) im Mark (A-1; 'Akito') bzw. im Xylem (A-2; 'Milva')

Die in diesen Versuchen angewandte Synchrotron-Röntgenmikrotomographie mit monochromatischer Synchrotron-Röntgenstrahlung erzeugt Bilder von hoher Qualität. Die Variation der Strahlungsenergie im Bereich von 30 bis 60 keV erbrachte keine weitere signifikante Optimierung der Bildqualität. Allerdings zeigte die parallel zur Computertomographie durchgeführte Chlorophyllfluoreszenzbildanalyse auf, dass mit größerer zeitlicher Verzögerung zunehmend deutliche Schädigungen des bestrahlten Gewebes auftreten (**Abbildung 4**). Während auch 1 Stunde nach der Bestrahlung der Stängelbereich noch vollkommen intakt ist und eine hohe potentielle Photosyntheseaktivität zeigt (hoher F_v/F_m), ist nach 10 Stunden genau der bestrahlte Bereich völlig inaktiv ($F_v/F_m < 0,3$; VON WILLERT *et al.* 1995). Nach dieser Zeit konnten die bestrahlten Stellen auch schon mit bloßem Auge durch Braunfärbung der Epidermis erkannt werden. Dieser Teil des Stängels war dann sehr empfindlich und zerbrach teilweise schon bei der Präparation der Frischschnitte für die lichtmikroskopische Untersuchung (**Abbildung 5**). Besonders deutlich waren die Braunverfärbungen primär im Bereich der Epidermis und der Leitbündel. Die Wahl der Energie der Röntgenstrahlung sowie die Dauer der Behandlung hatten dabei einen großen Einfluss auf das Ausmaß der Schädigung. Beide Parameter bieten allerdings noch großen Spielraum für eine weitere Optimierung der Methode um die Synchrotron-Röntgenmikrotomographie auch für sensitives biologisches Material zu einer echt zerstörungsfreien 3-D Analysemethode werden zu lassen.

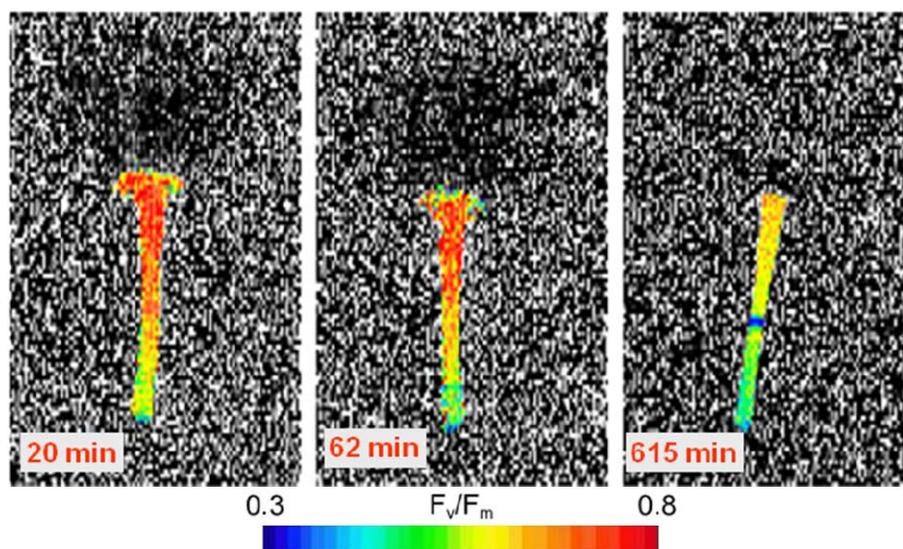


Abbildung 4: Zeitliche Entwicklung der Schädigung des bestrahlten Stängelabschnittes ('Red Giant', 30 keV), nachgewiesen als Abnahme der maximalen photochemischen Effizienz (F_v/F_m).



Abbildung 5: Quer- und Längsschnitt des bestrahlten Stielabschnittes mehrere Stunden nach der Behandlung. Das Gewebe in diesen, vom unbestrahlten grünen Gewebe (a) deutlich (b) abgesetzten braunen Bereichen (c) war sehr zerbrechlich

4 Schlussfolgerung

Die Synchrotron-Röntgenmikrotomographie ermöglicht hoch aufgelöste Aufnahmen der Gewebestrukturen intakter Blütenstiele. Damit ist diese Technik sehr gut geeignet, in-situ 3-D Bilder zur Analyse der funktionellen Pflanzenmikroanatomie zu erstellen.

Allerdings schädigte in diesen Versuchen die genutzte Röntgenstrahlung zeitverzögert die untersuchten Gewebe. Speziell im Bereich der Epidermis und der Leitbündel kam es zu starken Verbräunungen.

Für vollständig zerstörungsfreie Analysen pflanzlicher Gewebe unter Beibehaltung der hohen Auflösung muss die Technik der Synchrotron-Röntgenmikrotomographie noch weiter optimiert werden.

Literatur

- GRAF W., HUYSKENS-KEIL S., HERPPICH W.B., GRÜNEBERG H. (2006):** Impact of water status, biochemical and mechanical product properties on bent neck occurrence in cut roses. Proceedings of the Fifth Plant Biomechanics Conference, Stockholm, August 28 – September 1, 2006: 365-370
- GRAF W., HERPPICH W.B., HUYSKENS-KEIL S., GRÜNEBERG H. (2009):** Gas exchange of the flower bud over the vase life and the water transport capacity in the peduncle of two cut roses with different vase life. *Acta Horticulturae* 847:301-308
- LEE S.-J., KIM Y. (2008):** In vivo visualization of the water-refilling process in xylem vessels using x-ray micro-imaging. *Annals of Botany*, 101: 595-602

- MATSUSHIMA U., KARDJILOV N., HILGER A., GRAF W., HERPPICH W.B. (2008):** Application potential of cold neutron radiography in plant science research. *Journal of Applied Botany and Food Quality* 82: 90-98
- MATSUSHIMA U., GRAF W., KARDJILOV N., HILGER A., NISHIZAWA T., GRÜNEBERG H., HERPPICH W.B. (2009a):** Water flow in cut rose peduncles - destructive and non destructive measurement methods. The book of abstract, 5th International Symposium Rose Research and Cultivation, May 24-28, 2009, Gifu: 30
- MATSUSHIMA U., HERPPICH W.B., KARDJILOV N., HILGER A., GRAF W., MANKE I. (2009b):** Estimation of water flow velocity in small plants using cold neutron imaging with D₂O tracer. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A* 605: 146-149
- MATSUSHIMA U., GRAF W., KARDJILOV N., HILGER A., NISHIZAWA T., HERPPICH W.B. (2010):** Non-destructive measurement of water flow in small plants using cold neutron radiography - an application to investigate Rose bent neck symptom. *Acta Horticulturae* 858: 387-392
- MENDOZA F., PIETER V., MEBATSION H.K., KERCKHOFS G., WEVERS M., NICOLAI B. (2007):** Three-dimensional pore space quantification of apple tissue using x-ray computed microtomography. *Planta*, 226: 559-570
- VON WILLERT D.J., MATYSSEK R., HERPPICH W.B. (1995):** Experimentelle Pflanzenökologie: Grundlagen und Anwendungen. Georg Thieme Verlag, Stuttgart

Anwendung automatischer Verfahren zur Erfassung von Wurzeln in Minirhizotron-Bildern

Application of automatic methods for the detection of roots in minirhizotron images

Maik Veste

Brandenburgische Technische Universität Cottbus, Zentralanalytisches Labor, Konrad-Wachsmann-Allee 6, 03045 Cottbus, Germany
E-mail: maik.veste@ecology-climate.de

Kurzfassung: Das Wurzelsystem der Pflanzen spielt eine wichtige Rolle für die Kohlenstoffverteilung und für die Aufnahme von Nährstoffen und Wasser. Die Minirhizotron-Technik erlaubt im Gegensatz zu destruktiven Methoden die ungestörte Erfassung der Feinwurzelproduktion, Mortalität und Umsatz. Die Minirhizotron-Technik kann für das Monitoring von Wurzeln über einen bestimmten Zeitraum, der zwischen Tagen und Jahren variiert, eingesetzt werden. Eine manuelle Auswertung der erfassten Bilder ist sehr zeitaufwendig. Ein verbessertes Verfahren für die automatische Wurzeldetektion, die einen regionen- und konturbasierten Ansatz kombiniert wurde, entwickelt. Erste Entwicklungsschritte sind die Erfassung von leicht erkennbaren Teilen der Wurzeln, welche als R-seeds bezeichnet werden.

Deskriptoren: Minirhizotrone, Automatische Bildanalyse, Wurzeldynamik, Wurzelsysteme

Abstract: *The root systems of plants play an important part in the carbon allocation and for the uptake of nutrients and water. The minirhizotron method, in contrast to destructive methods, permit the measurement of the fine root production, mortality and turnover. The minirhizotron technique can be used to monitor the same root(s) over selected time intervals, which can vary from days to years. Manual analysis of the resulting images is very time consuming, however. An improved approach for automatic root detection combining region and contour based techniques was developed. The first step is aimed at detecting easily recognizable parts of the root, which will be called a R-seed.*

Keywords: *Minirhizotron, automatic image analysis, root dynamics, root systems*

1 Einleitung

Die Wurzeln haben für die Pflanze wichtige Funktionen: Sie dienen der Verankerung und zur Aufnahme von Wasser und Nährstoffen aus dem Boden (WAISEL *et al.* 2002). Dabei ist die Durchwurzelung des Bodens, d.h. Die Wurzellängendichte, im Endeffekt entscheidend für die Wasseraufnahme und Nährstoffaufnahme. Aufbau und Tiefe des Wurzelsystems werden im Wesentlichen von den physikalischen und chemischen Bodeneigenschaften beeinflusst, aber auch genetisch gesteuert. Direkte Untersuchungen zur Struktur und Dynamik des Wurzelsystems sind allerdings im Boden erschwert. Vielfältige methodische Ansätze wurden für Wurzeluntersuchungen entwickelt (BÖHM 1979, SMIT *et al.* 2000). Destruktive Methoden, wie das Ausgraben von Wurzeln, erlauben keine langfristigen Untersuchungen der Wurzeldynamik. Mittlerweile hat sich die Minirhizotron-Technik als eine wichtige Methode zur Untersuchung des Wurzelsystems entwickelt (HENDRICK & PREGNITER 1995, SMIT *et al.* 2000, MAJDI *et al.* 2005), bei der durchsichtige Glas- oder Plexiglasröhren in den Boden eingelassen. Dies ermöglicht eine nicht-destruktive Wurzelbeobachtungen über einen längeren Zeitraum, sodass die saisonale Dynamik der Feinwurzelbildung bzw. Abbau, die Lebensdauer der Wurzeln, aber auch qualitative Daten wie die Wurzelfarbe, Verzweigungen und Bildung der Mykorrhiza erfasst werden. Für die Bilderfassung werden verschiedene Systeme verwendet: (a) Miniatur-Videokamera (Bartz-System, UPCHURCH & RITCHIE 1984, MAJDI & ANDERSSON 2005, MAJDI & PERSSON 2007), (b) technische Endoskope verbunden mit einer CCD-Videokamera (STEINKE *et al.* 1996, VESTE *et al.* 2005) und (c) Root-Scanner (DANNOURA *et al.* 2008). Der Durchmesser der verwendeten Röhren variiert zwischen 30 mm für Endoskope und 67 mm für die Videotechnik.

Für die Beobachtung des Wurzelwachstums von Tomaten wurde von VESTE *et al.* (2005) ein Boroskop der Firma Storz und Wolf mit einer Baulänge von 750 mm und einem Blickwinkel von 90° verwendet. Zur Beleuchtung wurde eine Kaltlichtquelle (Storz 81482) genutzt, die durch einen Glasfaser-Lichtleiter mit dem Endoskop verbunden war. Auf dem Endoskop wurde für die Bildaufnahme eine CCD-Kamera (Kappa CF 11/2, Göttingen) montiert und die Bilder auf einem S-VHS-Videorekorder (Panasonic) gespeichert bzw. direkt auf dem Monitor (Sony) noch am Messstandort ausgezählt. **Abbildung 1** zeigt Beispiele von Minirhizotron-Bildern, die mit Hilfe dieses Endoskop und einer CCD-Kamera aufgenommen wurden.



Abbildung 1: Minirhiztron-Bilder von Tomatenwurzeln aufgenommen mit einem Storz-Endoskop

Um Vergleiche bezüglich eines beliebigen Parameters durchzuführen und eine gesicherte statistische Auswertung der Minirhiztron-Bilder zu gewährleisten, muss der Stichprobenumfang auf die Spannweite der zu untersuchenden Variablen angepasst werden. Dazu ist eine hohe Anzahl von Röhren notwendig. Allein bei einem Versuchsansatz zur Untersuchung der Wurzeldynamik von Tomaten in einem Lysimeterexperiment wurden 56 Minirhizotrone verwendet (VESTE *et al.* 2005). Dabei mussten rund 26.000 Bilder manuell ausgewertet werden. Dieser hohe Personaleinsatz bei der Bilderfassung und vor allem bei der Bildauswertung limitiert den routinemäßigen Einsatz der Minirhizotron-Technik für das Wurzelmonitoring in der Agrar- und Forstwirtschaft.

2 Automatische Bildauswertung

Verschiedene Ansätze von interaktiven Programmen oder Ansätze zur automatischen Erkennung von Wurzeln wurden entwickelt (SMUCKER *et al.* 1987, CASARIN *et al.* 1993, ANDRÈN *et al.* 1996, RICHTNER *et al.* 2000). Diese Programme waren für die automatische Detektion von Wurzeln aus den Minirhizotron-Bildern nicht geeignet, da die Systeme stark von der Bildqualität beeinflusst werden und als vollautomatische Systeme verwendet werden. Eine verlässliche automatische Detektion konnte bei ausgewaschenen und gescannten Wurzeln gewährleistet werden (DOWDY *et al.* 1998). Erste Schritte für ein neues Verfahren einer automatischen Detektion von Wurzeln wurde von JANKOWSKI *et al.* (1995). Bisherige Algorithmen verwendeten sehr einfache, zum Teil feste Schwellenwerte. Allerdings sind diese Werte auf Grund der Variabilität des Hintergrundes für die Minirhizotron-Technik nicht verwendbar. Auch eine Detektion der Wurzeln mittels der Farbe war nicht möglich, da die Sandkörner und Wurzeln sehr ähnliche Farben aufwiesen. So wurde bei dem von JANKOSWKI *et al.* (1995) entwickelten Verfahren ein konturorientierter Ansatz verfolgt, der sich von den farb- (HEERAMAN *et al.* 1993) oder regionen-orientierten Ansätzen (SMUCKER *et al.* 1987) deutlich unterscheidet. Ausgang für die Bildverarbeitung waren Bilder, die auf einer S-VHS-Videokassette gespeichert

waren. Mittels eines Videoframegrabbers wurde das Farbbild digitalisiert und in Grauwerte umgewandelt. Das erzeugte digitale Bild hat eine Größe von 768x575 Pixeln mit einer Auflösung von ungefähr 1800 dpi. Das Bild wurde anschließend mit einem 11x11 Median geglättet.

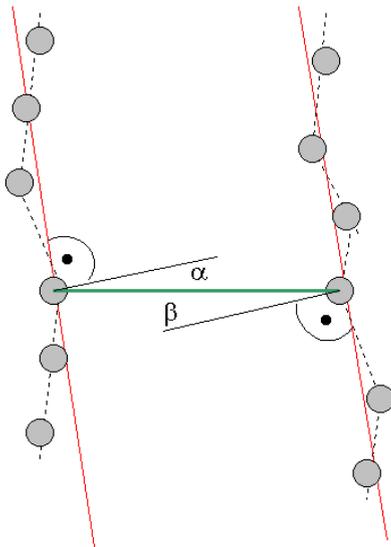


Abbildung 2: Bestimmung der R-seeds und Parallelität (verändert nach JANKOWSKI *et al.* 1995)

Für eine automatische Detektion der Wurzeln wurde ein zweistufiges Verfahren entwickelt: (1.) Die Detektion von R-Seeds (**Abbildung 2,3**) und (2.) deren Expansion (**Abbildung 3**). R-seeds sind definiert als kurze Abschnitte von Wurzeln, die sich mittels Grauwertunterschiede detektieren lassen. Für die Expansion wurden in der ersten Entwicklungsstufe (JANKOWSKI *et al.* 1995) ausschließlich lokale Informationen verwendet. Ein wichtiges Kriterium ist die Parallelität (**Abbildung 2**). Vergleicht man das konturorientierte Verfahren nach JANKOWSKI *et al.* (1995) mit dem regionenbasierten Ansatz nach SMUCKER *et al.* (1987), so ergibt sich ein eindeutiger Vorteil des konturorientierten Ansatzes. Dieser ursprüngliche Algorithmus wurde weiter modifiziert (ERZ & POSCH 2003, ERZ *et al.* 2005, 2006). Eine angeschlossene Komponentenanalyse wird verwendet, um Regionen in jedem der resultierenden Binär-Bildern zu erkennen. Die Regionen werden als R-Seeds gewählt, wenn sie eine bestimmte Form zu erfüllen. Als Kriterien werden Länge, Breite, Breite zu Längenverhältnis sowie die Krümmungen der Grenzen verwendet. Die daraus resultierenden Regionen sind sehr wahrscheinlich Teil einer Wurzel.

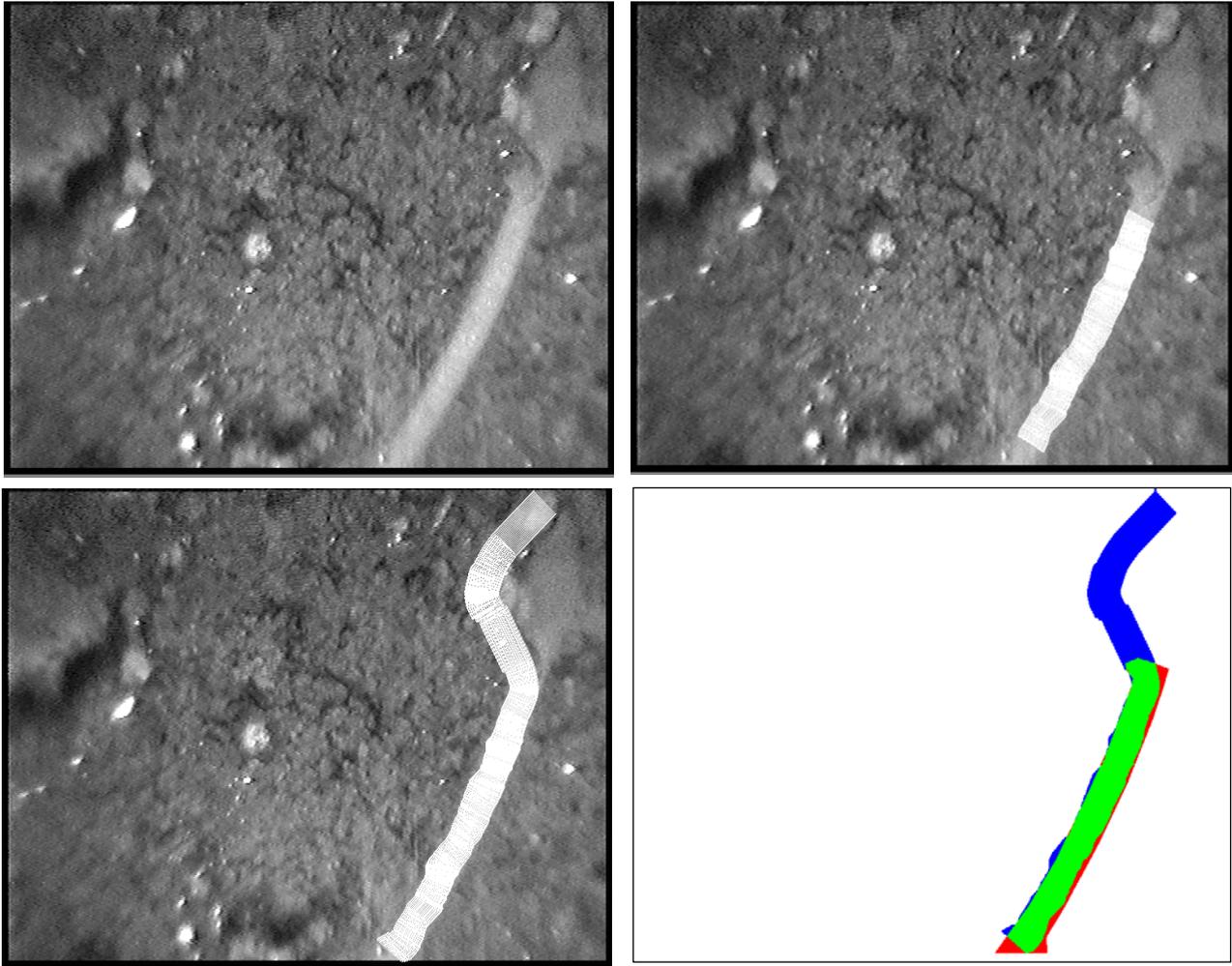


Abbildung 3: Original-Wurzel Bild (A), Detektion von R-seeds (B), Verlängerung der Wurzel (C) und Vergleich von richtig und falsch detektierten Wurzelabschnitten (D) (nach ERZ *et al.* 2006)

Für die Validierung des Programms verwendeten wir mehrere Zeitreihen von Minirhizotronbildern von Tomaten (VESTE *et al.* 2005). Die Wurzeln wurden sowohl automatisch detektiert als auch manuell durch einen Betrachter analysiert und markiert. Die Änderungen der Wurzelanzahl in den Bildern und deren Flächen sind in **Abbildung 4** dargestellt. Der Verlauf der Wurzeloberfläche reflektiert die Wurzeldynamik besser als deren Anzahl. Allerdings bestehen zum Teil noch eine Abweichung zwischen den automatisch erfassten Bereichen und den vorhandenen Wurzeln. Im Allgemeinen liegt der relative Fehler zwischen -8,8% und +7,3%. Nur in einem Fall, einer sich zersetzenden Wurzel, wurde die Fläche um 30,8% überschätzt. Probleme treten insbesondere auf, wenn Wurzeln vorhanden sind, die nicht ausgefüllt werden und beim Auftreten von Abzweigungen. Die Ausleuchtung der Bilder bei der Aufnahme hat sich als ein zentrales Problem bei der automatischen Detektion herausgestellt.

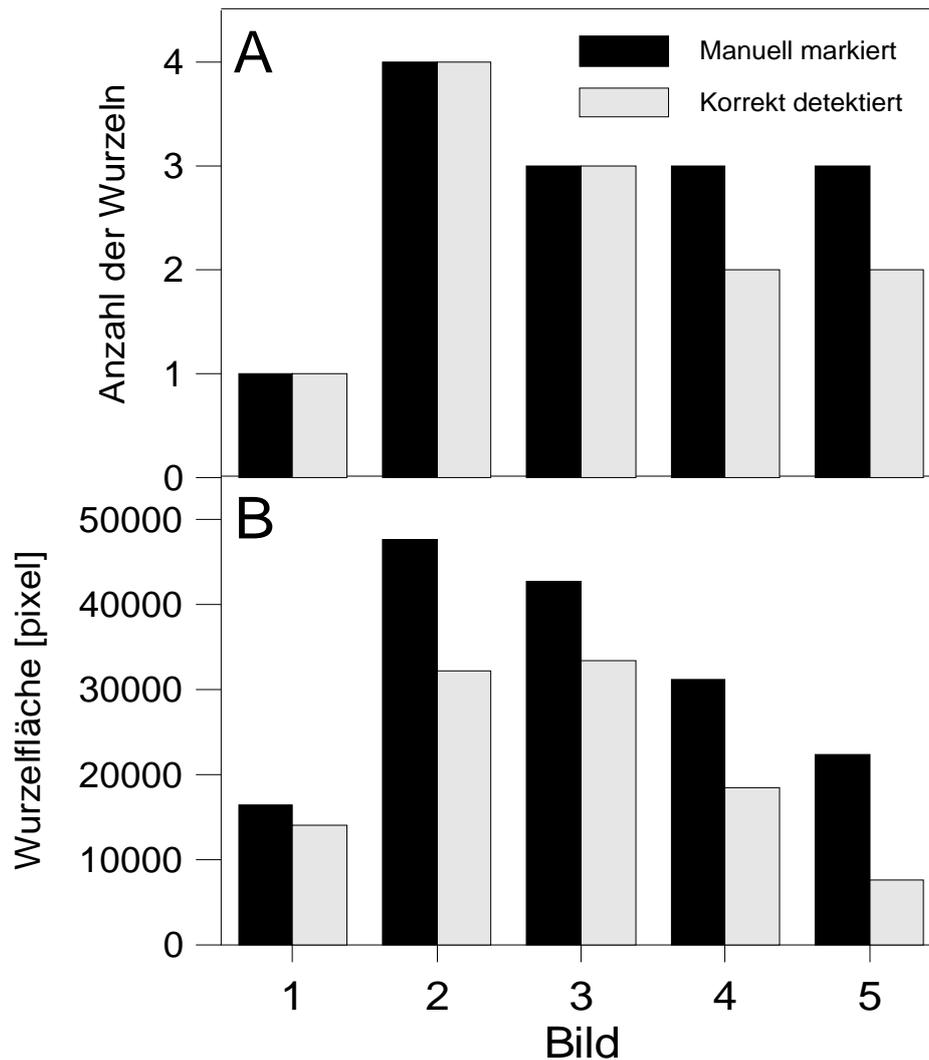


Abbildung 4: (A) Anzahl der manuell markierten und korrekt automatisch detektierten Tomatenwurzeln in einer Zeitreihe (Bild 1-5) und (B) manuell markierten und korrekt automatisch detektierten Wurzelfläche (verändert nach ERZ *et al.* 2005)

4 Ausblick

Bisherige Verfahren zeigen eine deutliche Limitierung bei der automatischen Detektion von Wurzeln. Ein neues Bilderfassung und -auswertesystem ist in der Entwicklung. Dies beinhaltet auch ein vollautomatische Kameraführung und Bilderfassung.

Literatur

ANDRÉN O., ELMQUIST H., HANSSON A.C. (1996): Recording, preprocessing and analysis of grass root images from a rhizotron. *Plant and Soil* 195: 259–269

BÖHM W. (1979): Methods of studying root systems. Springer Verlag. Berlin, Heidelberg, New York

- CASARIN M., JACQUEY S., FOURE A., GIRADIN P. (1991):** Digital picture processing and applied to the evaluation of plant root dynamics. In: B. McMichael & H. Persson (eds.) *Plant roots and their environment*, Elsevier Science Publisher, Amsterdam, 570–575
- DANNOURA M., KOMINAMI Y., OGUMA H., HANAZAWA Y. (2008):** The development of an optical scanner method for observation of plant root dynamics. *Plant Root 2*: 14-18
- DOWDY R.H., SMUCKER A.J.M., DOLAN, FERCUSON J.C. (1998):** Automated image analyses for separating plant roots from soil debris elutrated from soil cores. *Plant and Soil 200*: 91-94
- ERZ G., POSCH S., ANLAUF H., BRECKLE S.-W., VESTE M. (2006):** Automatic detections of roots in minirhizotron images. In: Ephrath J., Eshel A., Waisel Y., Silberbush M. (eds.), *COST 38 Meeting Woody Root Processes - Revealing the Hidden half*, 4-8. February 2006, Sede Boqer, Israel. *Book of Abstracts*, 30
- ERZ G., VESTE M., ANLAUF H., BRECKLE S.-W., POSCH S. (2005):** A region and contour based technique for automatic detection of roots of tomatoes in minirhizotron images. *Applied Botany and Food Quality 79*: 83-88
- HENDRICK R.L., PREGNITER K.S. (1996):** Applications of minirhizotron to understand root function in forests and other natural ecosystems. *Plant and Soil 185*: 293 – 304
- JANKOWSKI M., BRECKLE S.-W., SAGERER G., POSCH S., VESTE M. (1995):** Automatische Detektion von Wurzelsystemen in Minirhizotron-Bildern. In: Sagerer G., Posch S., Kummert F. (Hrsg.): *Mustererkennung 1995 in „Informatik aktuell“*, Springer, Berlin, Heidelberg, New York, pp. 176-185
- MAJDI H., ANDERSSON P. (2005):** Fine Root Production and Turnover in a Norway Spruce Stand in Northern Sweden: Effects of Nitrogen and Water Manipulation. *Ecosystems 8*: 191-199
- MAJDI H., PERSSON H. (2007):** A study on fine-root dynamics in response to nutrient applications in a Norway spruce stand using the minirhizotron technique. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science 158*: 429-433
- MAJDI H., PREGITZER K., MORÉN A.-S., NYLUND J.-E., ÅGREN G.I. (2005):** Measuring Fine Root Turnover in Forest Ecosystems. *Plant and Soil 276*: 1-8
- RICHNER W., LIEGGENS M., BÜRGI H., SOLDATI A., STAMP P. (2000):** Root image analysis and interpretation. In: Smit et al. (eds.) *Root methods – a Handbook*. Springer Publisher, Stuttgart, Berlin, New York, 305 – 341
- SMUCKER A.J.M., FERGUSON J.C., DEBRUYN W.P., BELFORD R.K., RITCHIE J.T. (1987):** Image analysis of video-recorded plant root systems, In: Taylor, H.M. (ed.) *Minirhizotron observation tubes: methods and applications for measuring rhizosphere dynamics*. Ed. H M Taylor, ASA Special publications no. 50, Madison, WI, 67 – 80
- SMIT A.L., BENGOUGH A.G., VAN NOORDWIJK M., PELERGRIN S., VAN DE GEIJN S.C. (eds.) (2000):** *Root methods – a Handbook*. Springer Publisher, Stuttgart, Berlin, New York
- STEINKE W., VON WILLER, D.J., AUSTENFELD F.A. (1996):** Root dynamics in a salt marsh over three consecutive years. *Plant and Soil 195*: 265-269
- UPCHURCH D.R., RITCHIE J.T. (1984):** Battery-operated color video recording system in minirhizotrons. *Agron. J. 75*: 1009-1015
- VESTE M., KÖNIG C., MINNICH M. (2005):** Anwendung der Minirhizotron-Technik zur Untersuchung der Wurzeldynamik von Tomaten bei unterschiedlicher Bewässerung. Veste M., Wucherer W., Homeier J. (Hrsg.): *Ökologische Forschung im globalen Kontext*, Cuvillier Verlag, Göttingen, pp. 55-69
- WASEL Y., ESHEL A., KAFKAFI U. (2002):** *Plant Roots – The Hidden Half*. 3rd edition, M. Dekker, Inc. New York

Intelligenter optischer Sensor für den teilflächenspezifischen Herbizideinsatz im Online-Verfahren (H-Sensor)

Smart vision sensor for site-specific herbicide spraying in real-time operation (H-Sensor)

Hagen F. Piotraschke

Agri Con GmbH, Im Wiesengrund 4, 04749 Jahna, Germany

E-mail: hagen.piotraschke@agrimon.de

Kurzfassung: Das Ziel dieses Vorhabens ist die Realisierung eines echtzeitfähigen Sensorsystems zur teilflächenspezifischen Herbizidausbringung. Ein solches System besteht aus mehreren Kameras mit integrierter Bildverarbeitung und Objekterkennung sowie einem Bedienterminal. Die Kameras sind mit Auslegern am Gestänge der Pflanzenschutzspritze befestigt. Während der Fahrt nehmen sie fortlaufend Bispektralbilder der Ackerfläche auf. Die im Bild jeweils erkennbaren Pflanzen bzw. Pflanzenteile werden über eine Auswertung ihrer Formmerkmale klassifiziert. Gemäß der im Bedienterminal hinterlegten Algorithmen für bestimmte Bestands- und Ausbringungssituationen fällt dann in Echtzeit die Entscheidung, ob bzw. mit welcher Aufwandmenge die jeweilige Teilbreite der Pflanzenschutzspritze an dieser Stelle aktiviert wird.

Der Einsatz des H-Sensors kann in der Praxis dazu führen, dass Herbizide im Ackerbau nicht mehr ganzflächig, sondern nur noch auf den tatsächlich verunkrauteten Teilflächen ausgebracht werden. Dies schont die Umwelt und steigert die Effizienz im Pflanzenbau.

Deskriptoren: H-Sensor, Herbizide, teilflächenspezifisch

Abstract: *The target of this project is to realize a real-time enabled sensor system for site-specific herbicide spraying. Such a system consists of several smart vision cameras with integrated image processing and object recognition as well an operation terminal. The cameras are mounted with brackets at the spray rig. They continuously record bispectral images while the sprayer is driving over the field. All visible plants respectively their aerial parts are classified by analyzing of several shape features. In accordance with the algorithms in the terminal for different crop and application cases is decided in real-time operation, whether respectively with which application rate the sprayer sections are to be activated. Using the so-called H-Sensor in farming practice will result in an usual herbicide spraying, which no more covers all over with 100% dose but only on the weed-infested partial areas. This protects the ecological environment and increases the efficiency of agriculture.*

Keywords: *H-sensor, herbicides, site-specific*

1 Anwendungsorientierte Unkrautklassifizierung

Die vom H-Sensor im Echtzeitbetrieb auf alle Bildobjekte angewendeten Klassifikatoren werden immer auf das vorgesehene Szenario der Herbizidanwendung hin definiert und mit entsprechendem Bildmaterial trainiert. Dabei gilt der Grundsatz, die Anzahl der je Szenario verwendeten Unkrautklassen so weit zu verringern, wie es angesichts der vorgesehenen Herbizidanwendung sinnvoll und möglich ist. Einzelne botanische Arten müssen also nur dann auch einzeln klassifiziert werden, wenn sie entweder gezielt bekämpft werden oder ihre Schadwirkung wesentlich größer ist als die anderer Arten der jeweiligen Gruppe. Dies betrifft beispielsweise das Klettenlabkraut und die Kamille-Arten, auf deren Erkennung in Getreidebeständen dann jeweils mit einem niedrigeren Bekämpfungsschwellwert reagiert wird, während alle sonstigen Unkrautarten nur entweder den einkeimblättrigen oder den zweikeimblättrigen Unkräutern zugeordnet werden. Eine solche Vereinfachung der an den H-Sensor gerichteten Anforderungen ist so lange zulässig, wie die in der Praxis verwendeten Feldspritzen noch darauf beschränkt sind, lediglich eine einzige vorgefertigte Spritzbrühe ausbringen zu können. Da somit nur relativ wenige Klassifikatoren auf alle Bildobjekte angewendet werden müssen, kann die je H-Sensor dafür benötigte Rechenleistung auch im Sensor selbst bereitgestellt werden. Mit der erwarteten Verfügbarkeit von Feldspritzen mit einer an den Düsen oder zumindest den Teilbreiten realisierten Mehrmittel-Einspeisung werden allerdings auch die Anforderungen an die Fähigkeiten des H-Sensors zunehmen, eine steigende Anzahl von Unkrautklassen oder gar einzelnen botanischen Arten voneinander unterscheiden zu können. Deswegen wurde beim H-Sensor ein modularer Aufbau vorgesehen, in dem die jeweils verwendeten CPU-Platinen später durch leistungsstärkere Versionen mit gleich ausgeführten Ein- und Ausgängen ersetzt werden können.

Die Erkennung einzelner botanischer Arten von einkeimblättrigen Unkräutern ist aus Sicht der Unkrautbekämpfung zumeist stärker wünschenswert, als dies mit einer Klassifikation aufgrund von Formmerkmalen der Bildobjekte geleistet werden kann. Demzufolge sollte die Zuordnung der als einkeimblättrige Unkräuter erkannten Bildobjekte zu den entsprechenden Arten bzw. Klassen auch anhand von Nutzereingaben zum jeweils erwarteten Artenspektrum erfolgen. Die betrieblichen Anwender des H-Sensors dürften üblicherweise wissen, welche Arten auf ihren Schlägen dominieren bzw. ob überhaupt schon einkeimblättrige Unkräuter zu erwarten sind. Diese Informationen werden schließlich auch schon zur Einsatzplanung sowie zur Anfertigung der Spritzbrühe benötigt und können daher über eine entsprechende Benutzeroberfläche auch zur Anpassung der jeweiligen Bekämpfungsschwellwerte genutzt werden. Die Echtzeit-Klassifikation im H-Sensor kann somit beispielsweise darauf beschränkt bleiben, die einkeimblättrigen Unkräuter nur von den Getreidepflanzen und nicht auch noch voneinander unterscheiden zu müssen. Hierfür kommen dann auch nicht nur die sonst üblichen Klassifikatoren auf Basis der Formmerkmale zum Einsatz, sondern auch noch weitere Entscheidungskriterien (z. B. hinsichtlich der Lage von Bildobjekten zueinander).

2 Aus der Forschung in die Praxis

Erstmalig wurde der H-Sensor als vollständiges System im Herbst 2009 zum Zeitpunkt der Nachauflaufbehandlung des Winterweizens auf Praxisschlägen in der Lommatzcher Pflege (Sachsen) eingesetzt. Mit Ausnahme der dabei noch etwas zu kurzen Ausleger am Gestänge der Feldspritze war das Gesamtsystem hier auch schon so aufgebaut, wie es zum späteren Einsatz in der Praxis vorgesehen ist.



Abbildung 1: Einsatz des H-Sensors im Herbst 2009 mit einer handelsüblichen Feldspritze

Insgesamt vier Kameras sind dabei am Spritzgestänge befestigt und über jeweils zwei Kabel mit einem Schaltkasten in der Gestängemitte verbunden, von dem aus die Hauptkabel für Stromversorgung und Datenübertragung zum Schlepper bzw. zum vorderen Teil des Selbstfahrers geführt werden. Dort befindet sich dann die Zentraleinheit zur Eingabe von Benutzerdaten, Speicherung von Aufzeichnungen sowie Ansteuerung der Feldspritze, wofür das so genannte *Agronomische Terminal* von Agri Con verwendet wird. In den Kameras wird nicht nur die Bildaufnahme, sondern auch die Bildverarbeitung bis hin zur Objekterkennung durchgeführt, so dass zur Zentraleinheit dann nur noch die Ergebnisse der Klassifikation übertragen werden müssen. Diese Ergebnisse beinhalten neben dem Zeitstempel und den Geokoordinaten der Bildaufnahme die Bodenbedeckungsgrade der jeweils verwendeten Klassen (Kulturpflanzen und Unkrautklassen).

Zur Vorbereitung auf die Praxiseinführung des H-Sensors, die in einer für 2010/2011 geplanten Produktumsetzungsphase beginnen soll, wird noch die so genannte *Unkraut-Datenbank* von Agri Con zum Klassifikatortraining bereitgestellt. Anhand des hiermit gespeicherten und manuell klassifizierten Bildmaterials werden dann die Klassifikatoren für die jeweiligen Anwendungen des H-Sensors in der Praxis entwickelt. In Ergänzung zum Betrieb des H-Sensors im Online-Verfahren ist auch noch die Möglichkeit vorgesehen, vor dem jeweiligen Zeitpunkt der Anwendung gespeicherte Informationen in die Ansteuerung der Feldspritze einbeziehen zu können. Dies betrifft beispielsweise Teilflächen, auf denen schon bei früheren Überfahrten eine stärkere Verunkrautung festgestellt wurde. Ein solcher "Map-Overlay"-Ansatz dient jedoch nur dem Ziel, die zu erwar-

tenden Zeitverzögerungen der Feldspritze beim Einschalten von Teilbreiten zu kompensieren, und hat ansonsten keinen Einfluss auf die Klassifikation im H-Sensor selbst.

Die Förderung des Vorhabens erfolgt aus Mitteln des Bundesministeriums für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (BMELV) über die Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung (BLE) im Rahmen des Programms zur Innovationsförderung.

Breeding by Design™: Sensorbasierte Phänotypisierung für eine Kaskadennutzung von *Triticale* unter Low-Input-Bedingungen

Breeding by Design™: Sensor based phenotyping for a cascade use of energy *Triticale* under low-input conditions

Kim Möller², Katharina V. Alheit¹, Lucas Busemeyer², Volker Hahn¹, Andreas Linz², Hans Peter Maurer¹, Daniel Mentrup², Florian Rahe³, Arno Ruckelshausen², Elmar A. Weissmann⁴, Tobias Würschum¹, Jochen C. Reif¹

¹ Universität Hohenheim, Landessaatzuchtanstalt, Fruwirthstr. 21, 70593 Stuttgart, Germany

² Fachhochschule Osnabrück, Albrechtstr. 30, 49076 Osnabrück, Germany

E-Mail: a.ruckelshausen@fhos.de

³ Amazonen Werke H. Dreyer GmbH & Co. KG, Postfach 51, 49205 Hasbergen, Germany

⁴ Saatzucht Hege, Domäne Hohebuch, 74638 Waldenburg, Germany

Kurzfassung: Ein stetig wachsender Energiebedarf und die immer weniger werdenden fossilen Brennstoffe führen dazu, dass Energie auch verstärkt aus Pflanzenbiomasse gewonnen wird. Eine Kaskadennutzung der Energiepflanzen kann dabei die auftretende Konkurrenz zwischen der Nahrungs- und Energieversorgung entschärfen. Bei der Kulturart *Triticale* können selbst unter Low-Input-Bedingungen hohe Biomasseerträge erzielt werden und es ist eine breite genetische Variation für Biomasseertragspotential im aktuellen Zuchtmaterial vorhanden. Ziel ist es die Stickstoffnutzungseffizienz von *Triticale* mittels Breeding by Design™ zu steigern. Eine wichtige Rolle spielt dabei die nicht-invasive Gewinnung vergleichbarer Phänotypisierungs-Daten zu verschiedenen Wachstumsperioden unterschiedlicher Genotypen. Dazu wurde eine Phänotypisierungsplattform konstruiert, die aus einem Anhänger und einer modularen Sensoreinheit besteht und über Testparzellen gezogen wird. An dem Sensormodul sind verschiedene Sensoren (z.B. Farbkamera, Lichtgitter, 3D-Kameras und Spectral-Imaging) angebracht um Daten für Biomasse, Pflanzenhöhe, Volumen, Bestandesdichte und Stickstoffgehalt zu sammeln. Die Daten werden in eine QTL-Kartierung anhand von verbundenen Mehrlinienkreuzungen zur Untersuchung der genetischen Basis von Stickstoffnutzungseffizienz eingesetzt.

Deskriptoren: *Triticale*, Phänotypisierung, Sensorfusion, QTL-Kartierung

Summary: *The increasing disparity between global energy consumption and fossil fuel supply is leading to the utilization of biomass as source for renewable energy. A cascade use of energy plants can mitigate the competition between food and energy production. Triticale is a low input energy grain showing high yield, even under low input*

conditions. The broad genetic background for biomass yield in existing breeding material favors triticale as a particularly suitable grain for the present project aiming at increasing the nitrogen use efficiency via Breeding by Design™. An important part plays the non-invasive recording and providing of comparable plant data at different growth stages taken from different genotypes. Therefore a phenotyping platform was developed combining a trailer with a modular sensordevice. On this device, different types of sensors (e.g. colour camera, lightcurtains, 3D cams, and spectral-imaging) are attached and gathering data to determine biomass, plant height, volume, and tiller density and nitrogen content. The phenotypic data is used for dynamic QTL mapping studies in connected multi-line crosses. These results in combination with sequence information of genes related to nitrogen use efficiency lay the basis for unravelling the genes underlying QTL regions with agronomic importance.

Keywords: Triticale, phenotyping, sensorfusion, QTL-mapping

Das wachsende Missverhältnis zwischen globalem Energieverbrauch und dem Vorrat an fossilen Energieträgern führt dazu, dass Energie verstärkt auch aus Pflanzenbiomasse gewonnen wird. Problematisch ist dabei die zunehmende Konkurrenz zwischen der Produktion von Energiepflanzen und der Produktion von Futter- bzw. Nahrungsmitteln. Eine Kaskadennutzung von Kulturarten kann diese Konkurrenz entschärfen. Darüber hinaus ist es wichtig, die Energieproduktion aus Biomasse so nachhaltig wie möglich zu gestalten. Eine entscheidende Größe ist dafür der Nettoenergieertrag je Flächeneinheit. Ein attraktiver Ansatz, den Energieertrag zu steigern, liegt in der züchterischen Verbesserung der Nährstoffnutzungseffizienz von Kulturarten. Damit könnte zum Beispiel der Einsatz mineralischer Stickstoffdünger reduziert werden, der energieintensiv über das Haber-Bosch-Verfahren synthetisiert werden muss. Die Kulturart *Triticale* (×*Triticosecale* Wittmack) ist hervorragend für eine nachhaltige Bioenergieproduktion geeignet, da selbst unter Low-Input-Bedingungen hohe Biomasseerträge erzielt werden können und eine breite genetische Variation für Biomasseertragspotential im aktuellen Zuchtmaterial vorhanden ist.

Ziel ist es, die Stickstoffnutzungseffizienz von *Triticale* mittels Breeding by Design™ unter spezieller Berücksichtigung einer Kaskadennutzung von Kornenertrag und Restpflanzenbiomasse zu steigern. Dazu wird eine Plattform für nicht-invasive Phänotypisierung bei Getreide etabliert, die es ermöglicht, das dynamische Merkmal Stickstoffnutzungseffizienz zu ermitteln. Diese Phänotypisierungsplattform wird für eine QTL-Kartierung mit Mehrlinienkreuzungen zur Untersuchung der molekularen Basis von Stickstoffnutzungseffizienz eingesetzt.

Den Versuchen des Projektes liegen zwei Gruppen Pflanzenmaterial zu Grunde. Das erste Set besteht aus 25 *Triticale* Linien zur Kalibrierung der Sensoren und Sequenzierung der Kandidatengene Glutaminsynthetase 1 und 2. Ein weiteres besteht aus 4 DH-

Populationen aus verbundenen Mehrlinien-Kreuzungen, die zur QTL-Kartierung eingesetzt werden. Hierfür werden sie mit SSR- und DArT - Markern genotypisiert und diese Daten mit den phänotypischen Daten aus der unten beschriebenen Plattform statistisch verrechnet. Das Ziel ist, Wachstums- bzw. Biomasse- Dynamiken zu modellieren und diese in die QTL-Analysen zu integrieren. Hierbei werden durch die mehrmalige nicht-invasive Phänotypisierung Vergleiche der QTL-Positionen zwischen den verschiedenen Entwicklungsphasen und die mathematische Einbindung von dynamischen Wachstumsparametern in die QTL-Kartierung möglich. Anhand der Analyse der Kandidatengene in den DH-Populationen kombiniert mit den Ergebnissen der QTL-Kartierung können Merkmale von agronomischer Relevanz detektiert werden. So können mittels markergestützter Selektion im Hinblick auf Stickstoffeffizienz verbesserte Triticale Sorten gezüchtet werden.

Für die Ermittlung und Speicherung der Pflanzendaten wurde eine Phänotypisierungsplattform entwickelt. Diese besteht aus einem Anhänger an dem ein aus Aluminium Konstruktionsprofilen gefertigtes Sensormodul eingehängt ist. So lässt sich das Modul auch ohne Anhänger einfach in Labor- bzw. Testumgebungen betreiben. Der Anhänger ist höhenverstellbar und kann durch Pflanzenbestände mit bis zu 180 cm Höhe fahren. An dem Sensormodul sind zwei Lichtgitter, eine Farbkamera, mehrere 3D-Kameras, mehrere Laserdistanzsensoren und ein Spectral-Imaging System angebracht. Außerdem ist in dem Modul auch noch eine höhenverstellbare Einheit integriert, an der höhenempfindliche Sensoren, wie z.B. Farbkamera und 3D-Kamera befestigt sind. Das System umfasst u.a. auch mehrere Controllerboards sowie einen Industrie-PC auf dem die Daten der Sensoren mit einem Ort- und Zeitstempel gespeichert werden. So lassen sich geeignete Algorithmen entwickeln, die mit einzelnen Sensoren und mittels Sensorfusion die erforderlichen Pflanzendaten (Pflanzenhöhe, Biomasse, Volumen, Bestandesdichte und Stickstoffgehalt) berechnen. Um eine möglichst breite Kalibration zu erzielen, wird das o.g. Kalibrationsexperiment neben dem Faktor Sorte auch jeweils zwei Faktorstufen für N-Düngung und Bestandesdichte enthalten. Das Kalibrationsexperiment wird an 4 Schnittzeitpunkten geerntet und mit den aufgenommenen Daten korreliert.

Bodengestützte Erfassung räumlich hochaufgelöster Hyperspektraldaten. Das Penta-Spek System

Acquisition of high resolution ground-based hyperspectral data. The Penta-Spek System

Holger Lilienthal, Ewald Schnug

Julius Kühn-Institut, Institut für Pflanzenbau und Bodenkunde, Bundesallee 50, 38116 Braunschweig, Germany

E-mail: holger.lilienthal@jki.bund.de

Kurzfassung: Hyperspektrale Fernerkundung bietet die Möglichkeit, Boden- und Pflanzeninhaltsstoffe zerstörungsfrei zu bestimmen. Der Einsatz von Fernerkundungstechniken in der Landwirtschaft war in der Vergangenheit jedoch auf Grund schlechter Datenverfügbarkeit limitiert. Das Julius Kühn Institut (JKI) entwickelt derzeit ein bodengestütztes Online-System, mit dem hochaufgelöste Reflexionsdaten im Feld gewonnen werden können.

Das sogenannte Penta-Spek System besteht aus 6 Spektrometern, die die spektrale Reflexion in 110 schmalen Bändern (Bandbreite ca. 5 nm) in einem Wellenlängenbereich von 400 bis 950 nm aufzeichnen. Ein Spektrometer zeichnet dabei kontinuierlich die Einstrahlung auf und liefert diese als Referenzdaten an die übrigen 5 Spektrometer, so dass im Gelände direkt der spektrale Reflexionsgrad bestimmt werden kann. Die räumliche Auflösung des Systems ist abhängig von der Fahrgeschwindigkeit. Je nach Anwendung können Auflösungen im Zentimeterbereich (Kleinparzellen) bis zu 5 m Bodenauflösung für größere Schläge erreicht werden. Die spektralen Punktmessungen werden anschließend mit geostatistischen Verfahren auf die Fläche extrapoliert.

Die Auswertemöglichkeiten für die Hyperspektraldaten reichen von der Bestimmung von Bodenparametern, bis hin zur Anwendung von Strahlungstransfermodellen zur Bestimmung von Vegetationsparametern. Strahlungstransfermodelle wie zum Beispiel ProSail erlauben die Berechnung spektraler Signaturen auf Basis verschiedener Bestandesparameter, wie zum Beispiel LAI, Chlorophyll-Gehalt, Blattwassergehalt usw.. Durch die Inversion dieser Modelle können diese Bestandesparameter aus den gemessenen Hyperspektraldaten berechnet werden.

Mit dem Penta-Spek System steht erstmals eine kostengünstige Technologie zur Erhebung von Hyperspektraldaten im Gelände zur Verfügung. Durch die permanente Messung der Einstrahlung werden Beleuchtungsunterschiede direkt bei der Messung kompensiert. Damit wird das System nahezu unabhängig von den Witterungsbedingungen.

Deskriptoren: Fernerkundung, Strahlungstransfermodell, Wachstumsmodell, Precision Farming.

Abstract: *Hyperspectral remote sensing offers new possibilities of non-destructive parameter estimation for soil and vegetation. The use of remote sensing techniques in agriculture in the past was limited due to poor data availability. The Julius Kühn Institut (JKI) is currently developing a ground-based online system, capable to obtain high-resolution reflection data in the field.*

The Penta-Spek system consists of six spectrometers to record the spectral reflectance in 110 narrow bands (bandwidth 5 nm) in a wavelength range of 400-950 nm. One spectrometer records the incoming radiation and thereby continuously provides this as a reference to the other five spectrometers, so that spectral reflectance can be determined in the field directly. The spatial resolution of the system depends on the driving speed of the vehicle. Depending on the application, resolution in centimetre range (e.g. for small scale plots) or up to 5 m ground resolution can be achieved. The hyperspectral point measurements are finally extrapolated to a larger spatial extent by using geostatistical techniques.

The analytical potential of hyperspectral data ranges from determination of soil parameters (see JARMER et al. in this issue), to the application of radiative transfer models for the determination of vegetation parameters. Radiative transfer models such as ProSail allow the calculation of spectral signatures based on various vegetation input parameters (e.g. LAI, chlorophyll content). By inversion of these models, crop and vegetation parameters can be retrieved from the measured hyperspectral reflectance data.

The Penta-Spek system allows a cost effective collection of hyperspectral data in the field. Through the continuous measurement of the incoming light, illumination differences are compensated directly from the measurement.

Keywords: *Remote sensing, radiative transfer model, crop model, precision agriculture.*

1 Einleitung

Der Einsatz von Fernerkundungstechniken in der Landwirtschaft bereits hat eine lange Tradition (SHAY 1967). Wurden zunächst breitbandige Flugzeug- und Satellitensensoren eingesetzt (z.B. Landsat MSS mit 100 nm Bandbreite), so konnte mit der Verbesserung der Leistungsfähigkeit von Computern und der Miniaturisierung der Elektronik die spektrale Auflösung deutlich werden verbessert (z.B. Hyperion mit 10 nm Bandbreite). In Mitteleuropa konnte sich Flugzeug- und Satellitenfernerkundung jedoch nicht in der praktischen Landwirtschaft durchsetzen, da die häufige Bewölkung zu einer unkalkulierbaren Verfügbarkeit der Daten führt. Für den Bereich der teilflächenspezifischen Landwirt-

schaft gibt es boden-gestützte Messverfahren (z.B. N-Sensor, Greenseeker), deren Auswertungskonzepte auf der einfachen Indexberechnungen aus wenigen spektralen Wellenlängen beruhen.

Die Weiterentwicklung der Spektralsensorik erlaubt es heute, Techniken aus dem Labor auf das Feld zu bringen. Neue Messtechnik erfordert aber auch neue Auswertestrategien. Aus diesem Grunde wird am Institut für Pflanzenbau und Bodenkunde des Julius Kühn Instituts ein Sensor System entwickelt, mit dem räumlich und spektral hochaufgelöste Daten im Feld gewonnen werden können. Wichtig dabei ist, dass der Einfluss der Witterung (Bewölkung) während der Datenerfassung so weit wie möglich kompensiert werden kann. Das Penta-Spek System wird im Folgenden näher vorgestellt.

2 Messverfahren

Das Penta-Spek System besteht aus sechs Einzelspektrometern, die in zwei Spektrometermodulen zusammengefasst sind (**Tabelle1**).

Tabelle1: Technische Spezifikation des Penta-Spek Systems

	Modul 1	Modul 2
Spektralbereich [nm]	340 - 1026	188 - 1036
Volle Auflösung	2048 Kanäle @ 0,67 nm	2048 Kanäle @ 0,83 nm
Effektiver Spektralbereich [nm]	400 - 950	400 - 950
Effektive Auflösung	110 Kanäle @ 5nm	110 Kanäle @ 5nm
Max. Aufzeichnungsgeschwindigkeit	3 msec	3 msec

Fünf Spektrometer sind nach unten gerichtet und können den Boden oder Pflanzenbestände vermessen, das sechste Spektrometer dient als Einstrahlungsreferenz. Die gemessene Einstrahlung wird mit den anderen fünf Spektrometern verrechnet, so dass der spektrale Reflexionsgrad direkt im Feld bestimmt werden kann. Ein wichtiger Vorteil des Systems ist die permanente Korrektur der Einstrahlungsbedingungen. Dadurch können Effekte, die durch Beleuchtungsunterschiede, die während der Messphasen auftreten können (zum Beispiel durchziehende Wolken), kompensiert werden (**Abbildung 1**). Zur räumlichen Lokalisierung der Messpunkte ist das System zusätzlich mit einem GPS-Empfänger ausgestattet.

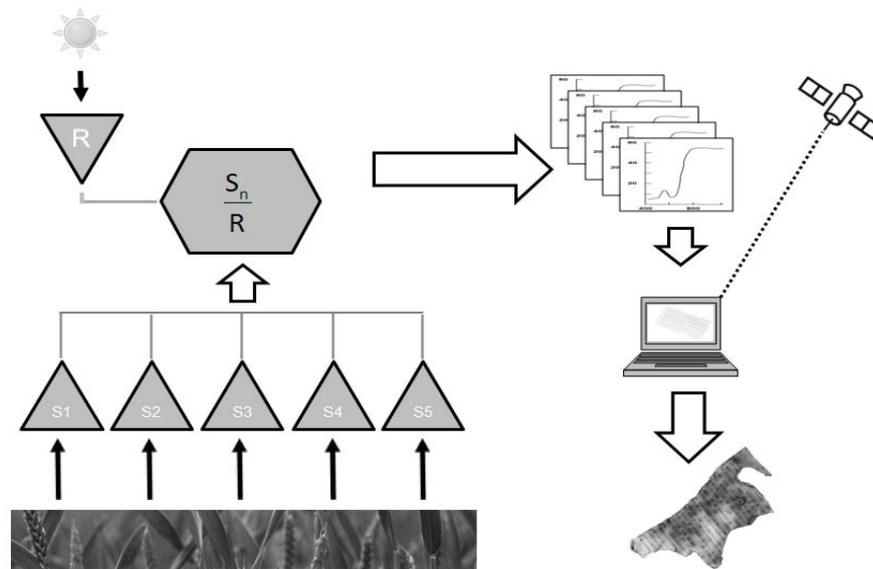


Abbildung 1: Schematischer Aufbau des Penta-Spek Systems

Die räumliche Auflösung ist abhängig von der Fahrgeschwindigkeit und variiert in Fahrtrichtung und Aufnahmebreite. Neben der minimalen Fahrgeschwindigkeit (bei einem Schlepper ca. 0,5 km/h) bestimmt die maximale Signalfrequenz des GPS die räumliche Auflösung in Fahrtrichtung. Ausgehend von einem GPS Signal im Sekundentakt ergibt sich so eine theoretische maximale Auflösung von 0,15 m in Fahrtrichtung.

Parallel zur Fahrtrichtung bestimmen der Öffnungswinkel der Spektraloptik (hier 45°) und der Abstand zum Objekt die räumliche Auflösung. Bei einer Aufnahmekonfiguration mit einem Sensorabstand von 1 m zum Objekt wird pro Sensor eine Fläche von 0,82 m² erfasst (**Abbildung 2**).



Abbildung 2: Mögliche Aufnahmekonfiguration des Penta-Spek Systems

Die geocodierten Einzeldaten der fünf Spektrometer können mit geostatistischen Verfahren auf die Fläche extrapoliert werden. Die variographische Analyse von Daten des

Blattflächenindex (LAI), der aus Penta-Spek Daten generiert wurden zeigt, dass der maximale Aussagewert (Range) für diesen Datensatz bei ca. 35 m liegt. Das bedeutet, zwischen Messpunkten mit einer maximalen Entfernung von 35 m zueinander besteht ein statistischer Zusammenhang (**Abbildung 3**).

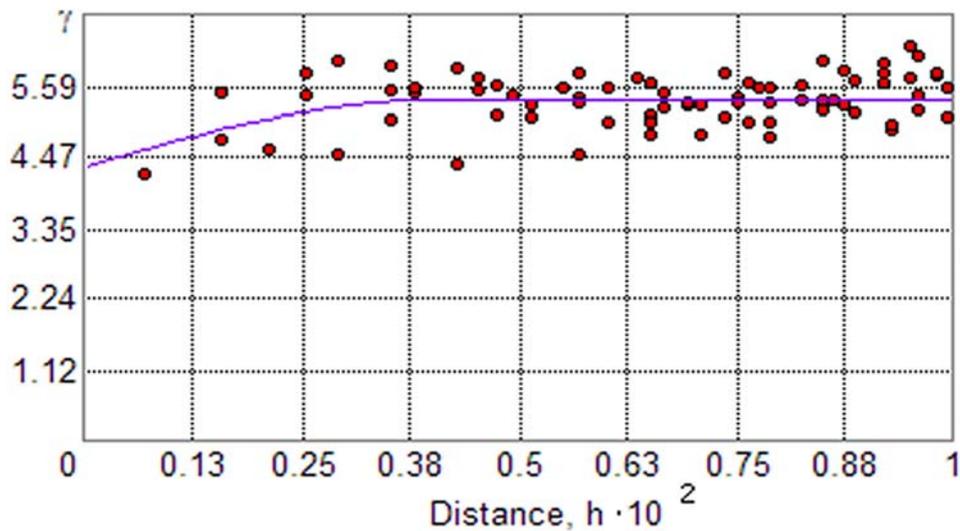


Abbildung 3: Variogramm für den Blattflächenindex (LAI), generiert aus Penta-Spek Daten (N=3367)

Somit können in diesem Beispiel die Daten auf ein 5 x 5 m Raster mit geostatistischen Verfahren, wie zum Beispiel Kriging, extrapoliert werden.

3 Auswertung

Das Messverfahren liefert eine sehr große Datenmenge, die vor der Auswertung aufbereitet werden muss. Dabei gibt es zwei grundsätzliche Strategien:

a) Extrapolation der Originaldaten

Im diesem Fall wird jede aufgezeichnete Wellenlänge aus den Originalspektren auf die Fläche extrapoliert. Es entstehen Pseudo-Hyperspektralbilder mit 110 Spektralkanälen. Anschließend findet die Informationsextraktion auf der Basis der Bilddaten statt. Dieses Verfahren erhält die maximale Information, ist aber sehr rechenintensiv, da für jede Wellenlänge (110) eine eigene Extrapolationsrechnung notwendig wird. Ein weiterer Nachteil dieses Verfahrens ist die hohe Datenredundanz, da die Information vieler benachbarter Wellenlängen untereinander sehr hoch korreliert, also die gleiche Information enthält.

b) Extrapolation von abgeleiteten Informationen

Bei dieser Auswertungsstrategie wird zunächst die Information aus den Einzelspektren errechnet und anschließend auf die Fläche extrapoliert. Der Vorteil dieses Verfahren liegt darin, dass nur die eigentliche Zielgröße (z.B. der Blattflächenindex) extrapoliert werden muss, der Rechenaufwand ist also deutlich geringer.

Für die Informationsextraktion gibt es wiederum verschiedene Möglichkeiten. Die Berechnung von Spektralindices wie zum Beispiel dem *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI, ROUSSE *et al.* 1974) ist überaus populär. Das Verfahren ist sehr schnell, jedoch wird nur ein Bruchteil der verfügbaren Information tatsächlich verwendet (im Fall des NDVI sind es zwei Wellenlängen von 110). Mittlerweile gibt es eine Vielzahl verschiedenster Indices (DORIGO 2008), denen aber gemein ist, dass nur einige wenige Wellenlängen der Spektralsignatur verwendet werden.

Strahlungstransfermodelle sind physikalisch basierte Modelle, die Spektralsignaturen auf der Basis von Vegetationsparametern errechnen können. Die Modelle *PROSPECT* (JACQUEMOUD & BARET 1990) und *SAIL* (VERHOEF 1984) berechnen die spektrale Signatur auf Blatt- bzw. Bestandesebene beispielsweise mit Hilfe der Chlorophyll- und Carotinoidgehalte, des Blattflächenindex und weiterer Parameter. Die Kombination beider Modelle führte zu dem Modell *PROSAIL* (JACQUEMOUD *et al.* 2009). Durch die Invertierung von *PROSAIL* wird es möglich, aus den gemessenen Spektraldaten die Vegetationsparameter zu bestimmen (DORIGO 2008, VOHLAND *et al.* 2010). Die Invertierung von Strahlungstransfermodellen nutzt die komplette Spektralinformation, erfordert aber noch einen höheren Rechenaufwand.

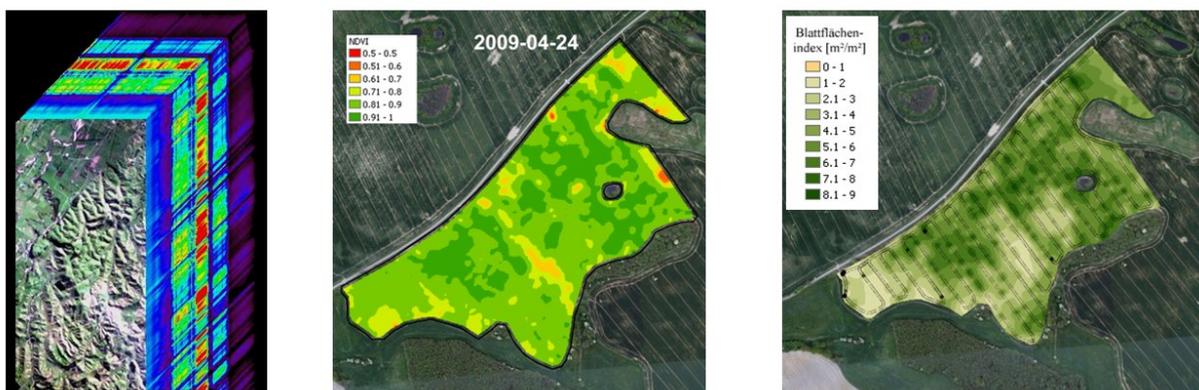


Abbildung 4: Auswertungsergebnisse von Hyperspektraldaten. Links: Hyperspektralbild als Image Cube Darstellung. Mitte: Indexberechnung aus Spektraldaten. Rechts: Blattflächenindex (LAI) aus invertiertem Strahlungstransfermodell

Zur Informationsextraktion eignen sich auch multivariate Verfahren, wie sie im Bereich in der Nahinfrarotspektroskopie (NIRS) üblich sind. Techniken wie die *Partial Least Square Regression* (PLRS) (HÖSKULDSSON 1988) oder *Support Vector Machines* (SVM) (BURGES 1998) erlauben die Verknüpfung und Klassifikation von Zielgrößen mit der ge-

messenen Spektralinformation. Diese Verfahren finden erst langsam Eingang in die Fernerkundung, dem bestehenden Forschungs- und Entwicklungsbedarf trägt das Penta-Spek System Rechnung.

4 Anwendungen

Das Penta-Spek System ist durch seine Konfiguration sehr flexibel einsetzbar. Durch die sehr hohe räumliche Auflösung bei langsamen Fahrgeschwindigkeiten, eignet sich das System besonders für Pflanzenzüchter, die ihre Zuchtprogramme in vielen Kleinpärzellen durchführen. Das Penta-Spek System kann hier den Boniturdurchsatz deutlich erhöhen. So wurde bei einem ersten Testlauf eine Fläche von 1 ha mit 804 Einzelpärzellen in 1,5 Stunden vermessen. Pro Einzelpärzelle wurden 5 Messungen durchgeführt, die anschließend gemittelt wurden.

Im Bereich der Forschung können mit dem Penta-Spek System Vegetationsparameter für größere Flächen schnell erhoben werden. Räumlich aufgelöste Parameter wie zum Beispiel LAI und Biomasse sind eine wichtige Eingangsgröße für Modellrechnungen aller Art. Durch die Kopplung von bodengestützten räumlichen Hyperspektraldaten wird zukünftig die Qualität von Wachstumsmodellen deutlich verbessert werden können.

5 Schlussfolgerung

Das Penta-Spek System ist ein bodengestütztes Fernerkundungssystem zur Erfassung räumlich und spektral hochaufgelöster Daten. Die hyperspektrale Fernerkundung bietet die Möglichkeit, Boden- und Pflanzeninhaltsstoffe zerstörungsfrei mit einem hohen Datendurchsatz zu bestimmen.

Die Auswertemöglichkeiten für die Hyperspektraldaten umfassen die gesamte Palette der Fernerkundungsanwendungen. Speziell für die Landwirtschaft interessant sind die Bestimmung von Bodenparametern (siehe JARMER *et al.* in diesem Heft), bis hin zur Anwendung von Strahlungstransfermodellen zur Bestimmung von Vegetationsparametern.

Mit dem Penta-Spek System steht erstmals eine kostengünstige Technologie zur Erhebung von Hyperspektraldaten im Gelände zur Verfügung. Durch die permanente Messung der Einstrahlung werden Beleuchtungsunterschiede direkt bei der Messung kompensiert. Damit wird das System nahezu unabhängig von den Witterungsbedingungen.

Literatur

- BURGES C.J.C. (1998):** A Tutorial on Support Vector Machines for Pattern Recognition. *Data Mining and Knowledge Discovery*, 2(2): 121-167
- DORIGO W. (2008):** Retrieving canopy variables by radiative transfer model inversion - a regional approach for imaging spectrometer data. Dissertation, Faculty Wissenschaftszentrum Weihenstephan, Technical University of Munich, Germany, 230 pp
- HÖSKULDSSON A (1988):** PLS regression methods. *J. Chemometrics*, 1988, 2(3): 211-228
- JACQUEMOUD S., BARET F. (1990):** PROSPECT: A model of leaf optical properties spectra. *Remote Sensing of Environment*, 34(2): 75-91
- JACQUEMOUD S., VERHOEF W., BARET F., BACOUR C., ZARCO-TEJADA P.J., ASNER G.P., FRANÇOIS C., USTIN S.L. (2009):** PROSPECT + SAIL models: a review of use for vegetation characterization, *Remote Sensing of Environment*, 113: S56-S66
- SHAY J. (1967):** Remote sensing for agricultural purposes.- *Bioscience* 17(7): 450-451
- VERHOEF W. (1984):** Light scattering by leaf layers with application to canopy reflectance modeling: The SAIL model. *Remote Sensing of Environment*, 16: 125-141
- VOHLAND M., MADER S., DORIGO W. (2010):** Applying different inversion techniques to retrieve stand variables of summer barley with PROSPECT + SAIL. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 12(2): 71-80

Die Erfassung organischen Kohlenstoffs des Oberbodens mittels Hyperspektraldaten

Detection of top soil organic carbon by hyperspectral datasets

Thomas Jarmer¹, Holger Lilienthal², Manfred Ehlers¹, Pablo Rosso³

¹ *Institut für Geoinformatik und Fernerkundung, Universität Osnabrück, Barbarastrasse 22b, 49076 Osnabrück, Germany*

E-mail: tjarmer@igf.uni-osnabrueck.de, mehlers@igf.uni-osnabrueck.de

² *Julius Kühn-Institut, Institut für Pflanzenbau und Bodenkunde, Bundesallee 50, 38116 Braunschweig, Germany*

E-mail: holger.lilienthal@jki.bund.de

³ *Product Development Group, RapidEye AG, Molkenmarkt 30, 14776 Brandenburg an der Havel, Germany*

E-mail: rosso@rapideye.de

Zusammenfassung: In der vorliegenden Studie wird die räumliche Erfassung des organischen Kohlenstoffs landwirtschaftlicher Böden mittels Hyperspektraldaten vorgestellt. Dazu wurde der organische Kohlenstoff von Oberbodenproben eines landwirtschaftlich genutzten Feldes nördlich von Osnabrück (Niedersachsen) analysiert. Im Labor wurden außerdem Reflexionsmessungen mit einem ASD FieldSpec-III Spektroradiometer durchgeführt. Aus den Reflexionsspektren wurden synthetische Spektren in der spektralen Auflösung des Penta-Spek-Systems generiert. Die Schätzung des organischen Kohlenstoffs aus den Laborspektren erfolgte über ein Partial Least Squares Regressionsmodell. Die aus den Penta-Spek-Daten geschätzten Konzentrationen lagen im Konzentrationsbereich der Laboranalytik und spiegelten die räumlichen Strukturen des Ackers wider. Die Ergebnisse zeigen das große Potential der Methode als ein schnelles Screening-Tool für die räumliche Erfassung organischen Kohlenstoffs und stellen eine geeignete Alternative zur zeit- und kostenintensiven chemischen Analyse im Labor dar. Damit wurden die Grundlagen für eine Anwendung der Methode auf spektralen Bilddaten entwickelt.

Deskriptoren: organischer Kohlenstoff, Spektroskopie, PLSR

Abstract: *This study focuses on spatial assessment of organic carbon of agricultural soils from hyperspectral data. For this purpose organic carbon of top soil samples of an agricultural used plot north of Osnabrück (Lower Saxony, NW-Germany) were analysed. Soil reflectance of the samples was measured in the lab using an ASD FieldSpec-III spectroradiometer. Reflectance spectra have been resampled to spectral resolution of the so-called "Penta-Spek-System". For organic carbon prediction, an empirical model*

based on partial least squares (PLS) regression was defined from the measured reflectance spectra. Concentrations obtained from simulated Penta-Spek data are in accordance with the concentration range of the chemical analysis. The predicted soil organic carbon concentrations reflect the spatial conditions of the investigated plot. The results indicate the potential of this method as a quick screening tool for the spatial assessment organic carbon, and therefore an appropriate alternative to time- and cost-intensive chemical analysis in the laboratory. Therewith basics of an application of this approach on spectral imagery have been developed.

Keywords: *organic carbon, spectroscopy, PLSR*

1 Einleitung

Bodeninhärente spektrale Eigenschaften, wie unterschiedliche Kombinationen mineralischer Komponenten, organischer Substanz und Bodenfeuchte beeinflussen die spektrale Reflexion von Böden (BAUMGARDNER *et al.* 1985). Die Beziehung zwischen spektraler Reflexion und Bodeneigenschaften wie zum Beispiel Korngrößenverteilung, Bodenfeuchte, Eisenoxide Karbonatgehalt und organische Substanz wurden in vielen Studien untersucht (z. B., KRISHNAN *et al.* 1980, KOSMAS *et al.* 1984, BEN-DOR & BANIN 1995a, b, UDELHOVEN *et al.* 2003, VISCARRA ROSSEL *et al.* 2006, JARMER *et al.* 2008, RICHTER *et al.* 2009) Obwohl einige dieser Studien ihr Potential unter Laborbedingungen belegten, sind Anwendungen für bildgebende Systeme selten und auf kleine Gebiete beschränkt (SELIGE *et al.* 2006, GOMEZ *et al.* 2008).

Die Erfassung und Kartierung organischen Kohlenstoffs ist nicht nur für den Bodenschutz von großer Bedeutung, sondern auch bei der Entwicklung von Strategien zur Minderung der globalen Erwärmung (JONES *et al.* 2005). Da Böden mehr als doppelt so viel Kohlenstoff im Vergleich zur Vegetation oder der Atmosphäre speichern können (BATES 1996), werden Bewirtschaftungspraktiken, die die Kohlenstoffspeicherung im Boden unterstützen, als Möglichkeit zur Reduzierung des CO₂ erwogen (LAL *et al.* 1998).

Die fernerkundliche Erfassung des Bodenkohlenstoffes besitzt ein großes Potential für ein bodenbezogenes Betriebsmanagement. Dies ist besonders wichtig vor dem Hintergrund der schnellen Entwicklung neuer Fernerkundungssensoren, wie dem Hyperspektralsatelliten EnMAP, die voraussichtlich in den nächsten Jahren gestartet werden. Allerdings werden auch diese operationellen Sensoren aufgrund von Wolkenbedeckung und konkurrierender Datenakquise nur eingeschränkt Daten liefern, so dass terrestrischen Hyperspektralsystemen, wie beispielsweise dem Penta-Spek-System des JKI (LILIEN-THAL & SCHNUG 2010), eine herausragende Bedeutung zukommt.

Das Ziel der vorliegenden Studie ist die räumliche Erfassung organischen Kohlenstoffes im Boden aus Hyperspektraldaten. Dabei wird auch der Einfluss der spektralen Auflö-

sung der Hyperspektraldaten auf die Modellierung untersucht, um die Anforderungen an ein terrestrisches Hyperspektralsystem zur Quantifizierung organischen Kohlenstoffes zu bestimmen.

2 Material und Methoden

Das Untersuchungsgebiet liegt im südwestlichsten Teil Niedersachsens ($52^{\circ}23'N / 8^{\circ}02'E$; **Abbildung 1**). Zehn Kilometer nördlich von Osnabrück wurde in der Nähe des Ortes Engter ein landwirtschaftlicher Schlag („Faldieke“) mit einer Größe von ca. fünf Hektar beprobt. Das untersuchte Feld erstreckt sich 300 m in West-Ost-Richtung und 120 m in Nord-Süd-Richtung. Bei den Böden handelt es sich um nährstoffarme Gleye und Pseudogleye, auf denen vor der Probennahme Weizen angebaut wurde. Die mittlere jährliche Niederschlagsmenge liegt bei etwa 700 mm.

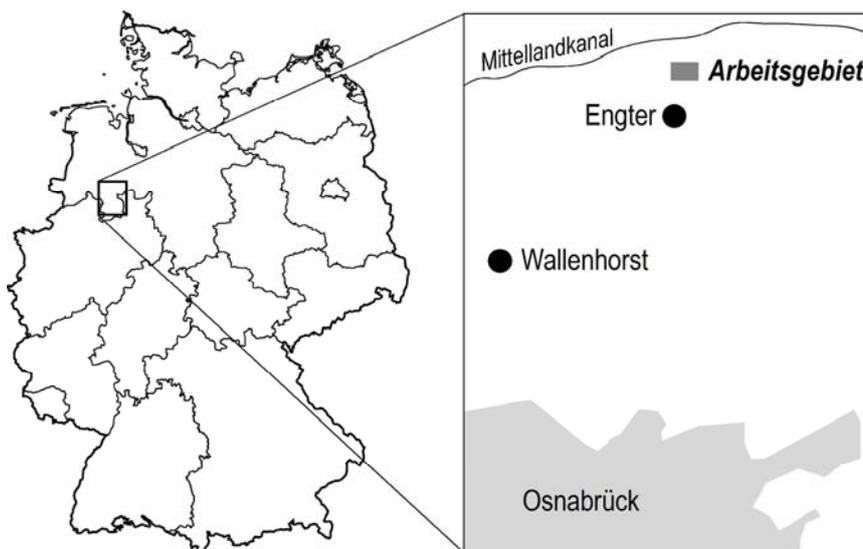


Abbildung 1: Lage des Untersuchungsgebietes

Die Bodenprobennahme erfolgte im Oktober 2009 nach der Ernte bei trockenen Wetterverhältnissen. Um die räumliche Variabilität der Bodeneigenschaften zu berücksichtigen, wurde eine 30 x 30 m-Rasterbeprobung durchgeführt ($n = 40$). An jeder Rasterposition wurde eine integrative Oberbodenprobe des obersten 1 cm des Bodenprofils einer Fläche von ca. 1 m^2 genommen. Mittels differenziellem GPS wurde jede Beprobungsstelle exakt verortet. Der Lagefehler für die einzelnen Probenstandorte liegt im Sub-Meter-Bereich.

Die Bodenproben wurden im Labor luftgetrocknet, vorsichtig zerkleinert und auf 2 mm gesiebt und anschließend für die chemische Analyse gemörsert. Die chemische Analyse der Bodenproben (organischer Kohlenstoff) wurde am RC612 (Temperaturgesteuert-

ter Kohlenstoff/Wasser-Phasenanalysator) der Firma LECO Instrumente GmbH vorgenommen.

Die bi-direktionelle Reflexion der gesiebten Bodenproben wurde im Labor mit ASD FieldSpec-III Spektroradiometer (Analytical Spectral Devices Inc.) in 1 nm-Auflösung im Wellenlängenbereich 350 - 2.500 nm unter Verwendung eines Reflexionsstandards (Spectralon©) gemessen. Der optische Sensor des Spektroradiometers wurde für die Messungen an einem Stativ in Nadir-Position in einer Entfernung von zehn Zentimetern befestigt. Die Beleuchtung des Referenzpanels und der Bodenproben erfolgte mit einer 1000 W Videolampe aus ca. einem Meter Entfernung unter einem Einstrahlungswinkel von 45 Grad.

Absolute Reflexionsspektren wurden durch Multiplikation der gemessenen Reflexion mit der zertifizierten Reflexion des Spectralons berechnet. Eine Datenvorverarbeitung wurde nicht durchgeführt; allerdings wurde in der Folge nur der Wellenlängenbereich 400 - 900 nm verwendet, in dem das Penta-Spek-System die Reflexion messen kann.

Die Schätzung der Gehalte an organischem Kohlenstoff und an Wasser aus den Reflexionsspektren erfolgte mittels Partial Least-Squares Regression (PLSR). Die maximale Anzahl der latenten Variablen (Rank) wurde auf zehn begrenzt. Die Ergebnisse der PLSR wurden nach der 'leave-one-out'-Methode kreuzvalidiert (cv). Das Bestimmtheitsmaß (r^2), der Quadratwurzelfehler (RMSE) und das Verhältnis des Standardfehlers der Vorhersage zur Standardabweichung (RPD) wurden als Maße für die Schätzgenauigkeit bestimmt (MALLEY *et al.* 2004).

3 Simulation des Penta-Spek-Systems

Das Penta-Spek-System verfügt über 2048 Spektralkanäle in zwei Modulen. Die spektrale Auflösung des ersten Moduls (100 μm Slit) beträgt 0,67 nm (0,57 – 0,75 nm), während das zweite Modul (50 μm Slit) eine spektrale Auflösung von 0,83 nm (0,71 – 0,93 nm) besitzt. Für die Simulation des Einflusses unterschiedlicher spektralen Auflösungen von Hyperspektraldaten auf die Modellierung des organischen Kohlenstoffes wurde die ursprüngliche 1 nm-Auflösung des ASD FieldSpec-III Spektroradiometer als spektral höchstauflösende Daten verwendet. Ausgehend von diesen Daten wurde die spektrale Auflösung in fünf Schritten bis auf eine Kanalbreite von 40 nm degradiert (**Tabelle 1**). Als Ergebnis lagen Reflexionsspektren in sechs verschiedenen spektralen Auflösungen mit unterschiedlicher Anzahl von Kanälen im Wellenlängenbereich 400 – 900 nm für die vergleichende Analyse vor.

Tabelle 1: Spektrale Auflösungen und Anzahl der Kanäle der Simulationen

Spektrale Auflösung	Anzahl der Kanäle
1 nm	501
3 nm	168
5 nm	101
10 nm	51
20 nm	26
40 nm	14

4 Ergebnisse und Diskussion

Die Gehalte an organischem Kohlenstoff in den untersuchten Bodenproben variierten zwischen 6.3 g kg^{-1} und 26.9 g kg^{-1} mit einem Mittelwert von 11.6 g kg^{-1} (Std.-Abw.: $4,9 \text{ g kg}^{-1}$). Allerdings lagen die untersuchten Parameter für den Schlag Faldieke nicht normalverteilt vor. Für den organischen Kohlenstoff war dies auf die Überrepräsentation niedriger Werte zurückzuführen. Da auch nach dem Logarithmieren keine Normalverteilung gegeben war, wurden die C_{org} -Werte aufsteigend sortiert und jede 4. Probe im Konzentrationsbereich unter 10 g kg^{-1} ausgeschlossen. Nach diesem Vorgehen war die Normalverteilung ($n = 30$) für organischen Kohlenstoff gegeben.

Tabelle 2: Einfluss der spektralen Auflösung auf die Schätzgüte

Spektrale Auflösung	Anzahl der Kanäle	Rank	r^2_{cv}	RMSE_{cv}	RPD_{cv}
1 nm	501	8	0,90	1,36	3,24
3 nm	168	1	0,91	1,31	3,36
5 nm	101	1	0,91	1,29	3,43
10 nm	51	1	0,92	1,24	3,56
20 nm	26	3	0,89	1,42	3,11
40 nm	14	1	0,88	1,53	2,89

Die Schätzungen des organischen Kohlenstoffes aus Reflexionsspektren unterschiedlicher spektraler Auflösung lieferten in allen Simulationen sehr gute Ergebnisse. In allen Fällen lag das kreuzvalidierte r^2 deutlich über 0,85 bei einem RMSE von unter $1,6 \text{ g kg}^{-1}$ (**Tabelle 2**). Der RPD erreichte im Minimum einen Wert von 2,89 und lag damit deutlich über dem von DUNN *et al.* (2002) für Bodenanalysen einer standortspezifischen Landwirtschaft als Untergrenze vorgeschlagenen Wert von 2,0 für exzellente Schätzungen.

Eine genauere Betrachtung der Ergebnisse zeigt dabei, dass die beste Schätzung des organischen Kohlenstoffes mit den Spektren in 10 nm Auflösung erreicht wurde und

nicht die spektral höchst aufgelösten Daten die besten Schätzungen ermöglichten. Ausgehend von der 1 nm-Auflösung nimmt das r^2 - wenn auch geringfügig mit verringerter spektraler Auflösung - bis zu einer Auflösung von 10 nm zu. Deutlicher wird die verbesserte Modellgüte mit abnehmender spektraler Auflösung bei Betrachtung des $RMSE_{cv}$ (Abnahme von 1,36 auf 1,24 g kg⁻¹) und des RPD (Anstieg von 3,24 auf 3,56). Bei der Verringerung der spektralen Auflösung auf 20 nm und weiter auf 40 nm kehrt sich dieser Trend um und die Güte der Schätzung organischen Kohlenstoffs nimmt deutlich ab. Die Verringerung der spektralen Auflösung scheint bis zu einem gewissen Grad wie eine Glättung der Spektraldaten zu wirken und so das Daten-inhärente Rauschen zu reduzieren. Wird allerdings durch das spektrale Resampling zu stark geglättet bzw. die Anzahl der spektralen Kanäle zu stark reduziert, wird sich dies auf die Schätzung des organischen Kohlenstoffes eindeutig negativ aus.

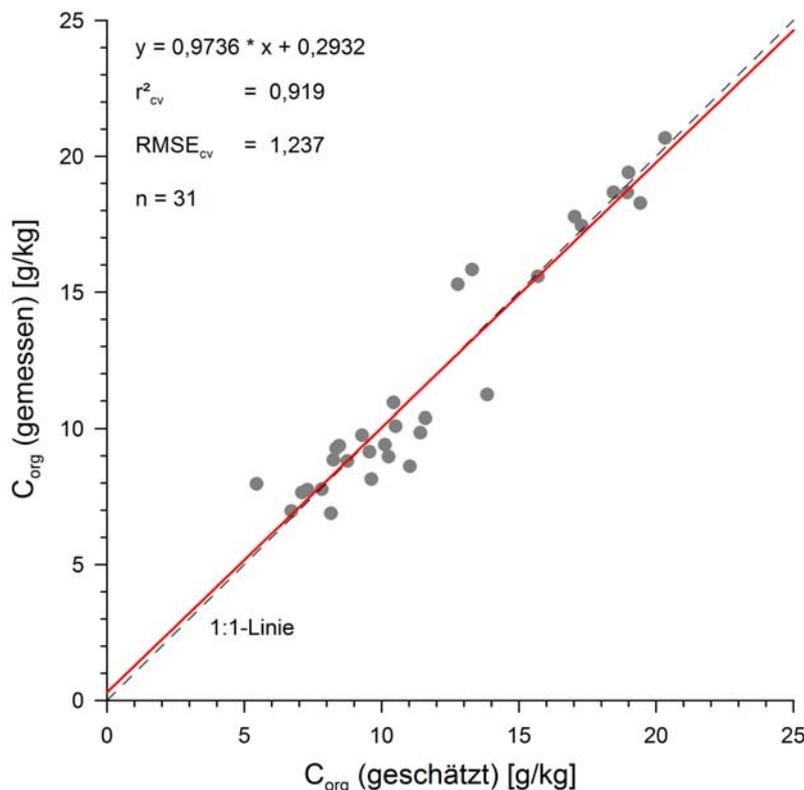


Abbildung 2: Scatterplot der PLS Schätzung (kruzvalidiert) für organischen Kohlenstoff aus simulierten Penta-Spek Daten in 10 nm Auflösung

In **Abbildung 2** sind die kruzvalidierten Schätzungen des organischen Kohlenstoffes für simulierten Penta-Spek Daten in 10 nm Auflösung dargestellt. Der Zusammenhang zwischen gemessenen und geschätzten Konzentrationen organischen Kohlenstoffes für den untersuchten landwirtschaftlichen Schlag lässt sich kein signifikanter Offset erkennen und die Regressionsgerade liegt sehr nahe der 1:1-Linie.

Ein operationeller Einsatz der Reflexionsspektrometrie und insbesondere des Penta-Spek-Systems für das Bodenmonitoring erfordert die akkurate Wiedergabe der räumlichen Konzentrationsmuster des organischen Kohlenstoffes. Um die Vorhersagekraft über punktuelle Daten hinaus zu belegen, wurden die im Labor gemessenen und die geschätzten Konzentrationen organischen Kohlenstoffes interpoliert (**Abbildung 3**).

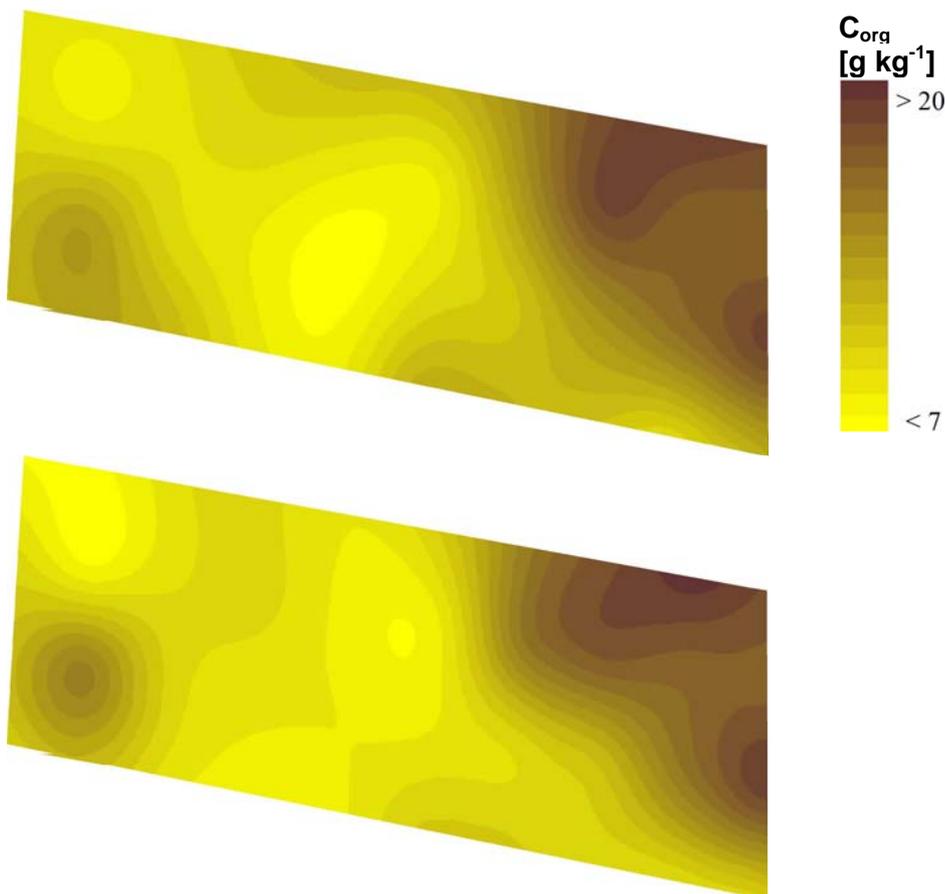


Abbildung 3: Interpolation gemessener (oben) und geschätzter (unten) Gehalte organischen Kohlenstoffes für den untersuchten Schlag

Ein Vergleich der Interpolationsergebnisse bestätigt, dass die Schätzung der PLSR eine relativ genaue Wiedergabe des räumlichen Musters organischen Kohlenstoffes ermöglicht. Das Muster, das sich für die geschätzten Gehalte ergibt, stimmt sehr gut mit den interpolierten gemessenen Werten überein. Um Unterschiede zwischen beiden räumlichen Mustern hervorzuheben wurden die räumlichen interpolierten Schätzungen von den aus den gemessenen Gehalten interpolierten Werten abgezogen. Dadurch zeigt sich, dass die Überschätzung mit $2,67\ g\ kg^{-1}$ im Norden des Feldes auftritt, während die stärkste Unterschätzung im rechten zentralen Bereich mit $2,83\ g\ kg^{-1}$ vorliegt.

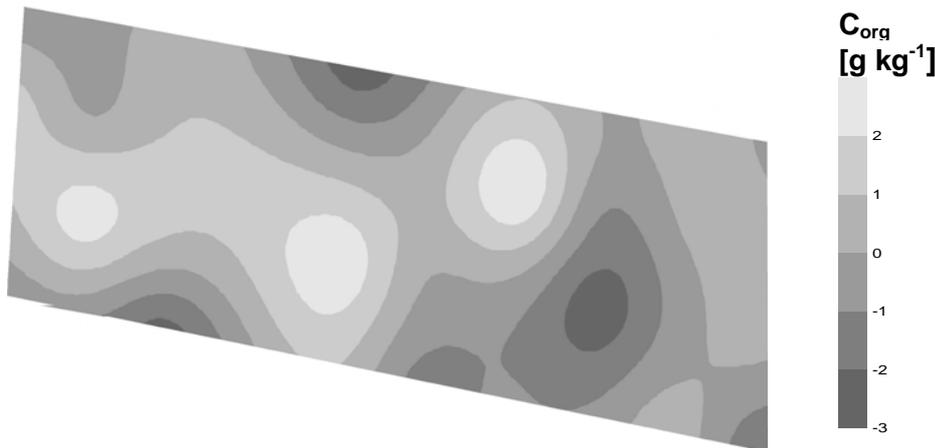


Abbildung 4: Unterschiede der räumlichen Verteilung interpolierter gemessener und geschätzter Konzentrationen organischen Kohlenstoffes

5 Zusammenfassung

Die Erfassung des organischen Kohlenstoffes ist von großer Relevanz für den Bodenschutz. Gleichzeitig kommt einer flächenscharfen Abschätzung des organischen Kohlenstoffgehaltes im Zusammenhang mit der globalen Erwärmung eine große Bedeutung zu. Aktuelle Karten des organischen Kohlenstoffes werden daher sowohl für das Monitoring als auch für das standortspezifische Betriebsmanagement in der Landwirtschaft benötigt. In der klassischen Vorgehensweise setzt dies eine hohe Anzahl von Bodenproben und deren zeit- und kostenaufwändige Laboranalyse voraus. Die Reflexionsspektrometrie besitzt das Potential, diese Einschränkungen zu überwinden, und so die zeitliche und räumliche Variabilität organischen Kohlenstoffes zu erfassen. Die Ergebnisse der vorliegenden Studie belegen, dass mittels PLSR aus Laborreflexionsspektren die Gehalte organischen Kohlenstoffes mit sehr hoher Genauigkeit geschätzt werden können. Die Simulation von Spektren des Penta-Spek-Systems belegte dabei insbesondere das Potential eines terrestrischen Hyperspektralsystems im Spektralbereich 400 – 900 nm für die Quantifizierung des organischen Kohlenstoffes landwirtschaftlicher Böden. Darüber hinaus konnte in den Simulation unterschiedlicher spektraler Auflösungen aufgezeigt werden, dass nicht ausschließlich eine hohe spektrale Auflösung relevant ist. Die Reduzierung der spektralen Auflösung führte in der Simulation scheinbar zu einer Glättung und somit Rauschreduzierung, so dass bessere Schätzungen möglich waren.

Danksagung

Diese Studie wurde durch das Bundesministerium für Bildung und Wissenschaft finanziell gefördert. Die Autoren danken Martin Bachmann und Sebastian Weide von der DLR für Organisation und die Möglichkeit der Teilnahme an der HyEurope Kampagne

2009. Ganz besonders möchten wir uns bei dem Landwirt des untersuchten Schlages für seine Kooperation und Unterstützung bedanken.

Literatur

- BATJES N.H. (1996):** Total carbon and nitrogen in the soils of the world. *European Journal of Soil Science*, 47: 151-163
- BAUMGARDNER M.F., SILVA L.F., BIEHL L.L., STONER E.R. (1985):** Reflectance properties of soils. *Advances in Agronomy*, 38: 1-44
- BEN-DOR E., BANIN A. (1995a):** Near-Infrared analysis (NIRA) as a method to simultaneously evaluate spectral featureless constituents in soils. *Soil Science*, 159(4): 259-270
- BEN-DOR E., BANIN A. (1995b):** Near-Infrared analysis as a rapid method to simultaneously evaluate several soil properties. *Soil Science Society of America Journal*, 59(2): 364-372
- DUNN B.W., BEECHER H.G., BATTEN G.D., CIAVARELLA S. (2002):** The potential of near-infrared reflectance spectroscopy for soil analysis – A case study from the Riverine Plain of south-eastern Australia. *Australian Journal of Experimental Agriculture*, 42: 607-614
- GOMEZ C., VISCARRA ROSSEL R.A., MCBRATNEY A.B. (2008):** Soil organic carbon prediction by hyperspectral remote sensing and field vis-NIR spectroscopy: An Australian case study. *Geoderma*, 146(3-4): 403-411
- JARMER T., VOHLAND M., LILIENTHAL H., SCHNUG E. (2008):** Estimation of some chemical properties of an agricultural soil by spectroradiometric measurements. *Pedosphere*, 18(2): 163-170
- JONES R.J.A., HIEDERER R., RUCO E., MONTANARELLA L. (2005):** Estimating organic carbon in the soils of Europe for policy support. *European Journal of Soil Science*, 56: 655–671
- KOSMAS C.S., CURI N., BRYANT R.B., FRANZMEIER D.P. (1984):** Characterisation of iron oxide minerals by second-derivative visible spectroscopy. *Soil Science Society of America Journal*, 48: 401-405
- KRISHNAN P., ALEXANDER D.J., BUTLER B., HUMMEL J.W. (1980):** Reflectance technique for predicting soil organic matter. *Soil Science Society of America Journal*, 44: 1282-1285
- LAL R., KIMBLE J.M., FOLLETT R.F., COLE C.V. (1998):** The potential of U.S. cropland to sequester carbon and mitigate the greenhouse effect, Ann Arbor Press, Chelsea, Michigan
- LILIENTHAL H., SCHNUG E. (2010):** Bodengestützte Erfassung räumlich hochaufgelöster Hyperspektraldaten. Das Penta-Spek System. In: 16. Workshop Computer-Bildanalyse in der Landwirtschaft, 4. Mai 2010, Braunschweig, Bornimer Agrartechnische Berichte; in diesem Band
- MALLEY D.F., MARTIN P.D., BEN-DOR E. (2004):** Application in analysis of soils. In *Near-infrared spectroscopy in agriculture (= Agronomy, 44)* (Eds. C.A. Roberts, J. Workman Jr & J.B. Reeves III), Madison, pp. 729-783
- RICHTER N., JARMER T., CHABRILLAT S., OYONARTE C., HOSTERT P., KAUFMANN H. (2009):** Free iron oxide determination in Mediterranean soils using diffuse reflectance spectroscopy. *Soil Science Society of America Journal*, 73: 72-81
- SELIGE T., BÖHNER J., SCHMIDHALTER U. (2006):** High resolution topsoil mapping using hyperspectral image and field data in multivariate regression modeling procedures. *Geoderma*, 136 (1-2): 235-244

UDELHOVEN T., EMMERLING C., JARMER T. (2003): Quantitative analysis of soil chemical properties with diffuse reflectance spectrometry and partial-least-square regression: A feasibility study. *Plant and Soil*, 251(2): 319-329

VISCARRA ROSSEL R.A., WALVOORT D.J.J., MCBRATNEY A.B., JANIK L.J., SKJEMSTAD J.O. (2006): Visible, near infrared or combined diffuse reflectance spectroscopy for simultaneous assessment of various soil properties. *Geoderma*, 131: 59–75

Erfahrungen mit berührungslosen Messverfahren für den Wasserversorgungszustand von Pflanzenbeständen

Experiences with contactless measurement methods for the crop water state of agricultural crops

Martin Kraft¹, Siegfried Schittenhelm², Klaus-Peter Wittich³

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

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

² *Institut für Pflanzenbau und Bodenkunde; Julius Kühn-Institut; Bundesallee 50; 38116 Braunschweig, Germany*

³ *Zentrum für Agrarmeteorologische Forschung; Deutscher Wetterdienst; Bundesallee 50; 38116 Braunschweig, Germany*

Zusammenfassung: In Trockenstressversuchen mit Kartoffeln, Mais, Sudangrashybride und Futterhirse wurden berührungslose Messungen der Oberflächentemperatur der Bestände mit einem Infrarotthermometer durchgeführt. Gleichzeitig wurde mit einem spektraloptischen Sensor die von den Beständen beeinflusste spektrale Reflexion des natürlichen Sonnenlichts gemessen. Sowohl die Bestandstemperaturen als auch die Indexwerte NDWI (normalized difference water index) und MSI (moisture stress index) wiesen deutliche Unterschiede zwischen den bewässerten und den unter Trockenstress stehenden Beständen auf. Dies traf auch für den NDVI (normalized difference vegetation index) zu, zumal die nicht bewässerten Flächen sehr deutliche Trockenstresssymptome zeigten und im Wachstum erheblich zurück geblieben waren.

Deskriptoren: Trockenstress, Wasserstatus, Bestandstemperatur, NDWI, MSI, NDVI.

Abstract: *Drought stress experiments were made in potatoes, maize, sorghum-sudangrass, and forage sorghum plots. The canopy temperature was measured by a contactless infrared thermometer. At the same time, the spectral reflectance of the canopies was measured with a spectral reflectance sensor under natural insolation. The canopy temperatures, the normalized difference water index (NDWI), and the moisture stress index (MSI) exhibited clear differences between the irrigated and the stressed crop areas. The normalized difference vegetation index (NDVI) also showed clear differences due to the fact that the drought stress was strong and the height of the non-irrigated canopies was much smaller than that of the irrigated plots.*

Keywords: *Drought stress, water status, canopy temperature, NDWI, MSI, NDVI.*

1 Einleitung

Die Bewässerung landwirtschaftlicher Kulturen spielt weltweit eine große Rolle. Weltweit wurden 2002 etwa 280 Mio. ha bewässert (FISCHER 2006), das sind 17% der insgesamt landwirtschaftlich genutzten Fläche (SOURELL 2008). In Deutschland werden ca. 560.000 ha bewässert, wobei der Anteil beregneter Flächen steigt bei gleichzeitigem Rückgang der landwirtschaftlich genutzten Flächen (HENNIES 2010). Die Verfügbarkeit von Wasser zu Bewässerungszwecken ist durch die europäische Wasserrahmenrichtlinie (WRRL vom 23. Oktober 2000) und das Wasserhaushaltsgesetz (WHG vom 31. Juli 2009) regional teilweise eingeschränkt. In vielen Bundesländern müssen die Landwirte für die Wasserentnahme zu Bewässerungszwecken eine Gebühr entrichten. In Niedersachsen beispielsweise sind es 0,511 Eurocent je m³ (Niedersächsisches Wassergesetz vom 19. Februar 2010). Zusätzlich fallen für die Bewässerung erhebliche Energiekosten an.

Der Landwirtschaft müssen deshalb sparsame und effiziente Techniken und Lösungen für die Bewässerung an die Hand gegeben werden. Bei der Entscheidung über Bewässerungstermine und -mengen spielt der tatsächliche Wasserbedarf der Kulturen eine wesentliche Rolle. Zur Ermittlung des Wasserbedarfs werden in der Regel Modelle eingesetzt, welche auf den Wetterdaten aufsetzen (z.B. „Agrowetter Beregnung“ des Deutschen Wetterdienstes). Daneben kann die im Boden enthaltene pflanzenverfügbare Wassermenge mittels Bodenfeuchtesensoren gemessen werden (WALKER *et al.* 2004).

Bisher gibt es nur wenig Möglichkeiten und Instrumente, um den Wasserbedarf direkt an den Pflanzen zu messen. Ein mögliches Messinstrument ist die am Markt erhältliche Scholanderbombe, mit der das Wasserpotenzial der Pflanzen an den Stängeln abgeschnittener Blätter gemessen werden kann. Eine Variation stellt das Pump-Up-Gerät dar, bei dem der erforderliche Druck durch eine Handpumpe erzeugt wird. Der Einsatz dieser Geräte wurde u.a. von PORTEN *et al.* (2007) für den Weinbau und von PASCHOLD & KLEBER (2007) für Spargel beschrieben. Diese Geräte werden jedoch in der Praxis nicht in nennenswertem Maße eingesetzt.

Alternativ zur Blattwasserpotenzialmessung mit der Scholanderbombe wird nach Möglichkeiten gesucht, den Wasserstatus der Pflanzen berührungslos online und vollautomatisch zu ermitteln. Ein Ansatz ergibt sich aus der Tatsache, dass gesunde Pflanzen bei hoher Sonneneinstrahlung und hohen Temperaturen eine aktive Temperaturregulation durch die Verdunstung von Wasser betreiben. Stehen die Pflanzen unter Trockenstress, so wird Wasser nur in reduziertem Maße oder gar nicht abgegeben, weshalb - bedingt durch die fehlende Verdunstungsabkühlung - die Blatttemperatur höher ist als bei ausreichend wasserversorgten Pflanzen. Zur berührungslosen Messung der Oberflächentemperatur eines Pflanzenbestands eignen sich Infrarotthermometer, welche preiswert am Markt verfügbar sind (FUCHS & TANNER 1966). Zwischen der Oberflächentemperatur ausreichend versorgter und stark gestresster Bestände wurden bei gleichen Wetterbedingungen Temperaturunterschiede von mehreren Grad Celsius gemessen (FUCHS 1990, IRMAK *et al.* 2000).

Ein weiterer Ansatz zur berührungslosen Messung des Wasserbedarfs der Pflanzen besteht in spektraloptischen Messungen der Reflexion von Infrarotlicht unterschiedlicher Wellenlängen im Bestand. Wasser ist zwar für sichtbares Licht durchlässig, es absorbiert aber teilweise Infrarotlicht. Gesunde grüne Pflanzenbestände reflektieren in den entsprechenden Wellenlängenbereichen weniger Infrarotlicht als trockene oder gestresste Bestände. Daraus haben verschiedene Autoren den Schluss gezogen, dass man aus der Infrarotreflexion von Beständen Aussagen über den Wasserversorgungsgrad treffen kann. Beispielsweise schlug GAO (1996) einen „normalized difference water index“ (NDWI) vor, der die Reflexion von Infrarotlicht der Wellenlängen 860 nm und 1.240 nm zur Erkennung von Pflanzenwasser nutzt. HUNT & ROCK (1989) schlugen einen „moisture stress index“ (MSI) zur Fernerkundung von Trockenstress anhand der Reflexion in den Wellenlängen 820 nm und 1.600 nm vor.

In diesem Beitrag wird über Versuchsmessungen im Jahr 2009 durch das Institut für Agrartechnologie und Biosystemtechnik des Johann Heinrich von Thünen-Instituts in Braunschweig berichtet, bei denen sowohl die Oberflächentemperatur als auch der NDWI und der MSI von Pflanzenbeständen mit unterschiedlicher Wasserversorgung gemessen wurde. Mit den Messungen sollte die Eignung der am Institut vorhandenen Technik für die Bestimmung der genannten Größen gezeigt und die Größenordnung der Effekte unter deutschen Klimabedingungen ermittelt werden.

2 Versuchsbeschreibung und Messverfahren

Die Messungen erfolgten im Jahr 2009 in zwei verschiedenen Versuchen. In einem Versuch des Deutschen Wetterdiensts (DWD) wurden Kartoffeln der Sorte *Solara* auf einem Versuchsfeld in Braunschweig angebaut. Der Anbau und die Kulturführung erfolgten nach der üblichen landwirtschaftlichen Praxis, wobei die Aussaat erst am 27. Mai erfolgen konnte. Eine Hälfte des Felds erhielt nur die natürlichen Niederschläge. Die zweite Hälfte wurde zusätzlich mit Tropfschläuchen bewässert, welche zwischen die Kartoffeldämme gelegt waren. Infolge der in 2009 aufgetretenen sehr heißen und trockenen Witterung wuchsen die nicht bewässerten Kartoffeln nur schlecht und die Pflanzen litten unter verschiedenen Blattkrankheiten.

Der zweite Versuch erfolgte am Institut für Pflanzenbau und Bodenkunde des Julius Kühn-Instituts ebenfalls in Braunschweig. Im Gesamtrahmen eines größeren Versuchs wurden die drei Energiepflanzen Mais (Sorte *Atletico*), Sudangrashybride (Sorte *Lussi*) und Futterhirse (Sorte *Sucrosorgo 506*) angebaut. Für jede Art erfolgten drei zeitlich versetzte Aussaattermine. Der Versuch erfolgte mit zwei unterschiedlichen Bewässerungsregimen: Die Hälfte der Parzellen erhielt nur den natürlichen Niederschlag, die andere Hälfte erhielt zusätzliche Wassergaben über Tropfschläuche mit dem Ziel, die Bodenfeuchte oberhalb 50% nutzbare Feldkapazität zu halten.

Die Messungen erfolgten mit einem am Institut gebauten Mehrsensorsystem. Dieses beinhaltet ein Infrarotthermometer DM21 der Fa. B+B Thermo-Technik GmbH. Die Temperaturmessung erfolgt bei diesem Thermometer im Wellenlängenbereich 8-14 μm und mit einem Öffnungswinkel von ca. 28°. Für die Temperaturmessung wurde die Standardeinstellung des DM21 ab Werk beibehalten. Dies beinhaltete die systeminterne Korrektur des Temperatursignals auf der Basis der im Messkopf selbst herrschenden Temperatur sowie einem festen Emissionsgrad von 0,97. Als Referenztemperatur der Umgebungsluft wurde die Temperatur im Messkopf verwendet, wie sie vom DM21 gemessen wurde. Das DM21 war in ein größeres Aluminiumgehäuse eingebaut, durch welches die Luft mit einem aktiven Lüfter geführt wurde. Die Genauigkeit dieser Referenztemperaturmessung wurde nicht geprüft.

Zur Beschreibung des Temperaturverhaltens der Bestände wurde die Temperaturdifferenz DTIR der mit dem Infrarotthermometer gemessenen Bestandstemperatur T_{Bestand} und der Lufttemperatur T_{Luft} berechnet:

$$DTIR = T_{\text{Bestand}} - T_{\text{Luft}} .$$

Die DTIR entspricht der von anderen Autoren verwendeten canopy temperature depression (CTD, z.B. BALOTA *et al.* 2008) bis auf das entgegengesetzte Vorzeichen. Bei dem Kartoffelversuch erfolgten zur gleichen Zeit (+/- 30 Minuten) Aufnahmen des Bestands mit einer Infrarot-Thermografiekamera ThermaCAM P675 von FLIR Systems. Begleitend wurde die Lufttemperatur (und Luftfeuchte) in 2 m Höhe über Grund in der Feldmitte mit einem elektrisch ventilierten Psychrometer (Typ "Frankenberger") der Fa. Theodor Friedrichs (Schenefeld) gemessen (Messfehler: +/- 0,1°C).

Neben dem Thermometer beinhaltet das Messsystem spektraloptische Kanäle u.a. bei den Wellenlängen 780 nm, 900 nm und 1.675 nm. Die Kanäle bestehen jeweils aus einer Fotodiode und einem Wellenlängenbandfilter; der Öffnungswinkel beträgt ca. 64°. Die spektraloptischen Messkanäle sind doppelt ausgelegt, wobei je ein Kanal in dem vertikal nach unten gerichteten Messkopf zusammen mit dem Infrarotthermometer eingebaut ist. Der zweite Kanal ist in einem vertikal nach oben gerichteten Referenzmesskopf mit Kosinusrezeptor eingebaut, mit welchem die einfallende Strahlung der oberen Hemisphäre gemessen wird. Der Reflexionsgrad wird in jedem Kanal als Quotient des vom Bestand reflektierten durch das von oben einfallende Licht berechnet.

Das Messsystem war an einem seitlich am Schlepper angebrachten Ausleger befestigt. Für die Kartoffeln hing das Messsystem 4,00 m über dem Boden. Für Mais und Sorghumhirsen betrug die Höhe zunächst 4,25 m über dem Boden und wurde mit zunehmendem Wachstum der Pflanzen bis auf 4,75 m erhöht. Damit wurden die in **Tabelle 1** dargestellten Flächen (bezogen auf Bodenhöhe) gemessen.

Tabelle 1: Größe der kreisförmigen Messfläche auf Bodenhöhe für die Temperatur des Bestands und für die Lichtreflexion des Bestands in Abhängigkeit der Messkopfhöhe

Höhe des Messkopfs über dem Boden	Temperaturmessung (Öffnungswinkel 28°)	Optische Reflexionsmessung (Öffnungswinkel 64°)
4,00 m	Ø 2,00 m / 3,14 m ²	Ø 5,02 m / 19,8 m ²
4,25 m	Ø 2,13 m / 3,56 m ²	Ø 5,34 m / 22,4 m ²
4,75 m	Ø 2,38 m / 4,45 m ²	Ø 5,96 m / 27,9 m ²

Aus den verfügbaren Kanälen wurden die spektraloptischen Indizes wie folgt berechnet. Der NDWI (normalized difference water index; GAO 1996) wurde aus den Reflexionsgraden bei 780 nm (R_{780}), bei 900 nm (R_{900}) und bei 1.675 nm (R_{1675}) berechnet:

$$NDWI = \frac{R_{780} + R_{900} - 2R_{1675}}{R_{780} + R_{900} + 2R_{1675}}$$

Der MSI (moisture stress index; ROCK *et al.* 1986) wurde aus den Reflexionsgraden bei 780 nm (R_{780}) und bei 1.675 nm (R_{1675}) berechnet:

$$MSI = \frac{R_{1675}}{R_{780}}$$

Zum Vergleich wurde auch der NDVI (normalized difference vegetation index) bestimmt:

$$NDVI = \frac{R_{780} - R_{670}}{R_{780} + R_{670}}$$

3 Messergebnisse für Kartoffeln

Während bis zum 27.7.2009, noch vor der ersten künstlichen Regengabe, beide Teilparzellen des Kartoffelbestands erwartungsgemäß nahezu die gleichen Temperaturen aufwiesen, zeigte sich ab dem Beginn der Bewässerung ein deutlicher Temperaturunterschied zwischen den Behandlungen. Bei Lufttemperaturen von über 25°C waren die nicht bewässerten Kartoffelflächen deutlich wärmer als die bewässerten (**Abbildung 1**). So wies z.B. am 19.8.2009, einen Tag nach einer Wassergabe von 38 mm, der unbewässerte Teil des Bestands eine um ca. 6°C höhere Bestandstemperatur auf.

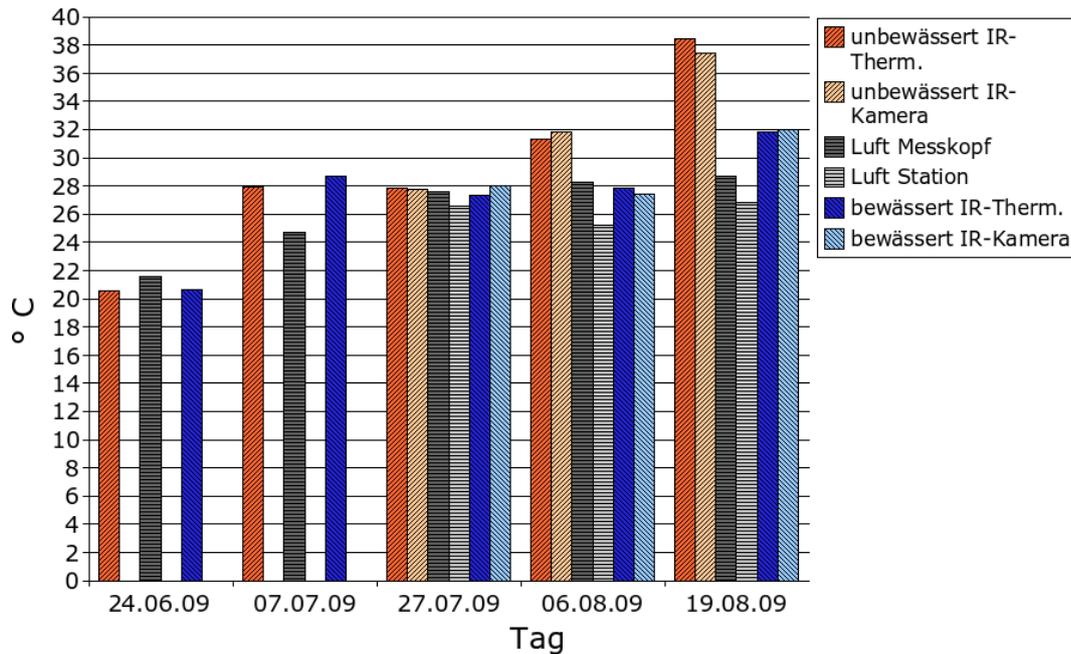


Abbildung 1: Temperaturen von Kartoffelparzellen bei unterschiedlicher Wasserversorgung. Die Temperaturen wurden mit einem Infrarotthermometer DM21 und einer Infrarotkamera gemessen. Die Referenzmessung der Lufttemperatur erfolgte mit dem im DM21 eingebauten Thermometer und in einer in der Nähe stehenden Wetterstation. Die Bewässerung erfolgte erstmals am 29.7.09 (35 mm) und weiter am 5.8.09 (25 mm) und am 18.8.09 (38 mm) mittels Tropfschläuchen zwischen den Kartoffelreihen.

4 Messergebnisse für Energiepflanzen

Auch bei den Energiepflanzen zeigt sich ab dem Beginn der Bewässerung ein deutlicher Temperaturunterschied zwischen den bewässerten und den nicht bewässerten Flächen. Der Temperaturunterschied ist an den heißeren Tagen größer, wobei die unter erheblichem Trockenstress stehenden Bestände eine Oberflächentemperatur aufwiesen, welche um bis zu 7°C über der Lufttemperatur lag. Die Oberflächentemperatur der bewässerten Bestände lag dagegen bei diesem Versuch immer leicht unter der Lufttemperatur. In **Abbildung 2** sind die Messergebnisse bei Mais dargestellt; für das Sudangras und die Futterhirse ergaben sich ähnliche Werte. In den **Abbildungen 2 bis 4** sind jeweils die Mittelwerte der Bestände über die drei verschiedenen Aussattermine dargestellt.

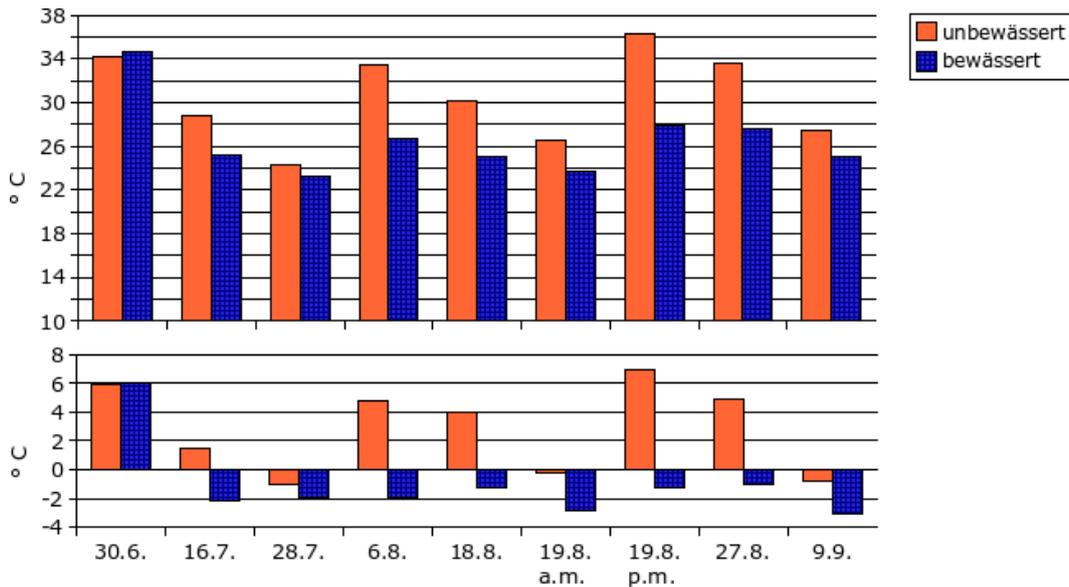


Abbildung 2: Temperaturen von Maisbeständen bei unterschiedlicher Wasserversorgung. Oben: Absolute Temperaturen in °C; unten: Differenztemperatur DTIR (Bestandstemperatur – Lufttemperatur). Die Temperaturen wurden mit einem Infrarotthermometer DM21 gemessen. Die Referenzmessung der Lufttemperatur erfolgte mit dem im DM21 eingebauten Thermometer. Die Bewässerung erfolgte erstmals am 1./2.7.09 und weiter am 6./7.7., 16.7., 30./31.7., 4.-6.8., 11.-13.8., 18.-20.8., 26./27.8., 1./2.9. und am 9./10.9.09 mittels Tropfschläuchen.

Aus den spektraloptischen Reflexionsgraden des Bestands wurden zwei in der Literatur dokumentierte Wasserstressindizes berechnet. Der NDWI (normalized difference water index, GAO 1996) zeigte bei allen drei untersuchten Arten ab Bewässerungsbeginn zu allen Terminen höhere Werte für die bewässerte als für die nicht bewässerte Variante (**Abbildung 3**). Der MSI (moisture stress index, Rock *et al.* 1986) zeigte umgekehrt ebenfalls ab Bewässerungsbeginn für alle Arten zu allen Terminen höhere Werte für die nicht bewässerte Variante (**Abbildung 4**).

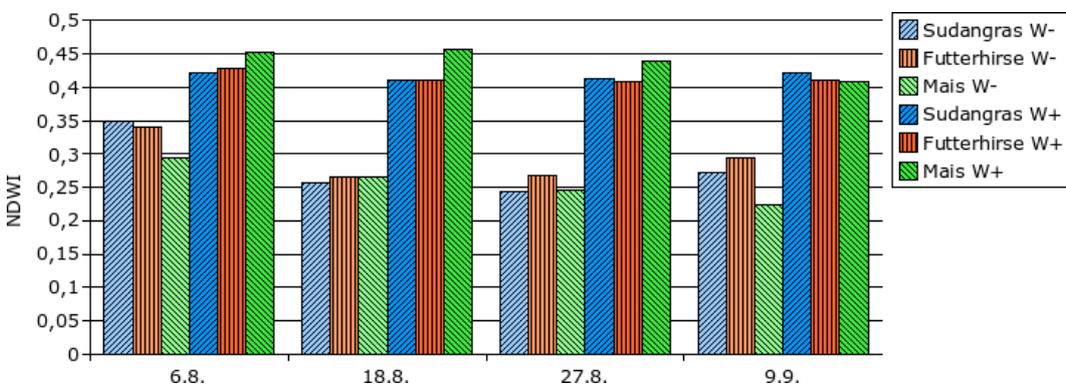


Abbildung 3: Spektraloptischer Indexwert NDWI (normalized difference water index) von Pflanzenbeständen bei unterschiedlicher Wasserversorgung. Die drei linken Säulen bei jedem Messtermin stellen die Werte der unbewässerten Variante (W-) dar; die drei rechten Säulen die bewässerte (W+). Bewässerungstermine siehe **Abbildung 2**.

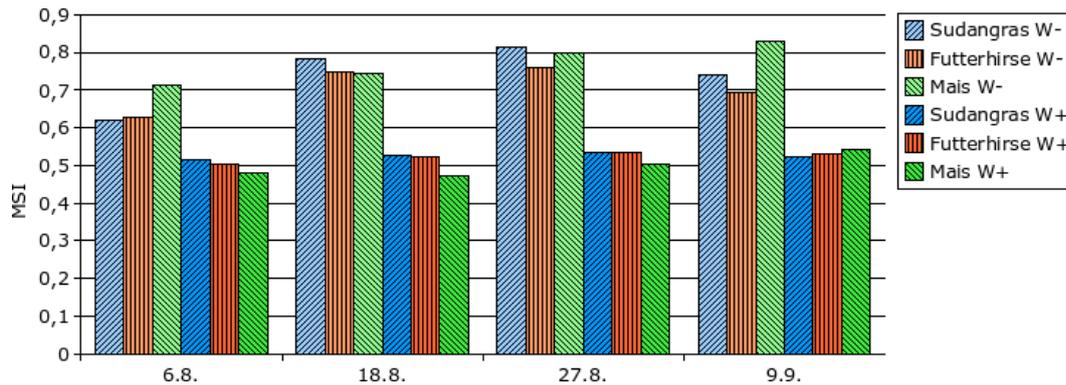


Abbildung 4: Spektraloptischer Indexwert MSI (moisture stress index) von Pflanzenbeständen bei unterschiedlicher Wasserversorgung. (Bewässerungstermine siehe **Abbildung 2**)

Der Sommer 2009 war in Braunschweig vergleichsweise heiß und trocken. Die nicht bewässerten Bestände zeigten deshalb erhebliche Stresssymptome. Sie blieben im Wachstum deutlich zurück und Teile der Blätter vertrockneten. Dies zeigte sich auch in den gemessenen Vegetationsindizes, z.B. im NDVI. Daraus ergibt sich die Frage, ob die gemessenen „Wasser“-Indizes eine spezifische Information über den Wasserversorgungszustand der Pflanzen beinhalten oder im Wesentlichen dieselbe Information wie der NDVI tragen. Tatsächlich korrelieren der NDWI ($r^2 = 0,63$) und der MSI ($r^2 = 0,69$) mit dem NDVI (**Abbildung 5**).

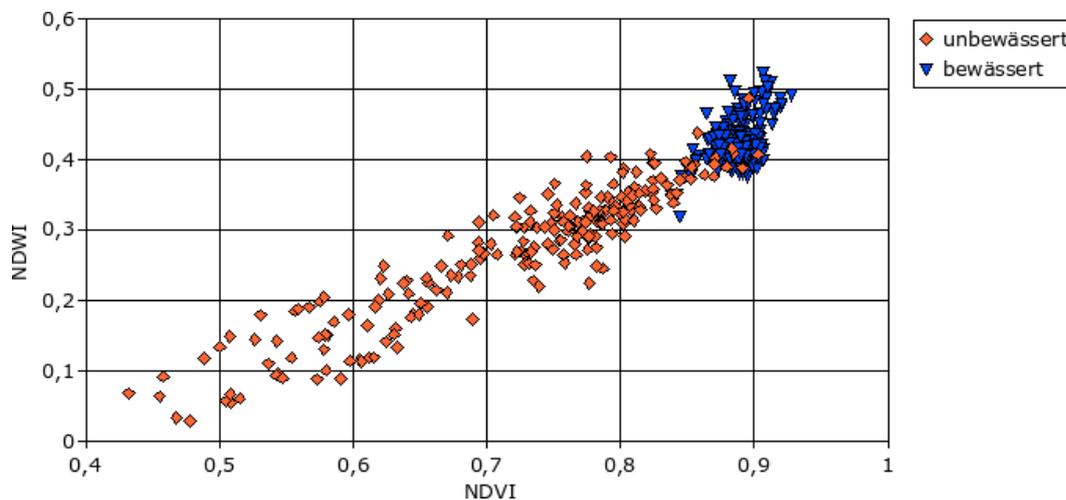


Abbildung 5: NDWI und NDVI der Energiepflanzenbestände ab dem Messtermin 6.8.2009. Beide Indizes waren deutlich korreliert ($r^2 = 0,63$). Bei getrennter Betrachtung ergeben sich für die beiden Behandlungen „unbewässert“ und „bewässert“ Bestimmtheitsmaße von $r^2 = 0,78$ bzw. $r^2 = 0,01$

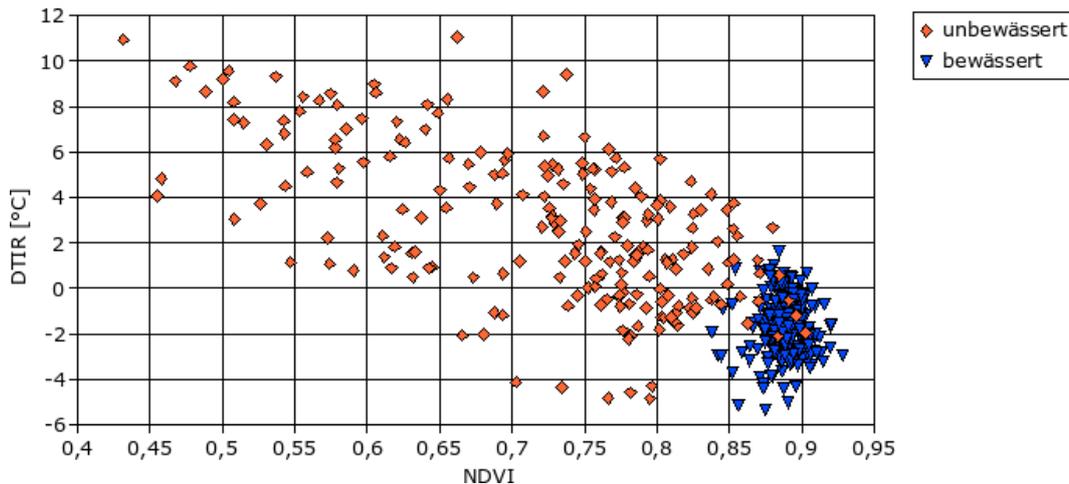


Abbildung 6: Temperaturdifferenz DTIR und NDVI der Energiepflanzenbestände ab dem Messtermin 6.8.2009 ($r^2 = 0,49$). Bei getrennter Betrachtung ergeben sich für die beiden Behandlungen „unbewässert“ und „bewässert“ Bestimmtheitsmaße von $r^2 = 0,43$ bzw. $r^2 = 0,00$.

Im Vergleich dazu war die Temperaturdifferenz DTIR etwas geringer mit dem NDVI korreliert ($r^2 = 0,49$, **Abbildung 6**). Die in **Abbildung 6** dargestellten Einzelmesswerte lassen vermuten, dass der NDVI ein besserer Indikator für den Wassermangel ist als die Temperaturdifferenz DTIR. Einige Messungen der unbewässerten Bestände ergaben Temperaturen, die um mehr als 4°C unter der Umgebungsluft lagen. Dies bedarf aber dringend der Überprüfung; es kann nicht ausgeschlossen werden, dass die Lufttemperatur in dem eingesetzten Messsystem höher angezeigt worden ist, als sie tatsächlich war.

5 Diskussion

Die im ersten Projektjahr gewonnenen Daten bestätigten, dass sowohl die Bestandstemperatur als auch die spektraloptischen Indexwerte NDWI und MSI die unterschiedliche Wasserversorgung deutlich widerspiegeln.

Die bewässerten Bestände wiesen wie erwartet an heißen sonnigen Tagen eine deutlich tiefere Oberflächentemperatur auf als die unter Trockenstress stehenden Bestände unter denselben Wetterbedingungen. Bei der Bewertung der gemessenen Temperaturunterschiede ist aber zu beachten, dass die Bewässerung immer sehr kurzfristig vor oder sogar noch gleichzeitig mit den Messungen erfolgte. Das von den Tropfschläuchen auf die Bodenoberfläche tropfende Wasser hat durch seine kühlere Temperatur und durch Verdunstung direkt an der Bodenoberfläche sicher einen Einfluss auf die gemessenen Bestandstemperaturen gehabt. Hier müssen weitere Versuche unter geänderten Bedingungen erfolgen. Pflanzen werden bei starkem Sonnenschein und hohen Temperaturen besonders zur Transpiration zum Zweck der eigenen Abkühlung angeregt (Transpirationskühlung). Solche Wetterbedingungen lagen während der Messungen

vor. Inwieweit signifikante messbare Temperaturunterschiede auch bei kühlerer Temperatur oder bewölktem Himmel auftreten, muss ebenfalls geprüft werden.

Die zwei untersuchten spektraloptischen Indizes zeichneten die unterschiedliche Bewässerung ebenfalls gut nach. Ihre Messung ist, was das Messverfahren selbst betrifft, weitgehend unabhängig von den aktuellen Wetterdaten und damit möglicherweise weniger aufwändig und stör anfällig als die Temperaturmessung. NDWI und MSI wiesen eine hohe Korrelation mit dem NDVI auf und sind somit Indexwerte, welche zunächst Informationen über die Menge der gesunden grünen Pflanzenmasse und deren Chlorophyllgehalt beinhalten. Inwieweit NDWI und MSI darüber hinaus Informationen spezifisch zum Wassergehalt oder dem Wasserpotenzial der Pflanzen liefern, muss noch untersucht werden. Eine Eignung dieser Indizes wie auch des NDVI selbst für Aussagen über den Wasserversorgungszustand wird aber angenommen, da eine unzureichende Wasserversorgung bereits kurzfristig zu verringertem Wachstum führt.

Im Rahmen des ersten Projektjahrs konnten nur wenige der aus der Literatur bekannten Indexwerte untersucht werden, welche Aussagen über den Wasserversorgungszustand liefern. Im weiteren Projektverlauf sollen auch andere, in internationalen oder ausländischen Untersuchungen ebenfalls bereits mehrfach eingesetzte Indizes wie der CWSI (Crop water stress index, MORAN *et al.* 1994, CREMONA *et al.* 2000) oder der WSVI (water supply vegetation index, JAIN *et al.* 2010) untersucht werden.

Literatur

- BALOTA M., PAYNE W.A., EVETT S.R., PETERS T.R. (2008):** Morphological and Physiological Traits Associated with Canopy Temperature Depression in Three Closely Related Wheat Lines. *Crop Science*, 48: 1897-1910
- CREMONA M.V., WITTICH K.P., SOURELL H. (2000):** The use of the crop water stress index in humid climates. Interner Bericht. Agrarmeteorologische Forschungsstelle Braunschweig, Deutscher Wetterdienst, und Institut für Betriebstechnik und Bauforschung, FAL Braunschweig, 18 Seiten
- FISCHER (2006):** Der Fischer Weltalmanach 2006, Zahlen, Daten, Fakten. Fischer Taschenbuch-Verlag, Frankfurt am Main
- FUCHS M., TANNER C.B. (1966):** Infrared Thermometry of Vegetation. *Agronomy Journal*, 58: 597-601
- FUCHS M. (1990):** Infrared Measurement of Canopy Temperature and Detection of Plant Water Stress. *Theor. Appl. Climatol.*, 42: 253-261
- GAO B.C. (1996):** NDWI – A Normalized Difference Water Index for Remote Sensing of Vegetation Liquid Water from Space. *Remote Sensing of Environment*, 58: 257-266
- HENNIES G. (2010):** Wasserwirtschaftliche Rahmenbedingungen / gesetzliche Vorgaben. Beitrag in: Feldberechnung IV, Rationalisierungskuratorium für Landwirtschaft, Hrsg. H. Sourell. In Vorbereitung
- HUNT E.R., ROCK B.N. (1989):** Detection of Changes in Leaf Water Content Using Near- and Middle-Infrared Reflectances. *Remote Sensing of Environment*, 30: 43-54

- IRMAK S., HAMAN D.Z., BASTUG R. (2000):** Determination of Crop Water Stress Index for Irrigation Timing and Yield Estimation of Corn. *Agronomy Journal*, 92: 1221-1227
- JAIN S.K., KESHRI R., GOSWAMI A., SARKAR A. (2010):** Application of meteorological and vegetation indices for evaluation of drought impact: a case study for Rajasthan, India. *Natural Hazards*, DOI 10.1007/s11069-009-9493-x
- MORAN M.S., CLARKE T.R., INOUE Y., VIDAL A. (1994):** Estimating Crop Water Deficit Using the Relation between Surface-Air Temperature and Spectral Vegetation Index. *Remote Sensing of Environment* 49: 246-263
- PASCHOLD P.J., KLEBER J. (2007):** Blattwasserpotential von Spargelpflanzen – messen mit mobilem Messgerät. 44. Gartenbauwissenschaftliche Tagung, 21.-24. Juni 2007, Erfurt, Kurzfassungen der Vorträge und Poster, 81
- PORTEN M., KOHL E., HERMEN S. (2007):** Bewässerungswürdigkeit einfach messen. *Die Winzerzeitschrift*, April 2007: 51-52
- SURELL H. (2008):** Durstiges Deutschland: Zum Wassereinsatz für unsere Nahrung. *Kirche Ländl. Raum* 59 (1): 22-29
- WALKER J.P., WILLGOOSE G.R., KALMA J.D. (2004):** In situ measurement of soil moisture: a comparison of techniques. *Journal of Hydrology*, 293: 85-99

Optical Analysis

for Agricultural Products and Processes

Quality control with NIRQuest

Near infrared spectroscopy is a great measurement method for sugar and moisture analyses. The NIRQuest spectrometer can measure up to 2500 nm and is an excellent sorting tool for quality grading of agricultural products.



PAR measurements with the Jaz light meter

The Jaz lightmeter is the universal tool for monitoring natural and artificial light conditions in greenhouses. The Jaz light meter gives you the full spectral information, but can also report in key parameters like PAR, Lumen, Lux and colour temperature.

Oxygen measurements with NeoFox

NeoFox is a fluorescence-based optical sensor system that can be used to monitor oxygen. NeoFox has fast response times and does not consume oxygen. In agricultural applications, optical oxygen sensors are used for soil oxygenation analysis, water quality analysis and fermentation and climate control.



Crop analysis using transmission and reflection measurements

Measuring the transmission and reflection of petals and leaves can be used for chlorophyll quantification, colour measurements, health and stress indication and environmental studies.



Teilnehmerliste

am 4. Mai 2010 in Braunschweig

Dipl.-Agr.Biol. Katharina Alheit
Universität Hohenheim
Landessaatzuchtanstalt [720] LSA - Triticale
Fruwirthstraße 21
70599 Stuttgart

Tel.: +49 711 459 231 28
Fax: +49 711 459 238 41
Mail: alheit@uni-hohenheim.de
URL: www.uni-hohenheim.de

Elke Bauriegel
Leibniz-Institut für Agrartechnik Potsdam-
Bornim
Abteilung 4: Technik im Pflanzenbau
Max-Eyth-Allee 100
14469 Potsdam

Tel.: +49 331 5699 414
Fax: +49 331 5699 849
Mail: ebauriegel@atb-potsdam.de
URL: www.atb-potsdam.de

Dr. Karl-Heinz Dammer
Leibniz-Institut für Agrartechnik Potsdam-
Bornim
Abteilung 4: Technik im Pflanzenbau
Max-Eyth-Allee 100
14469 Potsdam

Tel.: +49 331 5699 418
Fax: +49 331 5699 341
Mail: kdammer@atb-potsdam.de
URL: www.atb-potsdam.de

Dr. Jochen Hemming
Wageningen UR
Greenhouse Horticulture
Droevendaalsesteeg 1
NL-6708 PB Wageningen

Tel.: +31 317 486 710
Fax: +31 317 41 80 94
Mail: jochen.hemming@wur.nl
URL: www.glastuinbouw.wur.nl

Dr. Werner Herppich
Leibniz-Institut für Agrartechnik Potsdam-
Bornim
Abteilung 6: Technik im Gartenbau
Max-Eyth-Allee 100
14469 Potsdam

Tel.: +49 331 5699 620
Fax: +49 331 5699 849
Mail: wherppich@atb-potsdam.de
URL: www.atb-potsdam.de

Dr. Marcus Jansen
Forschungszentrum Jülich GmbH
Institut für Chemie und Dynamik der Geo-
sphäre; ICG-3: Phytosphäre
Wilhelm-Johnen-Straße, Gebäude 06.2,
Raum 313
52428 Jülich

Tel.: +49 2461 61 6784
Fax: +49 2461 61 2492
Mail: m.jansen@fz-juelich.de
URL: www.JPPC.de

Martina Keller
Universität Hohenheim
Institut für Phytomedizin [360], Fachgebiet
Herbologie
70599 Stuttgart

Tel.: +49 711 459 24057
Fax:
Mail: Martina.Keller@uni-hohenheim.de
URL: turbo.uni-hohenheim.de

MSc. Dipl.-Ing. [FH] Ralph Klose
Fachhochschule Osnabrück
Albrechtstraße 30
49076 Osnabrück

Tel.: + 49 541 969-3164
Fax: +49 541 969-2235
Mail: ralph.klose@gmx.de
URL:

Martin Kraft
Johann Heinrich von Thünen-Institut Braun-
schweig
Institut für Agrartechnologie u. Biosystem-
technik
Bundesallee 50
38116 Braunschweig

Tel.: +49 531 596 4140
Fax: +49 531 596-4299
Mail: martin.kraft@vti.bund.de
URL: www.vti.bund.de

Dr. Holger Lilienthal
Julius Kühn-Institut Braunschweig
Institut für Pflanzenbau und Bodenkunde
Bundesallee 50
38116 Braunschweig

Tel.: +49 531 596 2136
Fax: +49 531 596 2199
Mail: holger.lilienthal@jki.bund.de
URL: www.jki.bund.de

Christian Marx
Leibniz Universität Hannover
Institut für Biologische Produktionssysteme
Herrenhäuser Straße 2
30419 Hannover

Tel.: +49 511 762 5899
Fax: +49 511 762 2649
Mail: marx@bgt.uni-hannover.de
URL: www.bgt-hannover.de

Heiko Neeland
Johann Heinrich von Thünen-Institut Braun-
schweig
Institut für Agrartechnologie u. Biosystem-
technik
Bundesallee 50
38116 Braunschweig

Tel.: +49 531 596 4252
Fax: +49 531 596-4299
Mail: heiko.neeland@vti.bund.de
URL: www.vti.bund.de

Dr. Susanne Otter-Nacke
CLAAS Agrosystems GmbH & Co. KG
Produkt-Manager
Bäckerkamp 19
33330 Gütersloh

Tel.: +49 5241 3006 4820
Fax: +49 5241 3006 4801
Mail: otter-nacke@agrocom.com
URL: www.agrocom.com

Christian Pfitzner
Julius Kühn-Institut Braunschweig
Institut für Pflanzenbau und Bodenkunde
Bundesallee 50
38116 Braunschweig

Tel.: +49 531 596 2314
Fax: +49 531 596 2399
Mail: christian.pfitzner@jki.bund.de
URL: www.jki.bund.de

Kristin Pils
Fachhochschule Osnabrück
Fakultät Ingenieurwissenschaften und Infor-
matik
Albrechtstraße 30
49076 Osnabrück

Tel.:
Fax:
Mail: Kristin.Pils@fh-osnabrueck.de
URL:

Dipl.-Ing. agr. Hagen F. Piotraschke
Agri Con GmbH
Leiter für Forschung und Entwicklung
im Wiesengrund 4
04749 Jahna

Tel.: +49 343 24-524 341
Fax: +49 343 24-524 400
Mail: hagen.piotraschke@agricon.de
URL: www.agricon.de

Dr. Florian Rahe
AMAZONEN-WERKE
H. Dreyer GmbH & Co. KG
Am Amazonenwerk 9-13
49205 Hasbergen

Tel.: +49 540 5501 5375
Fax: +49 540 5501 234
Mail: dr.florian.rahe@amazone.de
URL: www.amazone.de

Prof. Dr. Thomas Rath
Leibniz Universität Hannover
Institut für Biologische Produktionssysteme
Herrenhäuser Straße 2
30419 Hannover

Tel.: +49 511 762 3288
Fax: +49 511 762 2649
Mail: rath@bgt.uni-hannover.de
URL: www.bgt-hannover.de

Prof. Dr. Arno Ruckelshausen
Fachhochschule Osnabrück
Fakultät Ingenieurwissenschaften und Infor-
matik
Albrechtstraße 30
49076 Osnabrück

Tel.: +49 541 969 2090
Fax: +49 541 969 2235
Mail: a.ruckelshausen@fhos.de
URL: www.ecs.fh-osnabrueck.de

Dr. Michael Rudolph
Ocean Optics Germany GmbH
Vertrieb Spektroskopie
Maybachstraße 11
73760 Ostfildern

Tel.: Firma+49 711 341 696-0
Home Office+49 5136 974 6705
Mobil +49 162 215 3834
Fax: +49 711 341 696-85
Mail: michael.rudolph@oceanoptics.eu
URL: www.oceanoptics.eu

Dr. Siegfried Schittenhelm
Julius Kühn-Institut Braunschweig
Institut für Pflanzenbau und Bodenkunde
Bundesallee 50
38116 Braunschweig

Tel.: +49 531 596 2318
Fax: +49 531 596 2399
Mail: siegfried.schittenhelm@jki.bund.de
URL:

Dr. Jürgen Schulz
FRITZMEIER Umwelttechnik GmbH & Co.
KG
Dorfstraße 7
85653 Großhelfendorf

Tel.: +49 809 587 339-229
Fax: +49 809 587 339-472
Mail: j.schulz@fritzmeier.de
URL: www.fritzmeier.com

Dipl.-Ing. [FH] Marius Thiel
Fachhochschule Osnabrück
Management und Technik
Albrechtstraße 30
49076 Osnabrück

Tel.: +49 541 969-2071
Fax: +49 541 969-2235
Mail: ma.thiel@fh-osnabrueck.de
URL: www.fh-osnabrueck.de

Dipl.-Ing. Werner Trentmann
Fachhochschule Osnabrück
Fakultät Ingenieurwissenschaften und Informatik
Albrechtstraße 30
49076 Osnabrück

Tel.: +49 541 969 2161
Fax:
Mail: w.trentmann@t-online.de
URL:

Dr. Maik Veste
Brandenburgische Technische Universität
Cottbus
Zentral Analytisches Labor
Konrad-Wachsmann-Allee 6
03046 Cottbus

Tel.:
Fax:
Mail: maik.veste@me.com
URL:

PD Dr. Achim Walter
Forschungszentrum Jülich
ICG-3: Phytosphäre
52425 Jülich

Tel.: +49 2461 61 8684
Fax: +49 2461 61 2492
Mail: a.walter@fz-juelich.de
URL: <http://www.fz-juelich.de/icg/icg-3/Mitarbeiter/Walter>

Martin Weis
Universität Hohenheim
Institut für Phytomedizin [360], Fachgebiet
Herbologie
70599 Stuttgart

Tel.: +49 711 459 22938
Fax:
Mail: Martin.Weis@uni-hohenheim.de
URL: turbo.uni-hohenheim.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
Heft 63	Experten-Workshop Lagerung von Holzhackschnitzeln	2008
Heft 64	Postharvest unlimited 2008	2008
Heft 65	Vom Agrarrohstoff zu neuen Produkten – Verfahrenstechnische Forschung im Nacherntebereich	2009
Heft 66	16. Arbeitswissenschaftliches Kolloquium des VDI-MEG Arbeitskreises Arbeitswissenschaften im Landbau	2009
Heft 67	Monitoring der methanbildenden Mikroflora in Praxis-Biogasanlagen im ländlichen Raum: Analyse des Ist-Zustandes und Entwicklung eines quantitativen Nachweissystems	2009
Heft 68	Wieviel Biogas steckt in Pflanzen? Abschluss- Symposium des "Biogas-Crops-Network" (BCN) 7. Mai 2009 Potsdam	2009
Heft 69	Image Analysis for Agricultural Products and Processes 27 to 28. Aug. 2009 Potsdam	2009
Heft 70	5th International Technical Symposium on Food Processing, Monitoring Technology in Bioprocesses and Food Quality Management 31. Aug. to 02. Sept. 2009 Potsdam	2009
Heft 71	Einsatz von Biogas in PEM-Brennstoffzellen	2009
Heft 72	Teilflächenspezifische Grunddüngung	2009
Heft 73	16. Workshop Computer-Bildanalyse in der Landwirtschaft	2010

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,- €