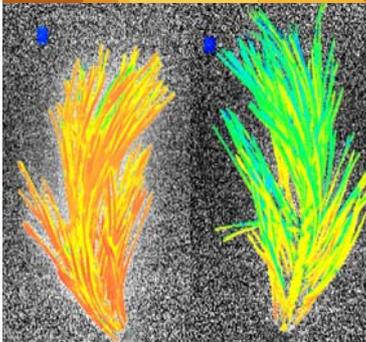
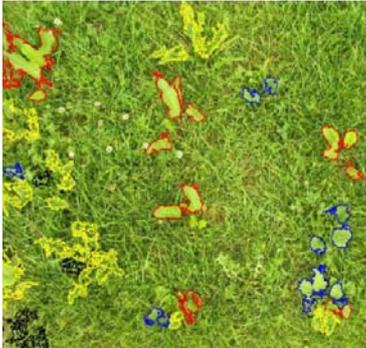


**Computer-Bildanalyse  
in der Landwirtschaft**

**- Workshop 2006 -**

**Computerised Image Analysis  
in Agriculture**

**- Workshop 2006 -**



**Bornimer Agrartechnische Berichte**

Heft 56

Potsdam-Bornim / Bonn 2006

**Computer-Bildanalyse  
In der Landwirtschaft  
-Workshop 2006-**

Computerised Image Analysis  
in Agriculture  
-Workshop 2006-

---

Bornimer Agrartechnische Berichte  
Heft 56

Potsdam-Bornim / Bonn 2006

**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](mailto:atb@atb-potsdam.de)  
Internet: <http://www.atb-potsdam.de>

Juli 2006

**Redaktion:**

Bernd Herold

**Typografische Gestaltung:**

Andrea Gabbert

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

Für den Inhalt der Beiträge zeichnen die Autoren verantwortlich.

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

ISSN 0947-7314

© Leibniz-Institut für Agrartechnik Potsdam-Bornim e.V., Potsdam-Bornim 2006

<b>Inhaltsverzeichnis</b>	<b>Seite</b>
<i>Table of contents</i>	<i>page</i>
<b>Vorwort</b> <i>Preface</i>	<b>5</b>
<b>Ein bildanalytischer Ansatz zur Ampferklassifikation</b> <i>Detection of broad-leaved dock using digital image analysis</i> Steffen Gebhardt, Walter Kühbauch	<b>7</b>
<b>Optoelektronisches Sensorsystem zur Reifegradmessung bei der Maisernte</b> <i>Optoelectronic sensor system for measuring the degree of maturity during maize harvesting</i> Christoph Frederik Kronsbein, Martin Egbers, Arno Ruckelshausen	<b>16</b>
<b>RAL-Referenzierte Messung der Rasenfarbe</b> <i>Measuring turf grass colour based on RAL-reference</i> Reiner Lock, N. Nonn, Walter Kühbauch	<b>22</b>
<b>Chlorophyllfluoreszenzbildanalyse zur raschen Indikation des Befalls von Laub- und Nadelbäumen durch herbivore Insekten</b> <i>Chlorophyll fluorescence imaging to analyse insect herbivory on broad-leaved and coniferous trees</i> Michael Forstreuter, Roland Schröder, Werner B. Herppich	<b>26</b>
<b>Stereobildverarbeitung für die Landtechnik</b> <i>Analysis of stereoimages in agricultural engineering</i> Hans-Rainer Langner, Hartmut Schemel, Saad Abusamra	<b>34</b>
<b>Wissensbasierte Artenerkennung anhand von Konturmerkmalen der Pflanzen mit verschiedenen Klassifikationsalgorithmen</b> <i>Knowledge based identification of plant species by using contour features and different classification algorithms</i> Markus Sökefeld, Roland Gerhards, Horst Oebel, Martin Weiss, Peter Risser, Markus Pflugfelder	<b>51</b>
<b>Einführung in die Bewegungsanalyse über automatisches, bildoptisches Markertracking</b> <i>Introduction to motion analysis based on automatic optical marker tracking</i> Martina Jakob	<b>60</b>
<b>Probleme des Einsatzes von Robotern zur selektiven Ernte von Pflanzen und Pflanzenteilen</b> <i>Problems using robotic systems for harvesting of plants or parts of plants</i> Thomas Rath, Marco Kawollek	<b>67</b>
<b>Ableitung von Materialeigenschaften aus Bildern von Seafood-Produkten</b> <i>Determination of material properties from images of seafood-products</i> Michael Kroeger	<b>76</b>
<b>Untersuchungen von Ausbreitungsvorgängen mit Hilfe der Laser-Lichtschnitt Technik im Grenzschichtwindkanal des ATB</b> <i>Investigation of dispersal processes by means of laser-light-sheet technique in boundary layer wind tunnel of ATB</i> Hans-Joachim Müller, Ulrich Pech, Kristina von Bobrutzki, Knut Schröter	<b>85</b>

<b>Ernteterminbestimmung auf der Basis von positionsbezogenen Daten zur Fruchtqualitätsbestimmung</b>	<b>93</b>
<i>Harvest Date Determination by Means of Site-Specific Fruit Quality Monitoring</i>	
Manuela Zude, Michael Pflanz, Bernd Herold, Craig Kaprielian, Brian L. Aivazian	
<b>Detektion von Stressmerkmalen in Getreidebeständen mittels spektraler Entmischung</b>	<b>101</b>
<i>Spectral mixture analysis to detect unspecific stress in wheat crops</i>	
Jonas Franke	
<b>Spektrale Messung zur Beurteilung von Reife und Lagerfähigkeit bei Apfel</b>	<b>113</b>
<i>Spectral measurement of maturity and shelf life of apple fruit</i>	
Bernd Herold, Manuela Zude, Ingo Truppel, Martin Geyer	
<b>Einzelpflanzenerkennung zur automatischen Maschinensteuerung</b>	<b>120</b>
<i>Single plant detection for automatic machine control</i>	
Oliver Schmittmann, Lutz Damerow	
<b>Thermographie zur Klimasteuerung im Kartoffellager</b>	<b>126</b>
<i>Thermography for environment control in potato stores</i>	
Klaus Gottschalk, Sabine Geyer	

## Vorwort

Computergestützte Bildanalyse ist in der Lage, Funktionen des menschlichen Sehvermögens nachzubilden und für spezifische Aufgabenstellungen leistungsfähigere technische Lösungen zu entwickeln. Bildanalytische Methoden bieten auch zahlreiche Möglichkeiten zur Effizienzsteigerung in der Landwirtschaft. Anwendungen mit landwirtschaftlichem Hintergrund umfassen sowohl molekularbiologische Objekte in elektronenmikroskopischen Bildern als auch große Landschaftsgebiete in Satellitenaufnahmen. Dabei reicht der Einsatz der computergestützten Bildanalyse von zeitaufwändigen Auswertungen im Labor bis zur Echtzeitsteuerung hochleistungsfähiger Maschinen unter rauen Feldbedingungen.

Mit dieser breiten Palette von Anwendungen im Agrarbereich befassen sich zahlreiche Universitäten und Hochschulen, aber auch die außeruniversitäre Forschung, die landwirtschaftlichen Versuchsanstalten und die Landmaschinenindustrie. Für einen effektiven Einsatz der Bildanalyse unter den komplizierten landwirtschaftlichen Anwendungsbedingungen ist die interdisziplinäre Zusammenarbeit zwischen Partnern aus unterschiedlichen Bereichen unverzichtbar. Deshalb besitzt der Austausch von Ideen und Erfahrungen innerhalb der Forschung sowie zwischen Wissenschaft und Praxis eine hohe Bedeutung.

Einen Beitrag zu diesem Austausch versucht der von der Ressortforschung des Bundes im Jahre 1995 initiierte alljährliche Workshop zu leisten, der in diesem Jahr am Institut für Landtechnik der Universität Bonn veranstaltet wurde. Zehn Vorträge und fünf Posterbeiträge wurden von den Teilnehmern präsentiert. Die Themen erstreckten sich von der Feldbestandsanalyse mit Pflanzenklassifikation, Steuerung von Robotern und Feldarbeitsmaschinen, Qualitätsbestimmung an pflanzlichen und tierischen Produkten, Analyse der Ausbreitungsvorgänge in Strömungen bis zur Bewegungsanalyse bei Handarbeitsprozessen.

Für die Vorbereitung und Durchführung des erfolgreichen Workshops ist dem gastgebenden Bonner Institut herzlich zu danken.

Bonn und Potsdam-Bornim im Mai 2006

Dr.-Ing. L. Damerow

Dr. M. Geyer



## Ein bildanalytischer Ansatz zur Ampferdetektion

### *Detection of broad-leaved dock using digital image analysis*

Steffen Gebhardt, Walter Kühbauch  
Institut für Nutzpflanzenwissenschaften und Ressourcenschutz INRES  
Katzenburgweg 5, 53115 Bonn  
E-Mail: s.gebhardt@uni-bonn.de

**Zusammenfassung:** Precision farming Techniken sind im Grünland bislang weitgehend ungenutzt. Zum Beispiel findet eine teilschlagspezifische Herbizidapplikation auf Basis einer automatischen Unkrautkartierung, wie im Ackerbau, nicht statt. Gegenstand unserer Untersuchung war, ein Verfahren zur bildanalytischen Detektion von Stumpfbältrigem Ampfer (*Rumex obtusifolius* L.), dem bedeutendsten Grünlandunkraut Mitteleuropas, zu entwickeln. In den Versuchen wurden in Grünlandparzellen Stumpfbältriger Ampfer und andere Grünland-Unkräuter eingepflanzt und in drei aufeinander folgenden Wachstumsphasen mit einer digitalen RGB Kamera erfasst. Mit objekt-orientierter Bildklassifikation konnten Ampfer-Erkennungsraten von bis zu 93% erzielt werden. Die GPS-Codierung der Bilder ermöglichte die Ableitung von Ampferverteilungs- und Ampferdichtekarten.

**Deskriptoren:** automatische Unkrautklassifikation, Ampferverteilungskarte, Precision farming, Bildverarbeitung

**Summary:** *Precision farming technologies are rarely used in grassland farming. For example, the site-specific weed control, based on automatic weed mapping, has not been established so far. Aim of this investigation was the development of an image analysis system for automatic mapping of Rumex obtusifolius which is a major weed in European grassland. Artificial designed plots populates with typical grassland weeds were photographed at three different stages of plant growing using a commercial digital RGB camera. An object-oriented image classification was applied which enabled the detection of Rumex with rates up to 93%. Further, GPS-coding of the images allowed the derivation of Rumex distribution and density maps.*

**Keywords:** *automatic weed detection, Rumex obtusifolius, distribution map, precision farming, image processing*

## 1 Einleitung

*Rumex obtusifolius* (RUMOB) gilt als eines der bedeutendsten Grünlandunkräuter in Mitteleuropa (ZALLER, 2004). Seine Bekämpfung ist kosten- und zeitintensiv. Die berührungsfreie Klassifikation der Grünlandvegetation, insbesondere die automatische, ortsgenaue Erkennung von RUMOB, wären ein enormer Beitrag zum Präzisionspflanzenbau im Grünland (GEBHARDT & KÜHBAUCH, 2005). Erste Versuche zur Detektion von RUMOB mit digitaler Bildanalyse unter kontrollierten Aufnahmebedingungen sind bei GEBHARDT *et al.* (2006) beschrieben. In der vorliegenden Arbeit wird das Bildanalyseverfahren bis zur Kartierung der Ampferverteilung und einer Plausibilitätsanalyse erweitert.

## 2 Material und Methoden

### *Bildmaterial*

Im Versuch wurden hintereinander gereiht 36 Parzellen mit Deutsch-Weidelgras auf dem Versuchsgut der Universität Bonn in Rengen (Eifel) angelegt. In jede Parzelle (2,50 x 2,0 m<sup>2</sup>) wurden im Gewächshaus angezogene Pflanzen von *Rumex obtusifolius* (RUMOB), *Plantago major* (PLAMA), *Taraxacum officinale* (TAROF) und *Trifolium repens* in einem definierten Muster angepflanzt. Parallel zu den in der Reihe angeordneten Versuchspartzellen wurde eine Schienenanlage konstruiert auf welcher ein Kamerakran bewegt wurde. Über Lichtschranken gesteuert, konnte jede Versuchspartzelle wiederholt in identischer Aufnahmeposition angesteuert werden und die Bildaufnahme automatisch ausgelöst werden. Es wurde eine Canon Powershot Pro1 Digitalkamera verwendet, welche in einer Höhe von 1,60 m am Kranarm befestigt wurde und senkrecht zur Erdoberfläche aufnahm. Bei einer Bildauflösung von 3264 × 2448 Pixeln wurde aus dieser Höhe eine räumliche Auflösung von 0,6 mm erreicht. Die Bildaufnahme erfolgte an drei Terminen in unterschiedlichen Wachstumsphasen der Pflanzen am 19., 22. und 28. Juli, 2005. Zum Zeitpunkt der Bildaufnahme drang infolge Bewölkung kein direktes Sonnenlicht auf den Versuch ein. Somit standen drei Bilddatensätze mit jeweils 36 Bildern zur Verfügung.

### *Bildsegmentierung*

Ziel der Bildsegmentierung war die Trennung der Blätter der Unkräuter vom Bildhintergrund. Das angewendete Verfahren ist in **Bild 1a-g** veranschaulicht. Die RGB Bilder wurden zunächst in Intensitätsbilder  $I$  umgewandelt (Formel 1).

$$I = 0.2989 \bullet R + 0.5870 \bullet G + 0.1140 \bullet B \quad (1)$$

Basierend auf diesen wurden die Gradientenbilder  $\nabla f$  (Formel 2) berechnet.

$$\nabla f_{ij} = \sqrt{G_{x_{ij}}^2 + G_{y_{ij}}^2} \quad (2)$$

G<sub>x</sub> und G<sub>y</sub> sind Ergebnis der Anwendung des Sobel-Operators in x- und y- Richtung auf I. Ebenso basierend auf I wurde das Bild der Standardabweichung S berechnet (Formel 3).

$$S_{ij} = \sqrt{\frac{1}{n_w} \sum_{I_w \in W_d(P_{ij})} (I_w - m_{ij})^2} \quad (3)$$

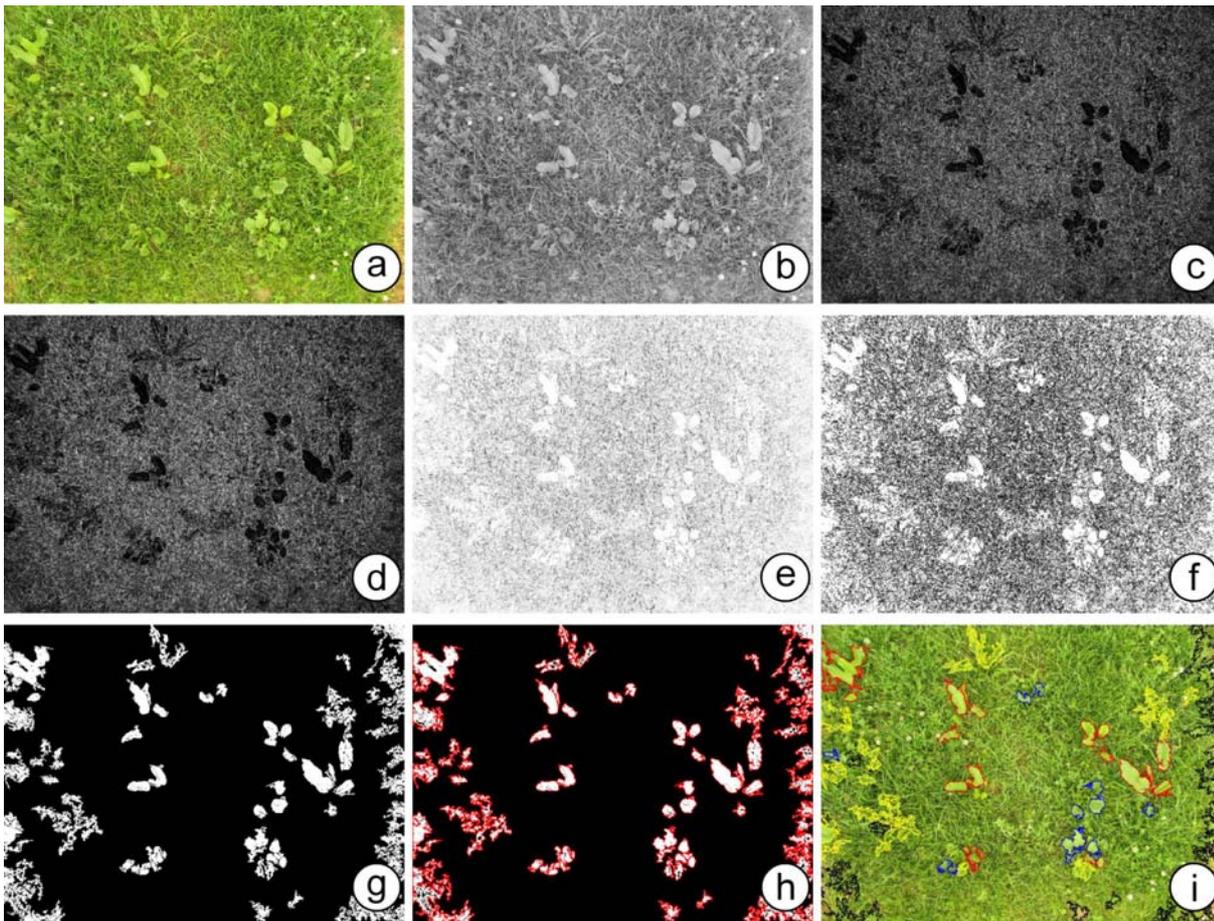
S<sub>ij</sub> ist die Standardabweichung der nW Intensitäten I<sub>w</sub> innerhalb der Filtermatrix W<sub>d</sub>. P<sub>ij</sub> ist die Position der Filtermatrix und m ist der Mittelwert aller Intensitäten innerhalb W<sub>d</sub> an der aktuellen Position. Die Größe von W<sub>d</sub> war 5 × 5 Pixel. Anschließend wurde die lokale Homogenität H berechnet (Formel 4).

$$H_{ij} = 1 - \frac{S_{ij}}{S_{\max}} \cdot \frac{\nabla f_{ij}}{\nabla f_{\max}} \quad (4)$$

$\nabla f / \nabla f_{\max}$  und  $S / S_{\max}$  sind die Maximum-normierten Gradientenbilder und Bilder der Standardabweichung. Durch Anwendung eines Schwellwertes von 0,97 auf H wurden Binärbilder B erzeugt (Formel 5), auf welche anschließend eine morphologische Bildöffnung mit einem Strukturelement S mit Radius 3 Pixel angewandt wurde (Formel 6). Abschließend wurden im Hinblick auf die relativ großblättrigen Kräuter alle Bildobjekte kleiner 5000 Pixel (ca. 17 mm<sup>2</sup>) eliminiert.

$$B_{ij} = \begin{cases} 0 & \text{if } H_{ij} < 0.97 \\ 1 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (5)$$

$$O(B_{ij}, S) = B_{ij} \circ S = D(E(B_{ij}, S), S) \quad (6)$$



**Bild 1:** Bildsegmentierung und Klassifikation: (a) original RGB Bild, (b) Intensitätsbild berechnet aus (a), (c) Gradientenbild, abgeleitet von (b), (d) Bild der Standardabweichung abgeleitet von (b), (e) lokale Homogenität berechnet aus (c) und (d), (f) Binärbild nach Schwellwertanwendung auf (e) und Eliminieren von Objekten kleiner 5000 Pixel, (g) Binärbild nach morphologischer Bildöffnung von (f) und Eliminieren von Objekten kleiner 5000 Pixel, (h) die Objektkonturen, (i) Klassifikationsergebnis.

### *Merkmalsextraktion und Merkmalsauswahl*

Für jedes der durch die Bildsegmentierung identifizierten Objekte wurden die in **Tabelle 1** aufgelisteten Merkmale zur Beschreibung der Geometrie, der Farbe und der Textur der Objekte berechnet. Das Ziel der Arbeit war die Klassifikation dieser Objekte in die Klassen (1) RUMOB, (2) TAROF, (3) PLAMA, (4) Boden und (5) einer Restklasse, auf Basis ihrer spezifischen Objekteigenschaften. Um zu ermitteln, welche der berechneten Merkmale einen Einfluss auf die Unterscheidung in die definierten Klassen hat, wurde eine schrittweise Diskriminanzanalyse durchgeführt.

### *Klassifikation*

Das Verfahren der Maximum-likelihood Schätzung wurde für die Klassifikation verwendet. Nur die Merkmale, welche nach Aussage der schrittweisen Diskriminanzanalyse Einfluss

auf die Klassifikation haben, wurden verwendet. Der Klassifikator wurde mit allen Objekten trainiert, welche aus den ersten 18 Bildern vom 22. Juli 2005 abgeleitet wurden. Alle restlichen Bildobjekte des Datensatzes vom 22. Juli und die Datensätze vom 19. und 28. Juli wurden anschließend klassifiziert.

**Tabelle 1:** Merkmalsextraktion und –auswahl. 17 Objektmerkmale und deren Beitrag zur Klassifikation

Geometrie	Objektmerkmale	
	Farbe	Textur
Fläche*	$\mu R^{**}$	$\mu S^{**}$
Umfang	$\mu G^{**}$	$\mu \nabla f^{**}$
Exzentrizität	$\mu I^{**}$	$\mu H^{**}$
Rundheit	$\sigma R^{**}$	$\sigma S^{**}$
Formfaktor	$\sigma G^{**}$	$\sigma \nabla f^{**}$
	$\sigma I^{**}$	$\sigma H^{**}$

\*\* in schrittweiser Diskriminanzanalyse ausgewählte Variablen (Merkmale) mit signifikantem Beitrag zur Unterscheidung der Gruppen

\* in schrittweiser Diskriminanzanalyse ausgewählte Merkmale, die nicht in der Klassifikation verwendet wurden

$\mu$ =Mittelwert und  $\sigma$ =Standardabweichung der Objektpixel. R=roter Kanal, G=grüner Kanal, I=Intensität, S=Bild der Standardabweichung,  $\nabla f$ =Gradientenbild, H=lokale Homogenität.

### Kartierung

Die Versuchsparzellen wurden über GPS eingemessen. Für jede der 36 Parzellen wurde die Gauß-Krüger Koordinate des Parzellenmittelpunktes berechnet. Die Koordinaten der als Ampfer klassifizierten Bildobjekte wurden ebenso ins Gauß-Krüger Koordinatensystem transformiert. Dazu wurden zunächst die Bildkoordinaten in metrische Werte umgewandelt. Unter der vereinfachten Annahme einer verzerrungsfreien Bildaufnahme wurde hierbei der Koordinatenvektor  $x$  eines Objektes mit der Bildauflösung (Pixelgröße) von 0,6 mm multipliziert. Das Bildkoordinatensystem hat seinen Ursprung in der linken oberen Ecke. Daher wurde die Position des Ursprungs in den Mittelpunkt verschoben und die Objektkoordinaten wurden bezogen auf diesen neu berechnet. Dies ist lediglich eine Translation in  $x$ - und  $y$ -Richtung, sowie eine abschließende Drehung der  $y$ -Koordinaten um die  $x$ -Achse. Durch Anwendung einer 3-parametrischen Affintransformation (eine  $x$ - und eine  $y$ -Translation; eine Rotation) wurden die Koordinaten jedes Bildes in Gauß-Krüger Koordinaten umgewandelt. Der Rotationswinkel  $\alpha$  ergab sich aus der Berechnung des Azimuts zwischen den Mittelpunktkoordinaten der ersten und der letzten Parzelle (Formel 7).

$$\alpha = \arctan\left(\frac{x_{36} - x_1}{y_{36} - y_1}\right) \quad (7)$$

Die Translation ist die Verschiebung des metrischen Bildmittelpunktes in den entsprechenden Parzellenmittelpunkt  $P_i$ . Formel (8) ist die angewandte Affintransformation,

$$x_i' = A^T \cdot x_i = \begin{bmatrix} \cos(\alpha) & -\sin(\alpha) & 0 \\ \sin(\alpha) & \cos(\alpha) & 0 \\ P_{ix} & P_{iy} & 0 \end{bmatrix}^T \cdot \begin{bmatrix} x_{i1} & \dots & x_{in} \\ y_{i1} & \dots & y_{in} \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

wobei  $x_i'$  der berechnete Koordinatenvektor,  $A$  die Transformationsmatrix,  $x_i$  die Objektkoordinaten in Bild  $i$ ,  $\alpha$  der Rotationswinkel,  $P_i$  der Mittelpunkt der Parzelle  $i$  und  $n$  die Anzahl der Bildobjekte im Bild  $i$  sind.

Ein GIS Datensatz wurde aus den berechneten Punktkoordinaten erstellt und mittels Punktmethode, Darstellung lokaler Quantitäten durch Punkte (HAKE & GRÜNREICH, 1994), dargestellt mit der Objektfläche als Werteinheit. Abschließend wurde die Objektdichte als Anzahl von Objekten pro Quadratmeter berechnet. Es wurden Dichteklassen definiert und mittels Arealmethode präsentiert.

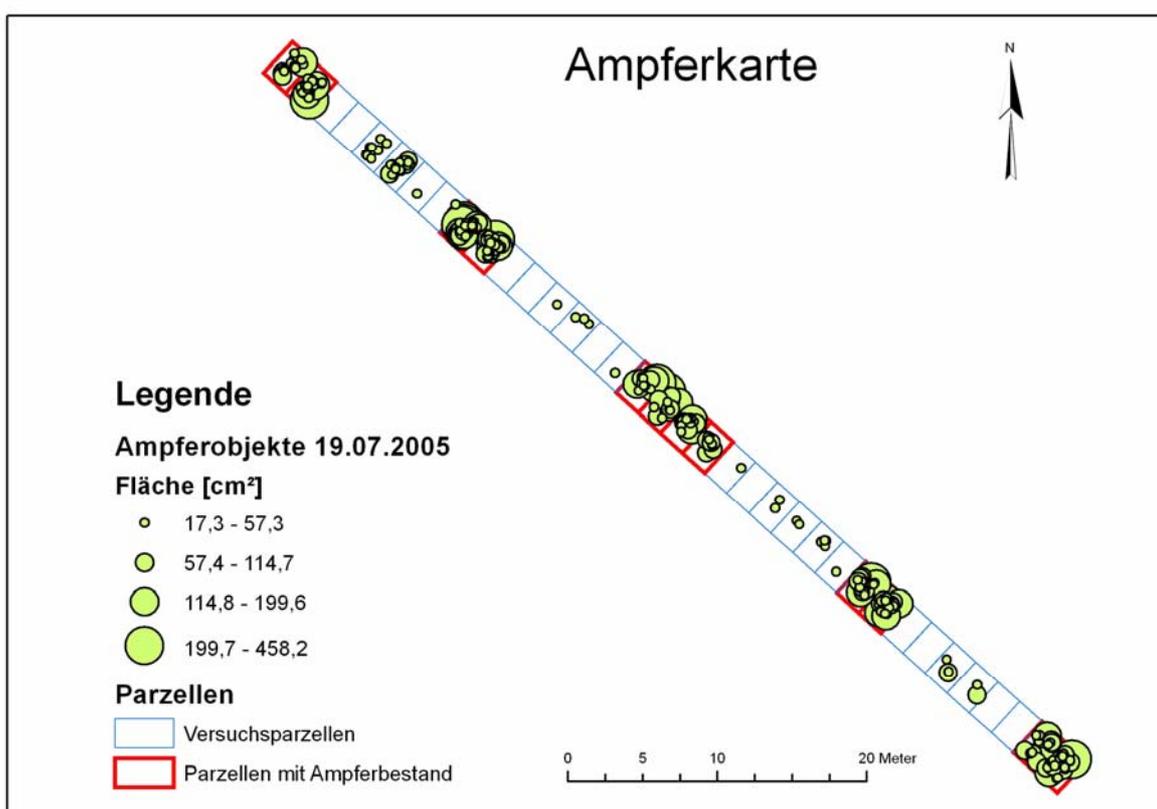
### 3 Ergebnisse

In 108 Bildaufnahmen wurden insgesamt 4070 Bildobjekte segmentiert. Dabei fielen 1216 bzw. 1429 und 1380 Objekte auf die Daten vom 19. bzw. 22. und 28. Juli. In der schrittweisen Diskriminanzanalyse wurden 649 Objekte des Datensatzes vom 22. Juli verwendet. Dies waren alle Objekte aus den ersten 18 Bildern dieses Datensatzes. Es zeigte sich, dass alle Farb- und Texturmerkmale Einfluss auf die Klassifikation haben. Unter den geometrischen Merkmalen hatte nur die Fläche einen gewissen Einfluss auf die Klassifikation. Aufgrund von Skalierungsproblemen bei der Berechnung der Kovarianzmatrizen beim Training des Klassifikators wurde diese aber wie alle geometrischen Merkmale nicht in die Klassifikation aufgenommen. Die Ergebnisse der Klassifikation des Datensatzes vom 19. Juli sind in **Tabelle 2** dargestellt. Die Gesamtdetektionsrate entsprach hierbei 82,7%. Die Rate richtig klassifizierter Ampferobjekte betrug 91,4% (233 von insgesamt 255 Objekten); 0,8% aller Restobjekte, 4,0% TAROF- und 6,8% PLAMA-Objekte wurden zu RUMOB fehlklassifiziert.

Die Detektionsraten aller drei Klassifikationen lagen zwischen 76% und 83%. Die RUMOB Raten lagen deutlich höher (85% – 93%). Fehlklassifikationen von Objekten anderer Klassen als RUMOB waren weit unter 10%.

**Tabelle 2:** Konfusionsmatrix der Klassifikation des Datensatzes vom 19. Juli

		Vorhergesagte Klasse					Objektanzahl	
		Rest	RUMOB	TAROF	PLAMA	Boden		
Originalklasse	Total	Rest	444	4	45	2	21	516
		RUMOB	0	233	10	12	0	255
		TAROF	21	7	131	14	3	176
		PLAMA	15	15	36	156	0	222
		Boden	5	0	0	0	42	47
%		Rest	86,0	0,8	8,7	0,4	4,1	100,0
		RUMOB	0,0	91,4	3,9	4,7	0,0	100,0
		TAROF	11,9	4,0	74,4	8,0	1,7	100,0
		PLAMA	6,8	6,8	16,2	70,3	0,0	100,0
		Boden	10,6	0,0	0,0	0,0	89,4	100,0

**Bild 2:** Kartierung von Stumpfbältrigem Ampfer (*Rumex obtusifolius* L.) im Parzellenversuch Rengen am 19. Juli 2005 anhand der Bildklassifikation und Objektverortung.

**Bild 2** ist die Karte der Ampferverteilung, abgeleitet aus dem Bilddatensatz vom 19. Juli 2005. Die Parzellen, in denen Ampferpflanzen vorhanden waren, sind durch dicke Umrandung gekennzeichnet. Es ist erkennbar, dass die dort vorhandenen Pflanzen mit hoher

Trefferquote erkannt wurden. Ebenso lassen sich sofort Fehlklassifikationen identifizieren, die zumeist auf falsch klassifizierte PLAMA-Objekte zurückzuführen sind. Die als Ampfer erkannten Objekte sind über deren Fläche in vier Stufen visualisiert. Bei den oberen beiden Klassen, ab ca. 115 cm<sup>2</sup>, kann man davon ausgehen, dass es sich nicht mehr um Einzelblätter wohl aber um Überlagerungen mehrerer Blätter handelt, die in der Bildsegmentierung nicht getrennt werden konnten.

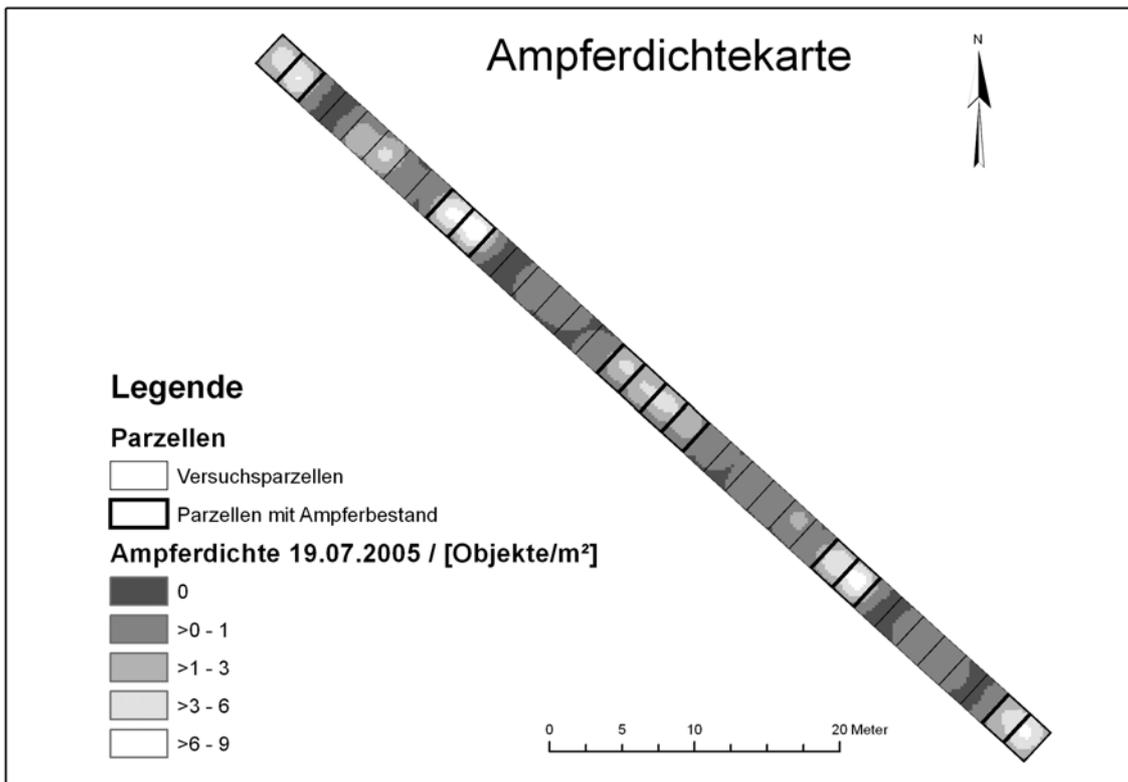
Aus der Ampferkarte wurde die Ampferdichtekarte in **Bild 3** abgeleitet. Sie veranschaulicht die Anzahl von Ampferobjekten pro Quadratmeter. Ampferpflanzen bestehen zumeist aus mehreren Ampferobjekten (Blättern). Dementsprechend muss die Dichte hier besonders hoch sein. Im Gegensatz dazu ist die Dichte bei zufällig verteilten Fehlklassifikationen geringer. Eine Validierung der Klassifikationsergebnisse könnte so möglich sein.

#### 4 Diskussion

Mit dem vorgestellten bildanalytischen Algorithmus war es möglich, RUMOB mit hoher Genauigkeit zu erkennen (bis zu 93% Detektionsrate). Die Verwechslung mit anderen Grünlandunkräutern war gleichzeitig gering (unter 10%).

Durch die Codierung der Bilder mit geographischen Koordinaten war eine Kartierung des Klassifikationsergebnisses möglich. Die Ampferverteilungskarte könnte Input für eine teilflächenspezifische Herbizidbehandlung sein. Darüber hinaus kann durch die Ableitung von Dichtekarten eine Verifikation der Klassifikationsergebnisse vorgenommen werden.

Das Verfahren wurde für Bilder entwickelt, welche unter konstanten Bedingungen aufgenommen wurde. Zum einen handelt es sich um künstlich etablierte Grünlandbestände, zum anderen waren die Beleuchtungsverhältnisse durch Abschattung der Parzellen konstant. Zukünftige Untersuchungen müssen auf die Anwendbarkeit und Übertragbarkeit des Verfahrens unter Praxisbedingungen gerichtet sein.



**Bild 3:** Ampferdichtekarte für den 19. Juli 2005. Anzahl der als Ampfer klassifizierten Objekte (**Bild 2**) pro Quadratmeter, dargestellt in vier Dichtestufen.

## 5 Literatur

- GEBHARDT S., KÜHBAUCH W. (2005):** Untersuchungen zur Unkrautererkennung im Grünland mittels digitaler Bildverarbeitung. In: 11. Workshop Computer-Bildanalyse in der Landwirtschaft: Bornimer Agrartechnische Berichte 40: 124-130
- GEBHARDT S., SCHELLBERG J., LOCK R., KÜHBAUCH W. (2006):** "Identificaton of broasleavsd dock (*Rumex obtusifolius* L.) on grassland by means of digital image processing." Precision Agriculture 7, DOI: 10.1007/S11119-006-9006-9
- HAKE G., GRÜNREICH D. (1994):** Kartographie (de Gruyter, Berlin, New York)
- ZALLER J.G. (2004):** Ecology and non-chemical control of *Rumex crispus* and *R. obtusifolius* (Polygonaceae): a review. Weed Research 44(6): 414-432

## **Optoelektronisches Sensorsystem zur Reifegradmessung bei der Maisernte**

### ***Optoelectronic sensor system for measuring the degree of maturity during maize harvesting***

Christoph Frederik Kronsbein\*, Martin Egbers\*\*, Arno Ruckelshausen\*

\* Interdisziplinärer Forschungsschwerpunkt Intelligente Sensorsysteme, Fachhochschule Osnabrück, Albrechtstr. 30, 49076 Osnabrück  
E-Mail: c.Kronsbein@addcom.de

\*\* Maschinenfabrik Bernard Krone GmbH, Heinrich-Krone-Straße 10, 48480 Spelle

**Zusammenfassung:** Erstmalig kann der Reifegrad von Maispflanzen während der Ernte durch ein optoelektronisches Sensorsystem ("online") bestimmt werden. Der Sensor basiert auf den unterscheidbaren spektralen Eigenschaften von grünen und braunen Maispflanzen. Durch Einsatz schneller elektronischer Schaltungskomponenten wird das Reflexionslicht der gepulsten LED's von einer Photodiode gemessen. Ein Mikrocontroller nimmt die Signalfilterung und die statistische Auswertung vor. Der optoelektronische Sensor wurde in das Maisgebiss eines Feldhäckslers integriert, so dass ein Effekt der Selbstreinigung durch die Maispflanzen genutzt werden kann. Der ermittelte Reifegrad wird auf die Schnittlänge abgebildet, wodurch ein vollautomatisches mechatronisches System geschaffen wurde.

**Deskriptoren:** Online Messung; Spektrale Eigenschaften von Maispflanzen; Gepulste LED's; Reflexionslicht; Photodiode; Selbstreinigung; Reifegrad; Schnittlänge;

**Summary:** *For the first time, the degree of maturity of maize plants can be determined during the harvesting process ("online") with an optoelectronic sensor system. The sensor principle is based on the differences in the spectral reflectance for green and brown maize plants. By using fast electronic circuits the reflected light from pulsed LED's of different wavelengths is measured with a photodiode. With a microcontroller the data are filtered and a statistical analysis is performed. The optoelectronic sensor is placed in the maize header of the harvester, thereby taking profit of self-cleaning effects of the maize plants. The measured degree of maturity is converted to a cutting length, thus a fully automatic mechatronic system is available.*

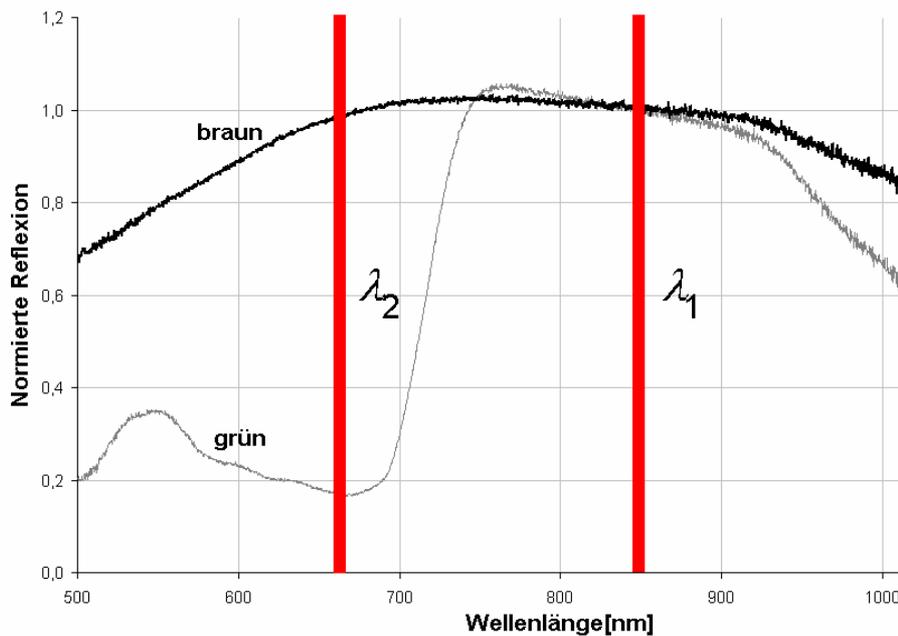
**Keywords:** *online-measurement; spectral reflectance of maize plants; pulsed LED's; reflected light; photodiode; self-cleaning; maturity; cutting length;*

## 1 Einleitung

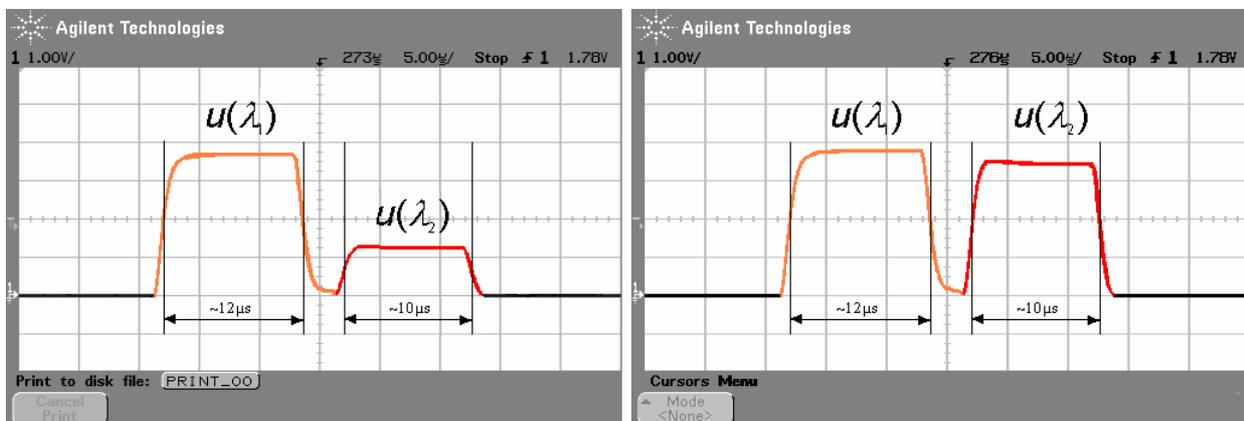
Die Auswirkung der Qualität der Maissilage in der Landwirtschaft ist Gegenstand zahlreicher Untersuchungen (WAGNER *et al.* 2005, MÖLDER 2005). Für eine optimale Maissilage ist die beim Erntevorgang eingestellte Häcksellänge von Bedeutung. Maispflanzen mit erhöhten Grünanteilen neigen im Silagestock aufgrund ihrer höheren Feuchte bei kurzen Häcksellängen zu vermusen. Werden hingegen trockenere Maispflanzen zu lang gehäckselt, kommt es zu vermehrten Lufteinschlüssen. Zur dynamischen Anpassung der Häcksellänge bzw. des Reifegrades von Maispflanzen während des Erntevorgangs wurde ein optoelektronisches Sensorsystem konzipiert und entwickelt. Das System wurde von der Maschinenfabrik Bernard Krone unter der Produktbezeichnung *AutoScan* auf der Agritechnica 2005 vorgestellt.

## 2 Konzeption des AutoScan-Sensors

Zur Realisierung des Sensors wurden optoelektronische Komponenten eingesetzt. Die in **Bild 1** abgebildeten spektralen Eigenschaften von grünen und braunen Maisblättern lassen durch Einsatz selektiver schmalbandiger Wellenlängen eine Messung des Reifezustandes durch Quotientenbildung zu. Die Wellenlängen der eingesetzten LED's wurden auf die zu messende Signatur ausgewählt und werden gepulst betrieben. Störgrößen wie Fremdlicht und fehlendes Erntegut lassen sich durch die Signaturen während und zwischen der Pulsung unterscheiden (RUCKELSHAUSEN *et al.* 2002). Durch den Einsatz von zwei Wellenlängen wird eine Relativmessung vorgenommen. **Bild 2** zeigt die Spannungsverläufe des Vorverstärkers für grüne und braune Blätter.



**Bild 1:** Typisches spektrales Reflexionsverhalten für eine „grüne“ und eine „braune“ Maispflanze. Die Messung bei selektiven Wellenlängen ermöglicht die Bestimmung des Reifegrades  
**Fig. 1:** Typical spectral response of a „green“ and a „brown“ maize plant. The measurement at selective wavelengths allows a detection of the degree of maturity

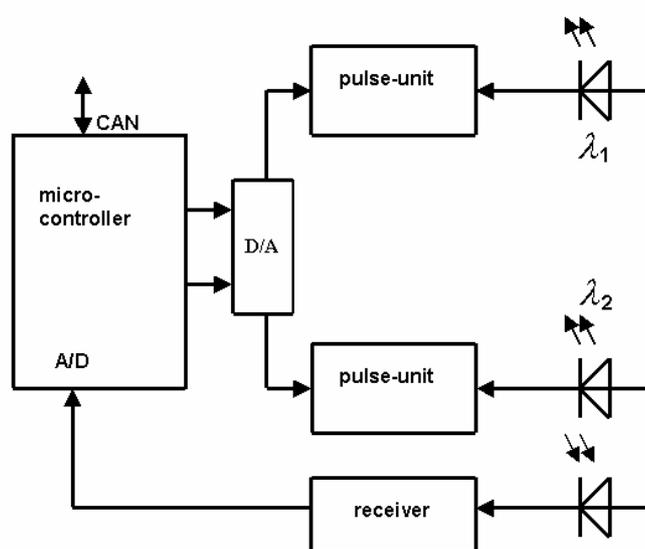


**Bild 2:** Typischer Spannungsverlauf für „grüne“ (links) und „braune“ Maisblätter (rechts)  
**Fig. 2:** Typical voltage response of a „green“ (left) and a „brown“ maize plant (right)

Die Komponenten des AutoScan-Sensors sind in **Bild 3** dargestellt und werden durch einen Mikrocontroller angesteuert. Neben den LED's mit den Messwellenlängen  $\lambda_1$  und  $\lambda_2$  dient eine PIN-Photodiode als Empfänger. Der Receiver (Vorverstärker) wandelt das Reflexionssignal (Licht) in eine proportionale Spannung, die vom Analog-Digital-Wandler des Mikrocontrollers digitalisiert wird. Die Referenzspannungen der Lichtintensitäten werden für beide Messwellenlängen durch einen Digital-Analog-Wandler (D/A) den Pulse-Unit's zugeführt. Die statistisch ausgewerteten Messdaten (Quotienten) werden gemittelt und auf Basis einer abgelegten Kalibrierung in eine relative Schnittlänge

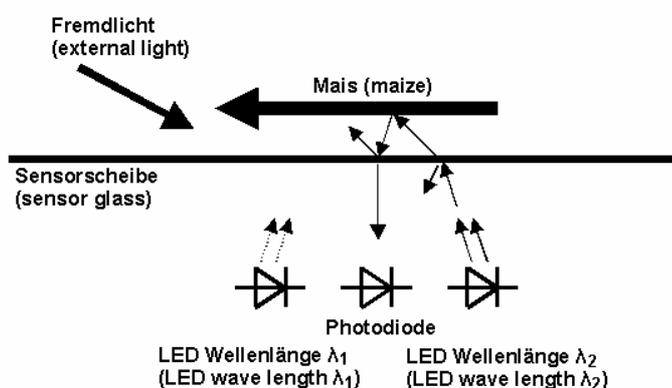
umgerechnet. Über die CAN-Schnittstelle des Mikrocontrollers wird diese Information bereitgestellt (EGBERS *et al.* 2005).

Das Messprinzip ist in **Bild 4** dargestellt. Im Gegensatz zu statischen Messungen setzen Messungen im dynamischen Fall durch die bewegten Messobjekte (Mais) eine schnelle Elektronik und Signalverarbeitung voraus, damit die Ortsabhängigkeit des Messortes gering ausfällt. Der an der Sensorscheibe vorbeifließende Gutstrom ist strukturbehafet, so dass die Geometrie von Messung zu Messung variiert. Spezielle Überlegungen bei der Pulsung und der Signalauswertung sind daher erforderlich. Der direkte Kontakt zwischen Sensorscheibe und Erntegut (Mais) stellt einen Effekt der Selbstreinigung sicher, so dass die optische Transparenz der Sensorscheibe erhalten bleibt.



**Bild 3:** Elektronisches Blockschaltbild des AutoScan Sensors

*Fig. 3: Electronic architecture of the AutoScan Sensor*

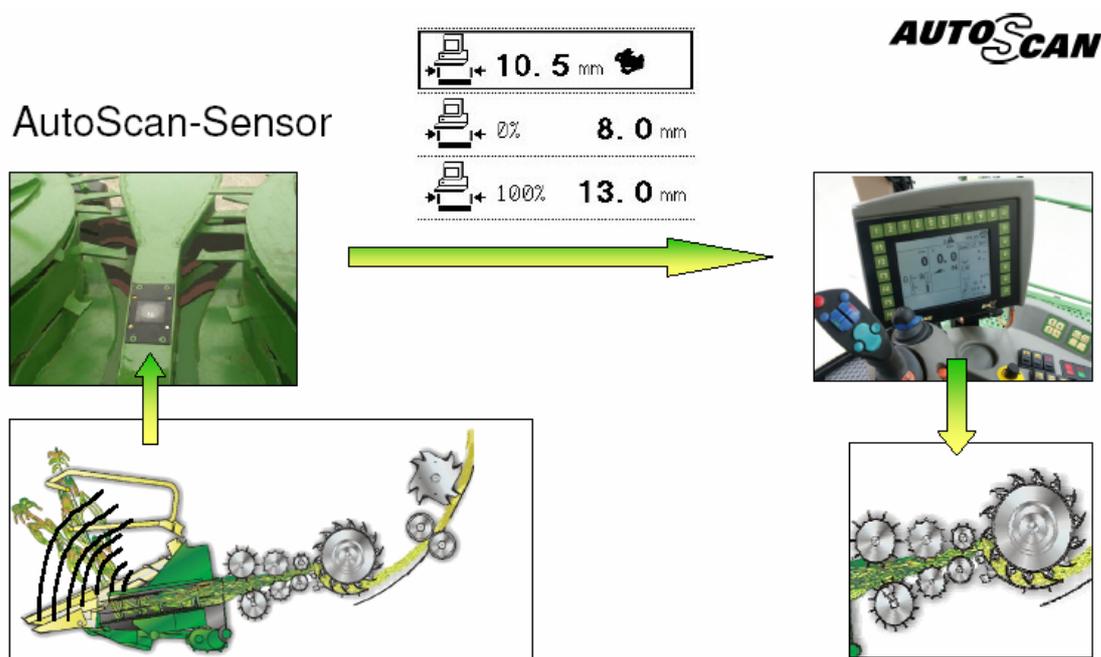


**Bild 4:** Messprinzip zur Bestimmung des Reifegrades von Mais

*Fig. 4: Principle of measurement for determining the degree of maturity for maize*

### 3 Systemintegration

Um eine relativ hohe Wahrscheinlichkeit für den Kontakt zwischen Erntegut (Mais) und dem AutoScan-Sensor sicherzustellen, wurde der AutoScan-Sensor im Bereich des Einzuges des BIG-X Feldhäckslers integriert. **Bild 5** zeigt die geschlossene Wirkungskette des AutoScan-Sensors. Durch die Vorgabe der minimalen und maximalen Schnittlängen errechnet die AutoScan-Regelelektronik die optimale Häcksellänge für die jeweiligen Maispflanzen innerhalb des vom Fahrer vorgegebenen „Korridors“. Die hydraulisch angetriebenen Vorpressewalzen werden daraufhin entsprechend in ihrer Geschwindigkeit verstellt. Diese führt automatisch zu einer Veränderung der Häcksellänge (EGBERS *et al.* 2005).

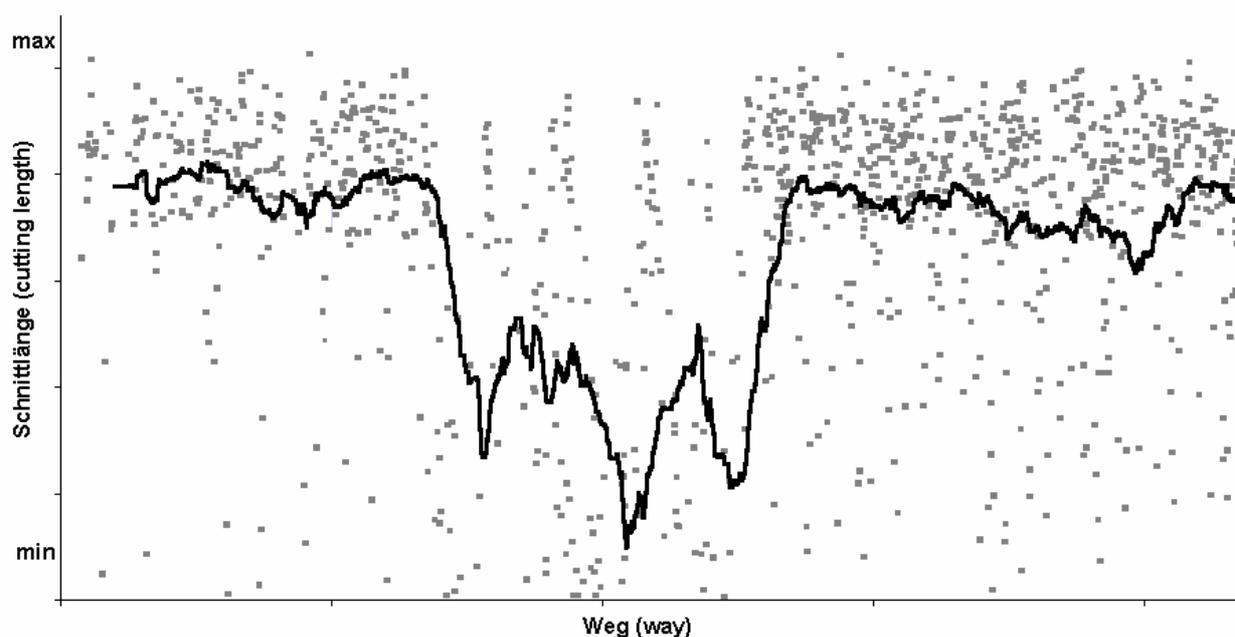


**Bild 5:** Systemintegration des AutoScan-Sensors

**Fig. 5:** System integration of the AutoScan sensor

### 4 Messergebnisse

Die Messungen (siehe Beispiel in **Bild 6**) belegen, dass auf Basis der selbstreinigenden Effekte und Signalfilterungen eine quantitative optoelektronische Messung des Reifegrades im Maisvorsatz durchgeführt werden kann. Der Bereich der Signalabsenkung sind Maispflanzen mit einem erhöhten Braunanteil.



**Bild 6:** Messergebnisse in einem heterogenen Bestand

**Fig. 6:** Measurement results in a heterogeneous crop

## 5 Ergebnis

Es wurde ein optoelektronisches Sensorsystem entwickelt, welches online – während des Erntevorgangs – den Reifegrad von Maispflanzen misst. Der AutoScan-Sensor ermöglicht damit die vollautomatische Einstellung der Häcksellänge während der Ernte zu Erzielung der optimalen Silagequalität. Es hat sich gezeigt, dass unter rauen Umgebungsbedingungen und Störgrößen zuverlässige optoelektronische Messungen durchgeführt werden können.

## 6 Literatur

- EGBERS M., KRONSBELN C., RUCKELSHAUSEN A. (2005):** „Online-Messung des Reifegrades von Maispflanzen zur Optimierung der Häckselqualität“, 63. Internationale Tagung Landtechnik 2005, Hannover, VDI-Verlag, VDI-Berichte 1895, S. 337-341
- MÖLDER R. (2005):** „Was bringen größere Häckselängen beim Silieren von Mais?“, profi 3, S. 62-64
- RUCKELSHAUSEN A., LINZ A., HUNTEMANN L., MAßBAUM F., BAIER G. (2002):** "Fremdlichtunabhängige Messung der Flächenbelegung in Pflanzenkulturen: Entwicklung von Low-Cost-Systemen mit neuen Spektrosensoren und gepulster Beleuchtung", 60. Internationale Tagung Landtechnik, Halle, VDI-Verlag, VDI-Berichte 1716, S. 145-150
- WAGNER A., LEURS K., BÜSCHER W. (2005):** "Silomais - Einfluss der Häckselänge auf Verdichtung, Silierung und Nacherwärmung", Landtechnik 60, H.1, S. 22-23

## RAL-Referenzierte Messung der Rasenfarbe

### *Measuring turf grass colour based on RAL-reference*

Reiner Lock\*, H. Nonn\*\*, Walter Kühbauch\*

\* INRES - Allgemeiner Pflanzenbau, Universität Bonn, Katzenburgweg 5, 53115 Bonn  
E-mail: R.Lock@uni-bonn.de

\*\* WOLF-Garten GmbH & Co KG, Industriestraße 83-85, 57518 Betzdorf

**Kurzfassung:** Farbe ist ein wichtiges Merkmal für die Beurteilung der Qualität von Rasen. In Deutschland geschieht die Bonitur der Rasenfarbe üblicherweise in einer Skala von 1 bis 9 (BUNDESSORTENAMT, 1999). Die Ergebnisse visueller Bonituren können personenabhängig sein und sind daher schwer zu reproduzieren. In einem Versuch wurde eine Digitalkamera mit Hilfe des RAL Farbsystems kalibriert. Um eine Vielzahl verschiedener Rasenfarben zu erzeugen, wurden Parzellen verschiedener Düngestufen angelegt. Die Parzellen wurden fotografiert und eine Farbanalyse durchgeführt. Es konnte gezeigt werden, dass digitale Bildverarbeitung eine viel versprechende Alternative zur herkömmlichen visuellen Bonitur ist.

**Deskriptoren:** Farbe, Digitale Bildverarbeitung, Rasen, RAL

**Summary:** *Colour is a major criterion to evaluate visually the quality of turf and lawn. In Germany, assessment of turf grass colour is rated usually along with other attributes in a scale of 1 to 9 (BUNDESSORTENAMT, Germany 1999). The rating result, however, is influenced by individual human bias and hard to reproduce. In the presented paper a camera and image analysis technology is applied to measure turf grass colour quantitatively by its reflectance in the Hue-Lightness-Chroma (HLC Systems). A CCD camera has been calibrated by means of the so-called RAL-colour system which includes 1688 colour charts in the HLC frame.*

*To obtain a span of colour and structural variation, turf grass plots have been established containing grass species of different leaf structure at 2 nitrogen fertilization levels. It is demonstrated that image analysis is suitable to assess turf grass colour in a reproducible and calibrated manner, over a wide span of structural and colour attributes.*

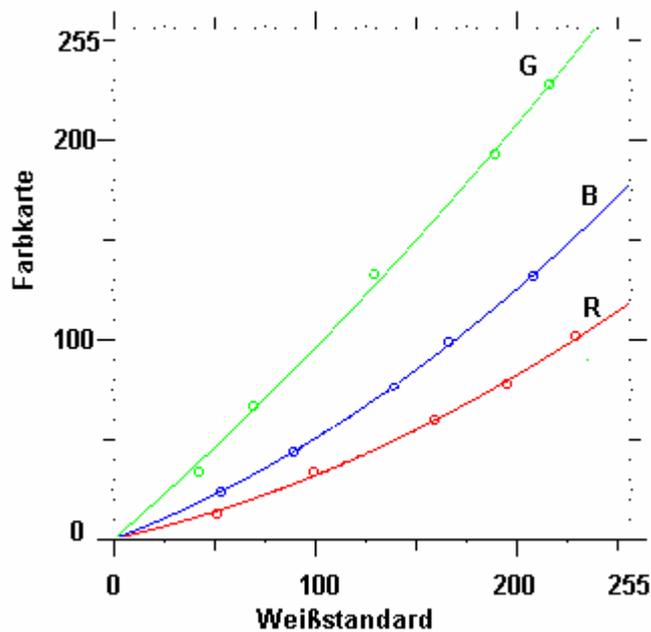
**Keywords:** *Colour, Digital Image Processing, Turf Grass, RAL*

## 1 Einleitung

Das Merkmal Farbe wird üblicherweise durch visuelle Bonitur ermittelt (BSA 1999). Nachteilig ist u.a. die Personenabhängigkeit der Ergebnisse einer visuellen Bonitur. Die enormen Fortschritte in der Kamerahardware versprechen den Einsatz als Messgerät zur Farbmessung mit hoher räumlicher Auflösung. In der vorliegenden Arbeit wurde am Beispiel Rasen untersucht ob und wie mit Hilfe einer hochauflösenden Digitalkamera eine Farbmessung durchgeführt werden kann.

## 2 Material und Methoden

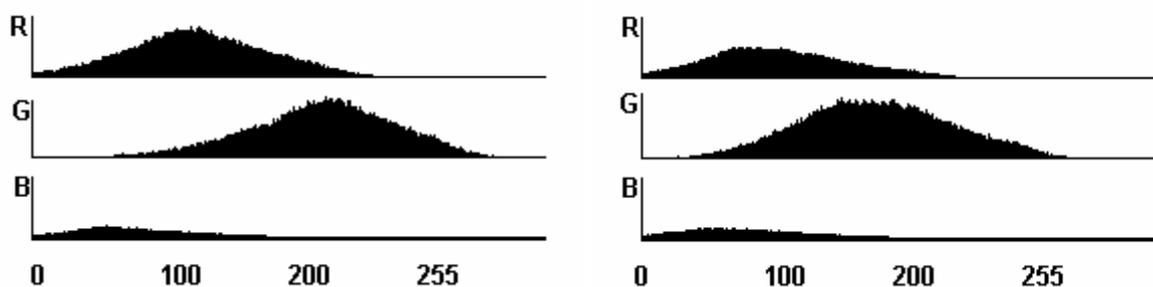
Es wurde ein Gefäßversuch mit 2 Rasenarten (Lägerrispe und Rotschwengel) angelegt. Die Aufnahmen wurden mit einer Digitalkamera vom Typ CANON Powershot<sup>®</sup> mit 5 M Pixel räumlicher Auflösung und 24 Bit Farbtiefe durchgeführt. Entscheidend für genaue und vergleichbare Ergebnisse ist eine geeignete Kalibrierung der Kamera. Da sich Kameras untereinander in Hard- und Software unterscheiden und die zu messenden Farbdifferenzen gering sind, reicht ein einfacher Weißabgleich nicht aus. Die Kamera wurde deshalb mit Hilfe des RAL- Design Farbsystems (RAL 1999) kalibriert. Es besteht als physikalischer Standard aus 1688 Farbkarten die nach dem HLC System (Hue, Lightness, Chroma) angeordnet sind. Das HLC Farbsystem basiert auf einem Zylinderkoordinatensystem, das eine dem menschlichen Farbempfinden ähnliche, gleichabständige Farbanordnung zulässt. Für die Kalibrierung wurde eine nach Intensität steuerbare Halogen-Lichtquelle mit einem ausgeglichenen Lichtspektrum verwendet. Eine Farbkarte wurde zusammen mit einem Weißstandard bei 5 verschiedenen Lichtintensitäten fotografiert. **Bild 1** zeigt die RGB Reflexionswerte einer Farbkarte gegenüber den Reflexionswerten des Weißstandards. Die Funktion ist ein Polynom höheren Grades und wurde durch Regression aus den Messwerten ermittelt. Der Vorgang wurde für alle 1688 Farbkarten wiederholt. Anschließend wurden von den Rasengräsern Aufnahmen im RAW Datenformat erstellt. Alle Kamera-eigenen Bildverarbeitungsfunktionen wurden abgeschaltet. Der Weißstandard wurde an verschiedenen Stellen im Bild mitfotografiert. Er dient als Helligkeitsmesser und kann, sofern er im Bild räumlich verteilt wird, auch einen Helligkeitsgradienten ermitteln. Für die Bestimmung der Rasenfarbe wurde aus dem Bild der RGB Reflexionswert des Weißstandards bestimmt. Mit Hilfe der zuvor bestimmten Parameter wurden nun für jede Farbkarte die zugehörigen RGB Reflexionswerte berechnet. Dann wurden aus dem Bild die RGB Reflexionswerte der Rasengräser bestimmt und nach dem Verfahren der minimalen Distanz eine Farbklassifizierung durchgeführt. Zur Validierung des beschriebenen Verfahrens wurden die Farbkarten unter verschiedenen Lichtquellen fotografiert und das Ergebnis der Messung mit dem Nennwert der Farbkarte verglichen. Die Farbkarten wurden zuverlässig erkannt, wenn ausreichend Licht in allen 3 Spektralkanälen vorhanden war.



**Bild 1:** Kalibrierkennlinien für die 3 Kanäle RGB für die Farbkarte 120,20,20

### 3 Ergebnisse und Diskussion

**Bild 2** zeigt eine starke Streuung der RGB Reflexionswerte von Lägerrispe und Rotschwingel. Die hohe Anzahl von verschiedenen Farben ist auf die 3D Struktur des Rasenbestandes zurückzuführen. Zunächst wurden die Farbwerte jeweils für die Mittelwerte berechnet. Aufgrund der großen Streuung der Farbwerte wurden darüber hinaus für jede Rasenart 2 Helligkeitsklassen gebildet und die RAL-Farbwerte bestimmt. Ein großer Vorteil des gewählten Verfahrens besteht in der direkten Überprüfbarkeit des Ergebnisses, das ja als Farbkarte vorliegt. Sollte eine feinere Farbabstufung erforderlich sein, können Zwischenwerte durch Interpolation ermittelt werden. Eine Umrechnung in einen anderen Farbraum, beispielsweise  $L^*a^*b^*$ , ist leicht möglich. (GONZALEZ *et. al.* 1993).



**Bild 2:** RGB Histogramm für die Rasenart Lägerrispe (links) und für die Rasenart Rotschwingel (rechts)

**Tabelle 1:** Ergebnis der Messung als RAL-Farbwerte im HLC Farbraum

<b>Rasenart</b>	<b>RGB Mittelwert</b>	<b>Helle Anteile</b>	<b>Dunkle Anteile</b>
Lägerrispe	120,40,30	120,60,40	120,40,20
Rotschwengel	110,30,20	110,40,20	110,30,10

#### **4 Literatur**

**BUNDESSORTENAMT (Hrsg.), (1999):** Richtlinie für die besondere Anbauprüfung auf Rasennutzung

**GONZALEZ R.C., WOODS R.E. (1993):** Digital Image Processing. New York: Addison-Wesley Publishing Co

**RAL (1999):** Deutsches Institut für Gütesicherung und Kennzeichnung e.V. Sankt Augustin 1999 RAL Design Farbsystem

## Chlorophyllfluoreszenzbildanalyse zur raschen Indikation des Befalls von Laub- und Nadelbäumen durch herbivore Insekten

### *Chlorophyll fluorescence imaging to analyse insect herbivory on broad-leaved and coniferous trees*

Manfred Forstreuter\*, Roland Schröder\*\*, Werner B Herppich\*\*\*

\* TU Berlin, Institut für Ökologie, Botanik/Angewandte Gehölzökologie, Königin-Luise-Str.22, 14195 Berlin

\*\* FU Berlin, Institut für Biologie, Haderslebener Str. 9, 12163 Berlin

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

**Kurzfassung:** Herbivore Insekten verursachen in Parkanlagen und Gärten vieler Städte oft großen Schaden. Zur erfolgreichen Bekämpfung dieser Schädlinge ist die Kenntnis ihrer Lebensweise aber auch der physiologischen Reaktionen der befallenen Pflanzen, z. B. die Emission gasförmiger Phytohormone und die damit verbundenen Stoffwechselveränderungen wichtig. Mit Hilfe der Chlorophyllfluoreszenzbildanalyse wurde der Einfluss unterschiedlicher herbivorer Insekten auf die Photosyntheseaktivität ihrer Wirtspflanzen qualitativ und quantitativ erfasst und die lokale und temporale Dynamik der pflanzlichen Reaktion analysiert. Besonderes Augenmerk wurde dabei auf die reversible systemische Veränderung der Photosyntheseleistung von *Pinus sylvestris* infolge der Eiablage durch die Pflanzenwespe *Diprion pini* gelegt.

**Deskriptoren:** Chlorophyllfluoreszenzbildanalyse, Insektenherbivorie, Photosynthese

**Summary:** *During recent years insect herbivory has caused tremendous damage to urban parks and gardens. A successful control of such pests requires exact knowledge both of the living patterns of the herbivores and of the diverse physiological plant responses to the attacking insects, e.g. the emission of gaseous phytohormones. Chlorophyll fluorescence imaging analysis was used to qualitatively und quantitatively study the effects of insect herbivory on the local and temporal dynamics of the host plants' photosynthetic activity. Major focus was laid on the reversible systemic changes in photosynthesis of Pinus sylvestris due to the oviposition of the sawfly Diprion pini.*

**Keywords:** *Chlorophyll fluorescence imaging analysis, insect herbivory, photosynthesis*

## 1 Einleitung

In den letzten Jahren entstand in vielen städtischen Parkanlagen und Gärten durch den Befall unterschiedlicher Laub- und Nadelbaumarten durch herbivore Insekten zunehmend großer Schaden. Für eine erfolgreiche, nicht umweltbelastende präventive Bekämpfung dieser Schadinsekten ist es wichtig, die Lebensweise der Parasiten zu verstehen und die physiologischen Reaktionen der befallenen Pflanzen für die verschiedenen Befallsstadien zu kennen.

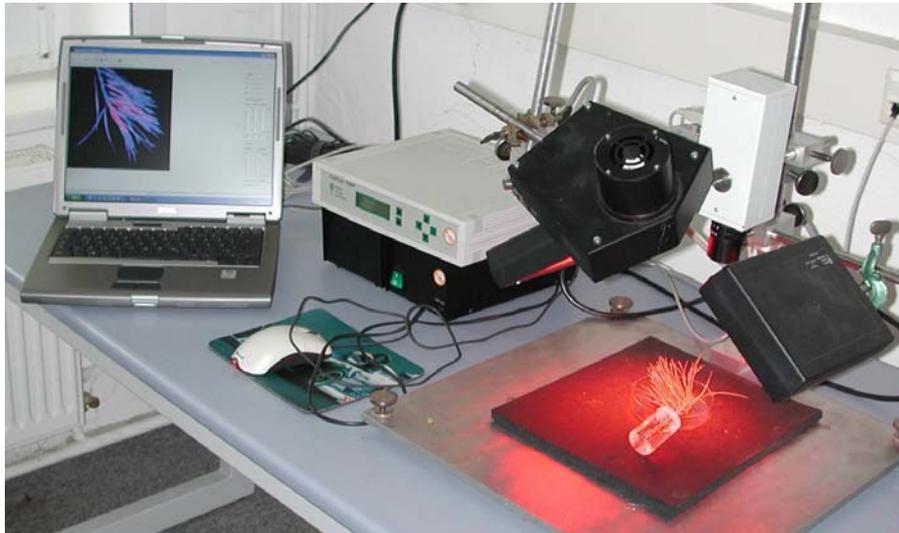
Es ist schon lange bekannt, dass Herbivorie den Primärstoffwechsel der befallenen Pflanzen verändern (WARRINGTON *et al.* 1989) und spezifische Schutzreaktionen auslösen kann (TURLINGS & WÄCKERS 2004). Schon die Deposition von Insekteneiern induziert die Emission flüchtiger Kohlenwasserstoffe (SÁNCHEZ-HERNÁNDEZ *et al.* 2006) so, dass Eiparasiten angelockt werden (MEINERS & HILKER 2000, COLAZZA *et al.* 2004). Die damit verbundenen Stoffwechseleränderungen beeinflussen zeitweise auch die Primärproduktion. Ob die aus der Eiablage resultierende Behinderung der Photosynthese eine Konsequenz der mit der Kohlenwasserstoffsynthese verbundenen Produktionskosten darstellt, oder nur eine nicht-adaptive Konsequenz der Verwundungsreaktion, ist nicht klar (SCHRÖDER *et al.* 2005). Dennoch könnte diese temporäre und lokale Inhibition der Photosyntheseaktivität genutzt werden, um den Befall zu detektieren und das Ausmaß zu verfolgen und zu bewerten.

Mit Hilfe der Chlorophyllfluoreszenzbildanalyse (NEDBAL *et al.* 2000, HERPPICH 2001, 2002, HERPPICH *et al.* 2005) ist es möglich, schnell, nichtdestruktiv und nicht-invasiv den Einfluss unterschiedlicher herbivorer Insekten auf die Photosyntheseaktivität ihrer Wirtspflanzen qualitativ und quantitativ zu erfassen und die lokale und temporale Dynamik der pflanzlichen Reaktion zu analysieren. In den hier vorgestellten Versuchen wurde dabei besonderes Augenmerk auf die systemische Veränderung der Photosyntheseleistung der Waldkiefer (*Pinus sylvestris* L.) infolge der Eiablage durch die Gemeine Kiefernbuschhornblattwespe *Diprion pini* L. gelegt (SCHRÖDER *et al.* 2005). Die Larven dieser Blattwespen verursachen an Kiefern durch Kahlfraß sehr große Schäden. Parasitoide, insbesondere Kokonparasitoide sind für die biologische Bekämpfung der Blattwespe von großer Bedeutung. Sie bauen zeitversetzt schnell hohe Populationsdichten auf und können somit erheblich (Parasitierungsraten von mehr als 90%) zur Reduzierung der Schädlinge beitragen. Dieses indirekte Abwehrsystem der Pflanze und die mit der Induktion dieser Abwehr verbundenen Investitionen der Pflanze bedürfen noch weitreichender Untersuchungen.

## 2 Material und Methoden

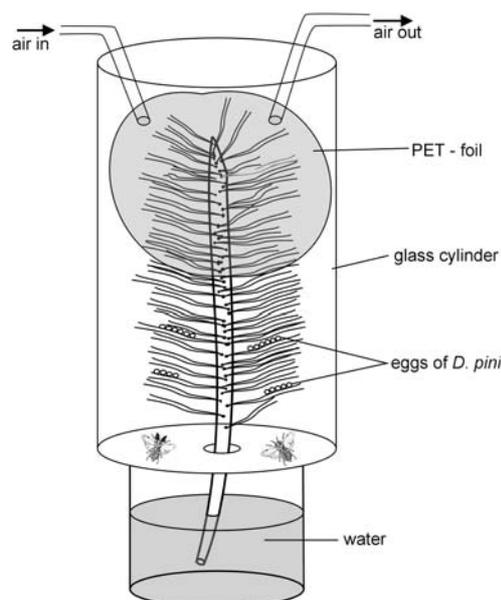
In den Laboruntersuchungen wurde an einzelnen Blättern (Bergahorn *Acer pseudoplatanus* L. bzw. Feldulme *Ulmus campestris*) bzw. an ganzen Zweigen (*Pinus sylvestris* L.) die maximale photochemische Effizienz ( $F_v/F_m$ ) als Maß für die Photosyntheseaktivität erfasst (vgl. VON WILLERT *et al.*, 1995). Dabei wurde das offene Chlorophyllfluoreszenzbild-

analysesystem FluorCam 690MF (Photon Systems Instruments, Brno, Tschechische Republik) genutzt (NEDBAL *et al.*, 2000a; HERPPICH, 2001; 2002). Dieses System besteht aus zwei LED-Einheiten (345 orange LED,  $\lambda_{\max} = 620 \text{ nm}$ ), einer Sättigungspulslampe (Halogenlampe 250 W, mit elektronisch gesteuertem Verschluss), einer CCD-Kamera, der Steuereinheit und einem PC (**Bild 1**).



**Bild 1:** Messung der maximalen photochemischen Effizienz ( $F_v/F_m$ ) ganzer Kiefernzweige mit einem Chlorophyllfluoreszenzbildanalysesystem FluorCam 690MF

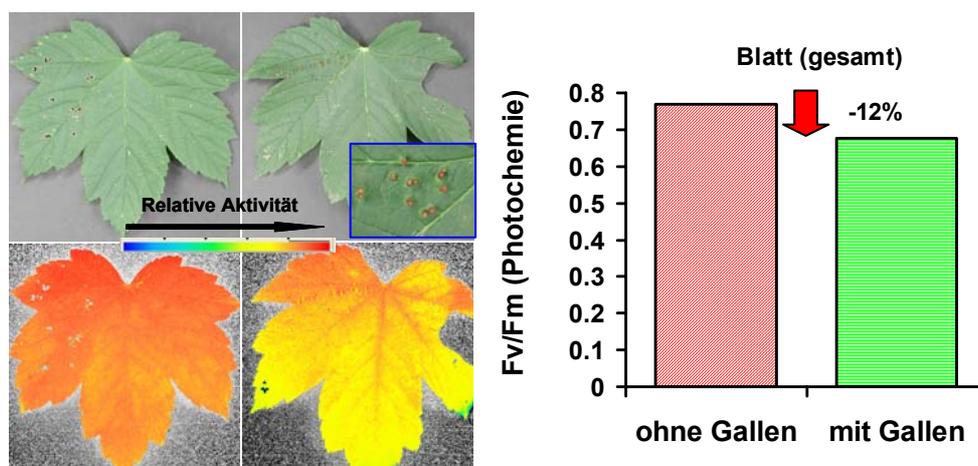
Für die Induktion der systemischen Reaktion von *Pinus sylvestris* auf die Oviposition der Kiefernbuschhornblattwespe *Diprion pini* L. wurden abgeschnittene Kiefernkurztriebe in einem abgeschlossenen Glaszylinder den Insekten ausgesetzt (**Bild 2**). Die Triebspitze war durch eine zusätzliche Plastikhülle vor den Blattwespen geschützt.



**Bild 2:** Kammer für die systemische Induktion der photosynthetischen Pflanzenreaktion durch die Oviposition der Gemeinen Kiefernbuschhornblattwespe an Kiefernadeln

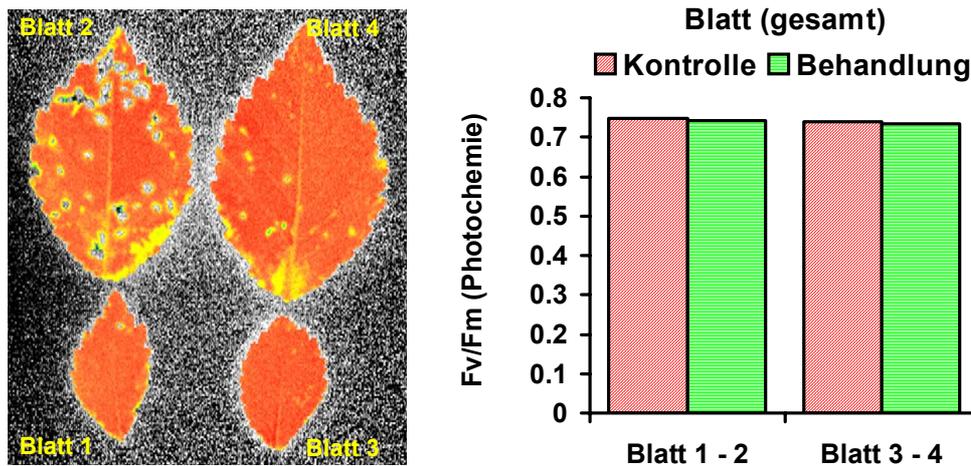
### 3 Ergebnisse und Diskussion

Werden Zellen von Bergahornblättern (*Acer pseudoplatanus* L.) von Ahorn-Gallmilben (*Aceria macroryncha*) mit ihren stilettartigen Mundwerkzeugen angestochen und ausgesaugt, induzieren die von den Gallmilben zum Verflüssigen der Zellinhalte ausgeschiedene Enzyme in einer starken Reaktion die Gallenbildung. Offensichtlich als Folge dieser Gallenbildung kommt es im gallenfreien Bereich des Blattes zu einer signifikanten Reduktion (12%) der Photosyntheseaktivität (**Bild 3**). Blattgallen von Ahorn-Gallmilben scheinen keinerlei negative Auswirkungen auf die Physiologie und das Wachstum von Gehölzen zu haben (Pflanzenschutzamt Berlin 2004).



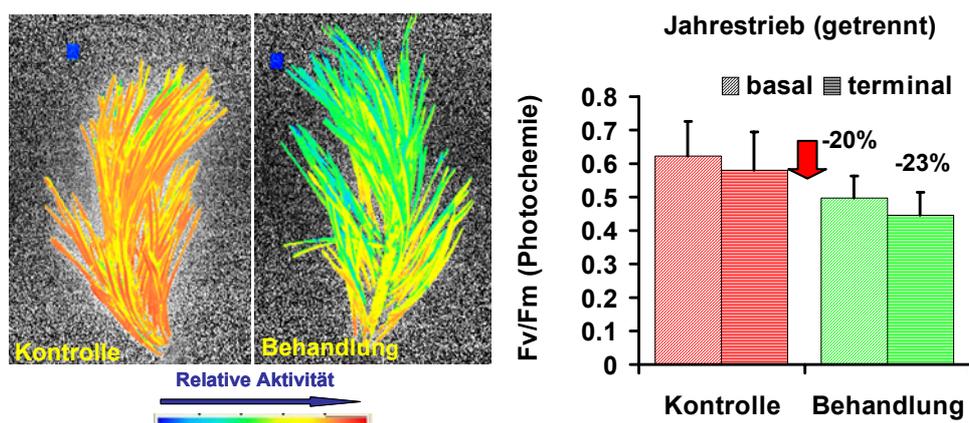
**Bild 3:** Falschfarbendarstellung der Chlorophyllfluoreszenzbilder ( $F_v/F_m$ ) sowie die daraus bestimmten  $F_v/F_m$ -Mittelwerte von Bergahornblättern (*Acer pseudoplatanus* L.) mit bzw. ohne Gallen der Ahorn-Gallmilbe (*Aceria macroryncha*).

Im Gegensatz dazu sind die in Pflanzengallen lebenden Larven der Gallwespen (Cynipiden) herbivor und ernähren sich vom Gallengewebe (REINKE 1999). Cynipide Gallen scheinen die Photosyntheseaktivität der Wirtsblätter sogar anzuregen (FAY *et al.* 1993), was als pflanzliche Kompensationsreaktion auf den Gewebeverlust interpretiert wird. Ein Stimulation der maximalen photochemischen Effizienz oder aber ihre Inhibierung konnte weder in den von Ulmenblattkäfer (*Xanthogaleruca luteola*) angefressenen Teilen von Feldulmenblättern (*Ulmus campestris*) noch in den benachbarten, intakten Bereichen festgestellt werden (**Bild 4**). Die oft beobachtete Inhibierung der  $\text{CO}_2$ -Aufnahme nach Herbivorenbefall (WARRINGTON *et al.* 1989, FAY *et al.* 1993) könnte primär durch eine stomatare Limitierung hervorgerufen sein (WARRINGTON *et al.* 1989).



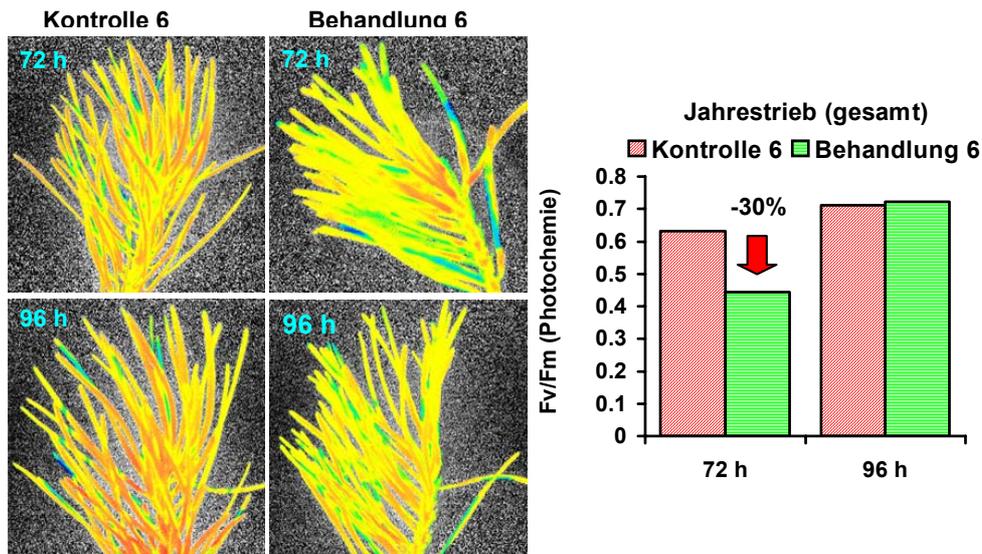
**Bild 4:** Falschfarbendarstellung der Chlorophyllfluoreszenzbilder ( $F_v/F_m$ ) sowie die daraus bestimmten  $F_v/F_m$ -Mittelwerte von unbelasteten bzw. von Ulmenblattkäfer angefressenen Feldulmenblätter

Aber nicht nur die Gallbildung oder der direkte Fraß auch die Oviposition kann pflanzliche Reaktionen induzieren (MEINERS & HILKER 2000). Bei *Pinus sylvestris* L. induziert die Eiablage der phytophagen Gemeinen Kiefernbuschhornblattwespe *Diprion pini* L. (Hymenoptera, Diprionidae) die Produktion von gasförmigen Phytohormonen (MEINERS & HILKER 2000), die Weibchen des spezialisierten Eiparasitoiden *Chrysonotomyia ruforum* Krausse (Hymenoptera, Eulophidae) anziehen (SCHRÖDER *et al.* 2005). *Pinus sylvestris*, *Diprion pini* und *Chrysonotomyia ruforum* stellen somit ein ideales tritrophisches Modellsystem dar, bei dem sich die vielfältigen Interaktionen Pflanze - Schädling - Nützling gezielt untersuchen lassen. Parallele Gaswechsellmessungen an Kiefernzweigen mit terminalen Abschnitten ohne Eiablage (systemische Reaktion) bzw. basalen Abschnitten mit und ohne Eiablage zeigten, dass  $CO_2$ -Aufnahme, Photosynthesekapazität und stomatäre Leitfähigkeit bei induzierten Zweigen systemisch verringert war. Diese Untersuchungen konnten nicht klären, ob die Änderungen des Primärstoffwechsels der Kiefer nach der Eiablage durch die Kiefernbuschhornblattwespe aufgrund einer spezifischen Wirkung auf Komponenten der Photosynthese ausgelöst wird oder ob die Verminderung der photosynthetischen Aktivität durch Chlorophyllabbau bedingt wird.



**Bild 5:** Chlorophyllfluoreszenzbilder ( $F_v/F_m$ ) sowie die daraus bestimmten  $F_v/F_m$ -Mittelwerte von unbelasteten (Kontrolle) und von nur im basalen Bereich durch die Oviposition der Gemeine Kiefernbuschhornblattwespe gestressten (Behandlung) Kiefernjahrestrieben

Die Chlorophyllfluoreszenzbildanalyse zeigte deutlich, dass die Eiablage der Pflanzenwespe innerhalb kurzer Zeit eine vorübergehende, lokal begrenzte Reduktion der photosynthetischen Leistungsfähigkeit bewirkt (**Bild 5**). Eine signifikante Verminderung der maximalen photochemischen Effizienz um etwa 20% tritt nicht nur im direkt befallenen Zweigbereich auf. Die Reduktion der Photosyntheseeffizienz war nach etwa 72 Stunden maximal und wurde vor allem in den benachbarten nichtbefallenen Triebteilen deutlich. Das Ausmaß der Inhibierung der photosynthetischen Aktivität war hier um etwa 10% höher. Diese physiologische Reaktion war jedoch nicht anhaltend sondern wurde nach 3 Tagen zunehmend abgeschwächt (**Bild 6**). Diese Reversibilität sowie die Ergebnisse der maximalen Fluoreszenz ( $F_m$ ) schließen eine Verminderung der Photosyntheseeffizienz durch die Reduktion der Chlorophylldichte der Blätter aus und deuten auf eine direkt biochemische oder biophysikalische Beeinflussung dieses Primärstoffwechselweges.



**Bild 6:** Chlorophyllfluoreszenzbilder ( $F_v/F_m$ ) sowie die daraus bestimmten  $F_v/F_m$ -Mittelwerte von unbelasteten (Kontrolle) und von nur im basalen Bereich durch die Oviposition der Gemeine Kiefernbuschhornblattwespe gestressten (Behandlung) Kiefernjahrestrieben, gemessen nach 72 bzw. 96 Stunden

#### 4 Schlussfolgerung

Die Chlorophyllfluoreszenzbildanalyse stellt eine schnelle, nichtdestruktive und nicht-invasive Methode mit vielfältigen Anwendungsmöglichkeiten bei der Untersuchung der physiologischen Reaktionen der Photosynthese von Laub- und Nadelbäumen auf Herbivorenbefall dar. Sie ermöglicht den Nachweis der Induktion der Pflanze durch die Eiablage eines phytophagen Insekts ebenso wie den Nachweis einer systemischen Reaktion innerhalb der Pflanzen. Es wurde gezeigt, dass Pflanzen in sehr unterschiedlicher Weise auf die unterschiedlichen Herbivoren mit spezifischen Veränderungen des Primärstoffwechsels (Photosynthese, photochemische Effizienz) reagieren. Auch die gleichzeitige Untersuchung der zeitlichen und räumlichen Dynamik der pflanzlichen Reaktion ist mit einem relativ einfachen Ansatz möglich. Damit bietet sich die Chlorophyllfluoreszenzbildanalyse als relativ schnelle und einfache Methode an, um einen Befall durch Herbivore zu detektieren und das temporäre und lokale Ausmaß zu verfolgen und zu bewerten.

#### 5 Literatur

- COLAZZA S., FUCARINO A., PERI E., SALERNO G., CONTI E., BIN F. (2004):** Insect oviposition induces volatile emission in herbaceous plants that attracts egg parasitoids. *Journal of Experimental Biology* 207: 47-53
- FAY P.A., HARTNETT D.C., KNAPP A.K. (1993):** Increased photosynthesis and water potentials in *Silphium integrifolium* galled by cynipid wasps. *Oecologia* 93: 114-120

- HERPPICH W.B. (2001):** Einsatzmöglichkeiten der Chlorophyllfluoreszenzbildanalyse in der gartenbaulichen Forschung. Bornimer Agrartechnische Berichte 26: 91-104
- HERPPICH W.B. (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 W.B., HETZ E., DAMMER K.-H., LANGNER H.-R., BEUCHE H., HELLEBRAND H.-J. (2005):** Einsatzmöglichkeiten der Chlorophyllfluoreszenzbildanalyse zur Erkennung und Bewertung von pilzlichem Pathogenbefall. Bornimer Agrartechnische Berichte 40: 95-108
- MEINERS T., HILKER M. (2000):** Induction of Plant Synomones by Oviposition of a Phytophagous Insect. Journal of Chemical Ecology 26: 221-232
- NEDBAL L., TRTILEK M., HERPPICH W.B. (2000):** Methods and equipment for fluorescence imaging on plant material. Bornimer Agrartechnische Berichte 25: 127-135
- PFLANZENSCHUTZAMT BERLIN**  
[https://www.stadtentwicklung.berlin.de/pflanzenschutz/unternehmen/de/download/hinweise\\_erwerbsgartenbau\\_06\\_2004.pdf](https://www.stadtentwicklung.berlin.de/pflanzenschutz/unternehmen/de/download/hinweise_erwerbsgartenbau_06_2004.pdf)
- REINKE H.-D. (1999):** Ein Insekt bohrt die Pflanze an. Bauernblatt 10/1999: 16-17
- SÁNCHEZ-HERNÁNDEZ C., LÓPEZ M.G., DÉLANO-FRIER J.P. (2006):** Reduced levels of volatile emissions in jasmonate-deficient spr2 tomato mutants favour oviposition by insect herbivores. Plant Cell and Environment 29: 546-557
- SCHRÖDER R., FORSTREUTER M., HILKER M. (2005):** A plant "notices" insect egg deposition and changes its rate of photosynthesis. Plant Physiology 138(1): 470-477
- TURLINGS T.C.J., WÄCKERS F. (2004):** Recruitment of predators and parasitoids by herbivore-injured plants. In: Advance in Insect Chemical Ecology (RT Cardé, JG Millar, eds). Cambridge University Press, Cambridge, UK
- VON WILLERT D.J., MATYSSEK R., HERPPICH W.B. (1995):** Experimentelle Pflanzenökologie: Grundlagen und Anwendungen. Georg Thieme Verlag, Stuttgart
- WARRINGTON S., COTTAM D.A., WHITTAKER J.B. (1989):** Effects of insect damage on photosynthesis, transpiration and SO<sub>2</sub> uptake by sycamore. Oecologia 80: 136-139

## Stereobildanalyse in der Landtechnik

### *Stereo image analysis for agricultural engineering*

Hans R. Langner\*, Hartmut Schemel\*, Saad Abusamra\*\*

\* Leibniz-Institut für Agrartechnik Potsdam-Bornim e.V., Max-Eyth-Allee 100, 14469 Potsdam  
E-Mail hlangner@atb-potsdam.de

\*\* Technische Fachhochschule Berlin, Luxemburger Str.10, 13353 Berlin, FB VII

**Kurzfassung:** Der Beitrag beginnt die Thematik Stereobildanalyse mit einem historischen Rückblick und der Definition wichtiger Begriffe. Eine Tiefeninformation kann durch aktive Verfahren wie z.B. Laserscannen oder durch passive Verfahren aus Stereobildern gewonnen werden. Der Beitrag stellt die Grundlagen beider Verfahren kurz vor und berichtet über erste Ergebnisse, die mit einem Laboraufbau zur Analyse hochaufgelöster Stereobilder erzielt wurden. Der verwendete Laboraufbau ist flexibel an die Applikationen in der Landtechnik anpassbar, verwendet keine spezielle Hardware zur Aufnahme von Stereobildern und wertet die Bilder mit der Software AdOculus aus. Im Abschnitt 2 werden Hardware und Software des Laboraufbaus vorgestellt und die wesentlichen Parameter für die Anwendung der Kamera zur Detektion von Hindernissen in Horizontalsilos dargestellt.

Mit dem Laboraufbau wurden die Möglichkeiten und Grenzen der Tiefenbestimmung über die Berechnung von Pixeldisparitäten untersucht und daraus die Anforderungen an die Kalibrierung einer Stereokamera abgeleitet. Für die Detektion von Hindernissen in Horizontalsilos wurden die optischen Anforderungen an eine Stereokamera definiert sowie die minimal erreichbare optische Auflösung in dieser Applikation berechnet und untersucht. Im dritten Abschnitt des Beitrags werden erste praktische Ergebnisse vorgestellt (optische Auflösung der Stereobilder, Betrachtungsregion, Verarbeitungsgeschwindigkeit), die aus Vorversuchen abgeleitet wurden.

**Deskriptoren:** Stereobilder, Bildanalyse, Disparität, AdOculus, digitale Kameras, Traktorsteuerung

**Summary:** *First a historical review and the definition of important terms are given. In general depth information can be obtained by active methods, such as laser scanning, or by passive methods. Then the basics of both methods are presented, and first results achieved with a laboratory system for analysis of highly resolved stereoscopic images are reported. The laboratory system is adaptable for different applications, doesn't use special hardware for capturing stereoscopic images and processes the images with the software AdOculus. Section 2 introduces the hard- and software of the laboratory system and explains the essential parameters for camera use to detect obstacles in horizontal silos.*

*The possibilities and limits of the laboratory system to determine the depth information were studied. The requirements for the camera calibration and the calculation of pixel disparities in stereoscopic images were derived. The visual requirements on a stereoscopic camera for the obstacle detection in horizontal silos were defined as well as the attainable geometrical resolution was calculated and studied. The third section presents first practical results, which were derived from previous tests (geometrical resolution of stereoscopic images, region of interest, processing speed).*

**Keywords:** *stereo images, image analysis, disparity, AdOculus, digital cameras, tractor guidance*

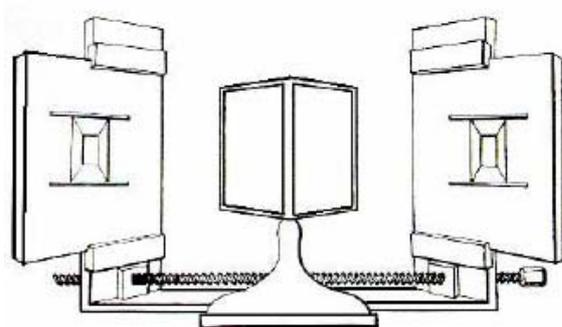
## 1 Einleitung

### 1.1 Historische Entwicklung der Erzeugung und Analyse von Stereobildern

Das Prinzip der räumlichen Wahrnehmung und die Erfassung von Tiefe wird von vielen Lebewesen genutzt, jedoch sind zwei Augen allein noch kein hinreichendes Kriterium für eine Gewinnung der Tiefeninformation. Als erstes ist ein überlappendes Gesichtsfeld erforderlich, aus dem die sogenannten Disparitäten (Überschneidungen) gewonnen werden können. Weiterhin müssen von beiden Augen unterschiedliche Informationen an unser Gehirn geliefert werden, um ein Bild als dreidimensional zu empfinden (JÄHNE 1997, HABERÄCKER 1991, SCHARSTEIN 1999). In der Realität sehen wir mit dem linken und rechten Auge unterschiedliche Bilder, die von unserem Gehirn kombiniert und zu einer räumlichen Szene mit Tiefeninformation zusammengefügt werden.

Das räumliche Sehen kann simuliert werden, wofür ein spezielles Bild für jedes Auge projiziert werden muss. Um dies zu erreichen gibt es verschiedene Techniken. Bereits im Altertum (ca. 300 v.Chr.) untersuchte Euklid die „Natur des Sehens mit zwei Augen“ und entwickelte daraus eine Theorie des dreidimensionalen Raums (VOGEL 1997). Erste Versuche zur dreidimensionalen Darstellung zweidimensionaler Bilder wurden in der Renaissance unternommen (Leonardo da Vinci, Albrecht Dürer u.a.). Nachdem die wissenschaftlichen Erkenntnisse über das menschliche Sehen geklärt waren, begann im 19. Jahrhundert die Technikentwicklung zur Darstellung dreidimensionaler Bilder (SCHÖNSTEIN 2001):

- 1838 erfindet Charles Wheatstone das Stereoskop. Das Stereoskop ist ein optisches Gerät zum Betrachten stereoskopischer Bildpaare. Für jedes Auge wird durch eine Spiegelkonstruktion ein eigenes Bild derselben Szene dargestellt, wobei aus dem Unterschied der Bilder eine virtuelle 3D Szene entsteht (**Bild 1**). Mit dieser Erfindung erweckte das Interesse an der Stereoskopie.



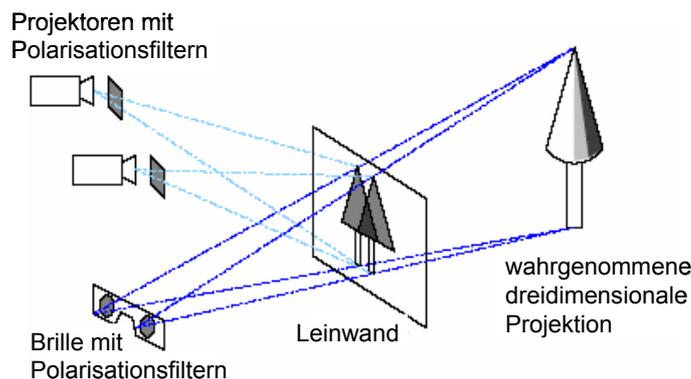
Wheatstone (1832)



Brewster (1849)

**Bild 1:** Projektion von Stereobildern nach Wheatstone und Brewster

- 1844 entdeckt Sir David Brewster den “Wallpaper-Effekt”, der auf der Tatsache basiert, dass die menschliche Bildanalyse verschiedene Mustereinheiten zusammenfassen kann. Durch unterschiedliche Abstände, Mustergrößen und Formen der Muster können hierbei Tiefenwahrnehmungen erreicht werden (KÖHN 1996).
- 1853 veröffentlicht Wilhelm Rollmann die Idee der Anaglyphen (**Bild 2**). Die Grundlage der Darstellung bilden wie bei Wheatstone zwei Halbbilder. Die zwei Halbbilder werden komplementär eingefärbt (z.B. rot und grün) und übereinander projiziert. Mit Hilfe einer Rot-Grün-Brille können die beiden Bilder getrennt werden und jedem Auge einzeln gezeigt werden.



**Bild 2:** Prinzip des Anaglyphen Verfahrens für 3D Projektionen

- 1983 stellt Christoph Taylor die Single-Image-Random-Dot Stereogramme SIRDS vor. Er bezeichnet sie als einen neuen Typ von Autostereogrammen ohne die Erfordernisse eines Stereoskops oder einer Anaglyphenbrille, basierend auf der Wiederholung zufällig erzeugter Muster. Diese zufälligen Muster gehen auf den “Wallpaper-Effekt” von Sir David Brewster zurück (FAUGERAS 1993).
- 1990 beschreiben Christoph Taylor und M. B. Clarke einen einfachen Algorithmus zur Produktion von SIRDS. Das Verfahren ist asymmetrisch, d.h. manche Menschen können den gewünschten Effekt nur sehen, wenn sie das Bild verkehrt herum halten (SMITS 2002). Technisch identisch zu den SIRDS sind die Single-Image-Random-Text Stereogramme SIRTs. Sie benutzen Buchstaben anstatt Pixel, was die Auflösung limitiert (ZHANG & XU 1996).

Die Gesamtheit der Verfahren zur Aufnahme und Wiedergabe von raumgetreuen Bildern wird als Stereoskopie bezeichnet. Demzufolge sind stereoskopische Bilder räumlich erscheinende, dreidimensional wiedergegebene Bilder. Stereokameras sind insgesamt mit zwei Objektiven ausgestattet, die um eine Basisweite versetzt angeordnet sind. Das Problem der Stereobilder ist weniger die Aufnahme der Bilder, als mehr die stereoskopische Wiedergabe. Dafür gibt es unterschiedliche Verfahren, die in der Regel unterschiedliche Filter (Rot- bzw. Grünfilter, bei Farbe unterschiedlich gedrehte Polarisationsfilter) vor den Augen verwenden.

## 1.2 Grundlagen des Stereobildes und der Stereobildanalyse

Um Stereobilder analysieren zu können, müssen diese zunächst digitalisiert und kalibriert werden. Ein digitalisiertes Bild ist allgemein eine Matrix  $B$  von Bildpunkten (Pixel), die  $u_{\max}$  horizontale und  $v_{\max}$  vertikale Elemente hat (HARTMUT 1991, HEYGSTER & SMULA 1998):

$$B = [u_{\max}, v_{\max}] \quad (1)$$

Eine Kalibrierung bzw. Rektifizierung der Bilder beseitigt die optischen Verzeichnungen in der Bildmatrix  $B$ , die durch Abbildungsfehler der Optik entstehen. Sie ist erforderlich, wenn eine quantitative Auswertung der Bilder wie z.B. die Berechnung von Tiefeninformationen erfolgen soll. Die mathematischen Operationen in der Bildaufbereitung sind folgende:

- |                                      |   |                               |
|--------------------------------------|---|-------------------------------|
| - Digitalisierung des Ortsbereiches  | → | Rasterung des Bildes          |
| - Digitalisierung des Wertebereiches | → | Quantisierung der Bildpixel   |
| - Rektifizierung des Digitalbilds    | → | Transformation der Bildmatrix |

Um Stereobilder analysieren zu können müssen zwei Bilder der gleichen Szene vorhanden sein. Für die Voruntersuchungen wurden zwei identische Kameras zur Aufnahme der gleichen Szene verwendet, wobei folgende Parameter für die Stereobildanalyse wichtig sind:

- Abstand der Kameras vom Objekt
- Brennweite der Kameras
- Abstand der Kameras zueinander (Augenabstand)
- Position des Objektpunktes (relativ zum Objekt)

Die beiden Kameras und der Objektpunkt bilden die Eckpunkte eines gleichschenkligen Dreiecks. Man kann die Positionierung der Kameras, das Ausrichten auf das Objekt (Look At Punkt) und die Winkelverhältnisse beschreiben durch :

$$\tan \beta = 2 R / b \quad \text{bzw.} \quad \beta = \arctan(2R/b) \quad (2)$$

$$\alpha = 90^\circ - \beta \quad (3)$$

Dabei ist  $R$  der Abstand Kamera zu Objektpunkt und  $b$  der Abstand zwischen den beiden Kameras (Basisweite). Die Stereokameras werden meist parallel in Richtung zum Objektpunkt positioniert und danach um den Winkel  $\alpha$  in Richtung zum Objektpunkt geschwenkt (HARTLEY & ZISSERMANN 2000, KLETTE 1995, POLLEFEYS 2000).

Eine der grundlegenden Aufgaben der Stereobildanalyse ist das Erkennen von Objekten bzw. von Hindernissen. Allgemein kann ein Objekt durch seine Form oder Kontur, durch die Farbe und evtl. durch seine Bewegung detektiert werden (Voss 1991). Das Erkennen von Objekten ist eine wesentliche Voraussetzung für die Berechnung von Tiefeninformationen. Daher werden einige Methoden der Objekterkennung nachfolgend kurz dargestellt (DEMANT *et al.* 1998, KÖHN 1996).

#### *Objekterkennung durch Konturverfolgung:*

Ein Bild wird in allen Zeilen und Spalten nach speziellen Objektpunkten untersucht. Wird ein Objektpunkt gefunden, ist er der Startpunkt für die Konturverfolgung. Anschließend untersucht der Konturfolge-Operator die Randpunkte des Objektes. Die ermittelte Kontur muss eine einfach zusammenhängende Fläche ergeben. Ein Konturobjekt besteht aus dem Startpunkt  $P_0(u_0, v_0)$  und dem Richtungscode.

#### *Objekterkennung mit lokalen Operatoren*

Die Methode ordnet die Objekte eines Bildes einer bestimmten Klasse zu. Voraussetzungen dafür sind die Objektsegmentierung (Trennung von Objekt und Untergrund) sowie die Merkmalsextraktion (Objekte sollen signifikant und unkorreliert sein). Die Vorgehensweise besteht darin, einen Satz von Merkmalen aufzustellen, einen n-dimensionalen Merkmalsraum zu erzeugen und sogenannte Anhäufungen im Merkmalsraum (sogenannte Cluster) zu analysieren. Zur Berechnung des Ergebnisbildes wird der Grauwert des aktuellen Pixels und die Grauwerte der Nachbarschaftspixel aus einem quadratischen Fenster mit ungerader Pixelanzahl (3x3, 5x5, 7x7 usw.) nach folgender Gleichung umgerechnet:

$$g_{j,k} = \frac{1}{N \cdot M} \sum_{n=-\frac{N-1}{2}}^{\frac{N-1}{2}} \sum_{m=-\frac{M-1}{2}}^{\frac{M-1}{2}} f(j-n, k-m) \cdot h(n, m) \quad (4)$$

#### *Objekterkennung durch Gradienten*

Um den Gradienten eines Bildpunktes zu bestimmen ist es notwendig, eine gute Näherung der eindimensionalen Ableitungen zu berechnen. Hierzu muss eine Basis festgelegt werden. Als sehr einfache Ableitungsoperatoren ergeben sich:

$$D_x = \frac{1}{2}(1 \quad 0 \quad -1) \text{ und } D_y = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ -1 \end{pmatrix} \quad (5)$$

Der Gradient eines Bildes entsteht, wenn für jeden Bildpunkt eine Betragsbildung durchgeführt wird, d.h. die x- und y-Koordinaten aus den Kantenbildern quadriert und das geometrische Mittel gebildet wird:

$$|D(x, y)| = \left[ D_x(x, y)^2 + D_y(x, y)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

Daraus kann die Richtung eines Gradienten  $\omega$  berechnet werden:

$$\omega(x, y) = \arctan\left(\frac{D_y(x, y)}{D_x(x, y)}\right) \quad (7)$$

### *Objekterkennung durch Rasterung und Filterung*

Bei der Rasterung wird die Bildvorlage durch die Überlagerung mit einem rechteckigen oder quadratischen Gitter in einzelne Rasterflächenstücke unterteilt. Man erhält eine Matrix von Abtastelementen. Bei der Filterung wird jede dieser Rasterflächen entweder nur schwarz oder weiß dargestellt, je nach dem ob der größere Teil der Rasterfläche ursprünglich weiß oder schwarz war. Es folgt die Einteilung des Wertebereiches in eine endliche Anzahl gleichgroßer Stufen. Man ordnet nun jedem einzelnen Funktionswert den Zahlenwert der nächstgelegenen Digitalisierungsstufe zu.

## **2 Mittel und Methoden zur Stereobildanalyse**

### 2.1 Hardware zur Stereobildaufnahme

Die vielen technischen Möglichkeiten zur Tiefenbestimmung lassen sich in zwei Hauptgruppen unterteilen (SLABAUGH *et al.* 2001, AYACHE 1991): Die erste Gruppe benutzt aktive Verfahren zur Bildaufnahme. Hierbei handelt es sich um Verfahren, die auf das zu bewertende Objekt ein Muster oder einen Abtaststrahl projizieren und daraus Rückschlüsse auf die Beschaffenheit des Objektes ziehen. So kann beispielsweise auf einem Gegenstand ein Streifenmuster aus schwarzen und weißen Balken abgebildet und das entstehende Bild durch eine Kamera aufgenommen und analysiert werden. Durch Drehen des Objek-

tes bzw. Variieren der Streifenabstände erhält man ein dreidimensionales Modell des Gegenstandes. Ein anderes aktives Verfahren erzeugt ein dreidimensionales Panorama aus mehreren Tiefenscans, die ein räumliches Modell der Umgebung liefern. Für die Erfassung des Parameters Biomasse in der Pflanzenproduktion kann z.B. ein Laser-Scanner der Fa. Sick eingesetzt werden (**Bild 3**), wobei die Information über die Bestandshöhe pixelweise erfasst und aus einer Bezugsordinate abgeleitet wird.



**Bild 3:** Messaufbau zur 3D Erfassung von Pflanzenbeständen

Die zweite Gruppe der Verfahren zur Gewinnung von Tiefeninformationen verwendet passive Verfahren, die ihre Umgebung in keiner Weise beleuchten bzw. beeinflussen. Die passiven Verfahren verwenden zwei oder mehr Bilder mit unterschiedlichen Perspektiven auf die zu untersuchende Szene. Die Bestimmung der Tiefeninformation wird über die Auswertung der Disparitäten zwischen zwei Teilbildern und die Rekonstruktion der Raumkoordinaten realisiert. Die binokulare Tiefengewinnung verwendet zwei Kameras und ist ein passives Verfahren für Situationen, in denen keine zusätzlichen Bildinformationen verfügbar sind (ROVIRA-MAS *et al.* 2005, ZHANG *et al.* 2005).

Für die Untersuchung der Stereobildanalyse wurden am ATB aktive und passive Verfahren für folgende zwei Anwendungsbereiche eingesetzt:

- Erfassen und Berechnen von Biomassen in der Pflanzenproduktion und
- Erkennen von Fremdkörpern bei der Einlagerung von Siliergut in Horizontalsilos.

In **Bild 4** sieht man die technologischen Abläufe zum Befüllen eines Horizontalsilos und die verwendeten Landmaschinen zum Verdichten des Silomaterials.



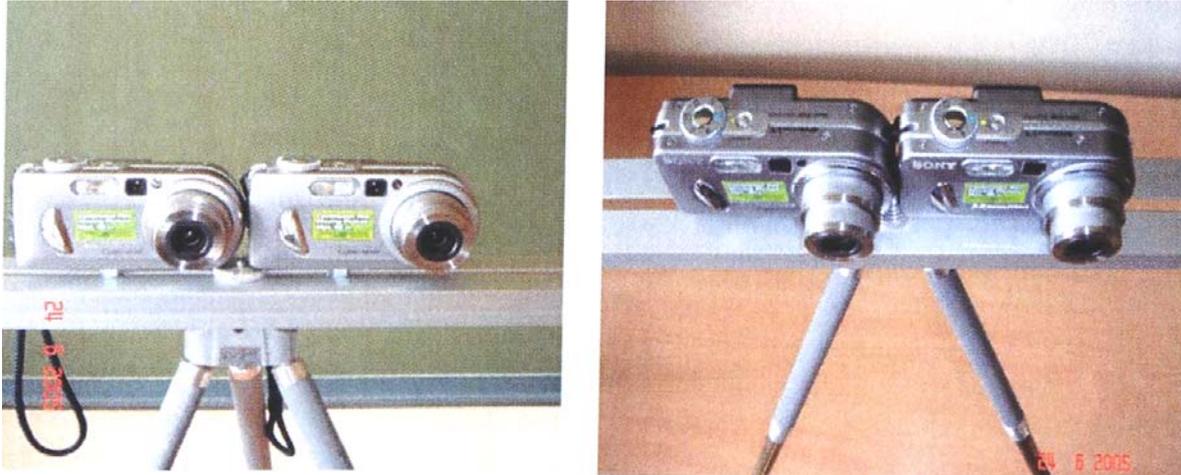
**Bild 4:** Befüllen eines Horizontalsilos

Die Stereobildanalyse kann zur Detektion von Fremdkörpern beim Befüllen bzw. beim Verdichten im Silo eingesetzt werden, wobei die Kamera auf dem Fahrzeug montiert wird und einen Bereich von ca. 2m x 3m vor der Maschine erfasst. Der Arbeitsgang zum Verdichten des Silierguts eignet sich für die Kontrolle auf Fremdkörper besonders gut, da die verwendete Maschine (**Bild 5**) mit geringer Geschwindigkeit arbeitet und sie das Areal des Horizontalsilos mehrfach komplett durchfährt. Das bietet günstige Voraussetzungen zur flächendeckenden Erfassung des Silos mit Hilfe der Stereokamera am Fahrzeug.



**Bild 5:** Verdichten des Silierguts im Horizontalsilo

Für die durchgeführten Untersuchungen wurden zwei Stereokameras DCS-10 der Fa. Sony mit Zoom-Objektiven verwendet (**Bild 6**). Diese wurden auf einem Makro-Einstellschlitten montiert, mit dessen Hilfe die Stereobasisweite  $b$  exakt eingestellt werden kann.



**Bild 6:** Laboraufbau eines Stereokamera mit zwei DCS-10 der Fa. Sony

## 2.2 Methoden und Software zur Stereobildanalyse

Mit dem Laboraufbau aus zwei DCS-10 Kameras nach **Bild 6** konnten in den Vorversuchen gute Stereobilder aufgenommen werden. **Bild 7** zeigt eine Aufnahme mit einfachen Objekten aus dem Labor. An diesem Beispiel werden die Arbeitsschritte zur Analyse eines Stereobildes und zur Berechnung der Tiefe  $R$  kurz dargelegt. Allgemein erfordert die Stereobildanalyse für jedes Teilbild zwei Rücktransformationen: Die Umrechnung der Pixelkoordinaten  $(u, v)$  in die Kamerakoordinaten  $(X_k, Y_k, Z_k)$  und eine Rücktransformation der Kamerakoordinaten in die sogenannten Weltkoordinaten  $(X_w, Y_w, Z_w)$  (FAUGERAS 1993, HETZEL 1994, HORN 1986). Für die erste Transformation ist eine Kalibrierung der inneren Geometrie der Kameras erforderlich. Für den zweiten Schritt wird eine Kalibrierung der äußeren Parameter benötigt, die z.B. durch die GPS-Koordinaten der Kamera bestimmt wird.

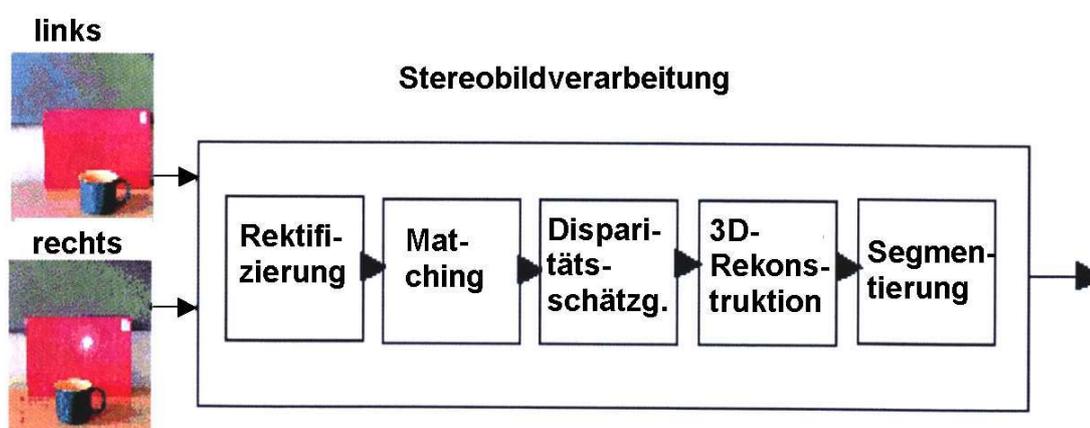


**Bild 7:** Beispiel zu den Teilbildern eines Stereobildes

Der erste Analyseschritt ist eine Rektifizierung der Bilder, d.h. die Korrektur von sphärischen Aberrationen durch die Objektive (**Bild 8**). Im zweiten Schritt erfolgt das Mat-

ching, d.h. das Erkennen von Objekten in beiden Teilbildern und ihre richtige Zuordnung zu den Bildobjekten des anderen Teilbildes. Voraussetzung für das korrekte Matching sind kontraststarke Bilder mit gut erkennbaren Objekten (SCHARSTEIN 1999).

Der dritte Schritt entsprechend der Auswertungskette nach **Bild 8** ist das Berechnen der Disparitätswerte zu jedem Pixel ( $u, v$ ) bzw. das Schätzen der Disparitäten, falls für einzelne Pixel oder Bildbereiche keine eindeutige Zuordnung zwischen den Teilbildern möglich ist. Aus den Koordinaten der korrespondierenden Pixel bzw. Bildobjekte kann ein Disparitätenbild berechnet werden, aus dem zumindest teilweise eine 3D Rekonstruktion des Bildes möglich wird. Durch Segmentierung werden Teilbereiche des Bildes unterdrückt, für die keine eindeutige Disparität bzw. Tiefeninformation berechnet werden kann. **Bild 8** fasst den gesamten Ablauf der Stereobildanalyse zusammen (BRANDES 1995, KÖHN 1996).



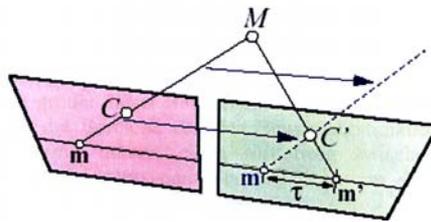
**Bild 8:** Übersicht zur Auswertung von Stereobildern, Berechnung der 3D Rekonstruktion

Ausgangspunkt für die Berechnung einer 3D Rekonstruktion ist die Bestimmung der Disparitäten für die detektierten Bildobjekte. Aus den Koordinaten ( $u_1, v_1$ ) eines Bildpunktes  $m$  im ersten Teilbild und den Koordinaten ( $u_2, v_2$ ) des korrespondierenden Bildpunktes  $m'$  im zweiten Teilbild (**Bild 9**) ergibt sich die Disparität  $t$  (WERNER 2002, MÜHLMANN *et al.* 2002):

$$\text{Disparität } t = u_2 - u_1 \quad (8)$$

Aus der Disparität, der Überschneidung in den zwei Teilbildern, kann in einem zweiten Schritt die geometrische Entfernung zwischen den korrespondierenden Bildpunkten  $m$  und  $m'$  berechnet werden. Dazu wird die Breite  $w$  der Kamerapixel benötigt. Das Produkt aus der Disparität und der Pixelbreite liefert den geometrischen Abstand  $\tau$  der Bildpunkte  $m$  und  $m'$ . Für diesen Abstand gilt:

Abstand  $\tau = tw$  (9)



**Bild 9:** Berechnung der Tiefe zum Objektpunkt M aus der Disparität

Aus dem Abstand  $\tau$  und den Beziehungen der geometrischen Optik kann nun die Entfernung des Objektpunktes M in Bild 9 berechnet werden. Aus dem Wert der Basisweite  $b$  (Kameraabstand bzw. Abstand der Punkte C, C' im **Bild 9**), der Objektivbrennweite  $f$  der Objektivs erhält man die Tiefe, d.h. den Abstand Objektivmitte zu Objektpunkt M. Nach dem Strahlensatz der Optik gilt folgendes Verhältnis (HARTLEY & ZISSERMANN 2000):

Tiefe  $R = bf / \tau$  (10)

Für den Anwendungsbereich zur Detektion von Fremdkörpern in Siloanlagen ist weiterhin die minimale Auflösung für eine Hinderniserkennung wichtig. Dieses Auflösungsvermögen wird von den Parametern Öffnungswinkel der Optik und maximale Anzahl Pixel in horizontaler Richtung entscheidend bestimmt. Aus der geometrischen Optik ist weiterhin klar, dass dieses Auflösungsvermögen  $h_{\min}$  mit dem Quadrat des Abstandes zwischen Objektpunkt und Kamera schlechter wird. Für die Detektion von Fremdkörpern in Siloanlagen wurde von einem Wert  $h_{\min} = 10\text{cm}$  in horizontaler und vertikaler Richtung ausgegangen, der nach (11) und (12) mit den entsprechenden Kameraparametern verbunden ist:

$$h_{x \min} = \frac{R^2 \cdot 2 \cdot \tan(0,5\Gamma)}{b \cdot u_{\max}} \quad (11)$$

$$h_{y \min} = \frac{R^2 \cdot 2 \cdot \tan(0,5\Gamma)}{b \cdot v_{\max}} \quad (12)$$

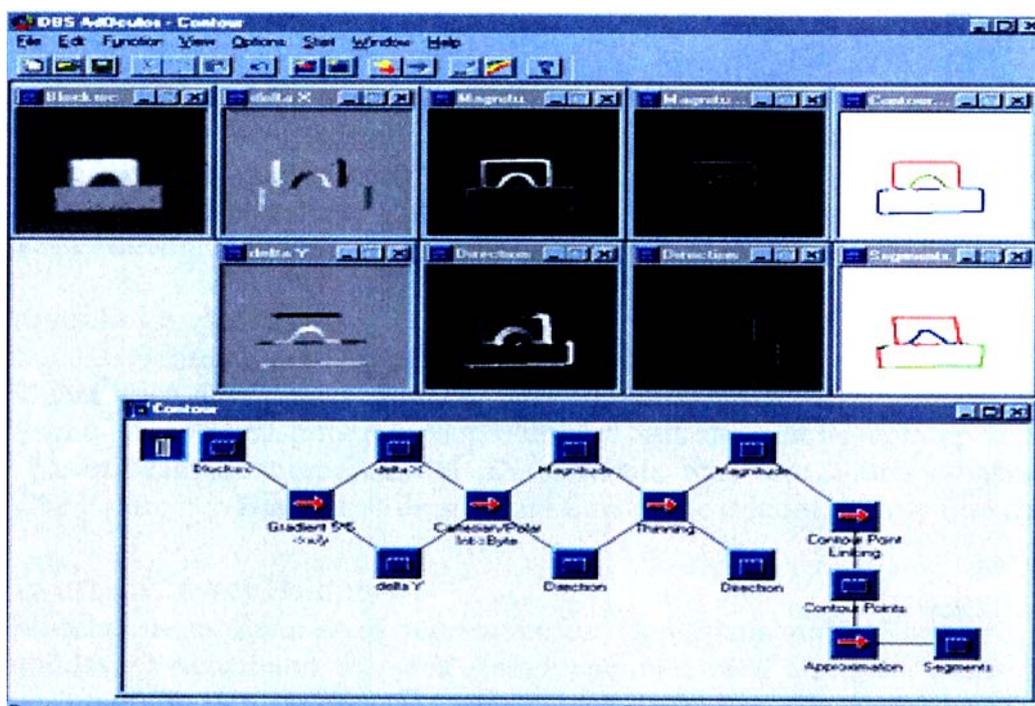
$R^2$  = Quadrat des Abstands zwischen Kamera und Objekt

$\Gamma$  = Öffnungswinkel des Kameraobjektivs

$b$  = Basisweite der Stereokamera

$u_{\max}$  = Maximalzahl der horizontalen Bildpixel

Für die Auswertung der Stereoaufnahmen wurde die Software AdOculus verwendet. Mit dieser Software sind die wesentlichen Schritte der Analyse von Stereobildern durchführbar (BÄSSMANN & BESSLICH 1993). Weiterhin konnten zusätzliche Module durch eine Programmierschnittstelle einbezogen werden. **Bild 10** zeigt einen Ausschnitt der Bedienoberfläche von AdOculus.

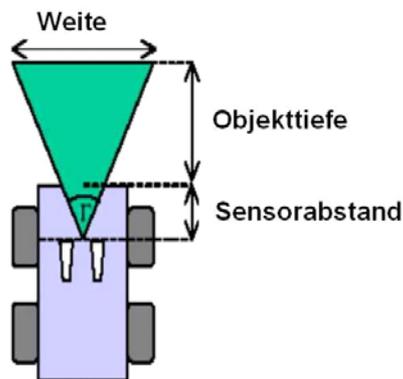


**Bild 10:** Screenshot vom Bildanalyseprogramm AdOculus

### 3 Ergebnisse

#### 3.1 Stereobilder zur Detektion von Hindernissen in Horizontalsilos

Für die Detektion der Fremdkörper in Horizontalsilos ist es notwendig, eine „Region of Interest“ ROI zu definieren. In dieser Region ist eine Analyse der Stereobilder erforderlich, d.h. für die ROI ist ein Disparitätenbild und eine Karte der Tiefen- bzw. Höheninformation zu berechnen. Um zusätzliche Sicherheitsfunktionen zu ermöglichen, soll die ROI eine Breite  $W$  haben, die mindestens der Fahrzeugbreite entspricht (**Bild 11**). Weiterhin soll durch die ROI ein bestimmter Bereich vor dem Fahrzeug abgedeckt werden, der eine ausreichende Reaktionszeit auf Fremdkörper bzw. Hindernisse ermöglicht.



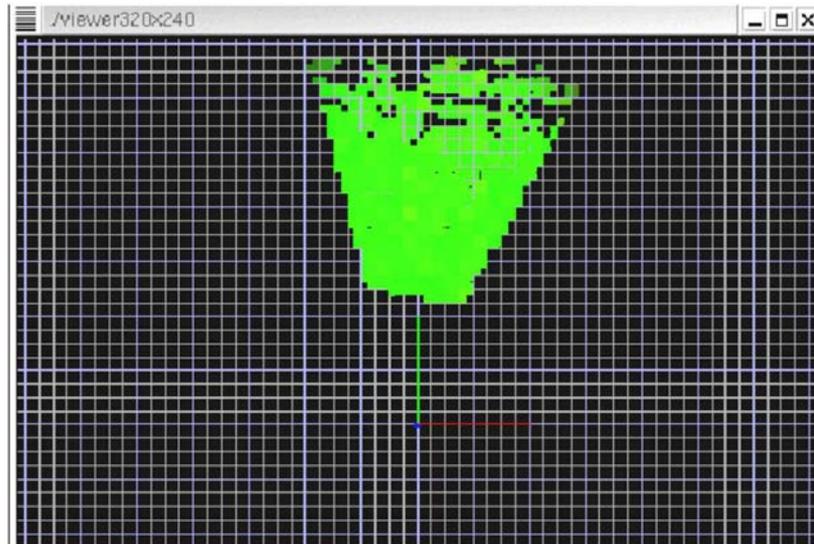
**Bild 11:** Region of Interest (ROI) in Front vor dem Verdichtungsfahrzeug

Für die Laboruntersuchungen in Hinblick auf die Anwendungen in Horizontalsilos wurde von der Zielstellung ausgegangen, die Detektion von Fremdkörpern mit  $h_{\min} < 10$  cm zu erreichen. Mit den optischen Parametern der Kameras DCS-10 ergeben sich die Werte der minimalen Auflösung in vertikaler Richtung nach **Tabelle 1**.

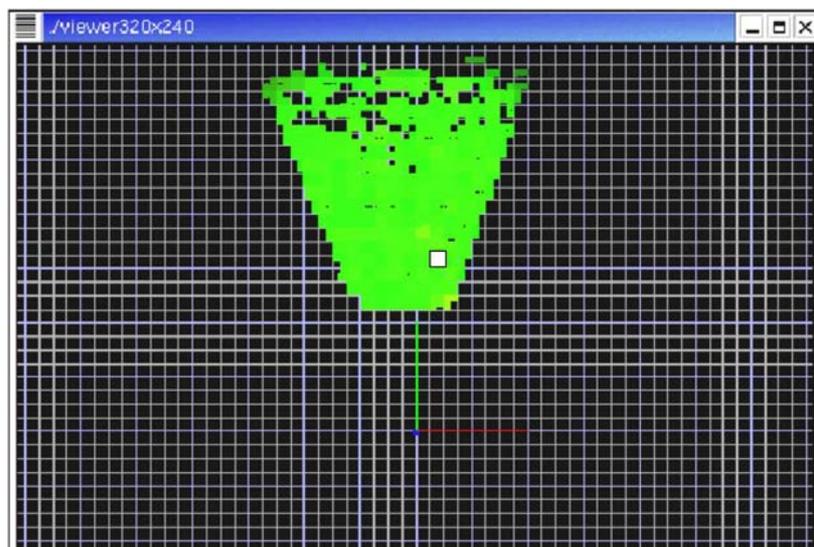
**Tabelle 1:** Minimale Auflösung in Abhängigkeit von Abstand R und Stereoweite b

<b>b \ R</b>	<b>1 m</b>	<b>2 m</b>	<b>4 m</b>	<b>8 m</b>
<b>0,1 m</b>	9mm	38mm	150mm	601mm
<b>0,2 m</b>	5mm	19mm	75mm	300mm
<b>0,4 m</b>	2,4mm	9,4mm	38mm	<b>150mm</b>
<b>0,8 m</b>	1,2mm	4,7mm	19mm	75mm

Die theoretischen Werte aus **Tabelle 1** wurden in einem ersten Feldtest überprüft. Dazu wurde der Laboraufbau einer Stereokamera mit der Basisweite  $b=0,4$ m verwendet. Ein würfelförmiger Fremdkörper mit einer Kantenlänge von 12 cm wurde in 8m Abstand von der Kamera auf dem Silagegut platziert und mit der Stereokamera aus fester Position aufgenommen. Aus den Aufnahmen wurden Disparitätenbilder errechnet und ein 3D Höhenbild der Szene rekonstruiert. **Bild 12** zeigt das Höhenbild ohne Fremdkörper und **Bild 13** die gleiche Szene mit detektiertem Fremdkörper.



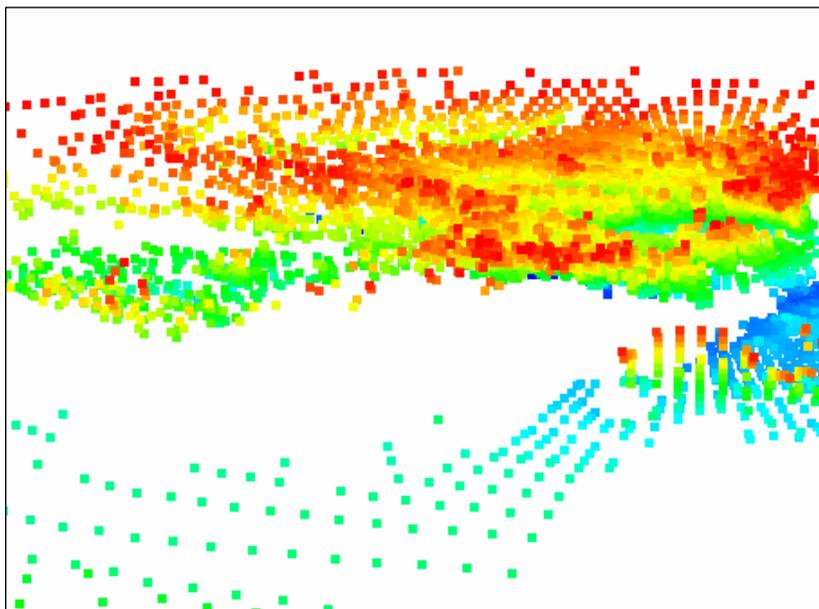
**Bild 12:** Aufnahme der Szene ohne Fremdkörper



**Bild 13:** Aufnahme der Szene mit detektiertem Fremdkörper (Bildpunkt vorn rechts)

### 3.2 Stereobilder zur Erfassung der Biomasse

3D Laserscannen ist eine Möglichkeit zur Detektion von Höheninformationen. Aus den Abstandsdaten zwischen Laserscanner und Objektpunkten wurden in einem Getreidebestand die Koordinaten des Pflanzenbestandes erfasst und in ein 3D Bild umgerechnet (**Bild 14**). Die Höheninformation der Pixel des Bildes 14 ist durch verschiedene Farben kodiert, was in einer Grauwertdarstellung nur teilweise erkennbar ist.



**Bild 14:** Aufnahme eines Pflanzenbestands aus aktivem 3D Laserscannen

#### 4 Diskussion

Das verwendete Verfahren zur Kamerakalibrierung lässt noch viel Raum für Verbesserungen. Wünschenswert wäre eine weitgehend automatische Kalibrierung der Stereokamera mit allen externen Parametern, wodurch die Messgenauigkeit wesentlich erhöht werden könnte. Des Weiteren gibt es derzeit noch Probleme bei der Anpassung der Kameraparameter an die verschiedenen Bildgrößen. Da die beiden Kameras hochauflösende Bilder liefern, könnte die Eignung der Algorithmen für verschiedene Bildgrößen sehr gut getestet werden. Es bleibt zu untersuchen, ob sich die derzeitige Tiefenbestimmung über die Berechnung der Pixeldisparitäten zur Ermittlung der externen Kameraparameter erweitern lässt.

Das Problem der Platzierung der Kameras, das wegen der Randbedingungen in einem Horizontalsilo und der geplanten Montage an einer Landmaschine zusätzliche Überlegungen erforderte, konnte durch theoretische Berechnungen der Anordnung und durch erste Tests gelöst werden. Stereoskopische Kameras mit Standardaufbau minimieren zwar den Rechenaufwand zur Auswertung, sind jedoch wenig flexibel in ihrer Anwendbarkeit. Daher wurde ein Laboraufbau aus zwei Digitalkameras DCS-10 realisiert, der auch frei positionierte Anordnungen ermöglicht. Bei der Auswertung frei positionierter Bilder stellt sich das Problem, ob die Disparitäten in einem aufwendigen Algorithmus berechnet werden sollten oder ob es besser ist, die stereoskopische Standardanordnung durch eine mathematische Transformation vorab herzustellen, z.B. durch Rektifizierung nach (FUSIELLO *et al.* 2000).

Die bekannten Algorithmen zur stereoskopischen Tiefengewinnung konzentrieren sich weitgehend auf die Disparitäten. Im Rahmen der Voruntersuchungen wurde der Weg mit

Rektifikation untersucht. Dabei wurde festgestellt, dass sich ohne Kalibrierung, d.h. ohne exakte interne Kameraparameter auch noch relative Tiefeninformationen bestimmen lassen. Ohne interne Kalibrierung sind qualitative Auswertungen der Kamerabilder zur Tiefenbestimmung möglich, die sich an Fixpunkten im Horizontalsilo orientieren (künstliche Passpunkte). Weiterführende Arbeiten werden untersuchen, ob sich die Passpunktfindung in den zwei Teilbildern zuverlässig durchführen lässt.

## 5 Literatur

- AYACHE N. (1991):** Artificial Vision for Mobile Robots: Stereo Vision Multisensory Perception, MIT Press, Cambridge, Massachusetts
- BÄSSMANN H., BESSLICH PH. W. (1993):** Bildverarbeitung. Ad Oculos. 2. Auflage, Springer Verlag
- BRANDES M. (1995):** Entfernungsbestimmung markanter Punkte aus einem Fahrzeug mit Hilfe eines Stereokamerasystems. Diplomarbeit, Fakultät Informatik, Uni. Stuttgart
- DEMANT C., STREICHER-ABEL B., WASZKEWITZ P. (1998):** Industrielle Bildverarbeitung - Wie optische Qualitätskontrolle wirklich funktioniert. Springer Verlag
- FAUGERAS O. (1993):** Three-Dimensional Computer Vision: A Geometric Viewpoint. MIT Press
- FUSIELLO A., TRUCCO A., VERRI A. (2000):** A compact algorithm for rectification of stereo pairs. Machine Vision and Applications
- HABERÄCKER P. (1991):** Digitale Bildverarbeitung - Grundlagen und Anwendungen. 4. Auflage, Carl Hanser Verlag
- HARTLEY R.I., ZISSERMAN A. (2000):** Multiple View Geometry in Computer Vision. Cambridge University Press
- HARTMUT E. (1991):** Einführung in die digitale Bildverarbeitung. Franzis Verlag, München,.
- HETZEL G. (1994):** Kalibrierung eines Stereokamerasystems. Diplomarbeit, Institut für Prozessrechen-technik und Robotik, Uni. Karlsruhe
- HEYGSTER G., SMULA C. (1998):** Script zur Vorlesung digitale Bildverarbeitung – Abschnitt Bildverbesserung. Uni. Bremen, Oktober
- HORN B. (1986):** Robot Vision. The MIT Press, Cambridge, Massachusetts
- JÄHNE B. (1997):** Digitale Bildverarbeitung. Springer Verlag, Berlin; Heidelberg; New York, 4. Auflage
- KLETTE R., KOSCHAN A., SCHLUNS K., RODEHORST V. (1995):** Surface Reconstruction based on Visual Information. Technischer Bericht 95/6, Dep. of Computer Science, The University of Western Australia
- KÖHN C. (1996):** Bildanalyse und Bilddatenkompression - Fraktale Verfahren und klassische Methoden im Einsatz. Hanser Verlag
- MÜHLMANN K., MAIER D., HESSER J., MÄNNER R. (2002):** Calculation Dense Disparity Maps from Color Stereo Images, an Efficient Implementation. Uni. Mannheim, Lehrstuhl für Informatik, International Journal of Computer Vision, Vol. 47, 1-3, Hingham: Kluwer Academic Publishers
- POLLEFEYS M. (2000):** 3D Modeling from Images. Dublin, Ireland, in conjunction with ECCV 2000, Katholieke University Leuven

- ROVIRA-MAS F., ZHANG Q., REID J.F. (2005):** Creation of Three-dimensional Crop Maps based on Aerial Stereo images. *Biosystems Engineering*, 90 (3), S. 251-259
- SCHARSTEIN D. (1999):** View Synthesis using Stereo Vision. *Lecture Note in Computer Science*. Springer Verlag, Berlin
- SCHÖNSTEIN O. (2001):** Zur Geschichte der Stereoskopie. *Mitteilungen des Deutschen Historischen Museums*, Heft 27, 11. Jahrgang, Der Raumbild-Verlag Otto Schönstein, Herbst
- SLABAUGH G., CULBERTSON B., MALZBENDER T., SCHAFER R. (2001):** A Survey of Methods for Volumetric Scene Reconstruction from Photographs. *Technischer Bericht 1*, Center for Signal and Image Processing, Georgia Institute of Technology
- SMITS R. (2002):** Linkshänder: Geschichte, Geschick, Begabung. Düsseldorf: Albatros Verlag
- VOGEL H. (1997):** Gerthsen Physik. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, 19. Auflage
- VOSS K., SÜß H. (1991):** Praktische Bildverarbeitung. Hanser Verlag
- WERNER C. (2002):** Ein optimierter Algorithmus zur Berechnung der Disparitäten aus Stereobilddaten und dessen Hardware-Implementation. *Diplomarbeit*, Humboldt-Uni. Berlin
- ZHANG Q., KISE M., ROVIRA F. (2005):** A Stereovision-based Crop Row Detection Method for Tractor-automated Guidance. *Ma's I* Department of Agricultural and Biological Engineering, University of Illinois at Urbana-Champaign. Published February
- ZHANG Z., XU G. (1996):** *Epipolar Geometry in Stereo, Motion and Object Recognition*. Kluwer Academic Publishers

## Wissensbasierte Artenerkennung anhand von Konturmerkmalen der Pflanzen mit verschiedenen Klassifikationsalgorithmen

### *Knowledge based identification of plant species by using contour features and different classification algorithms*

Markus Sökefeld, Roland Gerhards, Horst Oebel, Martin Weiss, Peter Risser, Markus Pflugfelder  
Institut für Phytomedizin 360, Fachgebiet Herbologie, Universität Hohenheim,  
Otto-Sander-Strasse 5, 70599 Stuttgart  
E-Mail: m.sokefeld@netcologne.de

**Zusammenfassung:** Eine automatische und schnelle Unkrautartenerkennung ist die Grundvoraussetzung für eine teilschlagspezifische selektive Herbizidapplikation. Ausgehend von einer bispektralen Kameratechnik zur Aufnahme der Oberfläche von Acker-schlägen über die Extrahierung von artspezifischen Konturmerkmalen werden drei Klassifikationsverfahren erläutert, die die bildanalytische Unkrautartenerkennung anhand von Wissensbasen erlauben. Neben der höheren Klassifikationsgenauigkeit des Klassifikators Diskriminanzanalyse zeichnet sich dieser auch durch seine große Flexibilität in Bezug auf variierende Unkrautartenzusammensetzung und Kulturpflanzenart sowie eine darauf anzupassende Erkennungsstrategie aus.

**Deskriptoren:** Digitale Bildverarbeitung, Unkrauterkenung, Klassifikationsverfahren, Diskriminanzanalyse

**Abstract:** *An automatic and fast identification of weed species is an essential condition for a site specific and selective application of herbicides. A bispectral camera system was used for taking images of the ground surface. Typical contour features were extracted from the images and used for a knowledge based identification of the plants. Three classifiers were compared in regard to identification accuracy. Beside the highest classification results discriminant analysis showed a good flexibility concerning to varying weed species composition and different crops.*

**Keywords:** *Digital image analysis, weed identification, classification method, discriminant analysis*

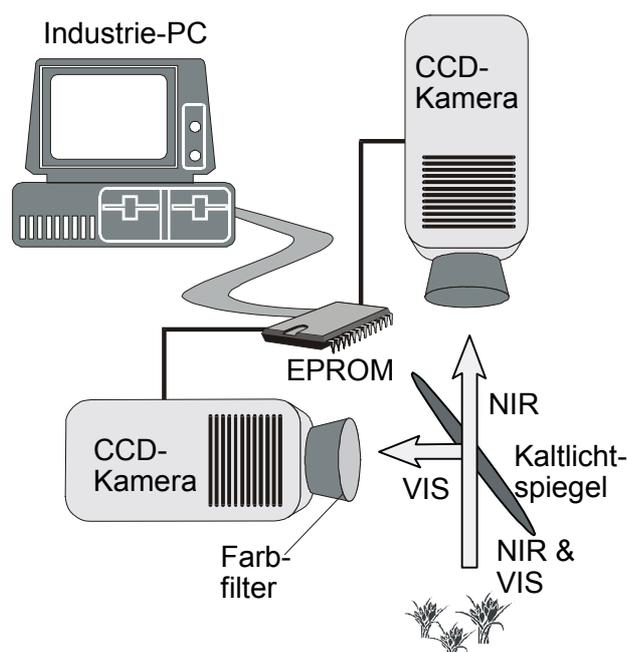
## 1 Einleitung

Für eine selektive Herbizidapplikation im Sinne des Precision Farming ist eine automatische Unterscheidung von Unkrautarten und Kulturpflanzenarten vor dem Hintergrund des Bodens eine unbedingte Voraussetzung. Eine Möglichkeit zur Erfassung der Unkrautsituation auf Ackerschlägen besteht in der Verwendung von Kameras mit nachgeschalteter Bildauswertung (SÖKEFELD *et al.* 1996, CHAPRON *et al.* 1999). In Verbindung mit Ortungssystemen und Geoinformationssystemen zur visuellen Darstellung der Geodaten, können so kleinräumige Informationen über die Unkrautsituation auf Ackerschlägen gewonnen werden (GERHARDS *et al.* 1996).

Neben der Bildaufnahme, für die verschiedene Verfahren in der Literatur beschrieben sind (PETERSEN *et al.* 2002, SÖKEFELD *et al.* 2002, YANG *et al.* 2003), ist die Bildauswertung bzw. die Klassifikation der gewonnenen Daten ausschlaggebend für die Güte des Klassifikationsergebnisses.

## 2 Bildaufnahme

Für die Bildaufnahme wurde der Reflexionsunterschied von vitalem Pflanzenmaterial zu Boden, Steinen, abgestorbenen Pflanzenresten und anderem organischen Material im sichtbaren und nahen infraroten Spektrum genutzt (GUYER *et al.* 1986). Um diesen Effekt für die Bildaufnahme zu verwenden, wurde ein bispektrales Kamerasystem konzipiert und entwickelt. Die Hauptbestandteile dieser Kamera sind zwei Monochromkameraköpfe, welche so in ein schock- und vibrations-unempfindliches Kameragehäuse montiert sind, dass mit einer Aufnahme zwei pixelsynchrone Bilder einer Szene mit unterschiedlichen Wellenlängen aufgenommen wurden. Hierzu ist vor der Optik der beiden Kameraköpfe ein Kaltlichtspiegel angebracht, der das einfallende Licht in einen infraroten und einen sichtbaren Wellenlängenbereich teilt. Der infrarote Anteil wird durch den Kaltlichtspiegel direkt auf einen Kamerakopf projiziert. Der sichtbare Wellenlängenbereich des einfallenden Lichtes wird vom Kaltlichtspiegel auf den zweiten Kamerakopf reflektiert. Über auswechselbare Schmalbandfilter wird der Wellenlängenbereich für das zweite Bild festgelegt. Aus beiden Bildern wird über ein nachgeschaltetes EPROM online ein Differenzbild berechnet und als einzelnes, kombiniertes Bild an den Framegrabber eines PCs weitergeleitet (**Bild 1**). Die Differenzbildung (IR–VIS) von zwei gleichzeitig aufgenommenen Bildern erlaubt eine wirkungsvolle Unterdrückung von hell reflektierenden Böden, Steinen und Mulch.



**Bild1:** Funktionsprinzip eines bispektralen Kamerasystems zur pixelsynchronen Aufnahme von zwei Bildern in unterschiedlichen Wellenlängenbereichen

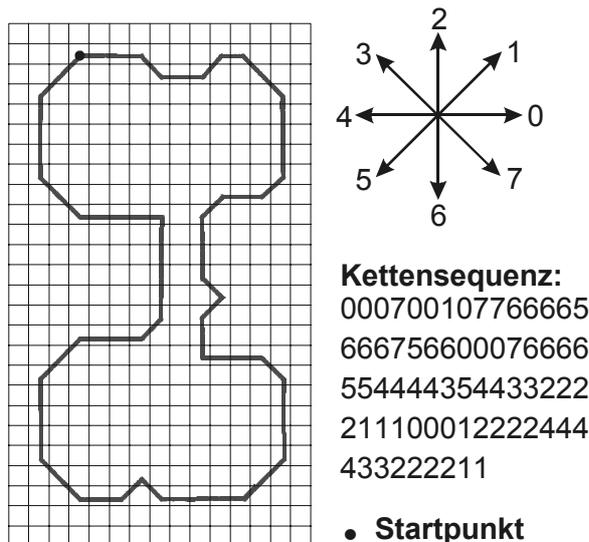
Für den praktischen Einsatz der beschriebenen Aufnahmetechnik wurden drei dieser Kamerasysteme im Abstand von jeweils drei Metern an einem Trägerfahrzeug ca. 0,85 m über dem Boden befestigt. Bei einer geometrischen Auflösung der Kameras von  $636 \times 480$  Pixel wird bei der angegebenen Aufnahmehöhe ein Bildausschnitt von  $185 \text{ mm} \times 140 \text{ mm}$  ( $0,026 \text{ m}^2$ ) realisiert. Dies entspricht einer Pflanzendarstellung von ca. 12 Pixel pro  $\text{mm}^2$ , was sich für die später Bildauswertung als ausreichend erwies. Die Aufnahmefrequenz beträgt etwa zwei Differenzbilder pro Kamera und Sekunde. Das entspricht bei einer Fahrgeschwindigkeit von 7 km/h einem Bildaufnahme raster von ca.  $1 \text{ m} \times 3 \text{ m}$ . Die aufgenommenen Bilder werden mit den zugehörigen GPS-Daten auf einem Bordcomputer gespeichert. Durch eine automatische an die Aufnahmebedingungen angepasste Gain- und Shutter-Regelung werden auch bei der oben angegebenen Fahrgeschwindigkeit und bei durch die Witterung wechselnden Aufnahmebedingungen konturscharfe und kontrastreiche Bilder erzeugt.

Eine verbesserte Kameratechnik, mit einer geometrischen Auflösung von  $1024 \times 768$  Pixel und einem daraus resultierendem größeren Bildausschnitt, sowie einer robusteren Technik zur Bildüberlagerung befindet sich derzeit im praktischen Versuchseinsatz.

### 3 Extrahierung der Konturmerkmale

Für die wissensbasierte Bildauswertung werden charakteristische Merkmale von bekannten Pflanzen extrahiert und zwecks eines Vergleiches mit unbekanntem Pflanzen in einer Datenbank gespeichert.

Im ersten Verarbeitungsschritt werden die Differenzbilder durch eine automatische Analyse ihres Grauwert-Histogrammes und einer darauf beruhenden Schwellenwertoperation in die Bestandteile Boden und Pflanze getrennt. Aus dem so erhaltenen Binärbild werden die Konturen der Pflanzen mit einem objektorientierten Verfahren extrahiert. Aufgrund der Extraktionsvorschrift ist die Geschlossenheit der Konturen gewährleistet (ABOU-NABOUT 1993). Anhand der Konturlänge können eventuell auftretende Störungen beseitigt werden. Die verbleibenden Konturen werden im Uhrzeigersinn in kettencodierter Form beschrieben (**Bild 2**). Der für die äußere Kontur einer Pflanze charakteristische Kettencode besteht aus einer Abfolge von Einheitsvektoren, die den Konturverlauf von Pixel zu Pixel beschreiben. Die Abfolge und Anzahl der Kettenelemente ist abhängig von Größe, Drehung und Position der Pflanze in der Bildvorlage sowie dem Startpunkt der Codierung. Um invariante Parameter bezüglich der genannten Größen zu erhalten, wird der Kettencode als Winkelfunktion dargestellt; auf der Abszisse ist die Länge der Konturabschnitte, auf der Ordinate die Winkeländerung im Vergleich zum Startwinkel abgetragen. Aufgrund dieser Approximation wird eine Invarianz bezüglich Rotation und Translation der Objekte im Bild erreicht. Durch die anschließende Normierung des Definitionsbereichs der Winkelfunktion auf das Intervall  $(0, 2\pi)$  wird eine weitgehende Größeninvarianz erzeugt. Die normierte Winkelfunktion wird einer Fourierreihenentwicklung unterworfen, die gewonnenen Amplitudenwerte (Fourierdeskriptoren) der verwendeten Funktionen (Sinus bzw. Kosinus) sind für den Funktionsverlauf spezifisch und vom Startpunkt der Kettencodierung unabhängig. Zur weiteren Charakterisierung der Pflanzen werden geometrische Parameter wie überdeckte Fläche der Pflanze, Umfang, minimale und maximale Spannweite, sowie kombinierte Parameter aus den einzelnen Größen ermittelt, hierzu zählen die Kompaktheit, berechnet aus dem Verhältnis von Umfang zu Fläche, sowie der Quotient aus minimaler und maximaler Spannweite. Nun stehen numerische Werte zur Verfügung, die den Habitus einer Pflanze unabhängig von Größe, Rotation und Translation beschreiben. Diese Parameter werden für eine Auswahl an Pflanzenarten in einer Datenbank (Wissensbasis) abgelegt und können so für einen wissensbasierten Vergleich mit unbekanntem Pflanzen verwendet werden.



**Bild 2:** Prinzip der Kettencodierung zur Konturbeschreibung am Beispiel einer vereinfachten Unkrautpflanze

#### 4 Klassifikationsverfahren

Zur Klassifikation von unbekanntem Pflanzen werden deren Formparameter bestimmt und mit den Daten in der Wissensbasis verglichen. Die unbekanntem Pflanzen werden einer Klasse in der Wissensbasis zugeordnet. Für diesen Vergleich standen drei Klassifikatoren zur Verfügung.

##### *Minimale Distanz*

Bei der Erkennung nach dem Prinzip der minimalen Distanz wird jeder der in die Analyse einbezogenen Parameter mit den Merkmalswerten der Pflanzen in der Wissensbasis verglichen und die Abweichungsquadrate berechnet und aufsummiert. Für die Erkennung kann jedem Merkmal eine Gewichtung zugeordnet werden, die angibt, welche Distanz eine Objektklasse der Wissensbasis zu der unbekanntem Pflanze haben darf, damit dieses Objekt noch im nächsten Erkennungsschritt berücksichtigt wird. Diese Gewichtung ist für jedes Merkmal variabel einzusetzen, ebenso wie die Anzahl der Erkennungsschritte und deren Reihenfolge. Im letzten Erkennungsschritt erfolgt die Zuordnung zu der Pflanze in der Wissensbasis, deren Merkmalswert der unbekanntem Pflanze am nächsten liegt. Die Klassifizierung von unbekanntem Pflanzen erfolgt auf Grundlage der Wissensbasis mit Hilfe der euklidischen Metrik für  $n$  Fourierdeskriptoren nach folgender Formel:

$$d = \sqrt{\sum_{k=1}^n (A_k - A'_k)^2} < M$$

- $d$ : Distanz  
 $n$ : Anzahl der Fourierdeskriptoren  
 $A_k$ : Amplituden der Fourierdeskriptoren der in der Wissensbasis enthaltenen Pflanze  
 $A'_k$ : Amplituden der Fourierdeskriptoren der zu erkennenden Pflanze  
 $M$ : kleine reelle Zahl

### Fuzzy Logic

Beim Verfahren der Fuzzy Logic werden nicht die Distanzen einzelner Pflanzenarten mit den unbekanntem Pflanzen verglichen, sondern die relative Zugehörigkeit zu einer Unkrautklasse für jedes Merkmal ermittelt. Für einen wissensbasierten Vergleich der Formparameter werden die Mittelwerte der Parameter und deren Varianzen berechnet. Für die Zugehörigkeit unbekannter Pflanzen in die jeweilige Unkrautklasse werden Wahrscheinlichkeiten berechnet. Je näher der Wert eines Parameters der unbekanntem Pflanze am Mittelwert des betrachteten Parameters der in der Wissensbasis vorhandenen Pflanzen bzw. Klassen liegt, desto höher ist der Zugehörigkeitsgrad. Bei einer schrittweisen Vorgehensweise können dabei Klassen anhand ihres geringen Zugehörigkeitsgrades bei einem Merkmal ausgeschlossen werden oder alternativ wird der Mittelwert der Zugehörigkeitsgrade für die Klassifizierung in eine Klasse verwendet. Eine Klasse der Wissensbasis, die für ein Merkmal die Zugehörigkeit von 0 % hat, kann nicht mehr für die Klassifikation verwendet werden, auch wenn die Zugehörigkeit für alle anderen Merkmale sehr hoch ist.

Der Anwender hat die Möglichkeit, die Reihenfolge und Gewichtung der Formmerkmale frei zu wählen. Diese Erkennungsstrategien haben entscheidenden Einfluss auf die Erkennungsgenauigkeit. Ebenso kann bei diesem Verfahren ein Mindestzugehörigkeitsgrad festgelegt werden. Pflanzen, die diesen Zugehörigkeitsgrad unterschreiten, werden als unbekannt klassifiziert.

### Diskriminanzanalyse

Die Diskriminanzanalyse ist ein multivariates Verfahren zur Analyse von Gruppen- bzw. Klassenunterschieden. Mit dieser Methode ist es möglich, mehrere a-priori festgelegte Gruppen unter Berücksichtigung von mehreren Variablen zu untersuchen und zu ermitteln, wie sich diese Gruppen unterscheiden. Auf diese Art und Weise ist es möglich, Wissensbasen zu optimieren und die diskriminatorische Bedeutung einzelner Parameter zu bestimmen. Darüber hinaus ist mit der Diskriminanzanalyse eine *Klassifizierung von unbekanntem Objekten* möglich. Dabei werden Formparameter von neuen Pflanzen aufgrund ihrer Merkmalsausprägung in Gruppen eingeordnet. Die für die Trennung der Unkrautarten oder -klassen berechneten Diskriminanzfunktionen werden hierbei für die Klassifizierung unbekannter Pflanzen herangezogen.

## 5 Ergebnisse und Diskussion

Für einen Vergleich der oben erläuterten Klassifikationsverfahren wurden Pflanzenaufnahmen bzw. deren Parameter verwendet, die unter Praxisbedingungen mit der beschriebenen bispektralen Kamertechnik in unterschiedlichen Kulturpflanzenarten aufgenommen wurden. Die Einteilung in Unkrautklassen orientierte sich ebenfalls an praktischen Erwägungen, es wurde in dikotyle und monokotyle Unkräuter, ein Problemunkraut sowie die auf dem Schlag angebaute Kulturart unterschieden. Hinter dieser einfachen Klasseneinteilung stehen in der Wissensbasis natürlich einzelne Unkrautarten, die für den Klassifikationsprozess zusammengefasst wurden. Für die untersuchten Kulturarten wurden jeweils eigene Wissensbasen angelegt, in denen die in diesen Beständen häufig auftretenden Unkrautarten berücksichtigt wurden. Mit Hilfe der Diskriminanzanalyse wurden die erstellten Wissensbasen vor der Klassifikation untersucht, wobei die Ergebnisse zur Prüfung der Merkmalsvariablen zur Formulierung einer Erkennungsstrategie (Reihenfolge und Gewichtung der Formparameter) nach dem Prinzip der minimalen Distanz oder Fuzzy Logic genutzt wurden. Für die Überprüfung der Güte der jeweiligen Wissensdatenbanken wurden Bilder aus Feldüberfahrten herangezogen, auf denen der Unkrautbesatz (Art und Dichte) zuvor visuell bestimmt worden war. Die Größe der verwendeten Testsets war jeweils > 400 Bilder.

Im Versuch stellte sich heraus, dass zwischen den Klassifikatoren Fuzzy Logic und minimale Distanz nur ein geringer Unterschied in den Klassifikationsergebnissen auftrat, daher wurden die Ergebnisse im Wesentlichen zusammengefasst.

Im Folgenden werden beispielhaft die Klassifikationsergebnisse einiger Testsets mit unterschiedlichen Klassifikatoren dargestellt. Die **Tabellen 1, 2 und 3** belegen, dass mit den Verfahren Fuzzy Logic bzw. minimale Distanz gute Ergebnisse mit Werten zwischen 69 und 88% erreicht wurden. In allen dargestellten Fällen wurde durch die Verwendung des Klassifikators Diskriminanzanalyse eine Steigerung der richtigen Klassifizierungsraten herbeigeführt. Bei über die Arten gemittelten Erkennungsraten zwischen 88 und 99% lagen die Klassifizierungsraten für die einzelnen Klassen in nur einem Fall unterhalb von 90%.

**Tabelle 1:** Klassifizierungsraten in % für Schlag 6 / Zuckerrüben (Aufnahmedatum 27.4.2004, 5,30 ha) über Fuzzy Logic / Diskriminanzanalyse

Erkennungsrate in %	<i>Beta vul- garis</i>	dikotyle Unkräuter	Ungräser	<i>Galium aparine</i>
<i>Beta vulgaris</i>	<b>80 / 90</b>	9 / 0	8 / 2	3 / 8
dikotyle Unkräuter	7 / 1	<b>79 / 72</b>	8 / 16	5 / 11
Ungräser	8 / 0	8 / 0	<b>69 / 100</b>	14 / 0
<i>Galium aparine</i>	5 / 9	4 / 0	14 / 0	<b>77 / 91</b>
Total				<b>77 / 88</b>

**Tabelle 2:** Klassifizierungsraten in % für Schlag 8 / Mais (Aufnahmedatum 21.5.2004, 3,55 ha) über Fuzzy Logic / Diskriminanzanalyse

Erkennungsrate in %	<i>Zea mays</i>	dikotyle Unkräuter	Ungräser	<i>Chenopodium album</i>
<i>Zea mays</i>	<b>81 / 100</b>	5 / 0	7 / 0	6 / 0
dikotyle Unkräuter	10 / 0	<b>73 / 98</b>	4 / 1	14 / 1
Ungräser	7 / 0	9 / 6	<b>74 / 90</b>	10 / 4
<i>Chenopodium al- bum</i>	2 / 0	13 / 11	15 / 0	<b>70 / 90</b>
Total				<b>74 / 94</b>

**Tabelle 3:** Klassifizierungsraten in % für den Schlag Eisenmustal / Winterraps (Aufnahmedatum 15.9.2004, 3,46 ha) über minimale Distanz / Diskriminanzanalyse

Erkennungsrate in %	<i>Brassica napus</i>	dikotyle Unkräuter	Ungräser	<i>Hordeum spp.</i>
<i>Brassica napus</i>	<b>85 / 99</b>	5 / 1	2 / 0	8 / 0
dikotyle Unkräuter	7 / 0	<b>82 / 100</b>	11 / 0	0 / 0
Ungräser	6 / 0	5 / 0	<b>85 / 100</b>	4 / 0
<i>Hordeum spp.</i>	2 / 3	8 / 0	2 / 0	<b>88 / 97</b>
Total				<b>85 / 99</b>

Neben der hohen Klassifizierungsgenauigkeit, die eventuelle Risiken der automatischen Unkrauterkenennung im Praxiseinsatz minimiert, bietet die Diskriminanzanalyse die Möglichkeit der Anpassung der für die Klassifizierung verwendeten Diskriminanzfunktionen an die bestehende Verunkrautungssituation (Artenzusammensetzung und Entwicklungsstadium) sowie die angebaute Kulturart. Hierzu werden direkt aus der verwendeten Wissensbasis die Diskriminanzfunktionen berechnet. Bei einer zuvor durchgeführten Abstimmung der Wissensbasis auf die zu erwartende Unkrautartenzusammensetzung auf dem jeweiligen Schlag wird so jedes Mal eine Optimierung der Erkennungsstrategie vorgenommen, die bei Verwendung der Klassifikatoren Fuzzy Logic oder minimale Distanz so nicht möglich ist.

Präzise Klassifikationsraten in Verbindung mit schneller Bildauswertungssoft- und -hardware führen zu Unkrauterfassungssystemen, die eine direkte Kombination dieser Systeme mit einer Pflanzenschutzspritze, den sogenannten online-Einsatz möglich machen.

## 6 Literatur

- ABOU-NABOUT A. (1993):** Modulares Konzept und Methodik zur wissensbasierten Erkennung komplexer Objekte in CAQ-Anwendungen. Fortschr.-Ber. VDI Reihe 20 Nr. 92
- CHAPRON M., REQUENA-ESTESO M., BOISSARD P., ASSEMAT L. (1999):** A method for recognizing vegetal species from multispectral images. In: Precision Agriculture '99, Proceedings of the 2<sup>nd</sup> European Conference on Precision Agriculture, ed. J.V. Stafford, Sheffield Academic Press Ltd, Sheffield UK, 239-247
- GERHARDS R., SÖKEFELD M., KNUF D., KÜHBAUCH W. (1996):** Kartierung und geostatistische Analyse der Unkrautverteilung in Zuckerrübenschlägen als Grundlage für eine teilschlag-spezifische Bekämpfung. J. Agronomy & Crop Science 176, 259-266
- GUYER D.E., MILES G.E., SCHREIBER M.M., MITCHELL O.R., VANDERBILT V.C. (1986):** Machine vision and image processing for plant identification. Transactions of the ASAE 29 (6), 1500-1507
- PETERSEN B.B., HANSEN P.K., WALTER A.M. (2002):** Weed density estimation from digital images. EWRS 12th Symposium, Wageningen, 416-417
- SÖKEFELD M., GERHARDS R., KÜHBAUCH W. (1996):** Automatische Erkennung von Unkräutern im Keimblattstadium mit digitaler Bildverarbeitung. In: Innovative Verfahren zur Unkrauter-kennung. KTBL Arbeitspapier 236, 47-58
- SÖKEFELD M., GERHARDS R., THERBURG R.-D., NABOUT A., JACOBI J., LOCK R., KÜHBAUCH W. (2002):** Multispektrale Bildanalyse zur Erfassung von Unkraut und Blattkrankheiten. Zeitschrift für Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz, Sonderheft XVIII, 227-233
- YANG C.C., PRASHER S., LANDRY J.-A., RAMASWAMY H. (2003):** Development of an image processing system and a fuzzy algorithm for site-specific herbicide applications. Precision Agriculture 4, 5-18

## **Einführung in die Bewegungsanalyse über automatisches, bildoptisches Markertracking**

### ***Introduction to motion analysis based on automatic optical marker tracking***

Martina Jakob

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

E-Mail: [mjakob@atb-potsdam.de](mailto:mjakob@atb-potsdam.de)

**Zusammenfassung:** Für die Erfassung von Bewegungen mit Hilfe von Markern gibt es unterschiedliche Analysesysteme, die sich in zwei Hauptgruppen gliedern lassen. Das vorgestellte Beispiel basiert auf der bildoptischen Erfassung passiver Marker im Gegensatz zur Gruppe der Online-Verfahren, bei der Markerpositionen über ihre Signale sofort ermittelt werden. Der Prozessablauf für das bildoptische Markertracking, Einsatzmöglichkeiten der Methode an sich in der Landwirtschaft und wichtige Voraussetzungen für den Erfolg werden im Folgenden beschrieben.

**Deskriptoren:** Bewegungsanalyse, Computerbildanalyse

**Summary:** *To investigate motions based on marker tracking, different systems are available. These can be classified into two groups, the active and the passive marker based systems. This presentation is an introduction to the method of automatic optical marker tracking, its implementation for agricultural purposes and names important requirement for a successful analysis.*

**Keywords:** *motion analysis, computerised image analysis*

## 1 Einführung

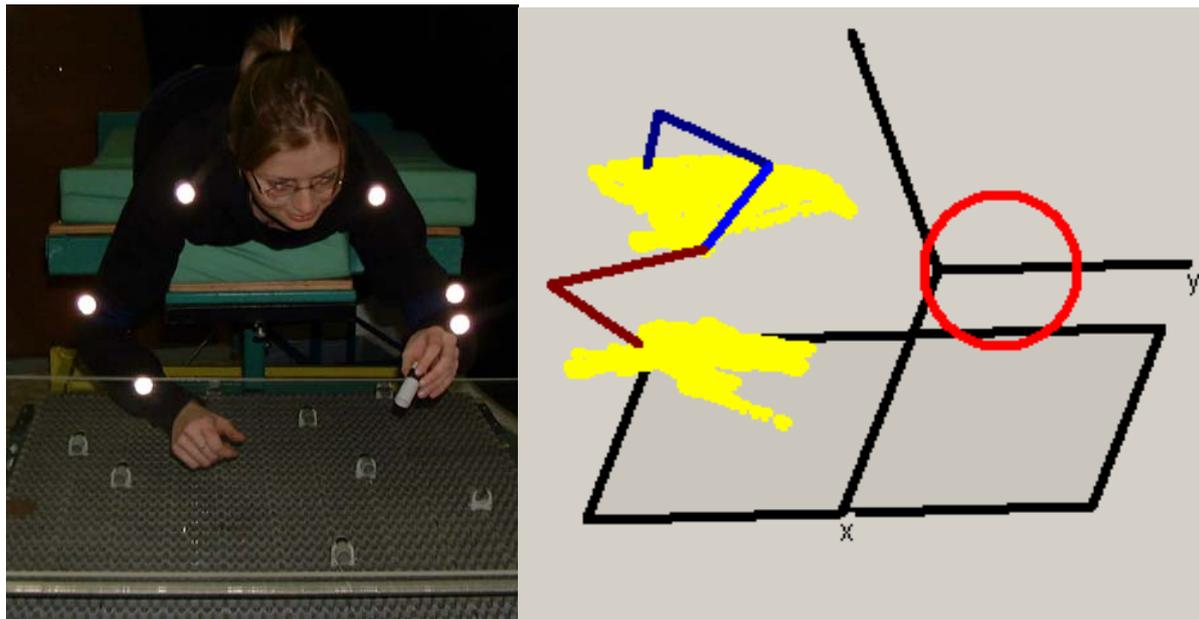
Der Gedanke, Bewegungen über die Erfassung von Bildern genauer zu untersuchen bzw. darzustellen, wurde mit der Erfindung der Fotografie geboren. Serienaufnahmen in möglichst schneller Abfolge, um beispielsweise die Bewegungen von Pferden in einzelne Phasen zu zerlegen, ist eines der ersten dokumentierten Beispiele für diese Methode. Im Zuge des technischen Fortschritts entwickelten sich die reinen Beobachtungsmethoden, über fotografische Aufzeichnungen mit immer höheren Aufzeichnungsfrequenzen bis zur heutigen millimetergenauen Ortung von markierten Körperpunkten im Raum.

Die heute verwendeten Systeme zur Analyse von Bewegungen lassen sich in zwei Gruppen unterteilen, welche sich in der Markierung der verfolgten Punkte unterscheiden. Die Verwendung aktiver Marker in Form von Infrarotleuchtdioden ist die gängigste Methode, aber auch elektromagnetische Ortung oder Ultraschall werden in dieser Gruppe eingesetzt. Das im Folgenden vorgestellte Verfahren basiert auf der Anbringung passiver Marker am Untersuchungsobjekt. Die Lage der Marker wird aus Videoaufzeichnungen über Mustererkennungsalgorithmen bestimmt.

Die Zielstellungen bewegungsanalytischer Untersuchungen können sehr vielfältig sein und finden sich in der Landwirtschaft vor allem in handarbeitsintensiven Bereichen. Beschreibende oder vergleichende Ansätze, um beispielsweise eine günstige Arbeitsplatzgestaltung zu erreichen oder um auf Belastungen zu schließen, wurden bereits veröffentlicht. Die Beantwortung der Fragestellungen ist unabhängig von der gewählten bewegungsanalytischen Methode zu sehen. Hier sind vielmehr die Rahmenbedingungen während der Aufzeichnung als Entscheidungskriterium zu betrachten.

## 2 Methodik des bildoptischen Markertrackings

Für die Aufzeichnung der ausgewählten Körperpunkte werden kugelförmige, retroreflektierende Marker verrutschsicher am Probanden befestigt. Es kann eine beliebige Anzahl an Markern verwendet werden. Die Bewegungsabläufe werden dann, für die Gewinnung von 3-D Raumkoordinaten von mindestens zwei digitalen Videokameras aufgezeichnet. Wichtigste Voraussetzung ist die Sichtbarkeit aller Marker zu jedem Zeitpunkt für beide Kameras. Die Anzahl der Messwerte für jeden Punkt entspricht der Bildrate der eingesetzten Kameras. Die Auswertung erfolgt mit der Software SIMI motion (Fa. SIMI Reality Motion Systems, Unterschleißheim, Deutschland).



**Bild 1** (links): Am Probanden angebrachte Marker durch den Blitz der Kamera erhellt

**Bild 2** (rechts): Strichdarstellung der verbundenen Marker mit kreisförmiger Kopfdarstellung nach bildoptischer Erfassung im Koordinatensystem, Bewegungsspur der Hände im Verlauf

Neben den Bewegungsvideos wird für jede Kamera ein Kalibrierungsvideo erstellt. Für eine räumliche Kalibrierung benötigt man zum einen mindestens zwei Kameras aus unterschiedlichen Perspektiven und zum anderen räumliche Referenzobjekte, Würfel oder Quader in der Größe des Messraumes. Je weiter die erfassten Punkte außerhalb des kalibrierten Raumes liegen, umso ungenauer wird das Ergebnis. Die Positionen der Kameras sind für die Erfassung ohne Bedeutung und können frei gewählt werden, sollten jedoch bei der Verwendung von zwei Kameras in einem Winkel von ca.  $60\text{-}120^\circ$  zueinander stehen.

Grundlage für die Ermittlung der Raumkoordinaten sind die Videoaufzeichnungen, deren Qualität den Zeitaufwand für die Datengewinnung beeinflusst. Die besten Ergebnisse werden erzielt, wenn die Marker kontinuierlich vor einem kontrastreichen Hintergrund aufgezeichnet werden und zusätzlich beleuchtet werden, um die Retroreflexion zu erwirken (**Bild 1**). Die Zusatzbeleuchtung sollte daher jeweils aus der Richtung der Kamera erfolgen.

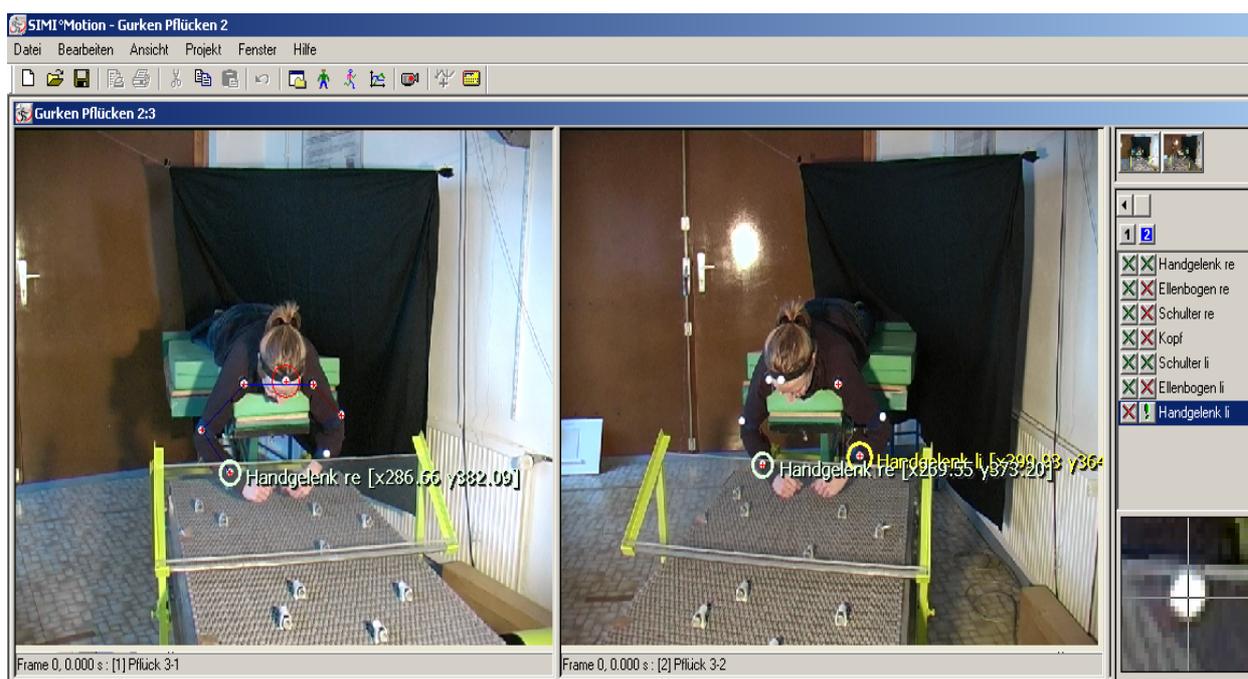
Über die Analysesoftware werden die Markerpositionen aus den aufgezeichneten Videosequenzen ermittelt (**Bild 3**). Die projekteigene Spezifikation benennt diejenigen Punkte, die in der anschließenden Erfassung im Videobild abgetastet werden sollen und ermöglicht bereits in der Auswertung das Verbinden der Marker über Linien.

Für das Markertracking gibt es verschiedene Möglichkeiten. Idealerweise erfolgt es automatisch, wobei die Markerposition jeweils in den Kreismittelpunkt gesetzt wird. Weniger gute Aufzeichnungsqualitäten werden optional im Patternmatching-Modus ausgewertet, der auch automatisch durchlaufen wird. Ist die automatische Auswertung nicht möglich,

können die Markerpositionen manuell bestimmt werden. Das bedeutet jedoch einen hohen Arbeitsaufwand, weil jedes Bild und jeder Punkt sukzessiv abgearbeitet werden müssen.

Wenn ein Marker teilweise verdeckt ist, so muss er nach dem Verschwinden wieder neu gesetzt werden. Fehlende Abschnitte können nach Bedarf interpoliert werden, wobei natürlich die dadurch entstehende Ungenauigkeit bei der Interpretation der Ergebnisse berücksichtigt werden sollte.

Wenn alle Markerpositionen ermittelt sind, können die 3-D-Koordinaten berechnet werden.



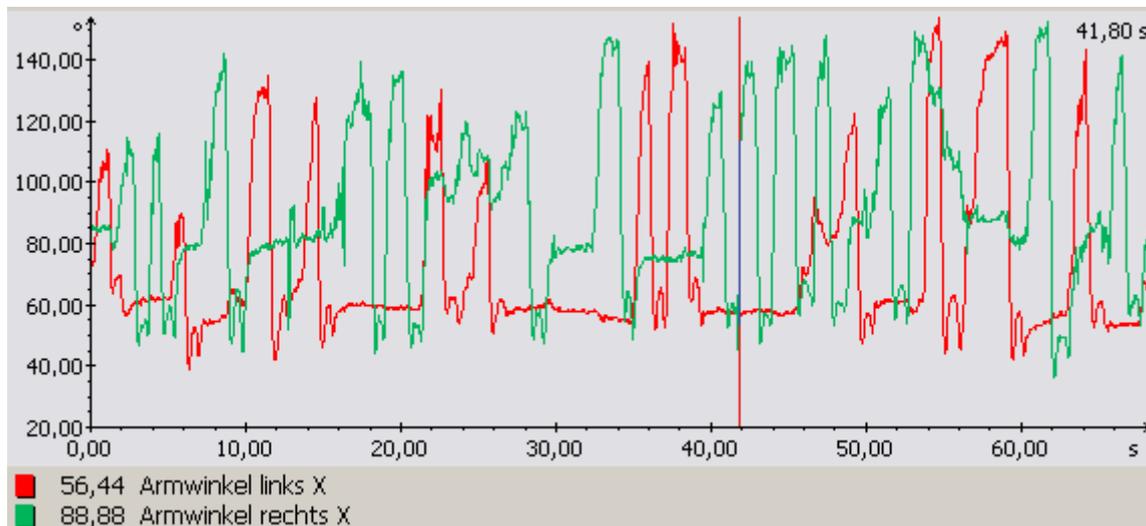
**Bild 3:** Maske für das Markertracking mit „Lupe“ rechts unten

Hat man die Bewegung erfasst, abgespeichert und berechnet, so kann man die Daten analysieren. Grundsätzlich gibt es zwei Möglichkeiten der Auswertung, erstens die subjektive Bewertung anhand der Strichdarstellung und zweitens den Export der Daten in Diagramme, um dann die Kurvenverläufe zu bewerten. Die 3-D-Koordinaten ermöglichen die Berechnung von Indikatoren wie beispielsweise:

- Weg
- Geschwindigkeit
- Winkel
- Abstände zwischen zwei Markern
- Diverse softwareseitig eingerichtete weitere arithmetische Operationen.

Je nach Fragestellung können die Indikatoren beliebig ausgewählt werden.

Für die Ergebnispräsentation ist es möglich, ausgewählte Diagramme, Video- oder Strichsequenzen als Animation zu extrahieren (**Bild 2** und **4**). Die Visualisierung und gleichzeitige Darstellung der Ergebnisse sind als großer Nutzen zu betrachten.



**Bild 4:** Winkelverläufe der Arme bei der Ernte von Gurken, die zum Zeitpunkt 41,8s gemessenen Winkel sind unter dem Diagramm dargestellt

### 3 Anwendungen in der Landwirtschaft

Während sich die Bewegungsanalyse im Bereich der Medizin oder im Sport als anerkannte Methode etabliert hat, sind bisher nur wenige Anwendungen im Bereich der Landwirtschaft publiziert worden. Besonders dort, wo noch viele Arbeiten von Hand erledigt werden, z.B. im Gartenbau oder aber bei Tätigkeiten, die für die Arbeitskräfte große oder ungünstige Belastungen darstellen, lässt sich eine Bewegungsanalyse als objektive Bewertungsmethode auch in der Landwirtschaft einsetzen. Sie kann weiterhin bisher angewandte Methoden, die auf subjektiver Bewertung beruhen, ersetzen.

Bereits erfolgt sind Untersuchungen an der Schnittstelle zwischen Mensch und Maschine, z.B. bei der Auflage von Produkten auf Förderbänder (JAKOB & GEYER 2006b). Im Rahmen einer Diplomarbeit wurde ein modifizierter Liegeplatz eines Gurkenfliegers bewegungsanalytisch untersucht (RULLMANN 2003, JAKOB *et al.* 2003).

Der Arbeitsplatzgestaltung werden in der Regel Gestaltungsnormen zugrunde gelegt. In der Landwirtschaft finden sich jedoch häufig Arbeitsplätze, für die es keine Regelwerke gibt, so auch bei der auf dem Bauch liegenden Ernte von Gurken oder für Sitzplätze, die Arbeiten in Bodennähe erleichtern sollen. Verschiedene Sitzplätze auf Spargelerntehilfen wurden ebenfalls bewegungsanalytisch untersucht und bewertet (JAKOB *et al.* 2003). REID

und andere (1985) setzten ein Menschmodell (SAMMIE) ein, um die Bewegungsbahnen von Traktorfahrern bei unterschiedlichen Arbeitsaufgaben zu berechnen.

Neben der Optimierung von Arbeitsplatz und Arbeitsablauf ist die Bewegungsanalyse auch interessant, um die Intensität und Wirksamkeit unterschiedlicher Arbeitskräfte im Prozess zu ermitteln. Im Bereich der repetitiven und kurzzyklischen Tätigkeiten finden wir in der Praxis große Leistungsunterschiede, welche eine prospektive Zeitplanung erschweren. Über einen subjektiv ermittelten Ausgleichsfaktor (z.B. den Leistungsgrad nach REFA) werden diese Leistungsunterschiede zum Teil nivelliert. Sie lassen sich aber auch über bewegungsspezifische Parameter quantifizieren (JAKOB & GEYER 2006a).

Die Beobachtung von Tieren war eines der ersten Betätigungsfelder für Bewegungsanalysen, sie ist aber für die Landwirtschaft auch heute noch aktuell. So stellte BERK auf dem ersten Computerbildanalyse-Workshop 1995 die Thematik der Erfassung von Tierbewegungen im Haltungsbereich vor. Um Fressplätze im Milchviehbetrieb tiergerechter zu gestalten, setzten GEORG & OBERDELLMANN 1999 ein Bewegungsanalysesystem ein.

#### **4 Diskussion**

Bei der Bewegungsanalyse handelt es sich um eine vom Beobachter unabhängige automatische Datenerfassung. Die Ermittlung von Indikatoren auf der Basis der 3-D-Raumkoordinaten ermöglicht eine objektive und umfassende Bewertung von Bewegungen jeder Art. Im Gegensatz zu gängigen Methoden des Arbeitsstudiums, wie beispielsweise Zeitstudien oder Körperhaltungsanalysen, können mehrere Parameter gleichzeitig erfasst werden, so dass die Variation zwischen mehrfach untersuchten Arbeitsabläufen als Einflussfaktor auf das Ergebnis ausgeschlossen wird.

Die Methode lässt sich im realen Arbeitsprozess einsetzen, solange es sich um ortsfeste Arbeitsplätze handelt.

Die Entscheidung, welche Methode (aktive oder passive Marker) angewandt werden sollte, ist von einer Vielzahl von Faktoren abhängig und für jeden Einzelfall zu treffen. Professionelle Anwender setzen in der Regel beide Varianten ein. Bei den auf aktiven Markern basierenden Verfahren sind sofort Ergebnisse präsent, während das bildoptische Markertracking im Anschluss an die Messungen vorzunehmen und unter Umständen sehr zeitaufwändig ist. Die Videoanalyse kann auf der anderen Seite Unregelmäßigkeiten in den Ergebnissen erklären und ist eine wertvolle Dokumentation der aufgezeichneten Prozessabläufe.

Die möglichen Einsatzbereiche der Bewegungsanalyse sind somit breit gefächert. Gute grafische Darstellungsmöglichkeiten machen die Übertragung der Ergebnisse in die Mitarbeiterschulung und andere Beratungstätigkeiten möglich. Die geringe Einflussnahme der Methode auf die Messergebnisse erlaubt die Übertragung der Ergebnisse auf die reale Arbeitssituation bzw. den direkten Praxiseinsatz. Eignung von Mitarbeitern, Einarbeitungs-

defizite oder Schulungserfolge können ebenfalls über eine Bewegungsanalyse dargestellt werden. Insgesamt sind die Voraussetzungen für den Transfer des erlangten Informationszuwachses in die Praxis als gut zu bezeichnen.

## 5 Literatur

- BERK J. (1995):** Analyse der Tierbewegungen im Haltungsbereich. Bericht über den Workshop zum Thema Anwendung der Computer-Bildanalyse in der Landwirtschaft am 9. Mai 1995 im ATB Potsdam-Bornim, S. 21
- GEORG H., OBERDELLMANN P. (1999):** Online-Motografie zur Bewegungsanalyse von Fressvorgängen bei Milchkühen. Landtechnik 54: 344-345
- JAKOB M., GEYER M., TISCHER S. (2003):** Evaluation of different harvesting aids for white asparagus, Proceedings of the XVth Triennial Congress of the International Ergonomics Association, Seoul, Korea
- JAKOB M., RULLMANN M., GEYER M., KLEISINGER S. (2003):** Liegend auf dem Gurkenflieger, Gemüse, 39. Jahrgang, Oktober
- JAKOB M., GEYER M. (2006a):** Indicators for objective determination of internal performance factors during postharvest operations, Int. J. Postharvest Technology and Innovation, Vol. 1, No. 1, pp. 121-132
- JAKOB M., GEYER M. (2006b):** The Influence of Machine Speed on Human Work Performance for Simple and Highly Repetitive Work Processes: A pilot study. Manuscript MES 05 005. Vol. VIII. February
- REID C.J., GIBSON S.A., BONNEY M.C., BOTTOMS D. (1985):** Computer simulation of reach zones for the agricultural driver. Proceedings of the 9<sup>th</sup> Congress of the International Ergonomics Association, 2.-6.9., Bournemouth, UK
- RULLMANN M. (2003):** Elektromyografischen Untersuchung der liegenden Arbeitshaltung bei der manuellen Ernte von Einlegegurken. Diplomarbeit an der Universität Hohenheim, Institut für Agrartechnik, Fachgebiet Verfahrenstechnik für Intensivkulturen, Prof. Dr. S. Kleisinger

## Probleme des Einsatzes von Robotern zur selektiven Ernte von Pflanzen und Pflanzenteilen

### *Problems using robotic systems for harvesting of plants or parts of plants*

Thomas Rath, Marco Kawollek  
Universität Hannover, Institut für Biologische Produktionssysteme,  
Fachgebiet Biosystem- und Gartenbautechnik

**Zusammenfassung:** Anhand der Ernte von *Gerbera jamesonii* Blütenstielen werden Problembereiche der autonomen bildanalytisch gestützten Ernte dargestellt. Folgende Haupt-Problembereiche wurden deutlich: 1. Segmentierung von Pflanze und überlappenden Blütenstiele. 2. Laufende Kalibrierung der Gesamtanlage. 3. Entwicklung eines Roboteraktors und die kollisionsfreie Ansteuerung des Roboters im Raum.

**Deskriptoren:** Robotersteuerung, Bildverarbeitung, automatische Ernte, Überlappungsproblem

**Summary:** *On the basis of harvesting *Gerbera jamesonii* problems are represented considering autonomous vision-based supported harvest. The following main problem areas became clear: 1. Segmenting of plant and overlapping flower stems. 2. Current calibration of the whole experimental device and system. 3. Development of a robot actuator and the collision-free control of the robot in the 3-dimensional space.*

**Keywords:** *robot control, image processing, autonomous harvest, overlap problem*

## 1 Einleitung

Ein gerade abgeschlossenes Forschungsprojekt über die modellgestützte Steuerung von Robotern zur autonomen Ernte von Gerberablüten bietet eine gute Möglichkeit, zusammenzufassen, in welchen Bereichen grundsätzliche Probleme beim bildgestützten autonomen Robotereinsatz zur selektiven Ernte bestehen. Prinzipiell lässt sich die bildgestützte Roboterernte dabei in folgende Bereiche aufteilen:

1. Bildanalyse (häufig Trennung von Objekt und Hintergrund mit anschließender Analyse der zu selektierenden Objekte oder Objektteile)
2. Berechnung der Ernteobjekte im Raum
3. Ansteuerung eines Roboteraktors, der kollisionsfrei entsprechende Objekte erntet.

Diese drei Schritte lassen sich nicht immer vollständig autonom verwirklichen, so dass Fehler und Probleme entstehen, die den Ernteerfolg reduzieren oder sogar den gesamten Robotereinsatz in Frage stellen. Im nachfolgenden Artikel sollen am Beispiel der Ernte von Gerberablütenstielen diese Probleme beschrieben werden.

Folgende Problembereiche lassen sich identifizieren:

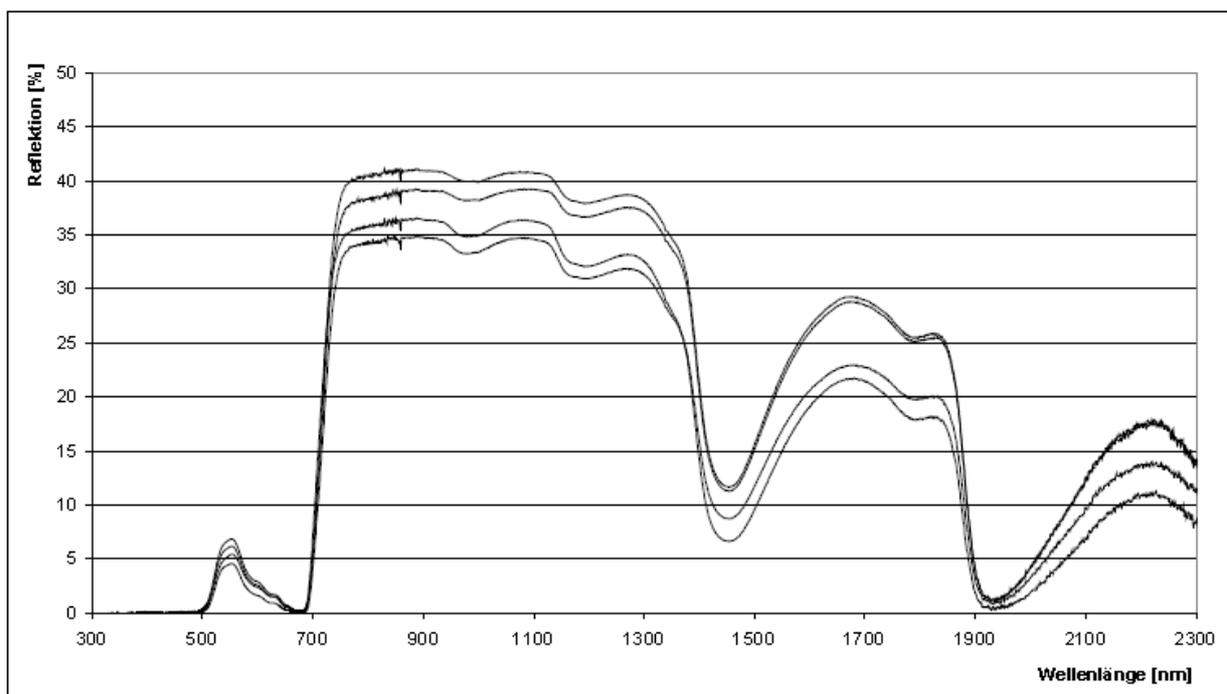
1. Kameras und Belichtung
2. Anwendung und Einsatz eines vereinfachten Lochkameramodells Triangulation und Epipolarebenegeometrie
4. Kalibrierungen und Koordinatentransformationen Bildanalytische Segmentierung der Ernteobjekte
6. Generierung eines Gesamtmodells für Ernteobjekt, Roboter, Transferstrecke und sonstige Hindernisse
7. Die Entwicklung geeigneter Ernteaktoren und deren Ansteuerung im Raum

## 2 Diskussion der einzelnen Problembereiche

### 2.1 Kameras und Belichtung

Prinzipiell lassen sich pflanzliche Objekte gut durch den Einsatz von Infrarotfiltern von Hintergründen differenzieren (siehe hierzu **Bild 1**). Hat man es mit gänzlich künstlicher Beleuchtung zu tun, vereinfacht dieses das Problem, da die Lichtquelle homogen und den jeweiligen Bedürfnissen angepasst werden kann. Trotzdem entstehen durch Reflexionen und IR-sensitive Materialien (z.B. Gerätebauteile) Fehlwiedergaben in den auszuwertenden Bildern, die in dem hier beschriebenen Fall selbst durch die totale Abschottung der Versuchsanlage vom natürlichen Außenlicht nicht behoben werden konnten. Diese Fehlwiedergaben mussten in einem nächsten Schritt mühsam durch Bildverarbeitung wieder entfernt werden und stellten prinzipiell Fehlerquellen dar. Darüber hinaus war die zuerst installierte Halogenbeleuchtung für eine angemessene Ausleuchtung der Szenerie viel zu schwach, so dass leistungsstarke Metallhochdruckdampflampen eingesetzt werden muss-

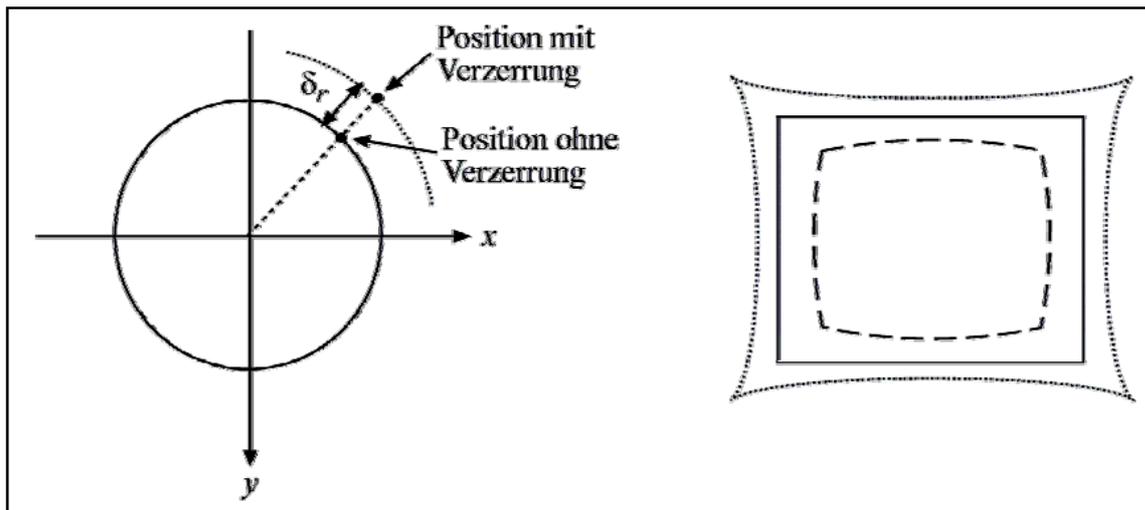
ten. Durch die entsprechend Verschaltung ließ sich hiermit eine über die Zeit relativ einheitliche Beleuchtungsstärke erzielen.



**Bild 1:** Reflexion von vier verschiedenen Gerberablättern in Abhängigkeit von der Wellenlänge. Man erkennt gut den hohen Reflexionsanteil im nahen Infrarotbereich

## 2.2 Anwendung und Einsatz des vereinfachten Lochkammermodells

Zur Berechnung der Bilder wurde ein vereinfachtes Lochkammermodell eingesetzt, bei dem die Kamera durch sogenannte interne Kameraparameter dargestellt wird. In der hier vorgestellten Arbeit zeigte sich, dass dieses einfache Lochkammermodell unzureichend war, da die Kameras radiale Verzerrungen aufwies, die besonders bei den Bildern zum Rand hin erhebliche Abweichungen vom berechneten zum tatsächlichen Bild verursachten. Besonders bei Kalibrieraufgaben war eine Nichtbeachtung der Randverzerrungen von Kameras, Objektiven und Filtern ein großes Problem. Ausgleichsrechnungen konnten dieses Defizit reduzieren, sie behoben es in der Regel aber nicht vollständig, da die Verzerrungen von komplexer Natur waren (siehe auch **Bild 2**).



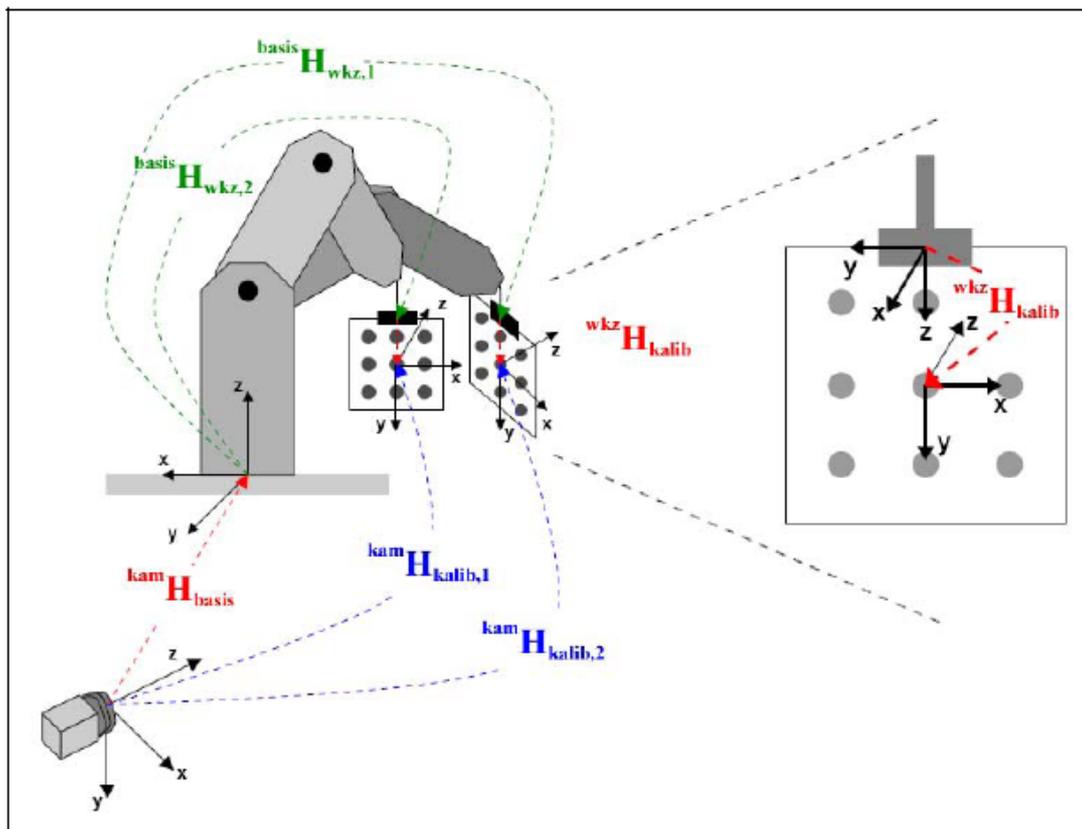
**Bild 2:** Auswirkungen radialer Verzerrungen (verändert nach WENG *et al.* 1992)

### 2.3 Triangulation und Epipolarebenegeometrie

Zur Bestimmung der Objektpositionen im Raum wird häufig das Triangulationsverfahren eingesetzt. Gleichzeitig wird die Suche nach zusammengehörigen Punkten mit sogenannten Epipolarebenen durchgeführt. Hierbei wird in dem korrespondierenden Bild jeweils nur auf der durch das Objekt im Originalbild verlaufenden Epipolarlinie nach den Punkten des jeweiligen Objektes gesucht. Dieses in der Theorie simple Verfahren wird in der Praxis dadurch erschwert, dass häufig korrespondierende Punkte von unterschiedlichen Objekten auf der gleichen Epipolarlinie liegen und somit nicht mehr differenziert werden können. In dem vorliegenden Erntefall war dieses besonders schwierig, wenn viele Blütenstiele nahe beieinander lagen und dadurch die Zuordnung der Objekte von der linken Kamera in der rechten Kamera nicht mehr oder nur unzureichend gelang. Durch eine automatische Drehung der Objekte (insgesamt 8 Aufnahmen aus unterschiedlichen Positionen) konnte dieses Defizit vermindert werden. Es war dabei zu beachten, dass sich durch die Drehungen die Stellungen der Objekte (Blütenstiele) nicht verändern durften. Dieses war bei flexiblen Pflanzenteilen, die immer auf Bewegung reagieren, fast unmöglich, so dass hier erneut das Problem der fehlenden Zuordnung auftauchte.

### 2.4 Kalibrierungen und Koordinatentransformationen

Wesentlicher Faktor zum Gelingen von autonomen bildanalytisch gesteuerten Roboter-einsätzen im Gartenbau sind die durchzuführenden Kalibrierungen. Da vor Beginn der Arbeiten weder die genauen Koordinatensysteme der Kameras, der Robotergelenke, der gesamten Versuchseinrichtung und des Roboteraktors bekannt sind, müssen diese über entsprechende Prozeduren so genau wie möglich festgelegt werden (siehe hierzu auch **Bild 3**). In der hier beschriebenen Arbeit wurden die



**Bild 3:** Schematische Darstellung der Konfiguration für die Auge-Hand-Kalibrierung mit den beteiligten Koordinatensystemen

Kalibrierungsarbeiten mit Hilfe eines sogenannten Bündelausgleichsverfahrens durchgeführt (siehe hierzu auch KAWOLLEK & RATH 2001). Trotzdem war zu beachten, dass schon kleinste Temperaturschwankungen direkt Ungenauigkeiten hervorriefen, da durch Ausdehnung einzelner Bauteile Verschiebungen stattfanden. Somit war die einzige sinnvolle Lösung, Kalibrierungsarbeiten laufend in die Robotertätigkeiten zu integrieren. Dieses wurde in der hier beschriebenen Arbeit entsprechend durchgeführt, so dass die Kalibrierungsungenauigkeiten auf ein Minimum reduziert werden konnten.

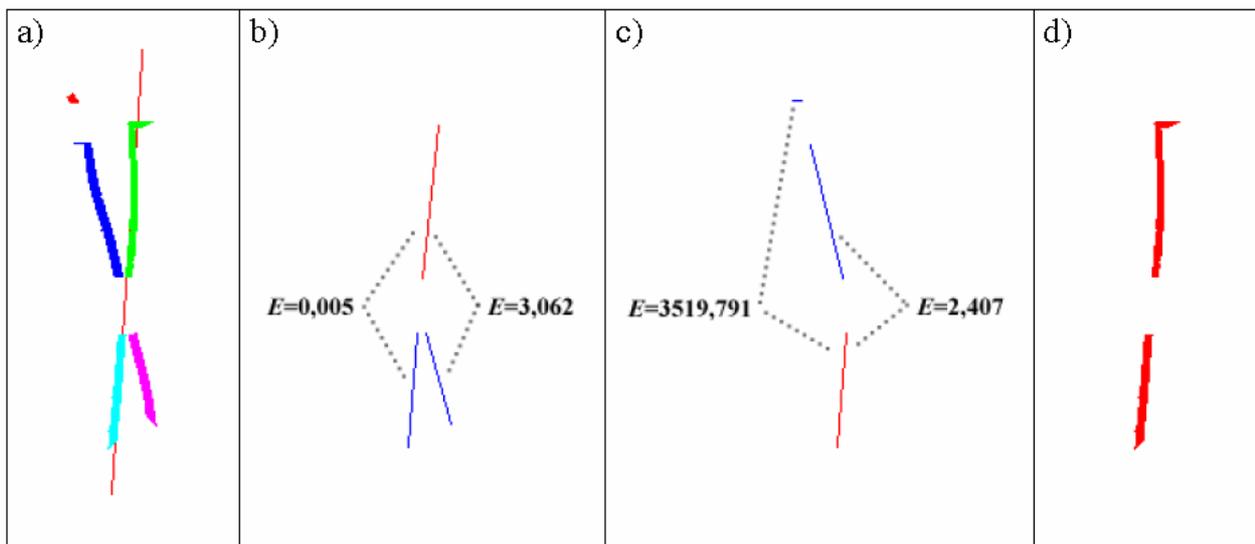
## 2.5 Bildanalytische Segmentierung der Ernteobjekte

Wesentliche Aufgabe bei der bildanalytischen Steuerung von Ernterobotern ist die Segmentierung und Ortung der zu erntenden Objekte. In dem vorliegenden Fall traten dabei folgende Probleme auf:

- Differenzierung zwischen Pflanze und Störobjekten
- Differenzierung zwischen Blütenstiel und Blüte und Restpflanze
- Separierung einzelner Stiele auch bei Überlappung der Blütenstiele

Das erste Problem konnte durch den Einsatz von IR-Filtern (s.o.) und durch die bildanalytische Auswahl von Flächen über einer bestimmten Pixelgröße gelöst werden. Das zweite

Problem konnte im Wesentlichen durch den Einsatz von morphologischen Bildanalyseoperatoren nach dem in RATH (1996) beschriebenen Verfahren gelöst werden. Das größte Problem stellte jedoch die Segmentierung der Blütenstiele dar, da sie zum Teil überlappen. Prinzipiell wurde das Problem gelöst, indem zuerst alle Blütenstielen in Einzelteile (ohne Kreuzungspunkte) vereinzelt wurden. In einem nächsten Schritt wurden mit Hilfe der Hough-Transformation und mit einem Linienverfolgungsalgorithmus' die Teile wieder zusammengesetzt, die am wahrscheinlichsten zu einem Blütenstiel gehörten (siehe hierzu auch **Bild 4**).



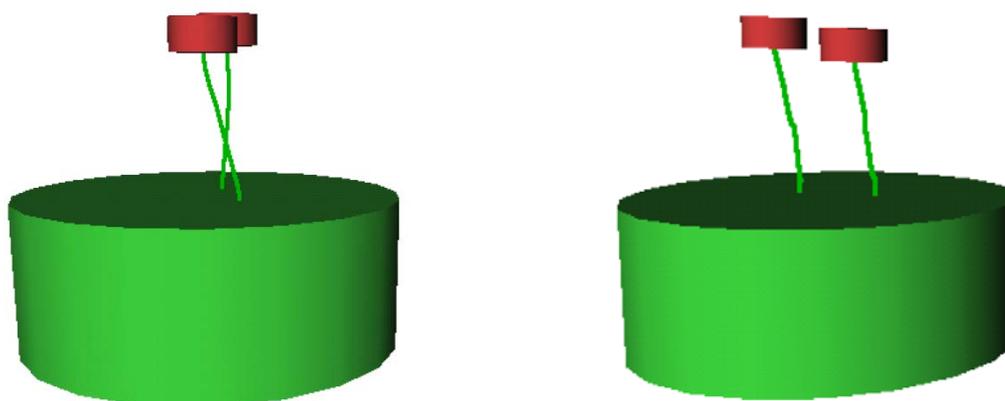
**Bild 4:** Bestimmung zusammengehöriger Segmente mittels Hough-Transformation (a) und Linienverfolgung (b), (c). (d) zeigt die zusammengehörigen Blütenstielteile.

Mit Hilfe des so entwickelten Algorithmus konnten Stielerkennungen von 74% (bei einer Aufnahme) verwirklicht werden.

## 2.6 Generierung eines Gesamtmodells für Ernteobjekt, Roboter, Transferstrecke und sonstige Hindernisse

**Bild 5** zeigt für eine zweiblütige Beispießpflanze das entwickelte Modell, mit dem der Ernteroboter angesteuert wurde. Die Pflanze und die Blüten wurden dabei als einfache Zylinder modelliert, die Stiele als gekrümmte langgezogene Zylinder.

Der Roboter selbst und die Transportstrecke wurden aus entsprechenden geometrischen Objekten zusammengesetzt.

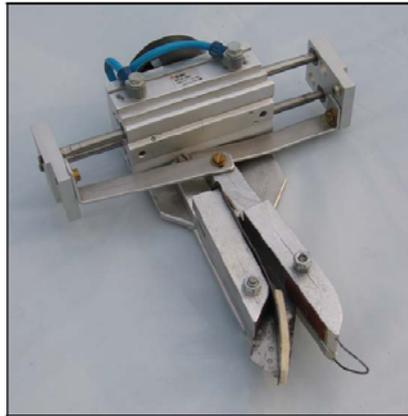


**Bild 5:** Gerberablütenstielmodell aus unterschiedlichen Betrachtungswinkeln

Es ist zu beachten, dass diese Modelle letztendlich aus dem Zusammenspiel von folgenden Arbeitsschritten bzw. Teilmodellen resultierten: Komponenten der Versuchsanlage aus Vermessung, Gerberamodell aus der Bildverarbeitung, Robotermodell aus Herstellerangaben, relative Position des Roboters aus der Systemkalibrierung, relative Position der Kameras aus Systemkalibrierung und die Lage und Orientierung des Weltkoordinatensystems aus der Kalibrierung. Das bedeutete, wenn in einem der aufgeführten Systeme ein Fehler entstand, wurde das Gesamtmodell ungenau, fehlerhaft und in der Regel für die automatisierte Ernte unbrauchbar. In der vorliegenden Arbeit konnte in 97% der Fälle ein korrektes Gerberamodell erstellt werden, in dem die Blütenstiele richtig positioniert waren (jeweils unter Verwendung von 8 Aufnahmen aus verschiedenen Positionen und Einsatz unterschiedlicher Gerberasorten).

## 2.7 Die Entwicklung geeigneter Ernteaktoren und deren Ansteuerung im Raum

Prinzipiell sind eine Menge Roboteraktoren auf dem Markt verfügbar. Für spezielle Arbeiten, wie zum Beispiel der Ernte von Gerberablütenstielen, müssen demgegenüber spezielle Aktoren entwickelt werden. **Bild 6** stellt den entwickelten Aktor dar. Um diesen Aktor fehlerfrei und ohne Kollision zur berechneten Erntestelle zu bewegen, musste eine Pfadplanung erfolgen, bei der die Bewegung der einzelnen Gelenke ausgerechnet und angesteuert wurde. Dieses Problem der automatischen Pfadplanung war um so schwieriger, je filigraner das zu erntende Objekt und damit die Ernteposition war. In der vorliegenden Arbeit konnte zur Bestimmung der notwendigen Gelenkstellungen und zur kollisionsfreien Pfadplanung die



**Bild 6:** Pneumatischer Roboteraktor zum Schneiden und Festhalten der Gerberastiele (Eigenentwicklung, Prototyp)

MicroB-Bibliothek (IREQ 2004) und die MPK-Bibliothek (Motion Planning Kit) (STANFORD UNIVERSITY 2004) verwendet werden. Hiermit war es möglich, in der überwiegenden Anzahl der Erntevorgänge kollisionsfreie Bewegungspfade zu generieren. Als ein weiteres Problem stellte sich heraus, dass der eigentliche Schnittpunkt der Stiele mehr oder weniger innerhalb der Gerberapflanze lag und somit von den Kameras nicht erfassbar war. Ein heuristischer Algorithmus musste daher entwickelt werden, der „blind“ einen gewissen Versatz der berechneten Ernteposition nach unten in Richtung des Stielverlaufes kalkulierte. Insgesamt konnten mit den entwickelten Verfahren Ernteraten von 98% (bei 1 bis 2 Stielen pro Pflanze) und 50% (bei 5 und mehr Stielen pro Pflanze) erzielt werden. Hierbei wurde keine Erntereifeerkennung (z.B. wie in der Arbeit von AJWANG, 2000 beschrieben) vorgeschaltet, so dass im Vergleich zu Praxisbedingungen sehr viele Stiele von einer Pflanze gleichzeitig zu ernten waren.

### 3 Bewertung und Fazit

Die beschriebenen Probleme und Problembereiche betrafen ca. 5 bis 10% der Ernte. Um diese Fehler auszuschalten, wäre ein immenser Mehraufwand notwendig, dessen Größe nicht abschätzbar ist. In vielen Erntebereichen (so auch in dem vorliegenden Fall) ist eine 100%ige fehlerfreie automatische Ernte nicht notwendig, da noch per Hand nachgeerntet werden kann oder die Ernte in einem nachfolgenden Erntevorgang erneut automatisch durchgeführt werden könnte. Somit bleibt festzuhalten, dass trotz einiger Probleme und Erntefehler eine robotergestützte Ernte auch von komplexen gartenbaulichen Produkten möglich ist. Die Erstellung und Realisierung der notwendigen Algorithmen ist jedoch aufgrund der starken Spezifität mit hohem Arbeitsaufwand verbunden und wird wahrscheinlich in näherer Zukunft nicht von privaten Investoren getätigt werden können.

#### 4 Literatur

**AJWANG P. (2000):** Computer Vision for Detection of Cut Flower Maturity. MSc-Thesis. University of Hannover, Institute for Biosystem- and Horticultural Engineering, unpublished

**IREQ (2004):** Homepage MICROB (Module Intégrés de Contrôle de ROBots),  
<http://www.robotique.ireq.ca/microb/en/index.html>, 28.09.2004

**KAWOLLEK M., RATH T. (2001):** Stereobildanalyse zur Robotersteuerung bei Arbeiten an der Pflanze. Gartenbautechnische Informationen, Heft 53 / Bornimer Agrartechnische Berichte, Heft 26, S. 33-41, Institut für Technik in Gartenbau und Landwirtschaft, Universität Hannover / Institut für Agrartechnik Bornim, Potsdam-Bornim

**RATH T. (1996):** Computerbildanalyse gartenbaulicher Objekte mit morphologischen Operatoren. Bornimer Agrartechnische Berichte, Heft 11, S. 37-49, Institut für Agrartechnik Bornim e.V., Potsdam-Bornim

**STANFORD UNIVERSITY (2004):** Homepage MPK (Motion Planning Kit)  
<http://robotics.stanford.edu/~mitul/mpk/>, 28.09.2004

**WENG J., COHEN P., HERNIOU M. (1992):** Camera Calibration with Distortion Models and Accuracy Evaluation. IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence, 14 (10): 965-980

## **Ableitung von Materialeigenschaften aus Bildern von Seafood-Produkten**

### ***Determination of material properties from images of seafood-products***

Michael Kroeger

Bundesforschungsanstalt für Ernährung und Lebensmittel, Forschungsbereich Fischqualität,  
Palmaille 9, 22767 Hamburg

E-Mail: michael.kroeger@it.bfa-fisch.de

**Kurzfassung:** Die Qualität von Seafood-Produkten wird stichprobenartig durch sensorische, chemische und physikalische Untersuchungen ermittelt. Wesentlicher Qualitätsparameter ist die Frische, mit deren Änderung eine Variation der elastischen Eigenschaften des Muskelgewebes gekoppelt ist. Mit sensorischen Tests wie der Qualitäts-Index-Methode wird diese von Experten durch mechanische Berührung der Probe abgeschätzt. Mittels Texture Analyzer lässt sich die elastische Steifigkeit der Probe im Labor messen. Dazu wird ein Stempel mit definierter Fläche mehrfach unter einer konstanten Kraft in das Gewebe gedrückt und die Deformationstiefe gemessen. Elastische Materialdaten werden aus der Kraft, der Stempelfläche und der Deformation abgeleitet. Vergleichbare Daten lassen sich durch eine Analyse von Oberflächenmustern aus digitalen Bildern gewinnen. Der dafür notwendige Bildausschnitt auf dem Muskelgewebe entspricht ungefähr der Größenordnung der beim Texture Analyzer verwendeten Stempelfläche von etwa 10 mm x 10 mm. Innerhalb des Bildes wird für jeden Bildpunkt die mittlere Orientierung des Musters innerhalb einer kleinen Umgebung um jeden Punkt ermittelt. Basis ist der Strukturtensor, aus dessen Eigenwertanalyse die lokale Orientierung und ein lokales Bestimmtheitsmaß berechnet wird. Die lokale Elastizität des Gewebes wird durch das lokale Arrangement von Muskelfasern erklärt. Eine Orientierungsanalyse von digitalen Bildern liefert einen Zugang zum lokalen Arrangement und damit zu lokalen elastischen Eigenschaften.

Zur Ermittlung von elastischen Materialeigenschaften des Probe werden digitale Bilder vom Muskelgewebe als elastische Membranen modelliert und deren lokale Steifigkeiten aus den Eigenwerten der lokalen Orientierungsanalyse berechnet. Pixelmittelpunkte der digitalen Bilder werden als Stützstellen der diskreten Membrangleichung gewählt. Auf jeden Punkt lässt man eine konstante virtuelle Kraft wirken, welche die Membranfläche deformiert. Deformationsparameter aus statischen Analysen liefern elastische Kennwerte der Probe. Abhängigkeiten der elastischen Materialgrößen von der Lagerzeit werden durch temporäre statische Analysen der Membrangleichung zu den entsprechenden Orientierungsdaten modelliert.

**Deskriptoren:** Elastizität, Mustererkennung, Fischqualität

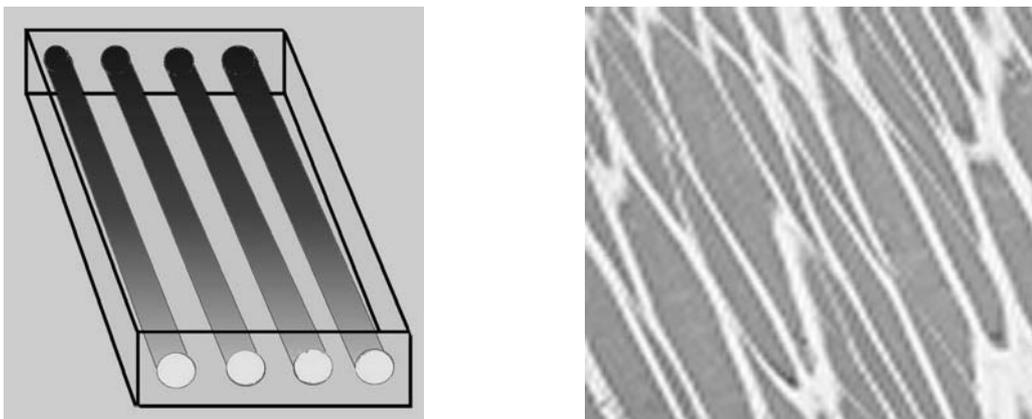
**Summary:** *The quality of Seafood products is investigated by sensory, chemical and physical examinations of sample-tests. Freshness is an essential quality parameter whose variations are assigned with a variation of elastic qualities of the muscle tissue. Experts classify elastic properties with sensory tests like the quality index method by a mechanical touch of the sample. By using a Texture Analyzer the stiffness of the sample can be measured in a laboratory. The Texture Analyzer uses an indenter for distortion of the tissue and measures the distortion depth under a constant force. Elastic material data are derived from the force, the indenter area and the deformation depth. Comparable data can be obtained from digital images by an analysis of surface patterns. The necessary inspection window for muscle tissue corresponds to approximately the indenter area of about 10 mm x 10 mm. For all the pixels of the digital image the mean orientation of the pattern is determined within a small neighborhood based on the structure tensor and the assigned eigenvalues. The local elasticity of the tissue is modeled by the local arrangement of muscle fibers. An orientation analysis of digital images gives a link to the local arrangement of muscle fibers and to local elastic properties.*

*For investigation of elastic properties of fish samples, digital images from tissue are modeled as an elastic membran. Local stiffness is calculated from the eigenvalues of the local orientation analysis. The centre of the pixels are used as node for the discrete membran equation. On every node a constant virtual force is acting and deforming the membran. Deformation parameters from a static analysis gives elastic characteristics of the sample. Variations of the elastic material quantities by storage time are modeled by temporary static analyses of the membrane equation for the corresponding orientation data.*

**Keywords:** *elasticity, pattern recognition, fish quality*

## 1 Einleitung

Das Auslesen des Alterungszustandes aus Oberflächenbildern vom Muskelgewebe hat sich als praxisnahe Methode zur Qualitätserkennung gezeigt (KROEGER 2003). Mikromuster des Muskelgewebes werden durch Orientierungsanalysen klassifiziert, deren Grundlage das lokale Arrangement von Muskelfasern bildet. Die Mikromuster sind von der Wellenlänge des eingestrahlteten Lichts abhängig. Alterungsvorgänge lassen sich nur durch eine hinreichende Anzahl spektroskopisch signierter Bilder simulieren (KROEGER *et al.* 2005). Von weiterem praktischen Interesse ist das Auslesen von Materialeigenschaften aus Bildern. Auch hierfür bildet das lokale Arrangement von Muskelfasern eine Basis, deren Muster sich mit den Eigenwerten des Strukturtenors klassifizieren lassen (JÄHNE 1997). Die lokale Kohärenz hat sich als ein geeigneter Koppelparameter für die lokale Steifigkeit erwiesen. Mit ihr lässt sich das Muskelgewebe als lokales Faser-Matrix-System modellieren (**Bild 1**).



**Bild 1:** Modell des Faser-Matrix-Systems (links) und ein Gewebeschnitt vom Muskelfleisch der Scholle *Pleuronectes platessa*

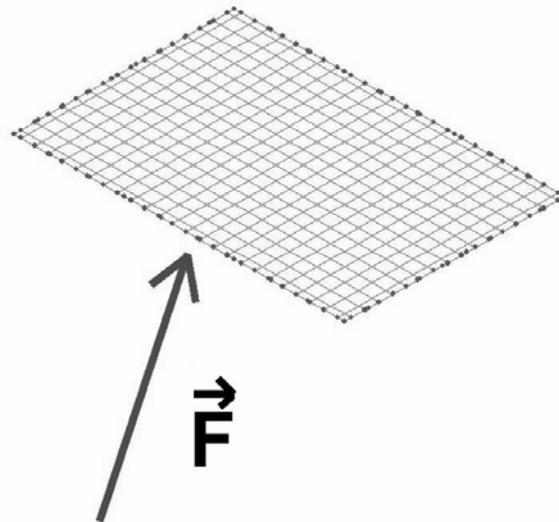
Die lokalen Orientierungen geben die lokalen Richtungen der Muskelfasern an und liefern ein orthotropes System mit unterschiedlichen lokalen Steifigkeiten in Faserrichtung und senkrecht dazu. Die allgemeinen elastischen Gleichungen, die einen Zusammenhang zwischen Spannungen und Dehnungen beschreiben, lassen sich mit 9 unabhängigen elastischen Kennwerten schreiben als (ARGYRIS 1986)

$$\begin{pmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_6 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} E_{11} & E_{12} & E_{16} \\ & E_{22} & E_{26} \\ \text{SYM} & & E_{66} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_6 \end{pmatrix}$$

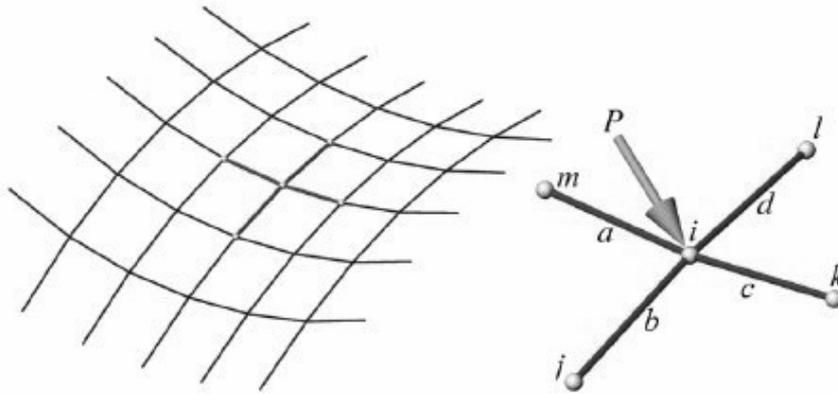
Da sich Bilder als dünnes Faser-Matrix-System betrachten lassen, kann das Gesamtsystem vereinfacht und als Membran berechnet werden. Die elastischen Kennwerte werden

in einer ersten Näherung aus den Mittelwerten der Kohärenzen benachbarter Punkte berechnet und in die entsprechenden Stützstellen der diskreten Membrangleichung eingesetzt.

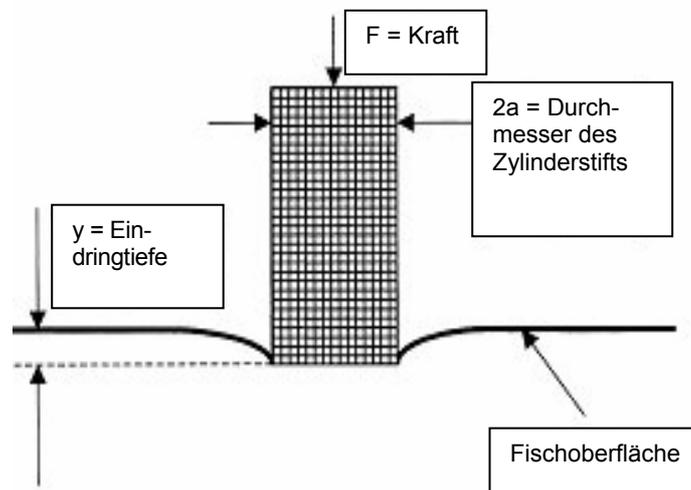
Um Materialeigenschaften aus Bildern ableiten zu können, wird auf die Gitterpunkte der diskreten Membrangleichung eine konstante virtuelle Kraft aufgebracht (**Bild 2**) und die Deformation mit dem Prinzip der minimalen Gesamtenergie berechnet. Da in jedem Punkt das Gleichgewicht des Systems für die 3 Raumkoordinaten erfüllt sein muss (**Bild 3**), wird eine Reduktion auf eine Grundfläche von 128 x 128 Gitterpunkte und damit insgesamt 49152 Gleichungen notwendig, um eine Berechnung auf Workstations zu ermöglichen. Mit der Deformationsanalyse der als Membran modellierten Bildebene lässt sich ein Texture Analyzer simulieren (**Bild 4** und **5**) und das System über einen Texture Analyzer kalibrieren. Ein weiterer Effekt der Deformationsanalyse liegt in der weitgehenden Unabhängigkeit der Deformationsparameter von der Auswahl der Signatur der Bilder, so dass sich eine Standardisierung der Beleuchtung zumindest für eine Species erreichen lässt.



**Bild 2:** Anwendung einer virtuellen Kraft auf die Grundfläche (Bildebene)



**Bild 3:** Membrangleichgewicht



**Bild 4:** Prinzip eines Texture Analyzers (nach: Quality control by instrumental Texture Measurements, In: Seafood – Quality, Technology and Nutraceutical Applications, Springer, Berlin, 2001)



**Bild 5:** Einsatz eines Texture Analyzers im Labor

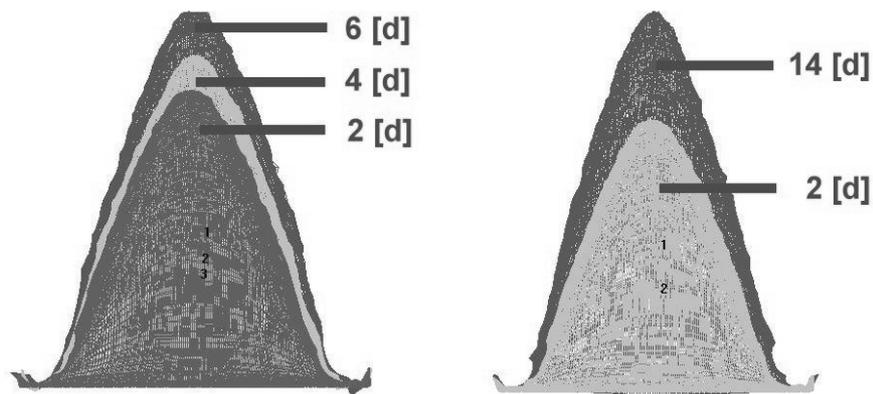
## 2 Material und Methoden

Untersuchungen erfolgten an Fischproben von Wolfsbarsch (*Dicentrarchus labrax*) und Kabeljau (*Gadus morhua*), die im Kanal vor der englischen Küste gefangen wurden. Sämtliche Proben wurden auf Eis gelagert. Weiterhin wurden tiefgefrorene Kabeljauproben aus der Barentssee über einen Zeitraum von über einem halben Jahr untersucht. Sämtliche Bildaufnahmen wurden sequentiell unter monochromatischem Licht von 12 verschiedenen Wellenlängen im Bereich von 400 nm bis 940 nm generiert, zu einem Vielkanalbild kombiniert und jeder Kanal in ein Gradientenbild transformiert (KROEGER 2004). Für eine Bestimmung des Alterungs- oder Frischezustandes sind Subsets von Histogrammen von Kohärenzdaten ausreichend, zur Ermittlung von elastischen Materialeigenschaften wurden Bilder aus unterschiedlichen Kanälen mit einer Gaußpyramide zu einem Kohärenzbild der Größe von 128 x 128 Pixel transformiert. Zwischen zwei Pixeln wurden die zugehörigen Kohärenzwerte gemittelt und in die entsprechende Position des Membrangleichungsgitters eingesetzt. Durch Einschalten einer äußeren Kraft deformierte sich die Membranfläche, gesteuert von den lokalen Kohärenzwerten. Als aussagekräftige Größe wurde das Verhältnis von Volumen zu Oberfläche der deformierten Membranfläche verwendet.

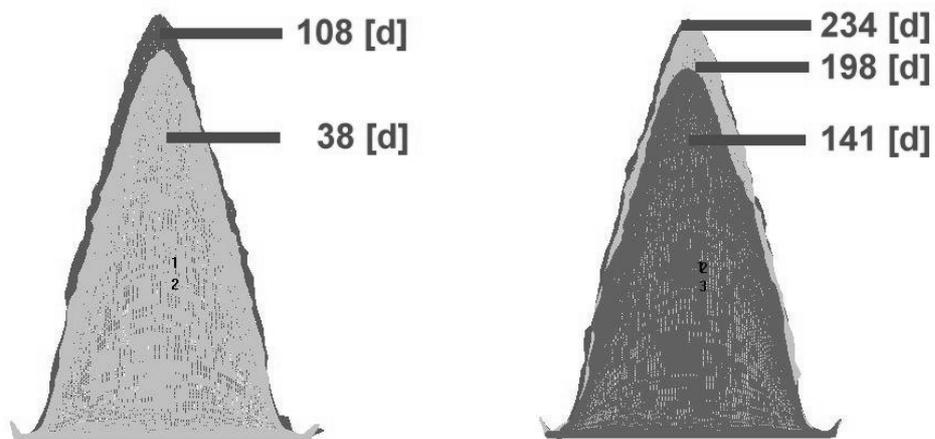
## 3 Ergebnisse

Für die untersuchten Fischarten wurden Deformationsberechnungen für verschiedene Wellenlängen durchgeführt und die der Alterungssimulation mit denen einer direkten Klassifizierung mit Hauptkomponenten-Analysen (PCA) verglichen. Aus Bildern für die optimale Wellenlängenkombination wurde ein Subset für Deformationsuntersuchungen ausgewählt. In **Bild 5** ist die Deformation der Bildflächen für 2, 4, 6, 14 Lagertage für Wolfsbarsch bei 0°C dargestellt. Hierfür wurden nur Bilder der Wellenlänge 850 nm berücksichtigt. **Bild 6** zeigt die Bildflächendeformation für Kabeljau bei – 20°C von Bildern der Wellenlänge 470 nm für die Lagertage 38, 108, 141, 198, 234. Elastische Eigenschaften lassen sich aus **Bild 7** ersehen. Hier wurde eine Spannungsanalyse des Gewebes von Wolfsbarsch bei 0°C auf Basis der Bilder für eine Wellenlänge von 470 nm vorgenommen. In den hellen Bereichen des rechten Bildes (A) ist eine Festigkeitsschwelle unterschritten, der dunkle Bereich (B) zeigt Gebiete von möglicher Klaffung des Gewebes. Die Simulation eines Texture Analyzers zeigt **Bild 8**. Hier wurde die Deformation für Kabeljau (Volumen durch Oberfläche) aus Bildern für 470 nm berechnet. Zum Vergleich sind Literaturdaten für die aufzuwendende Kraft für eine vorgegebene Eindringtiefe des Stempels aufgeführt. Der Einfluss des Rigor auf die Deformation ist eindeutig zu erkennen.

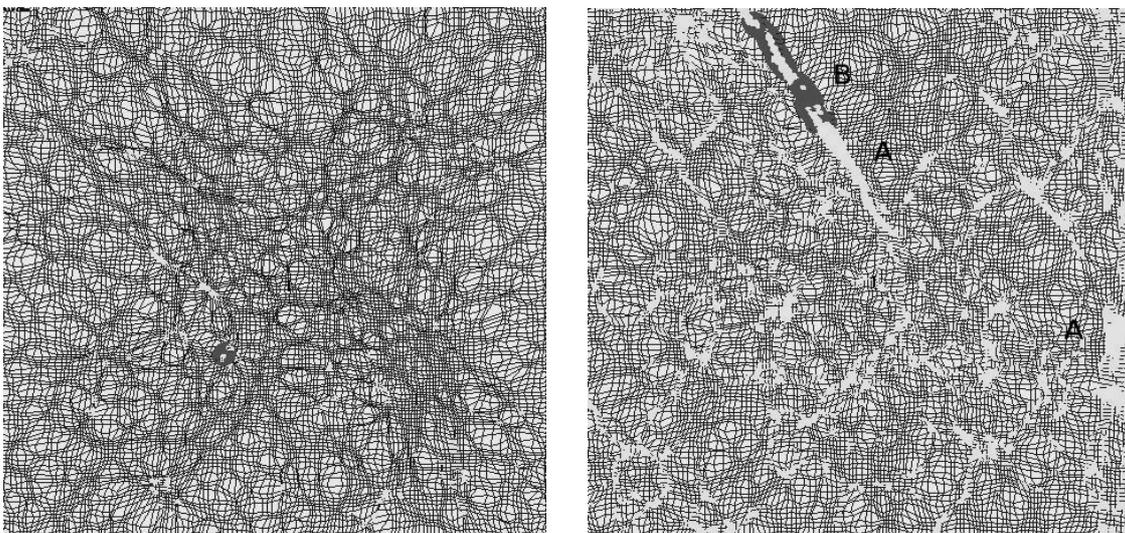
Daten aus Deformationsuntersuchungen an Proben gleicher Species zeigen eine geringe Varianz im Vergleich zu Kohärenzdaten, die als Merkmalsvektoren für Klassifikatoren dienen. Dieses liegt an den zugrunde liegenden Ausgleichsprozessen beim Lösen der Energiegleichung und gestattet eine Verwendung von nur wenigen Wellenlängen für Materialuntersuchungen.



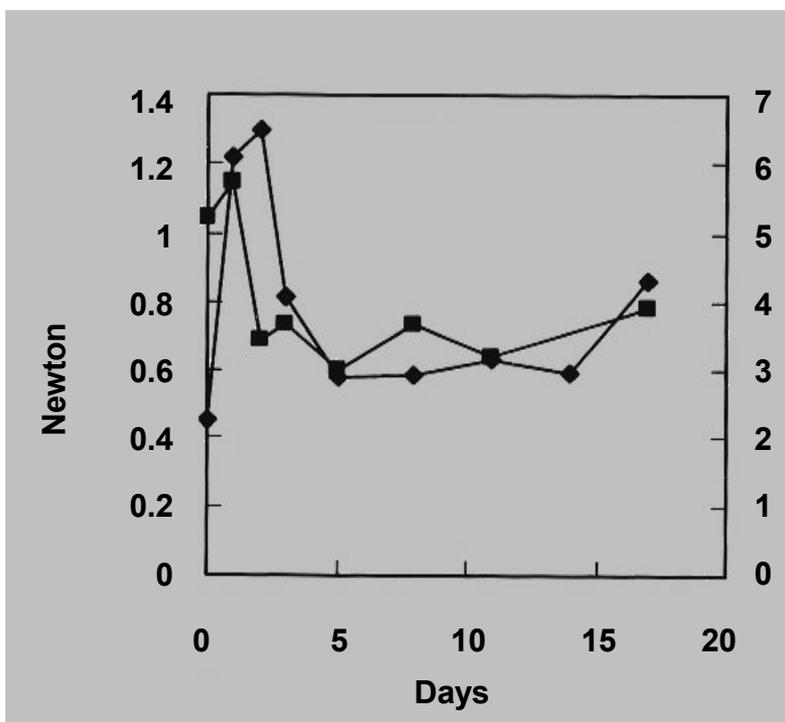
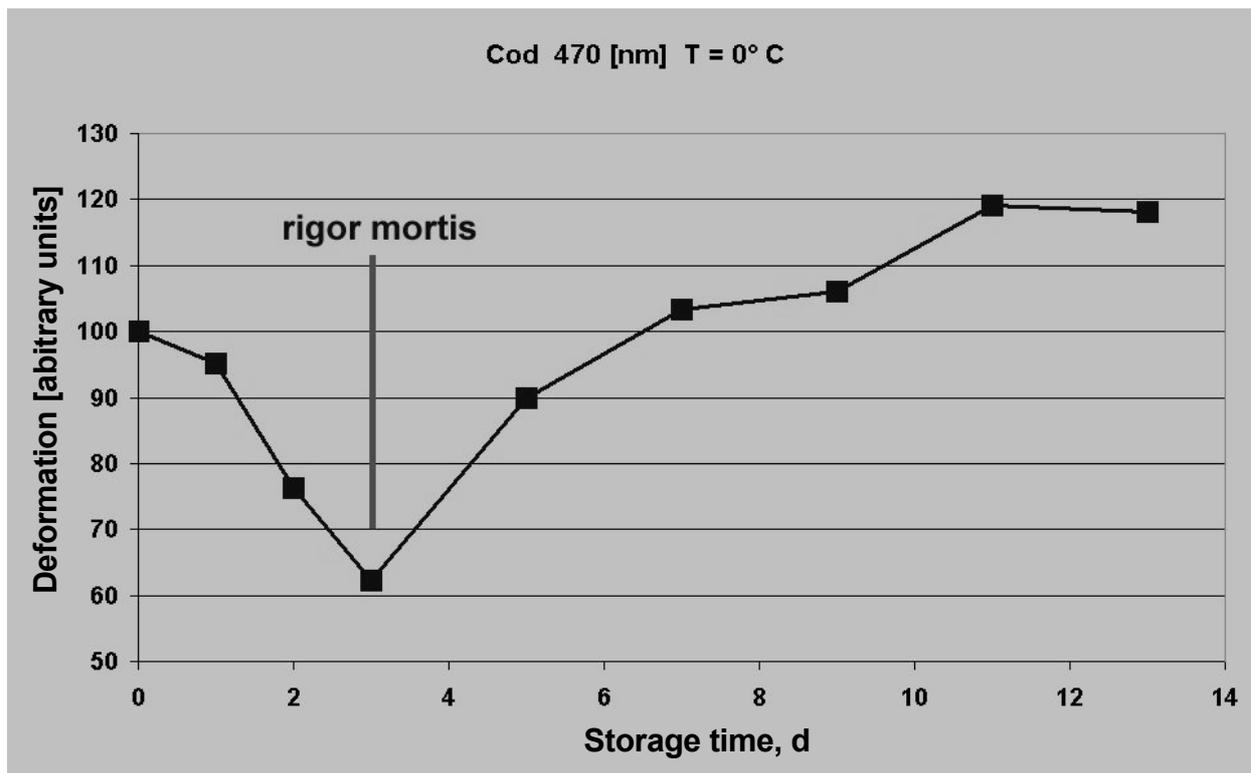
**Bild 5:** Deformation der Bildmembran für Wolfsbarsch ,  $T = 0^{\circ}\text{C}$ ,  $\lambda = 850 \text{ nm}$ .  
Links für 2, 4, 6 Lagertage, rechts für 2 und 14 Lagertage



**Bild 6:** Deformation der Bildmembran für Kabeljau (*Gadus morhua*),  $T = -20^{\circ}$ ,  $\lambda = 470 \text{ nm}$ .  
Links für 38 und 108 Lagertage, rechts für 141, 198, 234 Lagertage



**Bild 7:** Vergleich der inneren Spannungen vom Wolfsbarsch (*Dicentrarchus labrax*),  $T = 0^{\circ}$ ,  $\lambda = 470 \text{ nm}$ . Links 0 Lagertage, rechts nach 15 Lagertagen. Die hellen Bereiche (A) geben Bereiche geringer Festigkeit an, dunkle Bereiche sind Gebiete mit potenziellen Klaffungen (B)



**Bild 8:** Vergleich von Deformationsmessungen aus Bildern mit denen von Texture Analyzer ermittelten Werten für Kabeljau (*Gadus morhua*). Oben die Deformation (Volumen durch Oberfläche) bezogen auf die Lagerzeit 0 d bei 470 nm. Unten die für eine konstante Eindringtiefe des Stempels aufgewendete Kraft (nach: Quality Control by Instrumental Texture Measurements, in: Seafood – Quality, Technology and Nutraceutical Applications, Springer, Berlin, 2001)

#### 4 Zusammenfassung

Aus der Orientierungsanalyse von Bildern des Muskelgewebes lassen sich Parameter für elastische Gleichungen ableiten und mit ihnen die Textur-Analyse simulieren. Als Grundlage dienen Bilder, die mit nur wenigen für eine Species konstanten Wellenlängen signiert sind. Die Simulation der Alterungsvorgänge des Gewebes und der mit ihnen verbundene Festigkeitsverlust dient als Test für die Güte der Simulation. Der Einfluss des Rigors auf die Mikromuster und die elastischen Eigenschaften ist reproduzierbar. Mit einem Texture Analyzer lassen sich die aus Bildern gewonnenen Simulationsdaten kalibrieren und in absolute Daten umrechnen.

#### 5 Literatur

**ARGYRIS J., MLEIJNEK H.-P. (1986):** Methode der finiten Elemente. Band I, Vieweg, Braunschweig

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

**KROEGER M., TRUPPEL I., HEROLD B. (2005):** Fish Quality Monitoring – Bestimmung geeigneter Wellenlängen für die spektrale Signatur von Bildern. Bornimer Agrartechnische Berichte 40, S. 109-117

**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

## Untersuchung von Ausbreitungsvorgängen mit Hilfe der Laser-Lichtschnitt Technik im Grenzschichtwindkanal des ATB

### *Investigation of dispersal processes by means of laser-light-sheet technique in boundary layer wind tunnel of ATB*

Hans-Joachim Müller, Ulrich Pech, Kristina von Bobrutzki, Knut Schröter  
Leibniz-Institut für Agrartechnik Potsdam-Bornim e.V., Max-Eyth-Allee 100, 14469 Potsdam  
E-Mail: hmueller@atb-potsdam.de

**Kurzfassung:** Gasförmige Emissionen aus Tierhaltungen können zu Belästigungen bzw. Schäden im Umfeld von Stallanlagen führen. Durch Veränderungen am Luftführungssystem und an den Luftströmungsbedingungen im nahen Umfeld des Stalles kann die Konzentrationsverteilung der Gase und deren Ausbreitung beeinflusst werden. Eine Möglichkeit zur näheren Charakterisierung solcher Ausbreitungsvorgänge sind Untersuchungen in einem Windkanal. Das ATB betreibt einen solchen Grenzschichtwindkanal mit den notwendigen Messsystemen zur Luftgeschwindigkeitsmessung zur Konzentrationsmessung und zur Strömungssichtbarmachung. Das Verfahren der Sichtbarmachung mit Hilfe der Laser-Licht-Schnitt Technik ist eine relativ einfache und eine anschauliche Möglichkeit zur Analyse von Ausbreitungsvorgängen. Die Methode der Sichtbarmachung, der Bildaufnahme und Bildauswertung wird ständig weiterentwickelt. Mit dem vorliegenden Beitrag wird die Möglichkeit gezeigt, zu einer räumlichen Darstellung der Ausbreitungsvorgänge zu gelangen.

**Deskriptoren:** Emission, Ausbreitung; Luftströmung, Sichtbarmachung, Laser-Licht-Schnitt Technik, Windkanal

**Abstract:** *Air born pollutions derived from animal housing may lead to annoyances and damages in the surroundings of these buildings. Changes concerning ventilation system and air flow conditions inside and nearby this building can be used to alter the transmission process. Therefore the distribution of the emitted pollutants in the surroundings is modified. One possibility to investigate such dispersal processes offers the investigation in a boundary layer wind tunnel. The ATB is using such boundary layer wind tunnel, equipped with the necessary measuring systems for air velocity, gas concentration and air flow visualization. The method of visualization by means of laser-light-sheet technique is a relatively simple and demonstrative possibility to analyse the dispersion behaviour. The method of visualization, image acquisition and image processing will be enhanced always. The present paper shows the possibility to get a spatial illustration of dispersion processes.*

**Keywords:** *air born pollution, dispersion, air flow, visualization, laser-light-sheet technique, wind tunnel*



halb und außerhalb der Stallanlagen. Zusätzlich werden die Gaskonzentrationen, Luftgeschwindigkeiten und der Volumenstrom im Stall ermittelt.

Eine weitere Untersuchungsvariante liegt in der numerischen Strömungssimulation. Gewissermaßen zwischen der Praxismessung und der numerischen Simulation sind modelltechnische Untersuchungen angesiedelt. Modellversuche berücksichtigen die physikalischen Zusammenhänge. Im Gegensatz zu Praxisuntersuchungen können die Randbedingungen geändert und während eines Versuches konstant gehalten werden. Derartige Modelle lassen sich im Windkanal untersuchen. Mittels Visualisierung können die Strömungsverhältnisse betrachtet werden, um die genannten Einflussfaktoren besser in Zusammenhang bringen zu können.

Zudem tritt oft der Fall auf, dass Abstandsregelungen in Bezug auf Stallanlagen nicht genügend beachtet werden. Konflikte entstehen, wenn sich landwirtschaftlichen Anlagen zu dicht an Industrie-, Gewerbe- oder Wohngebieten befinden. In solchen Fällen bieten sich Windkanaluntersuchungen mit Nutzung der Laser-Licht-Schnitt Technik als geeignete Methode an, um die Ausbreitung von Emissionen aus bodennahen Quellen zu charakterisieren und so geeignete Schritte zur Reduzierung der Immissionen zu finden.

## 2 Material und Methoden

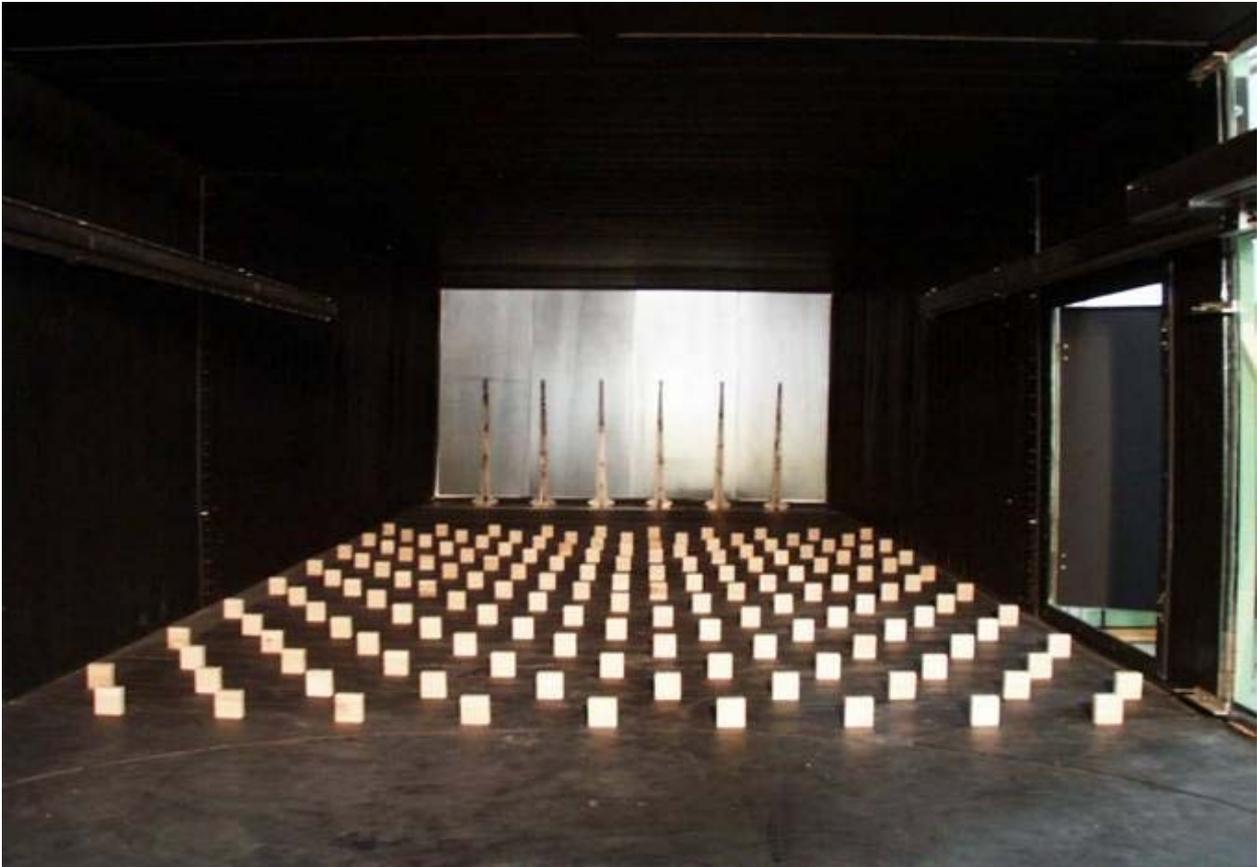
### 2.1 Windkanal

Bei dem institutseigenen Windkanal, mit einem Querschnitt von 2 m Breite und 1,25 m Höhe, handelt es sich um einen Grenzschichtwindkanal mit einer Gesamtlänge von 12 m. Der Kanal wird von rechts nach links durchströmt und arbeitet im Saugbetrieb. Die Messstrecke beträgt 1,80 m und die Anströmrichtung kann durch Änderung der vorhandenen Drehscheibe variiert werden (**Bild 2**).



**Bild 2:** Grenzschichtwindkanal des ATB

Im Kanal werden die atmosphärische Grenzschicht und das real existierende Windprofil in der Umgebung von Gebäuden möglichst genau nachgebildet. Die Windprofile werden geformt durch den Einsatz von Spires und die Anordnung von Rauigkeitselementen, in diesem Fall Klötzchen (**Bild 3**).

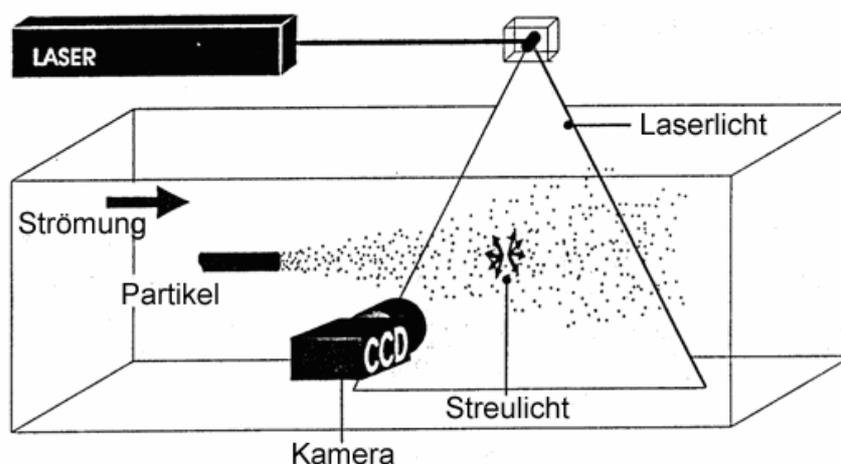


**Bild 3:** Anordnung der Spires und der Rauigkeitselemente im Kanal

Durch Windkanaluntersuchungen können mögliche Ausbreitungssituationen von Stoffen nachgebildet werden. Die Ergebnisse können zur Validierung numerischer Ausbreitungsmodelle genutzt werden. Damit wieder können Jahresprognosen in Bezug auf die Ausbreitung von Gasen und Gerüchen erstellt werden.

## 2.2 Laser-Licht-Schnitt Technik

Mit der Laser-Licht-Schnitt Technik kann eine Sichtbarmachung des Strömungszustandes realisiert werden. Der Vorteil dieser optischen Messtechnik liegt in der berührungslosen und den zu analysierenden Vorgang nicht störenden Arbeitsweise (RUCK 1990). Dazu wird ein Nebel in den Windkanal gebracht und ein Laserstrahl hindurchgeleitet. Zur Laserlichterzeugung wird ein Argon-Ionen-Laser im Multiline- Betrieb verwendet. Die Hauptwellenlänge liegt bei 516 nm und 488 nm. Die Leistung aller Wellenlängen liegt bei 4 W (MÜLLER *et al.* 1996) (**Bild 4**).



**Bild 4:** Prinzip der Laser-Licht-Schnitt Technik

Durch Vernebelung einer Substanz auf Alkoholbasis entstehen Streupartikel, die in den Windkanal eingebracht werden und an denen der Laserstrahl reflektiert wird. Dadurch entsteht eine qualitative Visualisierung der Strömungsverhältnisse. Die Videoaufnahme dieses Strömungszustandes erfolgt mit einer Monochrom-CCD-Kamera.

### 2.3 Verwendung von Java und Java 3D

Java ist eine plattformunabhängige objektorientierte Programmiersprache von Sun Microsystems. Das Konzept von Java sieht vor, dass die Programme nicht direkt auf dem jeweiligen Computersystem laufen, sondern auf einer Zwischenebene einer sogenannten „virtuellen Maschine“. Zunächst wird mit der Hilfe eines Texteditors oder einer Entwicklungsumgebung das Javaprogramm geschrieben, der Programmierer hat dabei auf keinerlei Eigenheiten der Programmierung für eine bestimmte Plattform zu achten. Der Java-Compiler übersetzt das fertige Programm in den sogenannten Byte-Code. Dieser „Zwischencode“ ist kein Maschinencode im eigentlichen Sinne. Die Java-Virtual-Maschine (JVM) interpretiert den Code und führt ihn aus. Dabei ist die JVM auf das entsprechende System, auf dem sie läuft, optimiert. Sun stellt virtuelle Maschinen für Windows (i586, AMD64), Linux (i586, AMD64) und Solaris (SPARC, x86, x64) bereit. Außerdem bietet Apple für Mac OS X, SGI für Irix und HP für ihre Unix-Plattformen eigene VM zum download an.

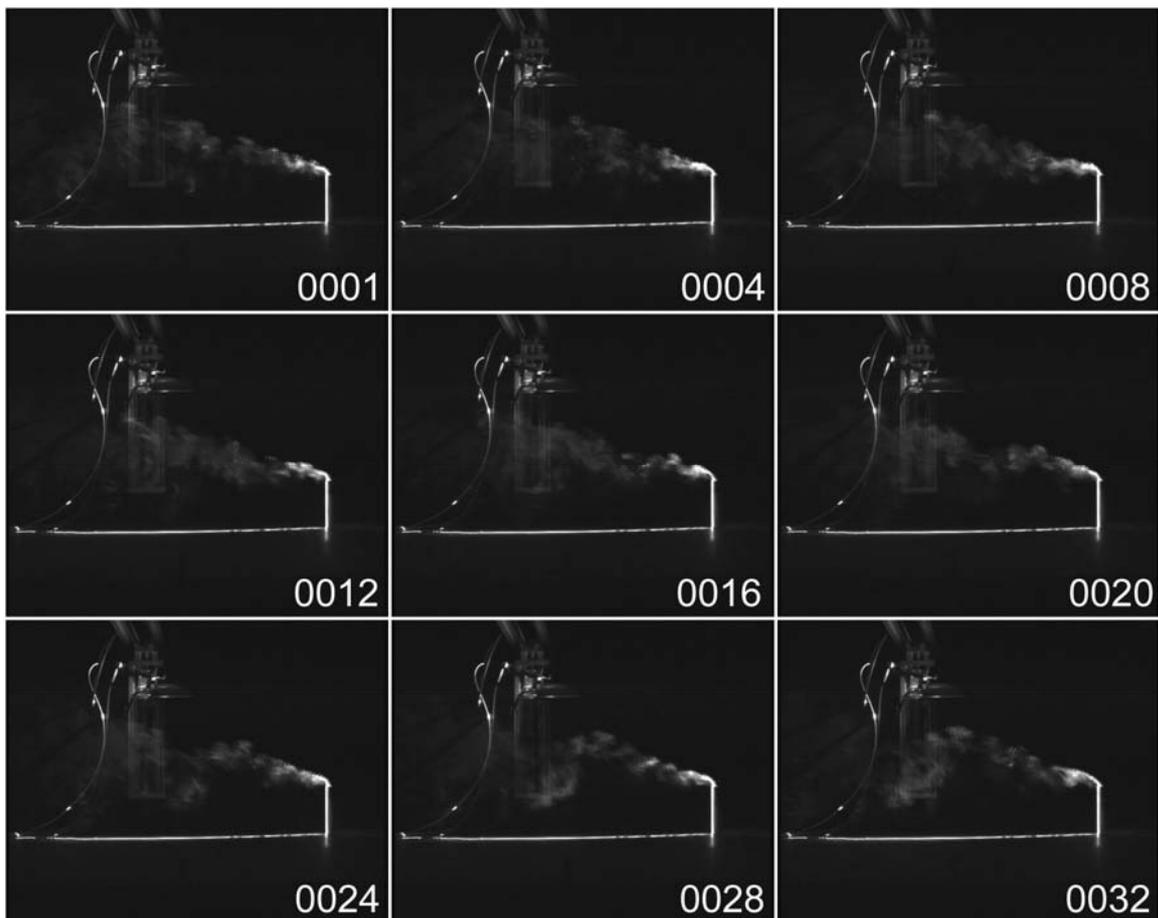
Nun soll ein interaktives Programm, das Strömungsbilder in einer dreidimensionalen Umgebung anzeigt, erstellt werden. Um dies möglich zu machen, wird die Java-Erweiterung Java 3D eingesetzt. Die Java 3D-API ist eine Erweiterung der Java 2 Klassenbibliotheken. Dem Programmierer wird hierbei eine Schnittstelle zur Verfügung gestellt, die es ihm ermöglicht, Programme mit einer dreidimensionalen Grafik und einer interaktiven Benutzung zu erstellen. Zudem wird die für eine schnelle Darstellung benötigte Anbindung an Grafikkarten von Java 3D übernommen. Grafikkarten mit 3D-Beschleunigung können so ohne

Umwege und mit Hilfe von OpenGL oder Direct3D benutzt werden. Dies wird im Unterschied zu beispielsweise der Java 2D-API, die ausschließlich aus Java-Klassen bestehen, nicht nur durch neue Java-Klassen ermöglicht, sondern auch durch einen zusätzlich plattformspezifischen Code. Somit sorgt Java 3D in Java-Anwendungen für eine Geschwindigkeit, die den Ansprüchen an eine schnelle 3D-Grafik genügt (**Bild 5**).

Mit diesen erforderlichen plattformabhängigen Teilen geht etwas von der eigentlichen Java Philosophie „Einmal schreiben, überall benutzen“ verloren. Dieses Manko relativiert sich, wenn man die in der aktuellen Version 1.4.0 zum Download angebotenen Java 3D Laufzeitumgebungen betrachtet. Unterstützt werden die wichtigsten Betriebssysteme und Plattformen. Mit OpenGL ist Java 3D verfügbar für: Linux mit AMD oder Intel Prozessoren, Solaris (Sparc/x86) und Windows für alle i586 kompatiblen Prozessoren. Auf Windows ist Java 3D auch mit Direct3D benutzbar.

Für Mac OS X, Irix und HP-Unix sind zumindest ältere Versionen verwendbar und es ist mit einer späteren Anpassung an die aktuelle Version zu rechnen.

Für den Programmierer gibt es nur eine Schnittstelle, das SDK (Software Development Kit ~ „Software-Entwicklungs-Ausrüstung“). Der Entwickler hat hier den Vorteil, den Code für die unterstützten Plattformen nicht auf das jeweilige System anpassen zu müssen.



**Bild 5:** Einzelbildsequenzen der Laser-Licht-Schnitt Technik

### 3 Ergebnisse

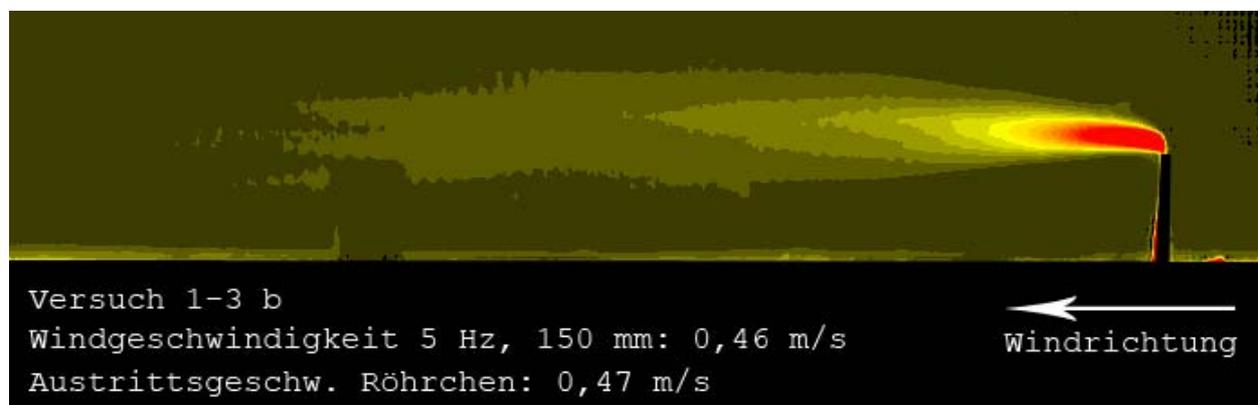
#### 3.1 Mittelwertbilder

Um die aufgenommenen monochromen Videos einlesen und auswerten zu können, werden sie zunächst in Einzelbilder umgewandelt. Das Programm liest die jpg-Bilder eines angegebenen Ordners von der Festplatte ein und addiert die Helligkeitswerte des Bildes inkrementell auf. Dabei werden die Farbinformationen nicht betrachtet, lediglich die Helligkeitsinformationen der einzelnen Pixel werden addiert.

Sind alle Bilder eingelesen, wird die Summe der Helligkeitswerte durch die Zahl der eingelesenen Bilder geteilt und man erhält das arithmetische Mittel. Dies erfolgt für jedes Pixel und als Ergebnis liegt anschließend ein Mittelwertbild vor.

Nun kann durch eine Zuordnung der Helligkeit mit einem Farbverlauf das Mittelwertbild „eingefärbt“ werden. Man kann beispielsweise dem hellen Anteil im Bild die Farbe Rot, den mittleren Tönen eine gelben Farbton und den dunklen Anteilen die Farbe Schwarz zuordnen. Dadurch werden die Stellen im Bild mit einer höheren Konzentration farblich hervorgehoben.

Um eine deutlichere Abstufung der Farben zu erhalten, kann bei dem monochromen Bild die Anzahl der Helligkeitsstufen herunter gesetzt werden. Dies hat im späteren eingefärbten Bild den Effekt, dass kein kontinuierlicher Verlauf mehr existiert, sondern harte Kanten zu sehen sind. Somit ist der Übergang zwischen Stellen mit unterschiedlicher Konzentration leichter zu erkennen (**Bild 6**).

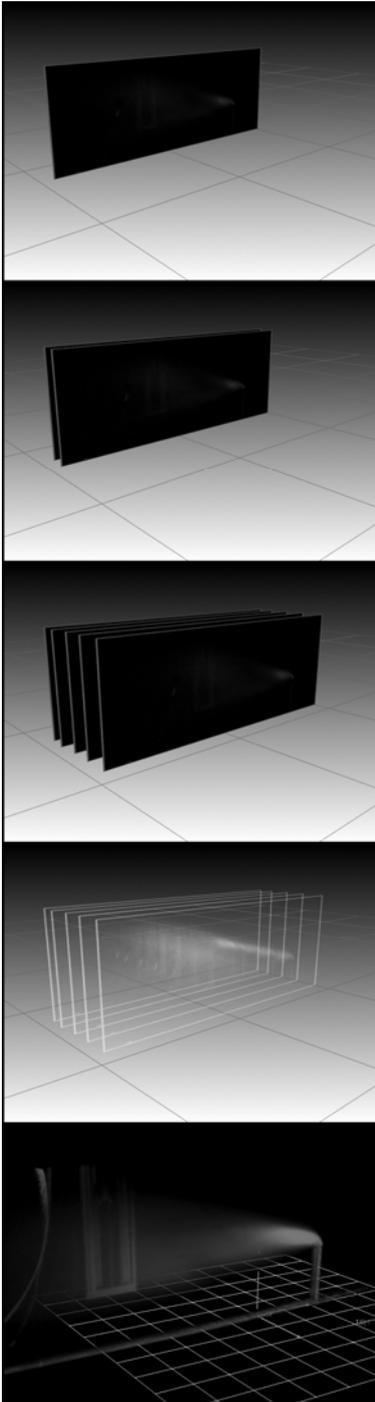


**Bild 6:** Zweidimensionales Mittelwertbild einer definierten Ausbreitungssituation

#### 3.2 Dreidimensionale Darstellungen

Für die dreidimensionale Umsetzung werden die Mittelwertbilder aus den unterschiedlichen Ebenen hintereinander im Raum positioniert. Die Bilder werden dabei in viele den Pixeln entsprechenden, farbige Flächen umgewandelt. Pixel, die im Bild schwarz sind, d.h. keine Informationen über das untersuchte Abluftverhalten beinhalten, werden nicht

übernommen. Somit werden die Stellen im Bild, an denen der Hintergrund zu sehen ist, transparent und so werden wichtige Bildteile isoliert.



Zwischen den Ebenen können zusätzlich Flächen interpoliert werden. Das führt im Programm zu einer Art Wolke von Flächen, die insgesamt betrachtet das dreidimensionale Abbild der Mittelwertbildebene darstellt.

Sind alle Flächen berechnet worden, hat der Benutzer des Programms die Möglichkeit, mit Hilfe der Maus, die dreidimensionale Darstellung von unterschiedlichen Blickrichtungen zu betrachten.

Hier liegt der Vorteil gegenüber der zweidimensionalen Visualisierung. Der Benutzer bekommt auf einen Blick einen räumlichen Eindruck über das Verhalten der Luftströmung an dem untersuchten Objekt (**Bild 7**).

#### 4 Zusammenfassung

Lüftungssysteme für Tierhaltungen sind hinsichtlich der zu erreichenden Stallklimaqualität und in Bezug auf die Reduzierung von Emissionen und Immissionen ständig weiterzuentwickeln. Modelluntersuchungen im Windkanal sind dabei ein wichtiges Hilfsmittel. Bei derartigen Untersuchungen im Grenzschichtwindkanal des ATB wird die Laser-Licht-Schnitt Technik angewendet. Diese Technik ermöglicht die Sichtbarmachung der Luftströmung, die Aufnahme dieser Bilder und die Bildauswertung. Neben der Erzeugung von Mittelwertbildern, welche die Charakteristik der Ausbreitung von Gasen erkennen lassen, wird an der räumlichen Darstellung der Strömungsvorgänge gearbeitet. Damit soll die Anschaulichkeit der Methode weiter erhöht werden.

**Bild 7:** Vorgehen bei der dreidimensionalen Bilderzeugung

#### 5 Literatur

- MÜLLER H.J., STOLLBERG U., WERNER D. (1996):** Laser-Lichtschnitt-Technik zur Visualisierung von Strömungsbildern. Bornimer Agrartechnische Berichte. Heft 11, S. 75-87
- RUCK B. (1990):** Laserlichtschnittverfahren und digitale Videobildverarbeitung. In: RUCK *et al.*: Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik. AT-Fachverlag GmbH Stuttgart

## Ernteterminbestimmung auf der Basis positions-bezogener Daten zur Fruchtqualitätsbestimmung

### *Harvest Date Determination by Means of Site-Specific Fruit Quality Monitoring*

Manuela Zude<sup>\*</sup>, Michael Pflanz<sup>\*</sup>, Bernd Herold<sup>\*</sup>, Craig Kaprielian<sup>\*\*</sup>, Brian L Aivazian<sup>\*\*\*</sup>

<sup>\*</sup> Leibniz-Institut für Agrartechnik Potsdam-Bornim e.V., Max-Eyth-Allee 100, 14469 Potsdam

<sup>\*\*</sup> Fruit World Nursery Inc., 9234 S. Alta Ave, Reedley, CA 93654, U.S.A

<sup>\*\*\*</sup> Vision Agrobotics Inc., 1425 S. Ash Street, Casper, Wyoming 82601, U.S.A

**Zusammenfassung:** Der Erntetermin von Zitrusfrüchten wird mit Hilfe des Fruchtgehaltes an löslicher Trockensubstanz (SSC) festgelegt. Der SSC [°Brix] steigt während der Fruchtentwicklung am Baum bis ein gleich bleibender Wert erreicht ist. Um qualitätsmindernde Einflüsse durch Schädlinge oder klimatischen Stress zu vermeiden, sollte bei Erreichen dieses Wertes geerntet werden. Im vorliegenden Versuch wurde ein Monitoring der Fruchtqualität von *Citrus reticulata* auf der Basis von zerstörungsfreier Spektralanalyse im nahinfraroten Wellenlängenbereich an zwei neuen Sorten in zwei Produktionssystemen in der Erntesaison von Oktober 2005 bis Februar 2006 (n=3849) durchgeführt. Eine erste Kalibrierung der Methode erfolgte bereits im Vorjahr. Die Ergebnisse zeigten einen hohen Fehler, der durch eine Anpassung der Kalibrierung an das vorliegende Fruchtmaterial auf 8,57% (0,86°Brix) reduziert werden konnte.

Die Fruchtqualität bezogen auf den SSC war mit zunehmender Reife erhöht, wobei sortenspezifische sowie vom Pflanzsystem abhängige Unterschiede auftraten. Deutliche Unterschiede traten auch in unterschiedlichen Arealen der Standorte auf, die mit der zerstörungsfreien Fruchtspektralanalyse über den Verlauf der Fruchtentwicklung dargestellt werden konnten.

**Deskriptoren:** Ersatztermin, Zitruspektralanalyse, teilflächenspezifische Kontrolle

**Summary:** *During citrus fruit development the soluble solids content (SSC) increases until a steady-state is reached, when the fruits should be harvested to avoid possible damages due to following unfavourable weather conditions. For monitoring the fruit quality on tree a recently developed method based on near infrared spectrometry (NIRS) was applied non-destructively. In the present study, monitoring the fruit SSC [°Brix] was carried out on two new citrus varieties (Fruit World Nursery Inc.) of *Citrus reticulata*, grown in two different production systems, in the period from October 2005 to February 2006 (n=3849) in weekly interval. Applying a calibration built in the former season resulted in high errors as expected from earlier studies in apples. After re-calibration a root mean square error of prediction of 8.57% (0.86°Brix) was found.*

*During fruit development on tree, the fruit SSC level was influenced by the cultivar as well as by the production system. However, the influence of the two production systems studied was not consistent in all cultivars. Site-specific monitoring of the variation in fruit quality was possible with the non-destructive fruit analysis.*

**Keywords:** *Harvest date, Citrus, Spectral analysis, Site-specific monitoring*

## 1 Einleitung

In der Zitrusproduktion ist eine wesentliche Fragestellung für die Erzeugung qualitativ hochwertiger Früchte die Bestimmung des optimalen Erntetermins. Im Verlauf der Fruchtentwicklung am Baum nimmt deren Gehalt an löslicher Trockensubstanz kurz vor dem optimalen Erntetermin deutlich zu und verbleibt nach Erreichen eines sorten-, umwelt- und produktionssystemabhängigen Wertes auf diesem Niveau. Nach Erreichen dieses Niveaus sollten die Früchte geerntet werden, um Schäden durch biotische und klimatische Umwelteinflüsse zu vermeiden.

Der Erntetermin wird im kommerziellen Zitrusanbau 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.

Auf der Basis von spektralphotometrischen Messungen könnte die Bestimmung der SSC jedoch auch zerstörungsfrei durchgeführt werden. Hierzu wird Strahlung im sichtbaren oder nahinfraroten Wellenlängenbereich auf eine Frucht gegeben, wobei ein geringer Teil des eintreffenden Lichtes an der Fruchtoberfläche reflektiert wird, sichtbar als Reflexion oder Glanz. Die verbleibende Strahlung tritt in das Fruchtgewebe ein und wird an den zellulären Bestandteilen gestreut oder von Molekülen absorbiert. Die rückwärts gestreute Strahlung tritt wieder an die Fruchtoberfläche und kann dort aufgenommen und gemessen werden. Es zeigt durch die Absorption bei verschiedenen Wellenlängen typische Minima und enthält nach dem Lambert-Beer'schen Gesetz Informationen über die Konzentration der absorbierenden Moleküle. Zur Reife- und Qualitätsbestimmung bei Obst können Informationen im sichtbaren (VIS, visible) und im nahinfraroten (NIR) Bereich des Spektrums genutzt werden.

Bei der in Zitrus relevanten Bestimmung der löslichen Trockensubstanz wird für die Messwertaufnahme im Labor der nahinfraroten Wellenlängenbereich von 800 nm bis 1800 nm aufgezeichnet. Portable Geräte für den Feldeinsatz arbeiten jedoch zumeist mit Siliziumbasierten Detektoren, die einen reduzierten Wellenlängenbereich bis 1100 nm abdecken. Hier hat sich eine multivariate Auswertung als sinnvoll erwiesen, um die so genannten Obertöne, d.h. mit NIR-Strahlung angeregte Molekülschwingungen höherer Ordnung, zu messen. Die Absorption der elektromagnetischen Strahlung erfolgt je nach Molekülkonformation und Schwingungsart an verschiedenen Wellenlängen. Der spezifische Fingerabdruck eines bestimmten Moleküls wird gebildet durch Absorptionsbanden, die sich über den gesamten NIR-Bereich erstrecken. Dieses Verfahren wurde bereits in Sortieranlagen für Zitrus erprobt (MILLER & ZUDE 2004) und wird in verschiedenen Anbauregionen in der Praxis eingesetzt.

Grundsätzlich bietet diese zerstörungsfreie, optische Methode die Möglichkeiten größere Stichproben bei Kontrollprozessen sowie wiederholt an derselben Frucht zu messen, und nicht zuletzt zur Kartierung eingesetzt zu werden.

Im Kalifornischen Valley, einem der weltweit größten zusammenhängenden Obstanbaugebiete, wurde bereits in der Erntesaison 2004/2005 die NIR-Spektrometrie mit einem neu

verfügbaren Gerät (ZUDE 2005) zur Bestimmung der löslichen Trockensubstanz in einer kommerziellen Zitrusproduktion getestet (ZUDE *et al.* 2005).

Im vorliegenden Beitrag werden neuere Ergebnisse aus den Versuchen der Erntesaison 2005/2006 zur Qualitätsanalyse bei Zitrusfrüchten mit Hilfe der NIR-Spektrometrie aufbauend auf vorjährigen Versuchsreihen vorgestellt.

## 2 Material und Methoden

In Reedley, CA (USA), wurde in der Erntesaison 2005/2006 eine 2,4 ha große, hydroponische Pilotanlage beprobt, indem die Zitrusbäume in einem Lavasubstrat in 20L-Containern angebaut werden. Das hochintensive Produktionssystem beinhaltet Fertigation, ggf. Blattdüngung und zusätzlich eine Gaze-Beschattung (10% Lichtminderung). In einem zweiten Versuchsareal im nahe gelegenen Sanger, CA (USA), erfolgten Messungen in intensivem konventionellem Farmanbau mit engen Pflanzabständen, Freihaltung der Baumreihen, Fertigation und ggf. Blattdüngung. Das Mikroklima in den Anlagen wurde hinsichtlich der Lufttemperatur in 1,0 m Höhe, die Niederschlagsmenge und das Bodenwasserpotential in 0,5 m und 1,0 m Bodentiefe aufgezeichnet.

Die spektrophotometrische Fruchtqualitätsbestimmung wurde an zwei Sorten jeweils in beiden Produktionssystemen getestet. Es wurden fünf Reihen mit jeweils zehn Bäumen pro Variante beprobt. Die zerstörungsfreie Aufzeichnung der Fruchtspektren erfolgte am Fruchtäquator in wöchentlichem Intervall insgesamt von Oktober 2005 bis Februar 2006, wobei nach der kommerziellen Ernte der einzelnen Sorten die Messungen nicht weiter geführt wurden.

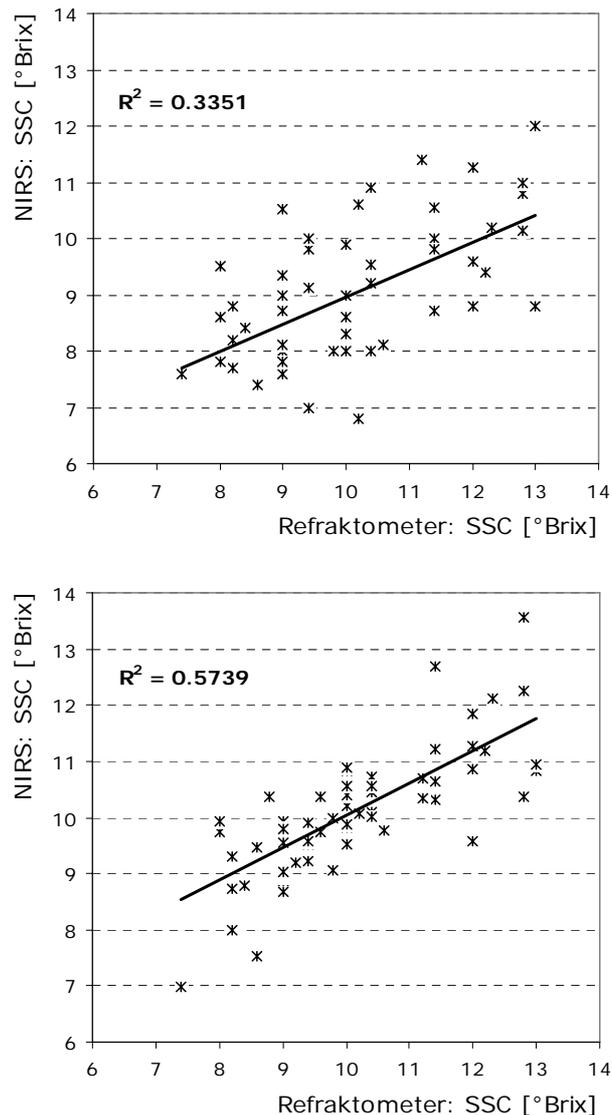
Hierzu wurde ein portables Gerät (PA1101, Fa. CP, Falkensee), ausgestattet mit einem lichtempfindlichen, monolithischen Photodiodenarray-Spektrophotometer, das im sichtbaren und nahinfraroten (NIR) Wellenlängenbereich bis 1100 nm mit 3,3 nm Auflösung detektiert. Zur Messung wird mit Hilfe von LEDs Strahlung im NIR Wellenlängenbereich (max. Peak bei 950 nm mit 80 nm Peakbreite und max. Peak bei 1020 nm mit 110 nm Peakbreite) in die Frucht eingekoppelt und die remittierte Strahlung mit dem Photodiodenarray-Spektrophotometer aufgezeichnet.

Zur Auswertung der Spektraldaten wurde ein Kalibriermodell, das in der Vorsaison entwickelt worden war verwendet. Um die Kalibrierung der NIR-Spektrophotometrie an das vorliegende Probenmaterial anzupassen, wurden in der Ernteperiode insgesamt 65 Früchte zerstörend mit einem Refraktometer (Digital-Refraktometer, Fa. Atago, Japan) auf ihren Gehalt an löslicher Trockensubstanz analysiert. Die somit angepasste Kalibrierung wurde mit dem mittleren Fehlerquadrat,  $\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y})^2}{n}}$ , bewertet und auf die aufgezeichneten

Fruchtspektren angewendet. Die ermittelten Brixwerte wurden für die Kartierung der Fruchtqualität mit Hilfe des Programm Matlab 7.04 (Mathworks Inc., U.S.A.) genutzt.

### 3 Ergebnisse und Diskussion

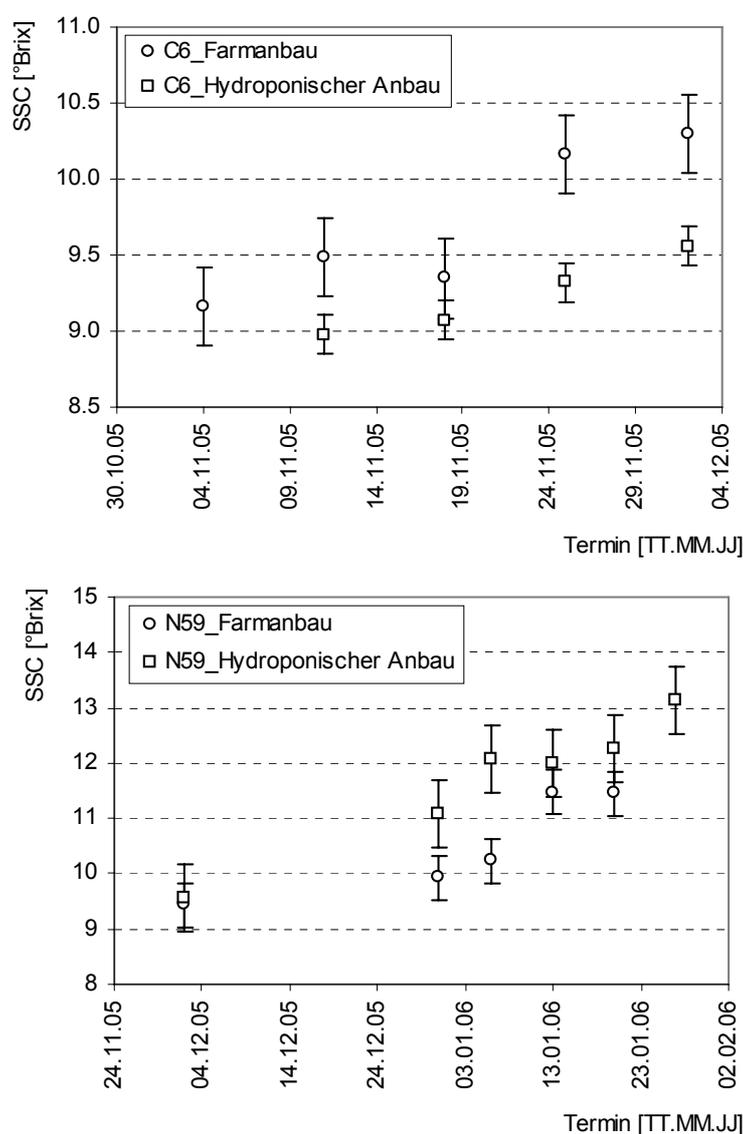
Am kalifornischen Standort wurden Versuchsreihen an zwei neuen Mandarinensorten zum Vergleich in intensivem Farmanbau sowie in einem hochintensiven hydroponischem Produktionssystem durchgeführt. Die Anlagen beider Produktionssysteme verzeichneten im Vorjahr einen ersten vermarktaren Ertrag, wobei die Bäume im hydroponischen System dies bereits im zweiten Standjahr erreichten. Im konventionellen intensiven Produktionssystem schlossen die Bäume ihre juvenile Phase im Vergleich zwei Jahre später ab.



**Bild 1:** Ergebnisse der zerstörungsfreien spektrometrischen (NIRS) und zerstörenden refraktometrischen Bestimmung der löslichen Trockensubstanz der Zitrusfrüchte [°Brix], wobei oben die Ergebnisse der NIRS mit einer in der vorherigen Wachstumsaison erstellten Kalibrierung und unten die Ergebnisse nach Anpassung der Kalibrierung an das vorliegende Fruchtmaterial abgebildet sind

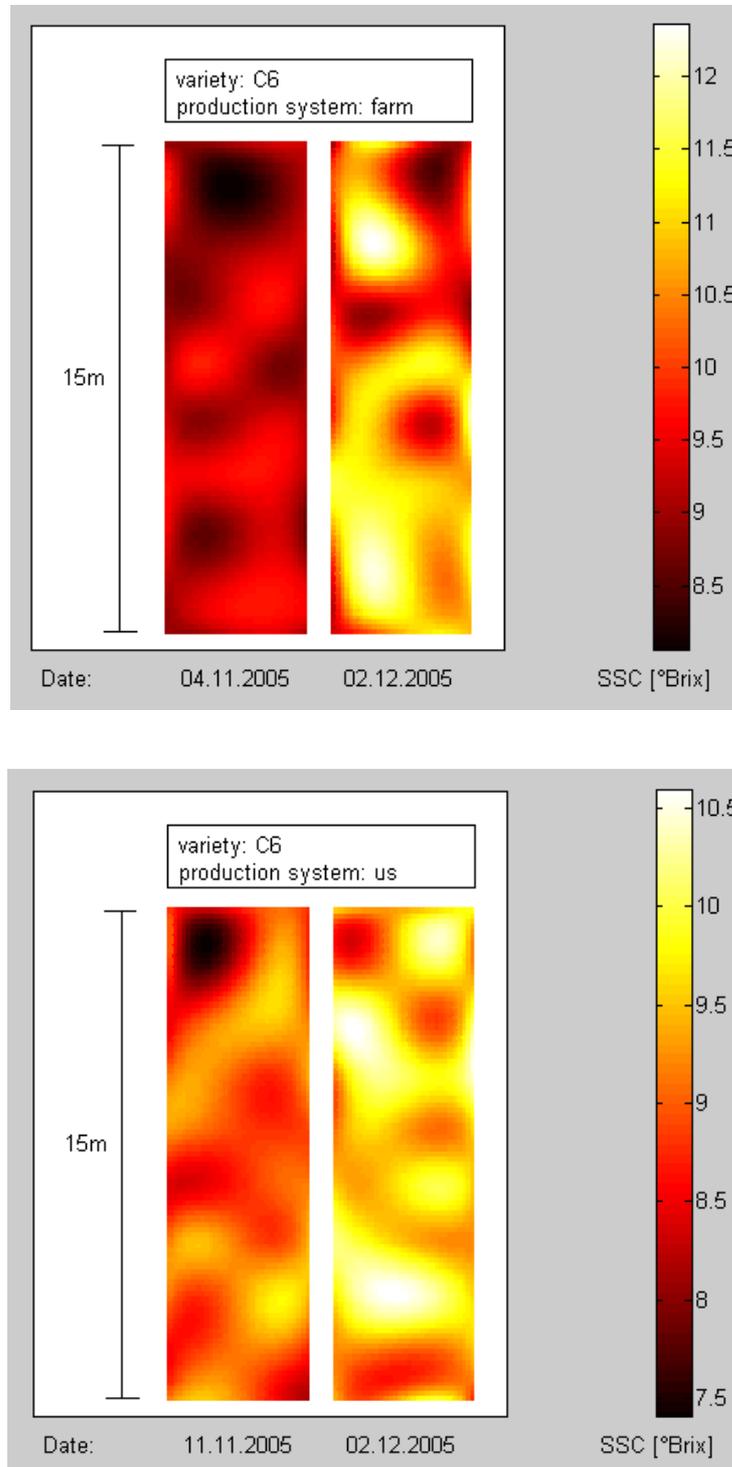
Eine erste Kalibrierung der zerstörungsfreien Fruchtanalyse auf der Basis der NIR-Spektrophotometrie erfolgte in der Erntesaison 2004/2005 auf einem Datensatz, der somit von Früchten sehr junger Bäume stammte. Speziell die Schalendicke und –beschaffenheit

sowie das erreichbare Niveau des löslichen Trockensubstanzgehaltes waren deutlich unterschiedlich von den Früchten der vorliegenden Versuchsreihe. Der hohe Fehler von  $4,56^\circ\text{Brix}$  (45,17%) bei der zerstörungsfreien Analyse mit der vorjährigen Kalibrierung konnte durch zusätzliche stichprobenartige Messungen mit dem Refraktometer und einer entsprechenden Anpassung der Kalibrierung auf  $0,86^\circ\text{Brix}$  (8,57%) vermindert werden (**Bild 1**). Aus Versuchsreihen anderer Arbeitsgruppen und eigenen früheren Versuchsreihen bleibt jedoch zu erwarten, dass eine solche ständige Anpassung der Kalibrierung auch in Folgejahren notwendig sein wird. Dieses Verfahren ermöglicht jedoch bei geringem Aufwand die sehr schnelle (100 ms pro Einzelfruchtanalyse) zerstörungsfreie Qualitätsanalyse einer großen Anzahl von Früchten.

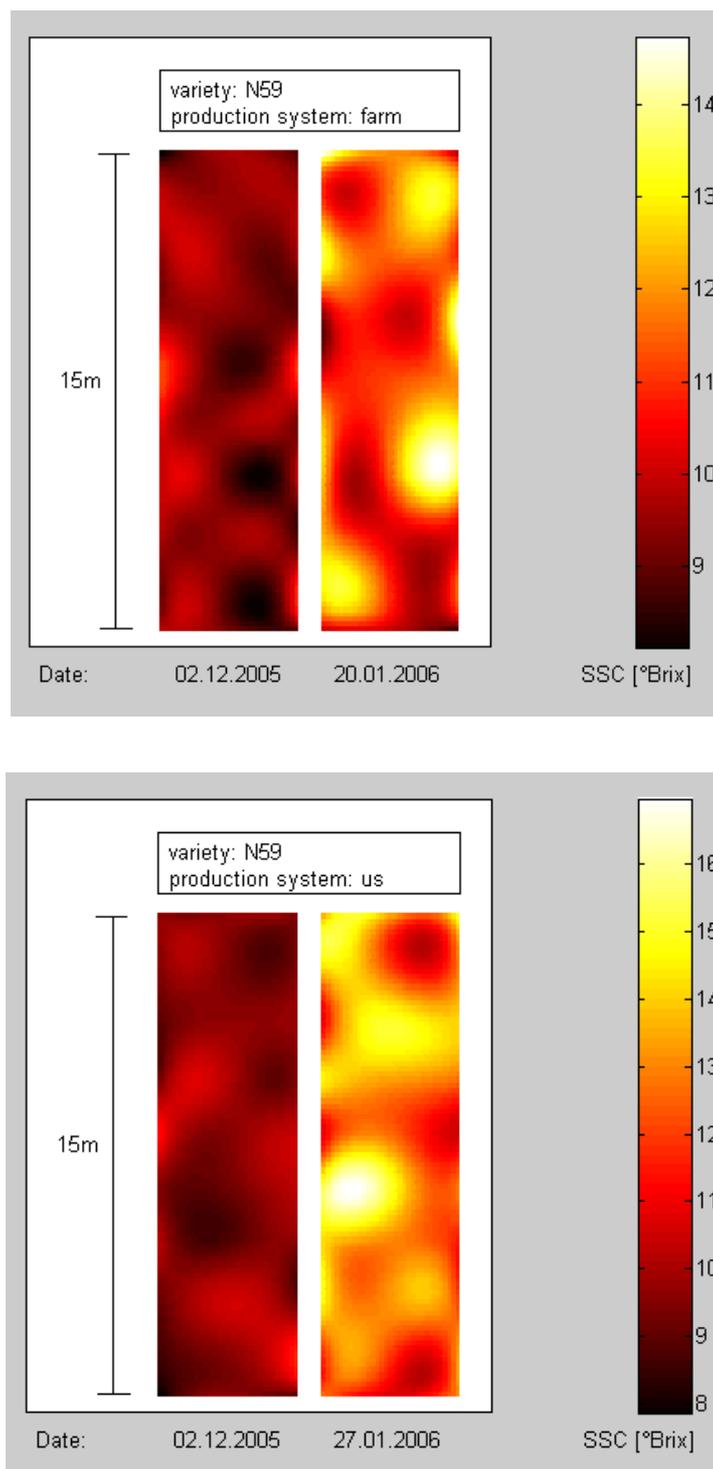


**Bild 2:** Beispiele von zwei neuen Sorten (C6 und N59), die hydroponisch unter einer Beschattung bzw. in einer konventionellen Obstanlage angebaut wurden. Die Veränderung der löslichen Trockensubstanz (SSC) ist im Verlauf der Fruchtentwicklung am Baum angegeben. Die Fehlerbalken zeigen die jeweilige Standardabweichung

Mit der angepassten Kalibrierung ermittelte Ergebnisse zeigten die Zunahme der löslichen Trockensubstanz [°Brix] im Verlauf der Fruchtentwicklung am Baum. Die neue Sorte C6 erreichte ihre maximale Qualität Anfang Dezember mit mittleren Werten zwischen 9,6 und 10,3 °Brix, während die neue Sorte N59 Anfang Januar erntereif war.



**Bild 3:** Beispielhafte Darstellung der Fruchtqualitätsunterschiede bei der neuen Sorte C6 in einem Areal des konventionellen Anbaus (farm) sowie im hydroponischen Anbau (us) an zwei Terminen



**Bild 4:** Beispielhafte Darstellung der Fruchtqualitätsunterschiede bei der neuen Sorte N59 in einem Areal des konventionellen Anbaus (farm) sowie im hydroponischen Anbau (us) an zwei Terminen

Während im Vorjahr sehr deutliche Unterschiede der Fruchtqualität bei derselben Sorte in unterschiedlichen Produktionssystemen festzustellen waren, wurde in der vorliegenden Saison ein verringerter Einfluss des Produktionssystems gemessen. Der genetische Einfluss der Sorten überwog deutlich. Wie schon im Vorjahr konnte kein eindeuti-

ger Trend in der Fruchtqualität im Vergleich der beiden Produktionssysteme festgestellt werden. Im gesamten Versuch erfolgten Messungen in beiden Systemen an sieben Sorten (hier nicht dargestellt), wovon fünf Sorten keinen signifikanten Unterschied in der Qualität in beiden Systemen aufwiesen.

In unterschiedlichen Teilflächen der Farm wurden Unterschiede der Fruchtqualität festgestellt. In den **Bilder 3** und **4** ist die Entwicklung der Fruchtqualität für zwei Termine flächenbezogen dargestellt. Solchermaßen erhobene Daten liefern den Produzenten wertvolle Informationen für die Durchführung von Produktionsmaßnahmen und für das Erntemanagement.

#### **4 Literatur**

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

**ZUDE M., LEE A., HEROLD B., KAPRIELIAN C. (2005):** Anwendung der Spektralanalyse für den Präzisions-Gartenbau am Beispiel einer Citrusanlage. *Bornimer Agrartechnische Berichte* 40: 118-123

**ZUDE M. (2005):** Innovation: Mit optischer Sensorik zerstörungsfrei die Fruchtreife und -qualität entlang der Versorgungskette bestimmen. *Fruchthandelsmagazin* 6: 44-45

## Detektion von Stressmerkmalen in Getreidebeständen mittels spektraler Entmischung

### *Spectral mixture analysis to detect unspecific stress in wheat crops*

Jonas Franke

Zentrum für Fernerkundung der Landoberfläche, Universität Bonn, Walter-Flex-Str. 3, 53113 Bonn,  
E-Mail: jonasfranke@uni-bonn.de

**Kurzfassung:** In der Präzisionslandwirtschaft wird eine teilschlagspezifische Applikation von Pflanzenschutzmittel angestrebt, wodurch eine ökonomische und ökologische Optimierung der Pflanzenproduktion erreicht werden kann. Die Fernerkundung bietet dabei die Möglichkeit, die raum-zeitliche Vitalitätsdynamik von Kulturpflanzenbeständen zu erfassen und kann somit als Entscheidungshilfe für teilschlagspezifische Maßnahmen herangezogen werden. In dieser Untersuchung wurde das Potential einer Methode der *spektralen Entmischung* (Matched Filtering) zur Erkennung und Quantifizierung von unspezifischem Pflanzenstress getestet, die unabhängig von *Ground Truth*-Informationen ist. Die dazu notwendige Referenzsignatur wurde, basierend auf pflanzenphysiologischen Annahmen bezüglich stress-bedingter Veränderung der Reflexionseigenschaften, synthetisch erzeugt.

**Deskriptoren:** Fernerkundung, spektrale Entmischung, Matched Filtering, Stress, Präzisionslandwirtschaft

**Summary:** *In the context of precision agriculture, the implementation of site-specific applications of agrochemicals is desirable that saves resources and reduces environmental damage. Remote Sensing is a useful tool to monitor the heterogeneity of crop vitalities within agricultural sites and thus provide decision support for site-specific management actions. This study examines the potential of a spectral mixture analysis (Matched Filtering), which is not depending on ground truth information, to detect unspecific crop stress with multispectral Remote Sensing. Therefore, synthetically created spectral signatures were used as reference, based on assumptions of plants physiological changes due to stress impact.*

**Keywords:** *Remote Sensing, spectral unmixing, Matched Filtering, stress, precision agriculture*

## 1 Einleitung

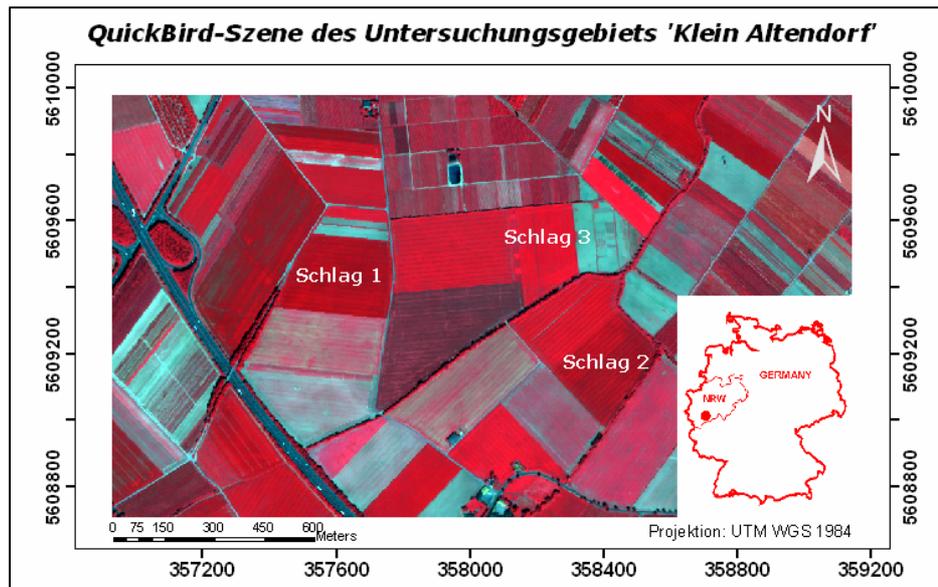
Teilschlagspezifische Landwirtschaft bedingt eine hohe zeitliche und räumliche Informationsdichte bezüglich der auftretenden Bedingungs- und Heterogenitäten. Bisherige visuelle Stichprobenverfahren im Gelände zur Erkennung teilschlagspezifischer Boden- und Pflanzenparameter können den Anforderungen der Präzisionslandwirtschaft nicht mehr gerecht werden. Die ‚Schlüsseltechnologien‘ Fernerkundung, Geographische Informationssysteme (GIS), Globale Positionierungssysteme (GPS) sowie präzise Applikationstechnologien ermöglichen die Erfassung und die angepasste Bearbeitung teilschlagspezifischer Heterogenitäten. Die Fernerkundung hat dabei das Potential, eine kontinuierliche Beobachtung landwirtschaftlicher Flächen mit hoher zeitlicher Frequenz zu ermöglichen (KÜHBAUCH & HAWLITSCHKA 2003). Eine wichtige Rolle im Präzisionslandbau kommt der Fernerkundung bei der Erkennung von Stressfaktoren in Pflanzenbeständen und somit bei jeglichen Pflanzenschutzmaßnahmen zu. Aufgrund der Heterogenität des Stresses ist die Fernerkundung durch ihre hohe räumliche und zeitliche Informationsdichte für diese Analyse prinzipiell geeignet. Einige in der Vergangenheit durchgeführte fernerkundliche Untersuchungen zielten bereits auf die Erkennung von Stressfaktoren ab (CARLSON *et al.* 1991, ESTEP *et al.* 1994, WYSE-PESTER *et al.* 1999, WEST *et al.* 2003, LAUDIEN *et al.* 2004, FRANKE *et al.* 2005, JACOBI & KÜHBAUCH 2005, SHAW & KELLEY 2005). Die mittels Fernerkundung gewonnenen Informationen können direkt als Entscheidungshilfe für Bewirtschaftungsmaßnahmen genutzt werden.

In der hier vorgestellten Untersuchung wurde das Potential einer Bildverarbeitungsmethode, eine spezielle Art der spektralen Entmischung, zur Quantifizierung von Vegetationsstress bzw. -anomalien in Getreide mit Hilfe multispektraler Fernerkundungsdaten getestet. Die spektrale Entmischung der Daten erfordert eine Referenzsignatur des zu beobachtenden Phänomens (endmember), dessen anteiliges Vorkommen im Bilddatensatz anschließend gefiltert werden soll. Dazu werden normalerweise Spektroradiometermessungen einer Referenzoberfläche herangezogen oder die Referenzsignatur wird anhand von Bildpixel erstellt, welche die gesuchte Oberfläche in ausreichendem Maße repräsentieren, wie es auch in bisher durchgeführten Untersuchungen der Stressdynamik in Pflanzenbeständen der Fall war (LELONG *et al.* 1998, DU *et al.* 2004, FITZGERALD *et al.* 2004). In beiden Fällen sind *Ground Truth*-Informationen notwendig, dessen Gewinnung häufig aufwendig und in manchen Fällen auch nicht möglich ist. Wünschenswert ist ein Verfahren, welches unabhängig von diesen Informationen, also völlig berührungslos, Aufschluss über das eventuelle Vorkommen eines gesuchten Oberflächentyps gibt. Daher wurde hier versucht, die Referenzsignatur zwar aus Bilddaten zu gewinnen, aber synthetisch, unter Berücksichtigung pflanzenphysiologischer Annahmen (wie verändert sich in der Regel eine spektrale Signatur von Vegetation durch Stresseinfluss), zu verändern. Dies ermöglichte eine Quantifizierung von Vegetationsanomalien/Vegetationsstress innerhalb eines landwirtschaftlichen Schlags, unabhängig von *Ground Truth*-Informationen.

## 2 Untersuchungsgebiet und Daten

Das Untersuchungsgebiet stellt das Versuchsgut „Klein Altendorf“ der Universität Bonn dar (50°37'N, 6°59'O, 175 m über N.N.). Es weist ein sehr flaches Relief auf und besitzt einen sehr einheitlichen Bodentyp (Luvisol aus Löss). Die landwirtschaftliche Bewirtschaftung dieses Gutes entspricht der für den Köln-Bonner-Raum typischen Bewirtschaftungsart mit den Hauptanbaufrüchten Zuckerrübe, Weizen und Gerste. Die Schlaggrößen des Versuchsgutes variieren zwischen 2 und 9 ha. Auf den hier untersuchten Schlägen wurde im Oktober 2004 Winterweizen (Schlag 1 und 2) und Wintergerste (Schlag 3) gesät. Auf den Flächen traten unterschiedliche Stressfaktoren auf, die während der gesamten Vegetationsperiode durch intensive Stress-Bonituren (z.B. Pathogen-befallene Blattfläche in %, Windwurf, Unkrautnester usw.) erfasst wurden. Während Schlag 1 und 3 betriebsüblich bewirtschaftet wurden, fand auf Schlag 2 ein Versuch mit differenzierter Fungizidbehandlung statt. Der Schlag wurde dabei in drei Teilparzellen mit unterschiedlicher Fungizidbehandlung gegliedert. Teilparzelle 1 wurde betriebsüblich zwei Mal behandelt, Teilparzelle 2 wurde nur einmal behandelt und auf der größten Teilparzelle 3 wurde keine Fungizidbehandlung durchgeführt. Somit konnten sich Pathogene in der dritten Teilparzelle des Schlags 2 natürlich und ungehindert ausbreiten.

Zur fernerkundungs-gestützten Analyse von Stress in Getreidebeständen wurde eine multispektrale QuickBird-Szene vom 20.06.2005 herangezogen. Diese Daten besitzen eine spektrale Auflösung von 4 Kanälen (blau, grün, rot und infrarot) bei einer hohen räumlichen Auflösung von 2,4 m. Die Vorprozessierung der QuickBird-Daten umfasste eine Atmosphärenkorrektur, welche mit dem Softwarepaket ATCOR3 durchgeführt wurde. Zur Validierung wurden Spektroradiometermessungen, die im Untersuchungsgebiet stattgefunden haben, herangezogen. Anschließend wurden die Daten unter Zuhilfenahme von DGPS-Messungen des Untersuchungsgebiets exakt geometrisch korrigiert (Software: ENVI 4.2), um den hohen Anforderungen des Präzisionspflanzenbaus an die räumliche Genauigkeit der Daten gerecht zu werden.



**Bild 1:** QuickBird-Szene des Untersuchungsgebiets Klein Altendorf in einer Falschfarbendarstellung (Kanal: R:4, G:3, B:2)

### 3 Methoden

In den bisher durchgeführten Untersuchungen der fernerkundungs-gestützten Stresserkennung in Kulturpflanzenbeständen wurden häufig Vegetationsindizes verwendet. Im Gegensatz dazu haben LELONG *et al.* (1998), DU *et al.* (2004) als auch FITZGERALD *et al.* (2004) den Vorteil der spektralen Entmischung hyperspektraler Fernerkundungsdaten zur Stressquantifizierung auf Subpixel-Ebene deutlich gemacht. Bei einer spektralen Entmischung werden im Gegensatz zu den Vegetationsindizes, die meist nur Informationen zweier Spektralkanäle nutzen, mehrere Spektralkanäle verwendet und somit ein höherer Informationsgehalt genutzt.

Eine spektrale Entmischung basiert auf der Annahme, dass jedes Pixel eine Kombination bzw. Mischung verschiedener Oberflächentypen (sog. endmember) repräsentiert, welche jeweils eine eigene charakteristische spektrale Reflexionssignatur besitzt. Im Idealfall setzt sich die Mischung eines Pixels aus einem gewichteten Mittel aller beteiligter endmember zusammen. Die Gewichtung bezieht sich dabei auf die Flächenanteile (Abundanzen) der endmember an der gesamten Pixelfläche (SCHOWENGERDT 1997). Die Methode der spektralen Entmischung ermöglicht, unter der Voraussetzung einer genauen Kenntnis der vorkommenden endmember inklusive ihrer spektralen Referenzspektren, eine Zerlegung des Reflexionsspektrums eines Pixels in seine unterschiedlichen Komponenten (ADAMS *et al.* 1985). Das Ergebnis einer spektralen Entmischung hängt in hohem Maße von der Charakteristik des Referenzspektrums ab. Die notwendigen Referenzspektren können entweder direkt aus dem Bild gewonnen werden, oder mit Hilfe von Spektrometermessungen der einzelnen Oberflächen erstellt werden.

Der Matched Filtering (MF)-Algorithmus stellt eine spezielle Art der spektralen Entmischung dar. Der Unterschied und auch der Vorteil des MF gegenüber der klassischen spektralen Entmischung ist, dass nur ein endmember bekannt sein muss. Es ist also eine „partielle“ Entmischung, wobei der Anteil des Referenzspektrums am Pixel ermittelt wird. Ähnlich zur klassischen Entmischung liefert das MF ein Graustufenbild (MF-fraction), welches den geschätzten Übereinstimmungsgrad zwischen dem Pixelspektrum und der Referenzsignatur repräsentiert. Je heller dabei ein Pixel dargestellt wird, umso höher ist der Anteil des endmembers am gesamten Pixelspektrum (WILLIAMS & HUNT 2002). Die Voraussetzung des MF ist ein minimum noise fraction (MNF)-transformiertes Bild.

Eine MNF-Transformation ordnet die Daten bezüglich des Informationsgehaltes durch eine Trennung vom Rauschanteil der Daten. Eine MNF-Transformation besteht aus einer zweistufigen Hauptkomponententransformation. Die erste Transformation ermittelt den Rauschanteil der Daten anhand der Kovarianzmatrix, die zweite Transformation ist eine übliche Hauptkomponententransformation, wodurch neue Kanäle erzeugt werden. Die ersten Kanäle höherer Datenqualität beinhalten dabei den Hauptanteil an Information. Der Datenraum dieser Kanäle ist verbunden mit hohen Eigenwerten. Die Kanäle mit geringen Eigenwerten beinhalten immer noch einen Signalanteil, jedoch erhöht sich auch die Dominanz des Rauschanteils (GREEN *et al.* 1988).

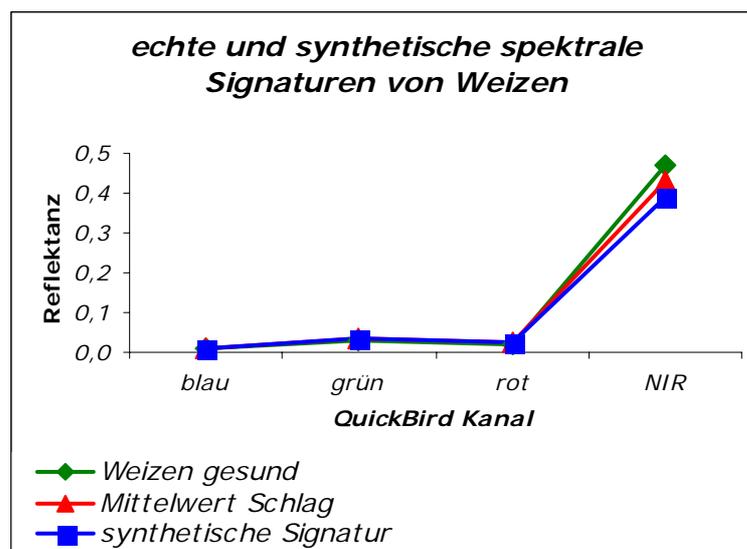
In der ersten Stufe der MNF-Transformation, wurde zunächst das Rauschen der Daten anhand homogener Flächen im Bilddatensatz geschätzt. Die zweite Transformation der MNF wurde danach lediglich für eine Teilfläche der QuickBird-Daten durchgeführt, nämlich genau für die jeweils zu untersuchenden Schläge. Damit wird gewährleistet, dass nur die statistische „Intra-Varianz“ der Schläge berücksichtigt wird und somit der Datenraum der Hauptkomponententransformation für die zu untersuchende Fläche optimiert wird, da andere hier unrelevante Oberflächentypen außerhalb der Schläge in der Statistik der Hauptkomponententransformation unberücksichtigt bleiben.

Um die Referenzsignaturen synthetisch erstellen zu können, ist eine genaue Betrachtung der pflanzenphysiologischen Auswirkungen von Stress auf die Vegetation notwendig. Wie in **Bild 2** zu erkennen ist, steigt die Reflexion grüner Vegetation im NIR sehr stark an. Da mit zunehmender Wellenlänge die Energie der elektromagnetischen Strahlung abnimmt, reicht die Energiemenge im nahen Infrarot (NIR) nicht mehr aus, um von der Vegetation zur Photosynthese genutzt werden zu können. Deshalb absorbieren die Chloroplasten nur 5% der einfallenden elektromagnetischen Strahlung im NIR, transmittieren 40% und reflektieren bis zu 55%. Diese Verteilung schwankt je nach Pflanzenart. Die Reflexionseigenschaften im NIR werden durch die interne Zellstruktur des Mesophylls und nicht mehr durch die Pigmente geprägt, wie dies im Spektralbereich des Sichtbaren der Fall ist (BEWARD 1990).

In der Vergangenheit wurden bereits typische Veränderungen des Reflexionsverhaltens gestresster Vegetation beobachtet und näher beschrieben. WEST *et al.* (2003) zeigt beispielsweise aufgrund einer Reduktion des Chlorophyllgehaltes der Pflanzen durch Pathogenbefall oder Stickstoffmangel, neben einer Beeinflussung der Reflexion im grünen und

roten Bereich des Spektrums, eine Abnahme der Reflexion im nahen Infrarot auf. Zudem findet bei Stress-bedingter Welkung der Pflanzen, wie zum Beispiel durch Pathogenbefall oder Wassermangel, aufgrund einer Abnahme des Wassergehaltes ebenfalls eine Veränderung der NIR-Reflexion (680-800 nm) statt. Während zu Beginn die Reflexionsrate eines Blattes steigt, da der Luftanteil im Zellinnern durch Wasserentzug größer wird, nimmt die Reflexion mit zunehmendem Alter der Pflanze ab, da die innere Zellstruktur zusammenfällt und dadurch der Luftanteil im Innern des Blattes reduziert wird. Dies führt dazu, dass das Reflexionsplateau des NIR abgeschwächt wird (BARRET & CURTIS 1982, BELWARD 1990). Diese reduzierte Reflexion im NIR tritt ebenfalls auf, wenn die Vegetation aufgrund von Stresseinflüssen eine geringere Bestandesdichte oder geringeren Blattflächenindex (LAI) aufweist (CARTER & KNAPP 2001, LORENZEN & JENSEN 1989). Es kann also festgehalten werden, dass sich jeglicher Stress in Pflanzenbeständen am deutlichsten durch eine Abnahme der Reflexion im NIR auszeichnet.

Diese Abschwächung der NIR-Reflexion wurde anhand von bekannten, von Stress beeinflussten Flächen eines Schlages im QuickBird-Datensatz ermittelt. Dabei wurden die spektralen Signaturen gestresster Vegetationsbereiche mit Signaturen vitaler Vegetation und mit der mittleren Signatur eines ganzen Schlages verglichen und festgestellt, dass gestresste Bereiche (im Vergleich zur mittleren Schlagsignatur) neben geringen Reflexionsveränderungen im sichtbaren Licht, vor allem eine Reduktion der NIR-Reflexion um ca. 10% aufweisen. Um gestresste und vitale Teilbereiche anderer Getreide-Schläge zu unterscheiden, wurde zunächst für jeden Schlag die mittlere spektrale Signatur aus den QuickBird-Daten ermittelt. Deren NIR-Wert wurde anschließend, aufgrund der beobachteten pflanzenphysiologischen Ausprägungen gestresster Vegetation, um 10% reduziert. Diese synthetisch erzeugten schlagspezifischen Signaturen, welche ebenfalls MNF-transformiert wurden, dienten als Referenzsignatur bei dem Matched Filtering (**Bild 2**).

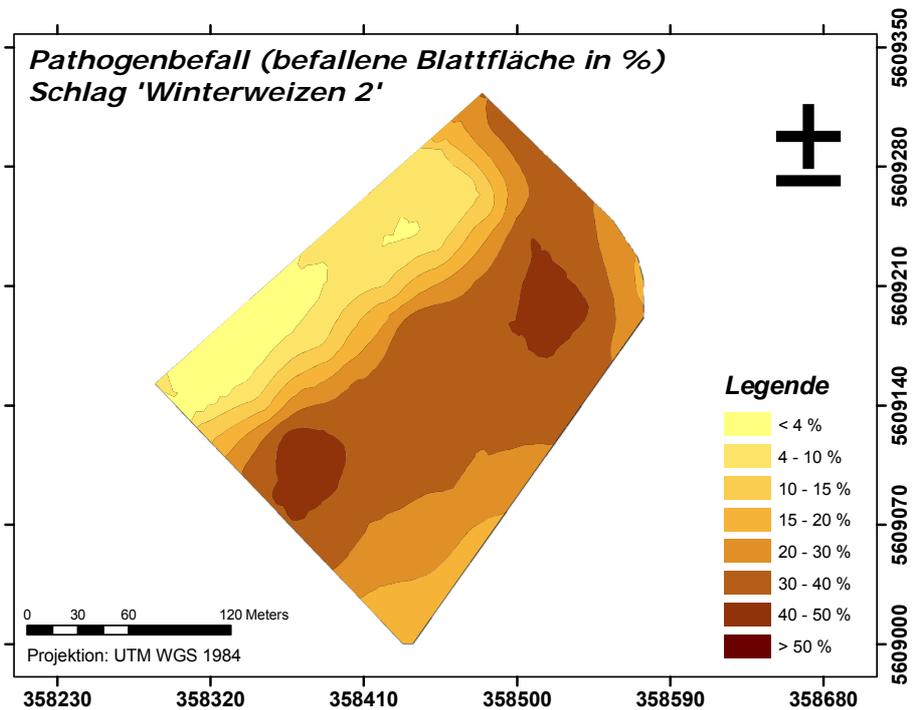
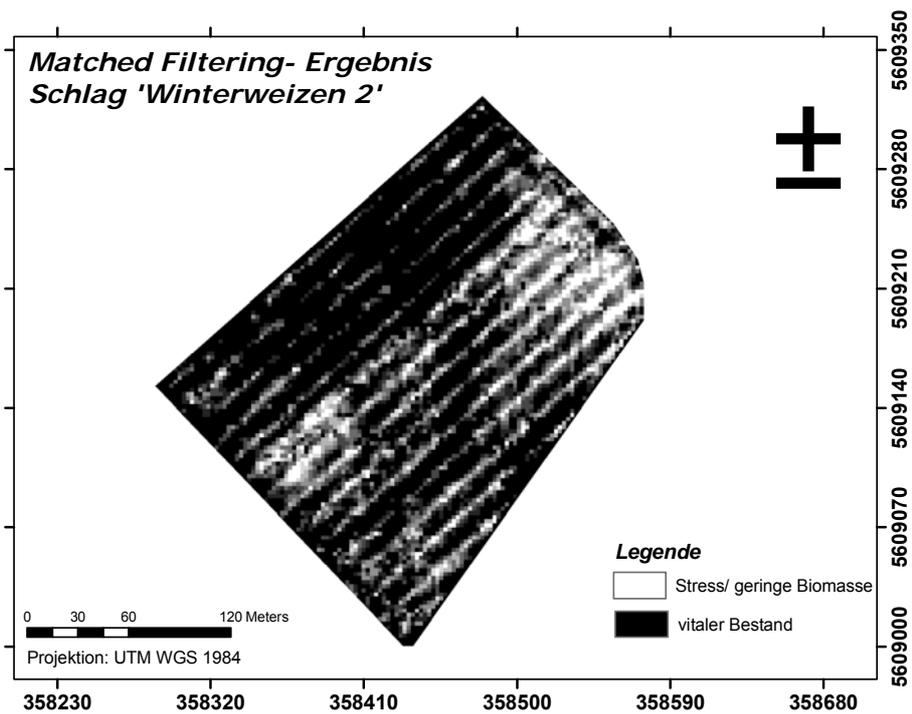


**Bild 2:** Beispiel für echte und synthetisch erzeugte spektrale Signaturen von Weizen (Schlag 2)

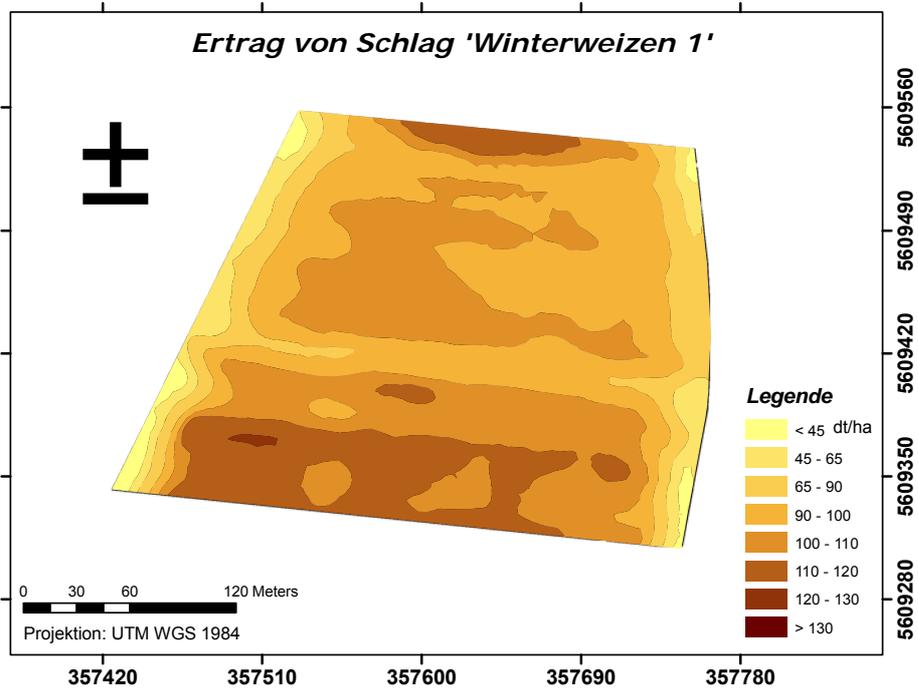
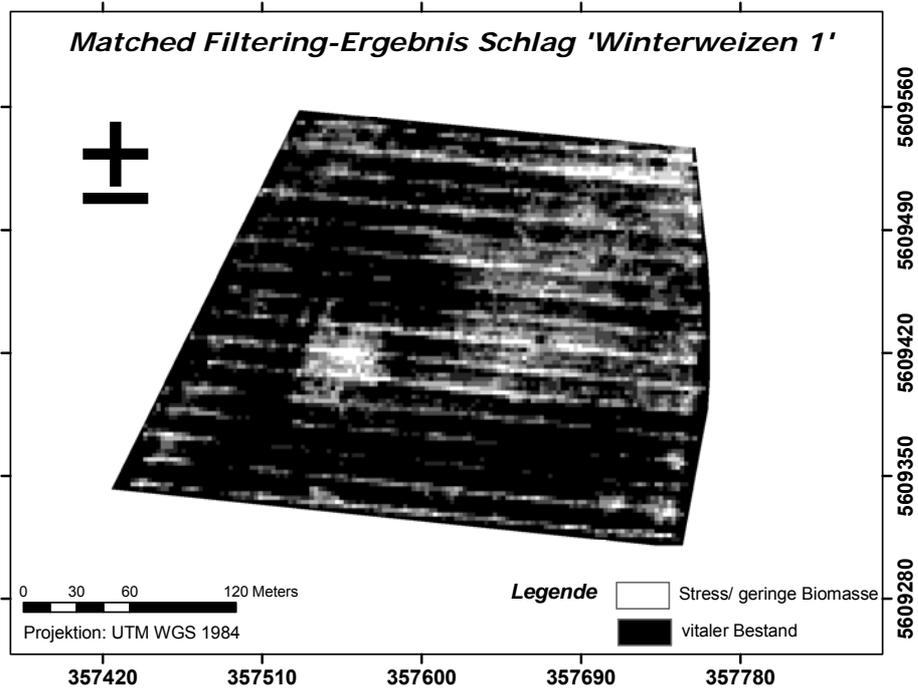
## 4 Ergebnisse

Die Ergebnisse des Matched Filterings der drei untersuchten Getreideschläge sind in **Bild 3a**, **4a** und **5a** zu sehen. Bei einer ersten visuellen Interpretation der spektral entmischten Bilder kann man deutlich teilschlagspezifische Unterschiede der Vitalität erkennen. Obwohl hier eine Ground-Truth unabhängige Detektionsmethode vorgestellt wird, waren zur Validierung dieser Methode detaillierte *Ground Truth*-Daten notwendig, die für Schlag 2 (Pathogen-Befallsgrad) des QuickBird-Aufnahmezeitpunktes zur Verfügung standen. Der rein visuelle Vergleich zwischen dem MF-Ergebnis und der interpolierten Pathogen-Befallskarte lässt schon gute Übereinstimmung gestresster und vitaler Bereiche im Schlag erkennen. Teilbereiche mit hohen MF-fraction-Werten (helle Pixel), was für eine hohe Wahrscheinlichkeit spricht, dass die Pixel durch die synthetisch erzeugte Referenzsignatur repräsentiert werden, decken sich mit Bereichen hoher Pathogen-Befallsgrade der interpolierten Boniturskarte. Um diesen Zusammenhang statistisch darzustellen, wurde die Korrelation zwischen den MF-fraction-Werten und den Befallsgraden (befallene Blattfläche in %) an den Boniturspunkten ermittelt. Dafür wurde für jeden der 54 Boniturspunkte ein 5m Puffer gewählt und alle darin befindlichen Werte beider Datensätze gemittelt und zur statistischen Auswertung herangezogen. Das Ergebnis zeigte für Schlag 2 eine positive Korrelation zwischen MF-fraction und Befallsgrad mit einem Pearson'schen Korrelationskoeffizienten von  $r = 0,7$ . Dieses Ergebnis lässt den Schluss zu, dass mit Hilfe einer synthetischen Referenzsignatur die spektrale Entmischung hier den tatsächlich vorhandenen Vegetationsstress gut wiedergibt.

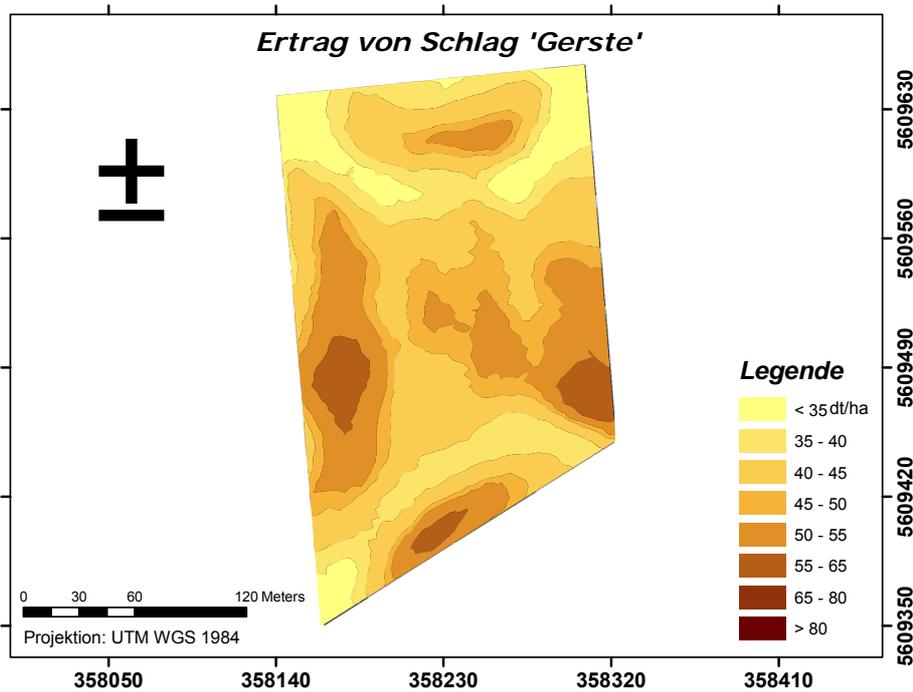
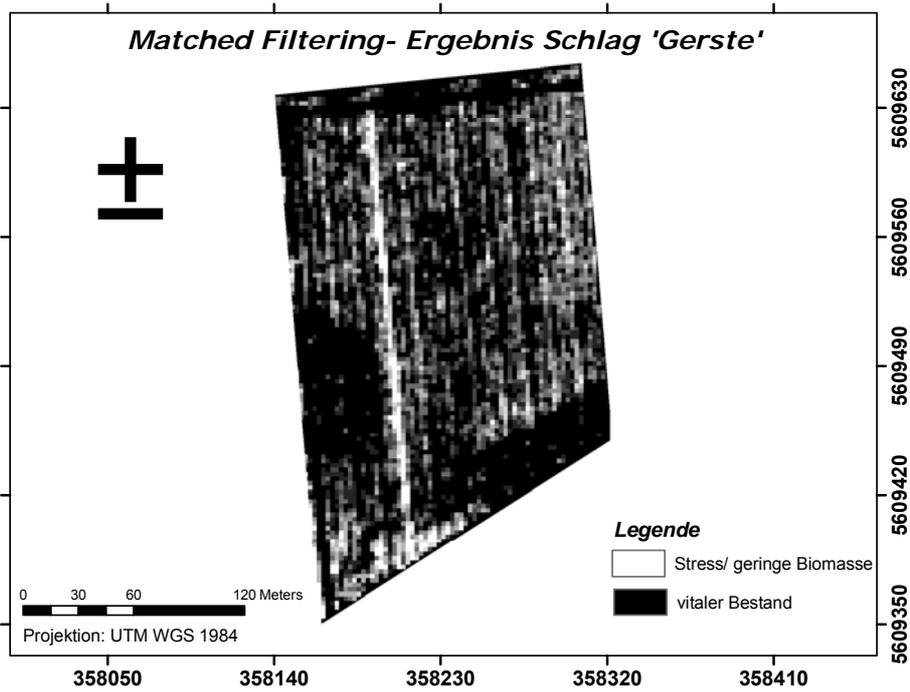
In Schlag 1 und 3, in denen kein Pathogen-Stress auftrat, wurde in erster Linie versucht, andere dort beobachtete Stressereignisse zu detektieren. In Schlag 1 kam es zu einem Auftreten eines Unkrautnestes, wohingegen in Schlag 3 Zonen geringer Bestandesdichten aufgrund von Aussaat-Unterschieden vorkamen. Wie in **Bild 4a** und **5a** zu erkennen ist, konnten diese Phänomene mittels hier vorgestellter Methode ebenfalls detektiert werden. Im Matched Filtering-Ergebnis von Schlag 1 ist deutlich ein runder Bereich hoher MF-fraction-Werte zu erkennen, was auf Stress bzw. geringe Biomasse schließen lässt. Dies war der Bereich in dem das Unkrautnest lokalisiert war. Der linienhafte, helle Bereich des MF-fraction-Ergebnisses von Schlag 3 (**Bild 5a**) korrespondierte mit dem Bereich geringer Biomasse aufgrund einer Aussaat-Anomalie. Obwohl Ertragsdaten nur bedingt zur Validierung der Stressdetektion geeignet sind, da Stress zwar einen starken Einfluss auf den Ertrag hat, jedoch Stress den Ertrag über die gesamte Wachstumsperiode beeinflusst, waren hier trotzdem gute Übereinstimmungen zu erkennen (**Bild 4b** und **5b**). Die zwei beobachteten Vegetationsanomalien in den Schlägen, welche durch die spektrale Entmischung detektiert wurden, hatten negativen Einfluss auf den Ertrag. Neben den erwähnten beobachteten Anomalien, detektierte die spektrale Entmischung zudem weitere Bereiche verringerter Biomasse/ erhöhtem Stress, die sich auch teilweise durch verringerten Ertrag in der Ertragskarte wieder fanden.



**Bild 3 a/b:** Matched Filtering-Ergebnis der QuickBird-Daten von Schlag 2 und interpolierte Boniturkarte der Pathogen-Befallsstärke (befallene Blattfläche in %) vom 20.06.2005.



**Bild 4 a/b:** Matched Filtering-Ergebnis der QuickBird-Daten von Schlag 1 vom 20.06.2005 und interpolierte Ertragskarte.



**Bild 5 a/b:** Matched Filtering-Ergebnis der QuickBird-Daten von Schlag 3 vom 20.06.2005 und interpolierte Ertragskarte.

## 5 Diskussion und Ausblick

In dieser Untersuchung ermöglichte die Verwendung synthetisch erzeugter endmember zur spektralen Entmischung von Fernerkundungsdaten eine Lokalisierung und Quantifizierung von Stress in Getreidebeständen. Die auf pflanzenphysiologischen Annahmen beruhende Veränderung spektraler Referenzsignaturen repräsentierte in ausreichendem Maße die des gestressten Getreides, wodurch mittels Matched Filtering teilschlagspezifische Vegetationsanomalien detektiert werden konnten. Als Basis für die synthetischen Referenzsignaturen diente dazu die mittlere Signatur des Schlages, was sich hier als effektive Grundlage herausgestellt hat. Dies könnte allerdings das Entmischungsergebnis in Ausnahmefällen negativ beeinflussen. Wenn beispielsweise die Vitalitätsheterogenität eines Schlages noch extremer ausfällt als in Schlag 2, würden extrem gestresste Bereiche, deren NIR-Reflexion deutlich unter der der synthetischen Referenzsignatur liegt, unberücksichtigt bleiben, da die Referenzsignatur diese Bereiche nicht ausreichend repräsentiert. Bei einem sehr homogenen Schlag hingegen, würden die Bereiche der Fahrspuren und des Vorgewendes durch die spektrale Entmischung ausgewiesen werden, da dort erfahrungsgemäß geringere Biomasse als im Mittel vorhanden ist.

In den meisten Fällen stellt die hier vorgestellte Methode ein einfaches Werkzeug zur Erkennung unspezifischen Vegetationsstresses oder Vegetationsanomalien dar, welches unabhängig von *Ground Truth*-Informationen ist. Diese berührungslose Detektion teilschlagspezifischer Anomalien der Getreidevitalität könnte als Entscheidungshilfe für teilschlagspezifisches Management dienen, wobei in detektierten Bereichen landwirtschaftliche Korrekturen durchgeführt werden könnten bevor stress-bedingte Ertragsverluste auftreten.

In kommenden Studien soll geklärt werden, ob diese Methode zum einen auf andere Fruchtarten und zum anderen auf andere Aufnahmezeitpunkte übertragen werden kann. Zudem soll geklärt werden, wie sich Referenzsignaturen mit anderen Veränderungen als die mit um 10% reduzierter NIR-Reflexion auf das Detektionsergebnis auswirken.

## 6 Literatur

**ADAMS J.B., SMITH M.O., JOHNSON P.E. (1985):** Spectral mixture modeling: a new analysis of rock and soil types at the Viking Lander I site. *Journal of Geophysical Research* 91: 8098-8112

**BARRET E.C., CURTIS L.F. (1982):** Introduction to Environmental Remote Sensing, Second Edition. London, New York

**BELWARD A.S. (1990):** Spectral characteristics of vegetation, soil and water in the visible, near-infrared and middle- infrared wavelengths. *Remote Sensing and Geographical Information Systems for Resource Management in Developing Countries*: 31-54

**CARLSON T.N., BELLES J.E., GILLIES R.R. (1991):** Transient water stress in a vegetation canopy: Simulations and measurements. *Remote Sensing of Environment* 35: 175-186

- CARTER G.A., KNAPP A.K. (2001):** Leaf optical properties in higher plants: linking spectral characteristics to stress and chlorophyll concentration. *American Journal of Botany* 88: 677-684
- DU Q., FRENCH J. V., SKARIA M., YANG C., EVERITT J. H. (2004):** Citrus pest stress monitoring using airborne hyperspectral imagery. *IEEE Conf.Proc.International Geoscience and Remote Sensing Symposia 2004*
- ESTEP L., TERRIE G., DAVIS B. (2004):** Crop stress detection using AVIRIS hyperspectral imagery and artificial neural networks. *International Journal of Remote Sensing* 25: 4999-5004
- FITZGERALD G.J., MAAS S.J., DETAR W.R. (2004):** Spider mite detection and canopy component mapping in cotton using hyperspectral imagery and spectral mixture analysis. *Precision Agriculture* 5: 275-289
- FRANKE J., MENZ G., OERKE E.-C., RASCHER U. (2005):** Comparison of multi- and hyperspectral imaging data of leaf rust infected wheat plants. *Conf. Proc. of SPIE- European Remote Sensing Symposium*
- GREEN A.A., BERMAN M., SWITZER P., CRAIG M.D. (1988):** A transformation for ordering multispectral data in terms of image quality with implications for noise removal. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 26: 65-74
- JACOBI J., KÜHBAUCH W. (2005):** Site-specific identification of fungal infection and nitrogen deficiency in wheat crop using remote sensing. *Proceedings of the 5th European Conference on Precision Agriculture*: 73-80
- KÜHBAUCH W., HAWLITSCHKA S. (2003):** Remote sensing - a future technology in precision farming. *Proceedings of the Workshop POLinSAR 2003*
- LAUDIEN R., BARETH G., DOLUSCHITZ R. (2004):** Comparison of remote sensing based analysis of crop diseases by using high resolution multispectral and hyperspectral data - case study: *Rhizoctonia Solani* in sugar beet. *Geoinformatics 2004. Proc.12<sup>th</sup> International Conference on Geoinformatics*: 670-676
- LELONG C.C.D., PINET P.C., POILVÉ H. (1998):** Hyperspectral Imaging and Stress Mapping in Agriculture: A Case Study on Wheat in Beauce (France). *Remote Sensing of Environment* 66: 179-191
- LORENZEN B., JENSEN A. (1989):** Changes in leaf spectral properties induced in barley by cereal powdery mildew. *Remote Sensing of Environment* 27: 201-209
- SCHOWENGERDT R. (1997):** Remote Sensing, models and methods for image interpretation. San Diego
- SHAW D., KELLEY F. (2005):** Evaluating Remote Sensing for determining and classifying soybean anomalies. *Precision Agriculture* 6: 421-429
- WEST J.S., BRAVO C., OBERTI R., LEMAIRE D., MOSHOU D., MCCARTNEY H.A. (2003):** The potential of optical canopy measurement for targeted control of field crop diseases. *Ann. Rev. Phytopathol.* 41: 593-614
- WILLIAMS A.M., HUNT JR. E.R. (2002):** Estimation of leafy spurge from hyperspectral imagery using mixture tuned matched filtering. *Remote Sensing of Environment* 82: 446-456
- WYSE-PESTER D., WESTRA P., WILES L.J. (1999):** Spatial sampling and analysis of crop pests in a center pivot corn field. *Precision Agriculture* 99: 485-494

## Spektrale Messung zur Beurteilung von Reife und Lagerfähigkeit bei Apfel

### *Spectral measurement of maturity and shelf life of apple fruit*

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

**Kurzfassung:** Nicht-destruktive spektraloptische Messungen erlauben die kontinuierliche Überwachung von mit der Reife einher gehenden Veränderungen der Früchte sowohl während der Entwicklung am Baum als auch nach der Ernte. Insbesondere könnte die Charakteristik der Chlorophyllabnahme geeignet sein, um die Lagereigenschaften bei Apfel zu quantifizieren. Untersuchungen erfolgten an Früchten der Sorten 'Elstar', 'Pinova' und 'Topaz' mit einem tragbaren Miniaturspektrometer unter Auswertung des Red-edge um 690 nm zu drei Ernte- und zwei Lagerungszeitpunkten. Im Verlauf der Lagerung verhalten sich die Werte von Fruchtfleischfestigkeit und Red-edge sortentypisch unterschiedlich. Um die Eignung der spektralen Messung zur Bestimmung der Lagereigenschaften zu bewerten, sind weitere Tests unumgänglich.

**Deskriptoren:** Spektrometrie, Red-edge, Chlorophyllgehalt, Fruchtreife, Lagerfähigkeit

**Summary:** *Non-destructive spectral measurements enable to continuously monitor changes on fruits caused by maturity progress on the tree as well as in post-harvest period. Particularly, the characteristics of chlorophyll decrease could be suited to quantify the storage properties of apple fruit. Studies were carried out on the cultivars 'Elstar', 'Pinova' and 'Topaz' by using a portable miniaturized spectrometer and estimation of the red-edge criterion near 690 nm at three harvest and storage dates. During the storage period the values of fruit firmness and red-edge show cultivar specific behaviour. To evaluate the suitability of spectral measurement for determination of shelf life, further tests are necessary.*

**Keywords:** *Spectrometry, red-edge, chlorophyll content, fruit maturity, shelf life*

## 1 Einführung

Erntereife und Haltbarkeit von Äpfeln werden konventionell durch Tests an Hand von Stichproben gepflückter Früchte ermittelt. Für die Erntereife ist es wichtig, dass die Fruchtentwicklung einen Zustand erreicht hat, wo die Umsetzung von Stärke zu Zucker deutlich eingesetzt hat, um die Ausprägung der geschmacklichen Qualitätsmerkmale zu gewährleisten. Um eine ausreichende Lagerfähigkeit zu sichern, müssen die Früchte eine genügende Festigkeit aufweisen. Darüber hinaus gibt es weitere physiologische und für die Qualität wichtige Merkmale, die mit den vorgenannten Parametern im Zusammenhang stehen. Beispielsweise ist der Chlorophyllgehalt ein Parameter, dessen Abnahme mit fortschreitender Reife durch das bekannte Aufhellen der Grundfarbe (oder auch Farbumschlag grün/gelb) wahrgenommen wird.

Der Chlorophyllgehalt bei Pflanzen und Pflanzenteilen kann schnell und nichtdestruktiv aus spektrometrischen Messungen durch Bestimmung des sogenannten Red-edge abgeleitet werden (LICHTENTHALER *et al.* 1996, MERZLYAK *et al.* 2003, HEROLD *et al.* 2005). Die Zusammenhänge zwischen den spektrometrischen Parametern und den destruktiv ermittelten Parametern zur Charakterisierung der Reife und Lagerfähigkeit bei Apfel sind jedoch noch wenig untersucht, so dass die praktische Umsetzung dieser aussichtsreichen Messmethode noch gehemmt wird.

Die technischen Voraussetzungen für die Durchführung spektrometrischer Messungen an Früchten während ihrer Entwicklung am Baum sind zur Zeit weitgehend vorhanden. Jedoch liegen die Kosten für die Anschaffung eines für die Praxis geeigneten Geräts gegenwärtig noch deutlich über der Akzeptanzgrenze der Erzeuger und Händler für frisches Obst und Gemüse.

Deshalb wird im Rahmen der agrartechnischen Forschung das Anwendungspotenzial dieser Methode weiter untersucht. Eine Frage galt der Aussagefähigkeit spektrometrischer Messungen über den Zusammenhang von Erntetermin und Lagerverhalten bei unterschiedlichen Apfelsorten.

## 2 Material und Methoden

Untersuchungen erfolgten an Äpfeln aus kommerzieller Produktion. Der Anbaustandort befand sich im Raum Werder bei Berlin auf leichtem Boden mit Tropfenbewässerung in einer leicht nach Nordwest abfallenden Geländelage. Drei Sorten waren in den Versuch im Jahre 2005 einbezogen: 'Elstar', 'Pinova' und 'Topaz'. Geerntet wurde zu drei Terminen: 'Elstar' am 20.09., 26.09. und 04.10., 'Pinova' und 'Topaz' am 20.09., 29.09. und 10.10., getrennt nach einer etwas höher gelegenen (oben) und einer tiefer gelegenen (unten) Position der Apfelanlage. Nach der Messung wurden die geernteten Früchte in Steigen gelegt und in ein Normal-Kühlager gebracht. Parallele Proben wurden für Laboranalysen bereitgestellt. Die gelagerten Proben (n = 30) wurden jeweils hälftig zu zwei Termi-

nen im Zeitraum November bis Februar wieder ausgelagert, erneut gemessen und abschließend im Labor analysiert.

Alle Proben wurden nichtdestruktiv mittels tragbarem Spektrometer (TRUPPEL 2003, HEROLD *et al.* 2005) geprüft. Aus den Spektraldaten wurden die Red-edge Werte ermittelt, und als Vergleichsparameter der Laboranalyse wurde die Fruchtfestigkeit bestimmt. Bei beiden Methoden wurde je Frucht nur ein Messwert bestimmt, und die Messorte auf der Fruchtoberfläche waren jeweils willkürlich ausgewählt.



**Bild 1:** Ansicht eines Teils der Apfelanlage; rechts im Bild ist die Durchführung der spektralen Messung während der Fruchtentwicklung am Baum zu sehen

### 3 Ergebnisse und Diskussion

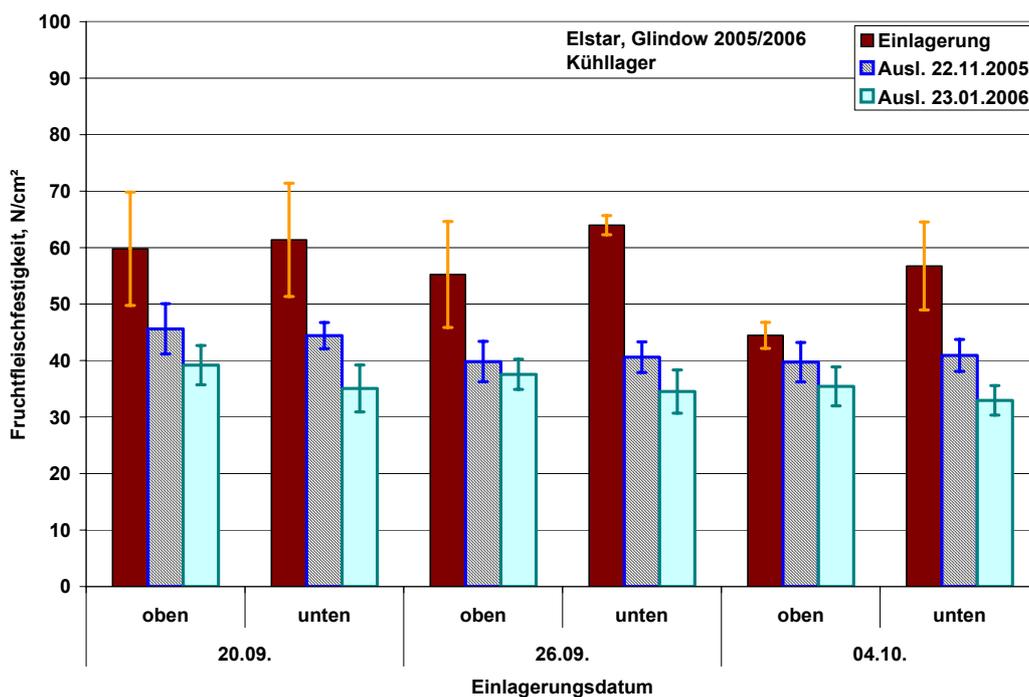
Nach dem Stand des Wissens ist mit fortschreitender Fruchtreife grundsätzlich eine Abnahme der Werte sowohl des Red-edge als auch der Fruchtfestigkeit festzustellen. Diese Tendenz wurde durch die vorliegenden Messungen im wesentlichen bestätigt. Eine Übersicht über die wichtigsten Ergebnisse liefert **Tabelle 1**. Am auffälligsten waren die Unterschiede zwischen den einzelnen Sorten. Zum ersten Einlagerungstermin waren die Chlorophyllgehalte (Red-edge) am höchsten mit 700 nm bei 'Pinova' und am niedrigsten mit 695 nm bei 'Elstar', während die Festigkeitswerte bei 'Topaz' mit 93 N/cm<sup>2</sup> am höchsten und bei 'Elstar' mit 60 N/cm<sup>2</sup> am niedrigsten lagen.

**Tabelle 1:** Übersicht über die Mittelwerte der Fruchtfestigkeit und des Red-edge von Früchten zu verschiedenen Terminen der Ein- und Auslagerung (Mittelung über die obere und untere Position der Anlage)

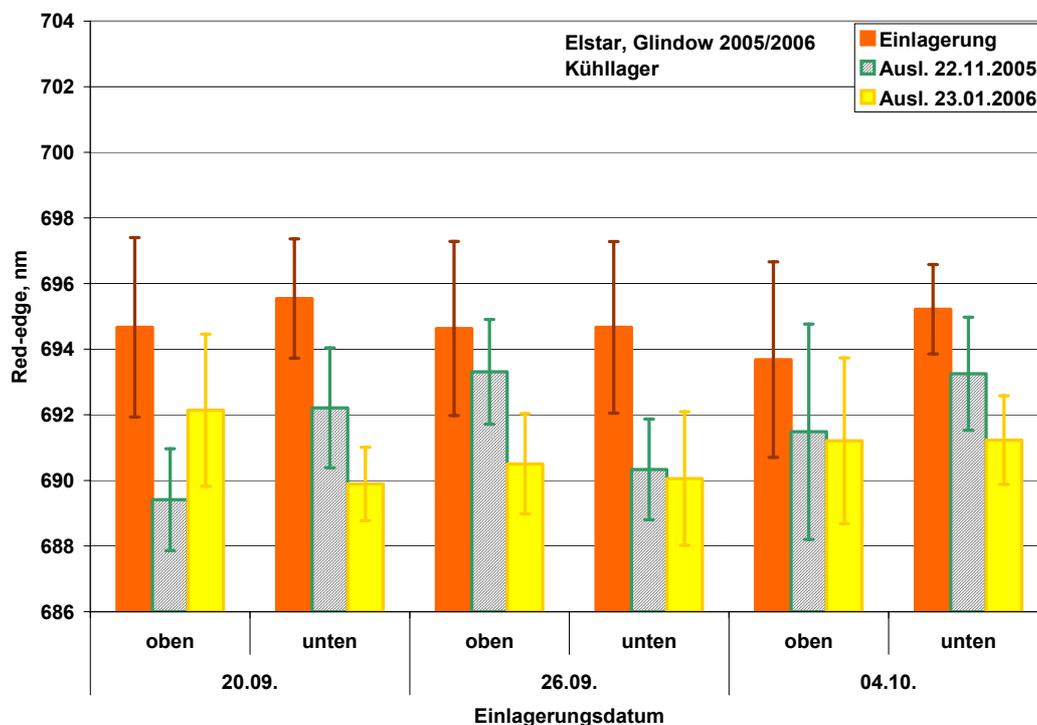
Sorte	Fruchtfestigkeit, N/cm <sup>2</sup>						Red-edge, nm					
	erste Einlagerung			letzte Einlagerung			erste Einlagerung			letzte Einlagerung		
	Einl.	1. Ausl.	2. Ausl.	Einl.	1. Ausl.	2. Ausl.	Einl.	1. Ausl.	2. Ausl.	Einl.	1. Ausl.	2. Ausl.
Pinova	76	65	56	71	61	56	700	695	694	693	689	689
Topaz	93	59	53	83	67	58	697	692	691	692	688	688
Elstar	60	45	37	50	40	34	695	691	691	694	692	691

Die Festigkeit fiel bei 'Elstar' schon bis zum ersten Auslagerungstermin bis auf 40 N/cm<sup>2</sup> und dann noch weiter (**Bild 2**). Diese niedrigen Werte deuten darauf hin, dass die Erntetermine für eine Lagerung schon zu spät gewählt waren. Die korrespondierenden Red-edge Werte lagen zum ersten Auslagerungstermin bei 692 nm und bewegten sich weiter bis 691 nm. Im Normal-Kühllager fielen die Festigkeitswerte bei 'Topaz' relativ rasch auf Werte von nahe 60 N/cm<sup>2</sup> zum ersten und auf minimal 53 N/cm<sup>2</sup> zum zweiten Auslagerungstermin Ende Januar. Bei 'Pinova' verlief der Abfall der Festigkeit flacher und erreichte Anfang Februar Werte von 56 N/cm<sup>2</sup>.

Der Red-edge zeigte bei 'Elstar' keine so klare Tendenz wie die Festigkeitswerte (**Bild 3**). Der Rückgang verlief sehr flach, was auf einen weitgehend abgeschlossenen Chlorophyllabbau hinweisen könnte. Jedoch traten insgesamt erhebliche Schwankungen in den Messdaten auf, was eher als Hinweis gelten könnte, die Probenahme und die Messdurchführung besser zu standardisieren. Die Red-edge Werte von 'Topaz' bewegten sich von maximal 697 nm zur ersten Einlagerung bis auf minimal 688 nm, und ebenfalls bei 'Pinova' war eine deutlichere Abnahme von maximal 700 nm auf minimal 689 nm festzustellen.



**Bild 2:** Veränderung der Festigkeitswerte bei 'Elstar' in Abhängigkeit von Position in der Anlage und Ernte- und Auslagerungstermin (Mittelwerte und Standardabweichungen, n = 15 bei Ernte)



**Bild 3:** Veränderung der Red-edge Werte bei 'Elstar' in Abhängigkeit von Position in der Anlage und Ernte- und Auslagerungstermin (Mittelwerte und Standardabweichungen, n = 30 bei Ernte)

Im Rahmen dieser Darstellung wurden keine Untersuchungen zu signifikanten Differenzen vorgenommen. Jedoch deuten die hohen Standardabweichungen darauf hin, dass zwar Tendenzen, aber nicht immer gesicherte Unterschiede zwischen den unterschiedlichen Varianten nachweisbar sind.

Innerhalb der einzelnen Sorte sind vergleichbare Tendenzen zwischen spektralen und Festigkeitswerten erkennbar, die sich möglicherweise für eine nichtdestruktive Bewertung der Lagerfähigkeit ausnutzen lassen. Jedoch kann auf Grund der absoluten Red-edge Werte kein Vergleich zwischen unterschiedlichen Sorten vorgenommen werden. Ebenso muss mit einem Einfluss weiterer Faktoren gerechnet werden, die bisher noch nicht erfasst werden konnten.

Für gesicherte Aussagen sind weitere Untersuchungen mit verbesserter Probenahme und insbesondere mit zuordenbarer Festlegung der Messstellen für die spektrale und die Festigkeitsmessung erforderlich.

#### **4 Schlussfolgerungen**

Spektrale Messungen lassen sich schnell und nichtdestruktiv durchführen und bieten deshalb große Vorteile gegenüber konventionellen destruktiven Prüfmethoden.

Die Auswertung des charakteristischen Wellenlängenbereichs der Chlorophyllabsorption und Bestimmung des Red-edge ist grundsätzlich geeignet, den Verlauf der Reifeentwicklung bei Apfel widerzuspiegeln. Vergleichsuntersuchungen mit Fruchtfestigkeitswerten bestätigten dies zumindest tendenziell. Damit kann der Messung von Red-edge Werten ein hohes Potenzial zur Beurteilung der Erntereife und Lagerfähigkeit bescheinigt werden.

Jedoch sind sortenspezifische Unterschiede festzustellen, die auf die Verwendbarkeit innerhalb einer einzelnen Sorte hinweisen, jedoch den direkten Vergleich unterschiedlicher Sorten an Hand von Absolutwerten erschweren.

In jedem Fall wird die Auswahl repräsentativer Stichproben entscheidenden Einfluss auf die Qualität und Aussagefähigkeit der Messdaten haben und ist deshalb sehr sorgfältig vorzunehmen.

Durch die schnellere spektrale Messung wird eine umfangreichere Probenahme und daher auch eine treffsichere Bewertung der Früchte möglich.

Bei der Messdurchführung ist die hohe Variabilität des Fruchtmaterials auch innerhalb der Einzelfrucht zu beachten. Eine standardisierte Vorgehensweise einschließlich der Zuordnung der Messstellen für die Festigkeit und die spektrale Messung an der Frucht ist daher dringend zu empfehlen.

## 5 Literatur

- HEROLD B., TRUPPEL I., ZUDE M., GEYER M. (2005):** Erfassung der Variabilität der Fruchtentwicklung bei Apfel mittels Spektrometer. Bornimer Agrartechnische Berichte, 40: 41-53
- LICHTENTHALER H.K., GITELSON A., LANG M. (1996):** Non-destructive determination of chlorophyll content of leaves and an aura mutant of tobacco by reflectance measurements. J. Plant Physiology, 148: 483-493
- MERZLYAK M.N., SOLOVCHENKO A.E., GITELSON A.A. (2003):** Reflectance spectral features and nondestructive estimation of chlorophyll, carotenoid and anthocyanin content in apple fruit. Postharvest Biology and Technology, 27: 197-211
- TRUPPEL I. (2003):** tragbares funkangekoppeltes Minispektrometer. Bornimer Agrartechnische Berichte, 34: 56-69

## **Einzelpflanzenerkennung zur automatischen Maschinensteuerung**

### ***Single plant detection for automatic machine control***

Oliver Schmittmann, Lutz Damerow

Institut für Landtechnik der Rheinischen Friedrich-Wilhelms Universität Bonn,  
Nussallee 5, 53115 Bonn

E-Mail: o.schmittmann@uni-bonn.de; damerow@uni-bonn.de

**Zusammenfassung:** Zur automatischen pflanzenindividuellen Steuerung von Landmaschinen sind schnelle und genaue Einzelpflanzenerkennungssysteme erforderlich.

Da bildgebende Verfahren dieses aufgrund ihrer Komplexität noch nicht bieten, sind zwei alternative Systeme entwickelt worden: Reflexionstaster zur vertikalen und Lichtschrankensysteme zur horizontalen Detektion. Diese Verfahren beruhen auf industriell erprobter und robuster Technik und lassen sich in Kombination mit einer einfachen Signalaufbereitung nutzen.

**Deskriptoren:** Reflexionstaster, Lichtschrankensysteme, Pflanzenerkennung, Präzisionslandwirtschaft

**Summary:** *For plant-specific control of farm machinery fast and accurate systems for detection of each single plant are important. Due to their complexity image processing systems are currently not able to achieve this. For this reason two alternate systems have been developed: a reflection sensor for vertical detection and a light barrier system for horizontal detection. Both systems contain robust and industrially proven techniques which can be used in combination with simple signal processing.*

**Keywords:** *reflection sensor, light barrier systems, plant detection sensors, precision farming*

## 1 Einleitung

Automatische Reihensteuerungssysteme für Anbaugeräte bzw. deren Werkzeugsteuerung erfordern einen Regelkreis bestehen aus einer schnell und exakt arbeitenden Sensorik, die der sicheren Erkennung der Pflanzenreihe sowie der Einzelpflanze dient, und einer entsprechenden Aktorik zur Umsetzung der erforderlichen Verstellereignisse. Moderne, auf Bildanalyse basierende Systeme würden eine elegante Lösung darstellen, weisen aber zur Zeit keine ausreichende Qualität auf. Aufgrund der zu hohen Auswertegeschwindigkeit und der zu geringen Genauigkeit durch Fehlinterpretationen, sind diese Verfahren für die Steuerung von Maschinen bedingt geeignet. Ökonomische Nachteile für den Praxiseinsatz ergeben sich dadurch, dass bei mehrreihigen Maschinen pro Reihe ein komplettes Pflanzenerkennungssystem installiert werden muss, wodurch sehr hohe Kosten entstehen würden.

## 2 Stand der Technik und Systemanalyse

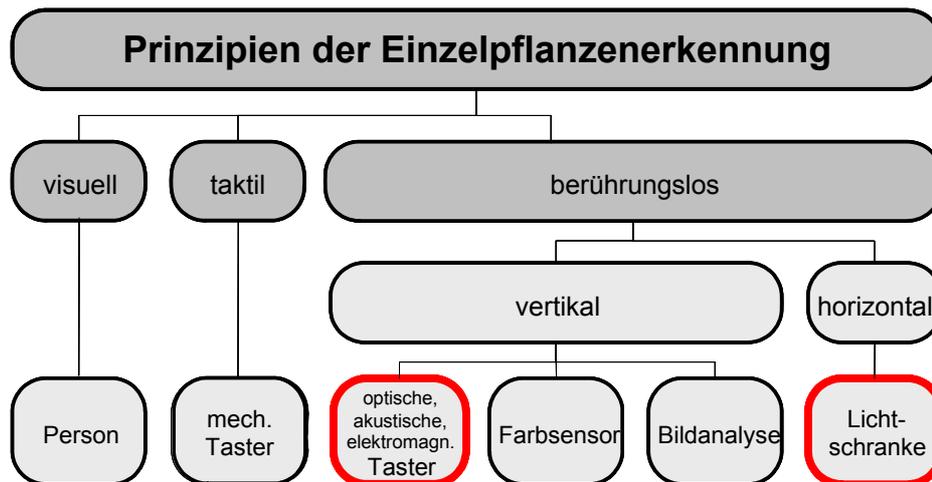
In **Bild 1** ist eine Systematisierung der möglichen Ansätze dargestellt. Visuelle und taktile Verfahren zur Reihensteuerung sind etabliert, zur Umsetzung einer Einzelpflanzenerkennung jedoch nicht praktikabel.

Berührungslose oder nicht taktile Verfahren sind hier besser geeignet und zeichnen sich dadurch aus, dass es nicht zu Beeinträchtigungen der Pflanze kommen kann.

Bildgebende Systeme zur Steuerung der gesamten Maschine anhand einer Reihe sind bereits im Einsatz, ermöglichen aber nicht die unabhängige Steuerung der einzelnen Werkzeuge pro Pflanzenreihe und Pflanze.

Vertikal arbeitende Sensoren müssen in einem definierten Abstand zur Bodenoberfläche installiert werden. Befinden sich Pflanzen im Messbereich, werden diese erkannt. Horizontale Sensoren haben den Vorteil, dass sie nicht negativ auf reihenuntreue Pflanzen reagieren und Pflanzen ab einer vorher bestimmten Mindesthöhe sicher erkennen.

Aufgrund der schnellen Auswertung und einfachen Installation werden die Ansätze mit berührungslosen Tastern und einem Lichtschrankensystem weiter verfolgt.



**Bild 1:** Prinzipien der Einzelpflanzenerkennung

### 3 Technische Umsetzung

#### 3.1 Pflanzenerkennung mit vertikaler Sensorik

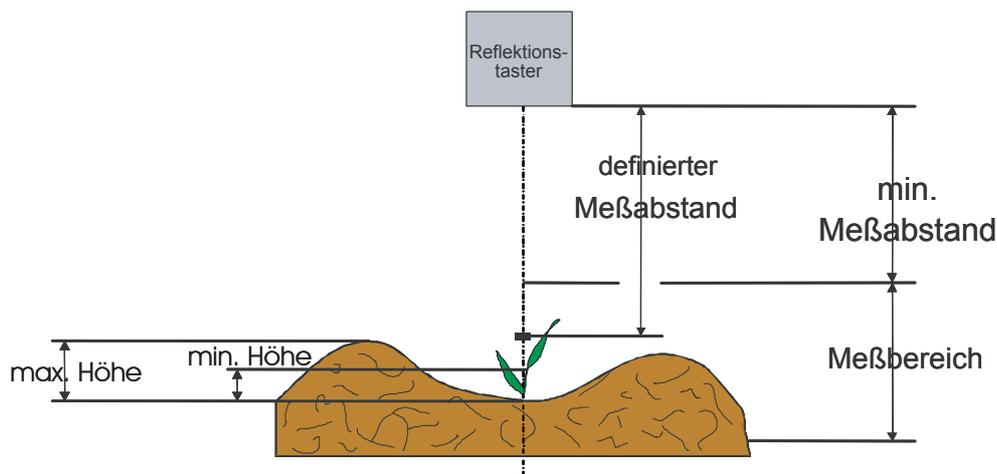
Eine schnelle und einfache Methode der Einzelpflanzenerkennung ist die mittels eines einzelnen Tasters, der direkt über die Reihe geführt wird. Prinzipiell eignen sich optische und akustische (Ultraschall) Sensoren. Der Sensor wird so installiert, dass sich alle aufzunehmenden Pflanzen im Messbereich befinden. Das heißt: Der Abstand bei Reflexionstastern ist so zu wählen, dass alle Objekte, die den Erfassungsbereich durchlaufen, erkannt werden (**Bild 2**). Der Messfleck muss mindestens so groß wie die zu erwartende Reihenuntreue sein oder alternativ müssen mehrere Sensoren nebeneinander kaskadiert werden.

Problematisch ist das Vorhandensein von Erdkluten und Fremdkörpern. Im Signalverlauf können zwei Blätter einer Pflanze abgebildet werden. Aus diesem Grund wird eine Signalanalyse notwendig:

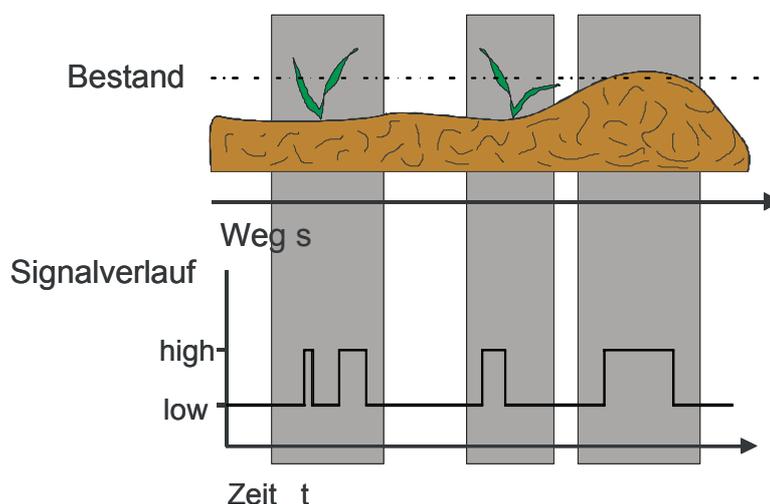
- Ein sehr langes 'high'-Signal deutet darauf hin, dass sich Erde oder Steine im Messbereich befinden.
- Ein Signalrauschen, d.h. der stetige Wechsel zwischen 'high' und 'low' deutet auf ein Pflanzen mit mehreren Blättern im Messbereich hin.

Zur Entscheidungsfindung können zusätzliche Informationen heran gezogen werden:

- die Signaldauer
- der Signalabstand
- der vorher bekannte Saatabstand



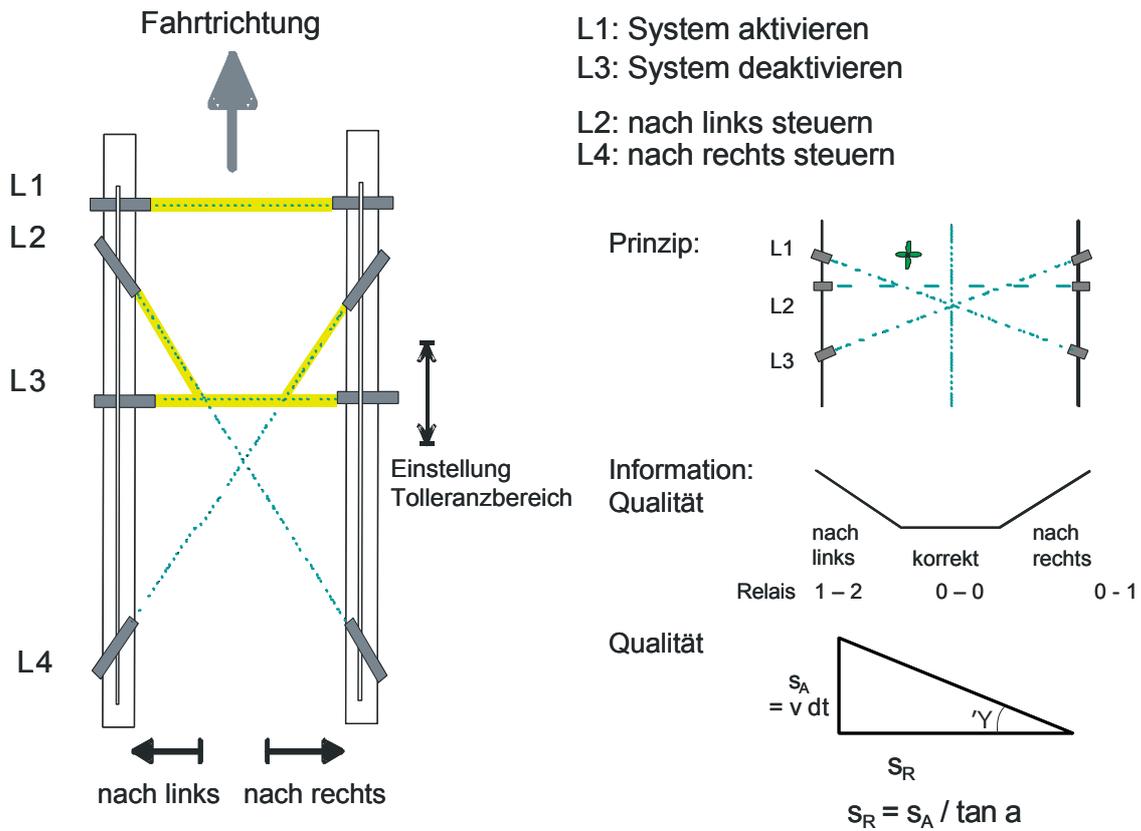
**Bild 2:** Funktionsprinzip der Einzelpflanzenerkennung mit berührungslos arbeitenden Reflexionstastern



**Bild 3:** Signalverlauf und Fehlerursachen bei der Abtastung einer Pflanzenreihe

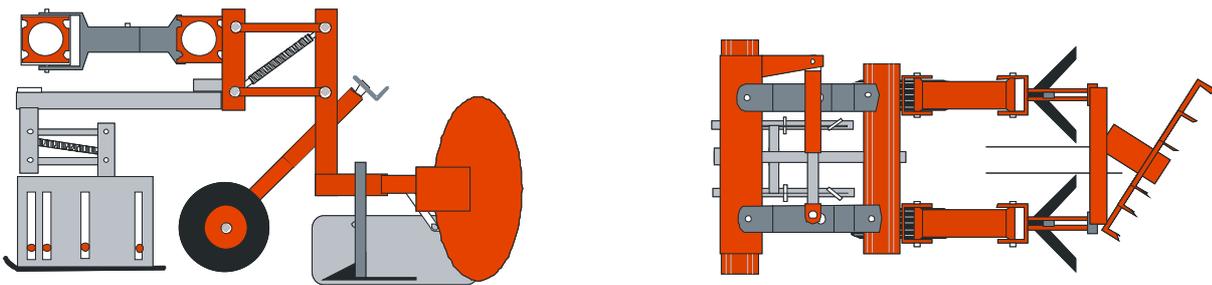
### 3.2 Pflanzenerkennung mit horizontaler Sensorik

Ist es nicht möglich, das Sensorsystem mittig über eine Reihe zu führen, so bietet sich die Anordnung von Einweglichtschranken parallel zur Bodenoberfläche an. Entsprechend der Bodenoberfläche und der Pflanzengröße, muss die Höhe der Lichtschranken eingestellt werden. Das heißt, je größer die Bodenrauhigkeit ist, desto größer muss auch die zu erkennende Pflanze sein. Keimpflanzen in einem frühen Stadium können so nicht sicher erkannt werden.



**Bild 4:** Funktionsprinzip der Einzelpflanzenpositionsbestimmung mit einem Lichtschrankenschlitten

Durch die Anordnung vier verschiedener Lichtschranken lässt sich der Pflanzenabstand, die Reihenuntreue und ebenfalls die Fahrgeschwindigkeit ermitteln. Aufgrund der Zeitdifferenzen zwischen dem Durchtreten der Pflanze durch die verschiedenen Lichtschranken (L2 zu L3 → Linksverstellung; L4 zu L3 → Rechtsverstellung) kann die exakte Position der Pflanze ermittelt werden. Der Lichtschrankenschlitten ermöglicht eine direkte Ansteuerung zur Reihenführung von Anbaugeräten und zudem auch die Bearbeitung zwischen den Pflanzen einer Reihe (**Bild 5**). Der Totbereich, d.h. der Bereich, der kein Steuerereignis zur Folge haben soll, kann durch Verschieben der dritten Lichtschranke variiert werden.



**Bild 5:** Anwendungsbeispiel des Lichtschrankenschlittens in einer automatischen Reihenquerhacke

#### 4 Schlussfolgerung

Die beiden vorgestellten Messsysteme bestehen aus häufig eingesetzten Standardsensoren und ermöglichen eine Reihen- und Einzelpflanzenerkennung. Sie sind robust und für jedes Werkzeug einfach zu installieren, bedürfen jedoch einer angeschlossenen Signalanalyse.

Im Gegensatz zur Bilderkennung und nachfolgender Bildanalyse mit mehreren Tausend Einzelinformationen müssen hier maximal nur 4 Signale pro Reihe ausgewertet werden. Die Auswertung ist somit wesentlich unkomplizierter, schneller und mit einfacher Mikrocontrollertechnik zu realisieren.

Zur Zeit werden Untersuchungen zur Leistungsfähigkeit und zu den Grenzen dieser Verfahren durchgeführt.

#### 5 Literatur

**SCHMITTMANN O., SCHULZE LAMMERS P. (2004):** Maschinelle Hacke von Zuckerrüben - Entwicklungstendenzen und Ansätze zur höheren Präzision; VDI-MEG Tagung Landtechnik, Dresden

**SCHMITTMANN O., SCHULZE LAMMERS P. (2004):** Mechanische Unkrautbekämpfungsmaßnahmen - Technische Möglichkeiten zur Steigerung ihrer Wirksamkeit; Landtechnik 59, 2/2004

## Thermographie zur Klimasteuerung im Kartoffellager

### *Thermography for environment control in potato stores*

Klaus Gottschalk, Sabine Geyer

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

E-Mail: kgottschalk@atb-potsdam.de

**Zusammenfassung:** Zur Qualitätssicherung landwirtschaftlicher Produkte können während der Langzeitlagerung durch eine bestangepasste Klimatisierung die erforderlichen Klimaparameter eingehalten werden. Hierfür ist eine möglichst hohe Anzahl an Temperaturfühlern erforderlich, um den Zustand der Produkte genau zu erfassen.

Durch Einsatz einer Infrarot-Thermographie-Kamera (IR-Kamera) lässt sich dagegen ein Gesamtbild über die lokalen Unterschiede der Temperaturverläufe an der Oberfläche des Lagerguts gewinnen. Es wird dargestellt, dass sich die Oberflächentemperaturen der Produkte als Informationsquelle zur Belüftungssteuerung eignen.

Eine Software wurde entwickelt, um an einem stationären Thermographie-Messplatz die Temperaturwerte konventionell und thermographisch zu sammeln und eine Ferndatenübertragung durchzuführen. Der stationäre Messplatz für die IR-Kamera ermöglicht die kontinuierliche Überwachung der Lagerklimatisierung und eine automatische Steuerung der Belüftungsklappen.

**Deskriptoren:** Kartoffellager, Kistenlager, Thermographie, Klimaregelung, freie konvektive Lüftung

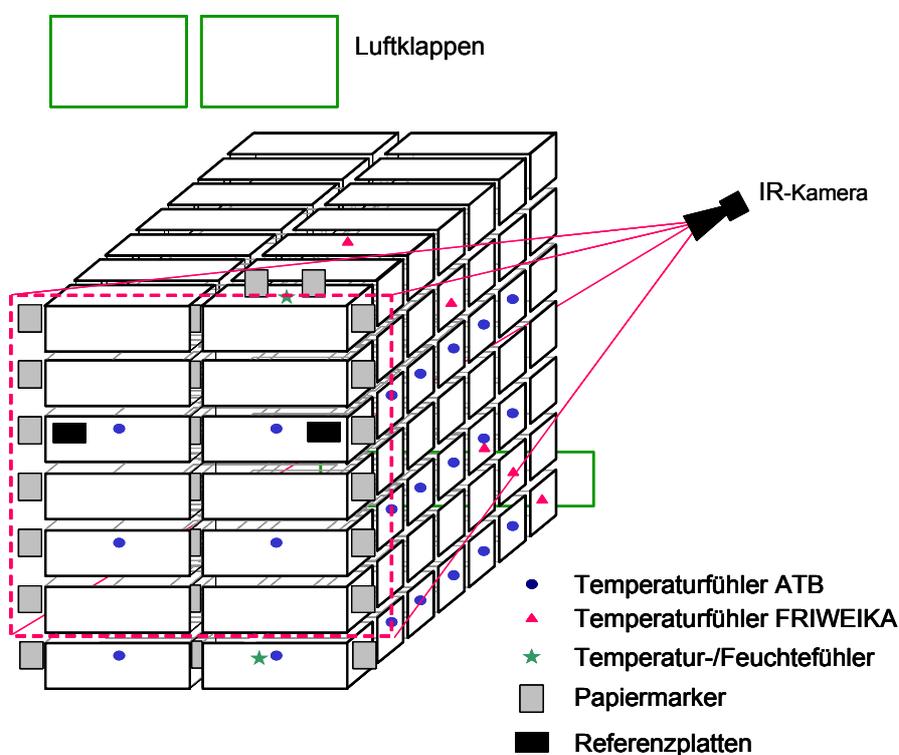
**Summary:** *An appropriated climate control is needed to keep quality of stored agricultural products like potatoes. Instead of using conventional temperature sensors, an infrared (IR) imaging camera is applied to acquire a view of a wide area and to determine local differences of temperatures in the store. The IR-measured temperatures can be used for environment control inside the store.*

**Keywords:** *potato store, bin box store, thermography, environment control, free convective ventilation*

## 1 Stationäre Thermographie-Messeinrichtung im Großkistenlager

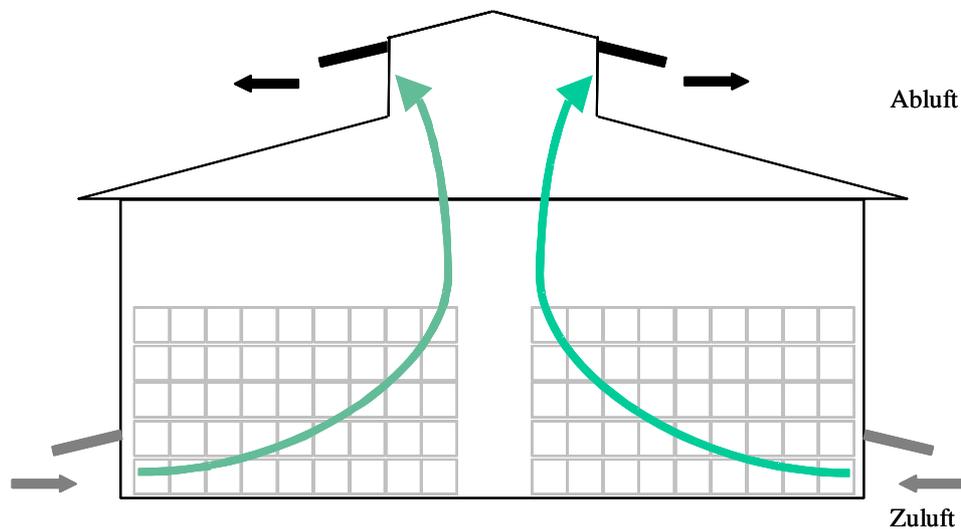
Das physikalische Prinzip, aus der Wärmestrahlung im Infrarot-Bereich (IR; Wellenlängenbereich ca. 780 nm bis 1 mm) die Temperatur des Wärmestrahlers nach dem Planckschen Strahlungsgesetz zu errechnen, erschließt die Möglichkeit, die Temperaturverteilung in einem Kartoffel-Kistenlager zu erfassen und für eine Klimasteuerung zu nutzen (GOTTSCHALK 2002). Erste viel versprechend verlaufende Untersuchungen, den Zustand von Agrarprodukten aus der Oberflächentemperatur zu ermitteln (HELLEBRAND *et al.* 2001, 2002a, 2002b), die mittels einer IR-Kamera erfasst werden kann, führten zu der Idee, diese Technologie für eine Lagerklimaüberwachung und Klimaregelung anzuwenden. Hierfür könnten kommerzielle IR-Kameras eingesetzt werden, die üblicherweise den Spektralbereich von etwa 3,5 – 14  $\mu\text{m}$  (mittelwelliges und langwelliges IR) abdecken (SCHUSTER 2000).

Eine stationäre Messeinrichtung (IR-Messtechnik und konventionelle Messtechnik für Vergleichsuntersuchungen) wurde in einem Großkistenlager mit ca. 16 kt Lagerkapazität (ca. 4000 Kisten je ca. 4t) aufgebaut und im Januar 2003 in Betrieb genommen. Eine stationär installierte IR-Kamera wurde mit einem zusätzlichen Weitwinkelobjektiv mit einem Sichtwinkel von  $45^\circ$  ausgerüstet, um den auswertbaren Sichtbereich deutlich zu erweitern. Messungen wurden während jeder Lagerperiode (etwa von Nov bis April/Mai) an einem Versuchsstand unter realen Bedingungen durchgeführt (GOTTSCHALK *et al.* 2003, GEYER *et al.* 2004a, 2004b, GOTTSCHALK *et al.* 2004) (**Bild 1**).



**Bild 1:** Kistenstapelanordnung mit Messfühlern und Thermographiekamera

Das Kistenlager für Kartoffeln wird lediglich nach dem Prinzip der ‚Freien Konvektiven Lüftung‘ (FKL), d.h. nur durch Steuerung von Klappen im Dachfirst und im Bodenbereich (**Bild 2**) unter Nutzung der Außenluft (Wind) und freier Konvektion im Inneren der Kistenstapel belüftet (KERN 2002).



**Bild 2:** Lüftungsprinzipien des Kistenlagers für Kartoffeln mit FKL

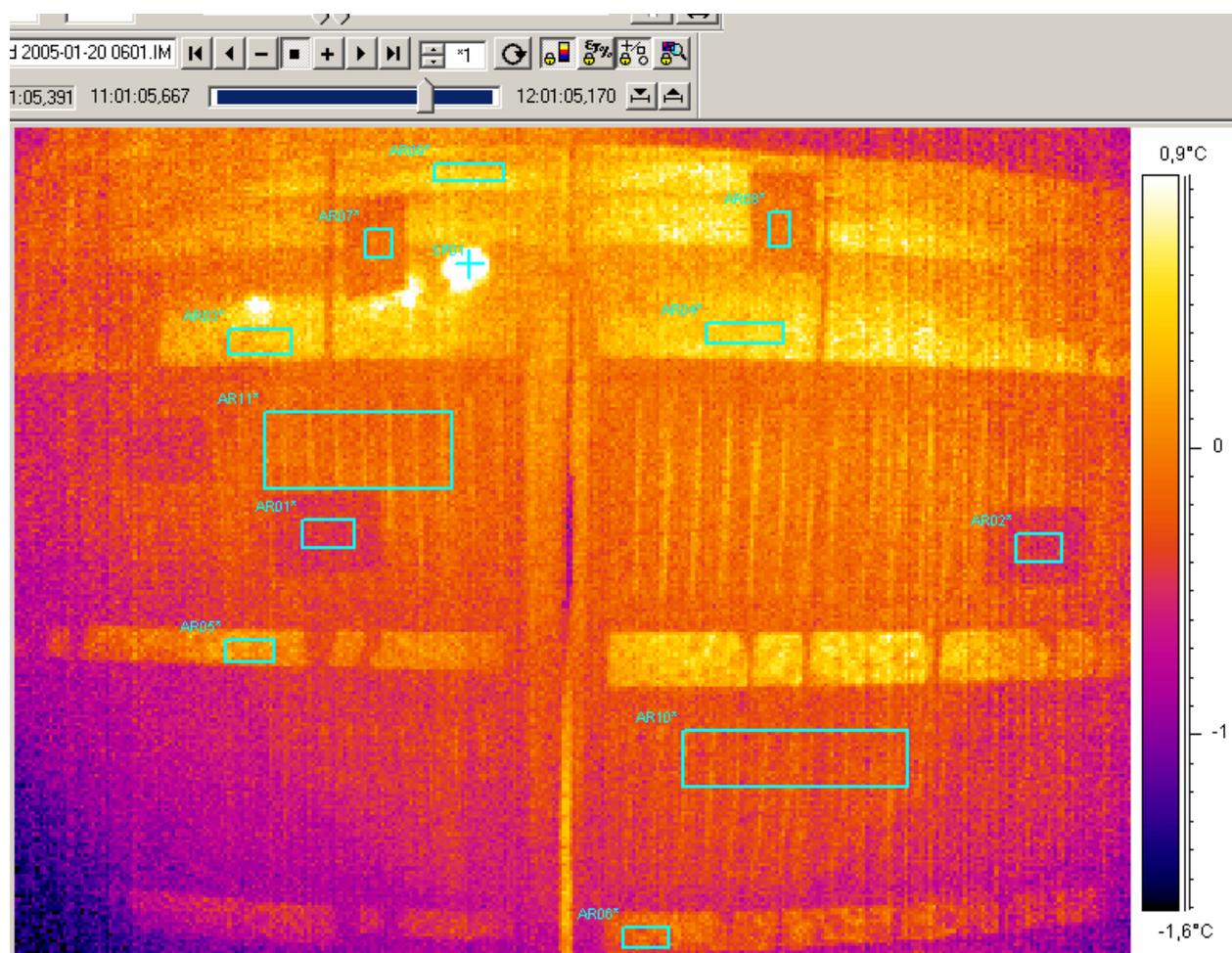
Von dem Thermographie-Messplatz aus wurde die kontinuierliche Überwachung der Lagerklimatisierung mittels IR-Kamera und konventioneller Messtechnik, d.h. mit im Lagergut verteilten Einzelsensoren durchgeführt. Dazu war eine Software zur Datenfernübertragung entwickelt worden, die die konventionell und thermographisch gewonnenen Temperaturwerte aufzeichnete und online übermittelte (Datenfernübertragung). Zusätzlich konnten Daten (Wetterdaten, Windrichtungen, Lagertemperaturen, Betriebszustände usw.) des betriebseigenen Klimadatencomputersystems mit erfasst und berücksichtigt werden.

Weiterhin war es mit Hilfe der entwickelten Software möglich, den Messtakt der thermographisch und konventionell ermittelten Temperaturwerte zu variieren. Damit wurde gewährleistet, dass Belüftungsvorgänge, wie sich verändernde Luftströmungen nach Klappenbewegungen, in Filmsequenzen mit einem Aufnahmetakt von beispielsweise 1 Messwert/Minute visualisiert und ausgewertet werden konnten, während für die längerfristige Klimaüberwachung des Lagerguts eine niedrigere Taktrate (1 Messwert/Stunde) gewählt wurde.

Die Abfrage des betriebseigenen Klimadatencomputersystems wurde derart verwirklicht, dass die Klappenöffnungszeiten und weitere klimarelevante Daten (wie z.B. Windrichtung) im nachhinein erfasst und bei der Auswertung der Klimadaten mit berücksichtigt werden konnten. Ergänzend wurde eine Software entwickelt und eingesetzt, die es ermöglichte, alle Klimadaten, d.h. die konventionell erfassten Messwerte sowie die der betriebsinternen

Klimasteuerung und die thermographisch erfassten Messwerte gleichzeitig abzurufen und auszuwerten.

Bei der Auswertung des Bildinhalts mit der kamerainternen Software wurden auf dem IR-Bild die für die Klimasteuerung relevanten Gebiete zur korrekten Temperaturemittlung mit entsprechendem Emissionsgrad (KING 1987) und Entfernung zur Kamera festgelegt (**Bild 3**). Eine Verschiebung des IR-Bildes, z.B. infolge Instabilität der Kamerabefestigung oder nicht vorhergesehene Verdeckung der Kistenfront durch zusätzliche Kisten, könnte zu einer Verfälschung der Klimasteuerungstemperaturen führen. Eine genaue Überwachung der Kamera sowie ihres Bildinhaltes ist daher erforderlich, z.B. über einen definierten Referenzpunkt, der im Bild gut erkennbar ist und dessen Temperaturwert über einen Datenlogger erfasst wird.



**Bild 3:** Infrarotbild mit markierten Messgebieten

Die thermographischen Messdaten zeigen die Auswirkungen von Temperaturänderungen und Luftströmungen direkt an. Allerdings sind sie - besonders bei kleinen Messtakten - wie die Lufttemperaturen größeren Schwankungen unterworfen als die in den Kartoffeln erfassten konventionellen Temperaturen. Dies muss bei Nutzung der Thermographiedaten

als Klimasteuerungsinstrument berücksichtigt werden. Es stellte sich heraus, dass ein Messtakt von 1 Aufnahme/Stunde für eine langfristige Klimasteuerung ausreichend und schwankungsfreie Verläufe zeigt. Je nach Bildausschnitt bzw. ausgewähltem Bereich (Kartoffeln, Holzkisten, Papiermarker) wurden unterschiedliche Temperaturverläufe im Kartoffellager erfasst.

Mittels IR gemessene Oberflächentemperaturen von Kartoffeln gaben, wenn auch z. T. geringfügig von der Umgebungsluft beeinflusst, die Kartoffeltemperaturen im Inneren des Stapels wieder, wie insbesondere Langzeitmessungen mit einer Taktfrequenz von 1 Aufnahme /Stunde ergaben. Die mittels IR gemessenen Oberflächentemperaturen an den Fronten der Holzkisten und den Papiermarkern folgten hinreichend genau den Temperaturverläufen der Umgebungsluft in der Halle. Dieses Erkenntnis konnte für Belüftungsversuche mit geringer Taktfrequenz (1 Aufnahme/Minute) genutzt werden.

Der Einfluss der Klappeneinstellungen auf die Belüftungseffektivität im Kartoffellager konnte mit Hilfe der Thermographie sehr gut demonstriert werden. Bei geschlossenen Dach- und Bodenklappen war ein Anstieg der Umgebungstemperatur in der Halle zu verzeichnen, auch bei Außentemperaturen unter 0°C; dies ist auf die Eigenwärme produzierenden Kartoffeln zurückzuführen. Ein Öffnen der Dachklappen bei gleichzeitig geschlossenen Bodenklappen (sog. Kellereffekt) führte nur zu einer geringfügigen und sehr langsamen Temperaturabsenkung der Umgebungsluft und der Kartoffeln im Lager. Ein Öffnen der Bodenklappen bei gleichzeitig geschlossenen Dachklappen führte zu einem Auftrieb der wärmeren Luftschichten. Gleichzeitig geöffnete Dach- und Bodenklappen bewirkten bei entsprechenden zur Belüftung günstigen Außentemperaturen eine deutliche Temperaturabsenkung der Hallenumgebungstemperatur. Auch die Temperaturen der Kartoffeln im Bereich der unteren Bodenklappen sanken relativ schnell. Eine veränderte Kameraeinstellung während der Lagersaison 2004/2005 (senkrechter Blickwinkel auf die Stapel bei reduzierter Kistenoberfläche im Gegensatz zu einem schrägen Blickwinkel mit großem Sichtbereich der Stapeloberfläche) ermöglichte neben der Erfassung der Oberflächentemperaturen im obersten Stapel (höchste Temperaturen) auch die Erfassung der Bodentemperatur in der Nähe der unteren Bodenklappen. Es konnte somit durch eine Lücke in der Mitte zwischen zwei Kistenstapeln bis auf den Boden im hinteren Bereich des Stapels (Nähe der Bodenklappen) durchgeblickt werden (**Bild 3**). Zum Vergleich wurden die Temperaturen der Kartoffeln in Nähe der Bodenklappen konventionell erfasst. Es bestand eine gute Übereinstimmung der Temperaturwerte.

## 2 Klimasteuerung mittels thermographisch bestimmter Messdaten im Kartoffellager

Die bisherige betriebsinterne Klimasteuerung lässt Belüftungen in einem Temperaturbereich von 0°C bis 5°C Außentemperatur in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit zu. Die Regelung kann sich nach der Durchschnittstemperatur aller eingesetzten Fühler bzw. eines einzelnen Fühlers als Istwert einstellen, wobei fünf Fühler gleichmäßig über 7 Schichten im Kistenstapel verteilt sind. Üblicherweise wurde bislang die Durchschnittstemperatur als Regeltemperatur verwendet.

Die Erfassung der Klimadaten im konvektiv belüfteten Kartoffellager über drei Lagerperioden hinweg ergab, dass der Einfluss der Außentemperaturen auf den Erhalt einer konstanten Lagertemperatur sehr viel größer war als der der Kartoffeln, die durch Atmung/Produktion von Eigenwärme ebenfalls einen Temperaturanstieg im Lager verursachen können. Insbesondere an warmen Frühjahrstagen stiegen die Lufttemperaturen unter dem Dach an, wobei mit einigen Tagen Verzögerung auch ein Anstieg der Kartoffeltemperaturen - speziell in den oberen Schichten - folgte. Ein Gegensteuern durch Belüften mit den Bodenklappen führte im Bereich der unteren Kartoffelschichten teilweise zu Lagertemperaturen von 0°C. Insgesamt ergaben sich beträchtliche Temperaturschwankungen innerhalb der oberen und unteren Kartoffelschichten, die im Wesentlichen von den Außentemperaturen verursacht wurden und die sich negativ auf die Qualität der Kartoffeln auswirkten (frühzeitiges Auskeimen in den oberen Schichten; Frostschäden in den Kisten in Nähe der Bodenklappen).

### *Korrektur der IR-Daten nach Ermittlung einer Regressionsgeraden*

Für die Berechnung einer Regressionsgeraden über einen möglichst großen Temperaturbereich wurden Temperaturdaten während der Lagerperiode thermographisch und an den Referenzplatten konventionell erfasst und ausgewertet (eine ausführliche Beschreibung in GEYER *et al.* 2004, GOTTSCHALK *et al.* 2003). Eine daraus errechnete Durchschnittsregressionsgerade wurde für die direkte Auswertung bzw. Korrektur der IR-Daten der Lagersaison verwendet.

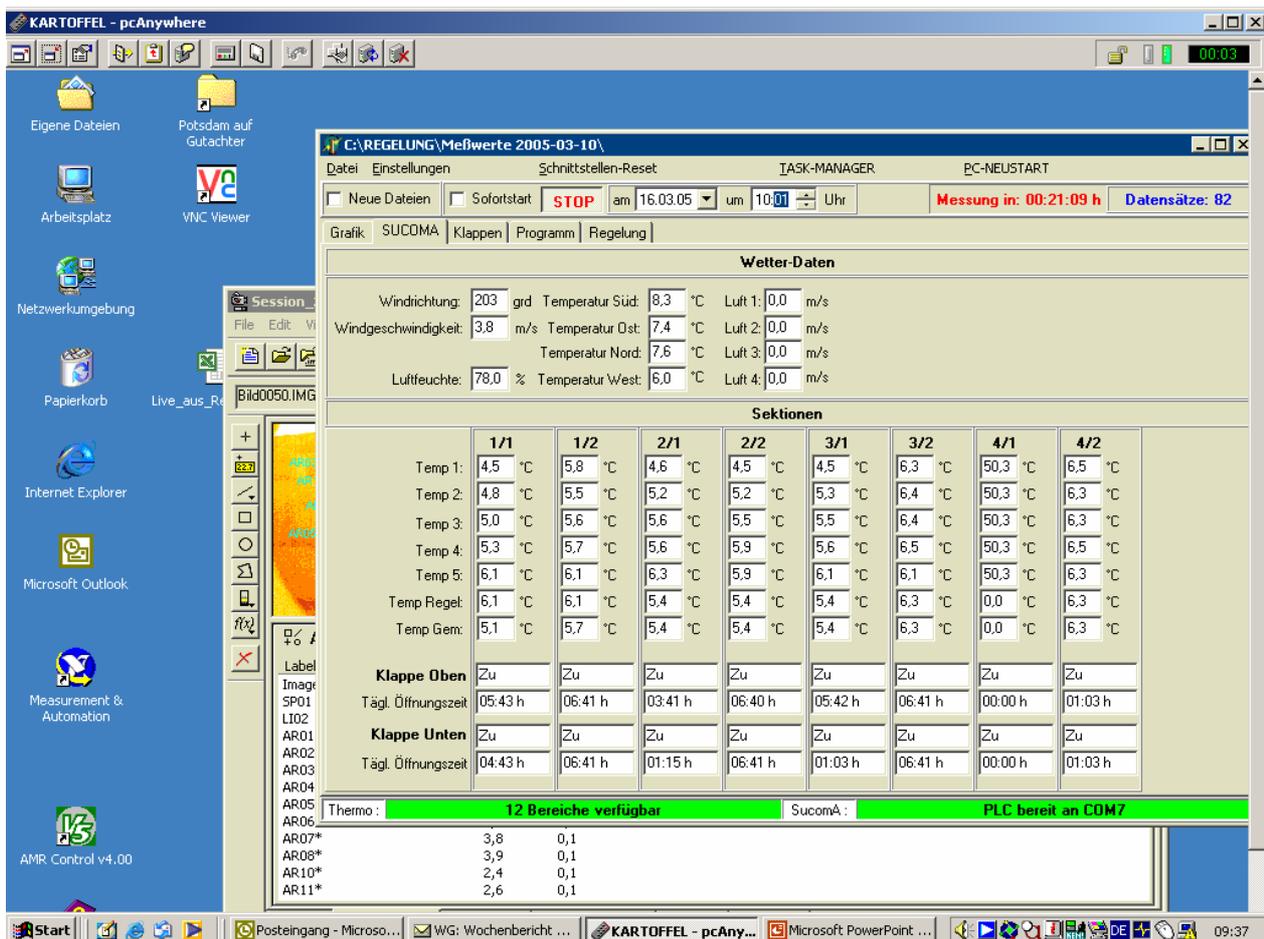
### *Klimasteuerung*

Für eine Klimasteuerung mittels thermographisch bestimmter Messdaten muss das unmittelbar erfasste IR-Bild sofort ausgewertet (korrigiert) und die gemessenen Temperaturdaten dem Klimasteuerungsalgorithmus zur Verrechnung zugewiesen werden. Die kameraeigene Software bietet die direkte Auswertung der Messwerte für jeweils ein Bild bzw. einen Zeitpunkt. In einem definierten Erfassungszeitraum können gezielt Temperaturfelder ausgewählt und gemäß ihres Emissionsgrades bzw. ihrer Entfernung zur Kamera vorkorrigiert werden; diese vorkorrigierten Messwerte werden als Temperaturwerte in Form eines Tabellenblatts parallel zum IR-Bild angezeigt. Zur Weiterleitung dieser Daten wurde

am ATB eine Software entwickelt, die das ausgewertete IR-Bild fotografisch erfasst und die Messwerte der aufgenommenen IR-Bilder nacheinander in einem Temperatur/Zeitdiagramm speichert. Von dort aus können die IR-Temperaturwerte mit Hilfe einer Regressionsgeraden auf die realen Werte korrigiert werden und als Messwert (Istwert) dem Steuerungsalgorithmus zugeführt werden.

### Software zur Ansteuerung der Klappen

In Anlehnung an die betriebseigene Klimasteuerungssoftware des Lagerbetriebes wurde eine Software entwickelt, die es erlaubt, unter Umgehung der betriebseigenen Klimasteuerung, die Belüftungs-Klappen direkt von einem entfernten Standort (online) anzusteuern. Eine Verknüpfung aller verfügbaren Datensätze wurde in der Software vorgenommen. Damit besteht die Möglichkeit, die Klimasteuerung über thermographisch ermittelte Daten zu gewährleisten (**Bild 4**).



**Bild 4:** Bildschirmauszug der Software zur Messung und Klappensteuerung

### *Einfacher Algorithmus zur Klimasteuerung*

Ein einfacher Algorithmus zur Klimasteuerung wurde entwickelt, der folgende Punkte für eine Klimaführung berücksichtigt.

- Bei der Regelung der Kartoffeltemperaturen müssen sowohl die Temperaturen in Nähe der Bodenklappen (niedrigste Temperatur) als auch im oberen Bereich (höchste Temperaturen) berücksichtigt werden (keine Durchschnittstemperatur!). Mit einem geeigneten Blickwinkel der IR-Kamera können die Umgebungstemperaturen gleichzeitig an beiden Positionen erfasst werden.
- Die Regelung muss derart eingestellt sein, dass die an der Oberfläche gemessene IR-Temperatur immer etwas niedriger ist, als die im Stapel gemessenen Kartoffeltemperaturen.
- Lufterwärmung im Bereich der Hallendecke sollte möglichst schnell ausgeglichen werden
- Bei *Frost* durch Öffnen der Dachklappen: da die Wärmekapazität des Lagers sehr groß ist und demzufolge eine Temperaturabsenkung relativ langsam verläuft, kann der bisherige Frostschutz für die oberen Dachklappen (Kellereffekt) von 0°C auf -3°C herabgesetzt werden.
- Bei *frostfreiem* Klima: gleichzeitiges Öffnen der Dach- und Bodenklappen möglich.

Die Regeltemperatur für die betriebseigene Regelung wurde bisher über den Fühler in der obersten Schicht gemessen. Durch Überwachung der Lufttemperaturen in den oberen Schichten mittels der IR-Kamera wurde durch entsprechendes Öffnen der Klappen (siehe oben) weitgehend vermieden, dass sich warme Luftmassen unter der Hallendecke ansammeln.

Es konnte ausgenutzt werden, dass die IR-Temperaturen immer niedriger waren als die Kartoffeltemperaturen.

Insgesamt konnten während der Lagerperiode 2004/2005 geringere Schwankungen der Kartoffeltemperaturen im Vergleich zu 2003/2004 erzielt werden (vermutlich ist dieser Umstand auch dadurch begründet, dass das Klima während der Lagerperiode 2004/2005 relativ ausgeglichen war).

Eine Senkung der Kartoffeltemperaturen in den oberen Schichten hätte am Ende der Lagerperiode eventuell noch verbessert werden können, wenn die betriebseigene Klimasteuerung ein Öffnen der Dachklappen bei Temperaturen unter 0°C zugelassen hätte.

### 3 Ergebnisse aus den Thermographie-Daten:

- In der Umgebung der Kistenstapel verteilte Papiermarker reagieren schnell auf Temperaturänderungen; die Holzlatten der Kisten dagegen etwas langsamer
- Kartoffeloberflächen reagieren deutlich langsamer (im Minutenbereich) auf Temperaturänderungen als die Holzfronten und Referenzplatten
- Die Strömungsverläufe bei frei konvektiver Lüftung (FKL) können über Berechnung der Temperaturgradienten mit der Thermographie dargestellt werden.
- Umwandlung der IR-Daten in exakte Temperaturen durch Berücksichtigung
  - der Umgebungsbedingungen der IR-Kamera (Temperatur, Luftfeuchte),
  - der Emissionsgrade für Kartoffeln, Kisten, usw.,
  - der Entfernung der Kamera zum Messpunkt für jedes gewählte Gebiet,
  - der konventionellen und thermographischen Messungen an einer Referenzfläche zur Korrektur der Thermographiedaten.

### 4 Ökonomische Bewertung der konventionellen Lagerverfahren und Aussagen zu Investitionen in die Thermographieausstattung

Die Belüftungskosten je Tonne eingelagerter Kartoffeln variieren je nach Belüftungsbedarf durch den vermehrten Einsatz einer mechanischen Belüftungsanlage (SCHUHMANN 2001) und der sich ändernden Abschreibung. Je nach Witterungsverlauf wird mit einem Belüftungsbedarf bei einem konventionellen Lager zwischen 180 h und 895 h pro Jahr gerechnet. Damit entsteht bei einer Thermographie-gestützten FKL-Lagerhaltung ein Einsparpotential an Belüftungskosten zwischen 5,20 € je Tonne und Jahr (bei Belüftungsbedarf 180 h/Jahr) und 8,62 € (bei Belüftungsbedarf 900 h/Jahr). Bei einem durchschnittlichen Belüftungsbedarf (450 h/Jahr) ist mit Kosten von 5,84 € je Tonne zu rechnen.

Es ist in den letzten Jahren zu beobachten, dass von Herstellern der IR-Kamera-Technologie versucht wird, erweiterte Anwendungsgebiete für die Thermographie-Technologie zu erschließen und dafür zu werben. Verbunden ist damit ein weiterer zu erwartender Preisverfall von IR-Kameras bei gleichzeitiger Erweiterung der Funktionalität der Kameras und der zugehörigen Auswertesoftware, sowie Erhöhung des Bedienungskomforts, der Genauigkeit und der Zuverlässigkeit derartiger Systeme. So sind derzeit (Stand: Mitte 2006) Kameras ab ca. 10.000,- bis 30.000,- €, zuzüglich Zubehör, wie Objektive usw. erhältlich. Diese Entwicklung könnte den Amortisationszeitraum für die Investition in ein Thermographiesystem deutlich verkürzen.

## 5 Schlussfolgerungen

Das thermographische Messsystem bietet gegenüber konventionellen Temperatursensoren folgende Vorteile:

Es kann gleichzeitig ein - in Grenzen - größerer Teilbereich des Lagers thermographisch erfasst werden. Damit kann das gesamte, im Sichtbereich innerhalb des Lagerraums vorliegende Temperaturspektrum erfasst werden. Es ist möglich, bei der Auswertung der Thermographie-Bilder definierte, für die Klimaerfassung relevante Temperaturbereiche herauszustellen. Geringe Temperaturdifferenzen werden durch die Thermographie deutlich unterscheidbar.

Die Untersuchungsergebnisse zeigen eine gute Übereinstimmung der Temperaturverläufe bei konventioneller Messtechnik und Thermographie, wenn Temperaturen direkt an der Außenfläche des Behälters gemessen werden. Die Thermographie, die die Temperaturverteilung direkt an der Oberfläche darstellt, reagiert schneller auf Temperaturveränderungen, die durch die Luftströmung auf die Kartoffelbehälter einwirken als es an der Behälterfront verteilte Temperatursensoren vermögen.

Die von den IR-Bildern der Thermographiekamera angezeigten Werte entsprechen allerdings, technisch bedingt, nicht den real vorliegenden Temperaturwerten. Eine Korrektur der Messwerte der IR-Kamera mit Hilfe einer konventionellen Referenzmessung muss daher durchgeführt werden.

Konventionelle Fühler, die nur oberflächlich die Kartoffellagertemperaturen erfassen, zeigen einen ähnlichen Temperaturverlauf wie die thermographischen Messdaten bei Belüftungen, jedoch zeitlich um einige Minuten verzögert.

Keine eindeutigen Erkenntnisse erbrachten die thermographischen Aufnahmen bei den Untersuchungen unterschiedlicher physiologischer Lagerungszustände der Kartoffeln (gekeimt, ungekeimt) bzw. von Sortenunterschieden und/oder Vorbehandlungen.

Es zeigte sich, dass ein zweiwöchiger Messrhythmus zu groß ist, um Erkenntnisse aus Infrarotbildern über die Abtrocknungsphase der Kartoffeln zu erlangen, da die Kartoffeln an der Oberfläche rasch abtrocknen. Es lassen sich allerdings feuchte Stellen in den Kartoffelkisten sehr gut mit der Infrarot-Kamera nachweisen, wenn man die an der Oberfläche liegenden Kartoffeln beiseite räumt.

Thermographische Aufnahmen von Kisten innerhalb des Kartoffelstapels zeigen, dass die Temperaturverteilung im Lager über der Lagergrundfläche weitgehend gleichmäßig vorliegt. Die Temperaturverteilung über der Höhe war in allen hintereinander liegenden Kartoffelreihen vergleichbar.

## 6 Literatur

- GEYER S., GOTTSCHALK K., HELLEBRAND H.J., SCHLAUDERER R., BEUCHE H. (2004a):** Infrarot-Thermographie zur Klimasteuerung in einem Großkisten-Kartoffellager, *Landtechnik* 2/2004, S96-97
- GEYER S., GOTTSCHALK K., HELLEBRAND H.J., SCHLAUDERER R. (2004b):** Application of a Thermal Imaging Measuring System to Optimise the Climate Control of Potato Stores In: *AgEng 2004 Conference Engineering the Future; Book of Abstracts*, Leuven Belgium, 12. – 16.09.2004, Technological Institute vzw, Leuven, Belgium, Part 2, p.1066-1067, Full paper CD
- GOTTSCHALK K. (2002):** Kartoffellagerung – Methoden und Trends bei der Klimaregelung und Luftströmung. *Kartoffelbau* 12/2002, S. 460-463
- GOTTSCHALK K., HELLEBRAND H.J., SCHLAUDERER R., GEYER S., BEUCHE H., FICHT I., JACOBS H., RICHTER I.G. (2003):** Anwendung der Thermographie zur Optimierung der Belüftungssteuerung bei der Lagerhaltung landwirtschaftlicher Produkte. Tagungsband, Statusseminar 2003 High-Tech Innovationen für Verfahrensketten der Agrarproduktion, IHK Potsdam, 29./30.09.2003
- GOTTSCHALK K., GEYER S., HELLEBRAND H.J., SCHLAUDERER R. (2004):** Thermographie im Kartoffellager (Thermography in potato store). *Computer-Bildanalyse in der Landwirtschaft (Computerised Image Analysis in Agriculture) - Workshop 2004*, Bornimer Agrartechnische Berichte, Heft 37 (2004) 128-142
- HELLEBRAND H.J., BEUCHE H., LINKE M., HEROLD B., GEYER M. (2001):** Chances and Shortcomings of Thermal Imaging in the Evaluation of Horticultural Products. International Conference "Physical Methods in Agriculture - Approach to Precision and Quality", Prague 27-30 August 2001, Proceedings S. 112-117 (ISBN 80-213-0836-2)
- HELLEBRAND H.J., BEUCHE H., LINKE M. (2002a):** Thermal imaging. A promising high-tec method in agriculture and horticulture. In "Physical Methods in Agriculture - Approach to Precision and Quality" edited by J.Blahovec and M. Kutílek, Kluwer Academic/Plenum Publishers (ISBN 0-306-47430-1), New York 2002, p. 411-427
- HELLEBRAND H.J., BEUCHE H., LINKE M. (2002b):** Berührungslose Temperaturbestimmung (Remote temperature measurement). *ATB Jahresbericht 2002*, 50-51, on-line verfügbar: <http://www.atb-potsdam.de/hauptseite-deutsch/ATB-Schriften/Jahresberichte/Jahresberichte/Jabe2002/Jahresbericht-2002-gesamt.pdf>
- KERN A., KRUMBIEGEL D., PÖTKE E., SCHUHMANN P. (2002):** Qualitätsschonende Lager- und Lüftungssysteme. *Der Kartoffelbau* 53: 226-233
- KING W.J. (1987):** Emissivity and absorption, in R C Weast ed, *Handbook of Chemistry and Physics*. CRC Press, Boca Raton (Florida), 1987, pp E-393 - E-395
- LUTZ P. et al (1997):** Lehrbuch der Bauphysik, B.G. Teubner Stuttgart, 4. Auflage 1997
- SCHUHMANN P. (2001):** Zur Wirtschaftlichkeit der Lagerung von Kartoffeln. *Kartoffelbau* 52 9./10, 406-409
- SCHUSTER N., KOLOBRODOV V.G. (2000):** Thermal imaging. Viley-VCH Berlin Weinheim New York 2000, 339 p, p 59

**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 <sup>th</sup> 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 <sup>TM</sup> , Ökologie und Ökonomie	2003
Heft 33	Sozioökonomische Aspekte zu Perspektiven des Offenlandmanagements	2003
Heft 34	Computer-Bildanalyse in der Landwirtschaft Workshop 2003	2003
Heft 35	Energieholzproduktion in der Landwirtschaft Potenzial, Anbau, Technologie, Ökologie und Ökonomie	2004
Heft 36	High-Tech Innovationen für Verfahrensketten der Agrarproduktion. Statusseminar 2003	2004
Heft 37	Computer-Bildanalyse in der Landwirtschaft Workshop 2004	2004
Heft 38	Die Landmaschinenprüfung in der DDR 1951-1991 und ihre Vorgeschichte	2004
Heft 39	Energieverlust und Schimmelpilzentwicklung bei der Lagerung von Feldholz-Hackgut	2005
Heft 40	Computer-Bildanalyse in der Landwirtschaft Workshop 2005	2005
Heft 41	Demonstration der Langzeitwirkung bedarfsorientierter Fungizidbehandlung mit dem CROP-Meter	2005

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

Interessenten wenden sich an:

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

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

Schutzgebühr: 13,- €