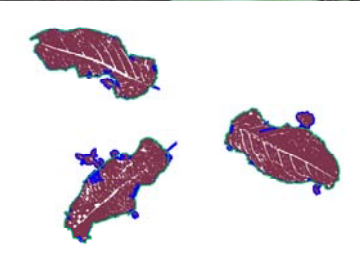


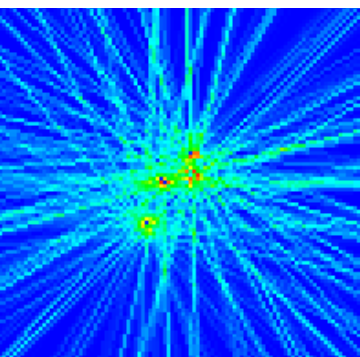


**Computer-Bildanalyse
in der Landwirtschaft
- Workshop 2005 -**



**Computerised Image Analysis
in Agriculture**

- Workshop 2005 -



Bornimer Agrartechnische Berichte

Heft 40

Potsdam-Bornim 2005

**Computer-Bildanalyse
In der Landwirtschaft
-Workshop 2005-**

Computerised Image Analysis
in Agriculture
-Workshop 2005-

Bornimer Agrartechnische Berichte
Heft 40

Potsdam-Bornim 2005

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>

August 2005

Redaktion:

Bernd Herold, ATB Potsdam-Bornim

Typografische Gestaltung:

Andrea Gabbert, ATB

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

Für den Inhalt der Beiträge zeichnen die Autoren verantwortlich.

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

ISSN 0947-7314

© Leibniz-Institut für Agrartechnik Potsdam-Bornim e.V., Potsdam-Bornim 2005

Inhaltsverzeichnis	Seite
<i>Table of contents</i>	<i>page</i>
Vorwort <i>Preface</i>	5
Messende Lichtgitter und Multispektralkameras als bildgebende Systeme zur Pflanzenerkennung <i>Imaging for crop detection based on light curtains and multispectral cameras</i> Frank Fender; Mark Hanneken; Andreas Linz; Arno Ruckelshausen; Mark Spicer	7
Reverse Volumetric Intersection (RVI), a method to generate 3D images of plants using multiple views <i>Reverse Volumetric Intersection (RVI), eine Methode zur 3D Bildgeneration durch Verwendung mehrerer Ansichten von Pflanzen</i> Jochen Hemming; F. Golbach; Jacco C. Noordam	17
Labor- und Felduntersuchungen zum Einsatz von Infrarotkameras für die Bewertung von Pflanzen <i>Laboratory and field tests using infrared cameras for plant evaluation</i> Hans Jürgen Hellebrand; Horst Beuche; Werner B. Herppich; Karl-Heinz Dammer	28
Erfassung der Variabilität der Fruchtentwicklung bei Apfel mittels Spektrometer <i>Acquisition of variability of apple fruit development by means of spectrophotometer</i> Bernd Herold; Ingo Truppel; Manuela Zude; Martin Geyer	41
FILLED Videodaten basierte Füllstandserkennung für landwirtschaftliche Schüttgüter <i>FILLED A video data based fill-level detection for agricultural bulkfreight</i> Fabian Graefe; Walter Schumacher; Raul Queiroz Feitosa; Diogo Menezes Duarte	54
Dynamik von Wachstum – Quantitative Untersuchung räumlich-zeitlicher Prozesse mittels Bildsequenzanalyse <i>Dynamics of growth – quantitative analysis of spatio-temporal processes by image sequence analysis</i> Frank Gilmer; Hanno Scharr; Achim Walter; Ulrich Schurr	66
Visualisierung von 3D-Messdaten <i>Visualisation of 3D measuring data</i> Andree Jacobs; Ingo Truppel	73
Gegenüberstellung bildanalytischer und spektraloptischer Messverfahren für Wachstumsuntersuchungen an Zuckerrüben <i>Comparing image analysis versus spectral reflectance measurement for growth investigations with sugar beets</i> Martin Kraft	80
Innovative Anwendungen zur Qualitätsüberwachung mittels industrieller Bildverarbeitung <i>Innovative applications of industrial image processing for quality monitoring</i> Uwe Urbansky	88
Einsatzmöglichkeiten der Chlorophyllfluoreszenzbildanalyse zur Erkennung und Bewertung von pilzlichem Pathogenbefall <i>Application of chlorophyll fluorescence imaging analysis in fungal pathogen detection</i> Werner B Herppich; Erich Hetz; Karl-Heinz Dammer; Hans-Rainer Langner; Horst Beuche; Hans-Jürgen Hellebrand	95


- Fish Quality Monitoring – Bestimmung geeigneter Wellenlängen für die spektrale Signatur von digitalen Bildern** 109
Fish Quality Monitoring – determination of suited wavelengths for the spectral signature of digital images
Michael Kroeger; Ingo Truppel; Bernd Herold
- Anwendung der Spektralanalyse für den Präzisions-Gartenbau am Beispiel einer Citrusanlage** 118
NIRS as a tool for precision horticulture in the citrus industry
Manuela Zude; Andrew Lee; Bernd Herold; Craig Kaprielian
- Untersuchungen zur Unkrauterkenung im Grünland mit Hilfe digitaler Bildverarbeitung** 124
Weed detection in grassland by means of digital image processing
Steffen Gebhardt; Walter Kühbauch
- Reihenführung autonomer Roboter mit der Low-Cost-Kamera CMUCam2** 131
Row-guidance of autonomous robots based on the low-cost camera CMUCam2
Ralph Klose; Martin Meier; Andreas Linz; Arno Ruckelshausen
- Belastungsverteilung am Stamm durch Rüttelwerkzeuge zur Industrie-obsternte** 138
Load distribution on apple tree trunk caused by shakers for fruit harvest
Bernd Herold; Uwe Wiesner; Ernst Triquart; Thorsten Rocksch; Uwe Schmidt; Martin Geyer
- Erfassung des Deckungsgrades in Winterraps mit der Kamera MS 2100** 144
Detection of the coverage level in winter rape with the camera MS 2100
Karl-Heinz Dammer; Hartmut Böttger; Hans-Jürgen Horn

Vorwort

Die Computer-Bildanalyse findet zunehmend als Hilfsmittel zur objektiven Bewertung von Prozessen und Objekten auch unter den schwierigen Bedingungen der Landwirtschaft praktische Anwendung. Das Anwendungsspektrum reicht von grundlegenden Untersuchungen des Pflanzenwachstums unter Laborbedingungen über pflanzenbauliche Feldbestandsanalysen bis zur online Steuerung von Arbeitsgeräten. Die Palette umfasst aber auch die Einsatzmöglichkeiten von Sensoren zur Erfassung von Wärmebildern, von spektralen Parametern im sichtbaren und nah-infraroten Wellenlängenbereich und von mechanischen Belastungen. Bildanalytische Sensoren bieten potenziell eine hervorragende Basis zur Entwicklung von Verfahrenstechniken für die Präzisionslandwirtschaft. Sie können helfen, monotone und schwere Handarbeit durch verbesserte technische Verfahren zu entlasten. Nicht zuletzt lassen sich mittels Computer-Bildanalyse auch Probleme der Qualitätssicherung bei landwirtschaftlichen Produkten besser bewältigen.

Mit elf Vorträgen, sechs Posterbeiträgen sowie mehreren gerätetechnischen Präsentationen setzte der diesjährige Workshop zur Anwendung der Computer-Bildanalyse in der Landwirtschaft am Institut für Agrartechnik in Potsdam-Bornim (ATB) die zehnjährige Tradition dieser informativen Veranstaltungsreihe fort. Durch Diskussion zu den Beiträgen sowie auch in den Pausen war wieder Gelegenheit für einen intensiven Gedankenaustausch gegeben, der sowohl Anregungen zur Lösung spezifischer Aufgaben als auch für mögliche arbeitsteilige Kooperationen lieferte.

Für die Vorbereitung und Durchführung des erfolgreichen Workshops ist allen Helfern am gastgebenden ATB herzlich zu danken.



Dr. M. Geyer

Potsdam-Bornim im Mai 2005

Messende Lichtgitter und Multispektralkameras als bildgebende Systeme zur Pflanzenerkennung

Imaging for crop detection based on light curtains and multispectral cameras

Frank Fender¹, Mark Hanneken¹, Andreas Linz¹, Arno Ruckelshausen¹, Mark Spicer²

¹Interdisziplinärer Forschungsschwerpunkt Intelligente Sensorsysteme, Fachhochschule Osnabrück, Albrechtstr. 30, 49076 Osnabrück

²Pioneer Hi-Bred International, Inc., Johnston/Iowa, USA

E-mail: a.ruckelshausen@fhos.de

Kurzfassung: Die Entwicklung automatisierter Systeme zur Erfassung und Unterscheidung von Pflanzen erfordert die kombinierte Analyse geometrischer und spektraler Merkmale. Der Einsatz neuartiger messender Lichtgitter bietet neue Optionen zur Messung zuverlässiger geometrischer Signaturen, wobei durch die direkt zur Verfügung stehenden Binärinformationen hohe Verarbeitungsgeschwindigkeiten möglich sind.

Es wurde ein messendes Lichtgitter (Height Profile Sensor/High Resolution – “HPS-HR“) zur online Erfassung von Pflanzenmerkmalen entwickelt und angewendet. Weiterhin wurde eine Multispektralkamera zur Erfassung bildhafter spektraler Merkmale mit dem Lichtgitter kombiniert. Die Korrelation der Signale eröffnet umfassende Möglichkeiten zur Erkennung und Unterscheidung von Nutzpflanzen und Unkräutern sowie zur Bonitur von Pflanzenkulturen.

Deskriptoren: Bildverarbeitung, multispektrale Kameras, messende Lichtgitter, teilflächenspezifische Unkrautbekämpfung, Pflanzenbonitur.

Summary: *The development of automated systems for the measurement and the distinction of plants is based on the detection of geometric and spectral information. The application of new light curtains for measurement purposes offers new options for the reliable analysis of geometric signatures, whereas the binary data are directly available thus resulting in high processing speeds.*

A new light curtain for measurement purposes (Height Profile Sensor/High Resolution – “HPS-HR”) for the online-detection of plant characteristics has been developed and applied. Moreover, a spectral imaging camera for the detection of the spectral characteristics has been combined with the light curtain. The correlation of the signals is a powerful tool for crop-weed-detection as well as for the characterization of plant cultures.

Keywords: *Image processing, multi-spectral cameras, light curtains, site specific weed control, plant characterization.*

1. Einleitung

An der Entwicklung von Komponenten zur ortsspezifischen Unkrautregulierung wird seit vielen Jahren gearbeitet, jedoch stehen noch keine praxistauglichen Geräte zur Verfügung. Die Verfügbarkeit einer zuverlässigen und kostengünstigen Sensorik wäre insbesondere die Voraussetzung für nichtchemische Verfahren mit ökonomischen als auch ökologischen Vorteilen (RUCKELSHAUSEN *et al.* 2004). Ein Lösungsansatz basiert auf dem Einsatz von Kameras, die verschiedene Spektralbereiche erfassen (z.B. SÖKEFELD *et al.* 2002, LANGNER und BÖTTGER 2003, OEBEL *et al.* 2004). Von DZINAJ *et al.* wurde 1998 die kombinierte Erfassung geometrischer und spektraler Signaturen unter Integration in ein Multisensorsystem vorgeschlagen, wobei insbesondere die Höheninformation online erfasst wurde. Die kombinierte Erfassung beider Aspekte wird von den Autoren als eine wesentliche Voraussetzung für eine kostengünstige und zuverlässige Unterscheidung von Nutzpflanzen und Unkräutern angesehen. Hier bieten sich in Zukunft 3D-Kameras an (CMOS-IMAGING 2004), jedoch erfordert die Marktverfügbarkeit hoch auflösender und zuverlässiger Systeme für die Praxis noch erhebliche Entwicklungsarbeiten.

Die seitliche – “einseitige“ – Erfassung von Pflanzenabständen wurde bereits bis zu Geschwindigkeiten oberhalb von 10 km/h durch punktweise optoelektronische Messungen realisiert (z.B. THÖSINK 2004), jedoch sind bildgebende Systeme mit Zeilenstrukturen noch nicht am Markt verfügbar. Zur Erfassung des seitlichen Pflanzenprofils mit Höheninformationen bieten sich prinzipiell Lichtgitter an. Jedoch haben sich die Hersteller dieser Systeme (eine Auswahl ist unter LICHTGITTER 2005 aufgeführt) in der Vergangenheit fast ausschließlich an sicherheitstechnischen Aspekten in der Robotik und Lasertechnik orientiert, ohne den bildgebenden Charakter ihrer Systeme in vollem Umfang auszunutzen. Eine erste landtechnische Anwendung für die Nutzung eines Lichtgitters als “Kamera“ wurde von HARA *et al.* (2003) für die Kartoffelernte realisiert.

Im folgenden wird daher auf die Technik dieser Systeme sowie die Entwicklung eines schnellen hoch auflösenden Höhenprofilsensors auf Basis des Prinzips von DZINAJ *et al.* (1998) beschrieben. Die Kombination dieses kostengünstigen Systems mit spektralen Signaturen wird als eine Anwendung dargestellt.

2. Messende Lichtgitter

Messende Lichtgitter stellen ein System parallel angeordneter Lichtschranken dar. Das zu vermessende Objekt muss sich zwischen dem Sende- und Empfangsteil befinden. Durch die Bewegung des Messobjektes oder des Lichtgitters kann das Profil des Objektes zwei-dimensional abgetastet werden und zu einem Binärbild synthetisiert werden. Wird darüber hinaus die Geschwindigkeit oder der Weg für die Bewegung aufgenommen, so lassen sich auch in Bewegungsrichtung absolute geometrische Abmaße ermitteln. Durch die Unterbrechungen der Lichtschranken erhält man für das in Bild 1 dargestellte Beispiel absolute Höhen- und Strukturinformationen. Die „digitalen“ Informationen mehrerer Messungen stellen unmittelbar ein Binärbild zur weiteren Verarbeitung mit den in der Bildverarbeitung angewendeten Algorithmen bereit. Es muss daher nicht – wie bei einer Standardkamera – eine analoge Information durch Schwellwertsetzung in eine binäre Information umgewandelt werden. Die resultierende schnelle Bilderfassung und –auswertung ermöglicht kostengünstige online Anwendungen.

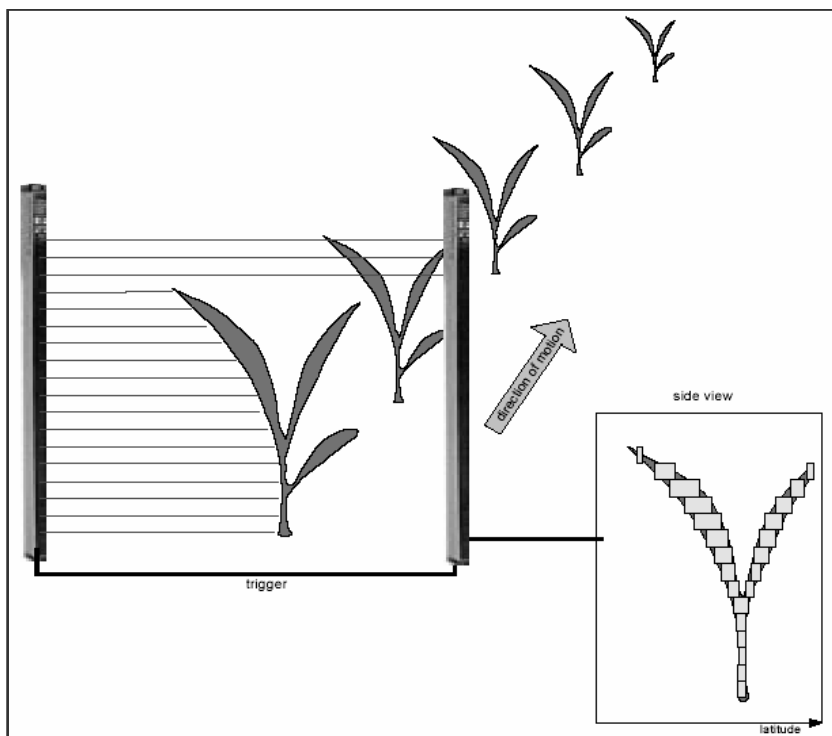


Bild 1: Messprinzip eines Höhenprofilsensors: Mehrere Lichtschranken erfassen das Profil des Objektes (z.B. einer Pflanze) und erzeugen ein Binärbild

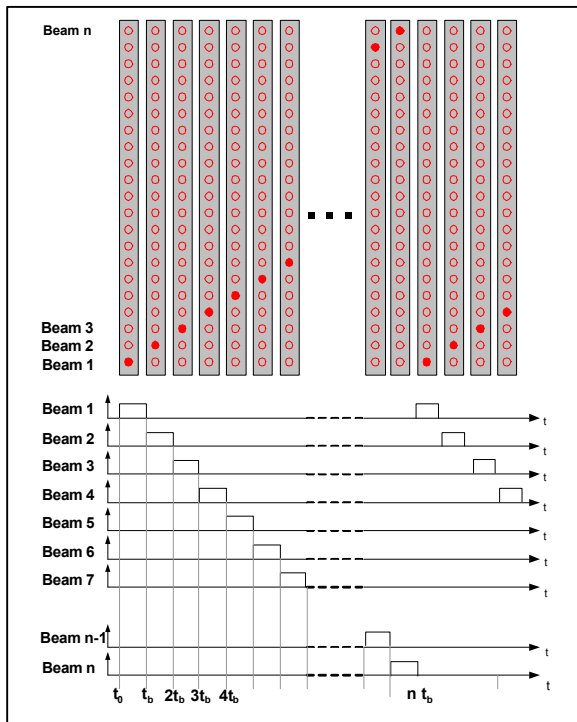


Bild 2: Gepulster Betriebs eines Lichtgitters

Kommerziell verfügbare Systeme (LICHTGITTER 2005) zielen überwiegend auf Anwendungen in der Sicherheitstechnik ab, so dass sie für anwenderspezifische Abstände ausgelegt sind. Zur Vermeidung fehlerhafter Signale werden die einzelnen Lichtschranken oder –gruppen gepulst (siehe Bild 2), auch wird die Lichtintensität der Sender dem Abstand angepasst.

Für spezifische Anwendungen der Lichtgitter als „Binärkamera“ – z.B. zur Erfassung von Pflanzenprofilen in Reihenkulturen - ist der Abstand jedoch meist festgelegt. In diesem Fall kann auf die Pulsung verzichtet werden, wenn das Übersprechen durch eine entsprechende geometrische Abschattung verhindert wird. Ein solches System (*HPS-HR: Height-Profile-Sensor/High Resolution*) wurde von den Autoren realisiert, wobei der Abstand der Lichtschranken gegenüber DZINAJ *et al.* (1998) von 10 mm auf 5 mm reduziert wurde. Aufgrund des Arbeitsabstandes und der Abstrahlcharakteristik der Sendedioden wurde ein Kunststoffblock als Träger der elektronischen Komponenten konstruiert, die LEDs und Fotodioden wurden alternierend eingebaut. Der mechanische Aufbau sowie das Blockschaltbild der Analogelektronik sind in Bild 3 schematisch dargestellt.

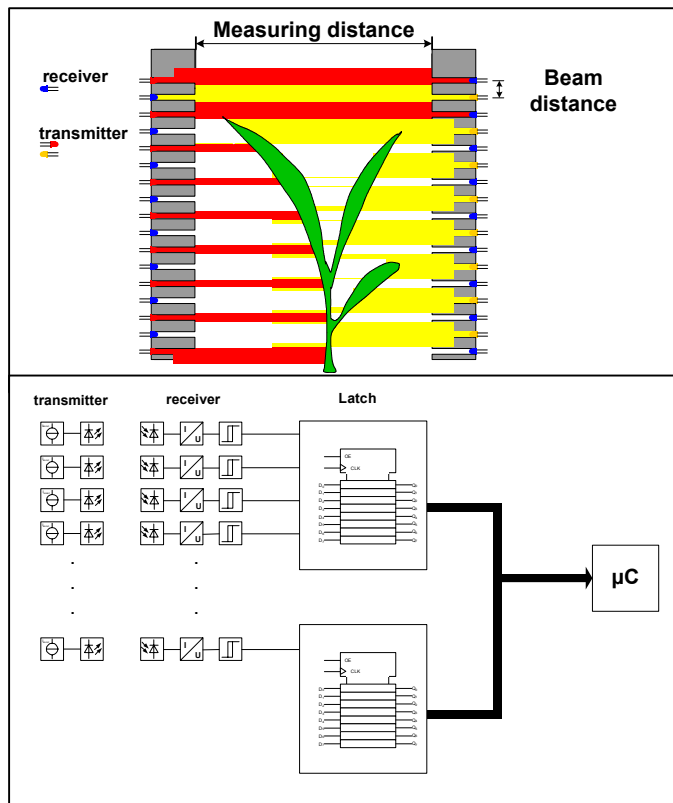


Bild 3: Design/Prinzipbild des HPS-HR (oben) und Blockschaltbild (unten)

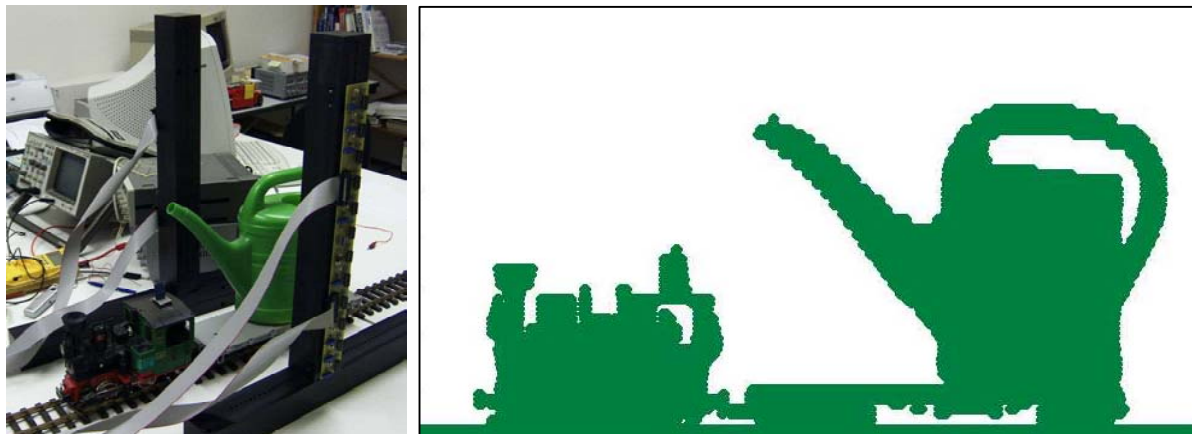


Bild 4: Testaufbau eines HPS-HR-Lichtvorhangs (links) mit Messergebnis (rechts)

Bild 4 zeigt einen Labor-Testaufbau und illustriert die Funktionsweise des HPS-HR. In Tabelle 1 werden technische Daten des Systems mit kommerziell verfügbaren Lichtgittern verglichen. Das realisierte System zeichnet sich insbesondere durch eine hohe Frame-Rate aus.

Tab. 1: Vergleich kommerziell verfügbarer Lichtgitter (Baumer, Leuze) mit dem HPS-HR

	Baumer INFRAS-CAN 5000	Leuze KON-TURflex K5-480	Height Profile Sensor HPS-HR
Working height (measuring field)	475 mm	475 mm	475 mm
Measuring distance	≤4 m	≤4 m	≤ 0,7 m
Beam distance	5 mm	5 mm	5 mm
Resolution with double scanning	2,5 ¹	-	-
Number of beams (light barriers)	96	96	96
Clock speed per beam t_b	11 μs	50 μs	
Clock speed per frame t_f	1056 μs	4800 μs	30 μs
Switching output	-	pnp	-
Serial interface	RS 422 / SSI (optional)	RS485 ProfiBus-DB	-
Configuration interface	RS232 ²	RS232	-
Parallel interface	10 Bit (optional)	-	16 bit
Analog output	Yes ³	-	-
Data format ⁴	normal / over all / largest blocked area		
Voltage supply	24 VDC ±10 %	19 – 40 V DC	12 - 14 V DC
Light source	Infrared	Infrared	Infrared
Light emission	950 nm	950 nm	950 nm
Reverse polarity protection	Yes	no	no
Temperature range	-25...+50°C	0 ... 65°C	0 ... 50°C
Dimensions			
Sensor height	630 mm	510 mm	550 mm
Sensor length	40 mm	40 mm	65 mm
Sensor width	80 mm	40 mm	50 mm
Min. perceiving height	130 mm / 25mm ⁵	10 mm	10 mm
Protection class	IP67	IP65	-

¹ In the centre of the measuring distance² RS232 adapter in the connecting cable³ With ext. analog converter⁴ Only for Baumer INFRASCAN⁵ Upside down

3. Multispektralkamera

Zur Unterscheidung von Boden und Pflanzen sowie für weitere spektrale Optionen zur Pflanzenunterscheidung wurde die Optik „ImSpector“ in Verbindung mit einer CMOS-Kamera eingesetzt (IN DER STROTH *et al.* 2003). Die Optik erfasst dabei eine geometrische

Zeile und erzeugt durch ein Prisma-Gitter-Element eine zweidimensionale Ort-Wellenlängen-Matrix (Bild 5). Die spektrale Signatur einzelner Messpunkte im Bereich von 1 bis 2 mm² kann dabei z.B. durch Quotientenbildung bei selektiven Wellenlängen per Software definiert werden. Dieses System ist insbesondere bei variablen Anwendungen von Vorteil, da gegenüber Kamerasystemen mit spektral festgelegten Bereichen keine Hardware-Änderungen erforderlich sind. Bild 6 zeigt ein Beispiel für eine Boden-Pflanze-Unterscheidung.

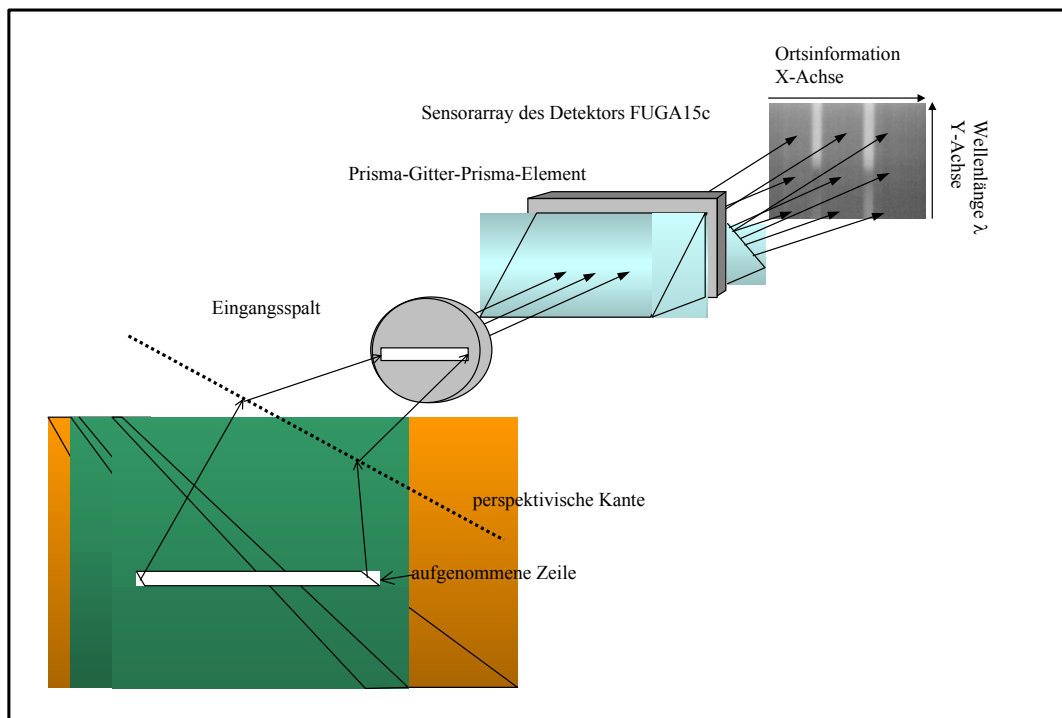


Bild 5: Arbeitsprinzip der Spektralkamera "ImSpector" zur Pflanzendetektion (IN DER STROTH *et al.* 2003)



Bild 6: ImSpector-Analyse (rechts) mit einer Software (Spektralauswertung und Schwellwert) zur Boden-Pflanze-Unterscheidung (RUCKELSHAUSEN *et al.* 2004)

4. Ergebnisse und Ausblick

Das messende Lichtgitter HPS-HR und die Multispektralkamera ImSpector wurden in ein System zur Online-Messung von Pflanzen in Reihenkulturen integriert. Zur Positionsbestimmung wurde ein Drehgeber verwendet, ein zusätzlicher Triangulationssensor zur Abstandsmessung wurde ebenfalls verwendet. Die Sensoren verfügen jeweils über einen Mikrocontroller zur schnellen Vorverarbeitung der Signale, die Kommunikation erfolgt über den CAN-Bus. Die Systemkomponenten sind in Bild 7 dargestellt.

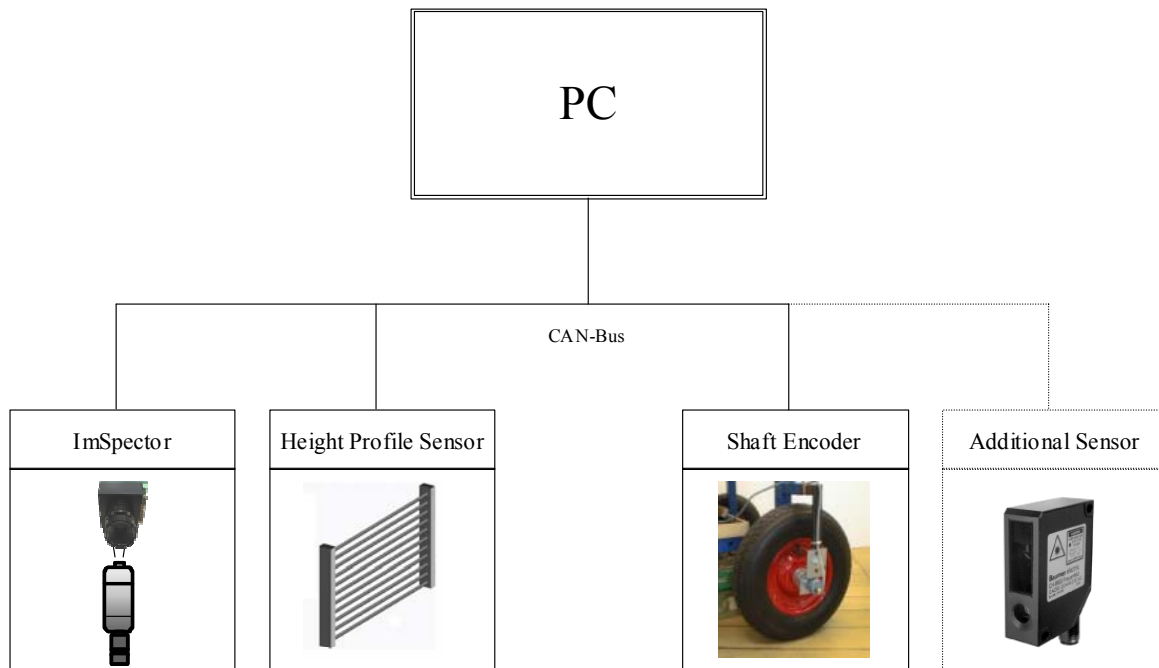


Bild 7: Systemintegration zur Messung von Pflanzenmerkmalen

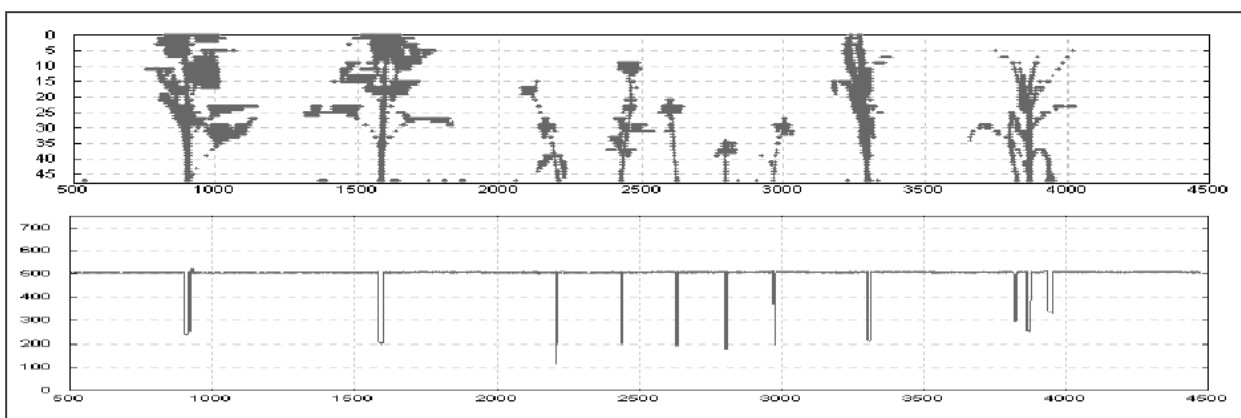


Bild 8: Profile von Pflanzen aufgenommen mit einem Höhenprofilsensor (oben) sowie zugehörige Signale eines seitlichen optischen Abstandssensors (unten)

Bild 8 zeigt typische Messergebnisse des HPS-HR für Pflanzenprofile sowie die Signale eines optischen Abstandssensors (Triangulation). Bild 9 zeigt Signale des HPS-HR in Korrelation mit den Daten der Multispektralkamera.

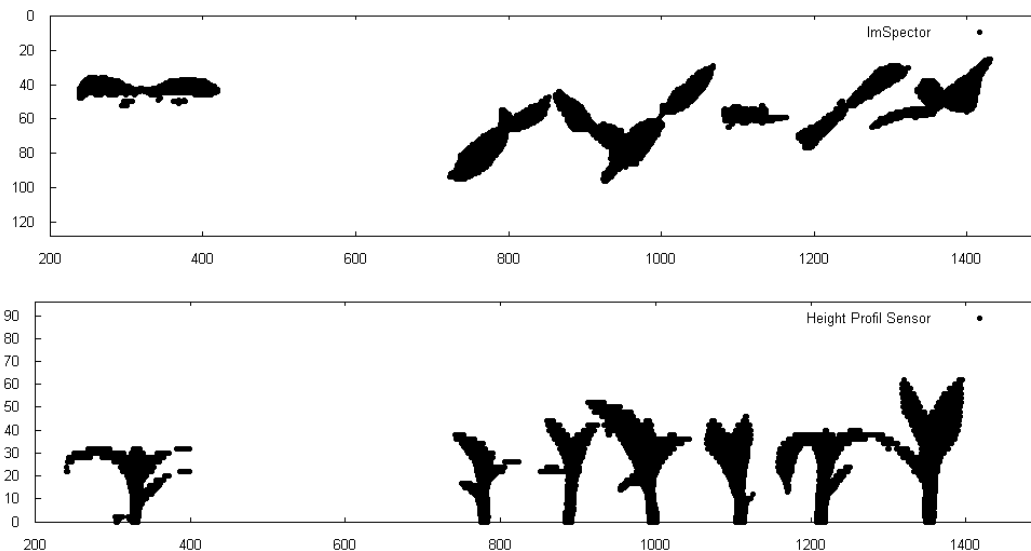


Bild 9: Messung von Maispflanzen mit dem Spectral Imaging System ImSpector (oben) und dem messenden Lichtgitter HPS-HR (unten)

Die Systeme können vielfältig zur Detektion einzelner Pflanzen (GRIEPENTROG *et al.* 2003) eingesetzt werden, beispielsweise zur Bonitur von Pflanzen oder zur Ansteuerung von Aktoren. Im Rahmen der Weiterentwicklung von zuverlässigen und kostengünstigen Sensoren zur nichtchemischen Unkrautregulierung innerhalb von Reihenkulturen (KIELHORN *et al.* 2000, BONTSEMA *et al.* 2002) bieten insbesondere messende Lichtvorhänge vielversprechende Optionen.

5. Literatur

BONTSEMA J, VAN ASSELT K, GROOT T (2002) Intra-row weed control. Bornimer Agrartechnische Berichte, Heft 31, 2002, ISSN 0947-7314: 64-72

CMOS IMAGING (2004) Proceedings of the 2nd Fraunhofer IMS Workshop CMOS Imaging – Emerging Technologies for Tomorrow Markets, May 25th and 26th, 2004, Duisburg/Germany

DZINAJ T, KLEINE HÖRSTKAMP S, LINZ A, RUCKELSHAUSEN A, BÖTTGER O, KEMPER M, MARQUE-RING J, NAESCHER J, TRAUTZ D, WISSERODT E (1998) Multi-Sensor-System zur Unterscheidung von Nutzpflanzen und Beikräutern. Zeitschrift für Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz, Sonderheft XVI: 233-242

GRIEPENTROG HW, NORREMARK M, NIELSEN H, BLACKMORE BS (2003) Individual plant care in cropping systems. Proceedings ECPA: 247-251

- HARA Y, TAKENAKA H, SEKIGUCHI K (2003)** A study on potato yield sensor and monitoring system for potato harvester. 4th European Conference on Precision Agriculture ECPA, Berlin, Programme book, ISBN 9076998345
- KIELHORN A, DZINAJ T, GELZE F, GRIMM J, KLEINE-HARTLAGE H, KLEINE HÖRSTKAMP S, KUNTZE W, LINZ A, NAESCHER J, NARDMANN M, RUCKELSHAUSEN A, TRAUTZ D, WISSERODT E (2000)** Beikrautregulierung in Reihenkulturen - Sensorgesteuerte Querhacke im Mais. Zeitschrift für Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz, Sonderheft XVII ISSN 0938-9938: 207-215
- LANGNER H-R, BÖTTGER H (2003)** Erfahrungsbericht zur bildgestützten Unkrauterkenennung mit einer 3Chip-CCD-Kamera. Bornimer Agrartechnische Berichte, Heft 34, 2003, ISSN 0947-7314: 38-48
- LICHTGITTER (2005)** Auswahl: <http://www.betasensorik.de/>, <http://www.leuze.de/>, <http://www.baumerelectric.com/de/>; www.sick.de, www.lucom-gmbh.de, www.pilz.com
- IN DER STROTH S, LINZ A, RAMLER B, RUCKELSHAUSEN A (2003)** Weed detection based on spectral imaging systems with CMOS cameras. 4th European Conference on Precision Agriculture ECPA, Berlin, Programme book
- OEBEL H, GERHARDS R, BECKERS G, DICKE D, SÖKEFELD M, LOCK R, NABOUT A, THERBURG R-D (2004)** Teilschlagspezifische Unkrautbekämpfung durch raumbezogene Bildverarbeitung im Offline (und Online)-Verfahren (TURBO) – Erste Erfahrungen aus der Praxis. Zeitschrift für Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz, Sonderheft XIX, ISSN 0938-9938: 459-465
- RUCKELSHAUSEN A, LINZ A, RAMLER B, IN DER STROTH S (2004)** Innovative methods in non-chemical weed control. Proceedings of the 15th International Plant Protection Congress, Beijing, China, Mai 11-16, 2004, Foreign Languages Press, ISBN 7-119-03698-X
- SÖKEFELD M, GERHARDS R, THERBURG R-D, NABOUT A, JACOBI R, LOCK R, KÜHBAUCH W (2002)** Multispektrale Bildanalyse zur Erfassung von Unkraut und Blattkrankheiten, Zeitschrift für Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz, Sonderheft XVIII, ISSN 0938-9938: 437-442
- THÖSINK G, PRECKWINKEL J, LINZ A, RUCKELSHAUSEN A, MARQUERING J (2004)** Optoelektronisches Sensorsystem zur Messung der Pflanzenbestandsdichte. Landtechnik 59: 78-79

Reverse Volumetric Intersection (RVI), a method to generate 3D images of plants using multiple views

Reverse Volumetric Intersection (RVI), eine Methode zur 3D Bildgeneration durch Verwendung mehrerer Ansichten von Pflanzen

Jochen Hemming, F. Golbach, Jacco C. Noordam
Wageningen UR, Agrotechnology & Food Innovations, P.O.
Box 17, 6700 AA Wageningen, The Netherlands;
E-mail: jochen.hemming@wur.nl

Summary: For many robotic plant treatments exact 3D information about the plant is required. Traditional volumetric intersection (VI) methods are used to derive a 3D description of an object from multiple 2D images. This paper presents a new, reverse volumetric intersection (RVI) method. Instead of cutting off projected object silhouettes from a filled 3D space this method starts with an empty space and accumulates view by view the values of the voxels traversed by the projection lines. This results in a method which is more robust in building 3D models from small structured and non-rigid objects like plants are. From several rose plants on a turntable images were captured every 15 degrees of rotation resulting in a series of 24 images. The RVI method was successfully used with data from the pre-processed images. Flower stems of all plants recorded could be traced manually using a developed voxel viewer. However, the RVI concept will fail with dense plants if no stems are visible in any of the images.

Keywords: Volumetric intersection, 3D imaging, Robotics, Harvesting, Roses

Kurzfassung: Viele robotisierte Kulturhandlungen benötigen exakte 3D Informationen über die zu behandelnde Pflanze. Traditionelle Volumetric Intersection (VI) Methoden werden verwendet, um aus mehreren 2D Bildern eine 3D Beschreibung des aufgenommenen Objekts zu erstellen. Der vorliegende Artikel beschreibt eine neue, umgekehrte VI: die Reverse Volumetric Intersection (RVI). Anstelle die projizierten Objektsilhouetten aus einem gefüllten 3D Raum herauszuschneiden, werden in einem leeren 3D Raum die Voxelwerte schrittweise akkumuliert. Dadurch ist die Methode bei der Erzeugung von 3D Modellen von fein strukturierten und nicht-starren Objekten, wie beispielsweise Pflanzen, robuster. Von mehreren auf einem Drehtisch positionierten Rosenpflanzen wurde alle 15 Grad eine Aufnahme genommen, wodurch pro Pflanze eine Serie von 24 Bildern entstand. Die RVI Methode wurde erfolgreich bei diesen Bildern angewendet. Blütenstiele aller aufgenommenen Pflanzen konnten manuell mit einem speziell entwickelten Voxel-viewer im 3D Raum lokalisiert werden. Die RVI ermöglicht es jedoch nicht, Blütenstiele zu detektieren, wenn die Pflanzen zu dicht gewachsen sind und wenn der Stiel in keiner der aufgenommenen Ansichten sichtbar ist.

Deskriptoren: Volumetric intersection, 3D Bildanalyse, Robotik, Ernte, Rosen

1. Introduction

For the task of automatic cutting of roses in greenhouses a method is needed to locate and trace the stem of a ripe flower bud. A to be developed cutting robot requires exact 3D information about stem position and cutting location. This process is complex because the stem in question is often surrounded by other stems and occluded by leaves. One possibility to solve the problem might be the combined use of multiple views of the same stem from different viewpoints. By this a 3D model of the plant could be built and used to set-up a control scheme for a harvesting robot.

The objective of this paper is to develop such a method based on traditional volumetric intersection principles and to test the method with images taken from real plants.

2. Material and Methods

Volumetric Intersection

Volumetric intersection (VI) recovers the volumetric description of an object from multiple (2D) binary images. For representing the object in 3D a so called voxel space is used. Voxel stands short for volume pixel, the smallest distinguishable box-shaped part of a three-dimensional image. VI algorithms start with a binary filled voxel space. When a silhouette of an object is extended into 3D space along the corresponding viewing direction, it sweeps out in a cylindrical volume. Parts of the voxel space not covered by this volume are cleared. The cylinders so obtained by sweeping several 2D silhouettes are intersected to obtain a representation of the original object. Basic work for the construction of 3D models from multiple views was done by MARTIN & AGGARWAL (1983) and CHIEN & AGGARWAL (1986 a, b). Volumetric intersection algorithms are an intuitive and stable approach to 3D-reconstruction since they are independent from distinctive points, light effects or texture. But using only the silhouette information means that non-silhouette-active parts of the object can not be reconstructed.

Reverse Volumetric Intersection

The here presented Reverse Volumetric Intersection (RVI) method takes the reverse way and starts with an empty voxel space. The voxel space is no longer described binary but the voxels may contain e.g. 256 (or even more) levels of intensity. Objects visible from different angles are projected as intersecting lines in the 3D space. At the line crossings

the values of the corresponding voxels are accumulated. For the example given in Figure 1, two views from two objects from different angles results in two crossing planes of different widths in the 3D voxel space.

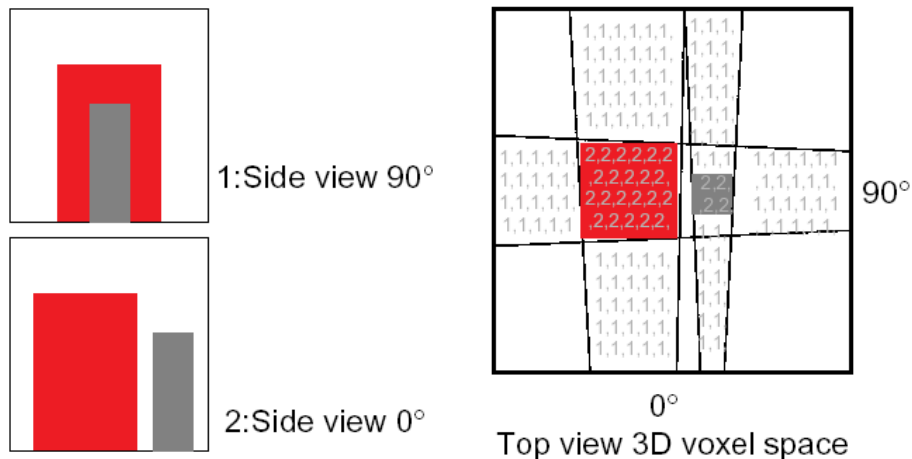


Figure 1: The principle for Reverse Volumetric Intersection for two views (0 degrees and 90 degrees) and two synthetic objects. At the intersections of the projection lines the values of the voxels are accumulated

As shown in Figure 2, the three axes of the real-world co-ordinates (RWC) are defined as x , y and z . The measurement space is defined by a bounding box with the dimensions $-x_k$ to x_k , $-y_k$ to y_k , and 0 to z_k . The origin of the RWC system (point C) is located at the base and in the axis of the turntable. The camera is positioned at a known position in the RWC system in a way that the field of view of the camera covers the measurement space. A ray of light intersects the 3D space at the two points P1 and P2, passes the optical centre of the lens (assuming a pinhole camera model) and hits the CCD sensor of the camera in point S.

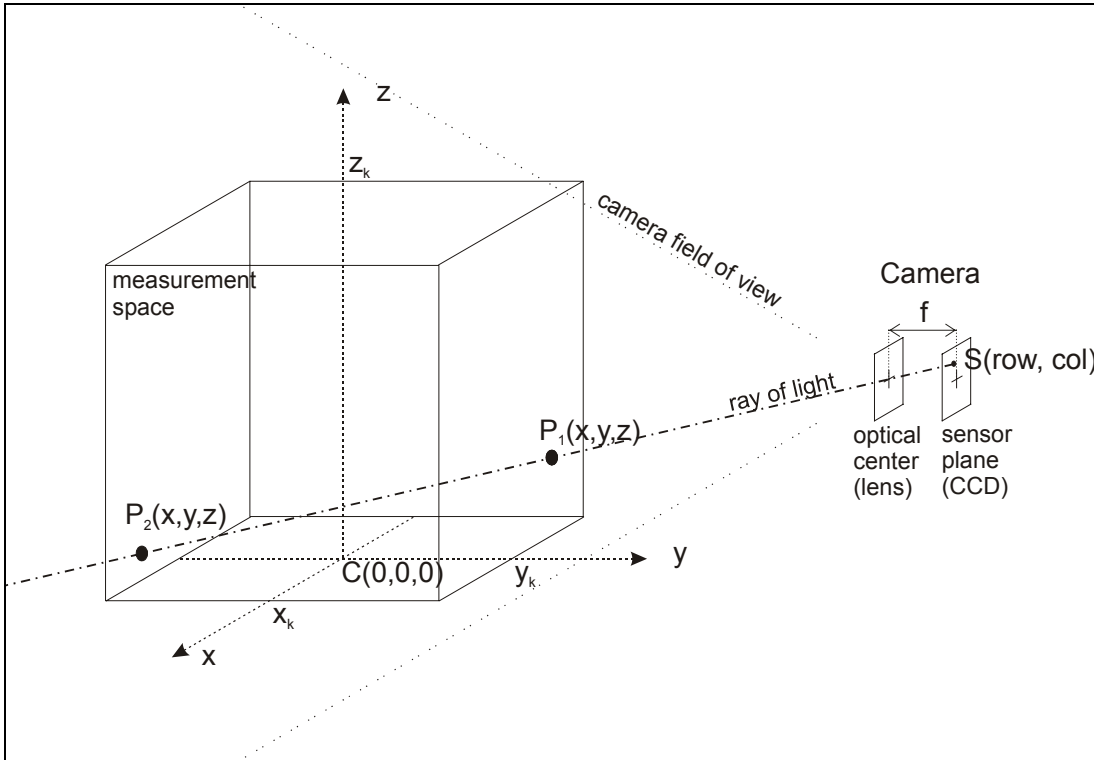


Figure 2: Co-ordinate definitions of the 3D space. The origin of the real world measurement space (point C) is located in the base and on the axis of the turntable. A ray of light intersects the 3D measurement space at the two points P1 and P2, passes the optical centre of the lens (pinhole camera model) and hits the CCD sensor of the camera in point S. The focal length of the lens (system) is indicated by f

To be able to accumulate the voxels corresponding to 2D image pixels, we need to have at least 2 points of the line which is defined by the ray of light through the system. The first point is the real-world position of the (optical centre of the) camera. This position is fixed and can be obtained by camera calibration. The second point is calculated from the pixel position (given in row, column) in the image acquired. The corresponding real-world position on the sensor can be calculated using data about the focal length of the camera, the physical dimensions of the CCD sensor and the pixel resolution of the image.

By this, 2 points on the line of the ray of light are known what allows calculating the possible intersections of this line with the measurement space. This space is described by six planes with the following equations:

$$x = -x_k, x = x_k, y = -y_k, y = y_k, z = 0, z = z_k \quad (1)$$

In case the line is not parallel to two or four planes, there is an intersection per plane. We select the two intersections which meet the following conditions:

$$x \in [-x_k, x_k] \wedge y \in [-y_k, y_k] \wedge z \in [0, z_k] \quad (2)$$

Thus, the two intersection points which are located on the planes of the measurement space. It is possible that there is no or only one point of intersection. In this case the ray of light passes the space and is skipped.

For easier handling, the measurement space has to be described in voxels (Figure 3). All co-ordinates in the voxel space are positive and integer numbers. We define a voxel density (P [pixels/meter]) and get:

$$\begin{aligned} u_k &= 2Px_k \\ v_k &= 2Py_k \\ w_k &= Pz_k \end{aligned} \quad (3)$$

This enables us to convert points from RWC to Voxel co-ordinates:

$$\begin{aligned} u &= \lfloor P(x + x_k) + \frac{1}{2} \rfloor \\ v &= \lfloor P(y + y_k) + \frac{1}{2} \rfloor \\ w &= \lfloor Pz + \frac{1}{2} \rfloor \end{aligned} \quad (4)$$

We can now add a 3D line to the voxel space by using an appropriate algorithm as e.g. the Bresenham's line drawing algorithm. The values of voxels which are traversed by a projection line are incremented by one. Objects (stem points in our case) which are visible from several point of views are getting accumulated as a "hot spot". Visualizing the voxel space by using a plane viewer enables to locate these hot spots.

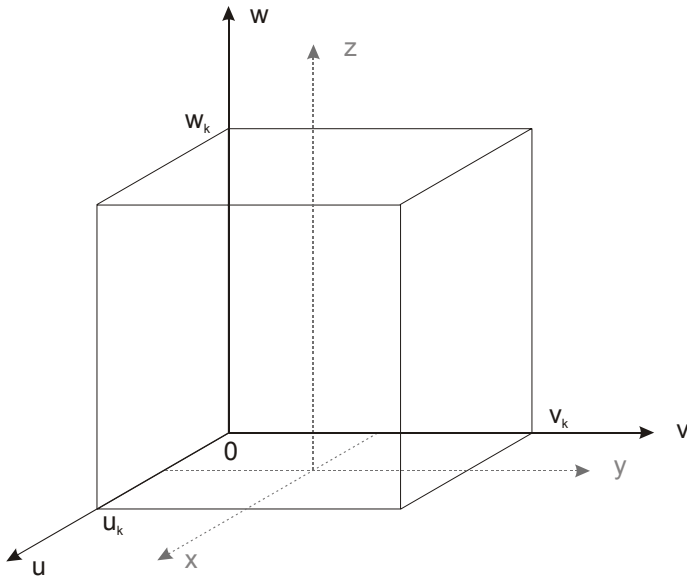


Figure 3: Voxel space

Image acquisition

To obtain homogeneous lighting in the camera's field of view, a special lighting chamber with high-frequency fluorescent tubes (6500 K) was developed. A computer controlled turntable was located in the middle of the lighting chamber to rotate the plant in front of the image acquisition equipment (Figure 4).

The used camera was a 1/1,8" CCD Dolphin AVT progressive scan colour camera with 8 mm lens. Images were captured with a resolution of 1600 x 1200 pixels. The distance between camera and plant was 1.5 m.

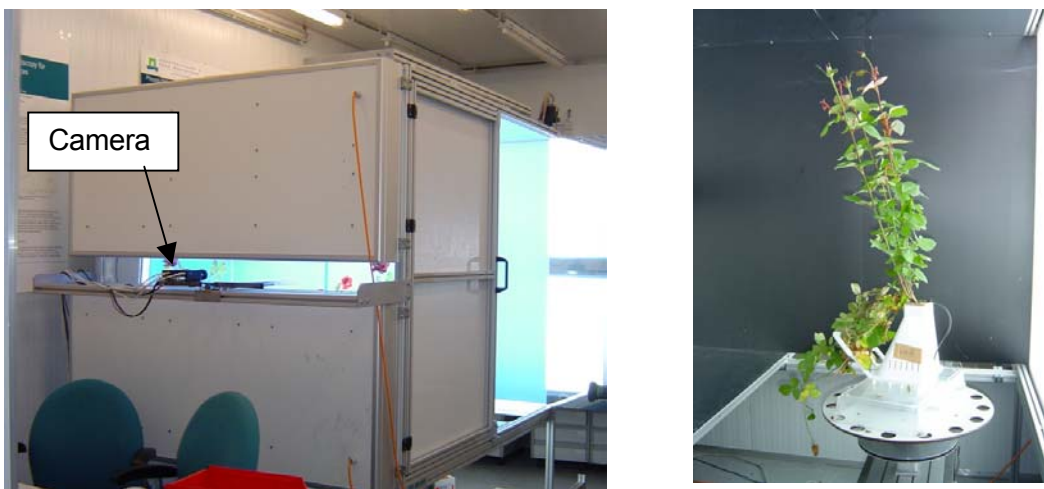


Figure 4: Lighting chamber (left) and rose plant on the turntable (right)

From several individual rose plants an image was captured every 15 degrees of rotation resulting in 24 images. Some example images are presented in Figure 5.

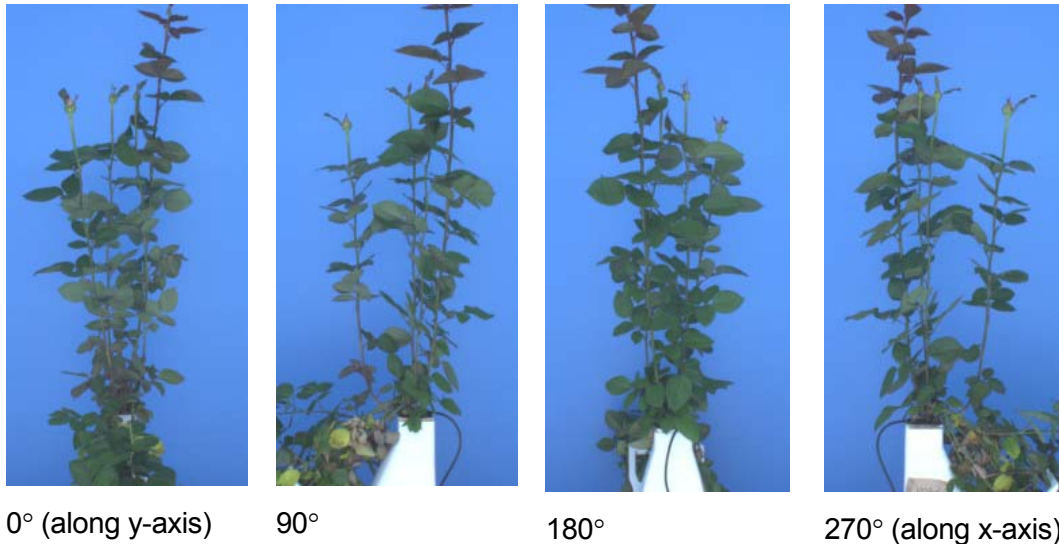


Figure 5: Side views of a rose plant, also the axes of the RWC system are indicated

A dedicated stem detection procedure was developed to locate stem pixels in an image (Figure 6). These pixels served as input for the RVI algorithm. Per pixel one line was projected and accumulated in the voxel space.



Figure 6: Rose plant with detected stem segments (yellow)

A plane viewer was developed to visualize the 3D voxel space. This viewer enables to scroll along the axes of the space and to view slices of this space. The width (thickness) of

the slice and the position of the slice can be chosen manually with two sliders on the user interface. The values of the voxels are summed up over the width of the slice and presented by false colours in a 2D image.

3. Results

Figure 7 to Figure 9 present the results of the plant which is also shown in Figure 5. This plant has one very long flower stem and three somewhat shorter stems with almost the same length. Looking from top on the plant (along the z-axis of the RWC space), first the long stem becomes visible as hot spot in Figure 7a. Half away the plant all 4 stems are resulting in hot spots in Figure 7b.

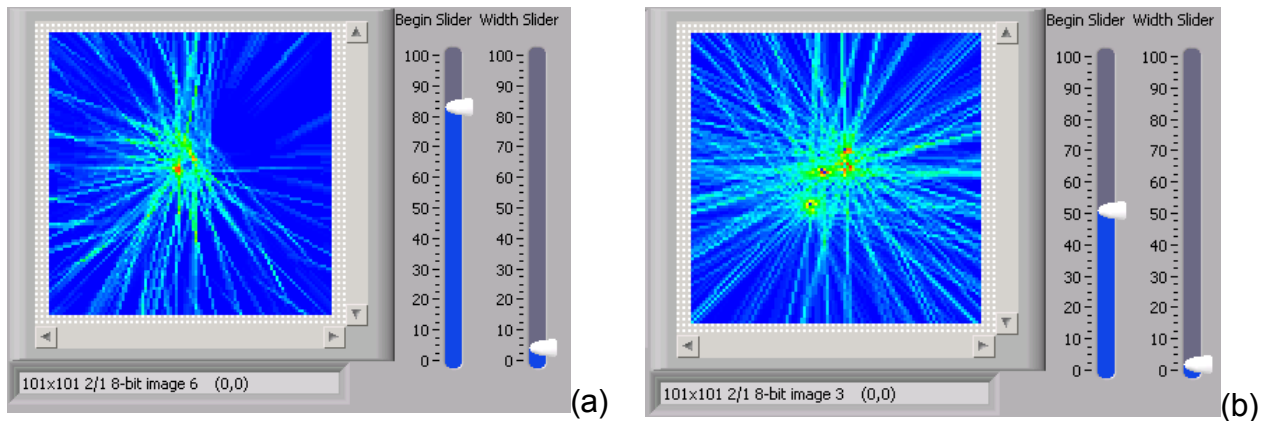


Figure 7: Plane viewer of the plant shown in Figure 5 along the z-axis

Going through the voxel cube along the x-axis we first come across 2 small stems close together (Figure 8a), and later the remaining 2 stems can be noticed (Figure 8b). Also with a lower intensity (cyan coloured), the cylindrical projection lines through the space of the different point of views are visible.

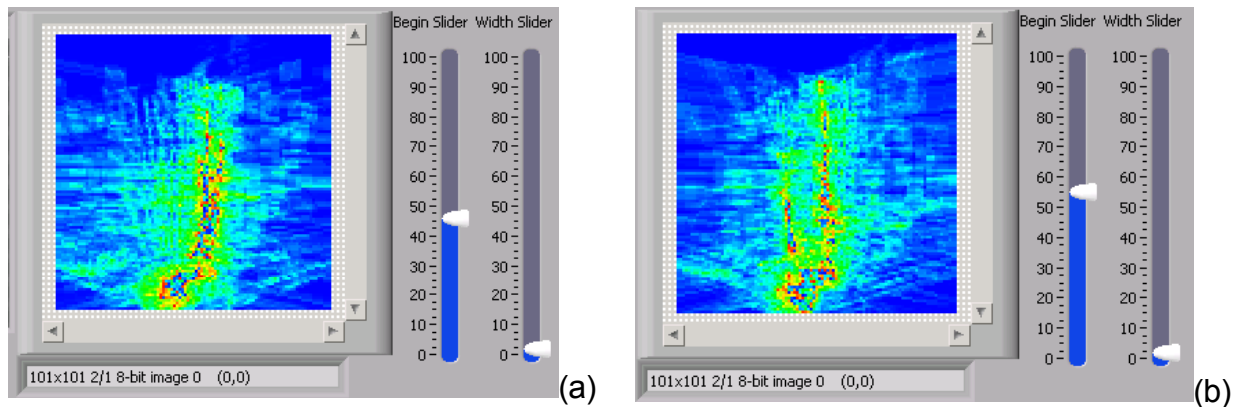


Figure 8: Plane viewer of the plant shown in Figure 5 along the x-axis

Also along the y-axis the plant stems can be traced. From this point of view a lot of leaf material is occluding the stems what resulted in false detected stem pixels at the lower part of the plant. This can be found back in Figure 9a. At the back of the voxel space the long plant stem is found back. He is only partly visualized because he is running transverse through the space (Figure 9b).

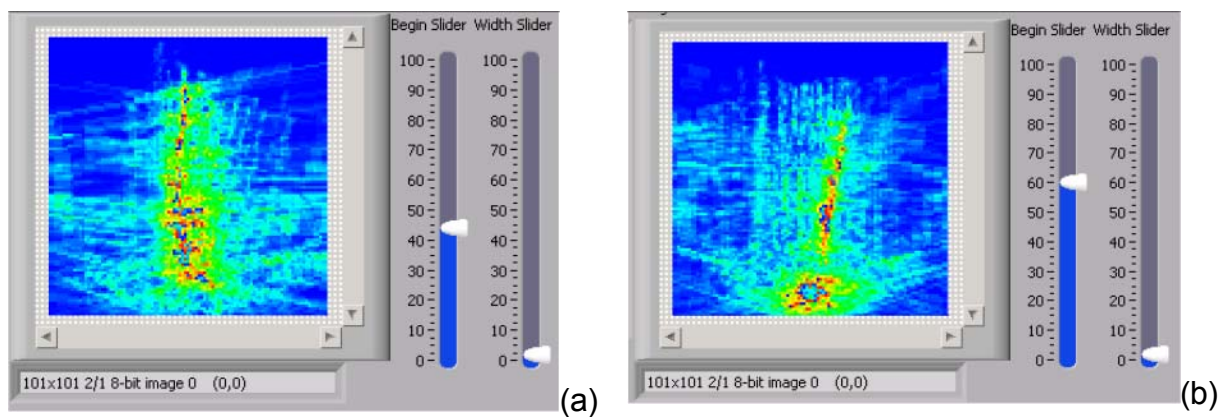


Figure 9: Plane viewer of the plant shown in Figure 5 along the y-axis

The flower stems of all plants recorded and processed with the methods described could be traced manually using the voxel viewer. At the base of the plants where the stems are coming very close together it was not possible to distinguish the individual stems any more.

4. Discussion and Conclusions

The presented RVI method allows to build a 3D representation of an object by combining several single (pre-processed) 2D images from different views of the same scene. These images can be either acquired by rotating an object in front of one camera or by using multiple cameras mounted around the object. In traditional VI small, thin structures like plant stems are easily accidentally removed due to misalignment or wrong calibration of the camera(s). The same is also valid for non-rigid objects such as plants which may slightly move during image acquisition. The RVI method is more robust than the VI in that aspect because the used voxel space is not binary but contains values that are accumulated and also because the method starts with an empty space which is filled instead of a filled space where elements are irreversible cleared.

The result of the RVI strongly depends on a good pre-processing of the images. The stem detection algorithms used in the tests described are not part of this paper. As stated above not all stems of the plants are visible from one view and in addition to this the used stem detection procedure is not able to locate all stem pixels without errors. In straightforward scenes, a few viewing angles may be sufficient for the true XYZ estimation of the stem, for a more complex scene the addition of multiple camera's might give sufficient information about stem position. However, the RVI concept will fail if no stems are visible in any of the images taken from all angles.

The next step will be the automatic analysis of the voxel space to extract the positions of the plant stems. Techniques like the Hough-transform for straight line recognition could be used. It remains future work to evaluate if RVI is a suitable method for use in robotic horticultural applications such as harvesting robots for cut flowers.

5. Acknowledgements

This work was funded by CERES: an initiative of the European Union, the Product Board for Horticulture, Agrotechnology and Food Innovations B.V. and Jentjens Machinetechniek B.V.

6. References

- CHIEN CH, AGGARWAL JK (1986a)** Volume/surface octrees for the representation of three-dimensional objects. *Computer Vision, Graphics, and Image Processing* 36: 100-113
- CHIEN CH, AGGARWAL JK (1986b)** "Identification of 3D objects from multiple silhouettes using quadtrees/octrees". *Computer Vision, Graphics, and Image Processing* 36: 256–273
- MARTIN WN, AGGARWAL JK (1983)** "Volumetric Descriptions of Objects from Multiple Views". *Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. PAMI-5: 150–159
- NOORDAM, JC, HEMMING J, VAN HEERDE C, GOLBACH F, VAN SOEST R, WEKKING E. (2004)** Automated Rose Cutting in Greenhouses with 3D Vision and Robotics: Analysis of 3D Vision Techniques for Stem Detection. *Proceedings of the Greensys 2004 Conference*, Leuven, Belgium

Labor- und Felduntersuchungen zum Einsatz von Infrarotkameras für die Bewertung von Pflanzen

Laboratory and field tests using infrared cameras for plant evaluation

Hans Jürgen Hellebrand, Horst Beuche, Werner B. Herppich, Karl-Heinz Dammer
Leibniz-Institut für Agrartechnik Potsdam-Bornim e.V., Max-Eyth-Allee 100, 14469 Potsdam
E-Mail: jhellebrand@atb-potsdam.de

Kurzfassung: Pilzbefall, der Temperaturänderungen der Pflanzenoberflächen nach sich zieht, kann unter Laborbedingungen mittels Infrarotkameras im thermischen Bereich (MIR: $\lambda = 8\text{-}12\ \mu\text{m}$) erkannt werden. Aufgrund der natürlichen Temperaturvariation im Pflanzenbestand bis zu einigen Kelvin können gegenwärtig kommerzielle Wärmebildsysteme als Einzellösung unter Feldbedingungen keine geeigneten Informationen für den Pflanzenschutz bereit stellen. Messungen mit der NIR-Kamera im Wellenlängenbereich $\lambda = 0,9 - 1,7\ \mu\text{m}$ sowie mit Bandpassfiltern (mit und ohne H₂O-Band) ergeben unterschiedliche Intensitätsverteilungen der reflektierten Strahlung. Die Auswertung der spektralen Intensitätsverhältnisse verbessert die Differenzierungschancen.

Deskriptoren: Thermografie, NIR-Spektren, Infrarotkameras, Pflanzendifferenzierung, Mehltau, Gelbrost

Summary: *Fungi infections, which may cause variations of plants' surface temperature, can be recognised by infrared cameras in the thermal range (MIR: $\lambda = 8\text{-}12\ \mu\text{m}$) under laboratory conditions. In the field, pronounced natural temperature variations of several Kelvin within the crop canopy prevent the recognition of infected plants by commercial thermal vision systems as stand-alone solutions. Near infrared cameras ($\lambda = 0.9 - 1.7\ \mu\text{m}$) fitted with band-pass filters show different intensity distributions of the reflected radiation. The evaluation of the spectral intensity relations improves the differentiation possibilities.*

Keywords: *Thermography, NIR spectra, infrared imagery, plant discrimination, powdery mildew, stripe rust*

1. Einleitung

Grundlage für das maschinelle Erkennen von Pflanzen und Pflanzenkrankheiten sind Unterschiede in der Farbe (Spektrum im sichtbaren Bereich (VIS) und nahem Infrarot (NIR)) und in der Gestalt (Geometrie bzw. Morphologie). Deshalb beruhen Verfahren zum Erkennen von Pflanzen und zur berührungslosen Diagnostik des Pflanzenzustandes auf der spektralen Informationsauswertung. Zusätzlich können geometrische Merkmale der Pflanze bzw. von Pflanzenteilen sowie die Position im Feld verwertet werden (BENNEDSEN & PETERSON 2005, GERHARDS *et al.* 1993, GUYER *et al.* 1986 und 1993, LILLESAND und KIEFER 2000, WOEBBECKE *et al.* 1995a und 1995b, u.a.). Pflanzenstress und Pflanzenkrankheiten können sich auf die Photosyntheseaktivität auswirken. Dann ist Chlorophyllfluoreszenzanalyse erfolgversprechend (DALEY 1995, HERPPICH 2002, VON WILLERT *et al.* 1995). Führt der Befall der Pflanzen zu veränderten Oberflächentemperaturen, z.B. durch veränderte Transpiration oder Stoffwechseländerungen, so bietet die Thermografie die Möglichkeit, räumliche Temperaturverteilungen zu bestimmen (HELLEBRAND *et al.* 2004, INOUE 1990, NILSSON 1995).

Die Bildpixel von Infrarotkameras sind Intensitätswerte („Grauwerte“), denen über die Kalibrierung der Kamera Temperaturwerte (in °F, K oder °C) oder Werte der Strahlungsflussdichte (in $W\ m^{-2}$) zugeordnet werden. Die Visualisierung dieser Intensitätsverteilung kann über Falschfarbendarstellungen erfolgen. Sollte es gelingen, Merkmale des Befalls als spezifische quantitative Intensitätsverteilung zu bestimmen, dann könnte die Auswertung von Bildausschnitten oder des Gesamtbildes als eine Grundlage für die Steuerung von Pflanzenschutzgeräten dienen.

Die ersten Fragen, die es deshalb zu untersuchen galt, lauteten: Können mittels der heute verfügbaren Infrarotkameras gesunde und infizierte Pflanzen differenziert werden? Gibt es in Infrarotaufnahmen erkennbare Unterschiede zwischen Nutz- und Beipflanzen? Zahlreiche Arbeiten sprechen für die Eignung spektroskopischer Methoden im VIS- und NIR-Bereich zur Detektion von Unkräutern und Pflanzenbefall (AMON & SCHNEIDER 1993, BROWN *et al.* 1995, WOEBBECKE 1995b u.a.). Da die Struktur der Pflanzenoberflächen und die Inhaltsstoffe der Zellen die NIR-Reflexion beeinflussen, sind Reflexionsunterschiede sowohl zwischen den Teilen einer Pflanze als auch zwischen verschiedenen Pflanzen zu erwarten. Mit der Thermografie wird die Superposition aus Eigenstrahlung des untersuchten Objektes und Reflexion thermischer Strahler

an der Objektoberfläche im mittleren Infrarot erfasst und als ein Temperaturfeld dargestellt. Pflanzen mit unterschiedlicher Transpirationsaktivität sollten infolge der jeweils für die Verdunstung erforderlichen unterschiedlichen Energiemengen auch unterschiedliche Oberflächentemperaturen aufweisen. Sollte die Infektion von Pflanzen diese Transpirationsrate ändern, müsste dies thermografisch messbar sein.

2. Material und Methoden

Um die prinzipielle Eignung der Thermografie zum Erkennen von befallenen Pflanzen zu testen, wurde in Laborexperimenten 2002 und 2003 die Ausprägung der Infektion von Weizenpflanzen (*Triticum aestivum*, Sorte 'Kanzler') analysiert, die mit Mehltau (*Blumeria* [syn. *Erysiphe*] *graminis* DC. f. sp. *tritici* March.) infiziert wurden. In 2004 erfolgten Laboruntersuchungen an mit Gelbrost (*Puccinia striiformis* West.) infizierten Weizenpflanzen ('Kanzler' und ein Weizen-Zuchtstamm). In diesem Jahr stand ein VIS/NIR Spektrometer zur Verfügung, so dass Spektren in die Auswertung einbezogen werden konnten. Ab 2003 konnten zusätzlich Messungen mit einer NIR-Kamera aufgenommen werden. Feldmessungen erfolgten ab 2003 mit MIR- und NIR-Kameras, die an einem Traktor montiert waren. Auf dem Experimentalfeld waren auf parallelen, drei Meter breiten Streifen die Pflanzen mit Pflanzenschutzmitteln behandelt. Die Fläche zwischen den Streifen blieb unbehandelt.

Thermografiekameras zur Messung von Temperaturfeldern im Umgebungstemperaturbereich (z. B. von -20°C bis $+100^{\circ}\text{C}$) verwenden mittleres Infrarot (MIR) im Wellenlängenbereich um $10\ \mu\text{m}$, da hier das Strahlungsmaximum eines „Schwarzkörperstrahlers“ mit 300 K liegt und somit eine hohe Messempfindlichkeit erreicht werden kann. Bei den Laborexperimenten wurde vorwiegend das Infrarotthermografiesystem Varioscan™ 3021-ST (Jenoptik Technologie GmbH) eingesetzt. Die Kamera besitzt einen MCT-Sensor (Mercury-Cadmium-Tellurid) mit Stirlingkühler und hat eine Temporauflösung von ca. 0,03 K bei 300 K im Messbereich 8 - 12 μm . Wärmebilder mit 360H x 240V Pixel können mit einer Rate von etwa einem Bild pro Sekunde aufgenommen werden. Für Aufnahmen unter Feldbedingungen fand zusätzlich eine FPA-Kamera (Focal Plane Array) ThermaCAM® SC 500 (FLIR Systems GmbH) mit einem ungekühlten Mikro-Bolometer Array im Messbereich 7,5 - 13 μm Verwendung. Sie hat eine Temporauflösung von ca. 0,07 K bei 300 K und liefert bis zu 50 Bilder pro Sekunde

raturauflösung von ca. 0,07 K bei 300 K und liefert bis zu 50 Bilder pro Sekunde mit 320H x 240V Pixel.

Für NIR-Messungen wird eine FPA-Kamera ALPHA NIR™ (Indigo Systems Corporation, jetzt FLIR SYSTEMS) genutzt. Diese Kamera hat mit einem InGaAs-Sensor (Indium Gallium Arsenid), der im Wellenlängenbereich 0,9 - 1,7 µm empfängt und eine Empfindlichkeit von 10^{10} Photonen $\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ ($2 \cdot 10^{-5} \text{ W m}^{-2}$) aufweist. Die Bildfolgegeschwindigkeit beträgt bis zu 30 Aufnahmen pro Sekunde mit 320H x 256V Pixel. Bei der Kamera können über eine Eigenbauvorrichtung Filter angebracht werden (Alpha™ Wellenbandpassfilter von LASER COMPONENTS GmbH mit 150 nm Bandbreite und den Zentralwellenlängen von 1000 nm, 1075 nm, 1175 nm und 1420 nm). Für die Aufnahme von Spektren in VIS-/NIR-Bereich kam ein Spektrometersystem (tec5 AG) basierend auf den Modulen MMS1 NIR enhanced (400 - 1100 nm) und MMS NIR 1.7tc (900 - 1700nm) zum Einsatz (Carl Zeiss Jena GmbH, Spektralsensorik). In den Modulen werden Dioden-Arrays von Hamamatsu verwendet. Als Lichtquellen dienen Halogenlampen und die Kopplung erfolgt über Quarzglasfaserkabel. Es wurden jeweils zehn Spektren von der Blattoberseite und von der Blattunterseite bei gesunden und infizierten Pflanzen aufgenommen. Die Reflexionswerte sind relative Werte. Mittels interner Kalibrierung wurde eine Vergleichbarkeit erreicht, so dass die Spektren miteinander verrechnet werden konnten.

3. Ergebnisse und Diskussion

Thermografie

Mit Mehltau infizierte Pflanzen zeigten in Laboruntersuchungen 2002 und 2003 thermografisch messbare Temperaturveränderungen. Einige Tage nach dem Infizieren der Blätter mit Mehltau sank deren Temperatur um 0,2 bis 0,9 K (Bild 1), wobei sich die Temperaturverteilungen auf den Pflanzen bei einigen Versuchen uneinheitlich entwickelten. So stieg bei einigen gesund erscheinenden Pflanzenbereichen der infizierten Pflanzen, bestehend aus nachgewachsenen Blättern ohne Infektionsanzeichen, die Temperatur an und erreichte höhere Werte als die der gesunden Pflanzen (Bild 2). Die Temperatur blieb jedoch unterhalb der Umgebungstemperatur. Bei Laboruntersuchungen in 2004 mit Weizenpflanzen, die mit Gelbrost infiziert waren, blieben die Temperaturdifferenzen zwischen gesunden und infizierten Pflanzen fast immer unterhalb $\pm 0,1$ K.

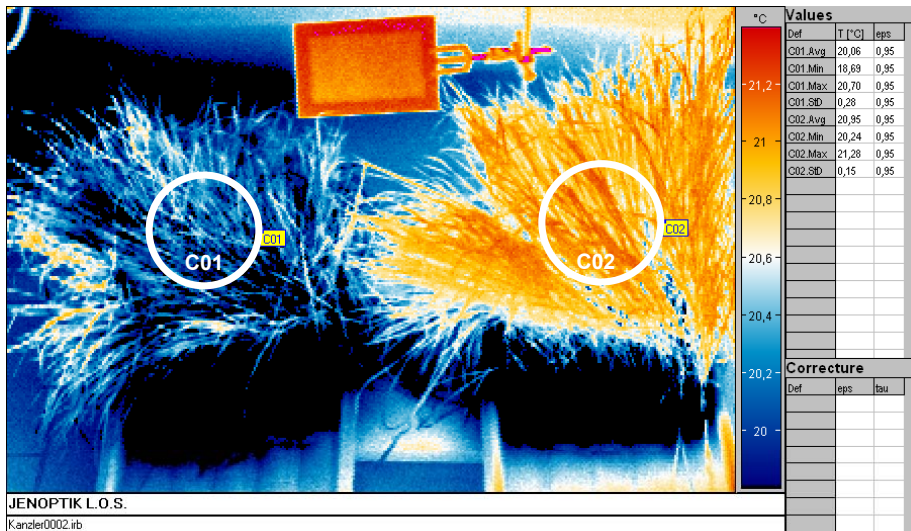


Bild 1: Temperaturunterschied von 0,9 K zwischen infizierten und nicht infizierten Weizenpflanzen (*Triticum aestivum*, Sorte 'Kanzler'). Die linken Pflanzen sind mit Mehltau (*Blumeria* [syn. *Erysiphe*] *graminis* DC. f. sp. *tritici* March.) infiziert.
 Temperaturwerte im linken Messkreis C01 (in °C): Mittelwert 20,1; Minimalwert 18,7; Maximalwert 20,7; Standardabweichung 0,3
 Temperaturwerte im rechten Messkreis C02 (in °C): Mittelwert 21,0; Minimalwert 20,2; Maximalwert 21,3; Standardabweichung 0,15
 Lufttemperatur T=22,5°C, Luftfeuchte 47 %



Bild 2: Aufnahmen von Weizenpflanzen (*Triticum aestivum*, Sorte 'Kanzler'), infiziert mit Mehltau (*Blumeria* [syn. *Erysiphe*] *graminis* DC. f. sp. *tritici* March.; linker Topf), und von nicht infizierten Weizenpflanzen (rechter Topf) im sichtbaren Bereich (VIS) und im thermischen Bereich (MIR). Teile der infizierten Pflanze haben höhere Temperatur als die nicht behandelte Pflanze.
 Lufttemperatur 24,1°C, relative Luftfeuchtigkeit 52 %

Die Temperatur von Blättern und anderen Pflanzenteilen wird durch die Wärmebilanz zwischen Wärmeabgabe infolge Transpiration und Wärme- bzw. Energieaufnahme aus der Umgebung bestimmt. Transpiration senkt durch die für den Verdunstungsprozess erforderliche Verdampfungsenthalpie die Blatttemperaturen im Vergleich zu der umgebenden Luft. Nur bei sehr geringer Transpiration und stark verminderter Wärmeableitung kann die bei der Zellatmung freiwerdende, normalerweise vernachlässigbar geringe Wärme dagegen zu einer Temperaturerhöhung führen. Bei

gen zu einer Temperaturerhöhung führen. Bei Pflanzen überwiegt in der Regel die Transpiration, d. h. die Oberflächen sind kühler als die Umgebungsluft. Die Transpirationsrate hängt neben pflanzenspezifischen Parametern von dem Wasserdampfgradienten zwischen Blatt und Luft und von der Luftbewegung an der Pflanzenoberfläche ab.

Während Rostbefall an den künstlich infizierten Weizenpflanzen kaum thermografisch messbar war, führte Mehltaubefall zu messbaren Temperatureffekten. Die Infektion mit Mehltau lässt die Transpirationsrate an der befallenen Pflanzenoberfläche zunächst ansteigen mit resultierender Abkühlung der befallenen Blätter. Das könnte auf das sich ausbildende Pilzmyzel und eine dadurch deutlich vergrößerte Verdunstungsfläche mit sehr geringem Verdunstungswiderstand zurück zu führen sein. Im weiteren Verlauf der Infektion und Seneszenz werden die befallenen Bereiche letal geschädigt, das Gewebe stirbt ab, trocknet aus und die Transpiration an den befallenen Stellen versiegt bzw. wird stark eingeschränkt. Es ist zu vermuten, dass sich die infizierten Blätter auf den Wasserhaushalt der gesamten Pflanze und damit auf deren Transpiration insgesamt auswirken können. Das würde erklären, dass die noch nicht befallenen, z.T. nachgewachsenen Pflanzenblätter höhere Temperaturen als die gesunder Pflanzen hatten. Wenn diese Pflanzenteile weniger Wasser verdunsten als gesunde Pflanzen, erscheinen sie bei identischen Luftkonditionen wärmer als gesunde Pflanzen. Damit hat man bei der Befallserkennung über Thermografiesysteme das Problem, dass je nach Infektionsstadium unterschiedliche Effekte auftreten.

Die Versuche unter Feldbedingungen zeigten eine zweite Schwierigkeit für die Anwendung von Wärmebildkameras. Der Pflanzenbestand auf dem Feld weist natürliche Temperaturvariationen bis zu mehreren Kelvin auf, die damit deutlich über den durch Infektion verursachten Temperaturänderungen liegen (Bild 3). Diese natürlichen Temperaturvariationen auf dem Feld entstehen durch unterschiedliche Pflanzenhöhe und -dichte, die bei Sonneneinstrahlung zu Schatteneffekten führen. Dann hängt die gemessene Temperaturverteilung stark vom Blickwinkel der Kamera in Bezug auf den Einstrahlungswinkel der Sonne ab. Weiterhin führt die Heterogenität des Pflanzenbestandes bei Luftbewegung (Wind und Auftrieb) zu unterschiedlichen Transpirationsraten und damit Abkühlraten der Pflanzen.

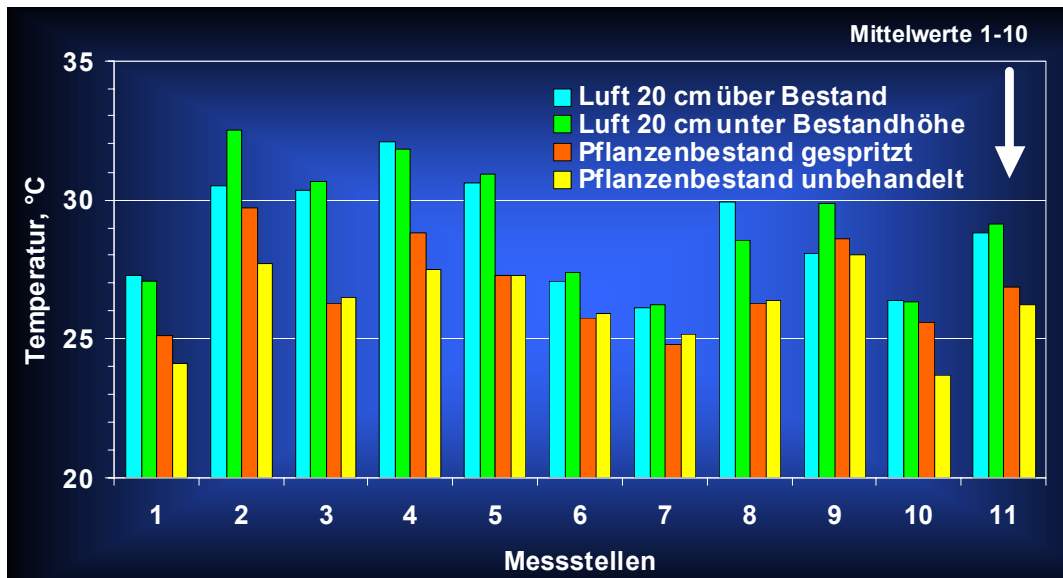


Bild 3: Temperatur des Winterweizenpflanzenbestandes auf gespritzten Streifen (3 m breit) und auf nicht gespritzten Flächen sowie der Lufttemperatur (20 cm unter sowie 20 cm über der durchschnittlichen Bestandshöhe).

Messbedingungen: Messtag 11. Juni 2003, 13.20 – 16.00 Uhr,

Schwankungsbreite zwischen den Messstellen: leicht bewölkt (Sonnenschein zwischen ca. 50 % und 100 %), Lufttemperatur 26,2°C - 32,5°C, Luftfeuchte 42,4 % - 66,2 %, Windgeschwindigkeit 1 m s⁻¹ - 9 m s⁻¹, durchschnittliche Bestandshöhe an den Messstellen 42 cm – 93 cm

Die Ergebnisse der bisherigen Untersuchungen zeigen, dass die Thermografie das Potenzial besitzt, infizierte Pflanzen, deren Transpiration durch den Befall Änderungen unterliegt, zu erkennen. Aufgrund der natürlichen Temperaturvariationen innerhalb des Pflanzenbestandes können allerdings gegenwärtig kommerzielle Wärmebildsysteme allein keine geeigneten Informationen für den Pflanzenschutz bereitstellen. Offen bleibt, ob durch Kombination mit Kameras anderer Wellenlängen (VIS, NIR) oder Wirkprinzipien (Fluoreszenz) die Aussagemöglichkeit verbessert werden kann.

4. NIR-Messungen

Im NIR liegen Spektralbereiche mit und ohne Wasserabsorption (Bild 4). Da durch die Infektion mit Pilzen oder anderen Mikroorganismen Änderungen der Oberflächenstruktur auftreten können (Austrocknen und sonstige Veränderungen infolge kutikulaabbauender Enzyme sowie Ausbildung von Pilzgeflechten), wurden Spektren von gesunden und mit Gelbrost infizierten Blättern gemessen sowie Infrarotbilder von gesunden und infizierten Pflanzen mit Bandpassfiltern, deren Wellenlängenbereiche innerhalb und außerhalb des Wasserabsorptionsbandes (um 1,4 µm) lagen, aufgenommen.

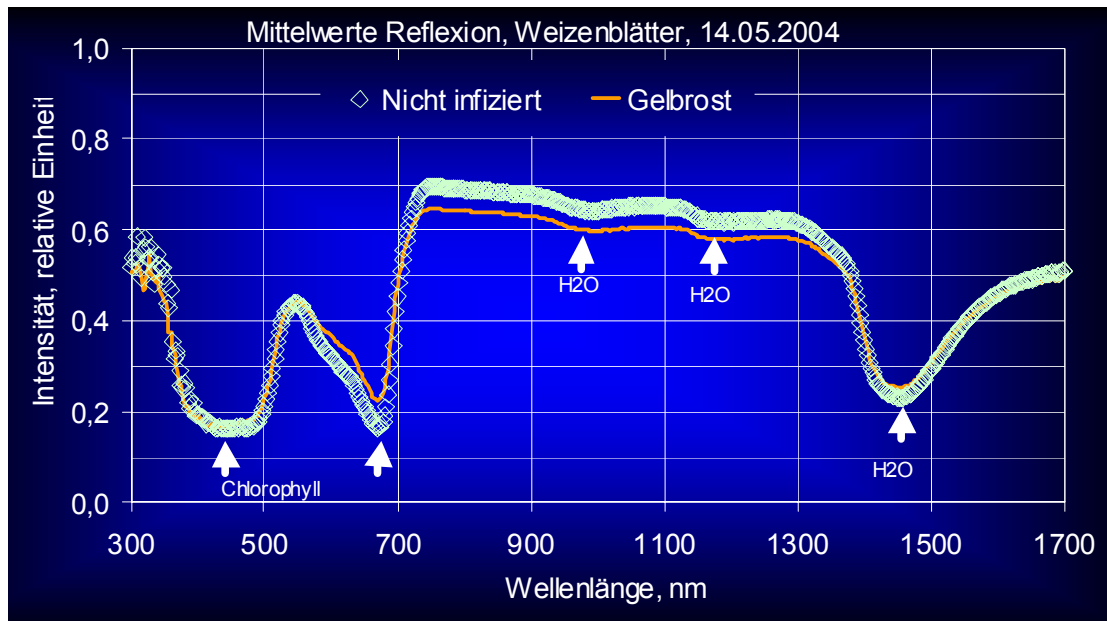


Bild 4: Spektrale Reflexion im NIR-Bereich von gesunden und mit Gelbrost (*Puccinia striiformis* West.) infizierten Weizenblättern (*Triticum aestivum*, Sorte 'Kanzler'; Mittelwerte von jeweils 20 Spektren). Auf H₂O-Absorptionsbanden weisen Pfeile

Tabelle 1: Mittelwerte und Standardabweichungen der NIR-Reflexionswerte von gesunden und mit Gelbrost infizierten Pflanzenblättern in den Wellenlängenbereichen 1085 ± 15 nm (ohne Wasserabsorption) und 1450 ± 15 nm (Wasserabsorptionsband). Die Mittelwerte und Standardabweichungen der Blattoberseiten und Blattunterseiten beruhen jeweils auf 120 Messwerten (10 Spektren mit 2,5 nm Auflösung)

Auswertung	Mittelwert 1085 ± 15 nm	Standard- abweichung 1085 ± 15 nm	Mittelwert 1450 ± 15 nm	Standardab- weichung 1450 ± 15 nm
Gesunde Pflanzen, alle Spektren	0,642	0,039	0,223	0,019
Gesunde Pflanze, 10 Spektren Blattoberseite	0,634	0,043	0,225	0,016
Gesunde Pflanze, 10 Spektren Blattunterseite	0,651	0,032	0,221	0,021
Infizierte Pflanze, alle Spektren	0,626	0,049	0,275	0,042
Infizierte Pflanze, 10 Spektren Blattoberseite	0,631	0,027	0,268	0,043
Infizierte Pflanze, 10 Spektren Blattunterseite	0,622	0,063	0,281	0,041

Die Spektren zeigen, dass im Mittel die IR-Reflexionsintensität infizierter Pflanzenteile niedriger ausfällt (Bild 4 und Tab. 1). Es treten allerdings spektral unterschiedliche Veränderungen auf. Im Bereich außerhalb der Wasserabsorption (1085 nm, Tab.1) nehmen die

IR-Reflexionswerte infizierter Blätter geringfügig ab, insbesondere an den Blattunterseiten. Dagegen steigen im Wellenlängenbereich der Wasserabsorption (ca. 1450 nm, Tab.1) die IR-Reflexionswerte infizierter Blätter etwas an, d. h. der Wassergehalt dieser Blätter ist niedriger. Die Standardabweichungen sind insbesondere in diesem Absorptionsband unterschiedlich und bei infizierten Pflanzen meist deutlich größer. Aufgrund dieser hohen Variabilität ist eine Pflanzendifferenzierung bei Gelbrostinfektion auf Grundlage der Reflexionsintensität, wie sie mit NIR-Aufnahmen gemessen wird, nicht möglich. Da jedoch die Intensitätsveränderungen in Bereichen mit und ohne Wasserabsorption gegenläufig sind, verbessert die Verhältnisbildung die Differenzierungschancen. Der Tabelle 2 ist zu entnehmen, dass sowohl das Verhältnis von zwei Linienintensitäten (1085 nm zu 1450 nm) als auch die Mittelwerte von Intensitätsverhältnissen in einem Spektralbereich (1070 - 1100 nm zu 1435 - 1465 nm) Werte liefert, deren Standardabweichungen sich nicht mehr deutlich überlappen, sondern eine Klassifizierung zulassen könnten.

Tabelle 2: Mittelwerte und Standardabweichungen der spektralen Intensitätsverhältnisse von gesunden und mit Gelbrost infizierten Weizenpflanzen aus jeweils zehn Spektren von Blattoberseiten und von Blattunterseiten

Auswertung	Mittelwert ¹⁾	Standardabweichung ¹⁾	Mittelwert ²⁾	Standardabweichung ²⁾
Gesunde Pflanzen, alle Spektren	5,84	0,36	5,78	0,35
Gesunde Pflanze, 10 Spektren Blattoberseite	5,70	0,27	5,64	0,26
Gesunde Pflanze, 10 Spektren Blattunterseite	5,99	0,40	5,92	0,37
Infizierte Pflanze, alle Spektren	4,71	0,87	4,68	0,83
Infizierte Pflanze, 10 Spektren Blattoberseite	4,82	0,65	4,79	0,61
Infizierte Pflanze, 10 Spektren Blattunterseite	4,60	1,07	4,56	1,00

¹⁾ 10 Spektren bei den Wellenlängen: 1085 nm (ohne Wasserabsorption) zu 1450 nm (Wasserabsorptionsband)

²⁾ 10 Spektren, jeweils bei den Wellenlängen (in nm): 1070/1435; 1072,5/1437,5; 1075/1440; 1077,5/1442,5; 1080/1445; 1082,5/1447,5; 1085/1450; 1087,5/1452,5; 1090/1455; 1092,5/1457,5; 1095/1460; 1087,5/1462,5; 1100/1465

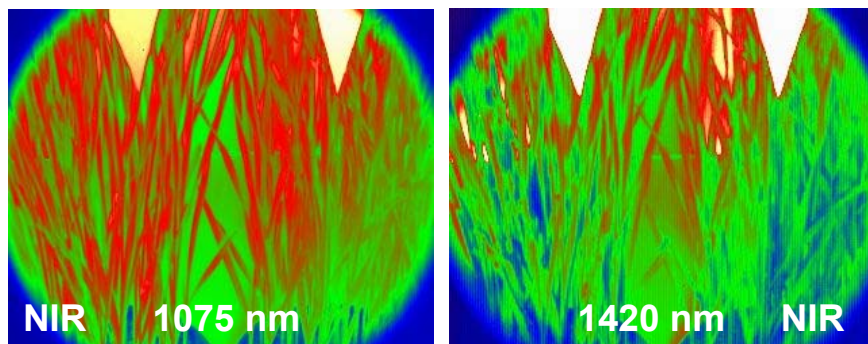


Bild 5: NIR-Aufnahmen mit Bandpassfilter 1075 ± 75 nm (keine H_2O -Absorption) und mit Bandpassfilter 1420 ± 75 nm (Wasserabsorptionsband). Weizenpflanzen linker Bildteil: mit Gelbrost infiziert, rechte Pflanzen unbehandelt

Gesunde Pflanzen sollten in NIR-Aufnahmen mit NIR-Filtern im 1070 ± 75 nm Bereich eine etwas höhere Intensität besitzen („heller“ sein) und bei Filtern im Wasserabsorptionsband (1420 ± 75 nm) dagegen eine geringere Intensität zeigen, d. h. „dunkler“ erscheinen. Die entsprechenden NIR-Aufnahmen zeigen tatsächlich die erwarteten unterschiedlichen Intensitätsverteilungen (Bild 5). Im Wasserabsorptionsband sind einige Pflanzenteile dunkler als mit dem 1075 nm-Filter. Diese Unterschiede werden bei der Darstellung als Binärbilder deutlich sichtbar (Bild 6). Die Unterschiede zwischen infizierten und gesunden Pflanzen hängen allerdings vom Blickwinkel ab und ändern sich im Versuchsablauf, so dass simple Auswertungsverfahren mit Intensitätsschwellen keine geeigneten Informationen für den Pflanzenschutz geben würden. Als Ausweg bietet sich die pixelweise Verrechnung von zwei oder mehr identischen NIR-Aufnahmen in unterschiedlichen Wellenbereichen an, da die Verhältnisbildung (vergl. Tab. 2) das Diskriminierungspotenzial im NIR-Bereich steigert. Es zeigt sich klar, dass sowohl bei der Quotientenbildung als auch der Differenzbildung (Bild 7) die Pflanzen gegenüber dem Hintergrund hervortreten und damit die unterschiedliche Absorption im Wasserband verstärkt wird. Eine Klassifizierung zwischen infizierten und nicht infizierten Pflanzen bedarf jedoch weiterer Untersuchung.

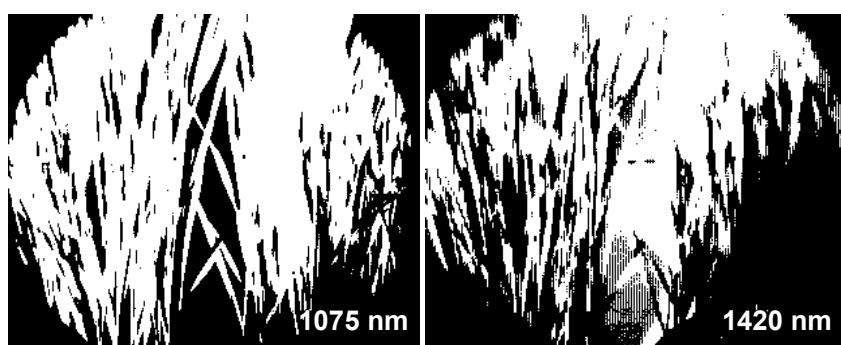


Bild 6: Binärbilder mit Schwellenwert 128 der NIR-Aufnahmen mit Bandpassfilter (Bild 5)

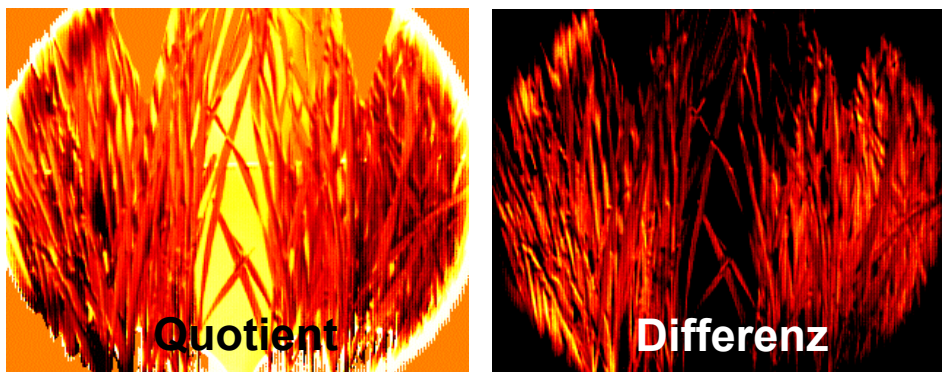


Bild 7: Quotient und Differenz der NIR Aufnahmen mit Bandpassfilter (Bild 5). Die Darstellung als Quotient erfolgte mit einem eigenem Programm (INTREß 2005). Je nach Parameterwahl kann das Bild auch invertiert erscheinen. Die Darstellung als Differenz erfolgte mit einer kommerziellen Software

5. Ausblick und Schlussfolgerungen

Multispektrale Aufnahmen im VIS/NIR Bereich stellen heute keine technische Hürde dar. Mit geeigneten Objektiven und Strahlteilern kann dieser Wellenlängenbereich erfasst werden. Als Beispiel sei die Unkrautkartierung genannt, bei der die Kombination aus VIS und NIR Bildverarbeitung verwendet wird (SÖKEFELD und GERHARDS 2004). Für die synchrone online Bildverarbeitung im thermischen und NIR-Bereich müssen geeignete Bedingungen gewählt werden, damit sowohl im MIR- als auch im NIR-Bereich vergleichbare Messflächen zugrunde liegen. Da für die optische Abbildung unterschiedliche Materialien (NIR: Glas und MIR: Germanium) verwendet werden, sind nach gegenwärtigem Kenntnisstand gemeinsame Objektive und Strahlteiler nicht möglich. Falls NIR- und MIR-Kameras zur online Befallsdetektion kombiniert werden sollen, kommt zur Zeit in erster Linie nur der Intensitätsvergleich sich überdeckender Bildausschnitte in Frage. Zusätzlich müsste im NIR-Bereich das verrechnete Bild aus unterschiedlichen Wellenlängenbereichen bestehen, denn die mit der NIR-Kamera direkt gemessene NIR-Intensitätsverteilungen erweist sich ohne spektrale Verrechnung als weniger aussagefähig für die Diskriminierung von Pflanzen.

6. Danksagung

Frau Dr. agr. Kerstin Flath, Wissenschaftlerin am Institut für Pflanzenschutz in Ackerbau und Grünland der Biologischen Bundesanstalt, möchten wir für die gute Zusammenar-

beit danken. Ihr Engagement ermöglichte die Laboruntersuchungen an definiert infizierten Weizenpflanzen.

7. Literatur

- AMON H, SCHNEIDER T (1993)** Anwendung spektraler Signaturen von Pflanzenbeständen für die Produktionstechnik im Pflanzenbau. Zeitschrift für Agrarinformatik 3: 54-60
- BENNESEN BS, PETERSON DL (2005)** Performance of a system for apple surface identification in near-infrared images. Biosystems Engineering 90 (4): 419-431
- BROWN RB, STECHLER, J-PGA, ANDERSON GW (1994)** Remote Sensing for identification of weeds in no-till corn. Transactions of the ASAE 37 (1): 297-302
- DALEY PF (1995)** Chlorophyll fluorescence analysis and imaging in plant stress and disease. Canadian Journal of Plant Pathology 17: 167-173
- GERHARDS R, NABOUT A, SÖKEFELD M, KÜHBAUCH W, NOUR ELDIN HA (1993)** Automatische Erkennung von zehn Unkrautarten mit Hilfe digitaler Bildverarbeitung und Fouriertransformation. Journal of Agronomy and Crop Science 171: 321-328
- GUYER DE, MILES GE, GAULTNEY LD, SCHREIBER MM (1993)** Application of machine vision to shape analysis in leaf and plant identification. Transactions of the ASAE 36 (1): 163-171
- GUYER DE, MILES GE, SCHREIBER MM, MITCHELL OR, VANDERBILT VC (1986)** Machine vision and image processing for plant identification. Transactions of the ASAE 29: 1500-1507
- HELLEBRAND HJ, BEUCHE H, DAMMER KH, FLATH K (2004)** Plant evaluation by NIR-Imaging and Thermal Imaging. AgEng 2004 Conference "Engineering the Future", Leuven, Belgium, September 12-16, 2004, Book of Abstracts, Part 2: 946-947
- HERPPICH WB (2002)** Chlorophyllfluoreszenzbildanalyse und Fluoreszenzspektralanalyse. Landtechnik 57 (2): 98-99
- INOUE Y (1990)** Remote detection of physiological depression in crop plants with infrared thermal imagery. Japanese Journal of Crop Science 59 (4): 762-768
- INTREB J (2005)** Persönliche Mitteilung
- LILLESAND T, KIEFER R (2000)** Remote sensing and image interpretation. John Wiley & Sons Inc., New York
- NILSSON H-E (1995)** Remote sensing and image analysis in plant pathology. Canadian Journal of Plant Pathology 17: 154-166
- SÖKEFELD M, GERHARDS R (2004)** Automatische Unkrautkartierung mit digitaler Bildverarbeitung. Landtechnik 59 (3): 154-155
- VON WILLERT DJ, MATYSSEK R, HERPPICH WB (1995)** Experimentelle Pflanzenökologie - Grundlagen und Anwendungen. Georg Thieme Verlag, Stuttgart

WOEBBECKE DM, MEYER GE, VON BARGEN K, MORTENSEN DA (1995a) Shape features for identifying young weeds using image analysis. Transactions of the ASAE, 38 (1): 271-281

WOEBBECKE DM, MEYER GE, VON BARGEN K, MORTENSEN DA (1995b) Color indices for weed identification under various soil, residue, and lighting conditions. Transactions of the ASAE 38 (1): 259-269

Erfassung der Variabilität der Fruchtentwicklung bei Apfel mittels Spektrometer

Acquisition of variability of apple fruit development by means of spectrophotometer

Bernd Herold, Ingo Truppel, Manuela Zude, Martin Geyer
Leibniz-Institut für Agrartechnik Potsdam-Bornim e.V., Max-Eyth-Allee 100, 14469 Potsdam
E-mail: bherold@atb-potsdam.de

Zusammenfassung: Äpfel für den Frischverzehr dürfen nicht zu früh aber auch nicht zu spät gepflückt werden, um höchstmögliche Qualität und ausreichende Haltbarkeit zu erzielen. Die Pflückreife wird traditionell mit zerstörenden Methoden geprüft, welche nur eingeschränkt für eine präzise Bestimmung des optimalen Erntetermins geeignet sind. Insbesondere bei Sorten mit hoher Variabilität in der Fruchtentwicklung kommt es auf eine exakte Bestimmung der Reife an. Reifebedingte Veränderungen an den Früchten sind beispielsweise an Veränderungen der Pigmentgehalte (Chlorophyll, Anthozyan) erkennbar und lassen sich nichtdestruktiv mit hoher Präzision durch spektraloptische Messungen zu überwachen. Aus dem Verlauf entsprechender Indizes kann der Einfluss unterschiedlicher Faktoren ermittelt und der Reifefortschritt exakter als bisher bestimmt werden.

Deskriptoren: Apfel, Frucht reife, Pigmentgehalt, spektraloptische Messung

Summary: *Apple fruits for fresh consumption should not be picked too early but also not too late in order to achieve maximum quality and sufficient storage and shelf life. Traditionally, optimum fruit maturity for picking is checked by using destructive methods that have only restricted suitability to determine precisely the optimum harvest date. Particularly, the fruit maturity of apple varieties showing high variability of fruit development need to be analyzed accurately. Fruit maturity changes can be detected based on changes of pigment contents (chlorophyll, anthocyanin) and can non-destructively be monitored with high precision by using spectral measurements. From the course of related indices, the influence of different factors on the fruit development can be identified leading to more accurate maturity detection.*

Keywords: *apple fruit, fruit maturity, pigment content, spectral measurement*

1. Problem und Aufgabenstellung

Die Bestimmung des optimalen Erntezeitpunkts von Äpfeln und anderen Früchten für den Frischverzehr ist mit herkömmlichen destruktiven Methoden nur bei Vorliegen ausreichender Kenntnisse und umfangreicher Erfahrungen mit befriedigendem Ergebnis möglich (HÖHN *et al.* 1999, YOM DIN *et al.* 1998). Deshalb gewinnen nichtdestruktive Methoden zur Bestimmung der Fruchtreife und der Fruchtqualität zunehmend an Bedeutung. Mit ihrer Hilfe ist eine kontinuierliche Überwachung der Entwicklung am Baum und damit eine erhöhte Aussagesicherheit der Reife- und Qualitätsbestimmung möglich (ROHRBACH *et al.* 2004, HEROLD *et al.* 2004, SARANWONG *et al.* 2003).

Die hohe Variabilität der Reifeentwicklung am Baum ist neben sortentypischen Eigenschaften bedingt durch Umwelt-, Pflege- und Erntebedingungen (OSTERLOH 1980). Insbesondere spielen die Jahreswitterung und die Standortbedingungen, die Versorgung mit Wasser und Nährstoffen, die Stärke des Fruchtbehangs (Blatt/Frucht-Verhältnis), die Kronengestaltung und damit im Zusammenhang die Fruchtposition (Fruchtastalter, Belichtung) im Baum eine wichtige Rolle. Auch endogene Faktoren wie Phytohormone und Reservestoffe sind dabei zu berücksichtigen.

Um die Fruchtentwicklung nichtdestruktiv zu überwachen, bieten sich vor allem spektrometrische Messungen der Pigmentgehaltveränderung an. Nach OSTERLOH (1980) erfolgt bei Kernobst nach Überschreiten eines Maximalwerts der Chlorophyllanreicherung - in unseren Breiten etwa zwischen 70 und 90 Tage nach der Befruchtung - eine schnelle Verringerung bis zum Eintritt der Baumreife. Mit der Veränderung des Chlorophyllgehalts verläuft ein Wechsel in der so genannten Grundfarbe von grün nach gelb. Dieser Vorgang kann bei allen Fruchtarten festgestellt werden, auch wenn die Grundfarbe durch Anthozyane überdeckt ist. Die Grundfarbe einer Frucht ist also ein Indikator für deren physiologischen Reifezustand. Dieser Farbumschlag verläuft sigmoid, d.h. zunächst mit geringer, danach mit starker und schließlich wieder mit verringerter Geschwindigkeit. Im Verlaufe der Fruchtentwicklung werden Anthozyane bis zur Ernte in den Früchten angereichert. Eine intensive Bildung ist aber erst mit Beginn oder nach Abbau des Chlorophylls möglich.

Laboruntersuchungen zu Pigmentveränderungen an Äpfeln wurden von MERZLYAK *et al.* (2003) mit Hilfe spektraler Reflexionsmessungen durchgeführt. Dabei wurden unterschiedliche Indizes zur Beschreibung der Veränderungen des Chlorophyll- und Anthozyangehalts verwendet, die sich auf die Auswertung von zwei oder drei Wellenlängen stützen. Sie fanden für mehrere Indizes signifikante Zusammenhänge mit den Pigmentgehalten.

Seit mehreren Jahren sind miniaturisierte Spektrometermodule kommerziell verfügbar. Dadurch wurde es möglich, portable Spektrometergeräte für Untersuchungen im Freiland zu entwickeln. Insbesondere für Messungen an Früchten gilt es Sonden für eine günstige Lichteinkopplung mit geeigneter Geometrie einzusetzen. Mit dieser Fragestellung und der Verwendung einer spezifischen Lösung für die Überwachung der Fruchtentwicklung bei Apfel befasst sich der vorliegende Beitrag. Besonders herausgestellt werden dabei erste Ergebnisse über äußere Einflussfaktoren auf die Fruchtentwicklung am Baum.

2. Material und Methoden

Eigene Untersuchungen erfolgten an Äpfeln der Sorten 'Elstar' und 'Pinova' in einer Produktionsanlage im Raum Werder bei Berlin in den Jahren 2003 und 2004. Die Bäume wurden im Jahre 2001 gepflanzt und als schlanke Spindel erzogen. Der Habitus dieser Bäume erlaubte in fast allen Positionen eine gute Belichtung der Früchte. Je untersuchtem Baum wurden in der ersten Augustdekade 10 Früchte für die weiteren Untersuchungen ausgewählt und am Stiel mit Etiketten versehen für die spätere Identifikation. Während der Fruchtentwicklung wurden in den folgenden Wochen anfangs einmal, später zweimal an jeder Frucht spektrale Messungen mit dem von TRUPPEL (2003) beschriebenen tragbaren funkangekoppeltem Minispektrometer durchgeführt. Nach jedem Messtermin wurden die 10 markierten Früchte eines der Bäume gepflückt und im Labor auf die konventionellen Reifeparameter analysiert.

Die spektrale Messung erfolgte im Modus der so genannten partiellen Lichttransmission, um Veränderungen im Fruchtfleisch stärker als bei Reflexionsmessung zu berücksichtigen (HEROLD *et al.* 2004). Dabei wird eine Sonde mit spezifischer Messgeometrie eingesetzt. Sie besteht aus einer kreisförmigen Anordnung von Miniglühlampen und einem mittig liegenden Lichtleiter und wird zur Messung direkt auf die Fruchtoberfläche aufgesetzt. Durch Isolierringe aus elastischem Schaumstoff an der Frontseite der Glühlampen und des Lichtleiters wird Vagabundieren des ausgestrahlten Lichts und Aufnahme von Lichtreflexion an der Fruchtoberfläche verhindert. Das Licht wird von den Lampen durch die Fruchtschale ins Fruchtfleisch gestrahlt und dort diffus gestreut. Ein Teil des gestreuten Lichts kommt mittig zurück, durchdringt wieder die Fruchtschale und wird vom Lichtleiter aufgenommen. Dieser Lichtanteil, der einen gewissen Weg durch die Frucht zurückgelegt hat, wird spektrometrisch ausgewertet. Man kann den auf diese Weise gewonnenen Messwert auch als Reflexion aus dem Fruchttinneren interpretieren. Zwischen diesem Messwert und

den Messwerten einer Interaktanz-Glasfasersonde z.B. eines NIRS 6500 Geräts (Foss NIRSystems Silver Spring, MD, USA) besteht Ähnlichkeit jedoch keine Gleichheit.

Als Parameter zur Beschreibung der Chlorophyllveränderung wurden dabei der so genannte Red-edge Index (LICHTENTHALER *et al.* 1996) sowie einfacher zu berechnende Parameter benutzt (KRAFT *et al.* 2000). Der Red-edge Index entspricht der Lage des Wendepunkts an der langwelligen Flanke der Chlorophyllabsorption in der spektralen Signatur und lässt sich aus der zweiten Ableitung als Koordinate des Nulldurchgangs durch die Wellenlängenchse ermitteln. Durch Laboranalysen an Äpfeln wurde die Korrelation des Red-edge Index mit dem Chlorophyllgehalt bestätigt (ZUDE-SASSE *et al.* 2002, ZUDE 2003). Darüber hinaus wurde ein einfacher zu bestimmender Parameter verwendet, welcher als normalisierter Index ähnlich wie der NDVI berechnet wird und sehr hoch mit dem Red-edge Index korreliert. Dafür wurden zwei spezifisch für Apfel angepasste Wellenlängen empirisch ermittelt. Dieser Index der Chlorophyllabnahme I_{NChI} ist definiert:

$$I_{NChI} = (R_{760} - R_{695}) / (R_{760} + R_{695}),$$

wobei R den Messwert bei der als Fußnote angegebenen Wellenlänge in nm bezeichnet.

In ähnlicher Weise wurde zur Beschreibung der Entwicklung der roten Deckfarbe ein Index der Anthozyan-Bildung I_{NA1} definiert:

$$I_{NA1} = (R_{630} - R_{570}) / (R_{630} + R_{570}).$$

Die Wellenlängen 570 und 630 nm dieses Index wurden ebenfalls empirisch ermittelt.

3. Ergebnisse und Diskussion

Die Werte der konventionell bestimmten Reifeparameter weisen mehr oder weniger starke Schwankungen im Verlaufe der Reifeperiode auf (Bild 1). Vor allem der Index des Stärkeabbau zeigte erhebliche Schwankungen zwischen dem 20. und 30. Messtag. Dafür können unterschiedliche Ursachen in Betracht kommen. Fehler bei der Bestimmung durch ungeübte Personen sind eine Möglichkeit. Dennoch wird der Stärkeabbau als ein sehr sensitives Kriterium für die Bestimmung des optimalen Erntezeitpunkts angesehen. Demgegenüber zeigen die mittels Penetrometer bestimmte Festigkeit und der refraktometrisch

bestimmte SSC (Soluble Solids Content = Brixwert) geringe relative Veränderungen. Die hier auftretenden Schwankungen wirken sich folglich nicht so stark auf Prognoseergebnisse aus.

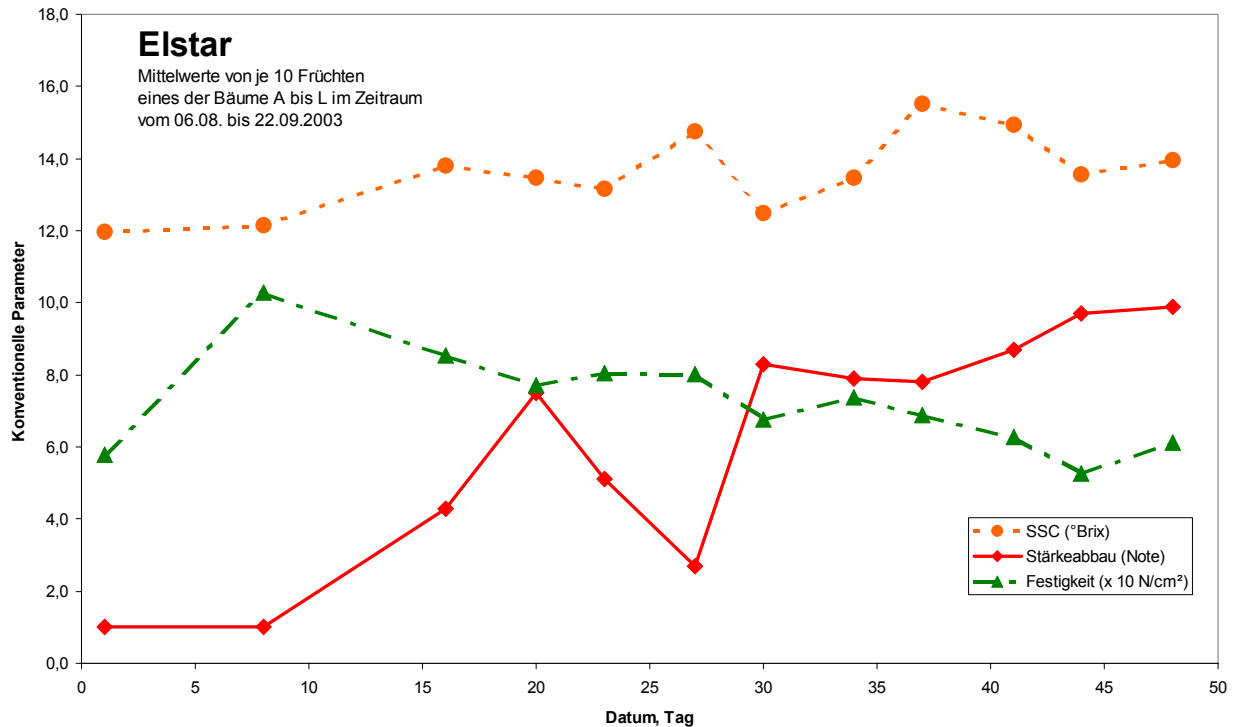


Bild 1: Verlauf von Stärkeabbau, Fruchtfleischfestigkeit und Gehalt an löslichen Feststoffen (SSC) bei 'Elstar' während der Saison 2003 von KW 32 (Tag 1) bis KW 39 (Tag 48)

Die destruktiven konventionellen Methoden erfordern für jede Bestimmung neue Stichproben. Wegen der subjektiven Stichprobennahme können durch ungeeignete Probenahme mangels ausreichender Erfahrung beträchtliche Fehler entstehen. Die richtige Auswahl der Früchte für repräsentative Stichproben besitzt deshalb erheblichen Einfluss auf die Gewinnung zuverlässiger Aussagen.

Bei hoher Variabilität der Fruchtentwicklung in einer Anlage sind für zuverlässige Aussagen sehr umfangreiche Analysen erforderlich. Gewöhnlich werden zur Bestimmung der konventionellen Reifeparameter Stichproben von jeweils 10 bis 20 Früchten analysiert. Um die tatsächliche Variabilität zu ermitteln, bedarf es wesentlich größerer Stichproben, welche sich jedoch in der Praxis nur mit Hilfe wesentlich schnellerer Methoden auswerten lassen.

Die Messung der spektralen Signatur mittels tragbarem Minispektrometer erlaubt schnelle wiederholte Messungen an den gleichen Früchten. Dadurch lassen sich Veränderungen

kontinuierlich und mit hoher Genauigkeit erfassen. Am auffälligsten markieren sich Veränderungen von Chlorophyll- und Anthozyangehalt in der spektralen Signatur. Im Gegensatz zur visuellen Wahrnehmung sind durch spektrometrische Messung beide Pigmente getrennt detektierbar.

In den vorliegenden Versuchen wurden bei 'Elstar' im Jahre 2003 beginnend in der 32. und endend in der 39. Kalenderwoche mit Hilfe des Minispektrometers Messungen durchgeführt. Wegen der sukzessiven Abernte der Früchte für Laboranalysen konnten zu Anfang insgesamt 177 und am Ende 86 Früchte gemessen werden. Die Indizes der Chlorophyllabnahme und der Anthozyanbildung zeigten zum Anfangstermin eine sehr breite Verteilung (Bild 2). Der Schwerpunkt der Verteilung des Chlorophyllindex verschob sich im Untersuchungszeitraum von 0,7 bis – 0,1 bei nur geringfügiger Verringerung der Variationsbreite. Demgegenüber driftete der Schwerpunkt des Anthozyanindex von 0,7 zu 1,0 mit sich stark verringernder Variationsbreite. Die sortentypisch breite Variation des Chlorophyllindex bestätigte die bestehenden Erfahrungen und wies auf die Zweckmäßigkeit von mehreren zeitlich aufeinander folgenden Pflückgängen bei dieser Sorte hin.

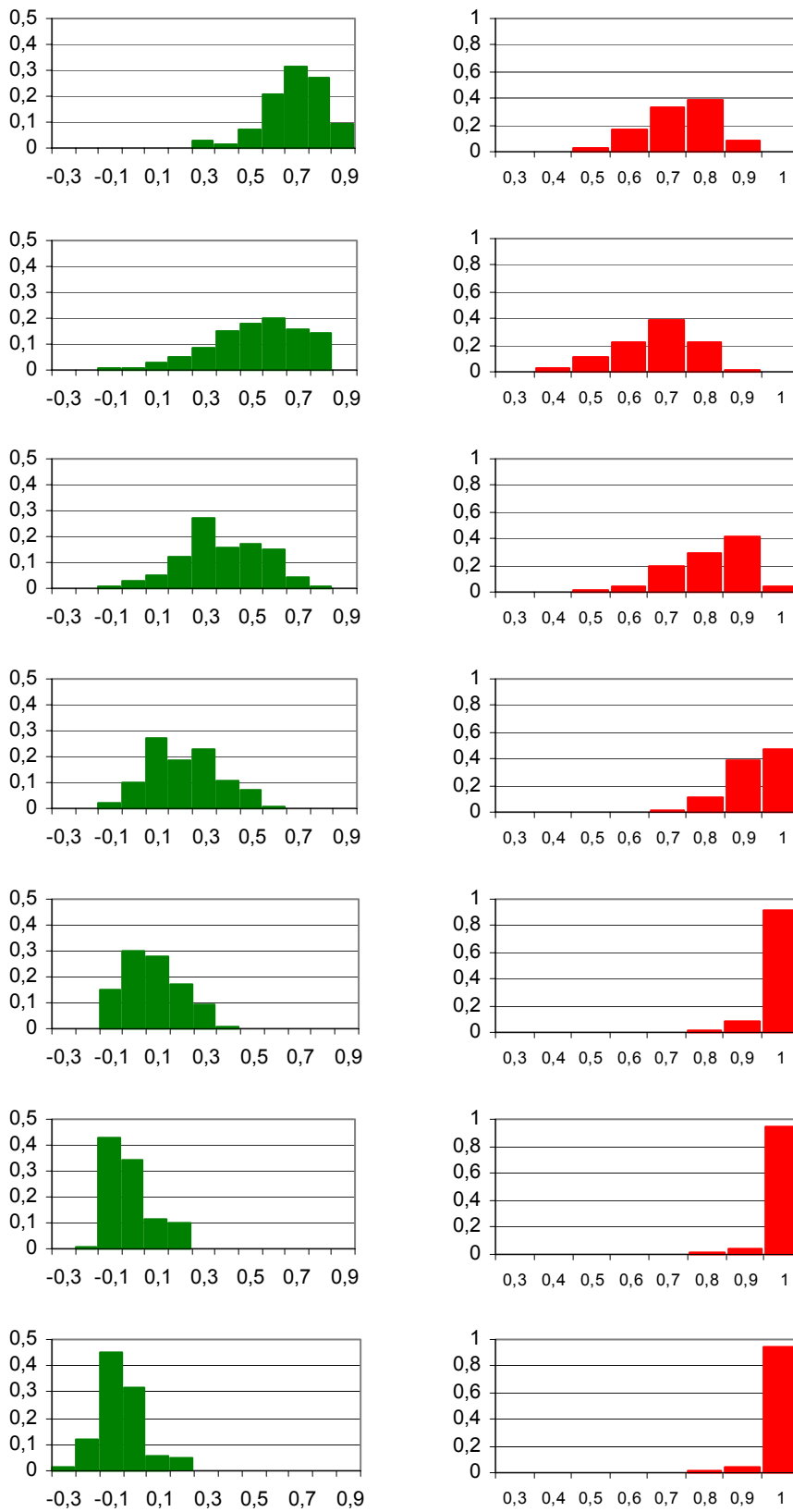


Bild 2: Entwicklung der Häufigkeitsverteilung der Indizes für Chlorophyllabbau (links) und Anthocyanbildung (rechts) bei 'Elstar'; von oben nach unten sind Ergebnisse von Entwicklungsstadien zwischen KW 32 bis KW 39 des Jahres 2003 dargestellt

Als Ursache für die hohe Variabilität der Reifeentwicklung kam nach den spektralen Messungen weniger der Einfluss der Fruchtposition im Baum in Betracht. Die Kronen wurden als schlanke Spindel erzogen und wiesen im vierten Standjahr der Bäume ein sehr liches Zweigwerk auf (Bild 3). Aus systematisch in unterschiedlichen definierten Positionen erfassten Daten von Früchten des gleichen Baumes konnte keine markante Abhängigkeit des Red-edge Index von der Fruchtposition gefunden werden (Bild 4). Daher wurde als mögliche Ursache für die hohe Variabilität des Chlorophyllgehalts innerhalb eines Baums eine unterschiedliche Entwicklung und Befruchtung der Blüten vermutet. Der Verlauf der Red-edge Werte war dabei weitgehend ähnlich und zeigte insgesamt einen gleichmäßigen Abfall mit fortschreitender Reife.



Bild 3: Typisches Beispiel für den Habitus der Bäume der Versuchsreihe im Jahre 2003; die Kronenerziehung als schlanke Spindel ermöglichte eine gute Belichtung für die meisten Früchte

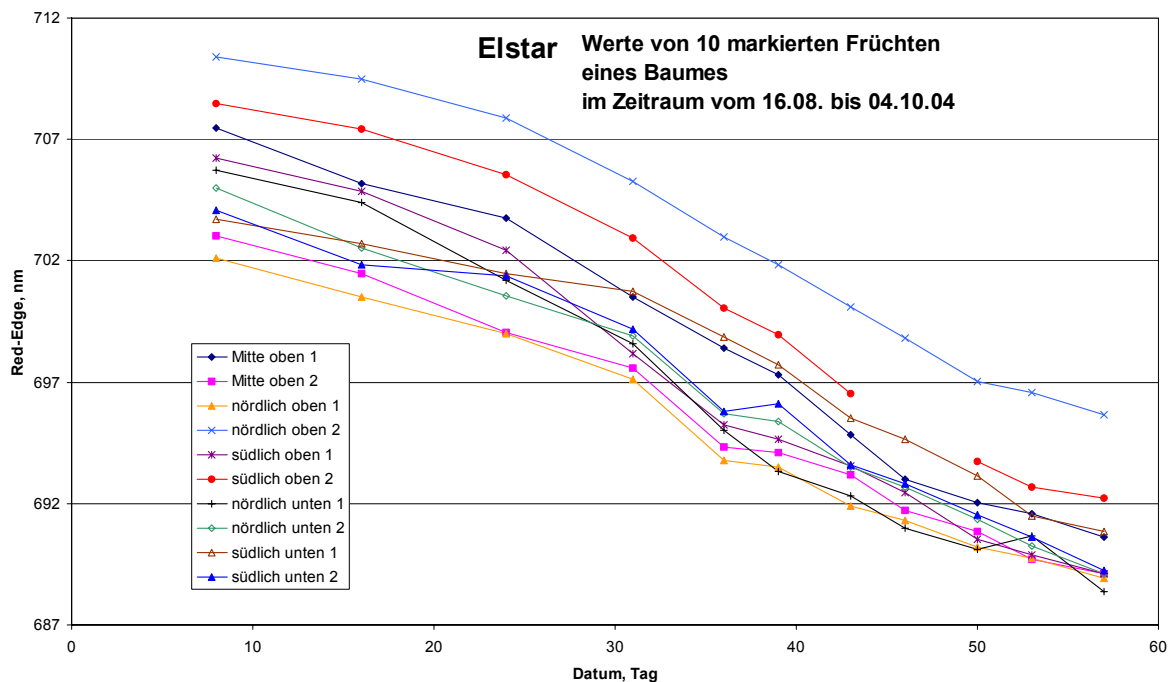


Bild 4: Verlauf des Red-edge Index bei zehn Früchten eines Baumes ('Elstar') in der Saison 2004; in der Legende sind die einzelnen Fruchtpositionen angegeben

Dagegen zeigte der Verlauf des Red-edge Index von unterschiedlichen Bäumen sehr deutliche Unterschiede, wie aus dem Vergleich von zwei Messreihen während der Fruchtentwicklung vor der Ernte hervorging (Bild 5). In der ersten Messreihe erfolgten wiederholte Messungen an zehn identischen Früchten ein und desselben Baumes, während für die andere Messreihe zu jedem Messtermin ein anderer Baum gewählt wurde, an dem wiederum jeweils zehn Früchte gemessen wurden. Durch wiederholte Messung an gleichen Früchten wurde ein kontinuierlicher Verlauf ermittelt, auf dessen Grundlage eine präzise Überwachung der Fruchtentwicklung möglich ist. Wegen der unterschiedlichen Bedingungen ergab sich bei wechselnden Bäumen (und Früchten) ein stark schwankender Verlauf, welcher keine vergleichbare Überwachung zuließe. Der Vergleich beider Messreihen bietet Ansatzpunkte, bei unterschiedlichen Probenahmevarianten Möglichkeiten und Grenzen der Reifekontrolle zur Prognose des optimalen Erntetermins zu untersuchen.

Die Fruchtentwicklung an unterschiedlichen Bäumen wird vor allem durch die Dichte des Fruchtbehangs beeinflusst (Bild 6). Die Früchte eines Baumes mit nur 22 Früchten reiften beträchtlich schneller als die eines Baumes mit 79 Früchten. Dies war sowohl an der Steigung als auch am zeitlichen Versatz des Verlaufs von Chlorophyll- und Anthozyanindex der Früchte beider Bäume erkennbar.

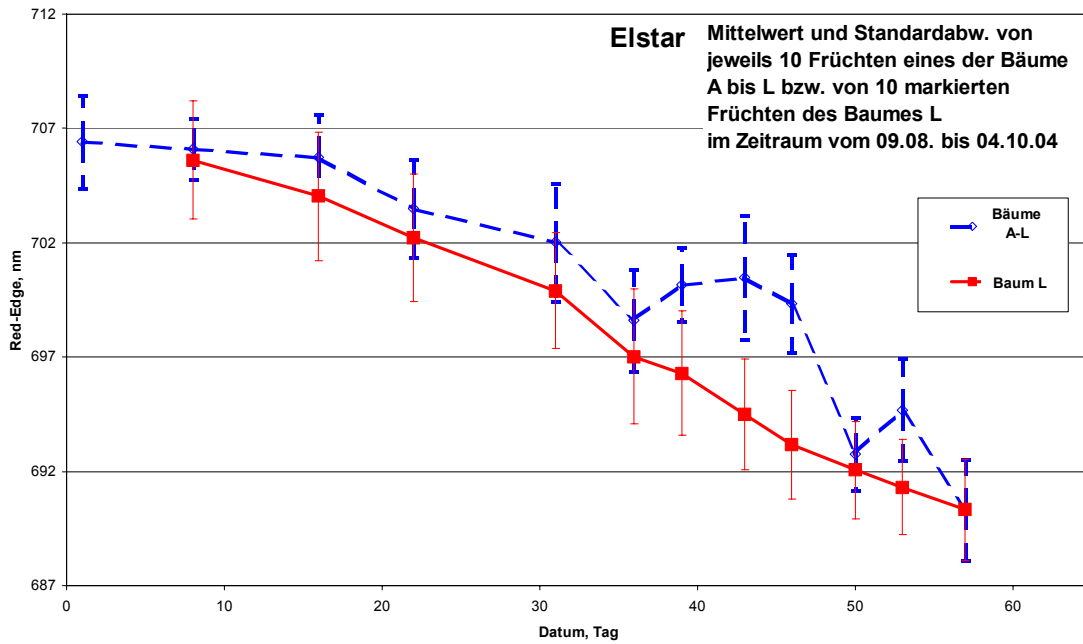


Bild 5: Verlauf des Red-edge Index im Mittel über zehn Früchte ('Elstar', 2003): die ausgezogene Linie zeigt den Verlauf bei wiederholter Messung von zehn identischen Früchten (ein und desselben Baumes); die gestrichelte Linie zeigt den Verlauf bei Messung von jeweils zehn anderen Früchten (unterschiedlicher Bäume)

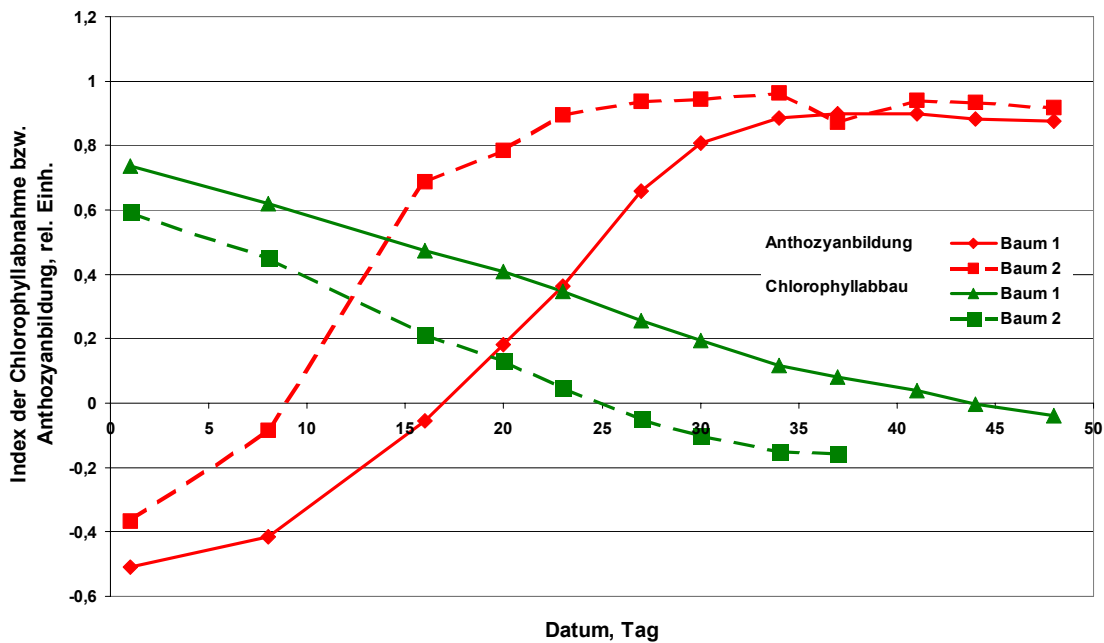


Bild 6: Verlauf der Indizes des Chlorophyllabbaus und der Anthozyanbildung im Mittel über je zehn Früchte von zwei Bäumen ('Elstar', 2003) mit unterschiedlich starkem Fruchtbehang: die ausgezogenen Linien zeigen die Verläufe bei Baum 1 (79 Früchte), die gestrichelten Linien zeigen die Verläufe bei Baum 2 (22 Früchte)

Die bisher aus den Jahren 2003 und 2004 vorliegenden spektralen Messdaten ließen erkennen, dass auch der Einfluss der unterschiedlichen Jahreswitterung auf den langfristigen Verlauf der Fruchtentwicklung an Hand des Red-edge Index nachgewiesen werden kann (Bild 7). Im extrem heißen und trockenen Jahr 2003 wurde bei 'Elstar' an Bäumen mit hohem und niedrigem Fruchtbehang ein deutlicher Entwicklungsvorsprung gegenüber dem eher durchschnittlichen Jahr 2004 an einem Baum mit mittlerem Fruchtbehang erreicht.

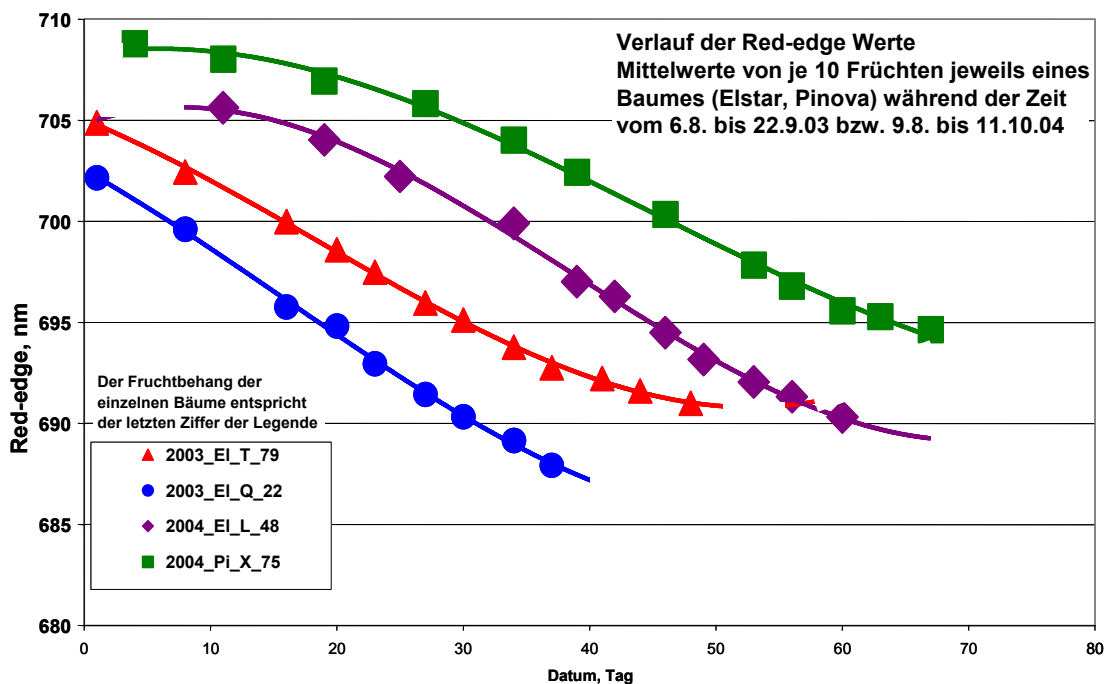


Bild 7: Verlauf der Red-edge Indizes im Mittel über zehn Früchte jeweils eines Baumes ('Elstar' und 'Pinova') in den Jahren 2003 und 2004; in der Legende sind Jahr, Kurzbezeichnung der Sorte und des Baumes sowie der Fruchtbehang angegeben

Ebenso wurde deutlich, dass mit der spektralen Messung der Einfluss der Sorte ermittelt werden kann. Früchte der Sorte 'Pinova' waren in ihrer Entwicklung erwartungsgemäß langsamer als 'Elstar' (Bild 7).

4. Schlussfolgerungen

Spektraloptische Messungen sind hervorragend geeignet, schnell und zerstörungsfrei eine Bestimmung der Fruchtentwicklung durchzuführen. Sie bieten den grundsätzlichen Vorteil

einer kontinuierlichen Überwachung der Fruchtentwicklung direkt am Baum. Als sensitive Indizes zur Bewertung des mit fortschreitender Fruchtentwicklung stattfindenden Rückgangs des Chlorophyllgehalts können der Red-edge Index und der Index der Chlorophyllabnahme genutzt werden. Bei Bestimmung auf Basis der Messung der partiellen Lichttransmission bei Apfel sind beide Indizes sehr eng miteinander korreliert. Die Ausprägung der Deckfarbe lässt sich mit Hilfe des Index der Anthozyanbildung sensitiv beschreiben. Die hohe Variabilität der Indexwerte der einzelnen Früchte ist von verschiedenen Faktoren abhängig. Insbesondere die Dichte des Fruchtbehangs, die Jahreswitterung und die Sorte zeigen eindeutige Zusammenhänge, während die Fruchtposition am Baum zumindest bei lichter Baumkrone keinen eindeutigen Einfluss zu besitzen scheint. Zur Bestimmung der Pflückreife ist der typisch sigmoide Verlauf des Chlorophyllabbau nutzbar, für Prognosen sind jedoch noch geeignete Modelle zu entwickeln. Dabei sind neben regionalen Unterschieden auch Einflüsse durch nicht optimale Stickstoffdüngung zu berücksichtigen. Der Chlorophyllabbau kann gegenüber der physiologischen Reife durch N-Überschuss verzögert, durch N-Mangel jedoch beschleunigt erfolgen. Auch sind Einflüsse durch andere Mineralstoffe und Mikroklima zu beachten. Deshalb sind für die Beurteilung der physiologischen Pflückreife stets mehrere voneinander unabhängige Reifekriterien zu empfehlen.

5. Literatur

- HEROLD B, TRUPPEL I, ZUDE M, GEYER M (2004)** Spektrale Signatur und Qualität von Äpfeln während der Fruchtentwicklung am Baum. Bornimer Agrartechnische Berichte 37: 144-152
- HÖHN E, DÄTWYLER D, GASSER F, JAMPEN M (1999)** Streifindex und optimaler Pflückzeitpunkt von Tafelkernobst. Schweiz. Zt. Obst-Weinbau 18: 443–446
- KRAFT M, BRANDES F, BEHRENS T, WIESLER F (2000)** Reflexionsoptische Bestimmung des Stickstoffversorgungsgrades von Rapsbeständen. Bornimer Agrartechnische Berichte 25: 91-100
- LICHTENTHALER H K, GITELSON A, LANG M (1996)** Non-destructive determination of chlorophyll content of leaves and an aurea mutant of tobacco by reflectance measurements. J. Plant Physiol., 148: 483-493
- MERZLYAK MN, SOLOVCHENKO AE, GITELSON AA (2003)** Reflectance spectral features and non-destructive estimation of chlorophyll, carotenoid and anthocyanin content in apple fruit. Postharvest Biology and Technology 27: 197-211
- OSTERLOH A (Hrsg.) (1980)** Obstlagerung. 1. Aufl. VEB Deutscher Landwirtschaftsverlag Berlin
- ROHRBACH A, ZUDE M, TRUPPEL I, HEROLD B (2004)** Spektralfotometrische Überwachung der Pflückreife von Äpfeln. Landtechnik 59, 2: 98-99
- SARANWONG S, SORNSRIVICHAI J, KAWANO S (2003)** On-tree evaluation of harvesting quality of mango fruit using a hand-held NIR instrument. J. Near Infrared Spectroscopy, 11: 283-293

-
- TRUPPEL I (2003)** Tragbares funkgekoppeltes Minispektrometer. Bornimer Agrartechnische Berichte 34: 56-69
- YOM DIN G, SAKS Y, KIM M (1998)** Prediction of Apple Quality Distribution at Harvest. Acta Hort. 476: 361-366
- ZUDE-SASSE M, TRUPPEL I, HEROLD B (2002)** An approach to non-destructive apple fruit chlorophyll determination. Postharvest Biology and Technology, 25: 123-133
- ZUDE M (2003)** Comparison of indices and multivariate models to non-destructively predict the fruit chlorophyll by means of visible spectrometry in apples. Analytica Chimica Acta 481: 119-126

FILLED Videodaten basierte Füllstandserkennung für landwirtschaftliche Schüttgüter

FILLED A video data based fill-level detection for agricultural bulkfreight

Fabian Graefe¹, Walter Schumacher¹, Raul Queiroz Feitosa², Diogo Menezes Duarte²

¹ TU Braunschweig, Inst. für Regelungstechnik, Hans-Sommer-Str. 66, 38106 Braunschweig

² Catholic University of Rio de Janeiro, Department of electrical engineering

E-Mail: f.graefe@tu-bs.de

Zusammenfassung: Für die Automatisierung des Überladeprozesses zweier in Bewegung befindlicher Fahrzeuge sind zwei Informationen notwendig. Einerseits muss die relative Position der Fahrzeuge zueinander bekannt sein. Andererseits ist es wichtig, den Beladungspunkt auf der Ladefläche des Transportfahrzeuges zu kennen. Um die Transportkapazität optimal auszunutzen, ist es notwendig den Beladungspunkt während der Beladung zu variieren. Um eine optimale Auslastung der vorhandenen Transportkapazität zu erzielen, ist es sinnvoll den Beladungspunkt auf die Stellen zu richten, an denen noch keine vollständige Befüllung erreicht wurde. Hierfür ist es notwendig, die Verteilung des Ladegutes im Laderaum zu messen. In diesem Umfeld entwickelt das Institut für Regelungstechnik der technischen Universität in Braunschweig das System FILLED zur Videodaten basierten Füllstandserkennung.

Deskriptoren: Füllstandserkennung, Bildverarbeitung, Stereovision, Überladeprozess, automatisches Überladen

Summary: *For automation of a continuous overloading process between two vehicles in motion, two information are essential. On the one hand there is the relative position between the vehicles to be known. On the other hand the loading point within the load space of the transport vehicle has to be determined. Often only a non optimal usage of the transport capacity is obtained without moving the overload swivel. In order to optimize the filling by moving load point, the distribution of the freight within the load space has to be measured during the overload process. In this article the Institut für Regelungstechnik of the Technische Universität in Braunschweig introduces the system FILLED for video data based fill level detection of agricultural bulk freight such as chaffed corn or grass.*

Keywords: *machine vision, fill level detection, stereo vision, overload process, automatic overloading.*

1. Einleitung

In der Landwirtschaft ist ein Trend zu immer stärkeren und größeren Erntemaschinen zu erkennen. Dies ermöglicht immer größere Erntegeschwindigkeiten. Mit diesem Anstieg der Erntegeschwindigkeit und umgesetzten Tonnage steigt gleichermaßen die Belastung für die Fahrer der Erntemaschinen. In diesem Umfeld wird seit zwei Jahren an der Technischen Universität in Braunschweig in einer Kooperation des Instituts für Landmaschinen- und Fluidtechnik mit dem Institut für Regelungstechnik das System RELATIV zur Automatisierung des Überladevorgangs eines selbstfahrenden Feldhäckslers entwickelt. Mit dem Ziel, die Fahrer einer Erntekombination bestehend aus einem selbstfahrenden Feldhäckslers und einer Transporteinheit zu entlasten, soll das Assistenzsystem RELATIV automatisch den Überladepunkt im Bereich der Ladefläche positionieren. Die wichtigsten Größen für die automatische Steuerung des Auswurfkrümmers sind die relative Position der beteiligten Fahrzeuge zueinander sowie der Beladungspunkt innerhalb der Ladefläche.



Bild 1: Selbstfahrender Feldhäcksler

Für die Bestimmung des optimalen Beladungspunktes ist es notwendig; die Verteilung des Erntegutes auf der Ladefläche zu kennen. In diesem Zusammenhang wird am Institut für Regelungstechnik das System FILLED zur Füllstandserkennung entwickelt. Mit Hilfe einer Stereovisionsanalyse wird der Beladungszustand auf Basis eines dreidimensionalen Modells der Ladegutoberfläche ermittelt. Somit können gerade die Stellen, an denen eine vollständige Auslastung des Transportmittels noch nicht erreicht wurde, ermittelt werden. Durch gezieltes Befüllen dieser Regionen ist es möglich, die Auslastung des Transportmittels zu optimieren. Handelsübliche Messsysteme zur Füllstandserkennung sind im Allgemeinen an das Transportmittel gebunden. Eine Modifikation des Transportsystems wird aus wirtschaftlichen Überlegungen abgelehnt.

Üblicherweise verteilt sich das Erntegut nicht gleichmäßig im Laderaum. Somit sind alle Sensoren, die lediglich eine punktuelle Information über den Beladungszustand liefern, für diese Anwendung ungeeignet. Im Test zeigte sich, dass Ultraschallsensoren aufgrund ihrer starken Abhängigkeit von der Luftströmungsgeschwindigkeit und der Lufttemperatur für diese Anwendung ungeeignet sind. Tests mit Radarsensoren ergaben, dass die Entfernungsmessungen zu organischen Materialien mit diesem System problematisch sind. Mit Laserzeilenscannern konnten aufgrund der hohen Partikelbelastung in der Luft keine verwertbaren Messwerte erzielt werden.

Im Gegensatz dazu bieten Kameras mit einer einzigen Aufnahme eine annähernd beliebig große Menge zweidimensional angeordneter Daten. Zudem ist durch die Wahl geeigneter Objektive der Messbereich von Kameras auf einfachste Weise einzustellen. Die zunehmende Leistung heutiger Rechnersysteme in Verbindung mit leistungsstarken mathematischen Methoden der Bildverarbeitung machen den Einsatz von Bildverarbeitungssystemen als Sensor praktikabel. Im Folgenden wird beschrieben, wie das System FILLED den Füllstand eines landwirtschaftlichen Transportmittels aus zwei Videobildern ermittelt. Der Abschnitt 2.1 beschäftigt sich mit der Bilddatenerfassung, in Abschnitt 2.2 wird die Segmentierung der Bilddaten beschrieben bevor Abschnitt 2.3 erläutert, wie mit Hilfe einer Stereovisionsanalyse ein dreidimensionales Modell der Schüttgutoberfläche erzeugt wird. Anschließend beschäftigt sich Abschnitt 2.4 mit der Softwaretopologie und beschreibt Maßnahmen zur Steigerung der Messgeschwindigkeit. In Abschnitt 3 wird abschließend auf den Prototyp des Systems FILLED und dessen Realisierung eingegangen.

2. Systembeschreibung

Das System FILLED misst unter Verwendung einer Stereovisionsanalyse den Füllstand einer landwirtschaftlichen Transporteinheit während der Beladung durch ein kontinuierlich überladendes Erntefahrzeug. Der Füllstand wird anhand eines dreidimensionalen Modells der Ladegutoberfläche bemessen. Hierbei wird die lokale Füllhöhe in einem Bereich in Bezug auf den oberen Rand des Laderaumes als Füllstand bewertet. FILLED besteht aus drei funktionalen Gruppen:

- Bildeinzug
- Segmentierung
- Stereovisionsanalyse

2.1 Bildeinzug

Das zu messende System ist während des Messprozesses in Bewegung. Ein Versatz der projizierten Bilder, hervorgerufen durch die Bewegung des Systems, würde die Stereovisionanalyse erschweren. Aus diesem Grund ist es notwendig, alle Bilder eines Schusses zeitgleich einzuziehen. Die meisten Stereovisionssysteme analysieren diejenigen Punkte, die von einem Objekt in den beteiligten optischen Systemen abgebildet werden. Die Koordinaten dieser korrelierenden Punkte werden mit Hilfe eines Vergleichs ihrer umgebenden Bildbereiche festgestellt. Dies setzt voraus, dass beide Bilder eine möglichst identische numerische Repräsentation der aufgenommenen Szene enthalten. Hierfür werden die beteiligten Kameras einer Kalibrierung unterzogen. Die Kalibrierungsfunktion umfasst den Abgleich der Bildhistogramme sowie die Steuerung der Belichtungszeit und der Verstärkung des CCD-Chips.

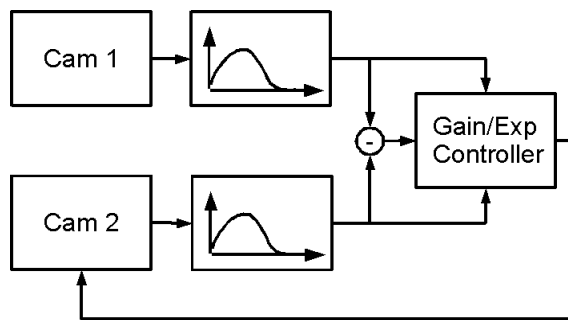


Bild 2: Kalibrieren der Kameras

Während der Initialisierung wird dieser Algorithmus so lange ausgeführt, bis eine minimale Differenz der Bildhistogramme vorliegt. Darüber hinaus wird das Kamerasystem geometrisch kalibriert. Hierfür wird eine Offline-Kalibrierung auf Basis eines Testmusters ausgeführt. Online-Kalibrierungsalgorithmen sind denkbar, konnten aber nicht erfolgreich getestet werden. Es ist in jedem Fall ratsam, in regelmäßigen Abständen die Kameras erneut zu kalibrieren.

2.2 Segmentierung

In diesem Schritt werden diejenigen Bildpunkte, die den Bereich des Ladegutes repräsentieren, identifiziert. Die Segmentierung wird in zwei Schritten durchgeführt. In einem ersten Schritt werden die Bildbereiche, die den Anhänger zeigen, vom Hintergrund getrennt. Im zweiten Schritt werden aus dem verbleibenden Bild die Bereiche, die das Ladegut zeigen, extrahiert.

Um die Erkennung der Ränder des Laderaumes zu vereinfachen, wurden diese rot markiert. Somit ist es möglich mit einer einfachen Farbfilterung die Bildbereiche, die den Rand des Laderaumes zeigen, zu identifizieren. Wir bezeichnen ein Pixel an der Stelle x, y des Bildes mit $P(x, y)$. Entsprechend benennen wir ein Pixel an der Stelle x, y in den jeweiligen Farblayer des Bildes mit:

$P_R(x, y)$ für den Rot-Layer, $P_G(x, y)$ für den Grün-Layer und $P_B(x, y)$ für den Blau-Layer. Das gefilterte Bild ergibt sich dann nach:

$$P_{fl}(x, y) = \begin{cases} 1 & T_G > \frac{P_R(x, y)}{P_G(x, y)} \wedge T_B > \frac{P_R(x, y)}{P_B(x, y)} \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad \text{G 1}$$

Der verbleibende Datensatz wird mit einer Canny-Edge-Detection weiter verarbeitet. Mit einer De-Hough-Analyse werden nun geometrische Primitive aus dem verbleibenden Bitmap extrahiert. Das Ergebnis der De-Hough-Analyse ist eine Geradenschar in der Ebene. Im Allgemeinen haben die Transportfahrzeuge einen Laderaum mit annähernd rechteckigem Grundriss. Nach Kompensation der Verzerrung, die aufgrund des Blickwinkels der Kameras auftreten, wird dann das geometrische Modell eines Rechteckes auf die gefundenen Geraden angewendet. Dazu werden die detektierten Geraden auf die Strecken, die von den roten Rändern des Anhängers überlagert werden, reduziert. Nach der Identifikation des Rechtecks, das die Ränder des Laderaumes repräsentiert, wird mit Hilfe einfacher geometrischer Algorithmen der Laderaum als Bildbereich, der durch ein Polygon eingeschlossen wird, extrahiert. Um das Ladegut aus dem verbleibenden Bild zu extrahieren, werden die örtlichen Frequenzspektren der Texturen untersucht. Hierfür wird in der Umgebung jedes Pixels $P(x, y)$ eine zweidimensionale Fouriertransformation berechnet. Ein Fourierkoeffizient des transformierten Bildbereiches sei $F(u, v)$. Es werden alle Pixel unterdrückt, die in einem Frequenzbereich ΔF einen mittleren Fourierkoeffizienten \bar{F}^* aufweisen, der kleiner ist als der gegebene Schwellwert T_F . Durch Überlagerung des resultierenden Bitmaps mit dem Eingabedatensatz erhalten wir im verbleibenden Bild den Bereich, der den Ladeguthaufen zeigt.

$$\Delta F : \{F(u, v) \in r_{F, \min} < r_F < r_{F, \max}\} \quad \text{G 2}$$

$$r_F = \sqrt{(u^2 + v^2)} \quad \text{G 3}$$

$$\bar{F}^* = \frac{1}{n} \sum \Delta F \quad \text{G 4}$$

$$P_{hp}(x, y) = \begin{cases} 1 & T_F < \bar{F}^* \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad \text{G 5}$$

2.3 Stereovision

Mit dem Ziel ein dreidimensionales Modell der Ladegutoberfläche zu rekonstruieren, wird nun eine Stereovisionsanalyse auf diejenigen Bildbereiche, die das Ladegut zeigen, angewendet. Der Stereovisionsalgorithmus kann in drei Schritte unterteilt werden:

- Bildvorverarbeitung
- Point Matching (finden korrelierender Punkte)
- Rekonstruktion der Objektpunkte im Raum

2.3.1 Bildvorverarbeitung

Zunächst wird das RGB-Farbbild in ein Graustufenbild konvertiert. Um im gesamten Bild annähernd konstante Kontrastverhältnisse zu erzielen, wird im Folgenden ein Algorithmus zur Kompensation ungleichförmiger Beleuchtung ausgeführt. In Bild 3 wird deutlich, dass die Bereiche in der Nähe der Ecken des Anhängers durch Schatteneffekte abgedunkelt werden. Hingegen sind die Bereiche in der Mitte des Laderaums, besonders die Spitze des Ladeguthaufen, durch gute Ausleuchtung gekennzeichnet.



Bild 3: Auszuwertendes Bild

Der Algorithmus, um diese Effekte zu unterdrücken, nutzt die Tatsache, dass das Frequenzspektrum der Textur des Ladegutes durch hohe Frequenzen gekennzeichnet ist. Die Beleuchtungsvarianzen können hingegen als niederfrequente Störung betrachtet werden. Durch Anwendung eines Gauß-Hochpass-Filters können diese Effekte unterdrückt werden. Das resultierende Bild berechnet sich nach:

$$f_{hp} = h_{ghp} * f_{in} \quad \text{G 6}$$

Hierbei bezeichnet f_{hp} den Ergebnisdatensatz, h_{ghp} den Gaußkernel, f_{in} den Eingabedatensatz und $*$ den Faltungsoperator. Der Ergebnisdatensatz ist eine Matrix, deren Mittelwert gleich NULL ist. Damit enthält diese Matrix sowohl negative als auch positive Werte. Der Wert des örtlichen Kontrasts f_{ic} wird nun durch Anwendung eines linearen Tiefpassfilters auf den Absolutwert $|f_{hp}|$ berechnet. Der Wert des örtlichen Kontrasts ergibt sich nach:

$$f_{hc} = h_{glp} * |f_{hp}| \quad \text{G 7}$$

$$f_{hc} = \frac{h_{glp}}{f_{ic}} \quad \text{G 8}$$

Um eine Division durch Null zu verhindern, wird diese Operation ausschließlich auf Werte $f_{ic} > 0$ angewandt. An dieser Stelle sei erwähnt, dass die Gleichungen 5 und 6 unter Umständen durch eine Fouriertransformation schneller bearbeitet werden können. Diese Entscheidung ist in Abhängigkeit der verwendeten Kernelgrößen zu treffen.

2.3.2 Finden korrelierender Punkte

Der zweite Schritt des Stereovisionsalgorithmus ist die Lösung des Korrelationsproblems. Hierbei werden diejenigen Punkte in den beiden Bildern gesucht, die jeweils von einem Objekt in den beiden optischen Systemen abgebildet werden. Mit Hilfe dieser korrelierenden Punkte werden in einem nächsten Schritt die zugehörigen Objektpunkte rekonstruiert. Hierfür werden zunächst im linken Bild diejenigen Punkte ausgewählt, die aufgrund des Informationsgehaltes ihrer Umgebung geeignet sind. Mit einer Schrittweitensteuerung wird sichergestellt, dass die Punkte möglichst gleichmäßig über die Region of Interest verteilt sind. Diese ausgewählten Punkte werden in der $3 \times N$ -Matrix P_L gespeichert. Jede Spalte dieser Matrix enthält die Koordinaten der gewählten Punkte in homogenen Koordinaten $[x_{Li} \ y_{Li} \ 1]^T$. Die Kameras des Stereosystems sind so angeordnet, dass der Basisvektor (dies ist der Abstand der optischen Zentren zueinander) viel kleiner ist als der Abstand zum projizierten Objekt. Unter dieser Voraussetzung bietet es sich an, die korrelierenden Punkte im rechten Bild mit Hilfe der Korrelationsfunktion zu suchen. Hier sei \vec{w}_{Li} (bzw. \vec{w}_{Rj}) der Vektor des zu untersuchenden Bereiches des linken (bzw. rechten) Bildes mit der Größe $(2n+1) \times (2n+1)$. Es sei der Punkt $P_{Li} = [x_{Li}, y_{Li}]$ (bzw. $P_{Re} = [x_{Re}, y_{Re}]$) das Zentrum dieses Bereiches im linken Bild (bzw. rechten Bild) an der Stelle x, y reihenweise dargestellt. So kann das Maß für die Übereinstimmung der Bildbereiche durch $c(P_{Li}, P_{Rj}) = \vec{w}_{Li} \cdot \vec{w}_{Rj}$

berechnet werden. Hierbei bezeichnet „ \bullet “ das interne Produkt. Der am meisten korrelierende Punkt P_{Ri}^* zu P_{Li} im rechten Bild wird nach

$$P_{Ri}^* = \arg \max (\vec{w}_{Li} \bullet \vec{w}_{Rj}) P_{Li} \quad \text{G 9}$$

ausgewählt. Mit Hinsicht auf die Berechnungsdauer wird die Suche nach dem korrelierenden Punkt auf die Umgehung A_{Li} mit der Größe $(2m+1) \times (2m+1)$; $m > n$ des Punktes $[x_{Li}, y_{Li}]$ im rechten Bild beschränkt. Eine weitere Reduzierung der Rechenzeit kann durch Berücksichtigung der Einschränkungen, die sich aus den Bedingungen der epipolaren Geometrie ergeben, erzielt werden. Mit einem kalibrierten Kamerasystem kann die Fundamentalmatrix des epipolaren Systems mit

$$\underline{\underline{E}} = \underline{\underline{R}} \underline{\underline{S}} \quad \text{G 10}$$

$$\underline{\underline{F}} = \underline{\underline{M}}_R^T \underline{\underline{E}} \underline{\underline{M}}_L^{-1} \quad \text{G 11}$$

berechnet werden. Hierbei bezeichnen $\underline{\underline{M}}_L$ und $\underline{\underline{M}}_R$ die Matrizen der intrinsischen Parameter der linken und rechten Kamera. $\underline{\underline{R}}$ bezeichnet die Rotationsmatrix der rechten Kamera bezogen auf die linke Kamera. $\underline{\underline{S}}$ ist die schiefsymmetrische Matrix, die den translativen Versatz der optischen Zentren zueinander berücksichtigt. Die Koeffizienten der epipolaren Linie mit Bezug auf P_{Li} berechnen sich nach

$$\vec{L} = \underline{\underline{F}}^T \vec{P}_L^{-1} \quad \text{G 12}$$

Hierbei ist \vec{P}_L^{-1} der Vektor, der den Punkt P_{Li} in homogenen Koordinaten repräsentiert. Somit ist die Suche nach dem korrelierenden Punkt auf ein eindimensionales Problem reduziert. Dies führt nicht nur zu einer Reduzierung der Berechnungsdauer, sondern ermöglicht auch eine einfache Identifikation falsch korrelierter Punkte.

2.3.3 Rekonstruktion

In diesem Abschnitt werden mit Hilfe der gefundenen korrelierenden Punkte P_{Li} und P_{Rj} die Objektpunkte P_O im Raum rekonstruiert. Somit wird ein dreidimensionales Modell des Bildbereichs gebildet. Die Koordinaten eines Objektpunktes im Raum werden mit X, Y, Z bezeichnet.

$$P_O = [X \ Y \ Z]^T \quad \text{G 13}$$

Um einen Punkt P_{O_i} im Raum zu rekonstruieren, wird eine erweiterte Triangulation ausgeführt. Der Vektor, der die optischen Zentren der Kameras verbindet sei \vec{V}_0 . Die Vektoren der Verbindungslinien von den optischen Zentren der Kameras zu einem Objektpunkt werden als \vec{V}_{Li} und \vec{V}_{Ri} für das linke und rechte optische System bezeichnet. Im Idealfall schneiden sich die durch die Vektoren \vec{V}_{Li} und \vec{V}_{Ri} definierten Strahlen. Im Allgemeinen ist dies aufgrund von Diskretisierungs- und Korrelationsfehlern nicht der Fall. Eine optimale Näherungslösung stellt nun der Mittelpunkt des kürzesten Vektors dar, der beide Geraden schneidet. Dieser Vektor \vec{V}_C steht senkrecht auf den Vektoren \vec{V}_{Li} sowie \vec{V}_{Ri} und kann durch

$$\vec{V}_C = \frac{\vec{V}_{Li} \times \vec{V}_{Ri}}{\left| \vec{V}_{Li} \times \vec{V}_{Ri} \right|} \quad \text{G 14}$$

berechnet werden.

Die angenäherte Lösung für P_O kann durch Lösen des Problems

$$\vec{0} = \vec{V}_0 + \lambda \vec{V}_{Li} + \mu \vec{V}_{Ri} + \eta \vec{V}_C \quad \text{G 15}$$

gefunden werden.

Aus Gleichung 15 ergeben sich zwei gleichwertige Lösungen für den Vektor zum rekonstruierten Punkt P_O :

$$\vec{V}_{POi} = \lambda \vec{V}_{Li} + \frac{\eta}{2} \vec{V}_C \quad \text{G 16}$$

$$\vec{V}_{POi} = \vec{V}_0 + \mu \vec{V}_{Ri} - \frac{\eta}{2} \vec{V}_C \quad \text{G 17}$$

2.4 Betrachtung der Messgeschwindigkeit

Ein wesentliches Problem der meisten Bildverarbeitungssysteme ist die große zu bearbeitende Datenmenge. Hier ist ein Kompromiss zwischen einer hohen Update-Rate und der Messgenauigkeit zu finden. Die Verwendung hochauflösender Kameras ermöglicht im Allgemeinen eine hohe Genauigkeit der Messwerte. Zudem wird Informationsverlusten bei der Abbildung feiner Texturen entgegengewirkt. Die Leistung momentan verfügbarer Rechnersysteme begrenzt hier die Update-Rate des Messsystems. Verwendet man hingegen weniger hochauflösende Kameras kann aufgrund der reduzierten Datenmenge die Messgeschwindigkeit erhöht werden. Dem entgegen stehen mögliche Probleme durch die

ebenfalls reduzierte Messgenauigkeit. Darüber hinaus treten schon bei geringer Entfernung zum optischen System Informationsverluste bei der Abbildung hochfrequenter Texturen auf. Um sowohl dem einen als auch dem anderen Problem entgegenzuwirken, werden die Bilddaten durch Segmentierung frühzeitig auf das benötigte Maß reduziert. Im Rahmen der De-Hough-Analyse wird die Menge der zu verarbeitenden Daten durch die Steuerung der Winkel-Scanbereiche begrenzt. An dieser Stelle wird die Bildauswertung in zwei Modi gesteuert. Einerseits wird eine Master-Slave-Strategie angewendet. Hierbei werden die bereits gewonnenen Informationen innerhalb des optischen System ausgetauscht. Andererseits werden die Informationen bereits ausgewerteter Datensätze für die Vorsteuerung der Auswertungsalgorithmen verwendet. Darüber hinaus werden ausschließlich lineare Filtermethoden angewendet.

Die Kameras sind so angeordnet, dass die Bildebenen als koplanar angesehen werden können. Unter dieser Voraussetzung kann angenommen werden, dass die Geometrie des betrachteten Objektes in beiden Kameras mit der gleichen Verzerrung abgebildet wird. Dies wiederum ermöglicht die Formulierung weiterer Einschränkungen, die für eine weitere Reduzierung der Rechenzeit genutzt werden können. Mit den Ergebnissen der Geometrieanalyse des Mastersystems ist es möglich, die Geradendetektion des Slavesystems auf die Bereiche in der unmittelbaren Umgebung der bereits gefundenen Geraden zu beschränken. Hieraus ergeben sich zwei Möglichkeiten, die Leistungsfähigkeit des Systems zu erhöhen. Einerseits kann bei einer konstanten Anzahl von Diskretisierungsschritten die Genauigkeit der Winkelauflösung erhöht werden. Die benötigte Rechenzeit wird hierdurch nicht beeinflusst. Andererseits bietet sich die Möglichkeit, bei gleicher Diskretisierungsschrittweite die Anzahl der Diskretisierungsschritte zu reduzieren. Dies hat bei gleichbleibender Genauigkeit eine Reduzierung der Berechnungsdauer zur Folge. Unterschiedliche Winkelauflösungen der De-Hough-Transformation innerhalb eines Datensatzes sind wenig sinnvoll. Im Rahmen der Master-Slave-Strategie wird deshalb die Diskretisierungsschrittweite der De-Hough-Transformation des Slave-Frames konstant gehalten. Darüber hinaus wird unter Verwendung der Ergebnisse der Geometrieanalyse die Größe des eingezogenen Bildbereiches gesteuert. Dies reduziert nicht nur die Größe der zu filternden Datensätze sondern auch die Menge der zur De-Hough-Analyse markierten Punkte.

Im Weiteren wird davon ausgegangen, dass die Relativbewegung der Fahrzeuge zu einander in Bezug auf die Update-Rate klein ist. Man kann also davon ausgehen, dass sich die Region of Interest von einem Bild zum nächsten nur geringfügig verändert. Darauf auf-

bauend können sowohl die interessierenden Bildbereiche als auch die Scanbereiche der De-Hough-Transformation für das jeweils nächste Bild vorgesteuert bzw. begrenzt werden. In diesem Fall ist es sinnvoll, die Genauigkeit der De-Hough-Analyse bei gleichbleibender Berechnungsdauer zu erhöhen.

3. Performance

Die ersten Versionen von FILLED wurden mit Videodaten getestet, die während der Maisernte 2004 aufgenommen wurden. Das Bild 3 zeigt eine Aufnahme, die aus einem solchen Videofilm extrahiert wurde. Im Weiteren wird das bisher implementierte und erprobte System beschrieben.

Als Bilderfassungssystem werden zwei Kameras vom Typ Pacific 9820 der Firma IDS (Imaging Development Systems) verwendet. Die Kameras verfügen über einen 3 BYTE RGB CCD Sensor. Der Sensor wird im Progressive-Scan-Verfahren abgetastet. Der 0.5“ Sensor hat eine Auflösung von 640 x 480 quadratischen Pixeln. Die Kameras sind mit Standard-Weitwinkelobjektiven ausgestattet, Die nominale Brennweite der Objektive beträgt $f = 4,8mm$. Die Kameras sind über eine Camera-Link-Verbindung jeweils an einen PCI-Framegrabber vom Typ Barracuda CL1 der Firma IDS angeschlossen. Die Framegrabber ermöglichen einen Software-Interrupt-getriggerten Bildeinzug.

Mit den Parametern $T_G = 1,5$ und $T_B = 1,2$ für die Farbfilter konnten stabile Ergebnisse auch bei variierender natürlicher Beleuchtung erzielt werden. Die De-Hough-Analyse wurde mit einer Winkelauflösung von $\Delta\varphi = \frac{1}{100}\pi$ ausgeführt. Der R-Vektor des De-Hough-Raumes wurde auf 255 diskrete Werte abgebildet. Gute Ergebnisse für die Lösung des Korrelations-Problems konnten mit einer Kernelgröße von 40 x 40 Punkten für h_{hp} erzielt werden. Die Region, in der nach den korrelierenden Punkten gesucht wurde, hatte eine Größe von 120 x 120 Punkten um den Referenzpunkt P_{Li} .

Die Anwendung wurde bereits teilweise in C/C++ implementiert und unter MS Windows 2000 ausgeführt. FILLED wird auf einem Standard-PC mit einem Intel Pentium 4 Prozessor mit einer Taktrate von 3 GHz betrieben.

Die Funktionen zur Segmentierung sind bereits auf dem Zielsystem implementiert. Für diese Funktionen kann bereits eine Update-Rate von $F_{upd} \geq 1Hz$ erreicht werden. Die Module der Stereovisionsanalyse wurden bisher in Matlab M-Code implementiert. Hier konnte eine Berechnungsdauer für einen Frame von weniger als 40 Sekunden festgestellt werden.

Mit dem vollständig implementierten Zielsystem soll eine Update-Rate von $F_{upd} \geq 0,1Hz$ erreicht werden.

4. Ausblick

Dieser Artikel stellt eine neue Möglichkeit vor, den Füllstand eines landwirtschaftlichen Transportfahrzeugs während der Beladung zu messen. Es ist denkbar, dass der Prototyp des Systems FILLED durch Parametrisierung so angepasst werden kann, dass eine Vielzahl anderer Schüttgüter auf beliebigen Transportmitteln damit vermessen werden können. Im weiteren sollen Shape From X Methoden untersucht werden, um die Oberfläche des Schüttgutes mit nur einer einzigen Kamera erfassen zu können. Um die Messgeschwindigkeit sowie die Genauigkeit der Messung zu steigern, wäre es denkbar, nutzerspezifische Hardware optimiert für Matrizenberechnung zu entwickeln und in das System einzubinden.

Dieses Projekt wurde aus Mitteln der Deutschen Forschungsgemeinschaft finanziert.

5. Referenzen

- CANNY J (1986)** A Computational Approach to Edge Detection. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol 8, No 6, Nov 1986
- FORSYTH DA, PONCE J (2003)** Computer Vision - A Modern Approach. ISBN 0-13-085198-1, Prentice Hall
- ORWANT J, HIETANIEMI J, MC DONALD J (1999)** Algorithmen mit Perl. ISBN 3-89721-141-6, 1. Auflage, April 2000
- SCHROEDER W, MARTIN K, LORENSEN B** VTK Toolkit 3rd Edition An Object-Oriented Approach To 3D Graphics. ISBN 1-930934-12-2
- TORR PHS, FITZGIBBON A (2004)** Invariant Fitting of Two View Geometry or "In Defiance of the eight point algorithm". IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 26(5), pages 648-651, 2004
- TRUCCO E, VERRI A (1998)** Introductory Techniques for 3-D Computer Vision. ISBN 0132611082, Prentice Hall (25. März 1998)

Dynamik von Wachstum – Quantitative Untersuchung räumlich-zeitlicher Prozesse mittels Bildsequenzanalyse

Dynamics of growth – quantitative analysis of spatio-temporal processes by image sequence analysis

Gilmer Frank, Scharr Hanno, Walter Achim und Schurr Ulrich
Institute for Phytosphere Research (ICG-III), Forschungszentrum Jülich, 52428 Jülich, Germany
E-mail: f.gilmer@fz-juelich.de

Kurzfassung: Wachstum verändert sich in charakteristischen Mustern während der Gewebeentwicklung und unter Stress. Die Basis der hier dargestellten quantitativen Auswertungen stellt der Strukturtensor dar. Dieser auf Ansatz des „optischen Flusses“ basierende Algorithmus eignet sich hervorragend, um Bewegungs- und Wachstumskartierungen mittels Analyse von Bildsequenzen durchzuführen. Angewendet wird **digital image sequence processing DISP** an Blättern und Wurzeln. Die Wachstumsanalyse kann mit veränderlichen Umweltparametern wie Licht, CO₂ oder Nährstoffangebot korreliert werden. Alternativ können über Farbsegmentierung die Blattflächen bestimmt werden

Keywords: Bildsequenzanalyse, Blattwachstum, Wurzelwachstum, Farbsegmentierung

Summary: *Growth varies in characteristic patterns with differentiation of plant tissues and stress. The quantitative analysis presented here are based on the so-called “structure tensor.” This approach used the idea of “optical flow” to map motion and growth in plant tissues. This **digital image sequence processing DISP** is shown for dicot leaf growth and root expansion. Growth analysis can be correlated with changing environmental parameters like radiation, carbon dioxide or nutrient availability. In addition total leaf area can be determined by color segmentation.*

Keywords: *image sequence analysis, leaf growth, root growth, color segmentation*

1. Einleitung

Wachstum ist ein zentraler Ertragsfaktor von Kulturpflanzen. Dies betrifft nicht nur das Wachstum des zu erntenden Pflanzenteils, sondern auch das Blatt- und Wurzelwachstum. Wachstum und die Differenzierung wachsender Gewebe schaffen die funktionellen und anatomischen Strukturen, über die Pflanzen Nährstoffe, Wasser, Kohlenstoff aber auch Schadstoffe und Pflanzenschutzmittel mit der Umwelt austauschen. Aufgrund des hohen Substanz- und Energiebedarfs bestimmen Wachstumsprozesse ganz wesentlich Ferntransport und Allokation von Substanzen in der Pflanze.

Wachstum zeichnet sich durch komplexe räumlich-zeitliche Heterogenität aus, so dass Punktmessungen zu einer bestimmten Zeit nur unzureichend Auskunft über die Wachstumsaktivität geben. Verschiedene pflanzliche Wachstumszonen lassen sich aufgrund ihrer räumlichen Organisation in linear, flächig oder im Volumen wachsend einteilen. Die räumlich-zeitliche Organisation von Wachstumszonen ist von großer praktischer Relevanz, beispielsweise für die Identifikation von Zielparametern für die Züchtung von Pflanzen oder die Optimierung der Ressourcen-Nutzung.

Die Bildanalyse hat sich zu einem wichtigen Hilfsmittel in der landwirtschaftlichen Praxis und Forschung entwickelt. In vielen klassischen Verfahren werden dabei relevante Informationen aus Einzelbildern gewonnen. Für derartige Anwendungen existieren eine Vielzahl von robusten und allgemein verfügbaren Algorithmen. Biologische Prozesse sind allerdings durch ihre räumlich-zeitliche Dynamik charakterisiert und lassen sich besser mit räumlich-zeitlich strukturierten Datensätzen von Bildsequenzen analysieren. Spezielle Algorithmen und Implementierungen sind notwendig, um quantitative Daten aus Bildsequenzen zu extrahieren (JÄHNE 1997). Diese bieten dann oft auch qualitativ bessere Daten, da das Signal-Rausch-Verhältnis über die Einbeziehung der Informationen aus einer Bildfolge deutlich gesteigert werden kann.

Grundlage quantitativer Bildsequenzanalyse ist neben der Algorithmik der hierauf optimierte Aufbau zur Erfassung geeigneter Datensätze. Durch die schnelle technische Entwicklung stehen inzwischen Kameras zur Verfügung, die bei physikalisch korrekter Verwendung wesentliche Beiträge zur Untersuchung von Pflanzen liefern können.

2. Wachstums- und Bewegungsdetektion in Bildsequenzen – optischer Fluss und Aufbau

Zeitrafferaufnahmen sind seit langem ein bewährtes Hilfsmittel, um Wachstum und Bewegung von Pflanzen zu visualisieren. Bildserien werden auch schon lange zur Identifikation von räumlichen und zeitlichen Mustern der Wachstumsprozesse verwendet. Allerdings waren die Ansätze hierzu im wesentlichen auf die Identifikation der Verschiebung von einigen künstlichen oder natürlichen Markierungen auf den Oberflächen angewiesen. Bei flächig wachsenden Organen wie z. B. dikotylen Blättern wurden zumeist ohne Rücksicht auf die tatsächlichen Wachstumsrichtungen rechtwinklige Punktgitter aufgetragen und deren Verziehung und Expansion mit der Zeit bestimmt. Dies ist ein sehr zeitaufwendiges und arbeitsintensives Verfahren. Alternative Verfahren wie biometrische Verfahren oder Messungen mit linearen Weggebern bieten zumeist keine oder nur sehr schlechte räumliche Auflösung (SCHURR 1997).

Der Ansatz des „optischen Flusses“ (HORN & SCHUNK 1981) ist ein alternativer Weg, der kürzlich durch die Implementierung des sogenannten Strukturensors in Verfahren der Wurzel- und Blattwachstumsanalyse eingeführt wurde (SCHMUNDT *et al.* 1997, WALTER *et al.* 2002). Hiermit können Karten der Expansionsaktivität mit hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung gleichzeitig erhalten werden. Grundlage des Basisalgorithmus ist die sogenannte „brightness constraint equation“ (BCE, Formel 1)

$$\frac{dg}{dt} = v_x \frac{\partial g}{\partial x} + v_y \frac{\partial g}{\partial y} + \frac{\partial g}{\partial t} = 0 \quad (\text{Formel 1})$$

Dieses einfache Modell geht davon aus, dass alle Veränderungen der Grauwerte im Bild auf der Basis von Bewegung geschehen (HAUßECKER & SPIES 1999). Anschaulich lässt sich die Umsetzung der BCE anhand der Grauwertstrukturen beschreiben, die in einem Bildstapel entstehen, wenn sich Objekte im Raum bewegen (Bild 1A). Implementierte Erweiterungen des Strukturensors sind in der Lage, Wachstum direkt quantitativ zu bestimmen.

Während der Aufnahme der Bildsequenz darf sich das Objekt (hier das Blatt) nur aufgrund des Wachstums in der Blattebene verschieben. Vertikale Bewegungen über den Aufbau müssen verhindert werden. Zudem werden die Aufnahmen im nahen Infrarot in einer nicht physiologisch aktiven Wellenlänge aufgenommen, um die Physiologie der Pflanze durch Belichtung in der Dunkelphase nicht zu verändern (Bild 1B).

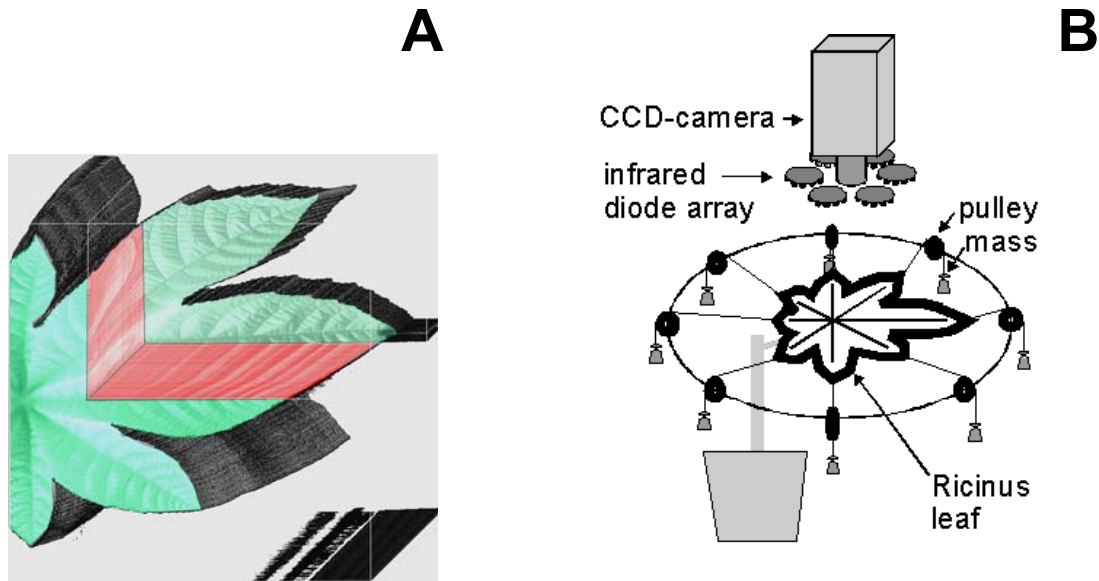


Bild 1: A: x-y-t-Darstellung einer Bildsequenz eines wachsenden Ricinus-Blattes. Im oberen rechten Teil wurde ein Würfel virtuell entfernt. Hierdurch werden die Grauwertstrukturen in den verschiedenen Schnittflächen (rot eingefärbt) freigelegt, die durch die Wachstumsbewegungen relativ zur fixierten Blattbasis entstehen
 B: Aufbau zur Akquisition von Bildserien von Blättern für die quantitative Kartierung von Blattwachstum

3. Wachstumsdynamik von dikotylen Blättern

Mit Hilfe des bildsequenz-analytischen Verfahrens können Karten der Verteilung von Expansionswachstum mit hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung erstellt werden (SCHURR *et al.* 2000). Die absolute Auflösung hängt von den optischen Eigenschaften des Aufbaus und der Geschwindigkeit der Wachstumsbewegung ab (JÄHNE 1997). Typische Werte bei der Analyse der kompletten Wachstumszone eines Tabakblattes liegen bei einer räumlichen Auflösung von 1 mm bei einer Analysenfrequenz von 1 Karte pro 10 Minuten. Die Software bietet in einem „Display“-Modul die Möglichkeit, die Verteilung der Wachstumsraten farblich kodiert darzustellen (Bild 2A). Ergebnisse zeigen, dass Blätter einen starken Tagesgang des Wachstums aufweisen, welcher bei verschiedenen Arten unterschiedliche tageszeitliche Maxima besitzt. Das Wachstum betrifft die gesamte zuwachsende Blattfläche. Es existiert jedoch häufig ein Basis-Spitze-Gradient des Blattwachstums (WALTER & SCHURR 2000, Bild 2B). Die Determinierung von zeitlichen Wachstumsmaxima und -minima ermöglicht die molekularbiologische Untersuchung des Wachstumsprozesses.

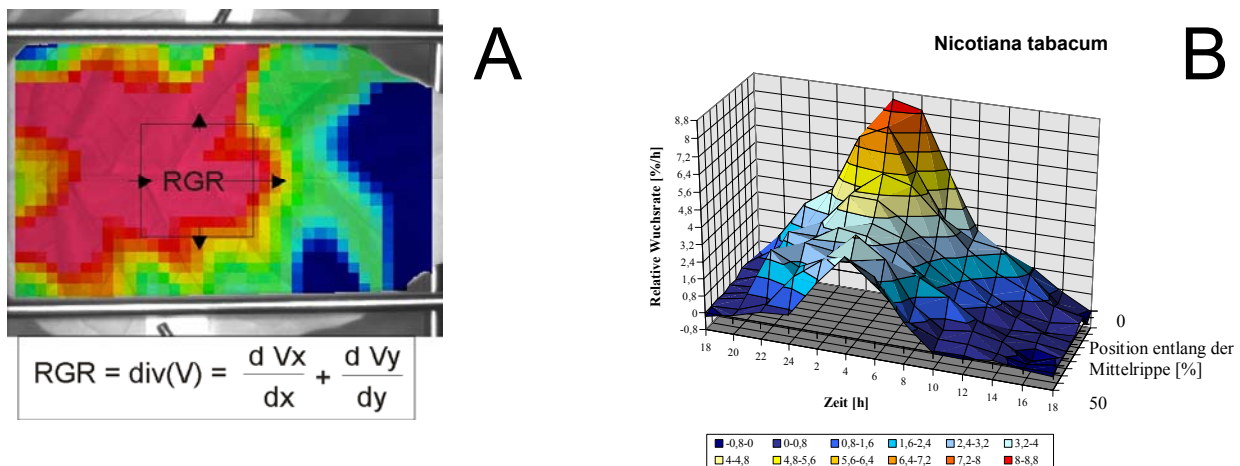


Bild 2: Kartierung der Dynamik der Blattexpansion mittels Bildsequenzanalyse.

(A): Momentaufnahme der Wachstumsverteilung eines Tabak-Blattes in Falschfarben-Kodierung (rot: 8 %/h, dunkelblau: 2 %/h);

(B): Tagesgang der Wachstumsverteilung entlang der Mittelrippe von Tabak. Gezeigt ist der Gradient der Wachstumsraten von der Blattbasis bis zu 50 % der Blattlänge während eines kompletten Tagesgangs. Die Dunkelperiode dauerte 12 h

4. Wachstumsdynamik von Wurzelspitzen

Die Implementierung des Strukturtensor-Algorithmus in ein Verfahren zur Kartierung von Wurzelwachstum erlaubt eine erhebliche Steigerung der räumlichen und zeitlichen Auflösung gegenüber früheren Messmethoden (WALTER *et al.* 2002). Das Verfahren folgt dabei analog der für das Blattwachstum beschriebenen Vorgehensweise (Bild 3A). Karten der Wachstumsverteilung über die gesamte Wachstumszone von *Zea mays* (Bild 3B) basieren dabei auf etwa 800 Pixel im Wurzelabbild, in denen die Geschwindigkeit bestimmt wurde, bei einer Bildaufnahmefrequenz von 1 Bild/Minute. Eine diurnale Rhythmik ist nicht feststellbar. Allerdings zeigen die Wurzeln unterschiedlicher Arten trotz verschiedener Durchmesser der Wurzelspitze eine vergleichbare relative Verteilung von Wachstumsmaxima und -minima entlang der Wurzelachse. Veränderungen in der Photosynthese im Spross wie auch in der Nährstoffversorgung der Wurzel führen zu sichtbaren Veränderungen der Wuchsgeschwindigkeiten der Wurzelspitze.

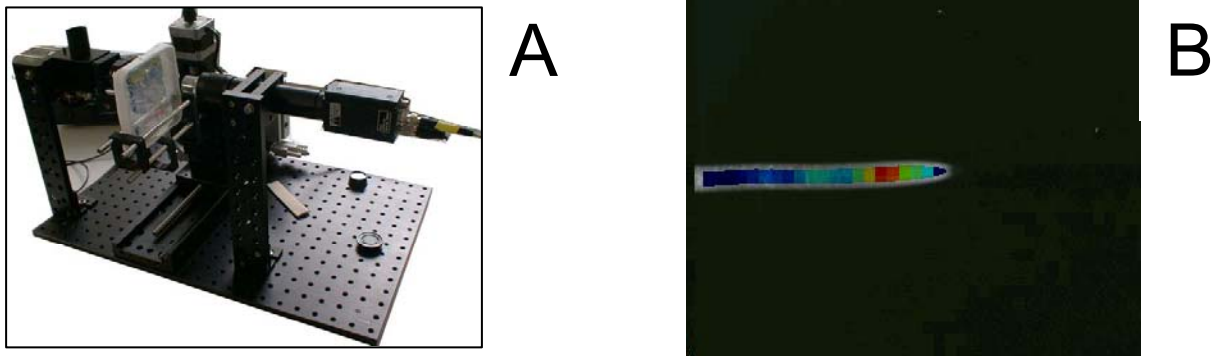


Bild 3: (A) Aufbau zur Erfassung von Bildsequenzen der Wurzel von *Arabidopsis thaliana*. Die Wurzeln wachsen oberflächlich auf einer Agarschicht und werden von einer CCD-Kamera (Sony XC75) im Wellenlängenbereich über 930 nm abgebildet. Die Szene wird über Infrarot-Dioden beleuchtet, um die Wurzeln unter Ausschluss von physiologisch relevantem Licht beobachten zu können
(B) Farbkodierte Wachstumskarte einer Wurzelspitze von *Zea mays*

5. Blattflächenbestimmung durch Farbsegmentierung

Alternativ zur DISP ermöglicht die Farbsegmentierung eine Blattflächenbestimmung bei einer hohen Anzahl von Einzelpflanzen in kurzer Zeit. Auf die orts aufgelöste Wachstumsbestimmung wird verzichtet. In einer Farbaufnahme der Einzelpflanze werden die Pixel im Farbbereich des Blattes erfasst; der Hintergrund wird entsprechend ausgespart. Aus dem Blattflächenzuwachs der Einzelpflanze über die Zeit lassen sich relative Wuchsraten kalkulieren. Pflanzen lassen sich durch diese zeitliche Wachstumsdynamik charakterisieren. Bei Pflanzen mit bekannter Dynamik können auch Wachstumsänderungen bei unterschiedlichen Behandlungen und Einflüssen untersucht werden.

6. Fazit

Bildsequenzen bieten interessante Möglichkeiten, räumlich-zeitliche Prozesse abzubilden und quantitativ auszuwerten. Auflösung und Qualität der quantitativen Auswertung werden erheblich gesteigert, wenn Algorithmen eingesetzt werden, die spezifisch für die quantitative Auswertung von Bildsequenzen entwickelt wurden. Im vorliegenden Beitrag wurde das Potential des sogenannten Strukturensors zur Erfassung von Bewegungen und Wachstum dargestellt. Hierdurch konnten neue Einblicke in die Steuerung von Wachstumsprozessen von Blatt und Wurzel gewonnen werden. Weiterhin wurde die Anwendungsmöglichkeit der farbsegmentierten Blattflächenbestimmung in einem Screening einer hohen Anzahl von Pflanzen dargestellt.

Die aufgezeigten Anwendungen zeigen exemplarisch, wie durch Kombination von speziellen Aufbauten, Spezialkameras und auf Bildsequenzen basierenden Algorithmen quantitativ relevante pflanzenbauliche Parameter und deren Dynamik erfasst werden können. Mit der Verfügbarkeit der Bildsequenzanalyse eröffnet sich ein neues Feld auch für die Anwendung in der Landwirtschaft.

7. Literaturverzeichnis

- HAUBECKER H, SPIES H (1999)** Motion. In: Handbook of Computer Vision and Applications, Vol. 2, Kap. 13, Academic Press
- HORN BKP, SCHUNK B (1981)** Determining optical flow. Artificial Intelligence 17, 185 – 204
- JÄHNE B (1997)** Digital image analysis. Springer Verlag, Heidelberg
- SCHMUNDT D, STITT MN, JÄHNE B, SCHURR U (1998)** Quantitative analysis of local growth rates of dicot leaves at high temporal and spatial resolution, using image sequence analysis. Plant Journal 16, 505-514
- SCHURR U (1997)** Growth Physiology: Approaches to a spatially and temporally varying problem. (eds H.-D. Behnke *et al.*), pp. 355-373. Springer Verlag, Berlin
- SCHURR U, HECKENBERGER U, HERDEL K, WALTER A, FEIL R (2000)** Leaf development in *Ricinus communis* during drought stress – dynamics of growth processes, of cellular structure and of sink-source-transition. Journal of Experimental Botany 51, 1515-1529
- WALTER A, SCHURR U (2000)** Spatial variability of leaf development, growth and function. In: Leaf Development and Canopy Growth (eds B.Marshall & J.Roberts), Sheffield Academic Press, Sheffield
- WALTER A, SPIES H, TERJUNG S, KÜSTERS R, KIRCHGEBNER N, SCHURR U (2002)** Spatio-temporal dynamics of expansion growth in roots: automatic quantification of diurnal course and temperature response by digital image sequence analysis. Journal of Experimental Botany 53, 689-698

Visualisierung von 3D-Messdaten

Visualisation of 3D measuring data

Andree Jacobs, Ingo Truppel

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

E-mail: ajacobs@atb-potsdam.de

Zusammenfassung: Am Leibniz-Institut für Agrartechnik Potsdam-Bornim (ATB) wurde ein miniaturisierter Messkörper zur Messung von Stoßbelastungen an Früchten entwickelt. Der im Inneren einer Frucht platzierte Messkörper misst auftretende Beschleunigungen dreidimensional. Zur Verarbeitung der erfassten Datenmengen und der räumlichen Veranschaulichung der darin enthaltenen Informationen wurde eine spezielle Softwarelösung entwickelt. Dazu sind aus der 3D-Computergrafik bekannte Modellansätze verwendet und für die spezielle Aufgabe der Datenprojektion auf die Oberfläche eines virtuellen Fruchtkörpers angepasst worden. Als Ergebnis entstand ein unmittelbar und ohne zusätzlichen Aufwand durch den Nutzer einsetzbares Programm zur Visualisierung der zeitlich und räumlich differenzierten Datenverteilung auf der Körperoberfläche.

Deskriptoren: 3D-Computergrafik, Datenvisualisierung

Summary: *A miniaturised sensor to acquire data on mechanical loads on fruit was developed at the Leibniz-Institute for Agricultural Engineering Bornim (ATB). The sensor is placed inside of a fruit and measures three-dimensional acceleration data. To process the data and for data visualisation, a special application software was developed. Common mathematical models for computer graphics were used for that purpose and supplemented by methods for data visualisation on the surface of virtual 3D models of fruit. The result was an easy to use software with the ability to show patterns of data distribution related to time and range.*

Keywords: *3D computer graphics, data visualisation*

1. Problemstellung

Zur Messung von mechanischen Stoßbelastungen an Früchten wurde am Institut für Agrartechnik Bornim ein miniaturisierter Messkörper (Bild 1) entwickelt, welcher im Inneren einer Frucht den zu untersuchenden Verarbeitungsprozess im Gutstrom durchläuft. Dieses Implantat misst die auftretenden Beschleunigungen gleichzeitig in drei Raumrichtungen.



Bild 1: Messkörper mit 3D-Beschleunigungssensoren im Fruchttinneren

Von Interesse sind bei der Datenauswertung nicht nur die absoluten Werte der resultierenden Beschleunigungen bzw. Stoßkräfte in Abhängigkeit von der Zeit, sondern auch deren Richtung und damit der genaue Ort des Einwirkens auf der Oberfläche der Frucht. Bei hohen Messraten von über drei kHz entstehen bereits nach wenigen Minuten Messzeit so große und komplexe Datenmengen, dass die darin enthaltenen Informationen über eine spezielle Softwarelösung sowohl verarbeitet als auch sinnvoll veranschaulicht werden müssen. Die räumliche Visualisierung dieser Daten unmittelbar nach deren Aufzeichnung ist als besonders geeignetes Hilfsmittel zum möglichst zeitnahen Verstehen und Bewerten notwendig.

2. Zielsetzung und Vorgaben

Als grundlegender Bestandteil der problembezogenen Softwarelösung soll ein angepasstes Computermodell zur Berechnung der Datenverteilung und deren gleichzeitiger Visualisierung auf der Oberfläche eines dreidimensionalen, virtuellen Fruchtkörpers entstehen. Das primäre Ziel ist dabei, über eine geeignete und schnelle Darstellung auch große Datenmengen für den Betrachter überschaubar zu halten und eine unmittelbare qualitative oder quantitative Beurteilungen zu ermöglichen. Die Form des jeweiligen Fruchtkörpers kann hier zwar idealisiert sein, muss aber geometrisch zum realen Vorbild eine hinrei-

chende Ähnlichkeit aufweisen. Durch entsprechende Einfärbung der Oberfläche ist die räumliche, darauf projizierte Messdatenverteilung darzustellen. Der Körper muss im Raum frei drehbar sein, um von allen Seiten betrachtet werden zu können. Alle dazu nötigen Berechnungen sind zeitoptimiert für eine verzögerungsfreie Darstellung auszuführen. Ohne spezielle Vorkenntnisse oder zusätzlichen Arbeitsaufwand des Nutzers soll das Programm unmittelbar einsetzbar sein.

3. Aufbau des Computermodells

Dem virtuellen Fruchtkörper liegt das bekannte Wireframe-Modell (FOLEY *et al.* 1994) zu Grunde, wobei jeder Körper durch einer bestimmte Anzahl räumlicher Knotenpunkte definiert ist. Zwischen den Verbindungslinien benachbarter Knoten lassen sich dann rechnerisch alle Teilflächen aufspannen und damit das Computerbild aufbauen. Zur Datenvisualisierung wurden diese bekannten Elemente in ihren funktionellen Eigenschaften zielgerichtet erweitert. Auf komplexe Berechnungen im Sinne der Annäherung zum Fotorealismus kann man hingegen vollständig verzichten. Stattdessen ist vorauszusetzen, dass die Körperoberfläche keine besonderen optischen Materialeigenschaften besitzt und auf ihr keine spiegelnde, sondern nur diffuse Reflexion stattfindet. Weiterhin wird die Lichtquelle als unendlich weit entfernt und farblos definiert. Perspektivische Verzerrungen und Wechselwirkungen zwischen den Objekten in Form von Schattenwurf o.ä. sind nicht problembezogen und spielen daher keine Rolle.

3.1 Erweiterte Funktion der Knotenpunkte

Jedes Modell eines Körpers besteht zunächst aus einer Liste von Knotenpunkten, die in Form kartesischer Koordinaten sowohl räumliche Informationen über den jeweiligen Körper in der Grundstruktur als auch über dessen Projektion auf die Bildfläche abhängig von den momentanen Betrachtungswinkeln tragen. Das Gerüst des Körpers ergibt sich durch direkte Verbindungen der Knoten untereinander. Mit steigender Anzahl von Knoten wird die Rasterung der Oberfläche des Körpers feiner und entspricht besser dem realen Fruchtkörper. Mehr als 5000 Knotenpunkte sind für eine hinreichende Ähnlichkeit allerdings nicht notwendig. Die freie Drehung des Körpers und damit die Möglichkeit des Betrachtens jeder beliebigen Stelle der Oberfläche erfolgt über die so genannten Eulerwinkel. Für jede Drehung wird die zugehörige Eulermatrix ermittelt. Durch Einsetzen der Koordinaten jedes einzelnen Knotens in diese Matrix entsteht rechnerisch dessen zweidimensio-

nale Projektion (Bild 2) auf der Bildfläche und die als Sichtbarkeitskriterium genutzte räumliche Tiefe.

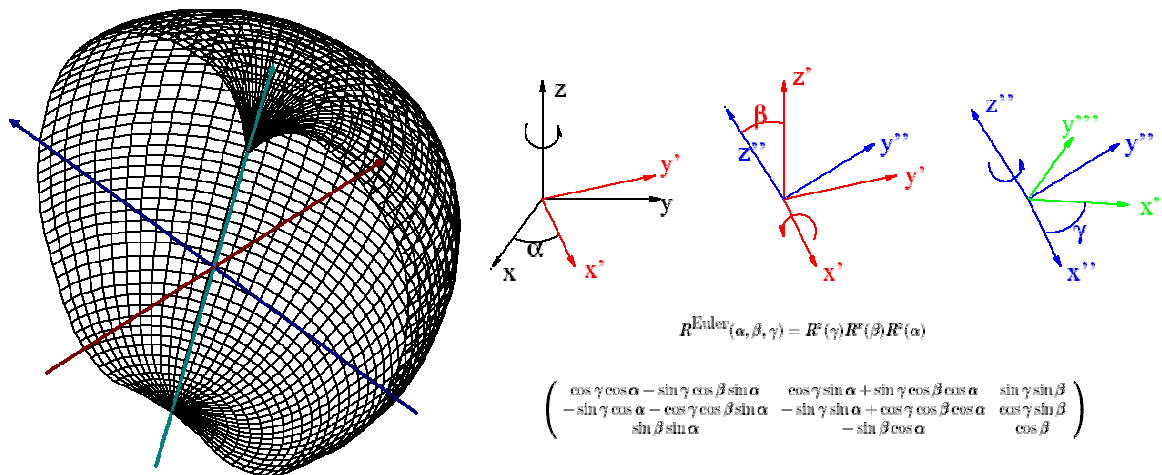


Bild 2: Schnitt durch einen über Eulerwinkel bzw. -matrix im Raum gedrehten virtuellen Fruchtkörper, dargestellt als Gittermodell mit ca. 5000 Knotenpunkten

In Erweiterung des Modells tragen die Knoten neben den räumlichen Koordinaten zusätzlich die notwendige Information zur Darstellung und Verteilung der Messdaten. Aus der räumlichen Lage des Implantats im realen Fruchtkörper und den gemessenen dreidimensionalen Beschleunigungsdaten ergeben sich Ursprung, Richtung und resultierender Betrag der momentan einwirkenden Stoßbeschleunigung. Die gedachte Wirkungslinie dieser Beschleunigung durchstößt die Oberfläche des virtuellen Körpers an einer bestimmten Stelle. In Bezug auf die räumliche Lage des Implantats hat jeder Knoten einen Richtungsvektor. Aus dem Skalarprodukt aller Richtungsvektoren mit dem Vektor der Stoßbeschleunigung lässt sich der Knoten mit dem geringsten Abstand von der Wirkungslinie ermitteln. Diesem Knoten und damit einer bestimmten Stelle der Oberfläche wird zunächst die Beschleunigungswirkung zugeordnet. Den benachbarten Knoten kann über deren relative Lage entsprechend des Abstandes, der Oberflächenkrümmung und angenommener Materialparameter die Beschleunigungswirkung dann auch anteilig zugeordnet werden. Mit steigender Anzahl und feinerer Oberflächenraasterung steigt dabei die mögliche Ortsauflösung bei der Messdatenzuordnung.

3.2 Erweiterte Funktion der Körperoberfläche

Die Oberfläche des Körpers setzt sich aus einer Liste von Viereckflächen zusammen. Jedes Viereck wird durch die Koordinaten von jeweils vier Knoten aufgespannt. Dabei werden ausschließlich im geometrischen Sinne einfach konvexe Vierecke gebildet, d. h. die Diagonalen verlaufen nicht außerhalb der Kanten und die Kanten selbst sind nicht gekreuzt. Da jeder Knoten sowohl über räumliche Koordinaten als auch zugeordnete Messdaten verfügt, kann die Interpolation zwischen den Knoten zum Füllen der Viereckfläche gleichzeitig zur Darstellung des räumlichen Eindrucks und der Datenverteilung genutzt werden. Dazu wird für die einzelnen Flächenpunkte ein Farbwert nach dem HSL-Farbsystem berechnet. Im Modell dient der Farbton H bei maximaler Sättigung S zur Anzeige der Messdaten, die Helligkeit L für den räumlichen Eindruck bzw. den Beleuchtungseffekt.

Zur Berechnung des Beleuchtungseffektes muss zunächst für den einzelnen Knoten der Normalvektor errechnet werden. Dieser ergibt sich durch Addition aller Normalen der ihn umgebenden Flächen. Bei der Drehung des Körpers wird der Normalvektor mitgedreht und ändert seinen Winkel zur angenommenen Lichtquelle. Über das Skalarprodukt aus Normalvektor und der Richtung des Lichteinfalls ergibt sich der reflektierte, in Richtung des Betrachters als winkelabhängige Helligkeit wahrgenommene, Lichtanteil. Nach dem vereinfachten Beleuchtungsmodell von Gouraud (FOLEY *et al.* 1994) genügt es, die Helligkeitswerte zwischen den Knoten zur Berechnung der Flächenpunkte zu interpolieren, ohne für alle Punkte zunächst rechenaufwendig die eigenen Normalvektoren und erst dann daraus Farb- und Helligkeitswerte zu ermitteln.

Analog lässt sich nun das Modell zur datenbezogenen Bestimmung des Farbtons der Flächenpunkte erweitern. Jedem Knoten bzw. Eckpunkt der Teilfläche ist ein konkreter Datenwert zugeordnet, welcher einem bestimmten Index aus einer hinterlegten Farbtabelle entspricht. Als ausreichend für die visuelle Differenzierung und als rechentechnisch günstig haben sich Tabellen mit 256 Farbtönen bewährt. Unter Berücksichtigung des erforderlichen Beleuchtungseffektes muss zusätzlich jeder einzelne Farbton in mindestens 80 bis 100 Helligkeitsstufen innerhalb des HSL-Farbraumes variiert werden, so dass sich als Ergebnis eine zweidimensionale Farbtabelle mit minimal ca. 20000 Einträgen ergibt.

Als Konsequenz lässt sich das Berechnen der Textur der Teilflächen als parallel auszuführende Interpolationen zweier rechtwinklig zueinander stehenden Indizes innerhalb der gewählten Farbtabelle beschreiben (Bild 3).

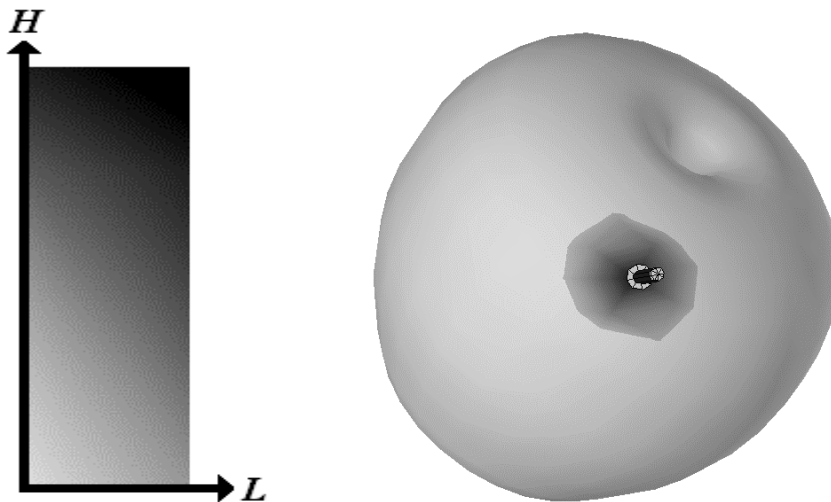


Bild 3: Räumliche Darstellung der Körperoberfläche durch winkelabhängige Variation der Helligkeit L und datengebundene, partielle Verfärbung durch ortsabhängige Variation des Farbtone H innerhalb einer vordefinierten Farbtabelle

Im ersten Schritt wird auf direkter Linie zwischen den Knoten, also entlang der Flächenkanten, linear interpoliert. Dadurch entstehen die Ausgangswerte in Form ganzzahliger Tabellenindizes zum Berechnen aller innerhalb der Fläche liegenden Bildpunkte, welche sich im nächsten Schritt durch kombinierte Interpolation zwischen den zuvor ermittelten, jeweils horizontal und vertikal gegenüberliegenden Kantenpunkten ergibt. Bei ausreichender Genauigkeit liegt der Vorteil dieses Verfahrens insbesondere in der schnellen Ausführbarkeit der Berechnung.

4. Ergebnisse

Im Ergebnis der Umsetzung des beschriebenen Computermodells zur dreidimensionalen Visualisierung entstand ein ohne besondere Vorkenntnisse sofort nutzbares Anwendungsprogramm. Nach Auswahl der Art des Fruchtkörpers, der Festlegung seiner Abmaße und der Lage des Messimplantats im Inneren liest das Programm die in Tabellenform vorliegenden Messdaten aus einer Textdatei aus und nimmt die Datenverteilung auf der Oberfläche vor (Bild 4). Dank zeitoptimierter Funktionen erfordert dieser Vorgang auch bei mehreren Millionen Einzelwerten nur wenige Sekunden. Wahlweise lassen sich die Daten als zeitliche Abfolge der Einzelwerte oder aggregiert in Summen, Maxima oder Häufigkeiten abbilden.

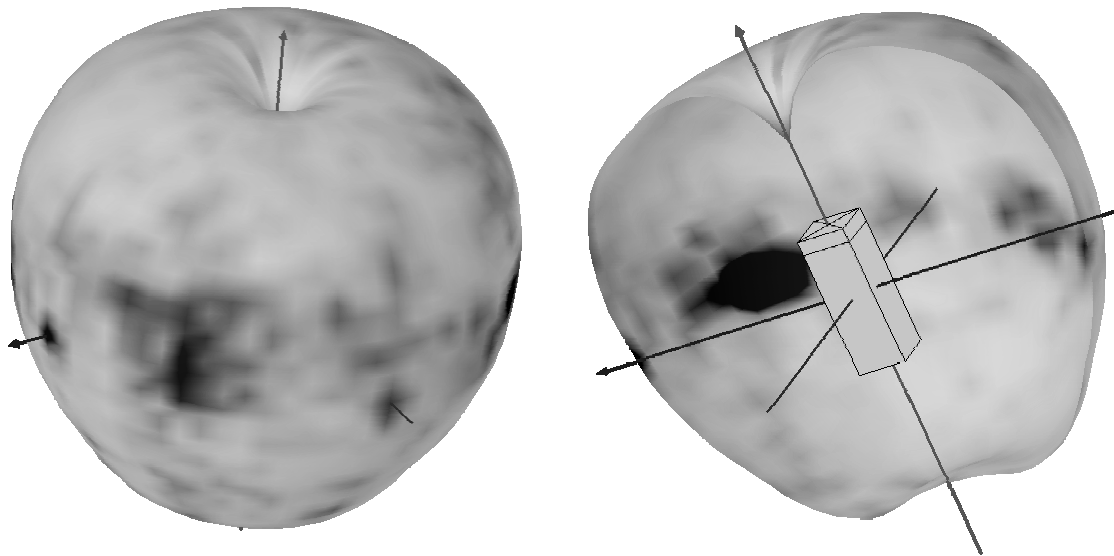


Bild 4: Visualisierte Verteilung der Belastung durch Stoßbeschleunigungen auf der Oberfläche eines virtuellen Apfels im Vollbild und als Schnittbild mit eingesetztem Messkörper

Über einen Regler zur Festlegung von Schwellwerten ist die visuelle Abgrenzung interessanter Bereiche der Oberfläche möglich und deren Flächenanteil bestimmbar.

Die örtliche Auflösung der Datenzuordnung kann durch Wahl der Knotenanzahl und damit der Oberflächenraasterung und durch einen zusätzlichen Materialparameter variiert werden. Besonders wichtig für die Handhabung des Programms sind verzögerungsfreie Berechnungen zur Visualisierung, z.B. nach Änderungen von Betrachtungswinkeln oder dem Abfahren der Zeitachse. Auf einem PC mittlerer Leistung sind ca. 30 berechnete Einzelbilder pro Sekunde darstellbar, d. h. alle Ergebnisse inklusive der Darstellung stehen in Echtzeit zur Verfügung.

5. Literatur

FOLEY JD, VAN DAM A, FEINER SK, HUGHES JF, PHILLIPS RL (1994) Computer Graphics, Principles and practice. Addison-Wesley, 1994

Gegenüberstellung bildanalytischer und spektraloptischer Messverfahren für Wachstumsuntersuchungen an Zuckerrüben

Comparing image analysis versus spectral reflectance measurement for growth investigations with sugar beets

Martin Kraft

Institut für Technologie und Biosystemtechnik; Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft (FAL); Bundesallee 50; 38116 Braunschweig

E-mail: martin.kraft@fal.de

Zusammenfassung: Die Aussagefähigkeit und Anwendbarkeit zweier unterschiedlicher optischer Messprinzipien für Wachstumsuntersuchungen bei Pflanzen wird am konkreten Beispiel eines zweifaktoriellen Versuches mit Zuckerrüben (Sorte *Impuls*) dargestellt und verglichen. Faktoren waren die Stickstoffversorgung und die atmosphärische CO₂-Konzentration. Als generelles Wachstumsmaß eignen sich sowohl der durch spektrale Reflexionsmessung bestimmte NDVI als auch der bildanalytisch bestimmte Bodenbedeckungsgrad. Für die Blattfarbenbestimmung eignet sich die Bildanalyse deutlich besser als die Reflexionsmessung. Der Wasserstress lässt sich ausschließlich mit den im Spektralmessgerät enthaltenen Infrarotkanälen bestimmen.

Schlüsselwörter: Optische Messung, spektrale Reflexion, Bildanalyse, Bodenbedeckungsgrad, Wasserstress, Pflanzenwachstum, Zuckerrübe

Abstract: *Two different optical measurement principles are compared for their suitability and usability for plant growth and plant state measurements. The comparison was done in a two factor experiment with sugar beet (cv. Impuls). The factors were the nitrogen supply and the atmospheric CO₂ concentration. Both, the soil cover (derived by image analysis) and the NDVI (by spectral reflectance measurement) are well suited as a general growth indicator. Image analysis is the only applicable method for in situ leaf colour measurement. On the other side, moisture stress can only be measured with the infrared channels contained in the spectral reflectance measurement device.*

Keywords: *Optical measurement, spectral reflectance, image analysis, soil cover, water stress, plant growth, sugar beet*

1. Einleitung

In pflanzenbaulichen Versuchsanstellungen besteht immer die Notwendigkeit, bei den Versuchspflanzen gewisse Wachstumsparameter zu messen. Solche Parameter sind beispielsweise der Blattflächenindex oder der Bodenbedeckungsgrad eines Bestandes, Längen und Flächengrößen von Blättern und Stielen, Nährstoff- und Chlorophyllkonzentrationen in den Pflanzenteilen. Die Messungen sind, nicht zuletzt infolge einer größeren Anzahl von treatments oder Wiederholungen arbeits- und zeitaufwändig; oft bedingen sie die vorzeitige Abernte von Pflanzenteilen.

Auf der anderen Seite stehen die viel versprechenden zerstörungsfreien optischen Messverfahren: Im Einsatz spektraler Reflexionsmesssensoren gibt es eine jahrzehntelange Erfahrung (u. a. aus der Satellitenfernerkundung). Mit diesen Sensoren lassen sich Vegetationsindizes berechnen, welche aus dem Messverfahren selbst entstanden sind und bestens zur Wachstumsverfolgung geeignet sind. Bekannteste Beispiele sind der NDVI (normalized difference vegetation index) und der Hauptwendepunkt. Diese Indizes erlauben allerdings keine direkte Interpretation im Sinne klassischer Pflanzenwachstumsparameter wie z.B. dem Blattflächenindex oder dem Chlorophyllgehalt, da die spektralen Reflexionssignaturen immer ein Mischsignal von einem größeren Bestandsausschnitt darstellen.

Hier verspricht die (automatische) Bildanalyse weiter gehende Möglichkeiten. So kann in einer Bildaufnahme der Bodenbedeckungsgrad exakt bestimmt werden, sofern es gelingt, automatisch die Bodenbildpunkte und die Pflanzenbildpunkte zu unterscheiden und zu trennen. Eine solche Bildauswertung mit automatischer Bildsegmentierung wird am Institut für Technologie und Biosystemtechnik der FAL seit etwa vier Jahren entwickelt und wurde bereits in zwei vorherigen Workshops vorgestellt (KRAFT 2003, KRAFT 2004).

In diesem Beitrag wird die Bildanalyse am Beispiel eines Zuckerrübenbestands mit zeitgleichen spektraloptischen Reflexionsmessungen verglichen.

2. Versuchsbeschreibung und Messverfahren

Seit etwa 50 Jahren steigt weltweit der Kohlendioxidgehalt der Atmosphäre kontinuierlich an und es ist auch in den kommenden Jahren mit einem weiteren Anstieg zu rechnen. Im

Braunschweiger Kohlenstoffprojekt wird die Auswirkung einer erhöhten Kohlendioxidkonzentration auf das Wachstum landwirtschaftlicher Kulturpflanzen untersucht. Kern des Projektes ist der mehrjährige FACE-Versuch (Free Air Carbon Dioxide Enrichment) bei dem Pflanzen unter Freilandbedingungen in einer kohlendioxidangereicherten Atmosphäre wachsen. In 2004 wurden Zuckerrüben (Sorte *Impuls*) angebaut. Die Atmosphäre wurde auf 550 ppm CO₂ angereichert (FACE). Die Kontrolle wuchs unter natürlichen atmosphärischen Bedingungen (377 ppm CO₂) auf. Als zweiter unabhängiger Parameter der Versuchsanlage wurde nur eine Hälfte der Versuchsfläche mit der praxisüblichen Menge an Stickstoff voll versorgt (N100); in der zweiten Hälfte betrug die N-Gesamtversorgung nur 50 % der praxisüblichen Menge (N50).

Während der Vegetation fanden die optischen Messungen etwa im Wochenabstand statt. Jeweils zeitgleich wurden immer zwischen 11:00 Uhr und 13:00 Uhr Ortszeit (mittlere Sonnenzeit) spektrale Reflexionsmessungen durchgeführt und fotografische Aufnahmen des Bestandes genommen.

Die spektrale Reflexionsmessung erfolgte mit dem Reflexionsmessgerät Typ FAL II. Der Messkopf mit einem Öffnungswinkel von 64° wurde in 2,40 m Höhe aufgehängt und vertikal nach unten gerichtet, woraus eine kreisförmige Messfläche mit Durchmesser 3 m resultierte. Der baugleiche Referenzmesskopf wurde mit einem Kosinusrezeptor versehen nach oben gerichtet. Die Spektralkanäle beider Messköpfe beinhalteten die Wellenlängenbänder WL₁ = 550 nm (Halbwertsbandbreite HWB 9 nm), WL₂ = 670 nm (HWB 11 nm), WL₅ = 780 nm (HWB 11 nm) und WL₇ = 1675 nm (HWB 38 nm). Aus den Reflexionsgraden R₅₅₀, R₆₇₀, R₇₈₀ und R₁₆₇₅ wurden der NDVI, ein normalisierter green peak NGP und der Wasserstressindex MSI (moisture stress index, HUNT & ROCK 1989) berechnet:

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

$$\text{NGP} = \frac{R_{550} - R_{670}}{R_{550} + R_{670}}$$

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

Die fotografischen Aufnahmen erfolgten mit einer handelsüblichen Digitalkamera vertikal aus einer Höhe von ca. 1,50 m. Dabei wurde immer auf der Südkante der Aufnahme­fläche ein vertikales weiß lackiertes Schild zur Abschattung der direkten Sonneneinstrahlung aufgestellt.

Die Auswertung der Bilder erfolgte zunächst anhand eines trainierten k-Nearest-Neighbour-Klassifikators ($k=20$) zur Trennung von Boden- und Pflanzenpixeln. Beschränkt auf die grünen Pflanzenpixel erfolgte eine gemittelte Farbauswertung. Der mittlere Farbton HUE der grünen Blattpixel wurde aus den Grauwerten r , g und b des Digitalbildes als CIE 1976, u, v hue-angle (CIE PUBL. 15.2) berechnet.

3. Bodenbedeckungsgrad und NDVI

Der *Bodenbedeckungsgrad* war vom zweiten Aufnahmeterrain bis zum weitgehenden Bestandsschluss am 14. Juli in der Variante N100 signifikant höher als in N50. In der Zeit der maximalen Zunahme des Bodenbedeckungsgrades am 11. Juni lag der Bodenbedeckungsgrad bei N100 um ca. 12 % (der Aufnahme­fläche) über derjenigen von N50.

Unter optimalen N-Versorgungsbedingungen trat ein geringer (nicht signifikanter) Effekt der erhöhten CO₂-Konzentration (FACE-Effekt) auf den Bodenbedeckungsgrad von maximal +4 % (am 17.6.) auf. Dagegen war bei reduzierter N-Versorgung (N50) während der Haupt-Blattwachstumsphase ein deutlich größerer (nicht signifikanter) FACE-Effekt auf den Bodenbedeckungsgrad von bis zu 15 % (am 11.6.) zu sehen. Dieser kehrte sich am 28.6. und 6.7. um (-4 % bzw. -3 %) und verschwand danach.

Der *spektraloptisch gemessene NDVI* zeigte einen sehr ähnlichen Verlauf. Er lag ab der Haupt-Blattwachstumsphase (ab 17.6.) unter N100 signifikant über dem NDVI der N-reduzierten Flächen. In der N50-Behandlung trat am 17.6. ein signifikant positiver CO₂-Effekt auf; am 28.6. und 6.7. kehrte sich dieser (nicht signifikant) um.

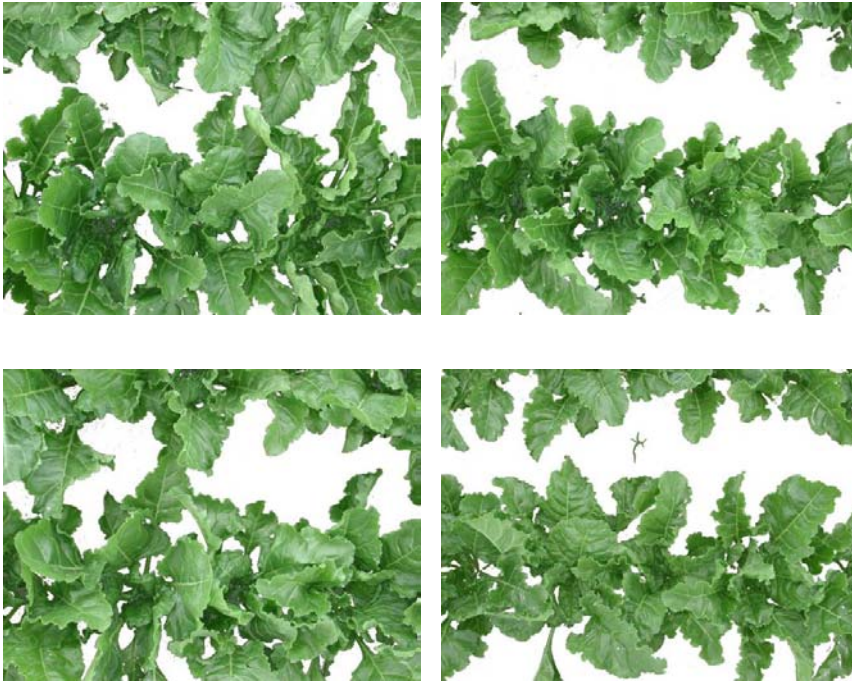


Bild 1: Bildaufnahmen von Zuckerrüben im FACE-Experiment am 17. Juni 2004. Obere Reihe: 550 ppm CO₂ (FACE); untere Reihe: 377 ppm CO₂ (Natürliche Atmosphäre). Links: N100; rechts: N50. Der Boden wurde durch automatische Pixelklassifikation ausgeblendet

Die unterschiedliche N-Versorgung führt erwartungsgemäß zu signifikanten Unterschieden sowohl beim Bodenbedeckungsgrad als auch beim NDVI. Die Auswirkungen der FACE-Behandlung sind geringer. Nach der Literatur ist unter FACE von einem schnelleren Pflanzenwachstum auszugehen. Der Effekt war in den optischen Messungen in der Tendenz erkennbar, aber überwiegend nicht signifikant.

Erstaunlich war die Umkehr des FACE-Effektes am 28.6. und am 6.7. unter N50 in einen negativen Effekt sowohl auf den Bodenbedeckungsgrad als auch auf den NDVI. Bei der Suche nach der Ursache trat in den Fotos der Eindruck auf, dass die Rübenblätter unter N50 und FACE zu den genannten Zeitpunkten aufrechter stehen als bei N50 und normaler CO₂-Konzentration. Dieser Effekt wurde in den Vorjahren bei den Getreidekulturen nicht beobachtet und müsste durch weitere Untersuchungen belegt werden.

4. Änderung der Blatt- und Bestandsfarbe unter FACE

Der mittlere Farbton der grünen Pflanzenpixel in den Aufnahmen war zu den ersten drei Aufnahmetermen unter FACE signifikant höher (grüner) als in der Kontrolle. Am dritten

Termin (17.6.) fand gleichzeitig die erste Spektralmessung statt und zu diesem Termin war der normalisierte green peak unter FACE signifikant höher.

Ab dem 23. Juni (weitgehender Bestandsschluss) verschwand der Unterschied zwischen den CO₂-Behandlungen sowohl im green peak als auch beim Blattfarbton. Ab Mitte Juli wurde der Blattfarbton unter FACE im Vergleich zur Kontrolle signifikant geringer (gelber); im green peak war weiterhin kein Unterschied zwischen den Behandlungen erkennbar.

Da in dem verwendeten Spektralmessgerät nur zwei Kanäle im sichtbaren Wellenlängenbereich zur Verfügung stehen, konnte nur der green peak als Ersatzgröße für die Farbin-terpretation verwendet werden. Während der Blattfarbton in der Bildanalyse ausschließlich von den grünen Pflanzenpixeln berechnet wurde, ist der green peak ein Mischsignal, welches die Reflexionssignatur des unbedeckten Bodens mit beinhaltet. In dem unter FACE erhöhten green peak (vor dem Bestandsschluss) mischen sich die Einflüsse der grüneren Blätter und der höheren Bodenbedeckung.

5. Wasserstress

Die spektralen Messungen begannen erst am 17.6.; zu diesem Zeitpunkt lag der Bodenbedeckungsgrad im Mittel schon über 50 %. Aus den Spektralkanälen 780 nm und 1675 nm wurde der moisture stress index (MSI, HUNT & ROCK 1989) berechnet. Er lag zu allen Messterminen in den FACE-Flächen signifikant unter dem MSI in den Kontrollflächen. Die N-Behandlung hinterließ keinen erkennbaren Effekt im MSI.

Aus der Literatur ist bekannt, dass Pflanzen unter FACE-Bedingungen deutlich weniger Wasser verbrauchen und weniger Wasserstress leiden (HUNSAKER *et al.* 1996, WALL *et al.* 2001). Die gemessenen MSI-Werte lassen auf einen geringeren Wasserstress und einen höheren relativen Wassergehalt (HUNT & ROCK 1989) der Rüben unter FACE schließen. Da die Wellenlänge 1675 nm in unserem Messgerät erstmals für diese Messkampagne zur Verfügung stand, müssen weiter gehende Interpretationen noch zurück gestellt werden.

6. Diskussion

Die Ergebnisse haben gezeigt, dass eine unterschiedliche N-Versorgung in einem Zuckerrübenbestand während der Haupt-Blattwachstumsphase (bis zum beginnenden Bestandsschluss) sowohl zu deutlichen Unterschieden im Bodenbedeckungsgrad als auch im NDVI führten. Spektralmesstechnik und Bildanalyse sind beide gut zur Messung dieses Effekts geeignet.

Die FACE-Effekte waren geringer als die N-Effekte; dies gilt sowohl für den Bodenbedeckungsgrad als auch für den NDVI. In der Tendenz waren sie zu erkennen, aber der Unterschied erwies sich in der Varianzanalyse zu den meisten Terminen als nicht signifikant.

Das Wachstum der Zuckerrüben unter den unterschiedlichen Versuchsbedingungen konnte somit in vergleichbarer Weise mit spektraloptischer Messtechnik und mit Bildanalyseverfahren verfolgt und quantifiziert werden.

Bei der Farbauswertung ergeben sich größere Unterschiede zwischen den Messverfahren. Nur die Bildanalyse erlaubt eine rein auf die Pflanzen begrenzte Farbmessung. Im spektraloptisch gemessenen green peak mischt sich das Reflexionssignal des unbedeckten Bodens zur Pflanzenfarbe, so dass keine direkte Aussage über die Pflanzenfarbe möglich ist. Die Pflanzenfarbe allein kann nur mittels der Bildanalyse gemessen werden.

Dagegen kann der unter FACE geringere Wasserstress der Blätter ausschließlich mit der spektralen Messtechnik und ihren Infrarotkanälen gemessen werden. Der Unterschied zwischen den CO₂-Stufen war signifikant; zwischen den N-Stufen waren keine Unterschiede im Wasserstress festzustellen.

7. Literatur

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

HUNSAKER DJ, KIMBALL BA, PINTER PJ JR., LAMORTE RL, WALL GW (1966) CO₂ enrichment and irrigation effects on wheat evapotranspiration in a free-air environment. Trans. ASAE 39, S. 1345-1355

HUNT ER, ROCK BN (1989) Detection of changes in Leaf Water content Using Near- and Middle-Infrared Reflectances. Remote Sens. Environ. 30, S. 43-54

-
- KRAFT M (2003)** Bildanalytische Bestimmung des Bodenbedeckungsgrades in Winterweizen. Bornimer Agrartechnische Berichte 34, S. 29-37
- KRAFT M (2004)** Potenzial der automatischen Bildanalyse für die Zustandsbestimmung landwirtschaftlicher Kulturen. Bornimer Agrartechnische Berichte 37, S. 159-166
- WALL GW, BROOKS TJ, ADAM NR, COUSINS AB, KIMBALL BA, PINTER PJ, LAMORTE RL, TRIGGS J, OTMANN MJ, LEAVITT SW, MATTHIAS AD, WILLIEMAS DG, WEBBER AN (2001)** Elevated atmospheric CO₂ improved Sorghum plant water status by ameliorating the adverse effects of drought. New Phytologist 152, S. 231-248

Innovative Anwendungen zur Qualitätsüberwachung mittels industrieller Bildverarbeitung

Innovative applications of industrial image processing for quality monitoring

Uwe Urbansky

Symacon Bildverarbeitung GmbH, Ebendorfer Chaussee 4, 39179 Barleben

E-mail: urbansky@symacon.de

Zusammenfassung: SYMACON ist ein industrienaher Forschungsbetrieb und Sondermaschinenbauer, der im Bereich der Bildverarbeitung Lösungen für die Industrie erarbeitet. Es werden komplexe Aufgabenstellungen realisiert wie z. B. Einsatz hochauflösender 3D-Messtechnik, Oberflächeninspektion im μm -Bereich sowie Mustervergleich großer Datenmengen.

Aus der Vielzahl der abgeschlossenen Projekte werden ausgewählte innovative Lösungen erläutert. Das neueste Produkt, SYMACON-VISION, ist ein universelles Prüfsystem zur Kontrolle von Etiketten, Aufdrucken und Prägungen sowie von qualitätsbestimmenden geometrischen Parametern und baut auf verschiedene Hardwareplattformen und einem kompatiblen, hardwareunabhängigen Softwarepaket auf.

Deskriptoren: Bildverarbeitung, Qualitätskontrolle, Prozessüberwachung, Prü fzellen

Summary: SYMACON is an industry-orientated research company and builder of special machines working out industrial image processing solutions. There are realised complex tasks e. g. high-resolution 3D measurement technology, surface inspection in μm range, and pattern comparison of high data volumes.

Selected innovative solutions of realised projects are explained. The latest product is SYMACON-VISION - a universal testing system for the control of labels, imprints and embossments, as well as quality-critical parameters. It is based on different hardware platforms and a compatible, hardware-independent software package.

Keywords: Image processing, quality testing, process monitoring, test cells

Als industrienaher Forschungsbetrieb und Sondermaschinenbauer konnte SYMACON durch vielfältige Erneuerungen und Verbesserungen im Bereich der Bildverarbeitung Lösungen für die Industrie erarbeiten, die vor wenigen Jahren undenkbar erschienen. Das hängt in erster Linie mit der sprunghaften Entwicklung der Mikroelektronik zusammen.

Insbesondere spielen hier die außerordentlich großen Speichermengen, die Übertragungsgeschwindigkeiten und Übertragungsvolumina eine entscheidende Rolle. Hinzu kommt die große Auflösung und die deutlich gestiegenen Rechenleistungen. Dadurch wurde es möglich, die Genauigkeit und kleinere Fehler zu detektieren. Die Prozesse verlaufen wesentlich schneller. Das alles fand und findet statt im Prozess einer weitergehenden Miniaturisierung.

Diese und weitere angrenzende Innovationen, die auch die Beleuchtungstechnik umfassen, machen es möglich, dass weitere Einsatzgebiete erschlossen werden können. Durch diese höchsten Anforderungen und Möglichkeiten der Beleuchtung wurde auch auf dem optischen Gebiet ein derart großer innovativer Sprung erreicht, der es ermöglicht, die Szene besser sichtbar zu machen und demzufolge eine bessere Beherrschung der durch die Bildverarbeitung zu erfüllenden Zielstellungen zu sichern. Dazu gehören u.a. technologische Prozesse, die mit hoher Geschwindigkeit ablaufen, bei denen räumlich beengte Bedingungen anzutreffen sind sowie Einsatzgebiete wo raue Umgebungsbedingungen herrschen wie u.a. Staub, Schwingungen, Temperatur etc. Im Rahmen dieser Prozesse ist es SYMACON möglich, bis zu 60 Bilder pro Sekunde in hoher Qualität und sicher auszuwerten. Damit werden Aufgaben im oberen Teil der Machbarkeit gelöst.

Heute sind komplexe Aufgabenstellungen realisierbar. Das betrifft den Einsatz hochauflösender 3D-Messtechnik, die Oberflächeninspektion im μm -Bereich sowie den Mustervergleich großer Datenmengen. Damit in Verbindung hat sich der Grad der Flexibilität und Variabilität bedeutend erhöht. Das führte dazu, dass komplexe Prüfvorgänge in der Endkontrolle mit automatischer Teilezuführung und Sortierung der Industrie übergeben werden konnten. Die Steuerung des Gesamtprozesses wird über zentrale Rechner realisiert.



Bild 1: Aufdruckkontrolle mit SYMA-CON-VISION

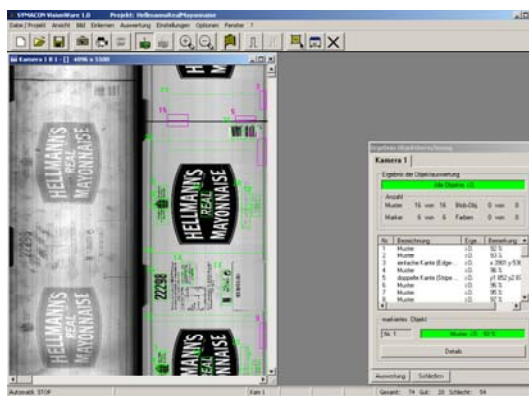


Bild 2: Kontrolle der Aufdrucke hinsichtlich Farbe, Faltenbildung, Maße, Gesamtbild

Von praktischer Bedeutung bezüglich der zu lösenden Projekte sind einfache Erkennungsaufgaben, wie vorhanden bzw. nicht vorhanden, bis hin zu Aufgaben als „Messmaschine“ sowie im Bereich der Grauwertverarbeitung unter Hinzuziehung des Systemwissens des Kunden bei der Beurteilung eines Erkennungsprozesses noch gut, schon schlecht – sowie die daraus abzuleitenden Handlungen wie z. B. Kennung, Registrierung, Ausschleusung aus dem Prozess, Speicherung der Daten für die entsprechende Rückverfolgbarkeit.

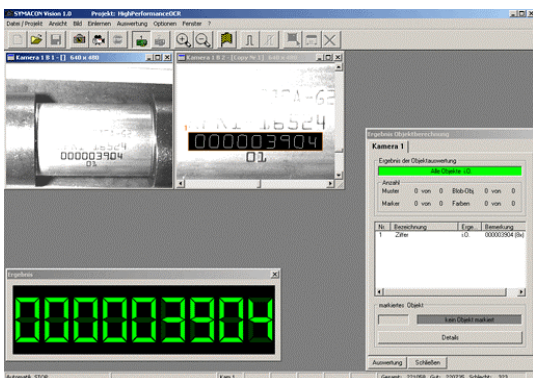


Bild 3: Zeichenidentifikation auf Metall

Nach DIN EN ISO 8402 ist unter dem Begriff Rückverfolgbarkeit die Möglichkeit zu verstehen, Werdegang, Verwendung oder den Ort einer Einheit anhand aufgezeichneter Kennzeichnungen verfolgen zu können.

In einer Zeit immer höherer Qualitätsansprüche betrifft die Rückverfolgbarkeit bei einem Produkt u.a. die Herkunft von Material und Teilen, die Verarbeitungsgeschichte des Produktes, die Verteilung und den Verbleib des Produktes nach seiner Auslieferung.

Anwendungstyp I

Betrifft das teilespezifische Abspeichern von Daten bzw. Parametern. Hier geht es um die Ermittlung von Qualitätsparametern bzw. von Fehlern (Oberflächenfehler, Risse, Verfärbungen etc.) und Abspeichern in Datenbanken. Dabei spielt die Kennzeichnung des jeweiligen Objektes eine entsprechende wichtige Rolle.



Bild 4: Montageanlage für Spinddüsen mit integrierter Qualitätskontrolle

Anwendungstyp II

Hier sind teilespezifische Daten Ausgangspunkt für den nächsten technologischen Schritt. Als Beispiel ist die Automobilzulieferindustrie zu nennen. Im Fall der Nockenwellenfertigung werden die Teile 3D-vermessen und gekennzeichnet. Das Auslesen vor dem Schleifen dient der Optimierung des Schleifprozesses. Gegenstand der Aufgabenstellung war das Kennzeichnen und das nachfolgende Auslesen der Kennzeichnung. Bei der Zylinderkopfhaubenmontage geht es um das Erkennen der Artikelnummer, um automatisch das zu montierende Teil korrekt zuzuführen.

Anwendungstyp III

Dies ist der Komplex, bei dem teilespezifische Daten bzw. Bilder bei Kundenreklamationen zur Nachweisführung herangezogen werden. In einem konkreten Projekt ging es dabei um eine Montageanlage mit acht Arbeitsplätzen und automatischer Qualitätskontrolle durch zwei Kameras am Arm einer 5-Achs-Einheit. Hier musste die richtige Zuordnung von Schläuchen für Wasser, Benzin und Luft sowie das Vorhandensein und der Sitz von Befestigungselementen und Etiketten kontrolliert und die teilespezifischen Daten entsprechend gespeichert werden.



Bild 5: Montageanlage mit zwei Kameras am Arm einer 5-Achs-Einheit

SYMACON-VISION ist ein Baukasten, sowohl zur messtechnischen Kontrolle als auch zur Aufdruckkontrolle, der auf verschiedenen Hardwareplattformen und einem kompatiblen, hardwareunabhängigen Softwarepaket aufbaut.

Ausgangspunkt ist eine Hardware-Strategie, wobei Hardwarekonzepte für verschiedene Leistungsklassen zum Einsatz kommen:

- Zeilenkamera + PC: hohe Auflösung, große Flächen
- Matrixkamera + PC: hohe Bildrate - bis 60 Bilder pro Sekunde
- Farbkamera + PC: Farbkontrolle hochwertiger Zeichen und Symbole
- Intelligente PC-Kamera



Bild 6: Intelligente PC-Kamera

Ein von der Hardware unabhängiges Softwarepaket rundet die Gesamtlösung ab. Nachfolgende Aufgabenstellungen stehen im Mittelpunkt:

- Messtechnische Anwendungen im Bereich der fertigungsbegleitenden Kontrolle
- Messplätze zur Erstbemusterung
- Lochbildkamera
- Etikettenkontrolle (Qualität, Position, Lage, Richtigkeit von Details)
- Klarschriftlesen - OCR, Identifikation
- Kontrolle / Identifikation von gestanzten Zeichen
- Vollständiger Vergleich von Schriftstücken, z.B. Beipackzettel

Von wachsender Bedeutung ist die Verknüpfung von VISION-Technologien und mit dem Einsatz von Industrierobotern. Damit wird die Flexibilität der Qualitätskontrolle deutlich erhöht. Hier wird der Trend verlassen, das Produkt an die Kamera heranzuführen. Der Roboter positioniert die Kamera in den Bereich des Prüfobjektes - auch an schwer zugänglichen Stellen.

Bei der Realisierung von Prüfzellen, die im automatischen Betrieb die Zuführung und das Beurteilen sowie die abschließende Entnahme der Teile umfassen, werden in der Regel Fernwartungs- und Fernsteuerungslösungen integriert.

Die Bildverarbeitung wird auch verstärkt zur Überwachung von manuellen Montageprozessen eingesetzt. Nach Bewertung durch das Bildverarbeitungssystem werden die nächsten, erforderlichen Arbeitsschritte freigegeben.

Der Einsatz der Bildverarbeitung durch SYMACON erfolgt vornehmlich in der: Automobilzulieferindustrie, Pharmaindustrie, Lebensmittelindustrie, Elektronik, Elektrotechnik, Holz- und Textilverarbeitung, um einige wesentliche Einsatzgebiete zu nennen.

Aus der Vielzahl der abgeschlossenen Projekte sollen genannt sein:

- Rissprüfung an geschweißten Felgen
- Qualitätskontrolle manueller Montageprozesse,
- Klarschriftlesen von Artikelnummern
- Komplette Prüfwellen
 - zur Kontrolle von Etiketten und Aufdrucken auf unterschiedlichen Trägern
 - zur Kontrolle von Farben, Oberflächenfehlern, Rundheiten, Löchern, Maßen,
 - zur Kontrolle des Gesamtbildes, von Vollständigkeits, der richtigen Zuordnung von Teilen, des Vorhandenseins von Befestigungselementen und der richtigen Positionierung von Teilen etc.
- Ermittlung von Oberflächenfehlern, Kratzern, Dellen, Verschmutzungen u. ä.

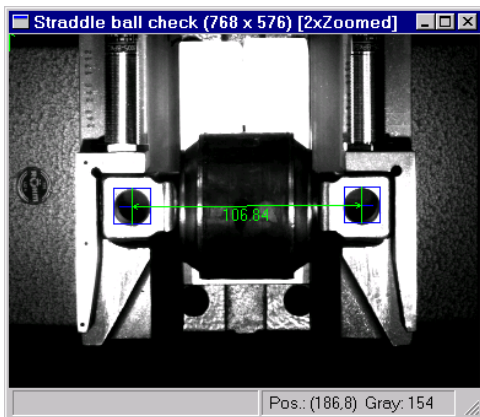


Bild 7: Überwachung der Montage von Kugelstücken

Einsatzmöglichkeiten der Chlorophyllfluoreszenzbildanalyse zur Erkennung und Bewertung von pilzlichem Pathogenbefall

Application of chlorophyll fluorescence imaging analysis in fungal pathogen detection

Werner B Herppich¹, Erich Hetz², Karl-Heinz Dammer¹, Hans-Rainer Langner¹, Horst Beuche¹, Hans-Jürgen Hellebrand¹

¹Leibniz - Institut für Agrartechnik Potsdam-Bornim e.V., Max-Eyth-Allee 100, 14469 Potsdam

E-mail: wherppich@atb-potsdam.de

²Landesamt für Verbraucherschutz und Landwirtschaft, Abteilung Landwirtschaft und Gartenbau, Großbeeren

Kurzfassung: Die Chlorophyllfluoreszenzanalyse ist ein wertvolles, nichtinvasives Werkzeug zur Untersuchung der photosynthetischen Reaktionen von Pflanzen auf abiotische und biotische Stressoren. Sie erlaubt es auf einfache Art die räumliche und zeitliche Dynamik der Wirkung pilzlicher Pathogene während und nach der Etablierung zu erfassen. Die Chlorophyllfluoreszenzbildanalyse bietet hier klare Vorteile gegenüber den Spotmessungen mit einfachen Fluorometern. Sie ist auch geeignet, die Dichte und Stärke des Pathogenbefalls in Pflanzenbeständen zu ermitteln. Für den online Einsatz zur teilflächenspezifischen Befallserkennung besteht bei Fluoreszenzbildverarbeitungssystemen und bei Datenverarbeitung bzw. -auswertung noch großer Entwicklungsbedarf. Für diese Applikation lässt sich die Genauigkeit der Befallsanalyse durch Kombination der Fluoreszenzbildverarbeitung mit anderen optischen Methoden

Deskriptoren: Chlorophyllfluoreszenzbildanalyse, pilzliche Schaderreger, Photosynthese

Summary: *The chlorophyll fluorescence analysis is a valuable, non-invasive tool to investigate the photosynthetic reaction of plants to various biotic and abiotic stressors. In a straightforward manner, it helps to study spatial and temporal dynamics of plants' infections by fungal pathogens. Here, whole leaf chlorophyll fluorescence imaging analysis is advantageous over spot measurements with a normal fluorometer. This method can also be applied to determine the density and strength of fungal pathogen infestation in the field. Instrumentation, data processing and data evaluation needs to be improved for an effective use of chlorophyll fluorescence imaging analysis in online application of pesticides in precision farming. Combining chlorophyll fluorescence imaging analysis with other optical imaging methods may largely increase the reliability of online infestation analysis.*

Keywords: *Chlorophyll fluorescence imaging analysis, fungal pathogen, photosynthesis*

1. Einleitung

Die Chlorophyllfluoreszenzanalyse hat sich seit langem als eine schnelle und/oder umfassende Methode zur zerstörungsfreien Analyse pflanzlicher Reaktionen auf unterschiedliche biotische und abiotische Stressoren etabliert (VON WILLERT *et al.* 1995, HERPPICH 2001, 2002). Hitze, Kälte, Frost, Trockenheit oder Sauerstoffmangel im Wurzelbereich und deren mögliche Interaktionen beeinflussen die photosynthetische Leistungsfähigkeit meist rasch und nachhaltig (HERPPICH *et al.* 1994, 1997, 1998, HERPPICH 2000, MARTIN *et al.* 1999). Allerdings können in spezifischen Stresssituationen die verschiedenen Teilkomponenten des komplexen photosynthetischen Gesamtprozesses sehr unterschiedlich reagieren und entweder inhibiert oder aktiviert werden (HERPPICH 2000). Mit ein paar schnellen Messungen ist es deshalb oft nicht getan, auch wenn die aktuell verfügbaren, sehr komfortabel und einfach zu bedienenden Messinstrumente (VON WILLERT *et al.* 1995) dazu verleiten. Ebenso ist die Wahl des geeigneten Messparameters für eine klar definierte Fragestellung sehr wichtig (HERPPICH 2001, 2002). Richtig angewendet kann die Chlorophyllfluoreszenzanalyse auf relativ einfache Weise detaillierte Informationen über die potentielle bzw. die tatsächliche Effizienz der Photosynthese, die Bruttphotosyntheseleistung, die Aktivität unterschiedlicher photosynthetischer Schutzmechanismen oder die Integrität des Photosyntheseapparates liefern (vgl. VON WILLERT *et al.* 1995). Inzwischen sind auch verschiedene Chlorophyllfluoreszenzbildanalyse-systeme (NEDBAL *et al.* 2000a, b, WALZ 2005) verfügbar, die zumindest teilweise häufig auftretende Aktivitätsgradienten innerhalb eines Pflanzenorgans oder die räumliche Dynamik in den pflanzlichen Reaktionen erfassen und die Untersuchungen noch aussagekräftiger machen (DALEY *et al.* 1989, ROLFE & SCHOLES 1995, BUSCHMANN & LICHTENTHALER 1997).

Im landwirtschaftlichen bzw. im gartenbaulichen Bereich wird die Chlorophyllfluoreszenz und die Chlorophyllfluoreszenzanalyse sowohl in der Forschung als auch in der Praxis eingesetzt, sei es zur berührungslosen Stickstoffbestimmung in Pflanzenbeständen (BREDEMEIER & SCHMIDHALTER 2003, FRITZMEIER 2005), zur automatischen Unkrautererkennung (KERÄNEN *et al.* 2003, AULICH & NORDMEYER 2004), für Studien zur Herbizidwirkung (VON WILLERT *et al.* 1995) zum Herbizideinsatz (NILSSON 1995) oder zur Qualitätsbestimmung bei Zierpflanzen (MATSCHKE *et al.* 1996) oder Früchten (NEDBAL *et al.* 2000a). Nicht zuletzt zur quantitativen Detektion und zur Früherkennung der Pathogeninfektion von Nutzpflanzen bietet diese Methode wertvolle Möglichkeiten (MOLL *et al.*

1995, BALACHANDRAN *et al.* 1997, SANTOS *et al.* 1998, BASSANEZI *et al.* 2002, POMAR *et al.* 2004). Da die biogene Stresswirkung der Phytopathogene meist sehr lokal ist (BALACHANDRAN *et al.* 1997), bietet sich speziell in diesem Fall der Einsatz der Chlorophyllfluoreszenzbildanalyse an (DAYLEY *et al.* 1889, BALACHANDRAN *et al.* 1994; ESFELD *et al.* 1995, SCHOLES & ROLFE 1996, NEDBAL *et al.* 2000b; MEYER *et al.* 2001; SOUKUPOVÁ *et al.* 2002).

Die stetig fortschreitende technische Entwicklung von digitalen Kamerasystemen, Computern und Bildanalysemethoden lässt die Chlorophyllfluoreszenzbildanalyse inzwischen auch, zumindest aber in naher Zukunft, als eine geeignete Methode für den online Einsatz zur kontrollierten teilflächenspezifischen Applikation von Pestiziden erscheinen (NILSSON 1995, BODRIA *et al.* 2002, BRAVO *et al.* 2002). Die Wirkweise der Phytopathogene, und damit auch ihre Detektierbarkeit, ist allerdings von ihren Eigenschaften und dem eigentlichen Wirkort stark beeinflusst (SCHOLES & ROLFE 1996, BASSANEZI *et al.* 2001, 2002).

An ausgewählten Beispielen, die ein breites Spektrum von Wirtspflanzen und Pathogenen darstellen, sollen die Möglichkeiten, aber auch die Grenzen des Einsatzes der Chlorophyllfluoreszenz- (bild-) Analyse zur Erkennung und Bewertung von pilzlichem Pathogenbefall im landwirtschaftlichen bzw. gartenbaulichen Bereich aufgezeigt werden.

2. Material und Methoden

Versuchspflanzen

Weiß, rosa und scharlachrot blühende Alpenveilchen (*Cyclamen persicum* Mill.) der Hybridsorte Sierra wurden unter praxisüblichen Klimabedingungen und Nährstoff- bzw. Wasserversorgung im Gewächshaus der Abteilung Landwirtschaft und Gartenbau des Landesamtes für Verbraucherschutz und Landwirtschaft in Großbeeren angezogen. Neben unbehandelten Kontrollpflanzen (K1) wurden Pflanzen gezielt mit *Fusarium oxysporum* f. sp. *Cyclaminis*, dem Erreger der Fusarium-Welke-Krankheit, infiziert (K2). An einem Teil dieser infizierten Pflanzen (V1 bzw. V2) wurde die Wirkung der Pflanzenstärkungsmittel FZB24 (*Bacillus subtilis*) und Vitalin T50 (*Trichoderma*) als mögliche Prophylaxe gegen bodenbürtige Schaderreger getestet.

In einem Feldversuch wurde die Reaktion des Weizenbestandes auf eine Mischinfektion (*Septoria tritici* und *Drechslera tritici-repentis*) untersucht. Auf dem Experimentalfeld waren dabei auf parallelen, drei Meter breiten Streifen die Pflanzen mit einem Fungizid (Juwel-Top®, 1 L ha⁻¹) behandelt. Gleichgroße Flächen zwischen den Streifen blieben unbehandelt.

In Laborexperimenten wurde die Ausprägung der Infektion von Weizenpflanzen (*Triticum aestivum*, Sorte "Kanzler") mit Mehltau (*Blumeria* [syn. *Erysiphe*] *graminis* DC. f. sp. *tritici* March.), Gelbrost (*Puccinia striiformis* West.) und Fusarium (*Fusarium* spec.) analysiert.

Chlorophyllfluoreszenz- (bild-) analyse

In dem Cyclamenexperiment und den Laboruntersuchungen an Weizen wurde das offene Chlorophyllfluoreszenzbildanalysesystem FluorCam 690MF (Photon Systems Instruments, Brno, Tschechische Republik) genutzt (NEDBAL *et al.* 2000a, HERPPICH 2001, 2002, AULICH und NORDMEYER 2004). Dieses System besteht aus zwei LED-Einheiten (345 orange LED, $\lambda_{\max} = 620$ nm), einer Sättigungspulslampe (Halogenlampe 250 W, mit elektronisch gesteuertem Verschluss), einer CCD-Kamera, der Steuereinheit und einem PC.

In dem Feldversuch an Weizen wurde das puls-amplituden-modulierte Fluorometer Mini-PAM (H. Walz GmbH, Effeltrich, Deutschland) eingesetzt. Mit einem speziellen Messprotokoll wurden an denselben Blättern Informationen über die maximale (F_v/F_m) bzw. momentane ($(F_m' - F_t) / F_m'$, vgl. VON WILLERT *et al.* 1995) photochemische Effizienz und die photosynthetische Elektronenflussrate als Maß für die maximale Photosyntheseleistung erfasst.

3. Ergebnisse und Diskussion

Pflanzenstärkungsmittel als Prophylaxe gegen die Fusarium-Welke-Krankheit

Ausgehend vom Stängelgrund verstopfen Fusarium-Pilze, wie etwa *Fusarium oxysporum* f. sp. *Cyclaminis*, die Leitungsbahnen, greifen die Rinde an, entwickeln starke Toxine und töten die befallenen Pflanzen. In einem mehrjährigen Experiment in der Abteilung Landwirtschaft und Gartenbau (Landesamtes für Verbraucherschutz und Landwirtschaft) wurde untersucht, ob Pflanzenstärkungsmittel bei Alpenveilchen mit unter-

schiedlichen Blütenfarben die Anfälligkeit gegen die Fusarium-Welke-Krankheit verringern können. Pflanzenstärkungsmittel dürfen keine direkte Schutzwirkung gegen Krankheiten hervorrufen, sondern sollen die Pflanzen durch Erhöhen ihrer Widerstandsfähigkeit gegen Schadorganismen schützen. Das heißt, Pflanzenstärkungsmittel sind keine zulassungspflichtigen Pflanzenschutzmittel. FZB24® WG nutzt beispielsweise den natürlich vorkommenden Gemeinen Heubazillus "*Bacillus subtilis*", während Vitalin Trichoderma T50 den Pilz *Trichoderma harzianum* enthält. Beide Organismen sollen die pflanzliche Resistenz gegen pilzliche Phytopathogene durch antagonistisches Wachstum sowie durch Ausscheidungen natürlicher, wachstumsregulierender Antibiotika, Enzyme und Phytohormone steigern.

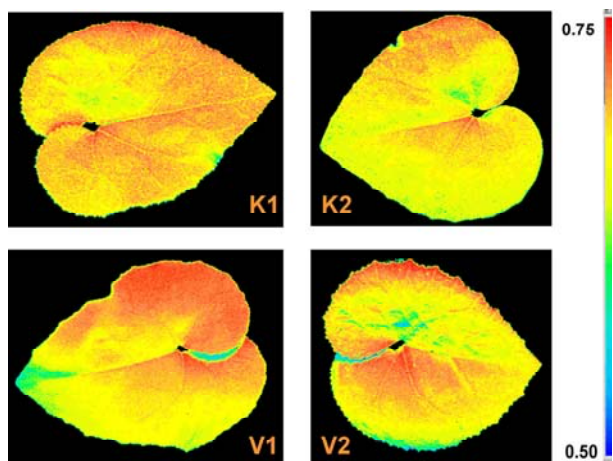


Bild 1: Falschfarbendarstellung der Chlorophyllfluoreszenzbilder (F_v/F_m) der Blätter von nicht infizierten (K1), infizierten (K2), infiziert und mit FZB24 (V1) bzw. mit Vitalin T50 behandelten scharlachrot blühender Alpenveilchen (*Cyclamen persicum* Mill.) der Hybridsorte Sierra

Ein Befall der Alpenveilchen mit *Fusarium oxysporum* f. sp. *Cyclaminis* bedingt keine direkte Auswirkungen auf die Photosyntheseaktivität der Blätter und zwar unabhängig von der Messposition (Bild 1). Dagegen ist jedoch ein leichter Trend offensichtlich, dass rot blühende Pflanzen die höchste potentielle photochemische Effizienz oder auch potentielle photosynthetische Leistungsfähigkeit besitzen, weiß blühende Pflanzen immer die niedrigste (Bild 2). Insgesamt ist die photosynthetische Leistungsfähigkeit aller untersuchten Pflanzen, unabhängig ob infiziert oder nicht, ob mit Pflanzenstärkungsmittel behandelt oder nicht, sehr niedrig. In vielen Studien konnte gezeigt werden, dass gesunde leistungsfähige Pflanzen ein F_v/F_m von ca. 0.83 aufweisen (VON WILLERT *et al.* 1995). Der Mittelwert der potentiellen photochemischen Effizienz der gemessenen Alpenveilchen betrug nur 0.66 ± 0.03 .

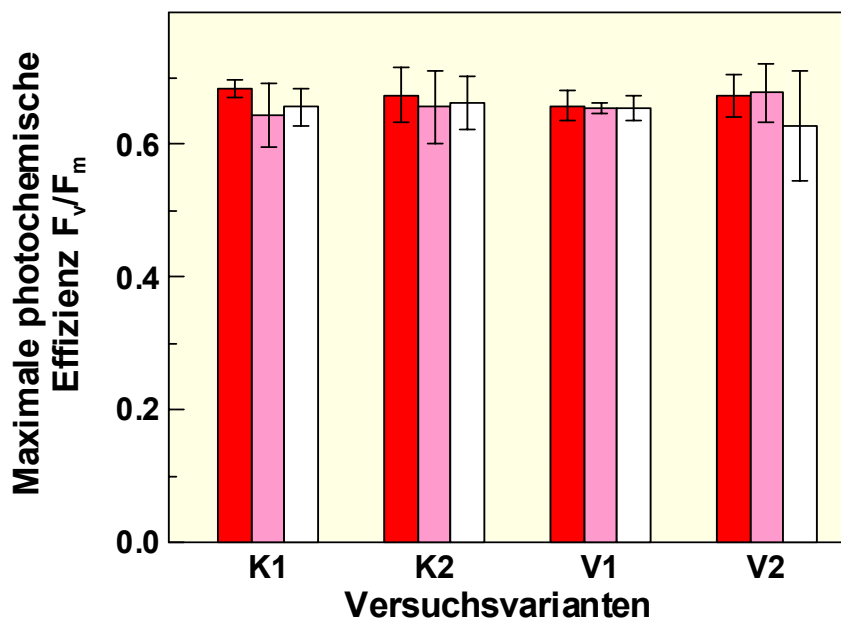


Bild 2: Über die gesamten Blätter gemittelte F_v/F_m -Werte der Blätter von nicht infizierten (K1), infizierten (K2), infiziert und mit FZB24 (V1) bzw. mit Vitalin T50 behandelten weißen, rosa und scharlachrot blühenden Alpenveilchen (*Cyclamen persicum* Mill.) der Hybridsorte Sierra

Bei Erkrankung von *Cyclamen* mit Fusarium-Welke können Pflanzenstärkungsmittel offensichtlich nicht erfolgreich angewendet werden. Dies deckt sich mit Wachstumsanalysen (E Hetz, unveröffentlichte Ergebnisse), die ebenfalls keine zweifelsfreie Wirkung zeigten. Dagegen berichtet ELLNER (2003), dass die regelmäßige Anwendung von Pflanzenstärkungsmittel bei verschiedenen Gemüsearten zur Vorbeugung gegen pilzliche Infektionen helfen soll.

Weizenmischinfektion (*Septoria tritici* und *Drechslera tritici-repentis*)

Pilzinfektionen richten in der Landwirtschaft großen Schaden an. Die landwirtschaftlichen Produkte werden ungenießbar und können zum Teil auch nicht als Futtermittel verwendet werden. Eine schnelle Felduntersuchung, die keine Probenvorbereitung benötigt, mit kürzesten Messzeiten auskommt, robust ist und die Möglichkeit zur Automatisierbarkeit bietet, ist in der Chlorophyllfluoreszenzanalyse gegeben. Damit sollten Voraussagen über das Fortschreiten und das Ausmaß des Befalls ermöglicht werden.

Wie vergleichende Untersuchungen in Beständen mit Pilzmischbefall und in gesunden bzw. mit Fungiziden behandelten Flächen zeigten, lässt sich die Beeinflussung der physiologischen Aktivität befallener Pflanzen mit dieser Methodik relativ eindeutig nachwei-

sen (Bild 3). In dem vorgestellten Versuchsjahr (2003) war der Befall sehr schwach ausgeprägt und die Symptome fast nur ausschließlich an den unteren Blättern zu finden. Dennoch wiesen unbehandelte Pflanzen speziell am Anfang des Untersuchungszeitraumes eine deutlich niedrigere maximale photosynthetische Effizienz auf (Bild 3A). Mit fortschreitender Entwicklung der Pflanzen wurde der Unterschied immer geringer, und die tatsächliche photosynthetische Effizienz war bei behandelten und unbehandelten Pflanzen oft gleich (Bild 3B). Auch eine ausgeprägte heiße Trockenperiode zwischen dem 170. und dem 180. Kalendertag verstärkte die unterschiedlichen Reaktionen der Versuchspflanzen nicht.

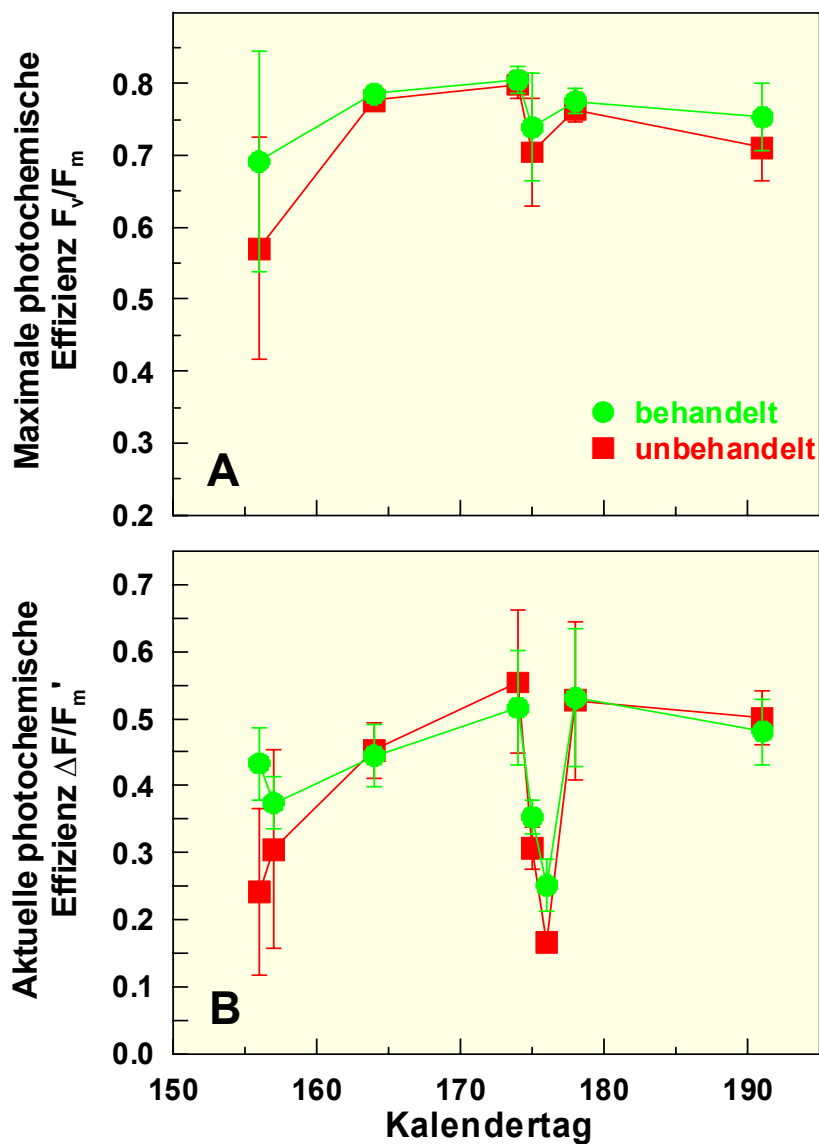


Bild 3: Maximale photochemische Effizienz (A) bzw. tatsächliche photochemische Effizienz von unbehandelten Weizenpflanzen (Quadrate) mit Pilzmischinfektion und von Pflanzen, die mit Fungizid behandelt wurden (Kreise)

Alle Messungen, auch die bei den infizierten Pflanzen, wurden an grünen Blattbereichen durchgeführt, die noch nicht von dem Pathogen zerstört waren. Obwohl die eigentliche Wirkung der unterschiedlichen Schaderreger ausgeprägt lokal begrenzt ist (ESFELD *et al.* 1995, SCHOLES & ROLFE 1996), wird auch in den scheinbar oder tatsächlich pathogenfreien Blattbereichen die Photosyntheseleistung beeinflusst (Bild 4), allerdings nicht jede der photosynthetischen Teilkomponenten in gleichem Maße (SCHOLES & ROLFE 1996, MEYER *et al.* 2001). Das jeweilige Ausmaß die Inhibierung hängt nicht zuletzt auch von den trophischen Charakteristiken der Pilze ab (SCHOLES & ROLFE 1996, BASSANEZI *et al.* 2001, 2002).

Wegen dieser z. T. schaderregerspezifischen Effekte ist durch Spotmessungen mit den herkömmlichen Fluorometern (VON WILLERT *et al.* 1995) eine ausreichende Genauigkeit nur durch die deutliche Erhöhung des Probenumfangs bzw. der Anzahl der Messungen zu erzielen (MATSCHKE *et al.* 1996, HERPPICH 2001, 2002). Hier bietet die Chlorophyllfluoreszenzbildanalyse schon klare Vorteile, wenn es um die Analyse von Blättern und Einzelpflanzen geht (DALEY *et al.* 1989, BALACHANDRAN *et al.* 1994, ROLFE & SCHOLES 1995, SOUKUPOVÁ *et al.* 2003).

Chlorophyllfluoreszenzbildanalyse unterschiedlicher Weizeninfektionen

Die lokal ausgeprägte Schadwirkung der Pathogene wird bei einem Vergleich von Digitalaufnahmen sowie Falschfarbenfluoreszenzbildern der maximalen Fluoreszenz F_m , der Grundfluoreszenz F_0 und der maximalen photochemischen Effizienz F_v/F_m einer *Fusarium*- (*Fusarium spec.*) infizierten Weizenpflanze sehr deutlich (Bild 4). Während die nicht infizierten ganzen Blätter nicht nur gesund grün aussehen, sondern, wie die maximale photochemische Effizienz zeigt, auch sehr aktiv sind, ist der scheinbar noch infektionsfreie Teil des befallenen Blattes doch deutlich in Mitleidenschaft gezogen und weist eine ungleich verteilte und unterschiedlich stark reduzierte Photosynthesekapazität auf. Der Vergleich dieser Aufnahmen zeigt auch, dass die Messung der momentanen Fluoreszenz (hier F_m) zur richtigen vollständigen Interpretation der Befallswirkung nicht ausreicht. Die maximale Fluoreszenz ist gerade am infizierten Blatt am höchsten, obwohl hier die potentielle Photosyntheseleistung geringer ist als in den gesunden Blättern. Alle diese Informationen der Falschfarbenfluoreszenzbilder sind aus den normalen digitalen Farbaufnahmen nicht ersichtlich.

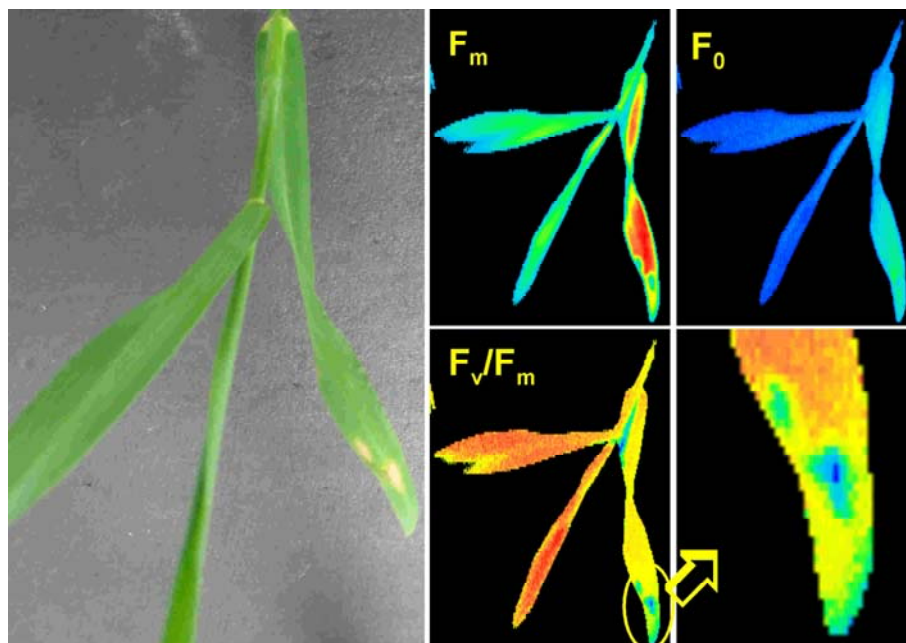


Bild 4: Digitalaufnahmen sowie Falschfarbenfluoreszenzbilder (maximale Fluoreszenz F_m , Grundfluoreszenz F_0 und maximale photochemische Effizienz F_v/F_m) einer *Fusarium spec.* infizierten Weizenpflanze. Gezeigt wird auch eine Detailaufnahme (F_v/F_m) der lokalen Pathogenwirkung

Schwieriger wird die Interpretation, wenn man ganze Pflanzenbestände untersucht, wie im Vergleich der Digitalaufnahmen und der Fluoreszenzbilder (maximale photochemische Effizienz F_v/F_m) von Gelbrost (*Puccinia striiformis* West.) infizierten bzw. unbehandelten Weizenpflanzen (Bild 5) dargestellt. In diesem Laborexperiment zeigte sich, dass die deutlich befallenen Pflanzen in vielen Bereichen eine geringere Photosynthesekapazität aufweisen als der nicht infizierte Bestand. Diese Bereiche mit niedrigen F_v/F_m -Werten werden oft von solchen mit hohen überdeckt, was eine Auswertung der Fluoreszenzbilder erschwert.

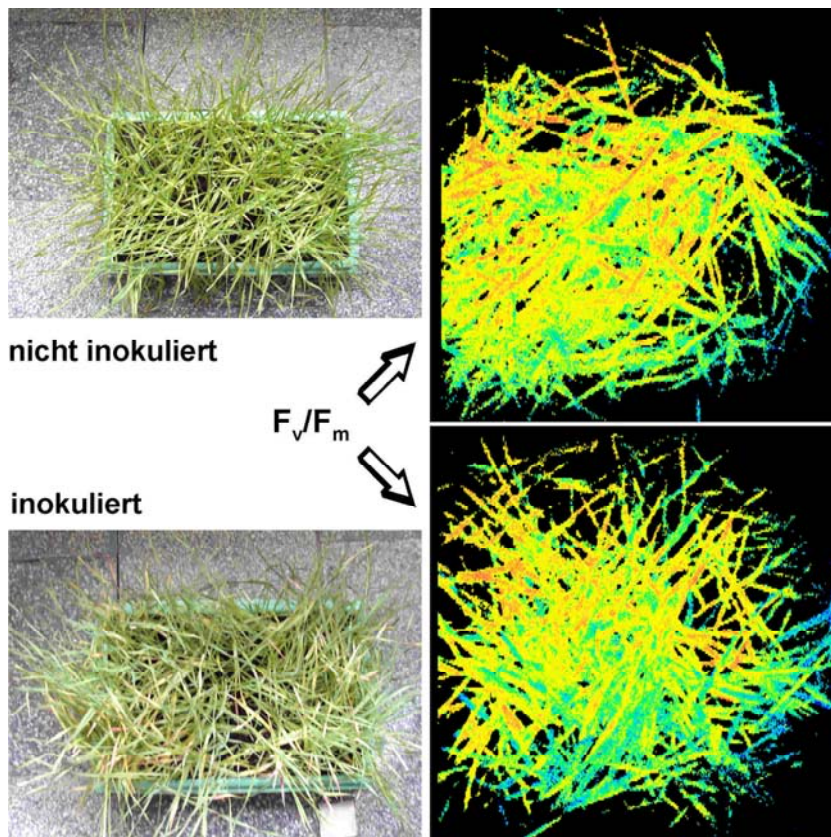


Bild 5: Digitalaufnahmen sowie Fluoreszenzbilder (maximale photochemische Effizienz F_v/F_m) von Gelbrost (*Puccinia striiformis* West.) infizierten (unten) bzw. unbehandelten Weizenpflanzen (oben)

Dennoch zeigt schon die Pixelverteilung der unverarbeiteten Daten der maximalen photochemischen Effizienz infizierter Weizenpflanzen eine breitere Werteverteilung als bei den unbehandelten Pflanzen (Bild 6A). Eine Vorverarbeitung der F_v/F_m -Daten durch einfache Bildung des gleitenden Mittelwertes erlaubt eine weitergehende statistische Analyse mehrerer Fluoreszenzaufnahmen (Bild 6B). Die gemittelte maximale photochemische Effizienz infizierter Weizenpflanzen weist auch hierbei eine größere Verteilungsbreite auf, als die der gesunden Pflanzen. Allerdings ist der Unterschied statistische nicht signifikant. Eine direkte Auswertung der Mittelwerte der maximalen photochemischen Effizienz könnte in diesem Beispiel zu einer Fehlinterpretation führen, da die F_v/F_m -Werte des infizierten Bestandes höher waren als bei den gesunden Pflanzen. Die hier gezeigten Ergebnisse verdeutlichen, dass sich mit einer optimierten Bildanalyse unter Verwendung statistischer Ansätze eine gute Erkennungsrate erzielen lässt.

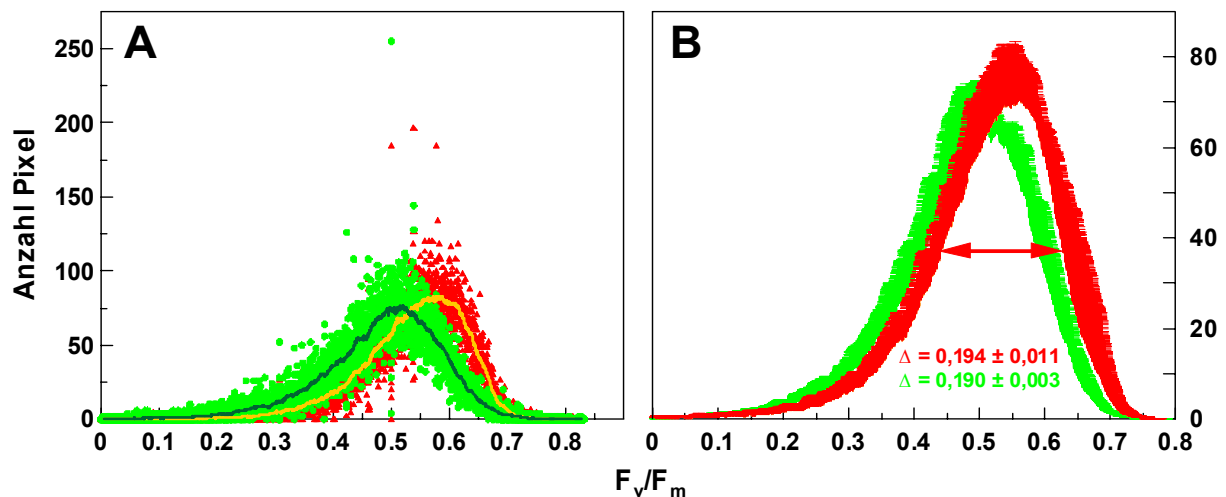


Bild 6: Pixelverteilung der Werte der maximalen photochemischen Effizienz F_v/F_m . Gezeigt sind die mit dem System gemessenen unverarbeiteten Daten (A) bzw. durch einfache Bildung des gleitenden Mittelwerts vorverarbeiteten Daten von Gelbrost (*Puccinia striiformis* West.) infizierten (rot) bzw. unbehandelten Weizenpflanzen (grün)

Zu ähnlichen Schlussfolgerungen kamen auch BODRIA *et al.* (2002) und BRAVO *et al.* (2002) an künstlich mit Gelbrost infizierten Weizenpflanzen. In diesen Feldversuchen wurde ein multispektrales Fluoreszenzbildverarbeitungssystem (BUSCHMANN & LICHTENTHALER 1997) verwendet, das gleichzeitig Bilder der momentanen Fluoreszenz im grünen (550 nm) und im roten Wellenlängenbereich (690 nm) aufzeichnet. Bei diesem System wird die Fluoreszenz mit kurzwelliger Strahlung im UV und violetten Spektralbereich (360 bis 430 nm) angeregt. Die Autoren konnten eine gute Erkennung befallener Bereiche nachweisen und eine klare Detektion der Befallsstärke erzielen. Allerdings wurden diese Untersuchungen bevorzugt nachts durchgeführt, da direktes und diffuses Sonnenlicht die Aufnahmen beeinflusst (BODRIA *et al.* 2002). In diesem Fall sollte die Nutzung eines optimierten puls-amplituden-modulierten Chlorophyllfluoreszenzbildanalyse-systems von Vorteil sein, das sowohl den direkten als auch den indirekten Einfluss der Strahlung auf die Fluoreszenzmessung verringern kann. Wie BRAVO *et al.* (2002) in weiterführenden Untersuchungen zeigten, kann die Qualität und die Genauigkeit der Detektion des Pathogenbefalls durch Kombination der Fluoreszenzbildverarbeitung mit anderen optischen Methoden deutlich erhöht werden.

4. Schlussfolgerung

Die Chlorophyllfluoreszenzbildanalyse erlaubt die zerstörungsfreie, berührungslose und umfassende Analyse pflanzlicher Reaktionen auf pilzliche Phytopathogene. Dies gilt speziell für Untersuchungen der direkten und indirekten Auswirkungen der Pathogene auf die Aktivität und Integrität der Photosynthese von Blättern und Einzelpflanzen. Auf diese Weise kann man mit großer Genauigkeit die räumliche und zeitliche Dynamik der Pathogenwirkung während und nach der Infektion aufzeigen. Die multispektrale Fluoreszenzbildanalyse und die Chlorophyllfluoreszenzbildanalyse sind gut geeignet, Befallsdichte und Befallsstärke in Pflanzenbeständen zu erfassen. Allerdings besteht hier sowohl bei den Fluoreszenzbildverarbeitungssystemen selbst als auch bei der Verarbeitung und Auswertung der Daten noch großer Entwicklungsbedarf, um diese Methode für den online Einsatz geeignet zu machen. Durch Kombination von Fluoreszenzbildverarbeitung mit anderen optischen Methoden lässt sich die Genauigkeit der Pathogenbefallsanalyse auch im online Einsatz deutlich erhöht werden.

5. Literatur

- AULICH S, NORDMEYER H (2004)** Chlorophyllfluoreszenzbildanalyse zur Differenzierung von Unkrautarten. *Bornimer Agrartechnische Berichte* 37: 7-14
- BALACHANDRAN S, OSMOND CB, DALEY PE (1994)** Diagnosis of the earliest stain-specific interaction between tobacco mosaic virus and chloroplasts of tobacco leaves in vivo by means of chlorophyll fluorescence imaging. *Plant Physiology* 104: 1059-1065
- BALACHANDRAN S, HURRY VM, KELLEY SE, OSMOND CB, ROBINSON SA, ROBOZINSKI J, SEATON GGR, SIMS DA (1997)** Concepts of plant biotic stress. Some insight into stress physiology of virus-infected plants, from the perspective of photosynthesis. *Physiologia Plantarum* 100: 203-213
- BASSANEZI RB, AMORIM L, BERGAMINS FILHO A, HAU B, BERGER RD (2001)** Accounting for photosynthetic efficiency of bean leaves with rust, angular leaf spot and anthracnose to assess crop damage. *Plant Pathology* 50: 443-452
- BASSANEZI RB, AMORIM L, BERGAMINS FILHO A, BERGER RD (2002)** Gas exchange and emission of chlorophyll fluorescence during the monocyte of rust, angular leaf spot and anthracnose on bean leaves as a function of their trophic characteristics. *Journal of Phytopathology* 150:37-47
- BODRIA L, FIALA M, OBERTI R, NALDI E (2002)** Chlorophyll fluorescence sensing for early detection of crop's diseases symptoms. ASAE paper 021114, 11 pp
- BRAVO C, MOSHOU D, OBERTI R, WEST J, MCCARTNEY A, BODRIA L, RAMON H (2002)** Detection of foliar disease in the field by the fusion of measurements made by optical sensors, ASAE paper 023087, 12 pp

- BREDEMEIER C, SCHMIDHALTER U (2003)** Non-contacting chlorophyll fluorescence sensing for site-specific nitrogen fertilization in wheat and maize. Proceedings of the 4th European Conference on Precision Agriculture, Berlin, Germany, 15-19 June 2003 103-108 2003
- BUSCHMANN C, LICHTENTHALER HK (1997)** Principles and characteristics of multi-colour fluorescence imaging of plants. *Journal of Plant Physiology* 152: 297-314
- DALEY PF, RASCHKE K, BALL JT, BERRY JA (1989)** Topography of photosynthetic activity of leaves obtained from video images of chlorophyll fluorescence. *Plant Physiology* 90: 1233-1238
- ELLNER FM (2003)** Bekämpfung von Echtem und Falschem Mehltau an Gemüse. *Gemüse* 9: 52-53
- ESFELD P, SIEBKE K, WACKER I, WEIS E (1995)** Local defense-related shift in the carbon metabolism in chicken pea leaves induced by a fungal pathogene. In: *Photosynthesis from light to biosphere*, Vol. 5 (P Mathis, ed). Kluwer Academic Publishers B.V., Dordrecht: 663-666
- FRITZMEIER UMWELTTECHNIK (2005)** MiniVeg.
http://www.fritzmeier.com/de/umwelt/umwelt_miniveg.htm
- HERPPICH WB (2000)** Interactive effects of light and drought stress on photosynthetic activity and photoinhibition under (sub-) tropical conditions. *Acta Horticulturae* 531: 135-142
- HERPPICH WB (2001)** Einsatzmöglichkeiten der Chlorophyllfluoreszenzbildanalyse in der gartenbaulichen Forschung. *Bornimer Agrartechnische Berichte* 26: 91-104
- HERPPICH WB (2002)** Application potential of chlorophyll fluorescence imaging analysis in horticultural research. In: *Fruit, Nut and Vegetable Production Engineering. Proceedings of the 6th International Symposium* (M Zude, B Herold, M Geyer, eds). Institut für Agrartechnik Bornim e.V., Potsdam: 609-614. ISBN 3-00-008305-7.
- HERPPICH, M.; HERPPICH, W. B.; VON WILLERT, D. J. (1994):** Influence of drought, rain and artificial irrigation on photosynthesis, gas exchange and water relations of the fynbos plant *Protea acaulos* (L.) Reich at the end of the dry season. *Botanica Acta* 107: S. 440-450.
- HERPPICH WB, FLACH BM-T, VON WILLERT DJ, HERPPICH M (1997)** Field investigations in *Welwitschia mirabilis* during a severe drought. II. Influence of leaf age, leaf temperature und irradiance on photosynthesis und photoinhibition. *Flora* 192: 165-174
- HERPPICH WB, MIDGLEY GF, HERPPICH M, TÜFFERS A, VESTE M, VON WILLERT DJ (1998)** Interactive effects of photon fluence rates and drought on CAM-cycling in *Delosperma tradescantoides* (Mesembryanthemaceae). *Physiologia Plantarum* 102: 148-154
- KERÄNEN M, ARO E-M, TYYSTJÄRVI E (2003)** Automatic plant identification with chlorophyll fluorescence fingerprinting. *Precision Agriculture* 4: 53-67
- MARTIN CE, TÜFFERS A, HERPPICH WB, VON WILLERT DJ (1999)** Utilization and dissipation of absorbed light energy in the epiphytic CAM bromeliad *Tillandsia ionantha*. *International Journal of Plant Science* 160: 307-313
- MATSCHKE J, AMENDA R, HERPPICH WB (1996)** Fluoreszenzmessungen an Zierpflanzen. *Gärtnerbörse* 23: 1099-1102

- MEYER S, SACCARDY-ADJI K, RIZZA F, GENTY B (2001)** Inhibition of photosynthesis by *Colletotrichum lindemuthianum* in bean leaves determined by chlorophyll fluorescence imaging. *Plant, Cell and Environment* 24: 947-955
- MOLL S, SERRANO P, BOYLE C (1995)** In vivo chlorophyll fluorescence in rust-infected bean plants. *Angewandte Botanik* 69: 163-138
- NEDBAL L, TRTILEK M, HERPPICH WB (2000a)** Methods and equipment for fluorescence imaging on plant material. *Bornimer Agrartechnische Berichte* 25: 127-135
- NEDBAL L, SOUKUPOVÁ J, WHITMARSH J, TRTILEK M (2000b)** Postharvest imaging of chlorophyll fluorescence from lemons can be used to predict fruit quality. *Photosynthetica* 38: 571-579
- NILSSON H-E (1995)** Remote sensing and image analysis in plant pathology. *Annual Review of Plant Pathology* 15: 489-457
- POMAR F, NOVO M, BERNAL MA, MERINO F, ROS BARCELO A (2004)** Changes in stem lignins (monomer composition and crosslinking) and peroxidase are related with the maintenance of leaf photosynthetic integrity during *Verticillium* wilt in *Capsicum annuum*. *New Phytologist* 163: 111-123
- ROLFE SA, SCHOLES JD (1995)** Quantitative imaging of chlorophyll fluorescence. *New Phytologist* 131: 69-79
- SANTOS ICF, DE ALMFIDA A-AF, VALLE RR (1998)** Chlorophyll fluorescence parameters characterizing the development of two cacao genotypes infected by witches' broom. *Photosynthetica* 35: 29-39
- SCHOLES JD, ROLFE SA (1996)** Photosynthesis in localised regions of oat leaves infected with crown rust (*Puccinia coronata*): Quantitative imaging of chlorophyll fluorescence. *Planta* 199: 573-582
- SOUKUPOVÁ J, SMATANOVÁ S, JEGOROV A, NEDBAL L, TRTILEK M (2002)** Fluorescence imaging as a tool for early detection of fungal stress in plants Part II: Plants responses to fungal infection and fungal toxins. In: *Fruit, Nut and Vegetable Production Engineering. Proceedings of the 6th International Symposium* (M Zude, B Herold, M Geyer, eds). Institut für Agrartechnik Bornim e.V., Potsdam: 609-614. ISBN 3-00-008305-7
- SOUKUPOVÁ J, SMATANOVÁ S, NEDBAL L, JEGOROV A (2003)** Plant response to destruxins visualized by imaging of chlorophyll fluorescence. *Physiologia Plantarum* 118: 399-405
- VON WILLERT DJ, MATYSSEK R, HERPPICH WB (1995)** *Experimentelle Pflanzenökologie: Grundlagen und Anwendungen*. Georg Thieme Verlag, Stuttgart
- WALZ H (2005)** IMAGING-PAM Chlorophyll Fluorometer
http://www.walz.com/products/fluorescence/imagingpam/menu_imagingpam.html

Fish Quality Monitoring – Bestimmung geeigneter Wellenlängen für die spektrale Signatur von digitalen Bildern

Fish Quality Monitoring – determination of suited wavelengths for the spectral signature of digital images

Michael Kroeger¹, Ingo Truppel² und Bernd Herold²

¹ Bundesforschungsanstalt für Ernährung und Lebensmittel, Palmaille 9, 22767 Hamburg

² Leibniz-Institut für Agrartechnik Potsdam-Bornim e.V., Max-Eyth-Allee 100, 14469 Potsdam

Email: michael.kroeger@it.bfa-fisch.de

Zusammenfassung: Im laufenden Verarbeitungsprozess lassen sich Informationen über den Frischezustand von Fischprodukten von der Oberfläche des Muskelgewebes abgreifen. Grundlage ist die Klassifizierung der Verteilung von Mikromustern, die von der Wellenlänge des eingestrahlten Lichts abhängig ist. Mit Hilfe von spektroskopisch signierten Bildern lassen sich Alterungsvorgänge des Gewebes simulieren und der Frischezustand bestimmen. Aus einem Reservoir von Bildern derselben Probe, die vom Ultraviolett bis zum nahen Infrarot signiert wurden, werden nur wenige (drei bis fünf) für eine Simulation gebraucht. Um Regeln für die Auswahl geeigneter Wellenlängen zu finden, wurden spektroskopische Untersuchungen an Kabeljau, Seelachs und Katfisch durchgeführt. Die Ergebnisse wurden mit der Signatur der Bilder verglichen, die für eine optimale Klassifizierung der Mikromustern geeignet waren. Hieraus lassen sich grundlegende Vorgehensweisen für zukünftige Signaturen festlegen.

Deskriptoren: Spektroskopie, Mustererkennung, Fischqualität

Summary: *During processing information about freshness is read out from surface of semifinished seafood products. Basis is the classification of distribution of wavelength dependent micropatterns. By help of spectroscopic signed images the aging of tissue is simulated and freshness is determined. From a reservoir of images of the same sample signed from ultraviolet to near infrared only three to five images are needed for a simulation. To get rules for selection of suitable wavelengths spectroscopic investigations were carried out on cod, saithe (pollack) and catfish. Results were compared with the signature of images for the best classification of micro patterns. From this basic procedures for spectroscopic signatures are derived.*

Keywords: *spectroscopy, pattern recognition, fish quality*

1. Einleitung

In der Verarbeitungs- und Handelskette von Seafood-Produkten werden begleitende Produktinformationen zum Verbraucher weitergegeben. Gemäß einer Durchführungsverordnung der EU-Kommission besteht eine Etikettierungspflicht für Handelsbezeichnungen der jeweiligen Fisch-, Krebs- oder Weichtierart, für die Produktionsmethode (Seefischerei, Binnenfischerei, Aquakultur) und für das Fanggebiet. Nach dem Fang und der Sortierung nach Fischarten und Größe an Bord von Schiffen werden Halbfertigprodukte für die Weiterverarbeitung hergestellt und in Kühlhäusern zwischengelagert. Zwischenlagerung und Handel von Rohprodukten sind mit möglichem Informationsverlust wie Lagerzeit, Lagertemperatur usw. verbunden und erfordern eine Qualitätskontrolle als erstem Schritt bei der Erzeugung von Endprodukten. Qualität wird von Experten in sensorischen Kontrollen und einer Kombination aus chemischen, physikalischen und mikrobiologischen Methoden ermittelt. Sämtliche Methoden sind zeitaufwendig und eignen sich nur für Stichproben. Eine Sonderstellung nehmen Bildverarbeitungsmethoden ein. Sie erlauben das Abgreifen von Qualitätsinformationen von der Oberfläche des Rohproduktes im laufenden Verarbeitungsprozess und liefern Aussagen über den Alterungs- oder Frischezustand (KROEGER 2003). Grundlage ist die Klassifizierung von Mikromustern des Muskelgewebes, die von der Wellenlänge des eingestrahnten Lichts abhängig ist. Mit Hilfe von spektroskopisch signierten Bildern lassen sich Alterungsvorgänge des Gewebes simulieren und der Frischezustand bestimmen (HEROLD *et al.* 2004). Aus einem Reservoir von Bildern derselben Probe, die vom Ultraviolett bis zum nahen Infrarot signiert wurden, werden nur wenige (drei bis fünf) für eine Simulation gebraucht. Welche der Wellenlängen des eingestrahnten Lichtes von Bedeutung sind, wurde bislang durch Versuch und Irrtum mit Testdatensätzen für eine Fischart festgelegt. Hier werden Untersuchungen über grundlegende spektroskopische Eigenschaften von Fischfilets beschrieben. Ziel ist die Entwicklung einer Auswahlstrategie von geeigneten Wellenlängen für den Mustererkennungsprozess.

2. Material und Methoden

Untersuchungen erfolgten an Fischproben von Kabeljau, Seelachs und Geflecktem Katfisch aus der Barentssee sowie von Kabeljau aus der Ostsee. Die Fischproben aus der Barentssee wurden tiefgefroren. Sie wurden etwa ein Jahr gelagert und am Messtermin aufgetaut. Die Proben aus der Ostsee wurden nach dem Fang auf Eis gelagert und waren fünf Tage bzw. vierzehn Tage alt. Aus dem Fisch wurden längs geteilte Proben hergestellt.

Die Messung erfolgte am Filet, das heißt nach Entfernen der Haut. Jede der längs geteilten Proben wurde an 7 Stellen gemessen: 3x längs nebeneinander auf der Seite oberhalb der Seitenlinie, 2x nebeneinander direkt auf der Seitenlinie, und 2x unterhalb der Seitenlinie.

2.1. Mustererkennung

Die Identifizierung des Alterungszustandes vom Muskelgewebe wird durch Messung der lokalen parallelen Anordnung der Myofibrillenmuster vorgenommen (KROEGER 2004). Dazu wird innerhalb einer Filtermaske eine Orientierungsanalyse durchgeführt, die rotationsinvariante lokale Kohärenz bestimmt und durch Verschiebung der Filtermaske über das gesamte Bild ein Verteilungsmuster erzeugt (JÄHNE 1997). Die Bestrahlung der Probe mit monochromatischem Licht verschiedener Wellenlängen führt zu unterschiedlichen Kohärenzverteilungsmustern. In den Untersuchungen wurden die Proben sequentiell mit Licht von 12 verschiedenen Wellenlängen im Bereich von 400 nm bis 940 nm bestrahlt, daraus ein Vielkanalbild erzeugt und die Kohärenzverteilungskurve für jede Wellenlänge bestimmt. Für die Zuordnung des Vielkanalbildes zu einer Alterungsstufe werden nur 3 bis 5 Kanäle benötigt, von den zugeordneten Verteilungskurven sind 8 bis 10 äquidistante Punkte hinreichend für eine Auswertung. Aus den Verteilungspunkten der benötigten Kanäle wird ein Eingabevektor für einen Klassifikator generiert. Die Anwendung von neuronalen Netzen, Principle Component Analysen oder Partial Least Square Methoden führt zu gleichen Ergebnissen bei der Bestimmung der Lagerzeit.

2.2. Spektroskopie

Zur optischen Spektralmessung wurde ein Glasfaser-Spektrometer tec5 VIS-NIR Spektrometer für Bereich 400 bis 1000 nm mit Sonde für partielle Lichttransmission eingesetzt. Die Messungen erfolgten im Laborkeller bei gedämpftem Licht (nur Außenlicht ohne direkte Sonneneinstrahlung). Um störendes Fremdlicht weitgehend zu unterdrücken, wurden darüber hinaus während der Messungen die Proben durch dunkle Folie abgeschattet.

Die Sonde für partielle Lichttransmission bestand aus zwei nahezu parallel ausgerichteten Lichtleitern, deren Enden im Abstand von 10 mm stumpf auf die Probe aufgesetzt wurden. Einer der beiden Lichtleiter führt Licht von einer Halogenglühlampe direkt in die Probe. Der

andere Lichtleiter nimmt aus der Probe zurück gestreutes Licht auf und führt dieses Licht zum Spektrometer. Um die Sonden gegen Verschmutzung zu schützen, wurde vor die Front der Lichttransmissionssonde eine dünne Klarsicht-Haushaltsfolie gelegt. Das Spektrometer wurde mit diesen Vorkehrungen vor der Messreihe mit einem Weißstandard (partielle Transmission an Teflon-Halbkugel) kalibriert.

Die Bewertung der spektralen Messdaten erfolgte qualitativ an Hand der Kennlinien der spektralen Signatur im Wellenlängenbereich von 400 bis 1000 nm. Es zeigte sich, dass die Beleuchtungsintensität der Halogenglühlampe speziell im kurzwelligen Bereich zwischen 400 und 500 nm relativ schwach war und deshalb die Messdaten ein markantes Rauschen aufwiesen. Die Möglichkeit auf die Analyse von Derivativspektren zurückzugreifen, war dadurch nur beschränkt möglich.

3. Ergebnisse

Die drei Fischarten unterschieden sich in ihren spektralen Signaturen im Wellenlängenbereich von 400 bis 1000 nm. Jedoch zeigten die spektralen Signaturen der einzelnen Messstellen innerhalb einer Fischart eine hohe Variabilität.

Bei Proben von Kabeljau unterschiedlichen Alters wurden mehr oder weniger stark ausgeprägte Absorptionsbanden insbesondere im kurzwelligen Bereich um 425 nm, aber auch um 550 nm und um 600 nm festgestellt (Bild 1). Diese Wellenlängenbereiche könnten geeignete Ansatzpunkte für die Auswahl von Filtern für die Kamerabild-Auswertung liefern. Im langwelligen Bereich war erwartungsgemäß um 980 nm die Absorptionsbande des Wassermoleküls (OH-Schwingung) zu finden.

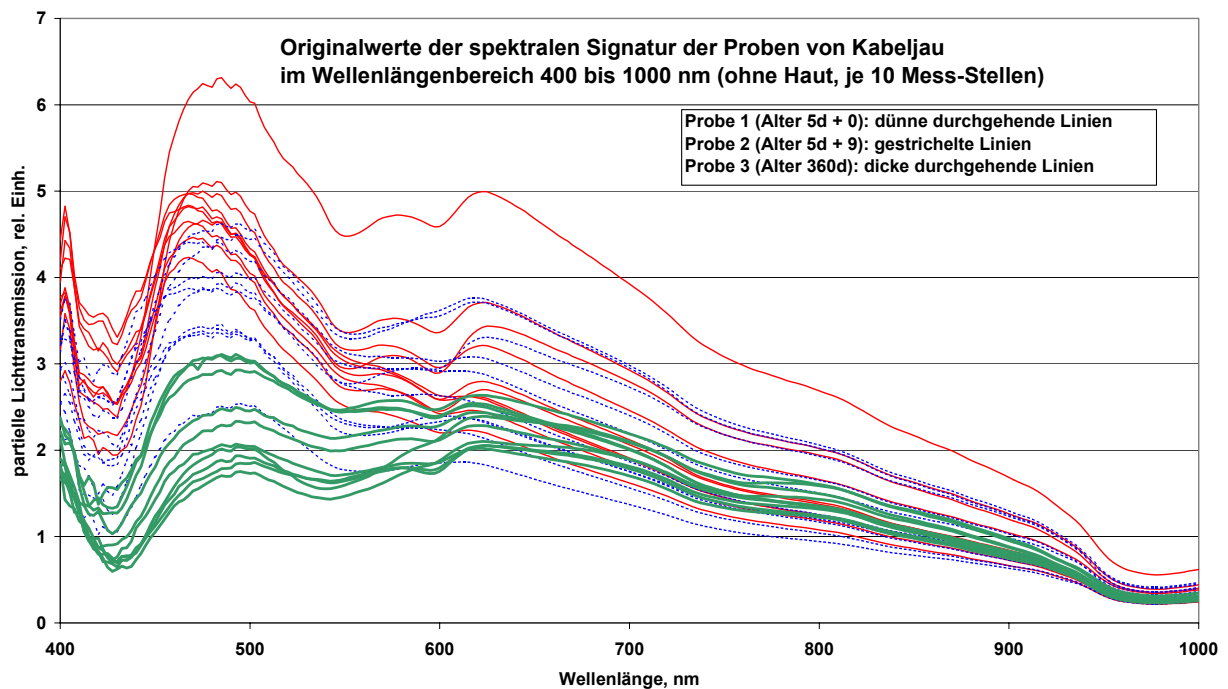


Bild 1: Spektrale Signatur der partiellen Lichttransmission von Kabeljauproben unterschiedlichen Alters

Bei Proben von Seelachs war eine besonders hohe Variabilität der spektralen Signaturen festzustellen (Bild 2). Die Mehrzahl der Messungen zeigte eine ähnliche Charakteristik wie bei Kabeljau mit Absorptionsbanden um 425 nm, um 550 nm und um 600 nm. Bei einigen Mess-Stellen lag jedoch eine stark verbreiterte Absorption zwischen 425 und 600 nm vor, auf der die schmalen Absorptionsbanden kaum noch oder überhaupt nicht mehr differenzierbar waren. Darüber hinaus war wieder um 980 nm die Wasserabsorptionsbande vorhanden.

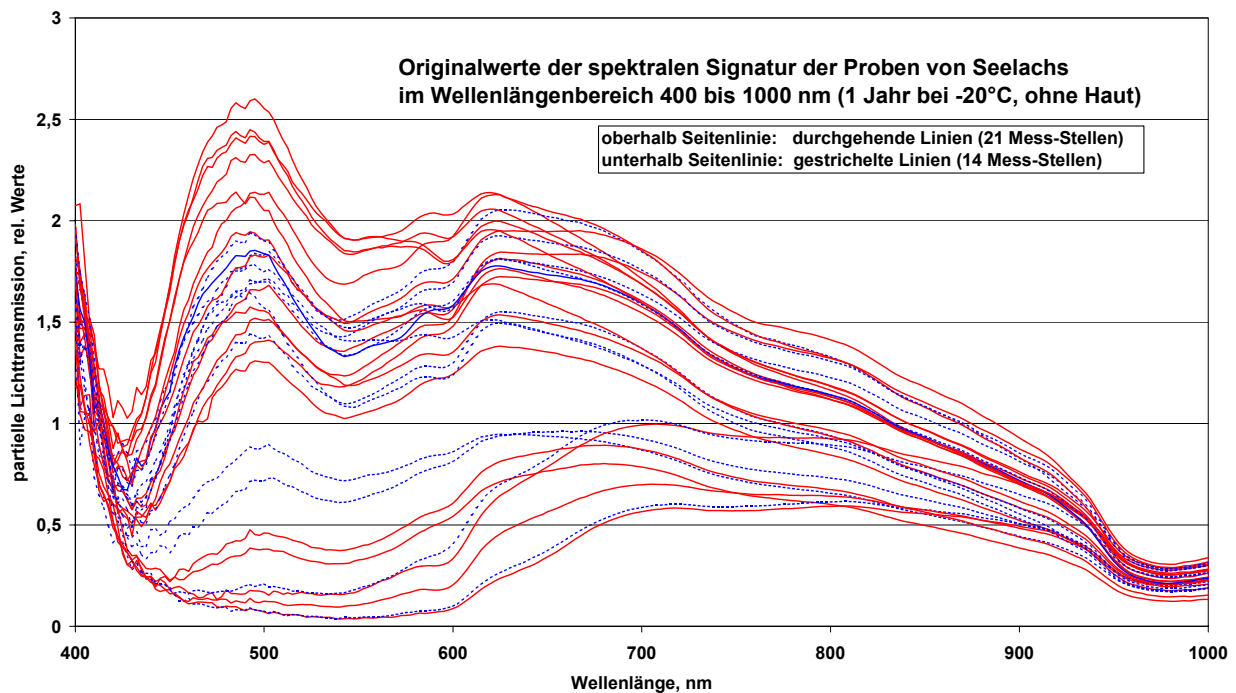


Bild 2: Spektrale Signatur der partiellen Lichttransmission von Seelachsproben

Bei Proben von geflecktem Katfisch war ebenfalls ein relativ breite Absorption zwischen 425 und 600 nm festzustellen, wobei in allen Fällen eine zusätzliche schwache Absorptionsbande um 600 nm erkennbar war (Bild 3). Daneben war wiederum um 980 nm die Wasserabsorptionsbande zu finden. Die Variabilität der Messung war geringer, wobei auch eine geringere Anzahl von Messungen vorlag.

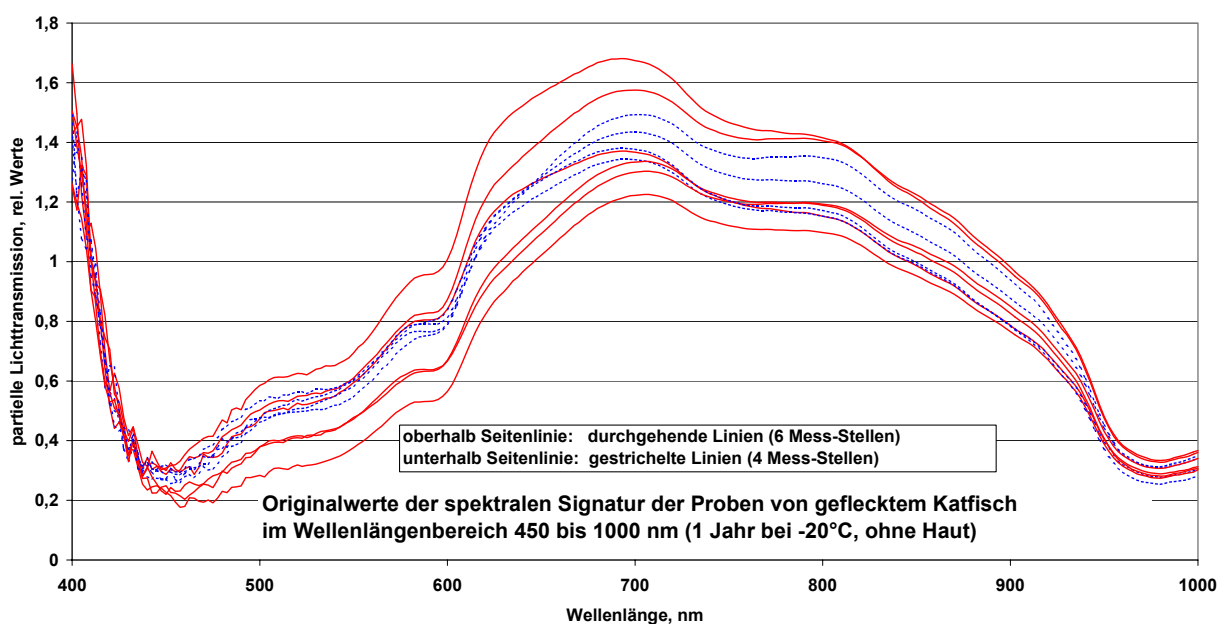


Bild 3: Spektrale Signatur der partiellen Lichttransmission von Proben von geflecktem Katfisch

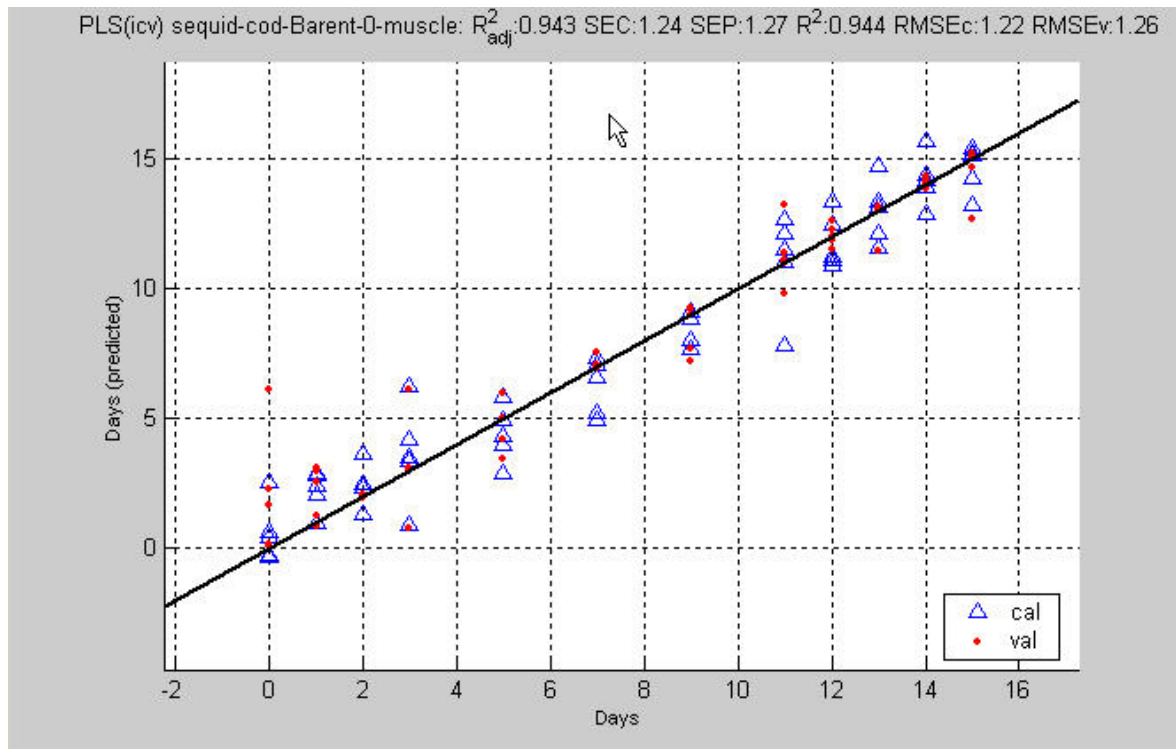


Bild 4: Bestimmung der Lagertage von Kabeljau aus signierten Bildern mit den Wellenlängen 470 nm, 505 nm, 525 nm und 570 nm

Im parallel durchgeführten Bildverarbeitungsprozess wurden Bilder mit den Wellenlängen 400 nm, 470 nm, 505 nm, 525 nm, 570 nm, 595 nm, 612 nm, 633 nm, 660 nm, 850 nm, 880 nm, 940 nm signiert. Die spektroskopischen Untersuchungen haben die Erfahrung bestätigt, dass für die Klassifizierung des Alterungszustandes von Muskelgewebe bei allen untersuchten Fischarten kleinere Wellenlängen mehr Informationen beinhalten als Wellenlängen im nahen Infrarot. Sämtliche bis jetzt untersuchten Proben von insgesamt 12 Fischarten benötigten Bilder mit einer Signatur bei 470 nm und 505 nm oder 525 nm. Die spektroskopischen Daten von Kabeljau (Bild 1) und Seelachs (Bild 2) zeigen, dass die signierten Bilder nur dann einen Beitrag zur Klassifizierung leisten können, wenn sich die Unterschiede zwischen den verschiedenen Lagerzeiten in hinreichenden Differenzen zwischen den Lichttransmissionswerten bemerkbar machen. Aus den Abbildungen ist ersichtlich, dass hinreichende Differenzen bei Kabeljau und Seelachs nur im Wellenlängenintervall von 425 nm bis ca. 750 nm gegeben sind. Eine Klassifikation muss sich daher auf Bilder stützen, die mit Wellenlängen aus diesem Bereich signiert wurden. Bild 4 zeigt die Bestimmung der Lagerzeit für Kabeljau für die Signaturkombination 470 nm, 505 nm, 525 nm und 570 nm. Aus Bild 5 ist die Abhängigkeit des Ergebnisses von der Signaturkombination

zu ersehen. Für Seelachs und Katfisch wurde die Signatur 470 nm, 505 nm und 633 nm bzw. 470 nm, 612 nm und 633 nm ermittelt.

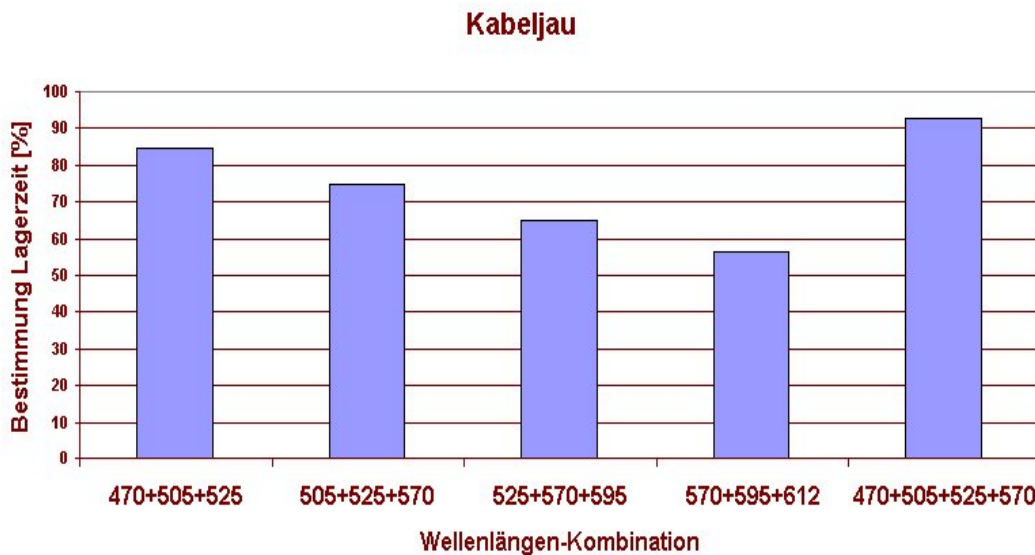


Bild 5: Abhängigkeit der Bestimmung der Lagerzeit von Kabeljau von der Signaturkombination

4. Schlussfolgerungen

Die Bestimmung des Alterungs- oder Frischezustandes von Fischfilets mit Bildverarbeitungsmethoden führt nur dann zu Ergebnissen, wenn durch eine spektrale Signatur der Bilder hinreichende Informationen für eine Klassifikation bereitgestellt werden. Experimentell wurden Bilder durch sequentielle Beleuchtung der Proben mit monochromatischem Licht von 12 verschiedenen Wellenlängen im Intervall 400 nm bis 940 nm signiert. Für die Klassifikation werden davon nur 3 bis 5 Bilder benötigt, die für optimale Ergebnisse eine Auswahlstrategie erfordert. Spektroskopische Untersuchungen am Kabeljau, Seelachs und Katfisch hatten das Ziel, den Auswahlprozess zu systematisieren und grundlegende Regeln für die Signatur aufzustellen. Obwohl nur wenig Fischarten untersucht wurden, haben die bislang gemachten Erfahrungen im Rahmen der Bildverarbeitung und Mustererkennung eine Erklärung erfahren und Hinweise für zukünftige Signaturverfahren gegeben. Insbesondere konnte gezeigt werden, dass nur Wellenlängen im Bereich 425 nm bis ca. 750 nm hinreichende Unterschiede der Lichttransmission für Filets verschiedenen Frischegrades liefern. Diese Unterschiede aber sind für eine Klassifikation der Mikromuster notwendig. Für die drei untersuchten Fischarten wurden keine signierten Bilder aus dem Bereich des nahen Infrarot benötigt. Die Signaturen für Kabeljau (470 nm, 505 nm, 525 nm, 570 nm), Schellfisch (470 nm, 505 nm und 633 nm) und Katfisch (470 nm, 612 nm

und 633 nm) zeigen in Übereinstimmung mit den spektroskopischen Untersuchungen, dass eine Signatur außerhalb der Absorptionsbande bei 425 nm stattfinden muss.

5. Literatur

HEROLD B, TRUPPEL I, ZUDE M, GEYER M (2004) Spektrale Signatur und Qualität von Äpfeln während der Fruchtentwicklung am Baum. Bornimer Agrartechnische Berichte 37, S. 144-152

JÄHNE B (1997) Digital Image Processing. Vlg. Springer , Berlin

KROEGER M (2003) Image analysis for monitoring the quality of fish. Wageningen Academic Publishers, Wageningen, pp 211-224

KROEGER M (2004) Optische Differenzierung von Wildlachs und Zuchtlachs. Bornimer Agrartechnische Berichte 37, S. 83-94

Anwendung der Spektralanalyse für den Präzisions-Gartenbau am Beispiel einer Citrusanlage

NIRS as a tool for precision horticulture in the citrus industry

Manuela Zude¹, Andrew Lee², Bernd Herold¹, Craig Kaprielian²

¹Leibniz - Institut für Agrartechnik Potsdam-Bornim e.V., Max-Eyth-Allee 100, 14469 Potsdam

²Fruit World Nursery Inc., 9234 S. Alta Ave, Reedley, CA 93654, USA

E-mail: zude@atb-potsdam.de

Zusammenfassung: Um zum Zeitpunkt der Ernte eine homogene Fruchtqualität zu erreichen, werden derzeit 2 Konzepte favorisiert: Intensiver, geschützter und ggf. hydroponischer Anbau (wie von der Fruit World Nursery entwickelt) oder eine teilflächenspezifische Bewirtschaftung in Anlagen mit Fertigungsmöglichkeit.

In beiden Produktionssystemen erfolgten im vorliegenden Projekt Tests zur zerstörungsfreien Analysen der Fruchtqualität. Als Qualitätsparameter wird im Citrusanbau vorrangig der Gehalt an löslicher Trockensubstanz zerstörend mit dem Refraktometer bestimmt, wodurch eine Überwachung einzelner Früchte in wiederholten Messungen nicht möglich ist. In der Erntesaison 2004/2005 wurde die NIR Spektrometrie als eine für Citrus neu verfügbare, zerstörungsfreie Methode an 8 Sorten in hydroponischem Anbausystem unter Beschattung und konventionellem Farmanbau in Kalifornien erprobt.

Die Varianz der Fruchtqualität war im konventionellen Anbau deutlich erhöht gegenüber dem geschützten Anbau. In unterschiedlichen Teilflächen der Farm wurden Verteilungen der Fruchtqualität aufgezeichnet. Die lösliche Trockensubstanz war im vorliegenden Versuch mit dem Bodenwasserpotential korreliert. Solche Informationen wurden von den Anbauern als wertvoll für das Qualitätsmanagement, speziell im Erntemanagement bewertet.

Summary: *At the present state of the art two production system concepts are favoured for obtaining homogeneous citrus fruit quality at harvest: (i) hydroponic production systems with protection against extreme weather conditions in a shade house as the Fruit World Nursery developed it, and (ii) site-specific harvest management on the farm.*

In commercial citrus production the fruits' soluble solids content (SSC) is used for determining the optimum harvest date. NIR spectrometry became recently available for measuring the citrus SSC non-destructively. In the present study, monitoring the citrus SSC was carried out on 8 citrus varieties in the shade house and on the farm by means of spectrometric readings (MMS1 NIRenh., Zeiss, Germany) during the harvest period from November 2004 to March 2005 (sample size=718).

Comparing the SSC values from fruit grown on the farm and in the shade house indicate a higher variance in fruit grown unprotected. On the farm, trees planted in sandy soil, more severely suffering from water stress as indicated by readings with tensiometers in different depths and stem shrinkage, developed fruits with slightly higher SSC in the period reported. Citrus growers are judging such additional information as very valuable for an appropriate harvest management.

1. Einleitung

In der Versorgungskette gartenbaulicher Produkte werden Informationen zum physiologischen Produktzustand für die Prozessoptimierung benötigt, da eine statische Behandlung der hohen Variabilität von biologischem lebenden Material nicht gerecht wird. Anforderungen an Methoden zum *Monitoring* physiologischer Parameter, z.B. dem Frucht-reifezustand, sind die Bereitstellung von aussagekräftigen und reproduzierbaren Daten. Darüber hinaus muss eine prozessbegleitende Datenerhebung naturgemäß zerstörungsfrei erfolgen.

Im Beitrag werden neuere Ergebnisse auf den Gebieten der Qualitätsanalyse bei Citrusfrüchten mit Hilfe der NIR-Spektrometrie vorgestellt.

Die Prozessoptimierung muss in der Produktion beginnen. Ein wesentliches Ziel ist es, zum Zeitpunkt der Ernte möglichst einheitliche Fruchtchargen hinsichtlich des Frucht-reifezustandes zu erhalten. In der folgenden Nacherntebehandlung (vor allem im so genannten „degreening“) und der Lagerung sind bei verminderter Varianz in den Chargen weniger Verluste durch nicht an die Frucht-reife angepasste Bedingungen zu erwarten.

Um dies zu erreichen eignen sich z.B. hydroponische Produktionssysteme, bei denen die Umweltbedingungen der Bäume sowie deren Ernährung optimal eingestellt werden können. Solche stark manipulierenden Anbauverfahren erfordern eine ständige Überwachung der Bäume und Früchte, da das System durch die fehlende Pufferwirkung des Bodens sehr anfällig gegenüber Abweichungen von den optimalen Wachstumsbedingungen reagiert.

Ein weiterer Ansatz zur Erreichung homogener Chargen ist die teilflächenspezifische Bewirtschaftung, wobei mit Hilfe einer zerstörungsfreien Methode zur Reifebestimmung der Früchte an unterschiedlichen Standorten wiederholt gemessen und somit der Verlauf der Fruchtentwicklung am Baum aufgezeichnet werden kann.

Die Frucht-reife wird im kommerziellen Citrusanbau vorrangig anhand des Gehalts an löslicher Trockensubstanz zerstörend mit dem Refraktometer bestimmt. Eine Überwachung einzelner Früchte in wiederholten Messungen ist mit dieser Methode nicht möglich. In der Erntesaison 2004/2005 wurde daher die NIR-Spektrometrie als eine für Citrus neu verfügbare, zerstörungsfreie Methode zur Bestimmung der löslichen Trockensubstanz (MILLER & ZUDE, 2004) getestet.

2. Material und Methoden

In der Erntesaison 2004/2005 wurde die spektrometrische Fruchtqualitätsbestimmung an 8 Sorten in hydroponischem Anbausystem unter Beschattung und im konventionellen Farmanbau erprobt.

Das Mikroklima in den Anlagen wurde hinsichtlich der Lufttemperatur in 1 m Höhe, die Niederschlagsmenge und das Bodenwasserpotential in 0,5 m und 1 m Bodentiefe aufgezeichnet.

Auf Basis der Spektralanalyse wurde ein Handgerät an die Anforderungen zur Bestimmung der Fruchtpigmente und der löslichen Trockensubstanz angepasst. Hierzu wurde ein lichtempfindliches, monolithisches Photodiodenarray (PDA) Spektrometer (MMS1 NI-Renh., Fa. Zeiss-Jena, Jena), das im sichtbaren und nahinfraroten (NIR) Wellenlängenbereich mit 3,3 nm Auflösung detektiert, in ein Gerät (PA1101, Fa. CP, Falkensee) mit eigener Elektronik und transportabler Stromversorgung integriert. Zur Messung wird Strahlung im sichtbaren und NIR Wellenlängenbereich in die Frucht eingekoppelt und die remittierte Strahlung mit dem PDA-Spektrometer aufgezeichnet. Ein Modell, das die spektralen Daten Bezug nehmend auf die Fruchtqualität (Digital-Refraktometer, Fa. Atago, Japan) analysiert, wurde entwickelt und die lösliche Trockensubstanz und ein Karotinoid-Index als Ausgabeparameter auf dem Gerätedisplay genutzt.

3. Ergebnisse und Diskussion

Am Kalifornischen Standort treten in einigen Jahren Nachtfröste sowie schwere Niederschläge auf. Dies birgt für den Citrusanbau die Gefahr von Fruchtqualitätsminderungen durch Frostschäden und „fade“ schmeckenden Früchten mit erhöhtem Wassergehalt und verminderter löslicher Trockensubstanz.

Mit Hilfe der Fruchtspektren sowie refraktometrischen Messungen der löslichen Trockensubstanz [%Brix] wurden an verschiedenen Standorten im Verlauf der Fruchtentwicklung Daten erhoben. Im sichtbaren Wellenlängenbereich konnte der Fruchtgehalt an Karotinoiden bestimmt werden, der im Verlauf der Fruchtentwicklung sortentypisch zunahm.

Im Wellenlängenbereich des NIR sind Obertöne von -OH, C-OH und C-OOH Bindungen detektierbar. Diese Information wurde zur Kalibrierung auf die lösliche Trockensubstanz der Citrusfrüchte genutzt. Relativ viele (80 von 718) Fruchtspektren wurden mit Hilfe von Ausreißertests vom Kalibrierdatensatz eliminiert. Die verworfenen Datensätze konnten als Fruchtspektren von Früchten mit schweren Frostschäden identifiziert werden.

Zwei Kalibriermodelle wurden getestet, wobei alle Früchte oder ausschließlich Früchte später Sorten einbezogen wurden. Das Bestimmtheitsmaß (R^2) der ersten Kalibrierung ($n=718$) lag bei 0,67, der Standardfehler der Kalibrierung (SEC) entsprach 0,55 %Brix, während der Standardfehler der Kreuzvalidierung 0,68 %Brix betrug.

Wurden ausschließlich Früchte später Sorten analysiert ergaben sich folgende Werte: $R^2=0,51$, $SEC=0,73$ %Brix und $SECV=0,78$ %Brix.

Die Validierung mit einem Test-set zeigte jedoch, dass eine an das Fruchtmaterial spezifisch angepasste Kalibrierung zu geringeren Fehlern führte. Bei der Kalibrierung auf die späten Sorten lag der Fehler (SEP) bei 0,86 %Brix, was vermutlich für die zerstörungsfreie Messung unter Feldbedingungen einen realistischen Fehler wieder spiegelt (Bild 1).

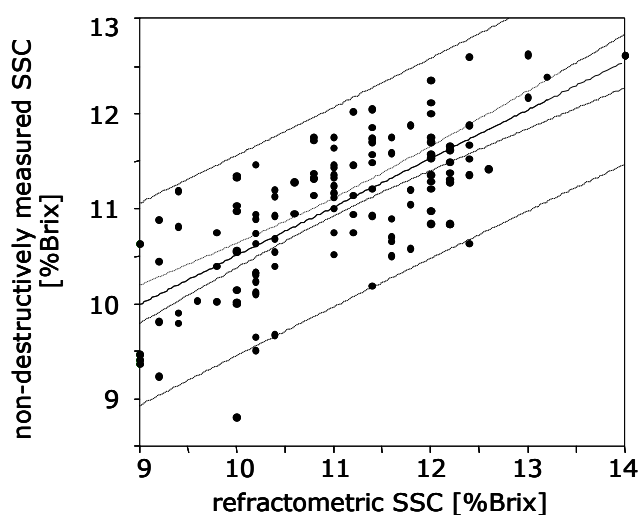


Bild 1: Ergebnisse der zerstörungsfreien spektrometrischen und zerstörenden refraktometrischen Bestimmung der löslichen Trockensubstanz der Citrusfrüchte [%Brix]

Die Sorte M58 (kodierte) weist unter geschützten, hydroponischen Anbaubedingungen eine Verfrühung des Erreichens der sortenspezifischen löslichen Trockensubstanz auf (Bild 2). Die erhöhten Werte der löslichen Trockensubstanz bei der Sorte S2 im konventionellen Produktionssystem werden auf das geringe Alter der Bäume unter der Beschattung zurückgeführt. Im konventionellen Anbau war bei dieser Sorte bereits das erwartungsgemäß erste Ertragsjahr (4. Standjahr) erreicht, während es sich unter der Beschattung um junge, noch stark wüchsige Bäume (2. Standjahr) handelte.

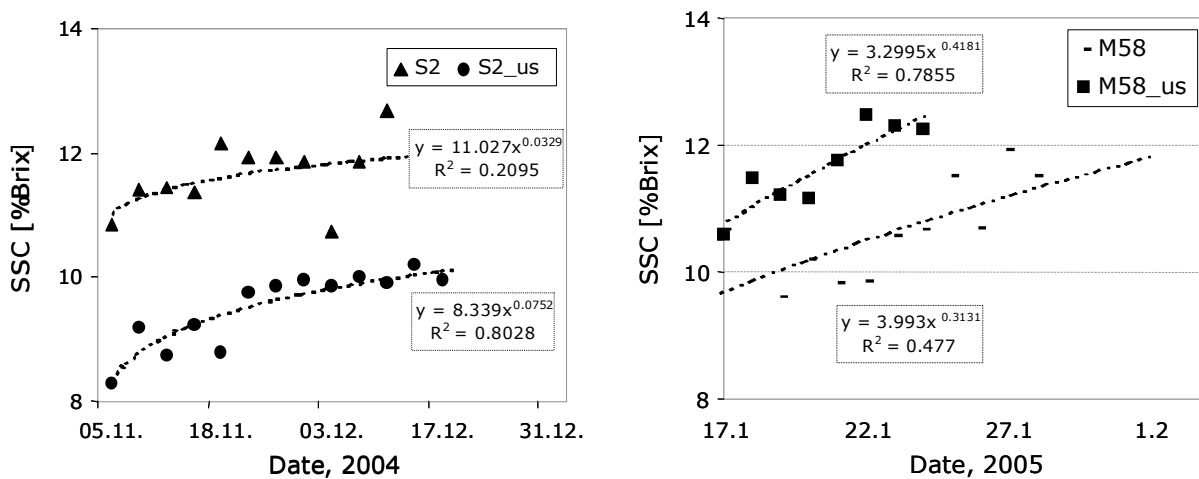


Bild 2: Beispiele von 2 Sorten, die hydroponisch unter einer Beschattung bzw. in einer konventionellen Obstanlage angebaut wurden. Die Veränderung der löslichen Trockensubstanz ist im Verlauf der Fruchtentwicklung angegeben. Die Legende zeigt eine Kodierung für neue Sorten, wobei us „under shade“ kennzeichnet

Festzustellen war, dass die Varianz der Fruchtqualität im konventionellen Anbau deutlich erhöht gegenüber dem geschützten Anbau war (Bild 2). Am 03.12. ist bei der Sorte S2 im ungeschützten Anbau eine deutliche Abnahme der löslichen Trockensubstanz mit folgendem Anstieg festzustellen, der durch hohe Niederschlagsmengen und anschließender Trockenperiode ausgelöst war.

In unterschiedlichen Teilflächen der Farm wurden Verteilungen der Fruchtqualität festgestellt. Die lösliche Trockensubstanz war im vorliegenden Versuch negativ mit dem Bodenwasserpotential korreliert. Ein Lösungsansatz, um auch hier einheitliche Fruchtchargen zum Zeitpunkt der Ernte zu erzielen, ist die Kartierung der Anlage mit dem Ziel der teilflächenspezifischen Bewirtschaftung (Precision Horticulture). Hierbei werden Fruchteigenschaften in der Produktion überwacht und an das Produkt angepasste Maßnahmen durchgeführt. So besteht z.B. die Möglichkeit durch teilflächenspezifische Bewässerung und Stickstoffdüngung eine Vereinheitlichung der Fruchtqualität anzustreben. Dies setzt jedoch entsprechende Fertigationssysteme voraus. Grundsätzlich könnten manuelle Produktionsmaßnahmen wie die Ausdünnung sowie das Erntemanagement durch eine selektive Ernte auf die teilflächenspezifischen Unterschiede abgestimmt werden.

Von den Anbauern wurden das zerstörungsfrei durchgeführte *Monitoring* der Obstanlagen sehr positiv aufgenommen. Die Informationen wurden als wertvoll für das Qualitätsmanagement, speziell im Erntemanagement zur Festlegung des Erntetermins, bewertet. Als Ausblick können Daten zum Fruchtreifegrad einer Charge darüber hinaus nach der Ernte für die Einstellung angepasster Nacherntebehandlungen verwendet werden. So sind z.B. Früchte in bestimmten Reifegraden weniger empfindlich gegenüber der Behandlung mit Ethylen bei hoher Temperatur und Luftfeuchte wie sie beim *Degreening* eingesetzt werden.

4. Literatur

MILLER WM, ZUDE M (2004) NIR-based sensing to identify soluble solids content of Florida citrus. Applied Engineering in Agriculture 20: 321-327

Untersuchungen zur Unkrauterkenennung im Grünland mit Hilfe digitaler Bildverarbeitung

Weed detection in grassland by means of digital image processing

Steffen Gebhardt, Walter Kühbauch
Lehrstuhl für Allgemeinen Pflanzenbau, Universität Bonn, 53115 Bonn
E-Mail: s.gebhardt@uni-bonn.de

Kurzfassung: Präzisionspflanzenbau (PA) basiert wesentlich auf dem Einsatz von Sensoren zur Zustandsbeschreibung von Pflanzenbeständen, häufig zur Analyse mittels quantitativer Bildanalyse. Im Grünland blieben bildanalytische Verfahren bisher weitgehend ungenutzt. Gründe sind die enorme Artenvielfalt und Heterogenität von Grünlandbeständen, welche eine bildanalytische Auswertung besonders schwierig gestalten. Die bildanalytische Unkrauterkenennung in die Grünlandwirtschaft einzuführen ist Inhalt des hier vorgestellten Projektes. Besonderes Augenmerk gilt hierbei der Erkennung des Stumpfbältrigen Ampfers (*Rumex obtusifolius*). Im Verlaufe der Arbeit sollen die erforderlichen Algorithmen zur automatischen Erkennung dieses Unkrautes und anderer Komponenten der Grünlandvegetation entwickelt werden. Am Ende des Projektes soll ein Bildanalysesystem zur differenzierten Erfassung der Grünlandvegetation zur Verfügung stehen. Die Ableitung von Unkrautverteilungs- und Applikationskarten für die teilschlagspezifische Unkrautbekämpfung und/oder die Entscheidungsfindung in einem zukünftigen Online-System zum Herbizideinsatz würde dadurch ermöglicht.

Deskriptoren: Digitale Bildverarbeitung, Mustererkennung, Unkrauterkenennung, Grünland, *Rumex obtusifolius*, Präzisionslandwirtschaft

Summary: *Vegetation classification in precision agriculture (PA) is often based on digital image analysis. In grassland farming these techniques are rarely investigated so far. Reasons for that are the heterogeneity and biodiversity of grassland, making the development of image analysis systems difficult. The aim of this project is to develop methods for automatic weed detection in grassland by means of digital image processing, focussing on the weed Broad-leaved Dock (*Rumex obtusifolius*). As a result, an image analysis system should be available, solving this task. Based on that the derivation of weed distribution maps will be possible, utilized for site-specific weed control. A real-time implementation of the algorithm in an autonomous crop protection vehicle can be possible as well.*

Keywords: *Digital image processing, Pattern recognition, Weed detection, Grassland, *Rumex obtusifolius*, Precision farming*

1. Einleitung

Die Digitale Bildverarbeitung hat im ackerbaulichen Pflanzenbau ein breites Anwendungsspektrum. Man denke z.B. an die Unkrauterkenennung und -unterscheidung im Nahbereich und deren Anwendung in Online-Systemen zur Herbizidapplikation (OEBEL *et al.* 2004).

Während im Ackerbau Vorteile der guten Unterscheidbarkeit von Pflanzen und Boden über ihre Farbmerkmale ausgenutzt werden können, ist dies bei Grünlandbeständen nicht ohne weiteres möglich. Die enorme Artenvielfalt und Heterogenität von Grünlandbeständen, welche eine bildanalytische Auswertung besonders schwierig gestalten, sind Gründe für den Rückstand gegenüber dem Ackerbau. Dazu kommt die hohe Dichte an Pflanzen, welche die Möglichkeiten einer Differenzierung des Grünlandbestandes durch Überlappungen und schwierige Kontrastverhältnisse im digitalen Bild enorm erschweren.

Der hohe Flächenanteil des Grünlandes an der landwirtschaftlichen Nutzfläche (ca. 30 % in Deutschland, 60 % in Großbritannien, 80 % in Schottland und Nordirland) verdeutlicht die Notwendigkeit von Maßnahmen des Präzisionspflanzenbaus. Pflanzenschutz, Kostenminimierung und Umweltschutz sind die entscheidenden Vorteile der PA, welche deren Einsatz auch im Grünland aus ökologischen und ökonomischen Gesichtspunkten erforderlich machen. Die Zustandserfassung der Grünlandvegetation mittels digitaler Bildverarbeitung wäre ein enormer Fortschritt für den Präzisionspflanzenschutz im Grünland.

2. Zielstellung

Die bildanalytische Unkrauterkenennung in die Grünlandwirtschaft einzuführen, ist Inhalt des hier vorgestellten Projektes. Besonderes Augenmerk gilt hierbei der Erkennung des Stumpfbältrigen Ampfers (*Rumex obtusifolius*), einer Unkrautart, die wegen der Häufigkeit des Auftretens, der rasanten Ausbreitung (Samenzahl, Keimbereitschaft) und der beträchtlichen Minderung der Futterqualität im Grünland Mitteleuropas sehr unerwünscht ist.

Im Verlaufe der Arbeit sollen die erforderlichen Algorithmen zur automatischen Erkennung dieses Unkrautes und anderer Komponenten der Grünlandvegetation entwickelt werden. Am Ende des Projektes soll ein Bildanalysesystem zur differenzierten Erfassung der Grünlandvegetation zur Verfügung stehen. Die Ableitung von Unkrautverteilungs- und Applikationskarten für die teilschlagspezifische Unkrautbekämpfung und/oder die Entscheidungsfindung in einem zukünftigen Online-System zum Herbizidausbringung würde dadurch ermöglicht.

3. Bildanalyse

Die Lösung einer bestimmten Aufgabe mit Hilfe digitaler Bildverarbeitung bedarf mehrerer Verfahrensschritte. Bild 1 stellt die Komponenten eines typischen Bildverarbeitungssystems dar, welche beim Lösungsansatz der objektorientierten Bildklassifikation immer wieder zu finden sind. Der Übergang zwischen der reinen Bildverarbeitung und der Bildinterpretation/Mustererkennung ist fließend. Immer muss das Gesamtsystem mit allen Komponenten betrachtet werden, da alle Teile einen Beitrag zum gewünschten Ergebnis leisten (STEINBRECHER 1993).

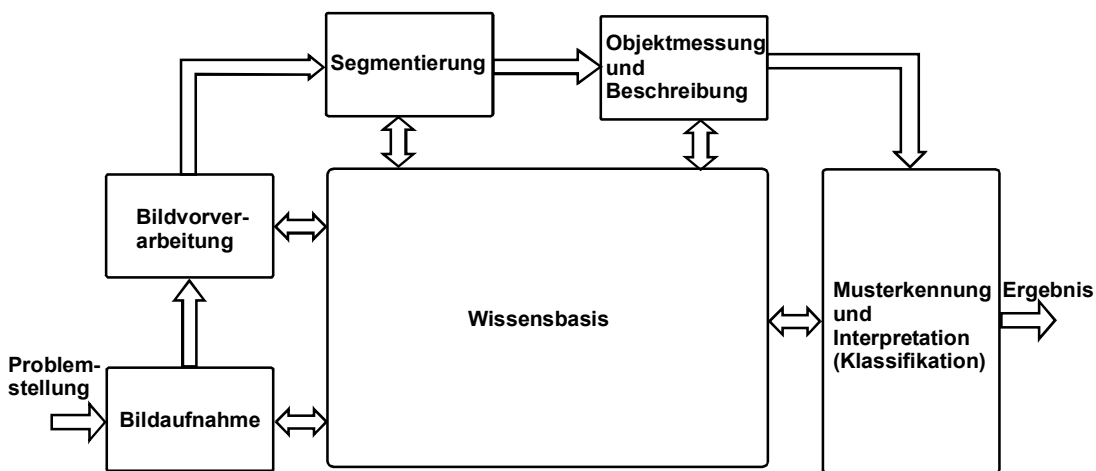


Bild 1: Grundlegende Schritte in der Bildverarbeitung (GONZALES & WOODS 1992)

3.1. Bildaufnahme

In der Grünlandwirtschaft treten Gräser und breitblättrige Kräuter in beliebiger und kleinräumig stark wechselnder Kombination auf. Aufgrund der Ähnlichkeit in Form und Farbe des Ampfers zu Löwenzahn, Breitwegerich und Weißklee müssen die individuellen Farb- und Formeigenschaften dieser Pflanzenarten in künstlich erstellten Artenkombinationen und Aufnahmesituationen verfolgt und statistisch getrennt werden.

Dazu wird ein Grünlandversuch auf der Lehr- und Forschungsstation der Universität Bonn in Rengen (Eifel) angelegt. Ziel dieses Versuches ist es, die oben genannte Kombinatorik künstlich herzustellen und diese Vegetation im phänologischen Verlauf mittels Digitalkamera zu erfassen. Um eine gleiche Aufnahmegeometrie zu gewährleisten wurde ein Aufnahmegerät konstruiert, welches parallel zum Versuch auf einer Gleisanlage bewegt wird. Dabei handelt es sich um einen Kran, dessen Arm die Kamera trägt. Durch Lichtschranken gesteuert fährt der Kran jede Parzelle des Versuches automatisch an und löst die

Aufnahme ebenso automatisch aus. Weitere Vorteile sind hohe Wiederholraten der Aufnahme und dem einhergehend eine hohe Dichte an Bildaufnahmen während der phänologischen Entwicklung, die Möglichkeit der Kombination mit anderen Sensoren, die Möglichkeit nächtlicher Aufnahmen mit künstlicher Beleuchtung sowie die direkte Speicherung auf einem PC und nicht zuletzt eine beträchtliche Minderung des Arbeitsaufwandes durch die Vollautomatik des Systems.

3.2. Bildvorverarbeitung

Unter der Vorverarbeitung versteht man Verfahren der Bildrestaurierung und –verbesserung. Sind die Störquellen im Bild bekannt, lassen sich diese unter Anwendung mathematischer Verfahren beschreiben und entfernen. Bei der Bildverbesserung handelt es sich Bildverarbeitungsmethoden, durch die anschließende Auswertevorgänge einfacher oder zuverlässiger werden, z.B. durch Kontraständerung, -ausgleich oder Kantenverstärkung.

3.3. Segmentierung

Die Erzeugung von inhaltlich zusammenhängenden Regionen durch Zusammenfassung benachbarter Pixel entsprechend einem bestimmten Kriterium bezeichnet man als Segmentierung. Ziel ist die Trennung von Vorder- und Hintergrund im Bild. Der Bildvordergrund entspricht in diesem Fall den großblättrigen Pflanzen im Grünland. Die Farbe wird als Unterscheidungskriterium nicht hinreichend sein, sind doch alle Pflanzen mehr oder weniger grün. Daher wird angestrebt, über kantenorientierte Verfahren mittels Gradientensuche homogene Flächen (Blattoberflächen) aufzuspüren. Nicht in jedem Fall lassen sich die Blätter allein durch Homogenitätseigenschaften identifizieren. Ein zusätzliches Kriterium könnte die Textur, die Oberflächenbeschaffenheit der Blätter darstellen. Erste Probeaufnahmen zeigen, dass sich die Muster von Ampfer optisch von denen der anderen zu erkennenden Pflanzen unterscheiden. Es muss untersucht werden, wie das Muster zu beschreiben ist. Denkbar sind statistische Größen wie u. a. der lokale Mittelwert, die lokale Varianz oder die lokale Homogenität.

Die Ergebnisse der Segmentierung können Polygone sein, welche die Objekte umranden. Viele Algorithmen liefern noch keine geschlossenen Kantenzüge, diese müssen erst mit weiteren Verfahren zusammengefügt werden, damit sie Objekte vollständig einschließen (siehe Bild 2). Durch Blattüberlagerungen kommt es zusätzlich zu unscharfen Konturen. Diese Fehler zu kompensieren ist weiterer Bestandteil der Arbeit. Möglichkeiten der Berei-

nigung der Kontur, z.B. durch Abschneiden oder Generalisierung, müssen in diesem Zusammenhang überprüft werden.

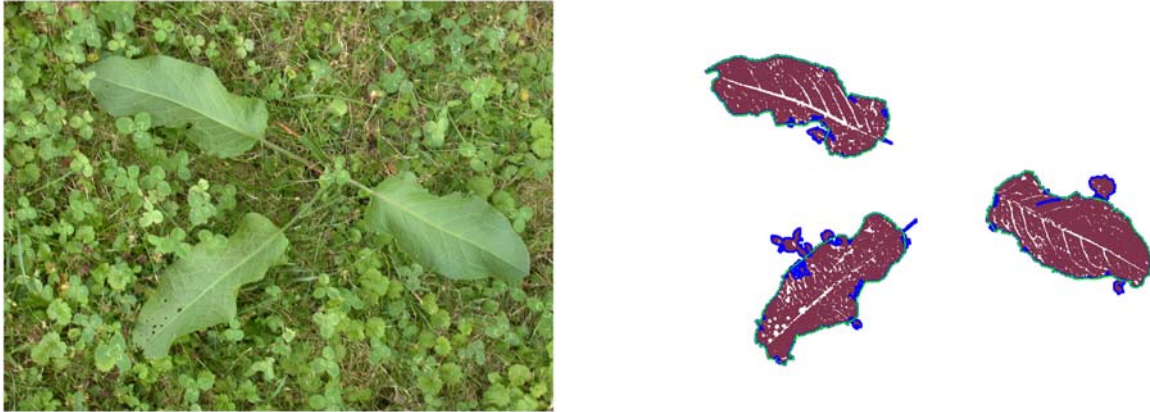


Bild 2: links: Gleiche Farbe und Blattüberlagerungen erschweren die Konturextraktion.
rechts: Segmentierungsfehler müssen durch Nachbearbeitung eliminiert werden; blau:
Kontur nach Segmentierung, grün: geglättete Kontur nach Generalisierung

3.4. Mustererkennung/Objektmessung

Ziel der Objektmessung ist das Auffinden von Eigenschaften, die das jeweilige Objekt charakteristisch beschreiben und es gleichzeitig signifikant von anderen Objekten abgrenzen. Es handelt es sich um die Extraktion von Merkmalen aus Objekten zu deren Beschreibung. Merkmalsmessungen können an der Größe, der Form, der Farbe oder der Textur der segmentierten Objekte vorgenommen werden. Die Segmentierung kann in diesem Zusammenhang bereits als Merkmalsextraktion bezeichnet werden, denn schließlich fließen bereits unterschiedliche Eigenschaften (Farbe, Textur, ...) in diese ein. Zur Beschreibung der unterschiedlichen Pflanzen im Grünland werden neben der Textur auch die Form der Blätter beschreibende Parameter wie Fläche und Umfang relevant sein (siehe Tabelle 1).

Tabelle 1: Übersicht einiger Formparameter (DU & SUN 2004)

$\text{Flächenindex} = \frac{\text{Fläche}}{\text{MaxDurchmesser} \cdot \text{MinDurchmesser}}$	$\text{Rundheit} = \frac{4\pi \cdot \text{Fläche}}{\pi \cdot \text{MaxDurchmesser}}$
$\text{Längenverhältnis} = \frac{\text{MaxDurchmesser}}{\text{MinDurchmesser}}$	$\text{FormFaktor1} = \frac{4\pi \cdot \text{Fläche}}{\text{Umfang}^2}$
$\text{Kreisförmigkeit} = \frac{\text{Umfang}^2}{\text{Fläche}}$	$\text{FormFaktor2} = \frac{\text{MaxDurchmesser}}{\text{Fläche}}$
$\text{Exzentrizität} = \sqrt{1 - \frac{\text{kleineHalbachse}^2}{\text{großeHalbachse}^2}}$	$\text{FormFaktor3} = \frac{4 \cdot \text{Fläche}}{\pi \cdot \text{MaxDurchmesser} \cdot \text{MinDurchmesser}}$

3.5. Bildinterpretation/Klassifikation

Entscheidend für das Klassifikationsergebnis ist die Wahl eines geeigneten Klassifikators. Kriterien für die Auswahl dessen sind die Komplexität der Berechnungen, die eventuell mögliche Berücksichtigung von Wissen über die Daten, die Einfachheit und die Klassifikationsleistung gemessen als Fehlerrate. Um der Forderung nach Einfachheit nachzukommen, ist eine Merkmalsreduktion notwendig. Das bedeutet das Herausfiltern der signifikanten Objektmerkmale, die für eine Unterscheidung notwendig sind. Es existieren verschiedene Modelle einer wissensbasierten Klassifikation, wie z.B. die Nächste-Nachbarschafts Klassifikation oder die Maximum-Likelihood Methode. Welche Klassifikationsmethode letztendlich hier Anwendung findet wird im Rahmen der Untersuchung anhand der oben genannten Kriterien untersucht werden.

4. Aussichten

Ziel der Untersuchung ist die Entwicklung eines Verfahrens zur automatischen bildanalytischen Erkennung von Pflanzenspezies im Grünland. Der Fokus liegt dabei auf der Erkennung des Unkrautes Stumpflättriger Ampfer. Neben diesem gilt es aber auch andere Pflanzen des Grünlandes zu erkennen. Der mögliche Erfolg wird sich anhand der Erkennungsrate messen lassen. Weiterhin ist die Praxistauglichkeit des Verfahrens zu bewerten. Durch GPS-kodierte Bildaufnahme ließen sich Unkrautverteilungskarten ableiten, auf deren Basis eine teilschlagspezifische Bekämpfung durchgeführt werden kann. Weiterhin ist der Einsatz in einem Online-System zum Herbizideinsatz denkbar, wobei vorn am fahrenden Gerät die Sensorik angebracht ist und hinten die direkte Applikation erfolgt, in Ab-

hängigkeit des Ergebnisses des auf dem Bordcomputer installierten Bildverarbeitungssystems.

5. Literatur

DU CJ, SUN DW (2004) "Recent developments in the applications of image processing techniques for food quality evaluation." Trends in Food Science & Technology 15 (5): 230-249

GONZALES RC, WOODS RE (1992) Digital image processing. Reading, Mass. u.a., Addison-Wesley

OEBEL H, et al. (2004) "Site-specific weed control using digital image analysis and georeferenced application maps - first field experiences." Zeitschrift für Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz - Journal of Plant Diseases and Protection: 459-465

STEINBRECHER R (1993) Bildverarbeitung in der Praxis. Oldenbourg München, Wien

Reihenführung autonomer Roboter mit der Low-Cost-Kamera CMU-Cam2

Row-guidance of autonomous robots based on the low-cost camera CMUCam2

Ralph Klose, Martin Meier, Andreas Linz, Arno Ruckelshausen
Interdisziplinärer Forschungsschwerpunkt Intelligente Sensorsysteme, Fachhochschule Osnabrück, Albrechtstr. 30, 49076 Osnabrück
E-mail: a.ruckelshausen@fhos.de

Zusammenfassung: Die Entwicklung leistungsfähiger und gleichzeitig kostengünstiger Kamerasysteme zur Reihenführung ist eine wichtige Voraussetzung für den zukünftigen Einsatz autonomer Roboter in der Landtechnik.

Zur Sammlung von Ideen und Anregungen für reale Applikationen wird der internationale Wettbewerb „Field Robot Event“ in Wageningen/Niederlande durchgeführt, an dem eine Studierendengruppe der Fachhochschule Osnabrück mit dem sensorgesteuerten Roboterfahrzeug EYE-MAIZE teilgenommen hat (2004). Das Fahrzeug kann beispielsweise autonom zwischen Maisreihen fahren und beim Erreichen des Endes der Reihe selbstständig wenden und in die nächste Reihe fahren. Im Roboterfahrzeug „Eye-Maize“ wurden diverse Sensoren - unter anderem die an der Carnegie Mellon University in Pittsburgh entwickelte Low-Cost-Kamera CMUCam2 - eingesetzt, um die Reihenführung im Maisfeld zu realisieren. Die Kamera ist mit einem Mikrocontroller für die Bildverarbeitung und Farberkennung ausgestattet, so dass reduzierte Daten z.B. für die Steuerung des Fahrzeugs zur Verfügung stehen. Der Preis der kompletten Kamera liegt nur bei ca. 140 € und eröffnet damit weit reichende Möglichkeiten – z.B. bei der Reihenführung - bei niedrigen Kosten.

Deskriptoren: CMOS-Kameras, Bildverarbeitung, Robotik

Summary: *The development of efficient as well as low-cost camera systems is of high importance for automatic row-guidance of future robot applications in agriculture environment.*

In order to get new ideas for real applications, the international competition “Field Robot Event” takes place in Wageningen/The Netherlands yearly. A student group from the University of Applied Sciences Osnabrück participated in 2004 with the sensor-controlled field robot EYE-MAIZE. The vehicle moves between maize rows and can automatically turn to the next row at the end of the field. Several sensors have been implemented for row guidance purposes, including the low-cost camera CMUCam2 which has been developed at the Carnegie Mellon University in Pittsburgh. The camera is coupled to a microcontroller for image and color processing, thereby resulting in reduced data which can be used for vehicle control. The price of the total camera is about 140 € and thus offers a wide range of applications (example: row guidance) at low cost.

Keywords: CMOS-cameras, image processing, robotics

1. Einleitung

Der Einsatz von CCD-Kameras zur Erfassung von Pflanzen oder Pflanzenmerkmalen ist bisher mit hohen Kosten der Systeme verbunden (siehe z.B. SÖKEFELD 2002, LANGNER & BÖTTGER 2003). Auch die Verfügbarkeit kostengünstiger CMOS-Kameras mit hoher Flexibilität (RUCKELSHAUSEN & LINZ 2000) war bisher nicht gegeben. Die seit 2004 verfügbare low-cost Kamera CMUCam2 mit einem Preis von ca. 140 € bietet jedoch neue Möglichkeiten (Row *et al.* 2002). Die Kamera wurde daher von einer Studierendengruppe der Fachhochschule Osnabrück zur Steuerung eines autonomen Feldroboters eingesetzt, der am „Field Robot Event 2004“ in Wageningen teilgenommen hat. Die Entwicklung eines anderen low-cost Systems wurde von HEMMING (2004) beschrieben.

Der „Field-Robot-Event“ ist ein jährlich stattfindender Wettbewerb, der von der Universität in Wageningen/Niederlande organisiert wird (FIELD ROBOT EVENT 2005). Jedes Team hatte dabei folgende Aufgaben zu lösen:

- Durchfahren einer geraden Maisreihe, am Ende der Reihe wenden und in die nächste Reihe fahren. (siehe Bild 1).
- Durchfahren einer kurvigen Maisreihe, ebenfalls wenden und in die nächste Reihe fahren.
- Durchfahren einer geraden Maisreihe, nassem Untergrund.
- Freestyle (freiwillig).

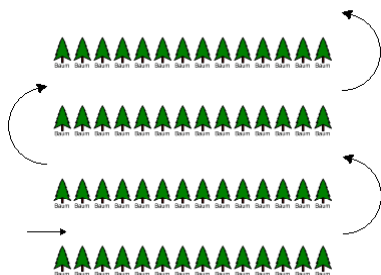


Bild 1: Parcours beim Field-Robot-Event

Das sensorgesteuerte Fahrzeug EYE-MAIZE (DIEKMANN *et al.* 2005, RUCKELSHAUSEN & LINZ 2004, Bild 2) basiert auf der Verwendung mehrerer verschiedener Sensoren. Zur Erkennung des Endes der Maisreihe wurden Sharp-Triangulationssensoren verwendet,

die den Abstand zu den links und rechts vom Roboter befindlichen Maispflanzen messen und auch erkennen, wenn sich dort keine Pflanze mehr befindet. Für die Reihenführung sind diese Sensoren jedoch nicht genau genug, so dass die Kamera CMUCam2 als Option eingesetzt wurde. In der Freestyle-Disziplin konnten weitere Funktionen des Roboterfahrzeugs dargestellt werden. „Eye-Maize“ demonstrierte hier die Erfassung und Verfolgung einer bestimmten Farbe.



Bild 2: Autonomes Roboterfahrzeug EYE-MAIZE (Fachhochschule Osnabrück)

2. Kamera "CMUCam2"

Die CMUCam2 (Bild 3) ist standardmäßig mit einem CMOS-Kameramodul OV6620 (OmniVision) und einem Mikrocontroller SX52 (Ubicom) ausgestattet. Der 384 kB große Frame-Buffer-Chip AL422B (Averlogic) erlaubt eine schnelle Aufnahme und Speicherung eines kompletten Frames. Die Kommunikation zwischen Kamera und PC bzw. Mikrocontroller wird über RS-232 realisiert. Der wesentliche Vorteil des Systems ist die Möglichkeit zur Weitergabe reduzierter Daten, die aus den Bilddaten generiert werden. Hierdurch ergibt sich die online-Fähigkeit des Kamerasystems.

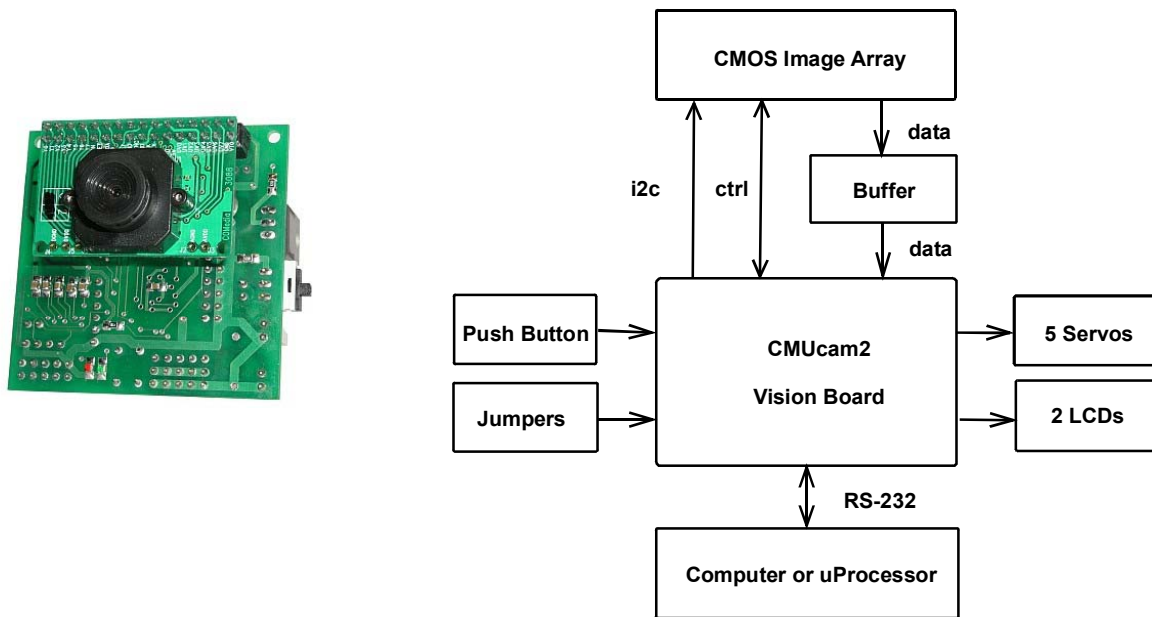


Bild 3: Kamera CMUCAM2 (links) und Architektur mit Datenfluss (rechts)

Zu den wichtigsten Funktionen der CMUCam2 gehören:

- Auflösung bis zu 176*255 Pixel
- Color-Tracking (Verfolgen von benutzerdefinierten Farben) mit maximal 50 Bildern pro Sekunde
- Berechnung des Schwerpunktes der definierten Farbe
- Analoger Video-Ausgang
- Ansteuerung von bis zu 5 Modellbauservos

Color-Tracking

Die für EYE-MAIZE wichtigste Funktion der CMUCam ist das „Color-Tracking“. Wird vom Controller bzw. PC die Anforderung „TC“ (Track Color) gesendet (Bild 4), so kommt von der Kamera ein sogenanntes „T-Packet“ zurück. Dieses Datenpaket enthält folgende statistische Daten:

- Schwerpunktkoordinaten einer benutzerdefinierten Farbe
- Rahmen um die Pixel der gesuchten Farbe
- Anzahl der Pixel der Farbe in der durchsuchten Region
- Pixel-Vorkommen der Farbe innerhalb des eingegrenzten Bereichs

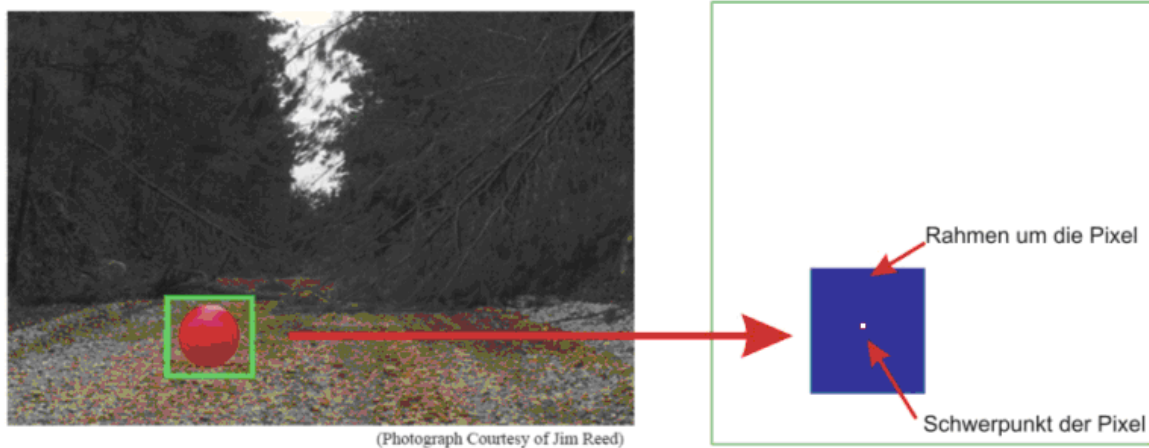


Bild 4: Bild der CMUCam2 (links), im T-Packet sind Informationen über die Pixelvorkommen und den Schwerpunkt von "Rot" (rechts)

Weiterhin gibt es die Möglichkeit, sogenannte „virtuelle Fenster“ zu definieren. Mit dieser Maßnahme werden die statistischen Größen nur für einen Teilbereich des Bildes berechnet.

3. Realisierung der Reihenführung

Die Kamera ist in einer Höhe von 47 cm an dem Roboter angebracht und „sieht“ mit einem Winkel von ca. 60° auf das Maisfeld (Bild 5).

Um den Mais vom Boden zu unterscheiden, ist es notwendig, eine Farbe für die „Track-Color“-Funktion der Kamera zu definieren. Hierzu muss für alle drei Grundfarben (Rot, Grün, Blau) ein unterer und ein oberer Schwellwert festgelegt werden. Die Kamera erfasst nun alle RGB-Pixel, die in diesem Farbbereich liegen.

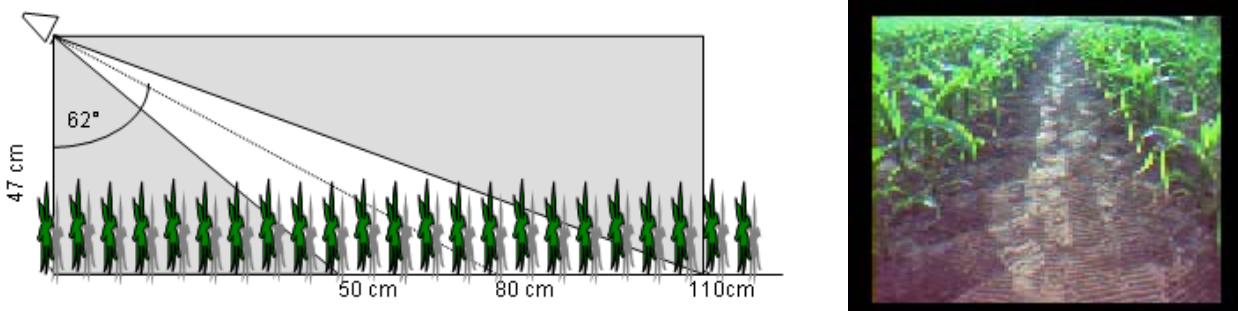


Bild 5: Schema zum Beobachtungswinkel der CMUCam2 (links), Sicht der CMUCam2 auf das Maisfeld (rechts)

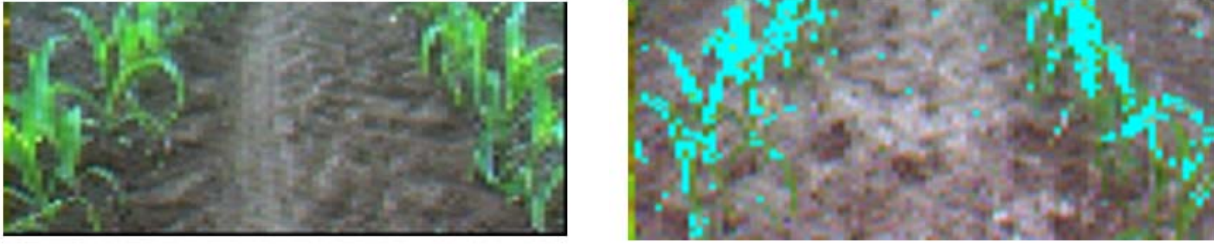


Bild 6: Aufnahme des Maisfeldes aus Sicht der CMUCam2 (links); im rechten Bild wurden die vom Color-tracking erkannten Pixel markiert

Um nun an verwertbare Daten zu gelangen, wurde die Möglichkeit genutzt, das Bild in virtuelle Fenster zu unterteilen. Für die Anwendung bei EYE-MAIZE wurde das Bild vertikal in der Mitte geteilt, so dass sich zwei T-Packets für den linken und rechten Bereich ergeben. Auf diese Weise wird für jede Seite der farbliche Schwerpunkt der definierten Farbe ermittelt. Die X-Koordinate des Schwerpunktes des rechten virtuellen Fensters wird von der maximalen X-Koordinate subtrahiert. Diese Differenz wird mit der X-Koordinate des linken virtuellen Fensters verglichen. Der Vergleich ist ein Parameter für die Geschwindigkeits- und Richtungsbestimmung des Roboters.

4. Ergebnis und Ausblick

Das Fahrzeug konnte mit Hilfe der CMUCam2 sowie einigen Abstandssensoren gesteuert werden. Kritischster Punkt ist dabei die Definition der korrekten Farbwerte. Bei geänderten Lichtverhältnissen ändert sich das Farbverhalten der Kamera, so dass gegebenenfalls die definierte Farbe nicht mehr erkannt wird. Bei zu großem Toleranzbereich der Farbwerte ergeben sich zu viele unerwünschte Pixel.

Beim Field-Robot-Event 2005 werden die Autoren mit Roboterfahrzeug optoMAIZER teilnehmen, welches auf Basis der CMUCam2 unter Integration weiterer neuer Sensoren derzeit entwickelt wird.

5. Literatur

DIEKMANN F, FLEISCHHACKER J, HENKEL J, KLOSE R, KÖNIG T, MEIER M, MOCCI N, MÜHRING A, NEGD D, NOLTE T, NORD E, SCHOTMANN M, SCHULZ J (2005) Field Robot Eye-Maize. Proceedings of the 2nd Field Robot event 2004, ISBN 906754-818-9, March 2005

- FIELD ROBOT EVENT (2005)** Proceedings of the 2nd Field Robot event 2004, ISBN 906754-818-9, March 2005
- HEMMING J (2004)** Development of a low-cost vision-based autonomous Vehicle for the Field Robot Event Wageningen. Bornimer Agrartechnische Berichte, Heft 37, 2002, ISSN 0947-7314: 32-41
- LANGNER H-R, BÖTTGER H (2003)** Erfahrungsbericht zur bildgestützten Unkrautererkennung mit einer 3Chip-CCD-Kamera. Bornimer Agrartechnische Berichte, Heft 34, 2003, ISSN 0947-7314: 38-48
- ROW A, ROSENBERG C, NOURBAKHSI I (2002)** A Low Cost Embedded Color Vision System. Proceedings of the 2002 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems IROS, 2002. Further information CMUCam2: <http://www-2.cs.cmu.edu/~cmucam/>
- RUCKELSHAUSEN A, LINZ A (2000)** "CMOS-Kameras zur online Erfassung spektraler und geometrischer Signaturen von Pflanzen und Pflanzeigenschaften". Bornimer Agrartechnische Berichte, Heft 25, 2000, ISSN 0947-7314: 101-110
- RUCKELSHAUSEN A, LINZ A (2004)** Student Project: Field Robot EYE-MAIZE, AgEng 2004 Conference "Engineering of the Future", Leuven / Belgium, 12.-16.09.2004
- SÖKEFELD M, GERHARDS R, THERBURG R-D, NABOUT A, JACOBI R, LOCK R, KÜHBAUCH W (2002)** Multispektrale Bildanalyse zur Erfassung von Unkraut und Blattkrankheiten. Zeitschrift für Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz, Sonderheft XVIII, ISSN 0938-9938: 437-442

Belastungsverteilung am Stamm durch Rüttelwerkzeuge zur Industrieobsternte

Load distribution on apple tree trunk caused by shakers for fruit harvest

Bernd Herold¹, Uwe Wiesner², Ernst Triquart², Thorsten Rocks², Uwe Schmidt², Martin Geyer¹

¹ Leibniz-Institut für Agrartechnik Potsdam-Bornim e. V. Max-Eyth-Allee 100, 14469 Potsdam

² Humboldt-Universität zu Berlin

E-Mail: bherold@atb-potsdam.de

Kurzfassung: Industrieobst wird maschinell geerntet, indem mit Hilfe von Rüttelwerkzeugen am Baumstamm Schwingungen eingeleitet und die Früchte abgeschüttelt werden. Dabei sollen Schäden am Stamm oder anderen Teilen des Baumes vermieden werden. Das Rüttelwerkzeug verursacht jedoch am Stamm Druck- und Schubbelastungen, welche mitunter zu Schädigungen der Rinde führen. Um Hinweise zur optimalen Verfahrensgestaltung zu finden, wurden mit Hilfe eines drucksensitiven Foliensensors Messungen der Druckbelastung an der Kontaktstelle zwischen Rüttelwerkzeug und Stamm durchgeführt. Zwei Werkzeugvarianten mit unterschiedlicher Polsterung wurden getestet: 1. U-Profilgummi (über Schaumstoff) und 2. Blockgummi. Die Druckbelastung am Stamm hängt von der Kraft und der Kontaktfläche ab. Die Größe der Kontaktfläche wird vom Stammdurchmesser und von der Elastizität der Polsterung beeinflusst. Polsterung mit Blockgummi übte sowohl geringere als auch gleichmäßigere Druckbelastungen aus als Polsterung mit U-Profilgummi. Schubbelastungen lassen sich durch ausreichend große Klemmkraft minimieren.

Deskriptoren: Maschinelle Obsternte, Stammrüttler, Druckbelastung, Rindenbeschädigung, Messung der Druckverteilung

Summary: *Fruits for industrial use are mechanically harvested by using shakers to excite trunk vibrations and to shake off the fruits. Mechanical damage of trunk and other parts of the tree should be avoided. However, the shaker causes pressure and shearing loads on the trunk that can lead to mechanical bark damage. In order to optimize the shaking procedure, measurements of pressure load were carried out by means of a pressure sensitive thin-film sensor placed on the contact region between shaker and trunk.*

Two variants of shakers with different padding material were tested: 1. a U-profile rubber (over elastic foam), and 2. a rubber block. The pressure load on trunk depends on the force and the contact area. The contact area is affected by the diameter of the trunk and the elasticity of the padding material. Padding with rubber block caused smaller as well as more even pressure load than padding with U-profile rubber. Shearing loads can be minimized by applying sufficiently high clamping force.

Keywords: *Mechanized fruit harvest, trunk shaker, pressure load, bark damage, measurement of pressure distribution*

1. Einführung

Zur Ernte von Industrieobst werden mit Hilfe von Rüttelwerkzeugen am Baumstamm Schwingungen eingeleitet. Durch die Schwingungen sollten in möglichst kurzer Zeit die zu erntenden Früchte abgeschüttelt werden ohne jedoch Beschädigungen am Stamm oder anderen Teilen des Baumes zu verursachen. Das Rüttelwerkzeug ruft insbesondere am Stamm Druck- und Schubbelastungen hervor, welche mitunter zu Schädigungen der Rinde und damit zu Leistungseinbußen der Obstanlage führen.

Im Rahmen eines bei der Humboldt-Universität zu Berlin laufenden AiF Projekts wurden mit Unterstützung des ATB Potsdam-Bornim messtechnische Untersuchungen der Belastung durch unterschiedlich gestaltete Rüttelwerkzeuge als Grundlage für eine betriebstechnische Optimierung der Obsterntemaschine durchgeführt.

2. Material und Methoden

Im Januar 2004 erfolgten Vorversuche mit einem Muster des Stammrüttelwerkzeugs (Bild 1a) an mittels Beton im Boden fixierten Testbäumen. Im Oktober des gleichen Jahres wurden während der Ernteperiode in einer Industrieapfelanlage Versuche mit einem modifizierten Muster des Stammrüttelwerkzeugs (Bild 1b) durchgeführt. Bei dem ersten Muster des Werkzeugs wiesen die Schenkel der Rüttelklaue eine Polsterung durch einen mit elastischem Schaumstoff gefüllten Gummischlauch und darüber gespannten U-Profilgummi auf. Im zweiten Test wurde diese Polsterung durch einen homogenen Blockgummi mit lose darüber hängendem Tuch ersetzt.



Bild 1: Rüttelwerkzeuge mit unterschiedlicher Polsterung: a – Polsterung mit U-Profilgummi (über mit Schaumstoff gefüllten Gummischlauch), b – Polsterung mit homogenem Blockgummi

Die Druckverteilung bei Einwirkung des Rüttelwerkzeugs auf den Stamm wurde mit Hilfe eines taktilen Foliensensors gemessen. Der eingesetzte Foliensensor TEKSCAN Typ 5101 ist 0,1 mm dick und besitzt eine drucksensitive Matrix von 44 x 44 Sensorpunkten (Sensorfläche 112 mm x 112 mm, Sättigungsdruck 3000 psi = 2060 N/cm²) (Bild 2). Durch periodisches Abtasten der Sensorpunktwerte mit einer Frequenz von 100 vollständigen Druckverteilungsbildern pro Sekunde erhält man eine detaillierte Bildfolge des Belastungsverlaufs am Baumstamm.

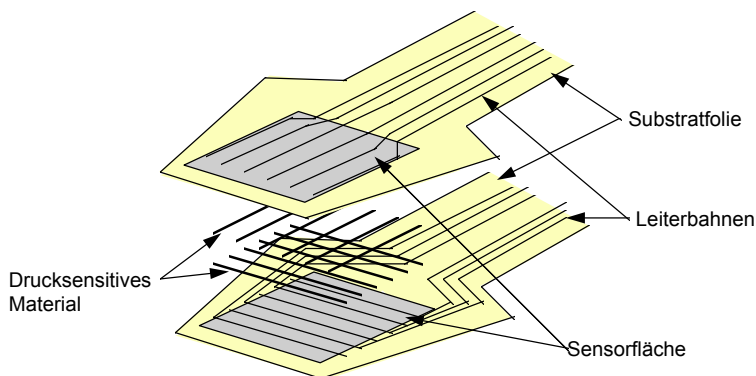


Bild 2: Schematischer Aufbau des drucksensitiven Foliensensors (zerlegt in seine einzelnen Bestandteile)

Beim ersten Test wurde der Sensor in einer Tasche aus Gummituch platziert und diese am Baumstamm verschnürt. Wegen mangelnder Gleitfähigkeit wurde diese Variante später verworfen und der Sensor in einer Tasche aus glatter Folie am Baumstamm mittels Klebeband fixiert. Die Tasche mit dem Foliensensor wurde in einer für das Ansetzen des Rüttelwerkzeugs am Stamm üblichen Höhe im Bereich von 40 bis 60 cm über dem Boden angebracht.

Um die Druckverteilung möglichst vollständig zu erfassen, sollte das Rüttelwerkzeug dann mittig ausgerichtet auf die Fläche des Foliensensors am Stamm angreifen. Es zeigte sich, dass diese Bedingung – auch in Abhängigkeit von der vom Stammdurchmesser abhängigen Größe der Kontaktfläche – nicht in allen Tests gesichert werden konnte und der Kontaktbereich des Rüttelwerkzeugs teilweise außerhalb der Sensorfläche lag.

Die Gleichmäßigkeit der Druckverteilung auf dem Stamm wurde subjektiv an Hand der aufgenommenen Bildfolgen beurteilt. Das Messsystem verfügt über mehrere Funktionen für spezifische Auswertungen. Davon wurde die Darstellung der zeitlichen Veränderung der Größe der Kontaktfläche (= Anzahl der belasteten Bildpunkte x Fläche eines Bildpunktes) sowie die Darstellung der Position des Belastungsschwerpunktes verwendet, dessen

Spur einen Eindruck über die in der Kontaktebene stattfindenden Belastungsverschiebungen, d.h. über mögliche Schubbelastungen vermittelt.

3. Ergebnisse und Diskussion

Die spezifische Druckbelastung am Stamm wird durch die wirkende Kraft und die Kontaktfläche bestimmt. Die Größe der Kontaktfläche wird beeinflusst vom Stammdurchmesser und von der Elastizität der Polsterung.

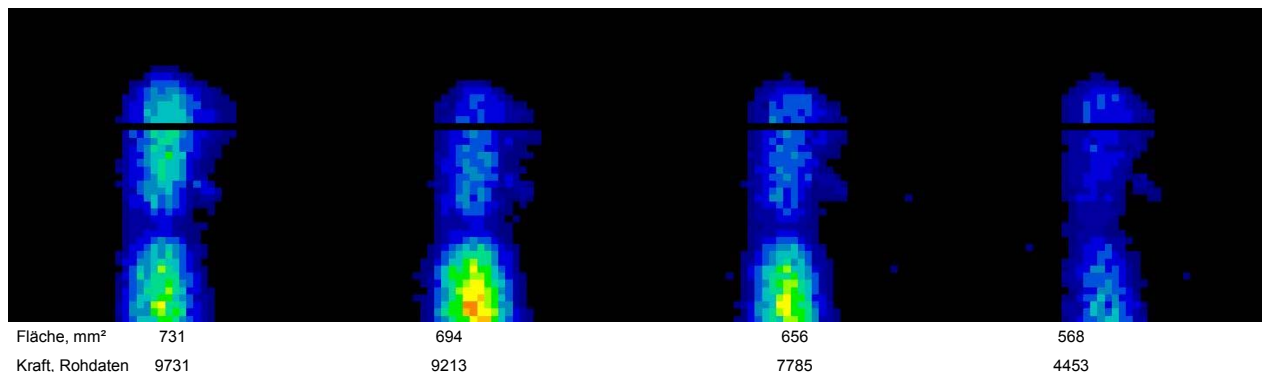


Bild 3: Vier Phasen der Druckverteilung am Werkzeug mit U-Profilgummi (links: maximale Kontaktfläche, rechts: minimale Kontaktfläche)

Beim Test mit U-Profilgummi ergab sich eine sehr ungleichmäßige Druckverteilung mit zwei vertikal übereinander liegenden Bereichen erhöhter Druckbelastung (Bild 3). In Bild 3 sind aus der Bildfolge der Druckbelastung zwischen Belastungsmaximum (maximale Kontaktfläche) und dem darauf folgenden Belastungsminimum (minimale Kontaktfläche) vier Bilder ausgewählt, welche die Veränderungen der Belastungsverteilung deutlich widerspiegeln. Hier zeigt die Farbskala von blau nach rot ansteigende Druckbelastung der Bildpunkte entsprechend Binärwerten von 1 bis 90. Besonders auffällig war, dass im oberen Bereich der Kontaktfläche die Druckbelastung abnahm, während sie im unteren Bereich zunächst zunahm und erst danach insgesamt das Minimum erreicht wurde. Der Schwerpunkt der Druckbelastung wanderte bei diesem Rüttelwerkzeug periodisch in vertikaler Richtung, was auf entsprechende Schubbelastungen schließen lässt. Die Kontaktfläche variierte in der dargestellten Bildfolge zwischen 731 und 568 mm², und die Kräftesumme (= Summe der Binärwerte der belasteten Bildpunkte) zwischen 9731 und 4453. Dabei ist zu berücksichtigen, dass nicht die gesamte Kontaktfläche vom Sensor erfasst wurde und eine Sensorzeile ausgefallen war.

Bild 4 zeigt den Verlauf der vom Sensor erfassten Kontaktfläche über eine Zeitspanne von etwas mehr als 5 Sekunden. Nach dem Einschwingen verlief diese wie eine ungedämpfte Schwingung.

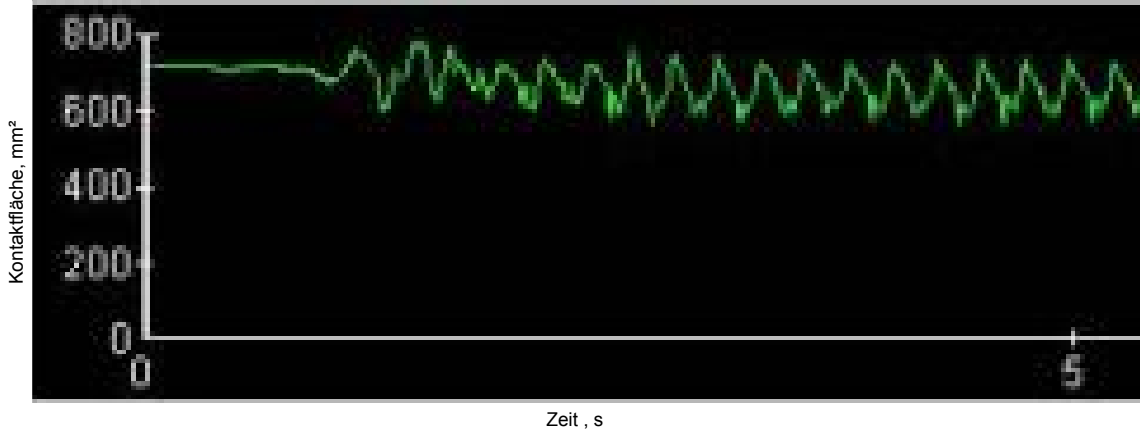
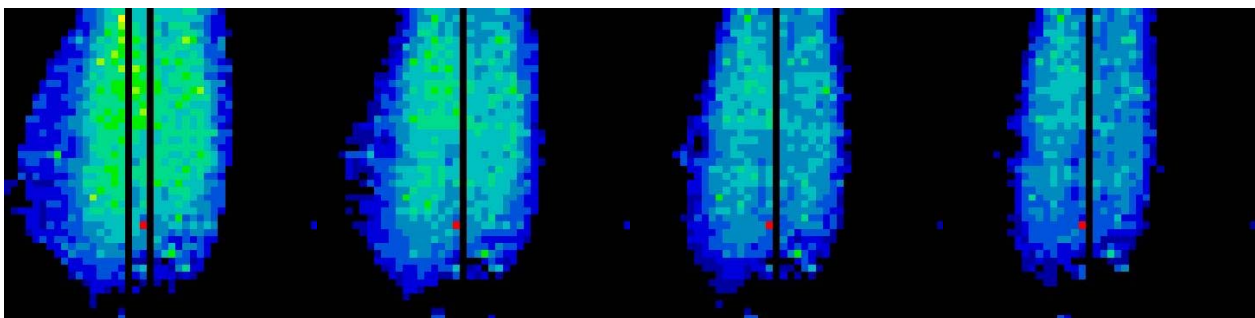


Bild 4: Verlauf der Kontaktflächenvariation über 5 Sekunden Rüttelvorgang beim Werkzeug mit U-Profilgummi (Rüttelfrequenz $4,2 \text{ s}^{-1}$)

Demgegenüber rief die Polsterung mit Blockgummi eine wesentlich gleichmäßigere Druckverteilung mit geringeren lokalen Spitzenwerten hervor (Bild 5). In diesem Falle wurde die Farbskala zur besseren Visualisierung niedriger eingestellt als bei dem Test mit dem U-Profilgummi. Sie zeigt von blau nach rot ansteigende Druckbelastung der Bildpunkte entsprechend Binärwerten von 1 bis 25. Der Druckschwerpunkt blieb im wesentlichen auf der gleichen Position stehen. Daher kann man Schubbelastungen wahrscheinlich vernachlässigen. Die Kontaktfläche variierte in der dargestellten Bildfolge zwischen 6013 und 4219 mm^2 , und die Kräftesumme (= Summe der Binärwerte der belasteten Bildpunkte) zwischen 8430 und 4888. Das heißt, die Kontaktfläche war beim Blockgummi-Polster wesentlich größer. Auch bei diesem Test wurde ein Teil der gesamten Kontaktfläche vom Sensor nicht erfasst und ein bis zwei Sensorspalten fielen aus.



Fläche, mm^2	6013	5497	4761	4219
Kraft, Rohdaten	8430	7205	5817	4888

Bild 5: Vier Phasen der Druckverteilung am Werkzeug mit Blockgummi (links: maximale Kontaktfläche, rechts: minimale Kontaktfläche)

Bild 6 zeigt einen Ausschnitt von etwa 5 Sekunden aus dem Verlauf der Kontaktflächenvariation gegen Ende des Rüttelvorgangs, der ebenfalls einer ungedämpften Schwingung entspricht.

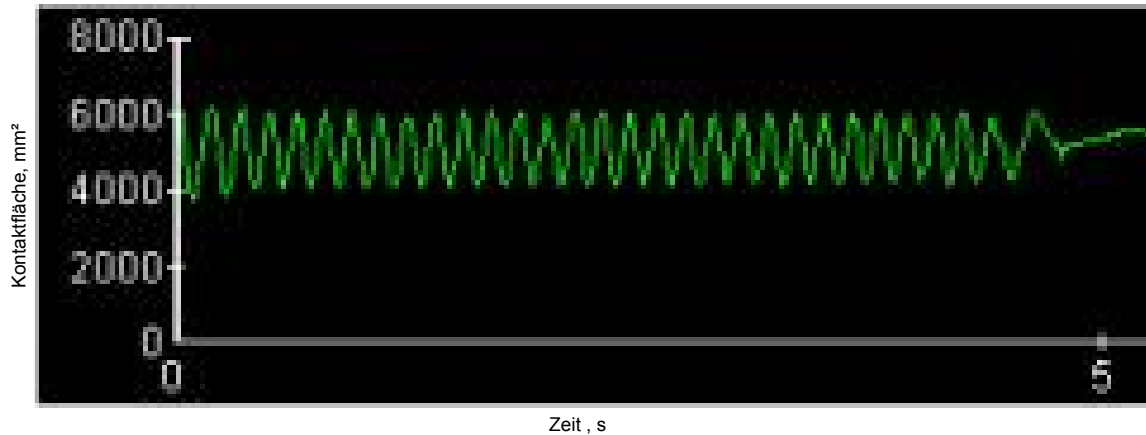


Bild 6: Verlauf der Kontaktflächenvariation über 5 Sekunden Rüttelvorgang beim Werkzeug mit Blockgummi (Rüttelfrequenz $6,6 \text{ s}^{-1}$)

Wegen der unebenen Rindenbeschaffenheit fand der Foliensensor keine gleichmäßige Auflagefläche. Dies führte teilweise zu Kontaktproblemen, wobei einzelne Zeilen oder Spalten des Sensors ausfielen, wie in den Druckverteilungsbildern zu sehen ist.

4. Schlussfolgerungen

Bei der Industrieobsternte mit Stammrüttelwerkzeug lässt sich die Belastungsverteilung am Stamm mit Hilfe eines drucksensitiven Foliensensors aufnehmen. An Hand der aufgenommenen Bildfolgen der Druckverteilung kann festgestellt werden, wie unterschiedliche Polstervarianten die Gleichmäßigkeit der Druckverteilung beeinflussen und inwieweit Schubbelastungen auf die Rinde vermutet werden können.

Polsterung mittels Blockgummi übte sowohl geringere als auch gleichmäßigere Belastungen aus als Polsterung mittels U-Profilgummi. Die Klemmkraft muss in jedem Falle größer als die Rüttelkraft sein, um Schubbelastungen zu minimieren.

Erfassung des Deckungsgrades in Winterraps mit der Kamera MS 2100

Detection of the coverage level in winter rape with the camera MS 2100

Karl-Heinz Dammer, Hartmut Böttger, Hans-Jürgen Horn
Leibniz-Institut für Agrartechnik Potsdam-Bornim e. V. Max-Eyth-Allee 100, 14469 Potsdam
E-mail: kdammer@atb-potsdam.de

Zusammenfassung: Im Herbst und Frühjahr 2003/2004 erfolgten Messungen in der Kultur Raps mit einem Kamerasystem zur Detektion des Deckungsgrades. Dieser zeigte an den Stichprobenpunkten eine hohe Korrelation zur Frisch- und Trockenmasse. Das Kamerasystem ist prinzipiell zur Steuerung einer Pflanzenschutzspritze in Echtzeit geeignet. Unter der Annahme eines Spritzszenarios, bei dem die Aufwandmenge direkt proportional dem Deckungsgrad angepasst wird, hätten sich bei dem im Frühjahr untersuchten Feld Pflanzenschutzmitteleinsparungen von etwa 46 % ergeben.

Deskriptoren: Kameratechnik, Bildverarbeitung, Deckungsgrad, Raps

Abstract: *In autumn and spring 2003/2004 the coverage level was detected by camera vision in rape. At the sampling points there was a high correlation between the camera detected coverage level and the green and dry mass, respectively.*

The sensor system would be suitable for the control of a field sprayer in real time. Assuming a spray scenario where the application amount is adapted to the coverage level linearly, pesticide savings of around 46 % would be obtained for the scanned field.

Keywords: *camera vision, image analysis, coverage level, rape*

1. Einleitung

Die Überführung von Echtzeit-Sensortechnik in die industrielle Produktion hängt unter anderem von deren universeller Einsetzbarkeit in der landwirtschaftlichen Praxis ab. Spezialisierte Sensoren können meist nur zur Steuerung eines pflanzenbaulichen Prozesses in einem bestimmten Zeitfenster und in meist nur einer Kulturart eingesetzt werden. Die Industrie und der Landwirt als Endverbraucher sind vor allem an Sensortechniken interessiert, die zur Steuerung verschiedener Arbeitsmaschinen für pflanzenbauliche Maßnahmen in mehreren Kulturen geeignet sind. Die Einsatzzeit pro Jahr ist größer als bei spezialisierten Sensoren. Folglich sind die mit der Anschaffung der neuen Technologie verbundenen Investitionen für den Landwirt schneller amortisierbar.

Innerhalb des vom BMBF geförderten Forschungsprojektes „Messsystem zur Bewertung des Unkrautvorkommens“ wurde ein fahrzeuggestütztes Kamerasystem zur Unkrauterkenkung während der Fahrt entwickelt (BÖTTGER, 2004). Die Hauptkomponente des Systems ist eine 3-Chip-CCD Multispektralkamera der Firma DUNCANTECH vom Typ MS2100. Die Kamera wird am Front-Dreipunktanbau eines Traktors angebracht. Durch pixelweise Differenzbildung aus reflektierten Werten im Bereich des roten und infraroten Lichtes wird grüne Pflanzenmasse von Boden separiert. Die Bildbearbeitungssoftware „weeds“ der Firma SYMACON ermöglicht es unter anderem, den Deckungsgrad während der Überfahrt zu ermitteln.

Das Ziel der vorgestellten Versuche war es, das Kamerasystem hinsichtlich der Einsetzbarkeit zur automatischen Erfassung der oberirdischen Biomasse in Raps zu prüfen. Um den potentiellen Nutzen des Verfahrens einzuschätzen, erfolgte eine Bewertung des Einsparpotentials an Fungiziden, wenn eine bedarfsgerechte Fungizidanwendung entsprechend des Deckungsgrades erfolgen würde.

2. Material und Methoden

Im Herbst 2003 sowie im Frühjahr 2004 wurden jeweils 13 Stichprobenpunkte entlang eines Transektes in einem heterogenen Rapsfeld ausgewählt. Die Punkte unterschieden sich hinsichtlich der oberirdischen Biomasse erheblich. An diesen Punkten erfolgte mit dem Kamerasystem eine stationäre Bildaufnahme. Unkräuter, die eine Überschätzung des Deckungsgrades zur Folge hätten, wurden während des Bildbearbeitungsprozesses von der Deckungsgradberechnung ausgeschlossen. Danach wurden im entsprechenden Bildausschnitt alle Rapspflanzen über dem Boden abgeschnitten und die

Frischmasse mit einer elektronischen Feinwaage bestimmt. Anschließend erfolgte die Trocknung des Pflanzenmaterials im Trockenschrank und die Bestimmung der Trockenmasse. Der Zusammenhang zwischen dem kameratechnisch erfassten Deckungsgrad und der Biomasse wurde durch Regressionsanalyse unter Verwendung des Statistikprogramms SAS ermittelt.

Außerdem erfolgte im Frühjahr 2004 eine Echtzeiterfassung des Deckungsgrades im gesamten Rapsfeld. Dazu wurde das Feld in den Fahrspuren (18 Meter Abstand) abgefahren, wobei der Deckungsgrad über einer Fahrstrecke von etwa 5 Metern gemittelt und in einem Messwerterfassungssystem gemeinsam mit den Ortskoordinaten abgelegt wurde.

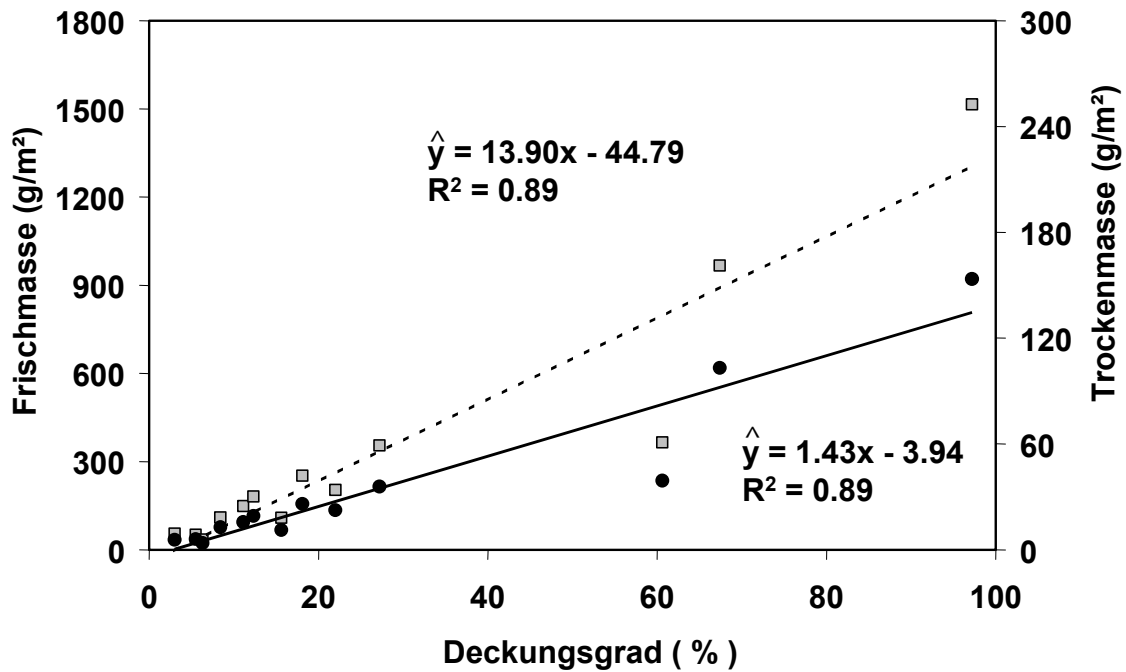
Das Einsparpotential wurde unter der Annahme eines Spritzszenarios berechnet, bei dem die Applikationsmenge von 0 % (bei Deckungsgrad 0 %) bis 100 % (bei Deckungsgrad 100 %) linear dem aktuellen Deckungsgrad angepasst wird.

3. Ergebnisse und Diskussion

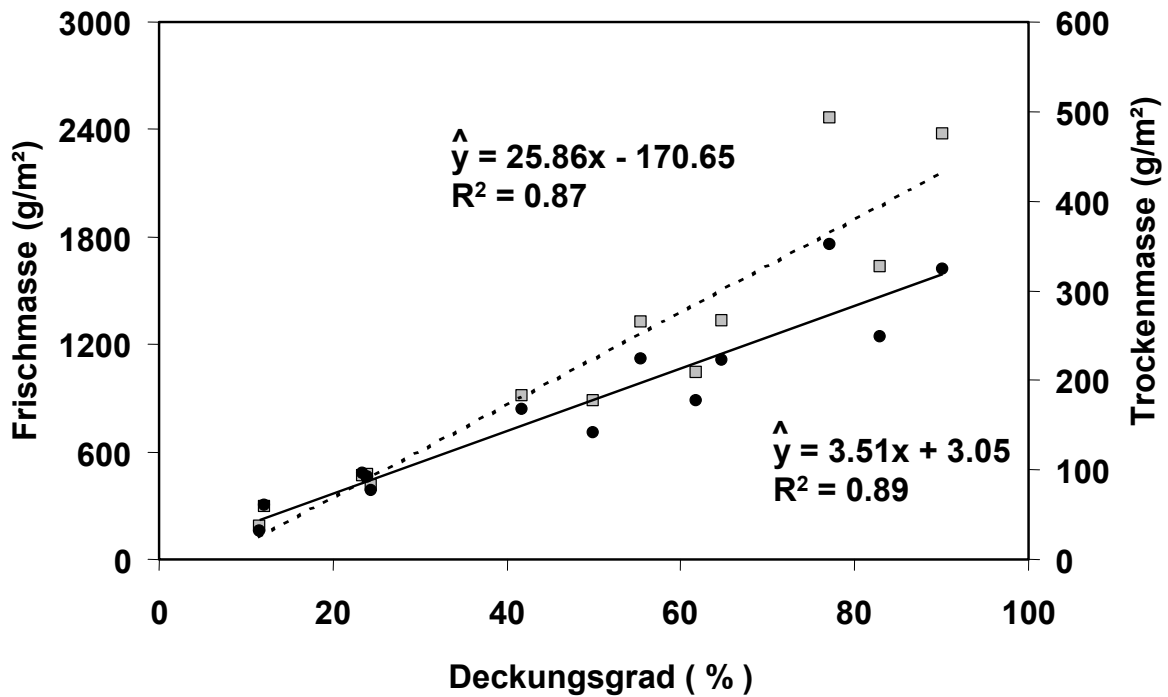
Im Herbst 2003 sowie im Frühjahr 2004 wurde die Biomasse durch das Kamerasystem mit einer hohen Genauigkeit erfasst (Herbst 2003: $R^2=0,89$, Frühjahr 2004 $R^2=0,87$). Die Abhängigkeit war linear (Bild 1 a, b). Dies würde beispielsweise eine unkomplizierte Ansteuerung einer Pflanzenschutzspritze ermöglichen.

Der Deckungsgrad zeigte eine gute Proportionalität zur Biomasse. Die Regressionskoeffizienten waren im Vergleich zum Herbst im Frühjahr höher. Dies ist ein Hinweis darauf, dass die Pflanzen im Frühjahr in die Schossphase übergehen und der apikale Wachstumspunkt bereits höher über dem Erdboden liegt als im Herbst.

Innerhalb des Feldes wurden mittels Kamerabetrieb in Echtzeit Deckungsgrade von 0 % bis 99 % detektiert. Die aufgezeichneten 5409 Messwerte waren nicht normalverteilt (Bild 2). Es ergab sich ein Median des Deckungsgrades von 58,4 %. Die durchgehende Linie in der Abbildung stellt das angenommene Applikationsszenario bei variierender Applikationsmenge dar. Für diese Bestandesverhältnisse würden sich Einsparungen von etwa 46 % an Pflanzenschutzmitteln ergeben.



a)



b)

Bild 1: Beziehung zwischen kameratechnisch detektiertem Deckungsgrad und Frisch- (unterbrochene Linie) bzw. Trockenmasse (durchgehende Linie),
 a) 1. 10.2003,
 b) 25.3.2004

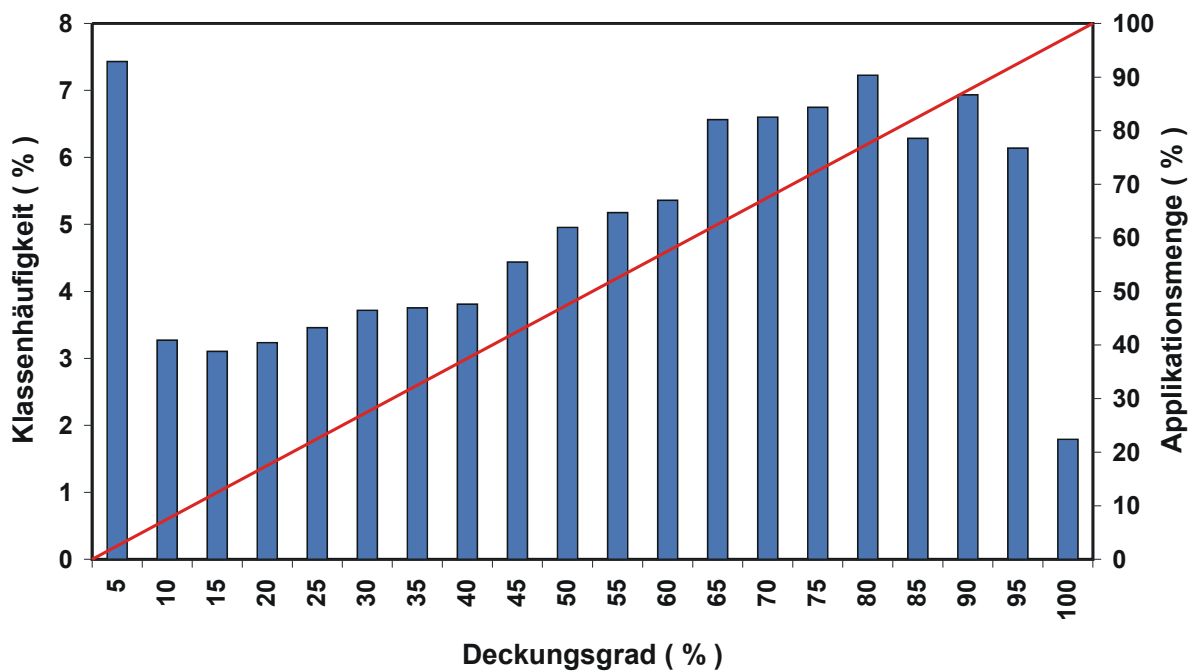


Bild 2: Häufigkeitsverteilung der Deckungsgrad-Messwerte, durchgehende Linie: Applikationsmenge bei Annahme einer Applikation mit variablen Aufwandmengen

Danksagung

Den Mitarbeitern Rolf Adamek, Antje Giebel und Katrin Witzke wird an dieser Stelle für die Versuchsdurchführung und –auswertung gedankt.

4. Literatur

BÖTTGER H, LANGNER HR, RUCKELSHAUSEN A (2004) Messsystem zur Bewertung des Unkrautvorkommens. Bornimer Agrartechnische Berichte Heft 36, pp. 49-54

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

Interessenten wenden sich an:

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

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

Schutzgebühr: 13,- €