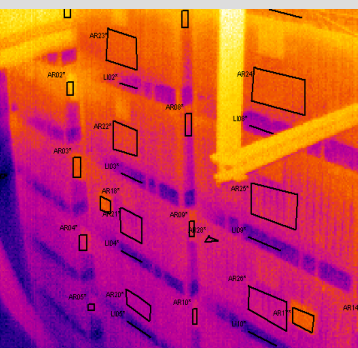


Computer-Bildanalyse in der Landwirtschaft

- Workshop 2004 -

Computerised Image Analysis in Agriculture

- Workshop 2004 -



Bornimer Agrartechnische Berichte

Heft 37

Potsdam-Bornim / Braunschweig 2004

Computer-Bildanalyse In der Landwirtschaft -Workshop 2004-

Computerised Image Analysis
in Agriculture
-Workshop 2004-

Bornimer Agrartechnische Berichte
Heft 37

Potsdam-Bornim / Braunschweig 2004

Herausgeber:

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

☎ (0331)-5699-0
Fax.: (0331)-5699-849
E-mail: atb@atb-potsdam.de
Internet: <http://www.atb-potsdam.de>

in Zusammenarbeit mit der

Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft
FAL
Bundesallee 50
38116 Braunschweig

☎ (0531)-596-0
Fax.: (0531)-596-1099
E-mail: info@fal.de
Internet: <http://www.fal.de>

September 2004

Redaktion:

Bernd Herold, ATB Potsdam-Bornim
Martin Kraft, Institut für Technologie und Biosystemtechnik, FAL

Typografische Gestaltung:

Andrea Gabbert, ATB

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

Für den Inhalt der Beiträge zeichnen die Autoren verantwortlich.

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

ISSN 0947-7314

© Institut für Agrartechnik Bornim e.V., Potsdam-Bornim 2004
Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft FAL Braunschweig 2004

Inhaltsverzeichnis	Seite
<i>Table of contents</i>	<i>page</i>
Vorwort <i>Preface</i>	5
Chlorophyllfluoreszenzbildanalyse zur Differenzierung von Unkrautarten <i>Weed species discrimination using chlorophyll fluorescence image analysis</i> Aulich Sabine; Nordmeyer Henning	7
Bildgestützte Robotersteuerung zur automatisierten Ernte von Gerberablütenstielen <i>Image-based robot control for automatic harvesting of gerbera cut flowers</i> Kawollek Marco; Rath Thomas	15
Bestimmung der Lückigkeit von Rasen mit Hilfe der digitalen Bildverarbeitung <i>Percent ground cover measurement on turf grass by digital image processing</i> Lock Reiner; Rademacher Ingo; Nonn H.; Kühbauch Walter	24
Development of a low-cost vision-based autonomous Vehicle for the Field Robot Event Wageningen <i>Entwicklung eines kostengünstigen, bildanalyse-gestützten Fahrzeuges für den Field Robot Event Wageningen</i> Hemming Jochen	32
A vision based row detection system for sugar beet <i>Reihenerkennungssystem mit Videokamera bei Zuckerrübe</i> Bakker Tijmen; Wouters Hendrik; van Asselt Kees; Bontsema Jan; Müller Joachim; van Straten Gerrit; Tang Lie	42
Erfassung der Kornfeuchte von Mais auf Parzellenmähdreschern mittels Diodenarrayspektrometer <i>Assessment of dry matter in maize grains on experimental combine harvesters using an NIR-diode array spectrometer</i> Pfitzner Christian; Meyer H.; Zieger G.; Paul Christian	56
Advanced Optoelectronic System – ein Multisensorsystem zur gezielten Unkrautkontrolle <i>Advanced Optoelectronic System – a multi-sensor system for targeted weed control</i> Biller Rainer H.; Ihle Walter; Titze Jörn; Berkefeld Hartmut; Schadt Jürgen	70
Optische Differenzierung von Wildlachs und Zuchtlachs <i>Optical differentiation of wild salmon and farmed salmon</i> Kroeger Michael	83
Geometrische Entzerrung von Schrägaufnahmen für die bodengestützte Fernerkundung <i>Geometric correction of oblique imagery for ground-based remote sensing</i> Lilienthal Holger; Schnug Ewald	95
Ableitung von Vegetationsparametern aus multidimensionalen Radardaten <i>Extraction of vegetation parameters from multi-dimensional radar data</i> Zillmann Erik; Lilienthal Holger; Schnug Ewald	113

Thermographie im Kartoffellager	128
<i>Thermography in potato store</i> Gottschalk Klaus; Geyer Sabine; Hellebrand Hans-Jürgen; Schlauderer Ralf	
Ein Beitrag zur computergestützten Erfassung der Blattmorphologie bei Möhren (<i>Daucus carota</i> L.)	143
Ahne Richard; Nothnagel Thomas; Frank J.	
Spektrale Signatur und Qualität von Äpfeln während der Fruchtentwicklung am Baum	144
<i>Spectral signature and quality of apples during fruit development on the tree</i> Herold Bernd; Truppel Ingo; Zude Manuela; Geyer Martin	
Methode zur optoelektronischen Online-Bestandsdichtemessung in der teilflächenspezifischen Bewirtschaftung	153
<i>Method for opto-electronic on-line measurement of crop density in site-specific farming</i> Preckwinkel Jörg; Thösink Guido; Linz Andreas; Marquering Johannes; Ruckelshausen Arno	
Potenzial der automatischen Bildanalyse für die Zustandsbestimmung landwirtschaftlicher Kulturen	159
<i>Potentials of crop state assessment by automatic image analysis</i> Kraft Martin	
Reduzierung des reliefbedingten Topographie-Effektes zur Verbesserung der Radiometrie von Satellitendaten	167
<i>Reduction of terrain induced topographic effects to improve radiometry in satellite data</i> Brauer Anja; Lilienthal Holger; Schnug Ewald	

Vorwort

Pflanzenbestände und pflanzliche Produkte sind bevorzugte Objekte bildanalytischer Auswertung, wobei der Einsatz als Bestandteil landwirtschaftlicher Robotertechnik zunimmt. So könnte man das Fazit des Workshops zur Anwendung der Computer-Bildanalyse in der Landwirtschaft ziehen, der dieses Jahr am Institut für Technologie und Biosystemtechnik der FAL Braunschweig-Völkenrode ausgerichtet wurde. Der Workshop demonstrierte in einem umfassenden Programm die vielfältigen Nutzungsmöglichkeiten optischer Mess- und Bildauswertemethoden für die Weiterentwicklung der landwirtschaftlichen Verfahrenstechnik.

Vor zehn Jahren wurde dieser jährlich stattfindende Workshop durch die Ressortforschung des Bundes initiiert und seither auch aktiv von der landwirtschaftlichen Hochschulforschung mit getragen. Wechselnde Veranstaltungsorte haben in den vergangenen vier Jahren die Teilnahme belebt und die Möglichkeiten zur Darstellung spezifischer Themen vertieft. Diesmal war Gelegenheit, Versuchsstände des Instituts für Betriebstechnik und Bauforschung der FAL kennen zu lernen. Neu wurden zusätzliche Posterpräsentationen aufgenommen, wodurch sich die Zahl der angebotenen Beiträge erhöhte.

In dem Teilnehmerkreis von etwa dreißig Personen war wieder ausreichend Gelegenheit, einen intensiven Gedankenaustausch pflegen zu können. Die Beschränkung auf einen Tag erscheint einerseits vorteilhaft, um auch künftig die Kosten niedrig zu halten. Andererseits könnte aber die eintägige Durchführung auch ein Hindernis für die Anreise von weiter entfernten Teilnehmern sein.

Für die ausgezeichnete Vorbereitung und Durchführung des erfolgreichen Workshops ist der gastgebenden FAL herzlich zu danken.

Braunschweig-Völkenrode und Potsdam-Bornim im Mai 2004

M. Kraft

Dr. M. Geyer

Chlorophyllfluoreszenzbildanalyse zur Differenzierung von Unkrautarten

Weed species discrimination using chlorophyll fluorescence image analysis

Sabine Aulich und Henning Nordmeyer

Biologische Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft, Institut für Unkrautforschung, Messeweg 11 – 12, 38104 Braunschweig

e-mail: S.Aulich@bba.de

Kurzfassung: Zur Differenzierung von Unkrautarten wurde die Methode der Chlorophyllfluoreszenzbildanalyse eingesetzt. Es wurde untersucht, ob sich dieses Verfahren eignet, um Unkrautarten abhängig vom Entwicklungsstadium mit verschiedenen Chlorophyllfluoreszenzparametern unterscheiden zu können. Für die Versuche wurden Pflanzen unter kontrollierten Bedingungen im Freiland und im Gewächshaus angezogen. Zudem wurden entsprechende Pflanzen von verschiedenen Ackerschlägen entnommen. Die Ergebnisse weisen darauf hin, dass sich mono- und dikotyle Arten besonders im Keimblattstadium differenzieren lassen. Obwohl die Freilandpflanzen Umwelteinflüssen stärker ausgesetzt waren, zeigten sich die gleichen Differenzen im Fluoreszenzmuster wie bei den Gewächshauspflanzen. Damit lässt sich ableiten, dass das artabhängige Fluoreszenzmuster bei Pflanzen in frühen Entwicklungsstadien stabil genug ist, um es zur Pflanzenarterkennung einzusetzen.

Deskriptoren: Chlorophyllfluoreszenz, Unkraut, Artendifferenzierung

Summary: *Chlorophyll fluorescence image analysis was used to recognise and discriminate between weed species. It was tested if the method is suitable to differentiate with various fluorescence parameters between weed species in dependence on their growth stage. Weed species were sown in a greenhouse and on field plots under controlled conditions. In addition weeds were collected on agricultural fields. The results show, that it is possible to discriminate especially at the cotyledonous stage between mono- and dicotyledonous plants. Although plants from fields were more affected by environmental conditions, the same differences in the species-specific fluorescence pattern could be shown for the greenhouse plants. As a consequence the fluorescence pattern is stable enough for field use.*

Keywords: *Chlorophyll fluorescence, weed, discrimination of species*

1. Einleitung

Die Chlorophyllfluoreszenzanalyse ist ein nichtdestruktives Verfahren für die Untersuchung physiologischer Reaktionen der Pflanze (HERPPICH, 2001). Mit der Chlorophyllfluoreszenzanalyse lassen sich beispielsweise Reifezustände von Früchten, Stickstoffgehalte und Krankheiten, bzw. Beschädigungen an Pflanzenteilen nachweisen. Die Chlorophyllfluoreszenz ist spezifisch für pflanzliche Gewebe. Über die Nutzung der Chlorophyllfluoreszenz zur Pflanzenartdifferenzierung ist bisher wenig bekannt. Obwohl bei allen Pflanzenarten das Chlorophyllfluoreszenzmuster ähnlich ist, gibt es artabhängige Unterschiede (KERÄNEN *et al.*, 2003). Diese Differenzen lassen sich zur Identifikation nutzen. Die Messung der Chlorophyllfluoreszenz ist unabhängig von Formparametern. Auch Pflanzenteile, die teilweise verdeckt sind, können identifiziert werden.

Im Mittelpunkt der Forschungsarbeiten steht die Frage, ob sich monokotyle und dikotyle Pflanzenarten abhängig von Herkunft und vom Pflanzenalter durch Messung verschiedener Chlorophyllfluoreszenzparameter unterscheiden lassen.

2. Material und Methoden

Versuchspflanzen

Im Versuchsjahr 2003 wurden im Frühjahr/Sommer monokotyle (*Alopecurus myosuroides* = ALOMY, *Apera spica-venti* = APESV) und dikotyle Unkrautarten (*Galium aparine* = GALAP, *Veronica hederifolia* = VERHE) für die Untersuchungen ausgewählt. Die Pflanzen wurden unter kontrollierten Bedingungen (20°C Tages- und Nachttemperatur, 60 % relative Luftfeuchte) im Gewächshaus ausgesät. Etwa drei Wochen nach der Aussaat hatten sich die Keimblätter der Unkräuter vollständig entwickelt. Von einem Teil der Pflanzen wurde jeweils ein Keimblatt abgeschnitten und gemessen. Ein anderer Teil der Pflanzen wurde weiterkultiviert. Sechs Wochen nach Aussaat hatten die Unkräuter 8 bis 10 Laubblätter entwickelt. Von jeder Pflanze wurde das älteste vollständig entwickelte Laubblatt untersucht. Zusätzlich zu den Gewächshausversuchen wurden *Alopecurus myosuroides*, *Apera spica-venti*, *Galium aparine* und *Veronica hederifolia* im Freiland auf 2 m²-Parzellen ausgesät. Auch hierbei erfolgte die Messung der Chlorophyllfluoreszenz der Keim- und Laubblätter. Ferner wurden *Galium aparine* und *Apera spica-venti* im Keim- und Laubblattstadium von zwei Ackerschlägen mit Winterweizen als Kulturpflanze entnommen. Die Pflanzen wurden ausgegraben. Zur Erholung der Pflanzen

wurde erst einen Tag später mit den Chlorophyllfluoreszenzmessungen der Keim- und Laubblätter begonnen. Für die Versuche im Frühjahr 2004 wurden *Viola arvensis* (VIO-AR) und *Bromus arvensis* (BROAR) unter gleichen Bedingungen im Gewächshaus kultiviert und von Ackerschlägen entnommen.

Chlorophyllfluoreszenzspektrometer

Die Chlorophyllfluoreszenzmessungen wurden mit einem PAM-Fluoreszenzbildanalysesystem (Puls-Amplituden moduliert) durchgeführt. Das System besteht aus zwei Licht-emittierenden Dioden (LED; $\lambda_{\max} = 620 \text{ nm}$), einer Halogenlampe (250 Watt), einer CCD-Kamera, einer Steuereinheit und einer Auswerteeinheit (Bild 1). Das mit einer Frequenz von 10 – 33 μs gepulste Messlicht, sowie die kontinuierliche aktinische Strahlung (max. $350 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ Photonen), werden durch die beiden LED-Einheiten erzeugt. Die Sättigungslichtpulse (max. $2500 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ Photonen) werden von der, über einen elektronischen Verschluss gesteuerten Halogenlampe abgegeben. Das Fluoreszenzbild kann mit einer Frequenz von max. 25 Bildern pro Sekunde in einer 8-bit Graustufenskala von der CCD-Kamera aufgenommen werden. Die Kamera ist mit einem Filter ausgestattet, der nur Licht der Wellenlänge 680 nm durchlässt. Die Steuerung der Anlage und Auswertung der Daten erfolgt über ein Windows Programm (FluorCam Version 5.0, 2002). Für die Untersuchungen im Frühjahr/Sommer 2003 wurden zwei Belichtungsprotokolle ausgewählt (F_0 /Kautsky-Effekt und Quenching-Analyse). Die Messungen der Versuche im Frühjahr 2004 erfolgten mit dem Belichtungsprotokoll F_0 /Kautsky-Effekt. Die Protokolle unterscheiden sich in ihrem Zeitaufwand und in der Anzahl an Auswertungsmöglichkeiten. Bei dem Protokoll F_0 /Kautsky-Effekt induzieren zunächst für die Dauer von 3 Sekunden die Messblitze der LEDs die Grundfluoreszenz (F_0). Als Kautsky-Effekt wird der starke Anstieg und anschließend das langsame Absinken der Chlorophyllfluoreszenz Quantenausbeute eines Blattes beim Übergang vom Dunkeln zum Licht bezeichnet. Dieser Effekt lässt sich auch bei Tageslichtbedingungen durch Bestrahlung mit einer künstlichen Lichtquelle induzieren (WALKER, 1988). In der zweiten Phase werden die Versuchsobjekte für 10 Sekunden mit kontinuierlichem aktinischen Licht der LEDs bestrahlt, um den Kautsky-Effekt einzuleiten. Das Protokoll Quenching-Analyse beginnt die Messung der Grundfluoreszenz genauso wie das Protokoll F_0 /Kautsky-Effekt. Unmittelbar darauf folgt die Messung der maximalen Fluoreszenz (F_m), ausgelöst durch einen 1600 ms Lichtpuls der Halogenlampe. Anschließend folgen 40 Sekunden ohne Licht. Dann wird der Kautsky-Effekt für 60 Sekunden mit akti-

nischen Licht der LEDs induziert. 9 Sekunden nach Beginn der Kautsky-Induktion wird durch einen Lichtpuls der Halogenlampe F_m' gemessen. Jeweils nach 16 weiteren Sekunden folgen noch drei Lichtpulse der Halogenlampe. Nach dem Kautsky-Effekt und den vier Lichtpulsen wird die Fluoreszenz F_0' für 3 Sekunden ohne Licht erfasst.



Bild 1: PAM-Fluoreszenzbildanalyseesystem (FluorCam 700 MF)

Versuchsdurchführung und -auswertung

Von den sechs Unkrautarten, die unter kontrollierten Bedingungen im Freiland bzw. im Gewächshaus aufwuchsen, wurden pro Art 30 Keimblätter abgeschnitten und unmittelbar darauf die Chlorophyllfluoreszenz mit dem Belichtungsprotokoll F_0 /Kautsky-Effekt gemessen (Blattoberseite). Alle Versuche wurden jeweils einmal wiederholt, so dass sich pro Pflanzenart 60 Stichproben ergaben. Mit dem zweiten Belichtungsprotokoll Quenching-Analyse wurden im Frühjahr/Sommer 2003 nur die Arten APESV, ALOMY, GALAP und VERHE gemessen. Für die Messung der Laubblätter wurden die ältesten vollständig entwickelten Laubblätter abgetrennt und gemessen. Bei den Versuchen mit Pflanzen vom Feld wurden von GALAP, VIOAR, BROAR und APESV Keimblätter und Laubblätter abgeschnitten und mit dem Protokoll F_0 /Kautsky-Effekt gemessen. Die Quenching-Analyse erfolgte nur bei GALAP und APESV.

Von den Messdaten wurden bei der F_0 /Kautsky-Analyse nur die Parameter F_0 (Grundfluoreszenz) und F_p (Peak-Fluoreszenz nach der Induktion des Kautsky-Effektes) und bei der Quenching-Analyse nur die Parameter F_0 , F_m (maximale Fluoreszenz), F_0' (Grundfluoreszenz nach dem Kautsky-Effekt), F_m' (maximale Fluoreszenz während des Kautsky-

Effektes), F_p und F_t (Steady-State-Fluoreszenz während des Kautsky-Effektes) zur Auswertung verwendet. Die Daten wurden mit der Statistiksoftware SAS System für Windows (Version 6.12) bearbeitet. Die verschiedenen Parameter wurden geblockt für jede Pflanzenart miteinander verglichen und auf signifikante Unterschiede untersucht. Es wurde eine einfaktorielle multivariate Varianzanalyse (MANOVA) durchgeführt. Um zu prüfen, zwischen welchen Pflanzenarten signifikante Unterschiede existieren, wurde ein multipler Mittelwert-Vergleich durchgeführt. Auf einen direkten Vergleich zwischen den Pflanzen verschiedener Herkünfte wurde verzichtet.

3. Ergebnisse

Die Chlorophyllfluoreszenzmessungen zeigten bei Verwendung der F_0 /Kautsky-Analyse bei den Gewächshauspflanzen im Keimblattstadium signifikante Unterschiede zwischen den monokotylen (APESV, BROAR und ALOMY) und den dikotylen Arten (GALAP, VIOAR und VERHE). Mit der Quenching-Analyse war ebenfalls eine Differenzierung zwischen monokotylen und dikotylen Arten im Keimblattstadium möglich. APESV und ALOMY konnten signifikant anhand der Quantenausbeute in Abhängigkeit von verschiedenen Fluoreszenzparametern unterschieden werden (Bild 2). Dagegen konnten GALAP und VERHE nicht voneinander differenziert werden. Beide Belichtungsprotokolle erzielten in allen Versuchen jeweils die gleichen Ergebnisse.

Bei den Pflanzen, die unter kontrollierten Bedingungen im Freiland aufwuchsen, zeigten sich im Keimblatt- und im Laubblattstadium die gleichen Ergebnisse.

Zwischen APESV, BROAR, GALAP und VIOAR die von zwei Ackerschlägen stammten, konnten im Keimblattstadium und im Laubblattstadium signifikante Unterschiede festgestellt werden. Hingegen konnten Pflanzen aus Gewächshaus und Freiland im Laubblattstadium sowohl bei der F_0 /Kautsky-Analyse als auch bei der Quenching-Analyse nicht signifikant unterschieden werden (Bild 3).

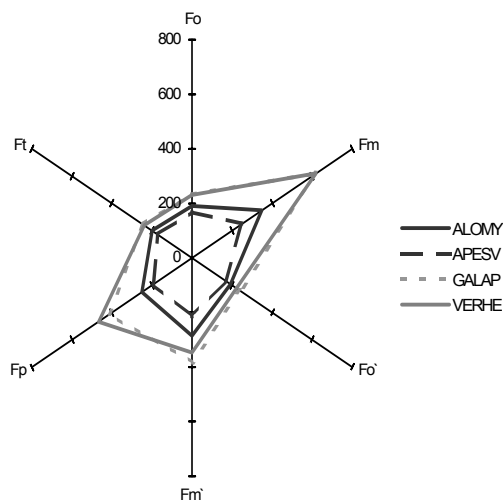


Bild 2: Quantenausbeute für die Unkrautarten (Gewächshaus) ALOMY, APESV, GALAP und VERHE im Keimblattstadium in Abhängigkeit von den Fluoreszenzparametern F_0 , F_m , F_0' , F_m' , F_p und F_t (Quenching-Analyse)

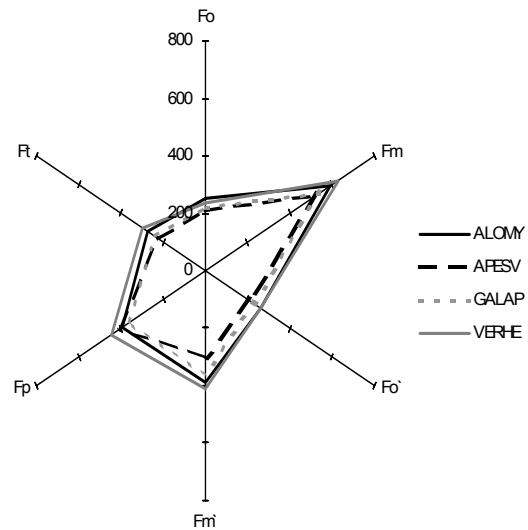


Bild 3: Quantenausbeute für die Unkrautarten (Gewächshaus) ALOMY, APESV, GALAP und VERHE im Laubblattstadium in Abhängigkeit von den Fluoreszenzparametern F_0 , F_m , F_0' , F_m' , F_p und F_t (Quenching-Analyse)

4. Diskussion

Chlorophyllfluoreszenzmessungen zeigen für Ober- und Unterseiten der Pflanzenblätter häufig unterschiedliche Fluoreszenzsignale. Die Fluoreszenzsignale gehen hauptsächlich von den chlorophyllhaltigen Zellen, die nahe der Oberfläche liegen aus. Die Blattunterseiten verfügen über eine geringere Chloroplastendichte und zeigen deshalb ein anderes Fluoreszenzmuster (NEDBAL *et al.*, 2000). In den vorliegenden Versuchen wurde die Chlorophyllfluoreszenz der Blattoberseiten gemessen. Beide Belichtungsprotokolle zeigten in allen Versuchen ähnliche Ergebnisse, obwohl bei der F_0 /Kautsky-Analyse nur 2 Fluoreszenzparameter statistisch ausgewertet wurden. Die zeitintensivere Quenching-Analyse bietet mehr Auswertungsmöglichkeiten (in diesem Fall wurden 6 Parameter ausgewertet). Bei den Unkräutern aller Herkünfte, konnte mit beiden Belichtungsprotokollen ein signifikanter Unterschied zwischen mono- und dikotylen Pflanzenarten im Keimblattstadium festgestellt werden. Somit ist die F_0 /Kautsky-Analyse ausreichend für eine Differenzierung. TYYSTJÄRVI *et al.* (1999) testeten ein PAM-Fluoreszenzanalyse-system in einem 1, 3 und 8 Sekunden dauernden Experiment. Selbst mit dem 1 Sekunden Experiment konnten noch 90 % der Arten erkannt werden.

Die Auswertungen der Messergebnisse für die Pflanzenarten im Laubblattstadium ergaben keine signifikanten Unterschiede zwischen den Arten. Trotz unterschiedlicher Strukturen und Flächen der Blätter, lassen sich Differenzen zwischen den Pflanzenarten im Keimblattstadium und auch im Laubblattstadium nicht mit der Blattstruktur begründen. Nach KERÄNEN *et al.* (2003) können Pflanzen in frühen Entwicklungsstadien besser voneinander unterschieden werden, da sie bis dahin kaum Umwelteinflüssen ausgesetzt sind, die sich auf die Chlorophyllfluoreszenz auswirken können. Entscheidend ist die Physiologie und die Reaktion der Pflanze auf Umweltsignale. Physiologische Gründe für Differenzen in der Chlorophyllfluoreszenz könnten beispielsweise die Abschattung der Photosysteme I und II durch Pigmente, ein verschiedener Anteil von PS I und II und Unterschiede in den Stoffwechselfrioritäten (z. B. Redox-Export aus den Chloroplasten) sein (BILGER *et al.*, 2001). Mit den Messungen der Gewächshaus-, Feld- und Freilandpflanzen wird deutlich, dass sich die sechs Arten im Keimblattstadium gut voneinander unterscheiden lassen, obwohl sie unter verschiedenen Umweltbedingungen aufgewachsen sind. Dies wurde auch von KERÄNEN *et al.* (2003) beobachtet. Experimente mit Freiland- und Gewächshauspflanzen zeigten, dass nur im Keimblattstadium Temperatur, Sonneneinstrahlung und Bodenwassergehalt wenig Einfluss auf das Fluoreszenzmuster hatten. Da die Pflanzen aus dem Freiland auf einer 2 m² großen Parzelle wuchsen, mit gleichen Umweltbedingungen, konnten sie genau wie die Gewächshauspflanzen in späteren Entwicklungsstadien nicht differenziert werden. Bei den Pflanzen vom Feld war hingegen auch in älteren Entwicklungsstadien eine Unterscheidung möglich. Da die Pflanzen vom Feld verschiedenen Umwelteinflüssen ausgesetzt waren (z. B. unterschiedliche klimatische Bedingungen, verschiedene Bodenzusammensetzungen, Schwankungen in der Nährstoffversorgung), zeigten sie kein einheitliches Fluoreszenzmuster. Es bleibt allerdings zu klären, ob sich ältere Pflanzen, die unter Feldbedingungen aufgewachsen sind, zuverlässig unterscheiden lassen.

5. Literatur

- BILGER W, JOHNSON T, SCHREIBER U (2001)** UV-excited chlorophyll fluorescence as a tool for the assessment of UV-protection by the epidermis of plants. *J. Exp. Bot.* 52: 2007-2014
- HERPPICH WB (2001)** Einsatzmöglichkeiten der Chlorophyllfluoreszenzbildanalyse in der gartenbaulichen Forschung. *Computer-Bildanalyse in der Landwirtschaft, Workshop, Bornimer Agrartechnische Berichte* 26: 91-104

- KERÄNEN M, ARO EM, TYYSTJÄRVI E (2003)** Automatic plant identification with chlorophyll fluorescence Fingerprinting. *Precision Agriculture*, 4: 53-67
- NEDBAL L, SOUKUPOVA J, KAFTAN D, WHITMARSH J, TRTILEK M (2000)** Kinetic imaging of chlorophyll fluorescence using modulated light. *Photosynthesis Research* 66: 3-12
- TYYSTJÄRVI E, KOSKI A, KERÄNEN M, NEVELAINEN O (1999)** The Kautsky curve is a built-in barcode. *Biophysical Journal* 77: 1159-1167
- WALKER DA (1988)** Some aspects of the relationship between chlorophyll a fluorescence and photosynthetic carbon assimilation. In: Lichtenthaler, H. K. (Hrsg.): *Applications of chlorophyll fluorescence*, Kluwer Academic Publishers: 13-20

Bildgestützte Robotersteuerung zur automatisierten Ernte von Gerberablütenstielen

Image-based robot control for automatic harvesting of gerbera cut flowers

Marco Kawollek und Thomas Rath
Institut für Technik in Gartenbau und Landwirtschaft, Universität Hannover
Herrenhäuser Str. 2; 30419 Hannover
e-mail: kawollek@itg.uni-hannover.de
www.itg.uni-hannover.de

Zusammenfassung: Am Institut für Technik in Gartenbau und Landwirtschaft werden grundlegende Untersuchungen zum Einsatz der Robotersteuerung auf der Grundlage bildanalytischer Verfahren für gartenbauliche Kulturarbeiten durchgeführt. Im Rahmen dieser Arbeiten wurde ein System zur automatisierten Ernte von Gerberablütenstielen entwickelt. Dieses System besteht aus einem Bildverarbeitungsteil zur Identifizierung der Blütenstiele, der dreidimensionalen Modellierung dieser Objekte und einer Pfadplanung mit anschließender Roboteransteuerung. Die einzelnen Komponenten des bisher entwickelten Systems werden dargestellt.

Deskriptoren: Bildverarbeitung, *Gerbera jamesonii*, automatisierte Ernte, Robotersteuerung, Pfadplanung

Abstract: *At the Institute for Horticultural and Biosystems Engineering basic research is done on the use of robotic control based on computer vision for horticultural production. Within this research a system for automatic harvesting of gerbera cut flowers is developed. This system mainly consists of a computer vision part for identifying flower stems, a three-dimensional modelling of these objects and a pathplanning modul for robotic control. The different components of the system are presented here.*

Keywords: *computer vision, Gerbera jamesonii, automatic harvesting, robotic control, pathplanning*

1. Einleitung

Die zukünftige gartenbauliche Produktion wird durch einen hohen Automatisierungsgrad gekennzeichnet sein. Neben dem Einsatz einfacher Automaten werden komplexe und flexible Systeme zum Einsatz kommen, die stationär oder beweglich arbeiten. Ein wichtiges Kriterium dabei ist die autonome Arbeitsweise der Systeme, das heißt, die Pflanzenobjekte, die eine hohe Variabilität und Inhomogenität aufweisen, müssen individuell erkannt und manipuliert werden. Aus diesem Grunde sind neben den eigentlichen robotischen Systemen auch aufwendigere Sensorsysteme und bildanalytische Verfahren für die Robotersteuerung notwendig.

Am Institut für Technik in Gartenbau und Landwirtschaft werden zur Zeit grundlegende Untersuchungen zum Einsatz der Robotersteuerung auf der Grundlage bildanalytischer Verfahren am Beispiel der Ernte von Gerberablütenstielen durchgeführt. Die Gerbera wurde als Modellpflanze ausgewählt, da es sich bei den Blütenstielen um recht einfache geometrische Objekte handelt. Das bisher entwickelte Gesamtsystem aus Anlagenkomponenten, Bildverarbeitung und Roboterpfadplanung wird im folgenden vereinfacht dargestellt.

2. Versuchsanlage und Setup

Die bisherigen Untersuchungen wurden am Roboterversuchstand des Institutes durchgeführt. Die Versuchsanlage (siehe Bild 1) besteht im wesentlichen aus einem Transferumlaufsystem für den Transport der Pflanzen, einem Kamerasystem und zwei Handhabungsrobotern mit sechs Freiheitsgraden, die für die Erweiterung des Arbeitsbereiches zusätzlich jeweils auf einer Linearachse montiert sind. Alle Komponenten können zentral über einen PC gesteuert werden. Details der Versuchsanlage wurden bereits von KAWOLLEK *et al.* 2002 beschrieben.

Die Pflanzen wurden am zentralen Arbeitsplatz der Versuchsanlage auf einer drehbaren Palette positioniert. Auf diese Weise sind Aufnahmen aus unterschiedlichen Positionen möglich. Die Bildaufnahmen wurden mit zwei Kameras in Stereoanordnung durchgeführt. Die CCD-Kameras sind zusätzlich mit NIR-Filteraufsätzen ausgestattet, welche die Strahlung erst ab einer Wellenlänge von ca. 800 nm durchlassen.

Für die Testaufnahmen wurden die Pflanzen aus 8 unterschiedlichen Positionen (jeweils um 45° gedreht) aufgenommen.

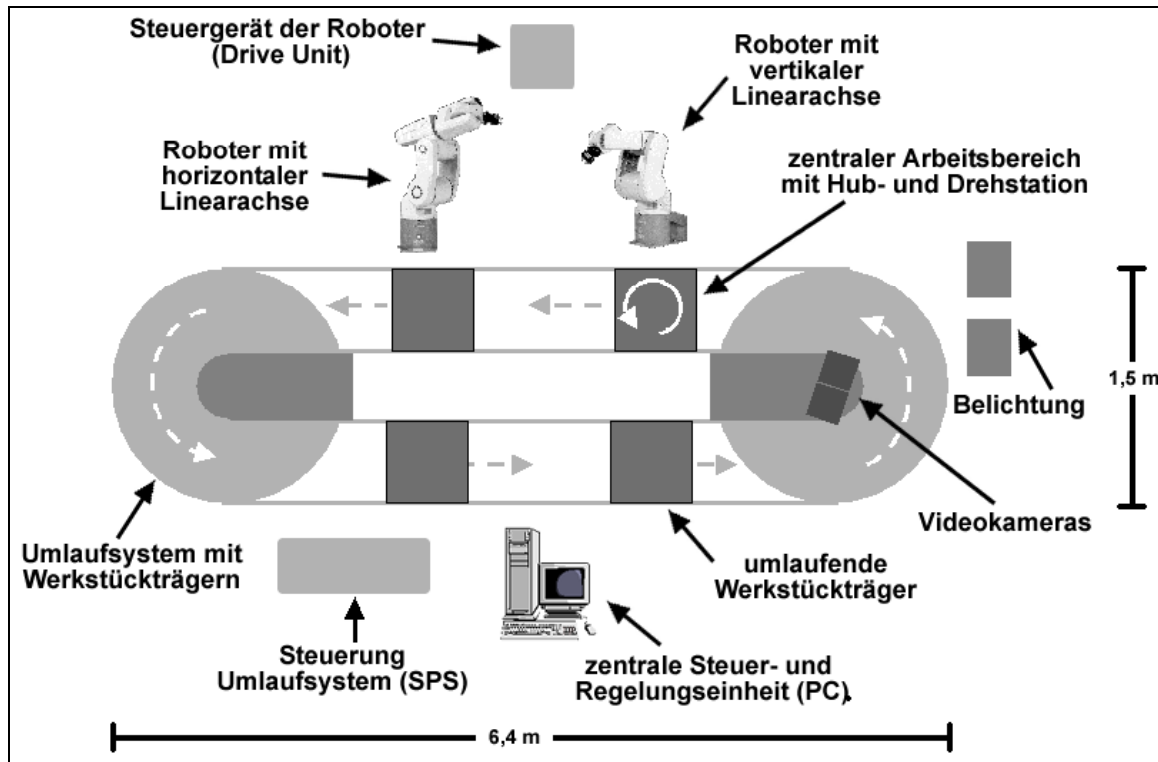


Bild 1: Schematische Darstellung der Versuchsanlage

3. Bildverarbeitung – Identifizierung der Blütenstielobjekte

Für die Berechnung der Ernteposition und die anschließende Roboteransteuerung wurde ein Algorithmus entwickelt, welcher aus den Bildern die Blütenstiele segmentiert. Aus den Informationen beider Bilder kann auf der Basis dieser Objekte dann ein stark vereinfachtes 3D-Modell generiert werden.

Zunächst wird aus den Bildern die Gesamtpflanze segmentiert. Die Segmentierung wird durch die Verwendung von NIR-Filtern und konstanter Belichtung mit Metallhalogenlampen vereinfacht.

Im Anschluss daran werden Blütenstielregionen im Bild gesucht, welche für die Weiterverarbeitung in Frage kommen. Zuerst wird anhand eines schrittweisen Flächendifferenzverfahrens auf der Basis von Erosionsfiltern (RATH, 1997) die Hauptpflanze im Bild identifiziert

und die so erkannte Fläche von der Ausgangsregion (Gesamtpflanze) abgezogen. Das Ergebnis dieses Verarbeitungsschrittes sind mögliche Bildbereiche mit Blütenstielen, deren Regionen dann weiter verarbeitet werden. Hierbei besteht das große Problem, dass sich die Blütenstielregionen mit anderen Objekten überlappen können.

Diese anderen Objekte können andere Blütenstiele, aber auch Blüten oder Blätter sein.

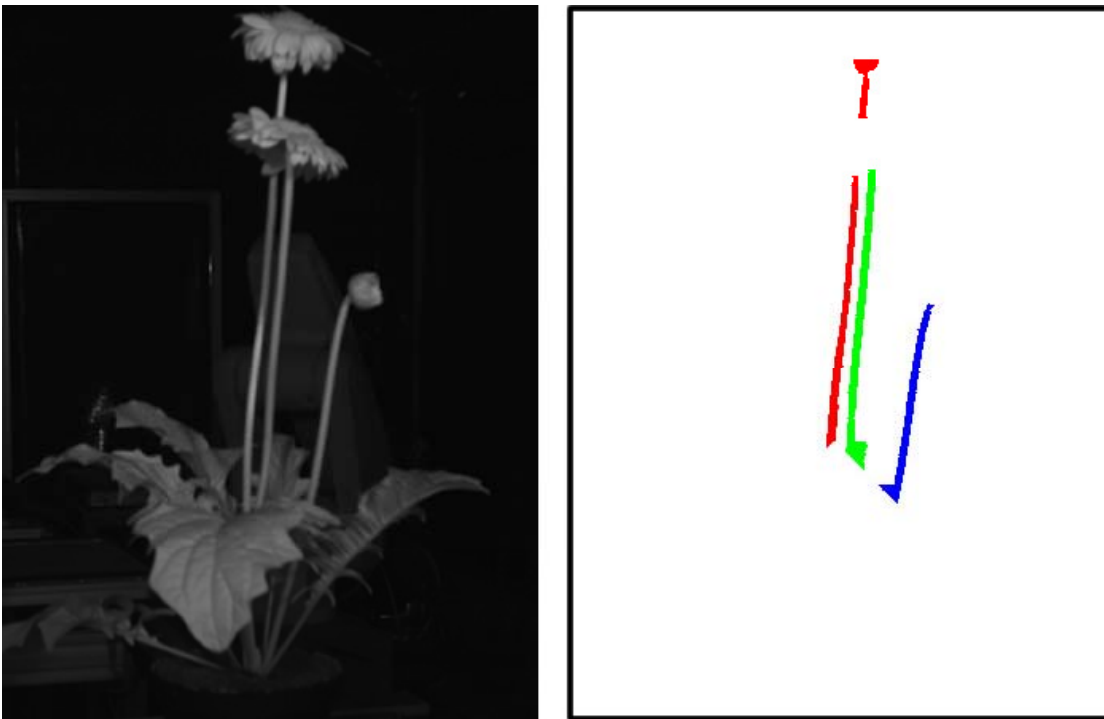


Bild 2: Aufnahme einer Gerbera mit NIR-Filter (links) und erkannte Blütenstielobjekte mit Überlappungen(rechts)

Der entwickelte Algorithmus unterteilt deshalb in einem ersten Schritt potenzielle Blütenstielregionen in zahlreiche unverzweigte Regionen. Im Anschluss werden diese mittels verschiedener Entscheidungsregeln auf Blütenstielobjektkandidaten reduziert. Dabei werden Störungen und Kreuzungsbereiche entfernt. Ein zentrales Kriterium im Entscheidungsprozess stellt dabei die Suche nach parallelen Kantenstrukturen in den vorliegenden Regionen dar. Schließlich werden die übrig gebliebenen Segmente mittels eines Kollinearitätskriteriums (LOWE, 1987) zu Blütenstielobjekten zusammengesetzt. Diese Blütenstielobjekte bilden dann die Grundlage für die Roboteransteuerung. In Bild 2 sind die segmentierten Blütenstiele einer Testpflanze exemplarisch dargestellt.

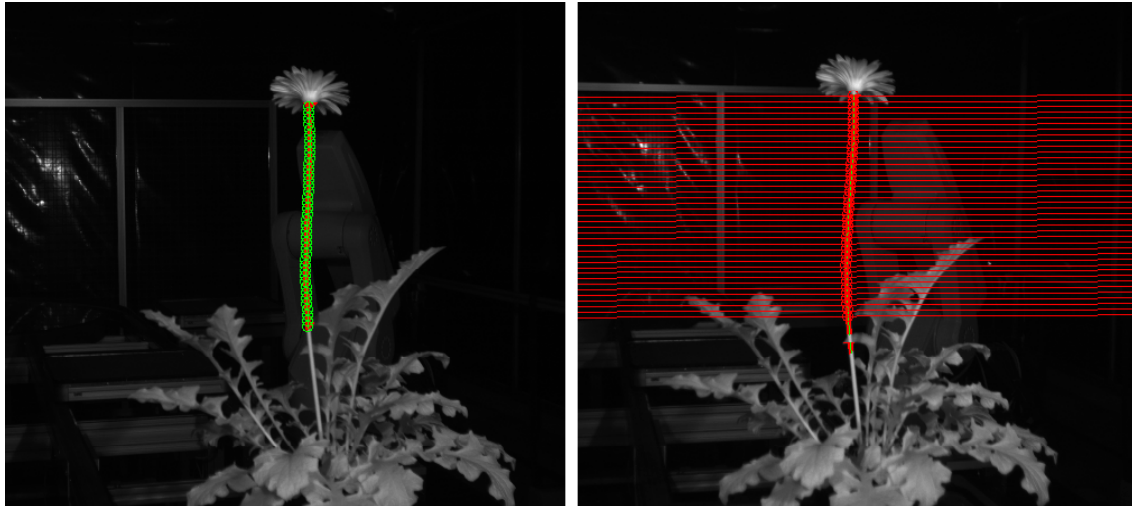


Bild 3: Suche nach korrespondierenden Bildpunkten mittels Epipolargeometrie bei einer Pflanze mit einem Blütenstiel. Ausgehend von Stützpunkten im linken Bild wird die Suche nach korrespondierenden Punkten im rechten Bild durch Epipolarlinien vereinfacht.

4. Erstellung eines 3D-Modells

Wurden in beiden Bildern die gleiche Anzahl Blütenstielobjekte erkannt, so werden diese aufgrund ihrer Lage im Bild einander zugeordnet, so dass Blütenstielobjektpaare entstehen. Diese Blütenstielobjektpaare sind die Voraussetzung für die Gewinnung von Lageinformationen im Raum. Hierzu werden zunächst von den Blütenstielen die Mittellinien bestimmt. Im ersten Bild werden durch Überlagerung mit einem festgelegten Linienraster Schnittpunkte ermittelt, welche als Stützstellen für das spätere Blütenstielmodell dienen. Zu jedem dieser Punkte wird mit Hilfe der epipolaren Geometrie der Kameras der korrespondierende Punkt im zweiten Bild gesucht. Dazu wird der Suchbereich auf die sogenannte Epipolarlinie eingeschränkt (näheres zur Epipolargeometrie siehe z.B. XU und ZHANG, 1996). Bild 3 stellt diesen Prozess der Zuordnung korrespondierender Punkte exemplarisch dar.

Aus den so ermittelten korrespondierenden Punkten werden mit den bekannten Kameraparametern mittels Triangulation Weltkoordinaten für die einzelnen Punkte errechnet. Diese dienen dann als Gerüst für das 3D-Modell des Blütenstiels. Benachbarte Punkte dieses Gerüsts werden durch Linien miteinander verbunden. Neben den Blütenstielen werden die Pflanze und die Blüte stark vereinfacht als Zylinder dargestellt (siehe auch abstrahiertes Modell der Pflanze in Bild 4).

5. Ernteprozess

Der eigentliche Ernteprozess gliedert sich in folgende Schritte:

1. Ermittlung des Greifpunktes am Stielobjekt
2. Berechnung der inversen Kinematik für den ermittelten Greif- bzw. Erntepunkt am Blütenstiel
3. Berechnung eines kollisionsfreien Pfades, der sowohl die Pflanze als auch die Teile der Versuchsanlage berücksichtigt
4. Wenn eine Lösung vorhanden ist, dann Ansteuerung der Roboter mit den Zwischenpositionen des ermittelten Pfades

Die Ermittlung des Greifpunktes erfolgt aufgrund der dreidimensionalen Daten des Blütenstielobjektes. Der Greifpunkt wird zunächst so gewählt, dass der Greifer den Blütenstiel möglichst weit unten erfasst, ohne dass er dabei mit der Pflanze kollidiert. Die Orientierung des Greifers wird so gewählt, dass sie annähernd der Sichtrichtung der Kameras auf die Pflanze entspricht.

Für die so ermittelte Position des Greifers wird die inverse Kinematik des Roboters errechnet, d.h. die notwendige Stellung der einzelnen Achsen, um diese Position zu erreichen. Für die Berechnung werden Teile der Microb-Bibliothek (IREQ, 2004) verwendet.

Für die anschließende Pfadplanung findet die Bibliothek MPK - Motion Planning Kit - (STANFORD UNIVERSITY, 2004; SCHWARZER *et al.*, 2002; SANCHEZ *et al.*, 2001) Verwendung. Es handelt sich dabei um eine C++-Bibliothek, welche die Pfadplanung und Kollisionsüberprüfung für Roboter mit unterschiedlicher Anzahl von Freiheitsgraden und sogar die Planung von Mehrrobotersystemen ermöglicht. Neben den eigentlichen Berechnungen ist auch eine visuelle Ausgabe des Bewegungsablaufes der Roboter möglich. Der Implementierungsaufwand für ein Robotermodell ist jedoch relativ hoch, da nur sehr wenige Robotertypen vorgegeben sind. Für die Pfadplanung der Versuchsanlage wurden dreidimensionale Modelle der Roboter und ein vereinfachtes Modell des Arbeitsbereiches der Versuchsanlage erstellt und die notwendigen Teile der MPK-Bibliothek in die eigene Software integriert.

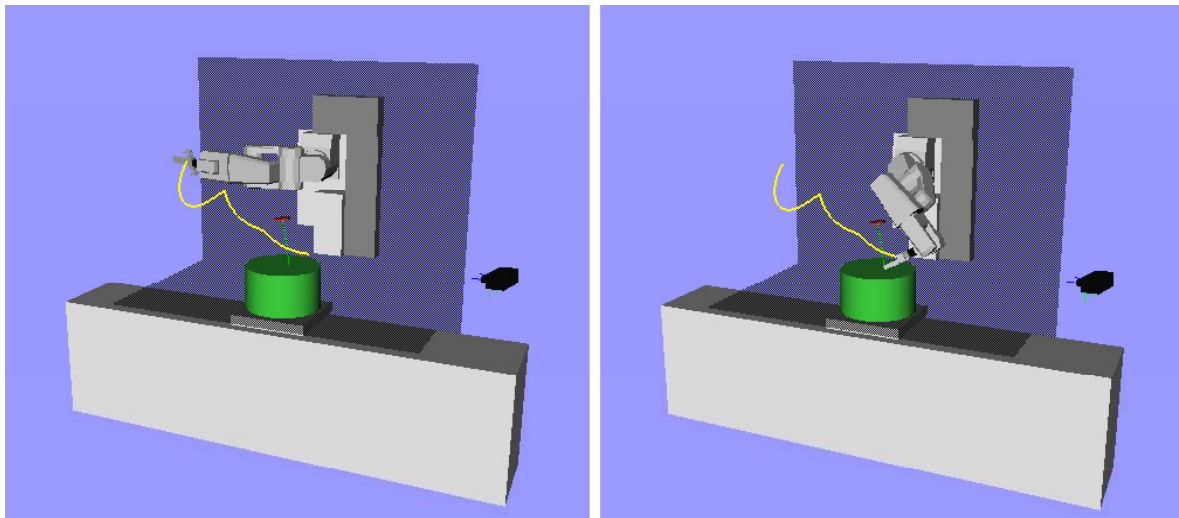


Bild 4: Geplanter Bewegungspfad von der Ausgangsposition (links) zur Ernteposition (rechts). Die helle Linie ist der Pfad, auf der sich der Greifer entlangbewegt.

Die Gültigkeit und Güte der berechneten inversen Kinematiken sowie die Übereinstimmung des von der Pfadplanung angezeigten Bewegungsablaufes mit dem tatsächlichen Verhalten des Roboters wurde vor ersten praktischen Tests mittels der Simulationssoftware Cosimir (EFR, 2004) überprüft.

Im Anschluss an die Erkennung der Blütenstiele wird das errechnete Modell der Pflanze in die bestehende Szene integriert und steht so zur Kollisionsprüfung zur Verfügung. Das Programm überprüft dann zunächst, ob die berechnete Erntestelle kollisionsfrei ist und berechnet dann ausgehend von der aktuellen Stellung des Roboters einen möglichen Pfad, der in Form von Zwischenpositionen ausgegeben wird. Das Ergebnis einer solchen Pfadplanung ist in Bild 4 dargestellt.

Diese errechneten Zwischenpositionen dienen dann zur direkten Roboteransteuerung für die Ernte des betreffenden Blütenstiels (siehe Bild 5).



Bild 5: Ernte des Blütenstiels

6. Ausblick

Bisher wurden nur einzelne Ernterversuche durchgeführt, um die prinzipielle Funktionsweise des Gesamtsystems zu testen. Endgültige Ergebnisse zur Funktionsweise und Effizienz des Systems werden erst abschließende Ernterversuche bringen, die sich zur Zeit in der Vorbereitung befinden.

Das hier beschriebene System stellt in dieser Form noch keine praxisreife Lösung dar. Ein Grund dafür ist, dass zur Zeit der ermittelte Greifpunkt noch wesentlich höher liegt, als dies in der Praxis üblich ist. Hier erweist es sich als problematisch, dass ein Teil des Blütenstiels durch die Hauptpflanze verdeckt wird und durch die Bildverarbeitung somit nicht erfasst werden kann. Eine mechanische Lösung in Form eines modifizierten Greifers könnte hier Abhilfe schaffen. Des weiteren ist keine Reifebestimmung der Blütenstiele integriert. Das System stellt „lediglich“ eine Lösung des Erntevorgangs dar. Möglichkeiten zur Bestimmung der Erntereife von Gerbera stellt AJWANG (2000) vor.

Das beschriebene System ist entsprechend dem Grundgedanken der Entwicklung modular so aufgebaut, dass eine Übertragung einzelner Komponenten bzw. Komponentengruppen für andere Automatisierungsvorgänge denkbar ist. Interessant erscheint insbesondere das prinzipielle Zusammenspiel der flexiblen dreidimensionalen Modellierung der Pflanze mit der kollisionsfreien Pfadplanung, die auch um weitere Roboter ergänzt werden

kann. So ist es aufgrund der offenen Architektur möglich, Modelle ganz anderer Pflanzen bzw. Objekte in das System zu integrieren und so die unterschiedlichsten Arbeiten durchführen zu lassen.

7. Literaturangaben und Weblinks

AJWANG P (2000) Computer Vision for Detection of Cut Flower Maturity. MSc-Thesis, Institut für Technik in Gartenbau und Landwirtschaft, Universität Hannover

EFR (2004) Cosimir Homepage, <http://www.cosimir.de>, 10.05.2004

IREQ (2004) Homepage MICROB (Module Intégrés de Contrôle de ROBots), <http://www.robotique.ireq.ca/microb/en/index.html>, 07.05.2004

KAWOLLEK M, TANTAU HJ, RATH T (2002) Entwicklung eines Versuchsstandes zur bildanalytisch gestützten Robotersteuerung im Pflanzenbau (*Development of a test stand for vision based robotics in plant production*). Gartenbauwissenschaft, 67 (4): 121 - 127

LOWE DG (1987) Three-Dimensional Object Recognition from Single Two-Dimensional Images. Artificial Intelligence, 31, 3: 355 - 395

RATH T (1997) Methoden zur computerbildanalytischen Pflanzenidentifikation am Beispiel dendrologischer Bestimmungen. Gartenbautechnische Informationen, Heft 42. Institut für Technik in Gartenbau und Landwirtschaft, Universität Hannover

SANCHEZ G, LATOMBE JC (2001) A Single-Query Bi-Directional Probabilistic Roadmap Planner with Lazy Collision Checking. Int. Symposium on Robotics Research (ISRR'01), Lorne, Victoria, Australia, November 2001

SCHWARZER F, SAHA M, LATOMBE J-C (2002) Exact collision checking of robot paths. In Workshop on Algorithmic Foundations of Robotics (WAFR), Nice, Dec 2002

STANFORD UNIVERSITY (2004) Homepage MPK (Motion Planning Kit), <http://robotics.stanford.edu/~mitul/mpk/>, 07.05.2004

XU G, ZHANG Z (1996) Epipolar Geometry in Stereo, Motion and Object Recognition, A Unified Approach. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht

Bestimmung der Lückigkeit von Rasen mit Hilfe der digitalen Bildverarbeitung

Percent ground cover measurement on turf grass by digital image processing

Reiner Lock¹, Ingo Rademacher¹, H. Nonn², Walter Kühbauch¹

¹ Institut für Pflanzenbau, Universität Bonn, D-53115 Bonn

e-mail: r.lock@uni-bonn.de

² WOLF - Garten, D-57518 Betzdorf

Kurzfassung: Die Lückigkeit ist eine wichtige Größe zur Beschreibung des Zustandes von Rasen. Üblicherweise wird die Lückigkeit durch visuelle Bonitur geschätzt. Nachteilig bei diesem Verfahren sind Ungenauigkeiten, die Personenabhängigkeit der Ergebnisse sowie der hohe Arbeits- und Zeitaufwand. Die rasante technische Entwicklung der letzten Jahre gestattet eine hoch auflösende optische Erfassung der Vegetation mit digitalerameratechnik. Eine geeignete Bildverarbeitung kann die Lückigkeitsbestimmung in einem standardisierten Verfahren genauer und objektiver machen. Um zwischen Boden und Pflanze zu unterscheiden, nutzt die Bildverarbeitungssoftware üblicherweise die Farbinformation aus. Es wird in diesem Beitrag gezeigt, dass die alleinige Verwendung der Farbinformation zu Ungenauigkeiten führen kann. Durch Berücksichtigung weiterer morphologischer Merkmale kann der Einfluss von Fehlerquellen deutlich verringert werden. Es wurden verschiedene Bildverarbeitungsverfahren erprobt und deren Wirkung in einem Versuch mit Rasen demonstriert.

Deskriptoren: Digitale Bildverarbeitung, Rasen, Lückigkeit, Deckungsgrad,

Summary:

Percent ground cover is a significant characteristic of turf grass quality and currently evaluated by subjective ratings. However, ratings are subjected to significant variation and therefore difficult to reproduce. The rapid development in digital camera techniques offers the possibility to substitute ratings by quantitative measurements. Since modern digital still image cameras provide images with high spatial resolution and high colour depth results of image processing strongly depend yet on the software algorithms used. In the present study different specific algorithms for digital image processing have been investigated on images obtained from a field experiment. The experiment was conducted in 2002 using turf grass plots with artificially established gaps in different size and shape representing 5 %, 10 %, and 15 % of plot area. Images of the canopy were taken using a digital still image camera. Image processing was done using soil colour and additionally morphological operators to improve the accuracy. Results show high accuracy and in particular the robustness of the used classifiers.

Keywords: Digital Image Analysis, turf grass, cover

1. Einleitung

Digitale Bildverarbeitung (DBV) stellt ein hohes Potenzial zur Optimierung von landwirtschaftlichen Produktionsprozessen im Rahmen des Präzisionspflanzenbaus dar. Vielversprechend erscheint dabei die enorme Entwicklung in der Hardware (Kameratechnik), die es ermöglicht Bilder hoher Auflösung mit hoher Wiederholung im Bereich der Nah- und Fernerkundung zu liefern. Das Potenzial im Bereich der Bildauswertung (Software) ist jedoch noch lange nicht ausgeschöpft. Vergleicht man die Leistungsfähigkeit des menschlichen Auges mit dem eines Bildverarbeitungssystems, so erscheinen die Ergebnisse der DBV sogar eher moderat. Der Grund dafür liegt im enorm komplexen Vorgang des Sehens und Erkennens, den das Auge ohne merkliche Anstrengung leistet. Allerdings müssen die erkannten Objekte (Pflanze oder Boden) auch hinsichtlich ihrer (Größe) Fläche bestimmt (geschätzt) werden wodurch bei visueller Bonitur mit dem Auge Ungenauigkeiten entstehen. Gelingt es nun mit Hilfe geeigneter Software für einen bestimmten Anwendungsfall Objekte eindeutig zu identifizieren, dann liefert die DBV bessere Ergebnisse, da Flächen exakter bestimmt werden können. Verfahren zur optischen Vermessung von Pflanzenteilen und –gewebe mit DBV unter dem Mikroskop sind seit langem bekannt. (KÜHBAUCH und BESTAJOVSKY 1983).

Eine weitere Fehlerquelle ist die Personenabhängigkeit von Boniturergebnissen. Softwarealgorithmen hingegen lassen sich standardisieren, so dass Bonituren, die an verschiedenen Versuchsstandorten oder zu verschiedenen Zeiten durchzuführen sind, immer mit dem gleichen Verfahren durchgeführt werden können. In dem hier beschriebenen Projekt wurden Verfahren entwickelt die speziell zugeschnitten und geeignet sind, die Lückigkeit für Grünland- und Rasenflächen zu bestimmen. Dazu wurde ein Versuch angelegt, bei dem künstlich Lücken ausgestanzt wurden. Von den Flächen wurden mit einer konventionellen Digitalkamera Bilder aufgenommen und mit verschiedenen Bildverarbeitungstechniken ausgewertet. Wie RICHARDSON *et al.* (2001) zeigten, konnte durch Verwendung des Farbmerkmals eine Unterscheidung zwischen Boden und Pflanze erreicht werden und damit eine Bestimmung des Deckungsgrades. In der hier beschriebenen Arbeit wurde darüber hinausgehend untersucht, inwieweit durch die zusätzliche Verwendung von morphologischen Parametern die Ergebnisse verbessert werden können.

2. Material und Methoden

In 2002 wurde ein Rasen-Feldversuch angelegt (*Lolium.perenne* L. und *Poa pratensis* L.). Dabei wurden in Rasenparzellen mit Werkzeugen Lücken verschiedener Form (rechteckig 10 cm* 15 cm und kreisförmig \varnothing 8,5 cm) und verschiedener Quantität (5 %, 10 %, 15 % Lückigkeit) aus dem Rasen ausgestanzt. Die Löcher wurden anschließend wieder mit Boden verfüllt. Von den 6 Varianten wurden 2 Wiederholungen angelegt. Der Rasen wurde auf 3,5 cm Schnitthöhe gemäht. Die Bilder wurden mit einer Digitalkamera (Nikon coolpix 995 Auflösung: 3,3 Megapixel) aufgenommen. Die Kamera befand sich in einer lichtdichten Kammer (B* L* H = 50 cm* 50 cm* 100 cm) mit künstlicher Beleuchtung (4*Sylvania Mini-Lynx 15 Watt).

3. Ergebnis und Diskussion

Zur Auswertung der Bilder wurden verschiedene Bildverarbeitungsschritte entwickelt, welche die besonderen Eigenschaften von Rasen berücksichtigen. Bild 1a zeigt eine typische Aufnahme einer Rasenfläche; durch eine (künstliche) Verletzung ist eine Lücke entstanden. Es ist zu erkennen, dass der Boden nicht aus einem einzigen Farbton, sondern vielmehr aus einer Vielzahl von hellen und dunklen Brauntönen besteht. Außerdem ragen einzelne Blätter in die Lücke hinein und reduzieren damit die optisch wahrnehmbare Lückenfläche. Im folgenden werden die einzelnen Bildverarbeitungsschritte erläutert.

Das Auge besitzt, wie bereits erwähnt, ein hohes Detektionsvermögen. In Bild 1a wurde daher zunächst der Lückenverlauf nach Augenmaß eingezeichnet. Die Bildverarbeitung sollte zu einem ähnlichen Ergebnis kommen. Zur Unterscheidung zwischen Boden und Pflanze ist die Farbe ein wichtiges Merkmal. In einer teach – in - Prozedur wurden mehrere Farbproben vom Boden entnommen. Alle Farboperationen wurden im HSI - Farbraum durchgeführt, da hierdurch eine Entkopplung von Intensität und Farbinformation erreicht wird. (GONZALEZ und WOODS, 1993)



Bild 1a): Nach Augenmaß eingezeichnete Lückenfläche

Durch die Farbproben wird im HSI Merkmalsraum ein Quader definiert. Jedes Bildpixel dessen Farbmerkmal mit dem zuvor für Boden definierten Farbmerkmal übereinstimmt ist im nebenstehenden Bild rot markiert. Die sichtbare Bodenfläche wurde durch diese Operation bereits gut detektiert. Dennoch wurden zusätzlich eine Vielzahl sehr kleiner Objekte markiert, die nicht mit zur Lückenfläche gezählt werden dürfen. Ursache sind Abschattungen der Blätter untereinander. Diese Bereiche werden durch reine Farbanalyse i.d.R. fälschlicherweise als Boden mitgezählt.

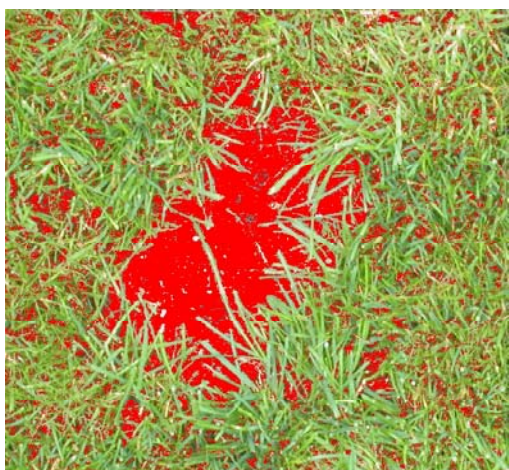


Bild 1b): Ergebnis der Farbanalyse

Da diese Objekte durch Abschattung entstehen (Schattenpixel), überschreiten sie eine bestimmte Fläche nicht, so dass sie anhand ihrer Größe entfernt werden können. Im gezeigten Beispiel wurden alle Objekte kleiner 10 mm^2 entfernt (Bild 1c).

Innerhalb der detektierten Lücke wurden einzelne Bereiche durch den Computer nicht rot markiert, da dessen Farbe von den im Merkmalsraum zuvor definierten Farben abwich. Da diese Bereiche aber offensichtlich zur Lücke dazugehören, wurden alle Fehlstellen innerhalb eines Objektes in einem neuen Arbeitsschritt aufgefüllt.

Weiterhin ist zu erkennen, dass Blätter in die Lücke hineinragen und damit optisch die Bodenfläche verkleinern. Deshalb müssen diese Blätter mit zur Lückenfläche hinzugezählt werden. Durch alleiniges Verwenden des Merkmals Farbe kann dies jedoch nicht erreicht werden. Das Entfernen der Blätter wurde mit einem morphologisch wirkenden Werkzeug durchgeführt, welches ähnlich wie ein Schere wirkt.

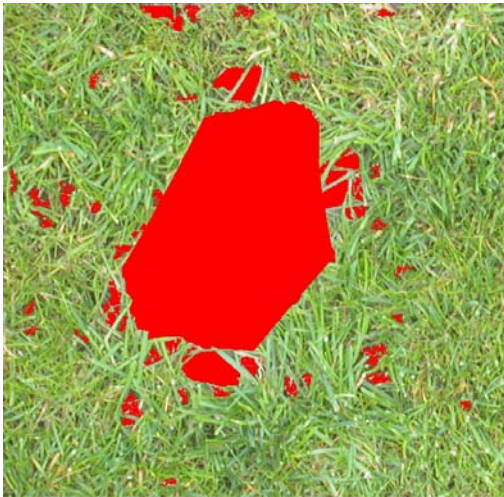


Bild 1 c): Durch Verwendung der "Digitalen Schere" wurden in die Lücke hineinragende Blätter abgeschnitten

Es zeigte sich, dass die gewünschte Wirkung erreicht wird, wenn man die Konturen des Objektes einer Glättungsoperation unterzieht. Dies führt dazu, dass hineinragende Blätter abgeschnitten werden. Die genaue Arbeitsweise dieser Methode wird im folgenden noch ausführlich beschrieben.

Bild 1d zeigt das Ergebnis der Bildverarbeitung. Durch Verwendung von Farbanalyse und durch zusätzliche Berücksichtigung morphologischer Eigenschaften des Rasens wurde ein Ergebnis erzielt, welches dem des menschlichen Auges sehr ähnlich ist.

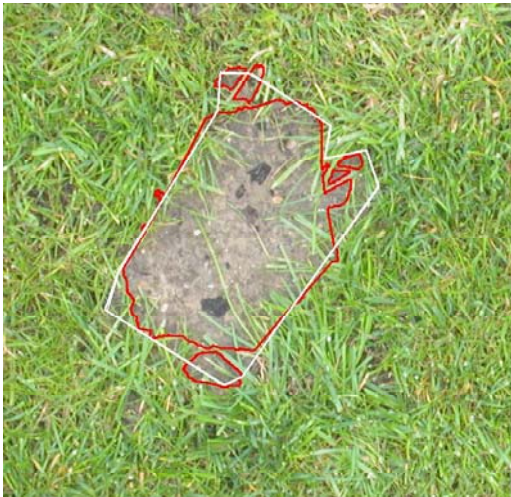


Bild 1 d): Vergleich zwischen dem Ergebnis der Bildverarbeitung (rot) und der visuell markierten Trennlinie zwischen Lücke und Rasen (weiß)

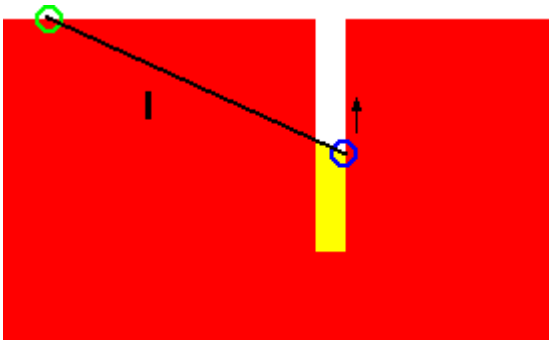


Bild 2: Funktionsweise der „digitalen Schere“

Die Beseitigung in die Lücke hineinragender Blätter erfolgt durch eine Konturglättung. Die Funktionsweise der Konturglättung ist in Bild 2 gezeigt. Ein Stab der Länge l liegt mit seinen beiden Enden auf der Objektkontur. Der Stab läuft während der Prozedur einmal um die ganze Kontur. Die dabei überstrichene Fläche (gelb) wird aufgefüllt. Einschnitte in die Objektkontur werden durch dieses Verfahren entfernt.

Die Messergebnisse sind in Bild 3 graphisch dargestellt. Dabei ist der Messfehler für alle 4 Bildverarbeitungsschritte für jede der 12 Parzellen als Balkendiagramm dargestellt. Als Messfehler wurde die prozentuale Abweichung vom Sollwert berechnet. Dabei wurde als Sollwert die Grundfläche des jeweiligen Stanzwerkzeuges verwendet.

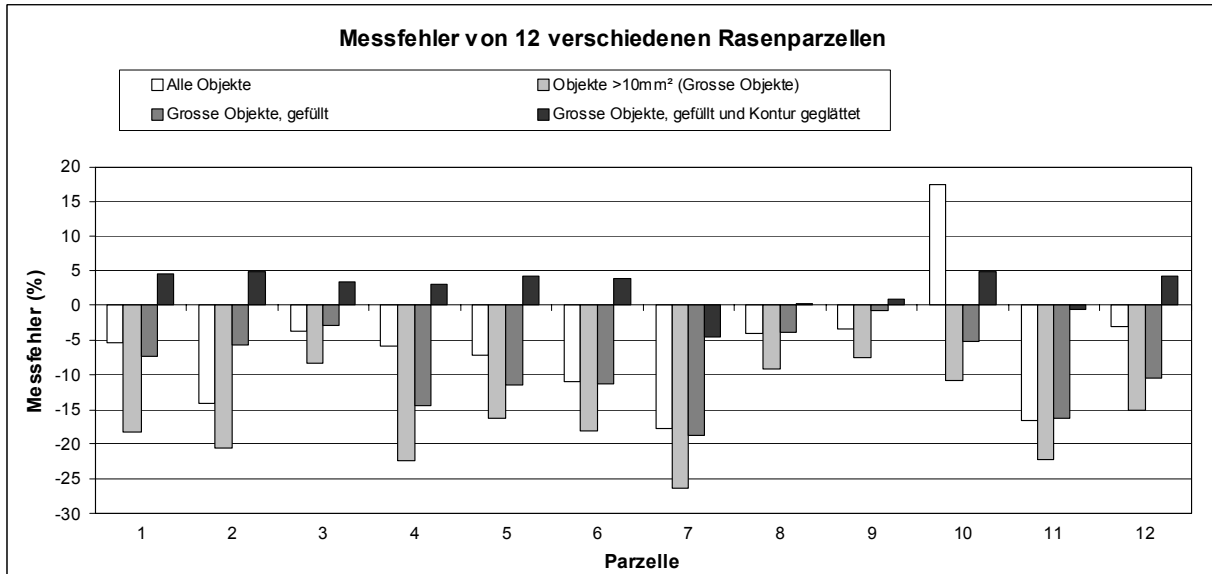


Bild 3: Prozentuale Abweichung der durch Bildverarbeitung ermittelten Lückenfläche von der als Sollwert verwendeten Werkzeugfläche für alle 4 Bildverarbeitungsschritte.

Plot 1, 2, 3: Rechteck 5 %, 10 %, 15 %

Plot 4, 5, 6: Kreis 5 %, 10 %, 15 %

Plot 7 bis 12: Wiederholung der Parzellen 1 bis 6

Im ersten Bildverarbeitungsschritt wurde nur die Farbinformation berücksichtigt. Die Werte zeigen eine leichte Unterschätzung der Fläche. Im zweiten Schritt wurden die Schattenpixel entfernt, so dass die gemessene Fläche noch weiter unterschätzt wird. Im dritten Schritt werden Fehlstellen innerhalb der detektierten Bodenflächen gefüllt. Damit wird die gemessene Fläche wieder höher gemessen. Im letzten Schritt werden in die Lücken hineinragende Blätter entfernt, wodurch sich die Werte noch weiter erhöhen und in diesem Fall bewirken, dass die gemessene Fläche die rechnerische Lückenfläche leicht übersteigt.

Vergleicht man nun das Ergebnis von Schritt 1 mit Schritt 4, so zeigt sich dass durch zusätzliche Verwendung morphologischer Parameter die Streuung der Messergebnisse verringert wurde. Dies lässt sich folgendermaßen erklären: Die einzelnen Störquellen wie Schattenpixel bzw. in die Lücke hineinragende Blätter wirken entgegengesetzt, kompensieren sich also. Sind die Störgrößen etwa gleich groß, so erhält man aus diesem Grund trotzdem ein relativ gutes Ergebnis. In anderen Fällen, kompensieren sich die Störgrößen nicht so gut mit der Folge, dass das Ergebnis stärker vom Sollwert abweicht. Durch zusätzliche Verwendung morphologischer Parameter haben die beschriebenen Störquellen keinen Einfluss auf das Messergebnis. Daher ist die Streuung der Messwerte deutlich ge-

ringer. Durch dieses Verfahren wird also eine hohe Robustheit gegenüber Störeinflüssen erreicht.

4. Literatur

GONZALEZ RC, WOODS RE (1993) Digital Image Processing. New York: Addison-Wesley Publishing Co

KÜHBAUCH W, BESTAJOVSKY J (1983) Bestimmung der Lignifizierung in Luzerne mit Hilfe der quantitativen Bildverarbeitung. Angewandte Botanik 57: 381-389

RICHARDSON MD, KARCHER DE, PURCELL LC (2001) Quantifying Turfgrass Cover Using Digital Image Analysis. Crop Science 41:1884-1888

Development of a low-cost vision-based autonomous Vehicle for the Field Robot Event Wageningen

Entwicklung eines kostengünstigen, bildanalyse-gestützten Fahrzeuges für den Field Robot Event Wageningen

Jochen Hemming

Wageningen UR, Agrotechnology & Food Innovations, Greenhouse Technology, P.O. Box 17, 6700 AA Wageningen, The Netherlands;
e-mail: jochen.hemming@wur.nl

Abstract: The development of two small sized vision-based autonomous field robots is presented. The robots are constructed to participate in the Field Robot Event, a yearly competition for high-school, university and professional teams organized by Wageningen University. Main task of the competition is to navigate autonomously in a maize field. EyeMAG, the first robot constructed, is based on a Lego RCX micro controller. A webcam attached to a notebook is used for real-time image processing. The second robot, Cropscout, is based on a C-programmable micro controller, different sensors and an iPAQ-Pocket PC with attached camera. Image processing for plant row tracking is done on the iPAQ. The participation in the event resulted in several positive effects such as public relation and networking, fun and challenge for the participants and knowledge upgrade in the field of precision farming.

Keywords: Autonomous Vehicle, Vision, Row-tracking, Precision farming

Zusammenfassung: Der Artikel beschreibt die Entwicklung von zwei kleinen, bildanalyse-gestützten autonomen Feldrobotern. Diese wurden für die Teilnahme an dem Field Robot Event realisiert, einem Wettkampf, der jährlich von der Universität Wageningen organisiert wird. Hauptaufgabe ist es, ein Fahrzeug autonom innerhalb eines Maisfeldes navigieren zu lassen. EyeMAG, der erste Roboter, basiert auf einem Lego RCX Mikrocontroller. Eine an einem Notebook angeschlossene Webcam wird für die Echtzeit Bildanalyse verwendet. Der zweite Roboter, Cropscout, besteht aus einem in C programmierbaren Mikrocontroller, verschiedenen Sensoren und einem iPAQ Pocket-PC mit Kamera. Auf dem iPAQ wird die Bildanalyse zur Pflanzenreihenerkennung durchgeführt. Die Teilnahme an dem Wettbewerb hatte viele positive Effekte. Hierzu zählen die erlangte Publizität und der Erfahrungsaustausch, Spaß, wissenschaftliche Herausforderung und Wissensvertiefung bei den Teilnehmern auf dem Gebiet des Precision farming.

Deskriptoren: Autonome Fahrzeuge, Bildverarbeitung, Reihenerkennung, Precision farming

1. Introduction

“Field robots are the cutting edge of science in Precision Agriculture - and fascinating hands-on learning objects for the upcoming e-generation”. This statement opens this year the website for the Field Robot Event 2004 (<http://www.fieldrobot.nl>). An initiative pushed by Prof. Joachim Müller from the Farm Technology Group of Wageningen University led in 2003 to the first Field Robot Event in Wageningen, The Netherlands. High-school, university and professional teams are invited again this year to enter an international open-air field robot contest. The teams will compete with self-constructed robots, navigating and operating autonomously in a maize field. The basic task, which has to be solved, is to navigate in a plot of 10 standard maize rows, 15 m long, turn at the end of the row and make as many rows as possible in 3 minutes. With the background of decreasing student numbers in agricultural engineering (students prefer high-tech oriented studies) the objectives of this event are threefold: Publicity (Improving the public image of agricultural engineering, Attracting high school students interest in agricultural engineering); Education (hands-on experience in design, off-curriculum skills) and science (harnessing students/researchers creativity, knowledge exchange on field robots en precision farming).

Some enthusiast researchers from the contract research organization Agrotechnology & Food Innovations (a new research institute merged in 2003 from former IMAG and ATO) decided to participate in this contest with minimal input concerning material and time.

2. Development of the EyeMAG robot in 2003

EyeMAG was developed as a small and low-cost vision controlled multipurpose autonomous robotic vehicle. Using a looking-ahead mounted camera, objects or paths can be traced by the vehicle without human interaction. The system consists of several sensors (rotation, touch, camera) and actuators (motors). Whereas the camera is linked via USB to a notebook. All other components are connected to a microcontroller (LEGO RCX 2.0). The control software is running on the notebook (Windows 98, 233 MHz). Using real-time image processing the target driving direction is calculated. By means of an infrared serial communication interface the notebook communicates with the microcontroller. Sensor values are provided by the microcontroller. The notebook transmits the set points for the actuators. Sensors, Actuators and the Microcontroller are all based on the LEGO Robotics Invention System. Figure 1 shows the individual components, Figures 2 and 3 the vehicle.

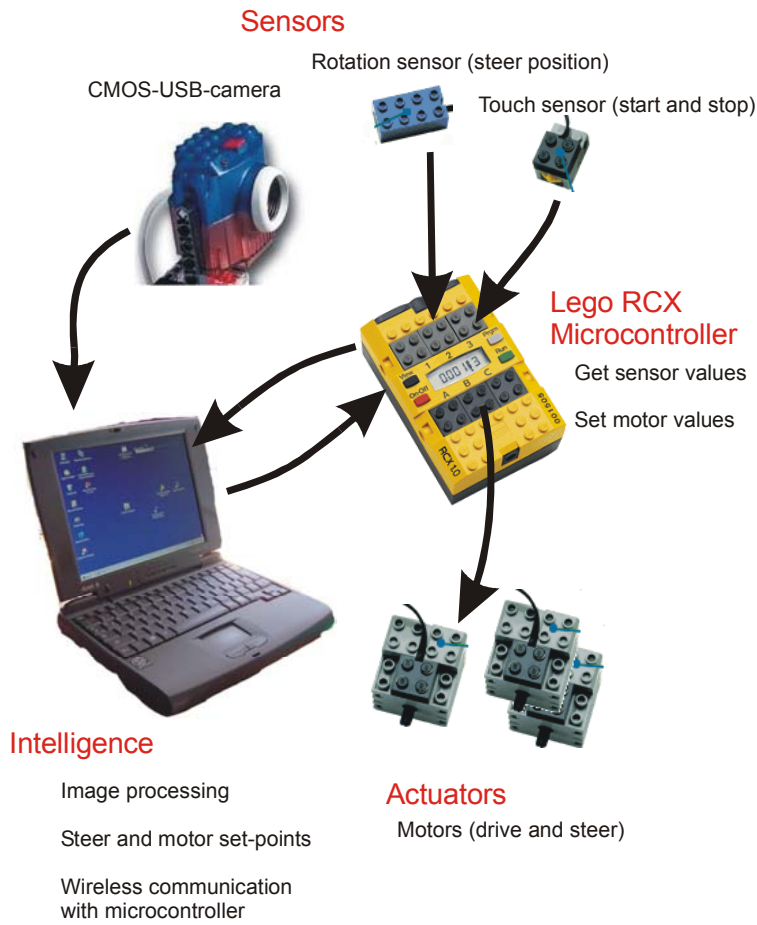


Figure 1: Components of the EyeMAG autonomous vehicle

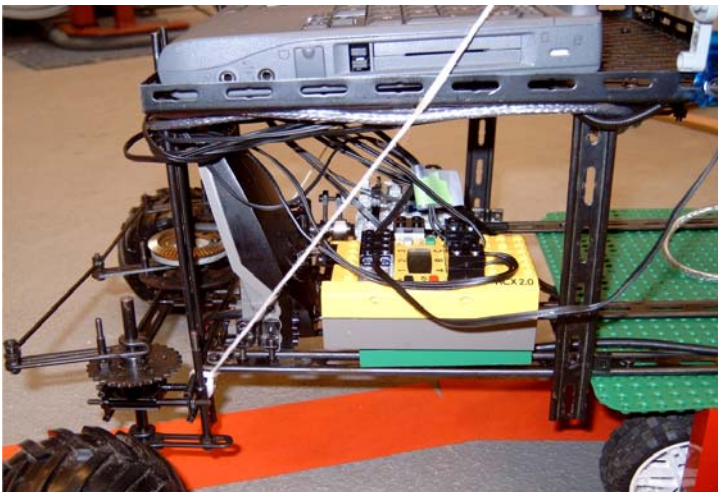


Figure 2: Command control of EyeMAG; a notebook and the Lego system teaming-up



Figure 3: EyeMAG following a red line in the field

Real-time image processing for row-tracking

The camera used captures color RGB-images with a resolution of 320 x 240 pixels. To e.g. let the vehicle follow a green line all pixels in the image fulfilling the characteristics of representing green are counted and the geometrical mean position of these pixels is calculated. If this position lies not within a defined center target corridor of the image the steer of the robot is turned slowly. If the calculated target position lies in the corridor, the steer is turned back to neutral position (straight ahead). Figure 4 shows the camera view from the vehicle and a screen-shot from the processing software. The system described is able to process 5 to 8 frames per second.

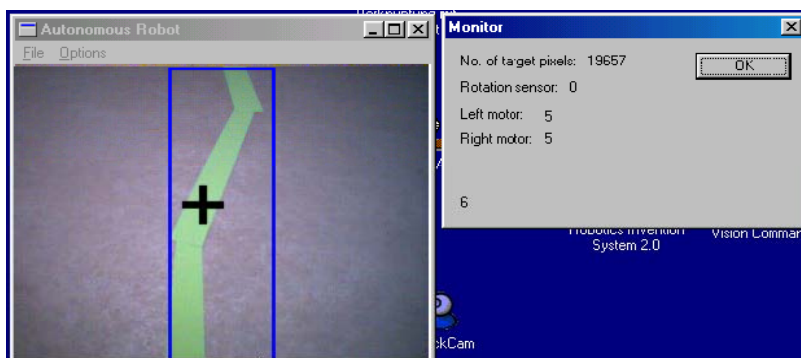


Figure 4: Camera view from the vehicle and processing software. Blue frame: center target corridor; black cross: calculated target position

For the field robot contest not only one row must be tracked but two parallel plant rows. For this purpose the image captured is virtually split in two vertical halves. Each half is analyzed separately. First, in each half the geometrical mean position of the “row” is calculated. This position is indicated in figure 5 (right) with small crosses. Then the target driving direction is calculated using the center-position between the two row positions. This is indicated in figure 5 (right) with a big cross. In case only one row is visible (figure 6) the steer of the vehicle is turned maximal in the direction of the missing row with the aim to bring the row back in the image. In case of no visible rows at all the vehicle keeps on going in the last calculated direction for 3 seconds before it stops. By this, some robustness is implemented in the steering algorithm.

This algorithm performed very well steering the vehicle along one ore between two parallel colored lines.

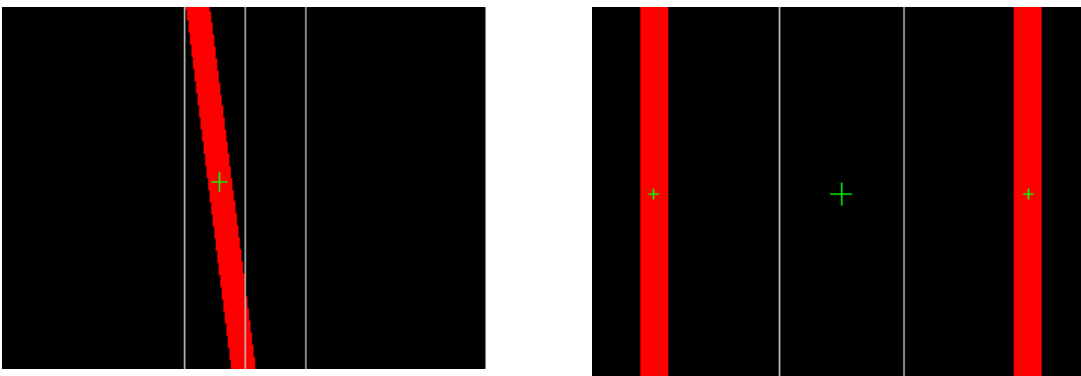


Figure 5: The target position calculated is indicated by a big green cross. Left: calculating position having one row. Right: calculating target position having two rows (explanation see text).

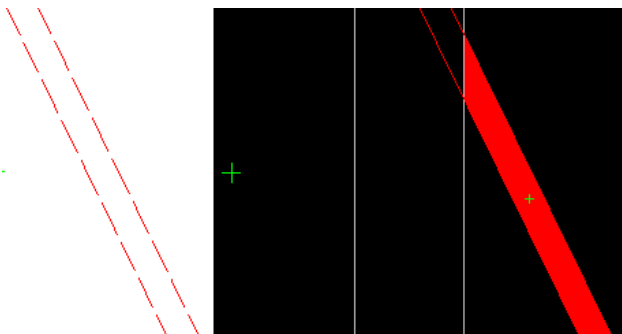


Figure 6: Special case having two rows: only one row within the field of view. Steer will be turned maximum left.

Image quality

Experiments showed, that the outdoor image quality of the LEGO-webcam is insufficient to segment the green maize plants from the background. This was mainly due to the outdoor lighting conditions: the images from the camera were strongly overexposed having direct sunshine. Webcams are in general developed for indoor use and low light intensities. No mechanical aperture exists at the lens of the camera and the incoming light can only be damped electronically for a certain extent. In addition to this, the maize plants on the competition playground were still smaller than predicted (about 5 to 10 cm height) and yellowish due to insufficient nutrition and cold weather. To cope with the problem, the EyeMAG vehicle needed also outdoors colored paper strips to navigate in the field. Red strips turned out to generate the best contrast in the images with a for red optimized algorithm of the software.

Press echo 2003

Regardless the not fully functional robot, the public response to the field robot event in general and to the LEGO-based EyeMAG in special was much more than expected. Not only local newspapers and TV stations but also agricultural and scientific magazines published articles about this event. The EyeMAG get much positive attention because everybody was attracted by the simple design with the LEGO bricks. This response motivated the team of Agrotechnology & Food Innovations to continue in 2004 with this initiative.

3. Plans for 2004: Cropscout

Based on the experiences in 2003, a new autonomous vehicle – Cropscout – is going to be constructed this year. A public website was started about this project giving background and showing the work in progress: <http://www.cropscout.nl>.

The platform

The platform drives on caterpillar tracks and is mainly controlled by a micro controller (Siemens 20CN167). This micro controller is programmable in C and has 1 MB Flash ROM; 52 digital I/O and 16 channel analog I/O. The micro controller is connected via serial interface to an iPAQ Pocket PC which serves as data logger, graphical user interface and also image processing unit. The available sensors on board the vehicle are:

- 1.3 Megapixel camera (LiefView Flycam CF 1.3) attached via compact flash interface to the Pocket PC
- Infrared and Ultrasound distance sensors
- Mechanical bumpers and whiskers
- Gyroscope
- Inclinator

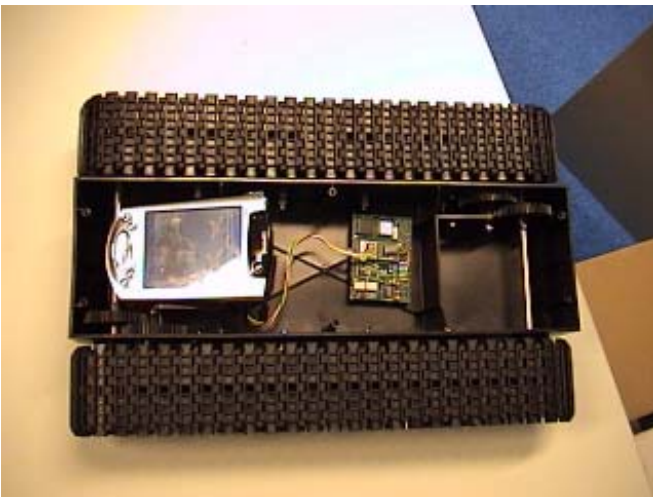


Figure 7: Cropscoat chassis with tracks, iPAQ and micro controller

Image processing

As in 2003 the camera is mounted on the vehicle looking ahead onto the plant rows with the aim to recognize the rows and to calculate the target driving direction. The Pocket PC is programmed with Embedded Visual C++. For image acquisition, a software development kit (SDK) with libraries is available for the camera used.



Figure 8: iPAQ Pocket PC providing the graphical user interface and running the image processing (row recognition). As imaging device a compact flash camera is used.

Row-detection

Many of the commonly used row detection methods such as e.g. the Hough-transform are performing very well but require much computer power. A good overview of the different techniques developed for agriculture can be found e.g. in ASTRAND (2000), also during the CBA workshop navigation in a row is discussed earlier (SEUFERT *et al.*, 2000). The simple “pixel-counting” algorithm used successfully for the EyeMAG vehicle encouraged the team to look for a technique with low computational load. Our approach is to analyze only a few image-rows what is comparable with the work done by TILLET and HAGUE (1999).

Color images are captured and processed. WOEBBECKE showed (1995) that good contrast between living plants and background (soil and residues) can be achieved using the normalized RGB (red, green and blue) chromatic values of a color image. The RGB-intensities of the image are normalized prior to the segmentation to be independent from variable illumination. For segmentation the following equation is used:

$$I=2g-r-b \quad (\text{Equation 1})$$

Figure 9 shows an example of a segmented image of a maize field. As row detection algorithm a template matching procedure is performed. The location of the crop rows in the image can be predicted from available prior information. Idealized templates for certain

image rows are built using a Gaussian bell-shaped curve per row (Figure 10). The template is fit on the image row using cross correlation.

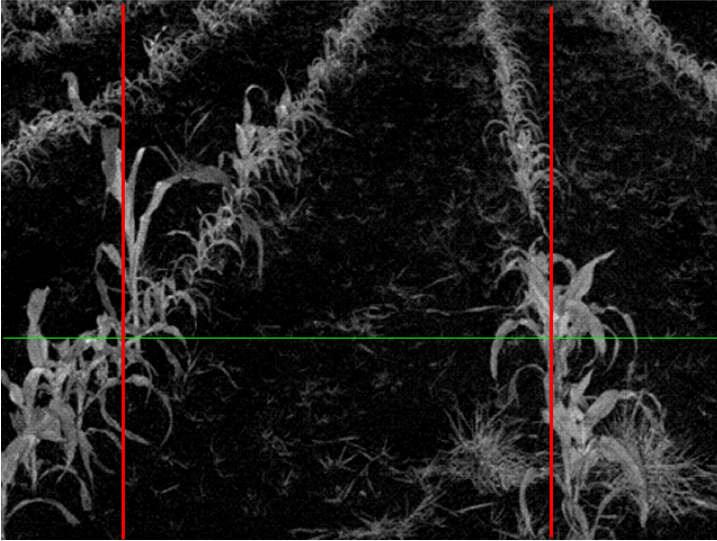


Figure 9: Segmented image of maize field. The green horizontal line is one of the scan lines for the row detection algorithm. The two vertical lines mark the row positions detected along the scan line

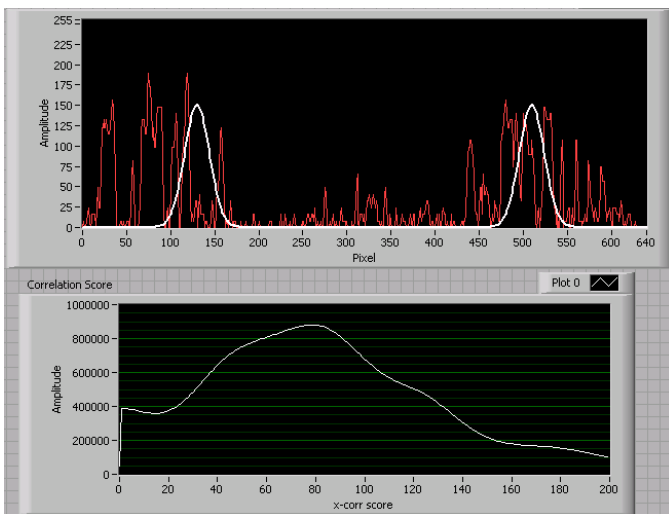


Figure 10: Top: pixel intensity graph (histogram) along the scan line showed in figure 9 (red line) and the template (white line).

Bottom: Cross correlation score of template and scan line while shifting the template over the scan line, the maximum indicates the best match.

First experiments showed that robust row localization is possible using this algorithm. The real-time implementation on the Pocket PC is still work in progress.

4. Conclusions

The participation in the field robot event resulted in several positive effects for Agrotechnology & Food Innovations.

First of all the public relation and networking effects must be mentioned. This includes improving the public image of the own institute by publicity in the different media (print media, radio, tv), attracting companies in- and outside the field of agriculture and meeting colleagues working in the same field. For the participating scientists the event challenged the creativity and promoted the team spirit.

Both robotic systems described are modular and very easy to extend with other sensors or actuators. The software is developed in C and C++ allowing the easy integration of 3rd party libraries. The platforms can be used for low-cost rapid prototyping and testing in a research environment. It can also be used as educational tool for understanding actuator-sensor interaction. The scientific value of such an event must not be underestimated. New techniques were developed or deepened (e.g. sensor fusion), knowledge on sensors, field robots, and precision farming in general are upgraded and the results gained are easy transferable to real-size machines.

Acknowledgments

Financial support from Priva B.V. and Inter Act B.V. for the development of Cropscout is gratefully acknowledged.

5. References

- ASTRAND B (2000)** Mechatronics in Agriculture. Row guidance system for agricultural field machinery. School of Electrical and Computer Engineering, Chalmers University, Göteborg, Sweden
- SEUFERT H, KEICHER R, KNECHTGES H, BRUNNER D (2000)** Automatische Traktorsteuerung in Reihenkulturen mittels Bildanalyse. In: Bornimer Agrartechnische Berichte Heft 25, Computer-Bildanalyse in der Landwirtschaft – Workshop 1999/2000: 26-42
- TILLET ND, HAGUE T (1999)** Computer-vision-based hoe guidance for cereals – an initial try. Journal of Agricultural Engineering Research 74: 225-236
- WOEBBECKE DM, MEYER GE (1995)** Color indices for weed identification under various soil, residue, and lighting conditions, Transactions of the ASAE, 38: 259-269

A vision based row detection system for sugar beet

Reihenerkennungssystem mit Videokamera bei Zuckerrübe

Tijmen Bakker¹, Hendrik Wouters¹, Kees van Asselt¹, Jan Bontsema², Joachim Müller¹, Gerrit van Straten¹, Lie Tang¹

¹ Wageningen University, Wageningen, The Netherlands

e-mail: tijmen.bakker@wur.nl

² Agrotechnology & Food Innovations, Wageningen, The Netherlands

Abstract: An approach for row recognition in sugar beet is presented. The algorithm is based on Hough transform. Unlike previously reported work on using Hough transform for row detection on sugar beet, we used a colour camera. The colour images are transformed to greyscale images resulting in good contrast between plant material and soil background. Our method does not rely on applying Hough transform to images with multiple rows. We divide the images in three sections that are merged into one image, creating less data while still having information of three rows. Hough transform is applied on the merged image, thus improving the speed of image processing. Instead of Hough transform on a binary image made by thresholding, we applied grey-scale Hough transform directly on the merged grey-scale image. The system is tested in an experimental sugar beet field in a greenhouse. It is shown that the algorithm is able to find the row at various growth stages. The system did find the crop row in images with heavy weed infestation. The average deviation between the estimated and real crop row varied from 6 to 223 mm. The higher deviations in this range can be explained by the number of plants visible in early crop stage, overexposure of the camera, and the presence of a lot of green algae due to our experimental set-up. If the measurements under these conditions are left out of consideration, the algorithm was able to find the row with an average error of 6 to 18 mm.

Keywords: Guidance, Sugar beet, Row detection, Hough transform, Machine vision

Kurzfassung: Eine Methode zur Reihenerkennung im Zuckerrübenanbau wird vorgestellt. Der Algorithmus basiert auf der Hough Transformation. Im Unterschied zu früheren Arbeiten über die Anwendung der Hough Transformation zur Reihenerkennung bei Zuckerrübe verwenden wir eine Farbkamera. Die Farbbilder werden in Grauwertbilder umgesetzt mit gutem Kontrast zwischen Pflanzenmaterial und Bodenuntergrund. Unsere Methode ist nicht angewiesen auf die Nutzung der Hough Transformation für Bilder mit mehreren Reihen. Wir teilen die Bilder in drei Sektionen, die zu einem Bild verschmolzen werden, und erzeugen so weniger Daten, haben aber noch die Information von drei Reihen. Die Hough Transformation wird auf das verschmolzene Bild angewandt, somit mit höherer Bildverarbeitungsgeschwindigkeit. Anstelle der Hough Transformation eines mittels Schwellwert erstellten Binärbildes, wenden wir die Grauwert Hough Transformation direkt auf das verschmolzene Grauwertbild an. Das System wurde in einem Zuckerrüben-Versuchsfeld in einem Gewächshaus getestet. Es wird gezeigt, dass der Algorithmus die Reihe bei unterschiedlichen Wachstumsstadien findet. Das System fand die Pflanzenreihe in Bildern mit starker Unkrautbelastung. Die durchschnittliche Abweichung zwischen ermittelter und tatsächlicher Pflanzenreihe variierte von 6 bis 223 mm. Die höheren Abweichungen in diesem Bereich können erklärt werden mit der Anzahl der im frühen Wachstumsstadium sichtbaren Pflanzen, der Überbelichtung der Kamera und der Anwesenheit einer Vielzahl von Grünalgen bedingt durch die Versuchsanlage. Lässt man Messungen unter diesen Bedingungen weg, dann findet der Algorithmus die Reihen mit einem durchschnittlichen Fehler von 6 bis 18 mm.

Deskriptoren: Lenkung, Zuckerrübe, Reihenerkennung, Hough Transformation, maschinelle Bildauswertung

1. Introduction

In case no herbicides are used, like in organic farming, weed control is a big problem. Not in all cases sufficient equipment is available for mechanical weed control. For instance in sugar beet manual weeding is needed, which demands a lot of labour. This labour involves high cost and is not always available. Autonomous weeding robots might replace this manual weeding in the future in a lot of crops. The work described here is part of a project with the objective to develop an autonomous weeding robot for sugar beet. A vision based row detection must provide the autonomous weeding robot with steering information while it is driving along the rows. In this paper a vision based row detection system for sugar beet is presented.

Recently much work has been done on row detection. OLSEN (1995) recorded images of a barley field with a video-camera looking vertically downwards. A near-infrared filter was used to increase contrast between plants and soil background. Next the monochrome images were reduced to single lines by summation of pixel intensities in crop row direction. With a first method the lateral row offset was determined by fitting a sinusoid through the summed intensities. The row centres were assumed to coincide with the lateral positions of the local maximum of the sinusoidal curve. In a second method the summed intensities are filtered with a low pass filter, resulting in local maximum for the crop row locations again. The methods are suitable for barley, but are not appropriate for row crops with large distances between the plants within the row like sugar beets. SLAUGHTER *et al.* (1999) developed a row detection system which was tested in tomato, cotton and lettuce. First the colour images were converted into a binary image by using a colour lookup table. A histogram was made by summing up all pixels in every column. The median was used to find the row position in the histogram. SLAUGHTER *et al.* (1997) found that the median gave a better estimation of the row position than the mean and the mode. No Hough transform was used because its high computational load (SLAUGHTER *et al.*, 1997). BILLINGSLEY and SCHOENFISH (1997) developed a vision guidance system to steer a tractor. First certain software transformed the colour images to a linear level. Then they selected part of the images for analysis to yield the necessary steering data. This part was called a 'view-port'. The driver sets a threshold discriminating plant and soil background. This threshold is adapted by keeping the proportion of plant material in the view-ports of the sequential images constant. Next a regression line is fitted to blobs which exceed the threshold value in the window. SØGAARD and OLSEN (2003) describe a row-detection system especially men-

tioned for small-grain crops. They transform colour images into greyscale images by calculating $2 \times \text{green} - \text{red} - \text{blue}$ for every pixel and mapping this to the range of 0-255 by simple linear mapping (WOEBBECKE *et al.*, 1995). This results in a greyscale image with a high contrast between green plants and background. SØGAARD and OLSEN (2003) divide the image in horizontal strips and then these strips were divided in segments of crop row spacing. These segments are combined by summing up the grey values of the segments. The row position is determined by calculating the centre of gravity of these combined segments. This method has functioned well for a wide range of illumination conditions, ranging from bright sunlight to a totally overcast sky, and even when the camera vehicle was moved from bright sunlight into a fully shaded area. The quality of the method increased with the number of rows. They argue that with a small number of rows, the Hough transformation method may perform better.

Only little research has been done to row detection in sugar beet. ÅSTRAND and BAERVELDT (2002) use a greyscale camera with near-infrared filter. After an operation to get the image intensity independent, a binary image is extracted with a fixed threshold. The crop row position is found by applying the Hough transform on the binary image. TILLET *et al.* (2002) describe a vision system for sugar beet, which is subsequent work on a vision system for cereals (TILLET and HAGUE, 1999; HAGUE and TILLET, 2001). They use a camera with near-infrared filter. To increase the performance of the system under partial shadowing a band-pass filter was developed. A band-pass filter extracted the lateral crop row locations from predefined scan bands in the image. The position and orientation of the rows were tracked using an extended Kalman filter.

In contrast to ÅSTRAND and BAERVELDT (2002), in our approach a colour camera is used. We used the method according to WOEBBECKE *et al.* (1995) to get a greyscale image with good contrast between plant material and soil background. Secondly, instead of applying the Hough transform on images with three rows and combining the Hough spaces into one, we first merge the three rows into one image, creating less data and improve this way the speed of image processing. Thirdly, we avoided thresholding because we use greyscale Hough transform (LO, 1995). In greyscale Hough transform the accumulator space is increased with the greyscale value of the corresponding pixel in the normal plane.

2. Materials and method

Experimental set-up

A sugar beet field was prepared for image acquisition in a greenhouse. The beets were sown manually September 29th 2003. A cord was tightened from one side of the field to the other by two people and laid down after that. Every 18 cm a seed was put into the ground just beside the cord. This was repeated for 5 rows at row distances of 50 cm. The length of the rows was about 25 metres.

For image acquisition a Basler 301fc colour camera with a resolution of 659 by 494 pixels was mounted on a platform (Figure1). The camera was mounted at 1.74 metres above the ground at a downward-looking angle of 40 degrees from the vertical. The area that is covered by one image is 2.5 metres long in row direction and 1.5 metres wide at the side closest to the camera. This means that at least three rows are visible in the image.



Figure 1: Experimental platform

The platform is pulled backwards over the field by a rope. The backward movement is done to prevent the pulling rope to be in view of the camera. While the vehicle is moving, it grabs images and stores them as a 24 bits bitmap on the hard disk of the computer. This is done in a continuous loop resulting in a speed of circa 9 images per second on a PC with a clock frequency of 1.6 GHz. On this PC also the offline image processing was performed. Both the image acquisition and the algorithm development are done with Labview®.

Image transformation

The first step in the row recognition algorithm, is transforming the image to a linear level with enhanced contrast between green plants and soil background (Figure 2a). The calculation of the pixel intensity values (I) was inspired by WOEBBECKE *et al.* (1995) and is calculated as:

$$I = 2g - r - b \quad 2.1$$

In our case the chromatic coordinates red (r), green (g) and blue (b) ranging from 0 to 1 were obtained as:

$$r = \frac{R_c}{R_m}, \quad g = \frac{G_c}{G_m}, \quad b = \frac{B_c}{B_m} \quad 2.2$$

where R_c , G_c and B_c are the RGB values of the current pixel and R_m , G_m and B_m the maximum RGB values of the image.

Inverse perspective transformation

Because the camera is looking downward at an angle from the vertical, the images undergo a perspective transformation. The images are corrected for this perspective transformation by an inverse perspective transformation. This inverse perspective transformation is calculated for the set-up of our experiment by a built-in calibration procedure of Labview®.

After acquisition, each image is rectified with the inverse perspective transformation calculated during calibration. Rectified images have real world proportions.

Summation of image segments

In the rectified image three rectangular sections of crop row spacing are selected (Figure 2b). The width of the sections corresponds to the crop row spacing, and the length corresponds to the length of the image. The first section is selected in the middle of the image. The other two are selected on both sides of the first section. The sections are combined by summing up the grey values of the sections to a combined image (Figure 2c). This way a smaller image is generated with a more intensified row signature than with one row alone. The advantage of this summation is that Hough transform on the combined image will be faster because of the reduced size and because of that we have to look for only one row.

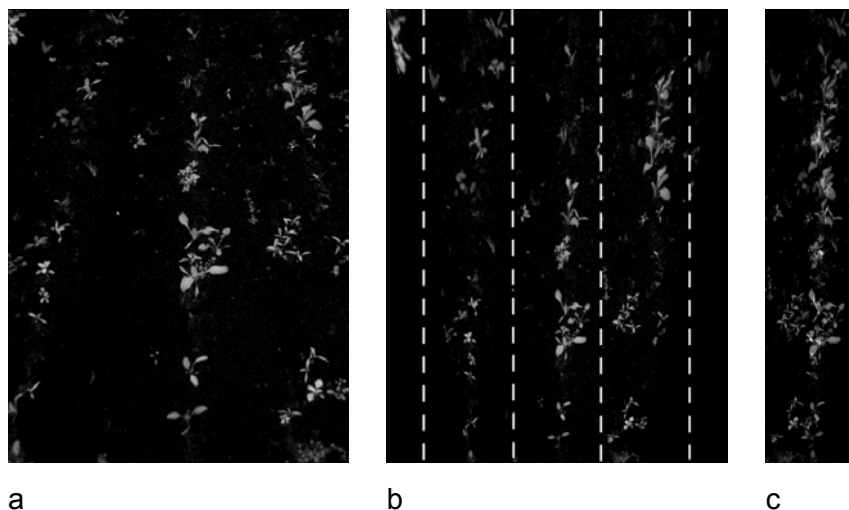


Figure 2: Image processing: image after colour transformation (a), selection of the segments in the rectified image (b) and the combined image (c)

Hough transform

Greyscale Hough transform is applied to the combined image. For applying the Hough transform we use the normal notation of straight lines to prevent difficulties in vertical line representations. A straight line l is then represented with:

$$\rho = x \cos(\theta) + y \sin(\theta) \quad 2.3$$

where the parameters x, y is a point on the line in the xy plane. Parameter ρ is the length of a line m perpendicular to l through the point $(x,y) = (0,0)$ and θ is the angle m makes with the x -axis. In greyscale Hough transform the accumulator is increased with the grey-scale pixel values instead of binary pixel values. To reduce the calculation time a threshold is set to neglect low pixel values. This value is set to 50 (pixels values 0-255), since for this threshold it was found that no important plant information is lost according to our measurement series. The algorithm of this grey-scale Hough transform is as follows:

Input: The combined grey-scale image $I(x,y)$, containing pixel values between one and zero (zero corresponds to background).

Output: The values of the Hough accumulator array $A(\rho,\theta)$

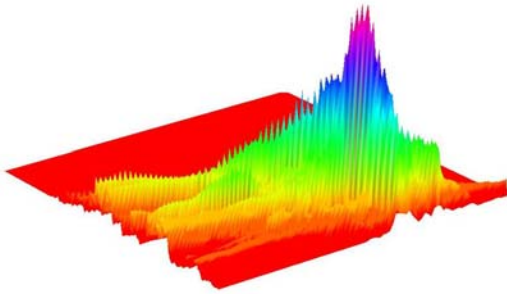


Figure 3: Hough Accumulator for the image of Figure 2c

Steps:

1. Initialise the Hough accumulator content $A(\rho_j, \theta_j)$ to 0
2. For each pixel $(x_i, y_i) > 0$,
3. For $\theta_j = 45^\circ$ to 135° with increment of 1°
4. Set $\rho_j = x_i \cos(\theta_j) + y_i \sin(\theta_j)$, and
5. Set accumulator value $A(\rho_j, \theta_j) = A(\rho_j, \theta_j) + I(x_i, y_i)$.
6. End

The best estimate for the line representing the crop row position is found by searching for the highest peak in the Hough transform. The parameters ρ and θ of this peak define the crop row position. In our case the line representing the row was modelled as three parallel, adjacent lines. Therefore we searched for a peak by searching for the maximum of the sum of three adjacent cells in the Hough accumulator space. We choose for three adjacent lines because in our camera configuration even young sugar beets have a minimal width of three pixels. Adaptation to different plant sizes could be made eventually by reducing or increasing the number of adjacent lines.

It is assumed that the orientation of the image will never exceed 45° offset from the row orientation in practice. Therefore the implemented Hough transform calculates the accumulator values only for lines θ_j between 45° to 135° incrementing with 1° . In this way the computational load was decreased.

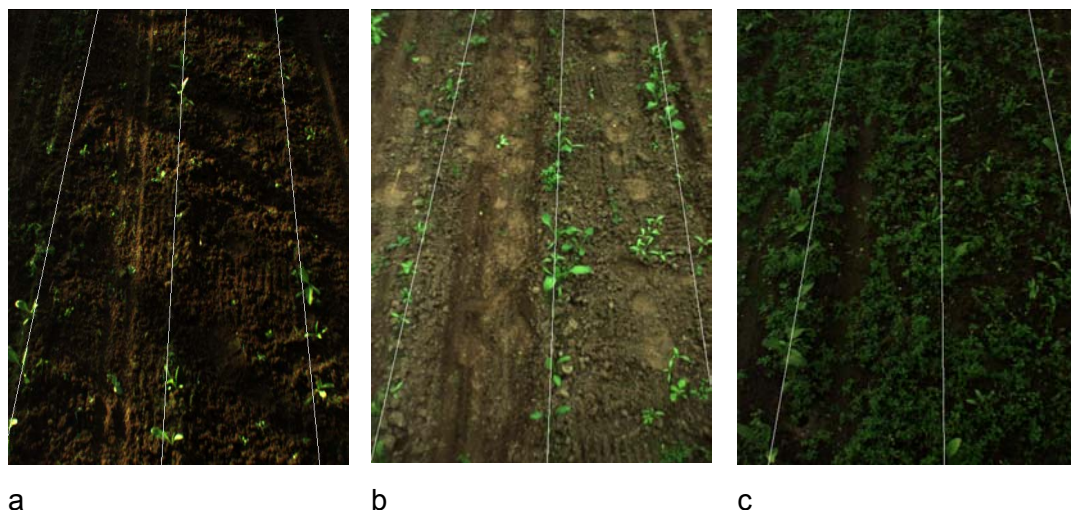


Figure 4: Typical images of series 6 (a), 8 (b) and 9 (c) together with estimated row position

The estimated crop line in the combined image can be transformed back into three lines in the original image.

3. Results

In the field in the greenhouse eleven series of images were acquired. Each series had a different crop stage and the series were made under different light conditions. In Figure 4 three typical images of these series are shown together with the estimated row position.

To evaluate the quality of the crop row position estimation, first a subset of the images is made. Because the images were acquired in a continuous loop at maximum acquiring speed, the images overlapped each other for a large part and the total amount of images was too large to evaluate each of them subsequently. Therefore, per measurement series 10 or 11 images were selected which covered over the whole length of the field, with a little overlap of the images remaining. For these subsets of images the quality of crop row position estimation is determined.

The quality of the row position estimation is determined by comparing the lines found by the algorithm with lines positioned over the crop rows by hand. Therefore in Labview® a tool was developed, by which the position of the three estimated lines in the original image can be changed by hand interactively. These lines are assumed to represent the real row position and are positioned so that they match the crop rows. The error of the

algorithm is calculated as the deviation between a line found by the algorithm and a line found manually. The deviation is calculated as follows:

- In the rectified image the area between the two lines is calculated.
- The deviation between the lines is calculated as the area between the two lines divided by the length of the image.

In Figure 5 the deviation is shown graphically for all measurement series.

Table 1: Quality of crop row position estimation for the subsets of the measurement series

Measurement	Date	Average deviation [mm]	Standard deviation [mm]	Peak error [mm]
1	10 - 10 - 2003	41	89	322
2	15 - 10 - 2003	131	115	356
3	20 - 10 - 2003	17	12	49
4	24 - 10 - 2003	67	54	108
5	31 - 10 - 2003	108	92	324
6	05 - 11 - 2003	14	14	67
7	10 - 11 - 2003	10	14	31
8	19 - 11 - 2003	7	6	31
9	25 - 11 - 2003	18	33	88
10	04 - 12 - 2003	6	9	35
11	06 - 01 - 2004	223	54	317

Per measurement series the average deviation, the standard deviation of this deviation, and the peak error are calculated. The peak error is the maximum deviation in a measurement series in mm. The results are summarised in Table 1.

There is a large difference in quality of crop row position estimation between the different measurement series. Series 3, 6, 7, 8, 9 and 10 have an average deviation below 20 mm. The series 1, 2, 4, 5 and 11 have average deviations from 41 up to 220 mm.

Since the algorithm has to be used for navigation, also the performance of the algorithm in terms of the calculation time per image is an important factor. The time necessary for the vision algorithm can become critical and decrease the working speed of the autonomous

robot. The performance of this algorithm is dependent on the amount of weed. The measured processing time varied from 1 to 1.5 seconds per image. This variation can be explained by the fact that the more light pixels there are, the more pixels have to be processed by the Hough transform.

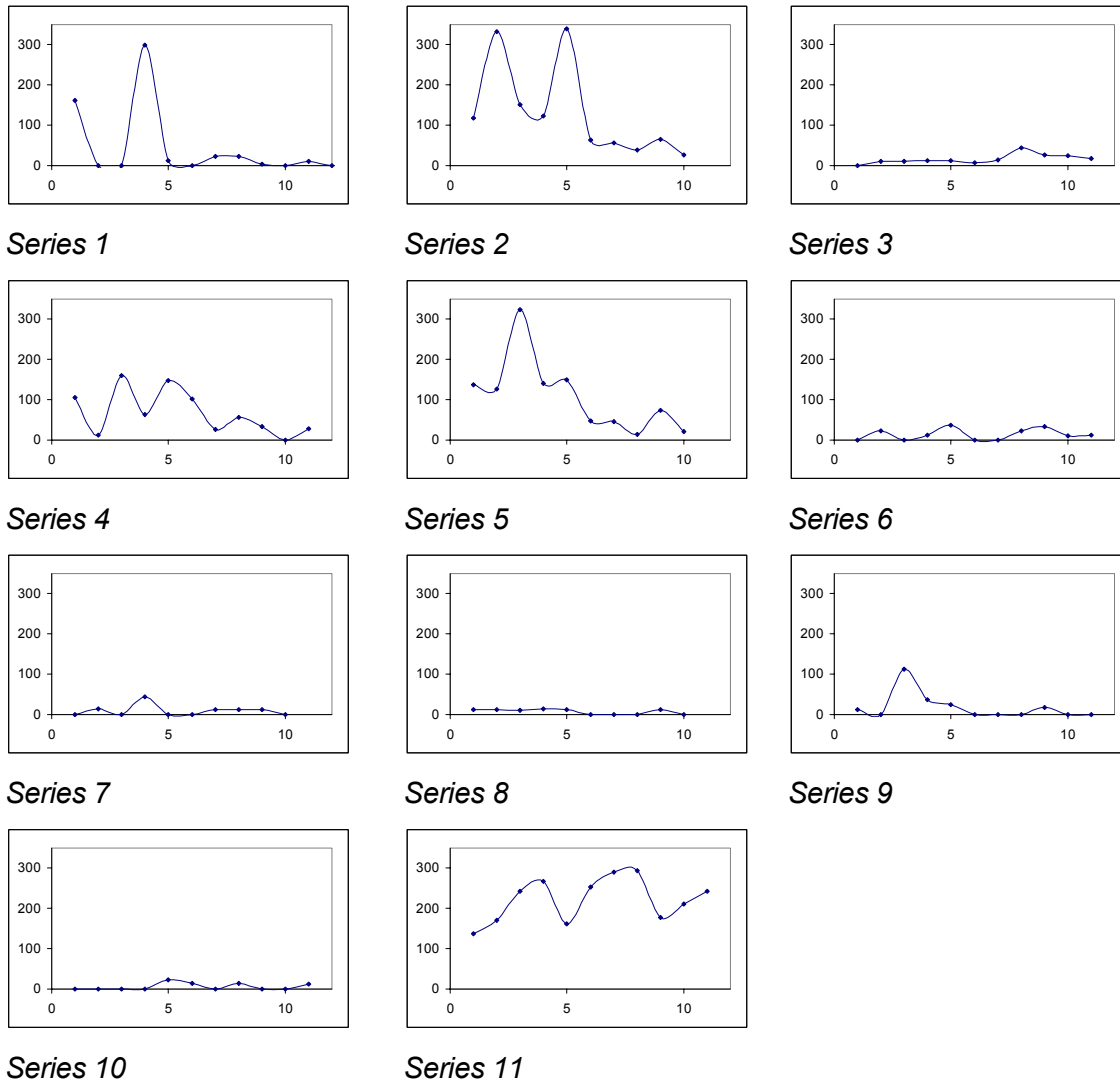


Figure 5: Deviations between automatic and manual found line. Vertically the deviation in mm and horizontally the image number are shown

4. Discussion

Series 1, 2, 4, 5 and 11 have average deviations that are much higher than for the other series. These inaccuracies can be explained from a number of factors.

Few crop plants.

In series 1, the performance is inconsistent, which is illustrated by the relative large standard deviation of this series. These images were made in an early crop stage and at some places the plant number is still too low to find the crop row. This is illustrated by the fact that in images of the same measurement series with more sugar beet plants, the algorithm gives a good estimation of the row position (Figure 7 a, b). So the small number of crop plants is the limiting factor and not the small size of the crop plants.

Overexposure

Series 2, 4 and 5 suffer from overexposure. In Figure 6 such an image with overexposure is shown. Also the corresponding histogram of the pixel distribution per intensity is given for the red, green and blue waveband.

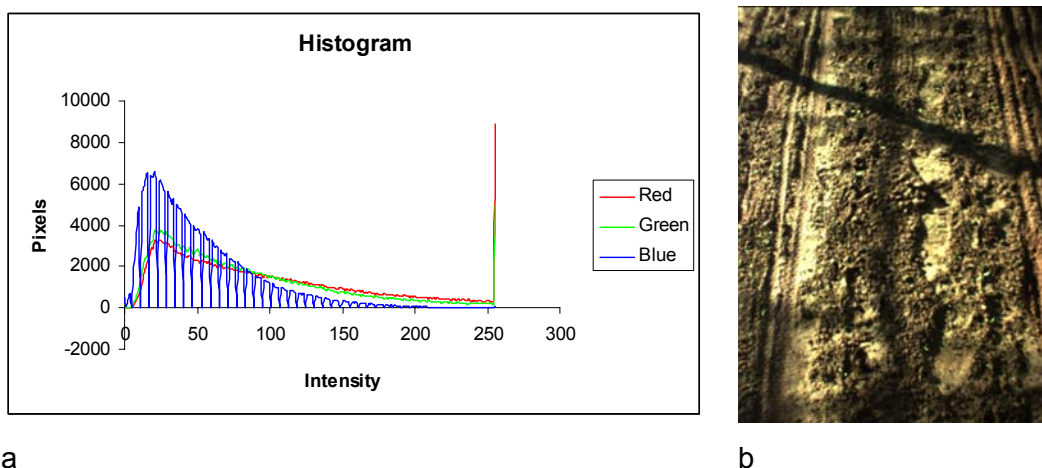


Figure 6: Histogram (a) of an overexposures image (b) of series 2

The maximum intensity value is 255 (8-bit per channel). The blue waveband pixels are distributed over the intensity ranging from 0 to 255. However, the red and green waveband are truncated at the intensity 255 and a peak is found there. If these peaks are found, the exposure is too high. This could be prevented by decreasing the aperture or the shutter time. The shutter time of the camera can be controlled by software. If the shutter time is controlled so that the pixels are within the intensity range of the camera, it could be possible to increase the accuracy under these circumstances.

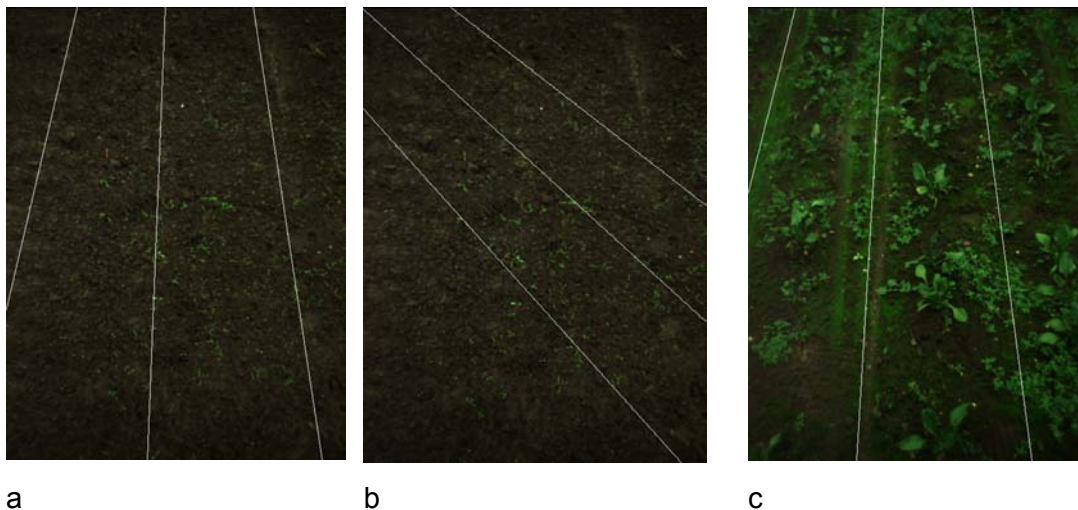


Figure 7: Estimated rows in small sugar beets (a successful) and (b failed) and in an image with a lot of green algae (c)

Green algae

In series 11 and also to a lower degree in series 4 and 5 there were green algae in the field, especially in the tracks of the vehicle left from the earlier measurements (Figure 7c). These tracks form green stripes, which are identified as crop rows by the algorithm. This is an artefact which will not appear under practical conditions.

5. Conclusion

The objective of this research is the development of a vision based row detection system in sugar beet fields. Literature shows different approaches to find the crop rows with vision. Many systems are developed for cereals or other crops, but there are also systems especially developed for sugar beet.

Here a new algorithm based on the Hough transform is presented. A colour camera is used and a linear operation on the images was performed which resulted in images with good contrast between plant material and soil background. The speed of applying the Hough transform is improved by merging three rows into one image and applying the Hough transform to the merged image. Thresholding was avoided by using greyscale Hough transform.

Measurements show that the algorithm is able to find the row independent of the crop stage. The algorithm needs no manual settings to adapt to different growth stages of the

crop. Furthermore the system has found the crop row in images with a high weed density. The algorithm is able to find the row with an average error of 6 to 18 m.

Some measurement series give worse results. Explanatory factors are:

- There are no or hardly any crop plants in the image. This is only the case in the beginning of the growing period.
- Overexposure of the images. However, choosing the right camera settings could prevent this.
- The presence of green algae especially in the tracks of the vehicle disturbs the result of the algorithm. This algae are strongly related to our experimental field and are not expected to be a problem in practice

The results of this research give good perspectives to navigate an autonomous vehicle through a sugar beet field in future.

6. References

- ÅSTRAND B, BAERVELDT AJ (2002)** An agricultural mobile robot with vision-based perception for mechanical weed control. *Autonomous Robots* 13: 21-35
- BILLINGSLEY J, SCHOENFISCH M (1997)** The successful development of a vision guidance system for agriculture, *Computers and Electronics in Agriculture* 16: 147-163
- HAGUE T, TILLET ND (2001)** A band-pass filter-based approach to crop row location and tracking. *Mechatronics* 11: 1-12
- LO RC, TSAI WH (1995)** Grey-scale Hough transform for thick line detection in grey-scale images, *Pattern Recognition*, 28: 647-661
- OLSEN HJ (1995)** Determination of row position in small-grain crops by analysis of video images, *Computers and Electronics in Agriculture* 12: 147-162
- SLAUGHTER DC, CHEN P, CURLEY RG (1997)** Computer vision guidance system for precision cultivation, *ASAE Paper* 97-1079
- SLAUGHTER DC, CHEN P, CURLEY RG (1999)** Vision guided precision cultivation, *Precision Agriculture* 1: 199-216
- SØGAARD HT, OLSEN HJ (2003)** Determination of crop rows by image analysis without segmentation. *Computers and Electronics in Agriculture* 38, 141-158
- TILLET ND, HAGUE T (1999)** Computer-vision-based hoe guidance for cereals – An initial trial, *Journal of Agricultural Engineering Research* 74: 225-236

TILLET ND, HAGUE T, MILES SJ (2002) Inter-row vision guidance for mechanical weed control in sugar beet. *Computers and Electronics in Agriculture* 33: 163-177

WOEBECKE DM, MEYER GE, BARGEN K VON, MORTENSEN DA (1995) Color indices for weed identification under various soil, residue, and lighting conditions, *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers* 38: 259-269

Erfassung der Kornfeuchte von Mais auf Parzellenmähdreschern mittels Diodenarrayspektrometer

Assessment of dry matter in maize grains on experimental combine harvesters using an NIR-diode array spectrometer

Christian Pfitzner¹, H. Meyer², G. Zieger³, Christian Paul¹

¹Institut für Pflanzenbau und Grünlandwirtschaft, Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft (FAL), Bundesallee 50, 38116 Braunschweig, e-mail: christian.pfitzner@fal.de

²KWS Saat AG, Einbeck,

³APZ GmbH, Bernburg

Kurzfassung: In einem dreijährigen Entwicklungsprojekt wurde von den Kooperationspartnern KWS Saat AG, Einbeck, der APZ GmbH, Bernburg, der Fa. Haldrup a/s, der Fa. Carl Zeiss Jena GmbH und des Institutes für Pflanzenbau und Grünlandwirtschaft der FAL ein NIRS-Modul einschließlich der dazu notwendigen Peripherie auf drei Haldrup Parzellenmähdreschern installiert und erprobt. Im Jahr 2003 konnte damit der Korntrockenmassegehalt bereits in über 13.000 Körnermaisparzellen bei der Ernte erfasst werden. Die technische Leistungsfähigkeit des Systems liegt mit ca. 100 Parzellen pro Stunde in einem für das züchterische Versuchswesen akzeptablen Bereich.

Die schrittweise Verbesserung der Kalibrationsmodelle gestattete die Schätzung der Trockenmasse der Ernteproben von 2003 mit einem mittleren Schätzfehler (SEP) von 1,06 %. Unzulänglichkeiten, die bei der automatischen Probenpräsentation im NIRS-Modul am Beginn und Ende der Messstrecke auftreten, werden durch speziell entwickelte Spektrenfilter eliminiert. Die dem Kalibrationsmodell zu Grunde liegende Proben temperaturverteilung gestattet den Einsatz des Systems in einem Temperaturbereich von 4 bis 20°C.

Deskriptoren: Pflanzenzüchtung; NIRS, Trockenmasse, Körnermais

Summary: *In a three year development project the cooperation partners KWS/Einbeck, APZ/Bernburg, Haldrup/Denmark, Carl Zeiss/Jena and the Institute of Crop and Grassland Science at FAL/Braunschweig installed and tested a NIRS module including hardware and software periphery on three Haldrup experimental combine harvesters. In 2003 the grain dry matter content could already be assessed in more than 13.000 plots during harvest. The technical performance of the system as characterized by a throughput of 100 plots per hour lies within the limits of acceptability for plant breeding trial work.*

The stepwise improvement of the calibration models allowed grain dry matter content in 2003 to be assessed with a mean prediction error of (SEP) of 1.06 %. Irregularities at the beginning and end of automatic sample presentation are eliminated by means of specially developed spectral filters. The distribution of sample temperatures contained in the calibration set allows the system to be utilized in a temperature range from 4°C to 20°C.

Descriptors: *Plant breeding, NIRS, dry matter, grain maize*

1. Einleitung

Der Wassergehalt von Körnerfrüchten ist ein entscheidender Qualitätsfaktor für deren Lagerfähigkeit und Verrechnungsbasis im Getreidehandel. Im pflanzenbaulichen und pflanzenzüchterischen Versuchswesen bildet der um den Wassergehalt korrigierte Ertrag (Basisfeuchte) die Grundlage für den Vergleich und die Rangordnung der Prüfglieder. Die spektrometrische Bestimmung des Wassergehaltes direkt auf der Erntemaschine ist weit aus schneller und kostengünstiger als über ein stationäres Labor. Der Einsatz von Spektrometern auf Erntemaschinen ist erst durch die in den letzten Jahren erfolgte Entwicklung von Diodenarray-Spektrometern ermöglicht worden.

Unter der Vielzahl möglicher Messprinzipien räumt KORMANN (2001) im Ergebnis vergleichender Untersuchungen der spektrometrischen Feuchtebestimmung im Spektralbereich des Nahen Infrarot für den mobilen Einsatz auf Erntemaschinen eine favorisierte Stellung ein. Darüber hinaus bietet dieser Ansatz die Möglichkeit, parallel zur Feuchtebestimmung weitere wertgebende Pflanzeninhaltsstoffe, wie z. B. Protein, Öl und Stärke online zu ermitteln. Dieser Aspekt ist im Versuchswesen von besonderer Bedeutung, weil der Informationsbedarf pro Flächeneinheit, d.h. pro Parzelle besonders hoch ist. Erste Einsätze von NIR-Diodenarrayspektrometern auf Versuchserntemaschinen wurden von DARDENNE *et al.* (2000) und PAUL *et al.* (2000) berichtet.

Untersuchungen des Institutes für Pflanzenbau und Grünlandwirtschaft der FAL Braunschweig zur Trockenmasseschätzung an frischen Futterpflanzen mit dem Parzellen-Grünfuttervollernter Haldrup NIRS-Harvest-Line haben die Eignung und Effektivität des Verfahrens für das züchterische Versuchswesen aufgezeigt (PAUL *et al.* 2002).

In Zusammenarbeit mit dem dänischen Landmaschinenhersteller Fa. Haldrup, der KWS Saat AG Einbeck, der APZ GmbH Bernburg und der FAL Braunschweig wurde im Jahr 2001 damit begonnen, die Erfassung der Trockenmasse von Körnermais auf einem Haldrup-Parzellenmähdrescher zu untersuchen (PFITZNER *et al.* 2002). Diese Untersuchungen wurden in den Versuchsernten 2002 und 2003 mit den Zielen fortgesetzt, die technische Prozessqualität weiterzuentwickeln und die Schätzigenauigkeit der Kalibriermodelle schrittweise zu verbessern. Über die Ergebnisse dieser Arbeiten soll im Folgenden berichtet werden.

2. Material und Methoden

Erfassung der Spektren der Körnerproben auf dem Parzellenmähdrescher

Je ein Parzellenmähdrescher des Typs Haldrup wurde in der Fa. KWS Saat AG Einbeck, der Fa. APZ GmbH, Bernburg und der FAL Braunschweig mit dem Diodenarray-(DA) Spektrometer CORONA 45 NIR (Fa. Carl Zeiss Jena GmbH) ausgerüstet. Das Spektrometer arbeitet in einem Spektralbereich von 960 nm-1690 nm. Das NIRS-Modul wurde so konstruiert, dass das Erntegut der gesamten Parzelle nach der Reinigung über eine Vorlaufzelle auf ein Förderband gelangt und durch dieses unter dem Spektrometermesskopf hindurch bewegt wird. Eine Abstreifvorrichtung sorgt für eine gleichmäßige 3 cm dicke Schicht des Körnerstromes auf dem Band und einen konstanten Abstand der Gutstromoberfläche zum Messkopf von ca. 13 mm. Nach Passieren des Spektrometers gelangt das Erntegut in die Wiegezelle des Mähdreschers. Nach der Wägung wird das Erntegut über einen Probenteiler, der eine über den gesamten Gutstrom gleichmäßig verteilte und in ihrer Größe einstellbare Referenzprobe entnimmt, durch eine Förderschnecke in den Getreidebunker transportiert. Die Steuerung des Spektrometers erfolgt mit dem Programm CORA (Carl Zeiss Jena GmbH). Die Zuordnung der Daten zu den Parzellen und die Datenspeicherung wird durch die Software HARVEST MANAGER (J. Haldrup a/s) realisiert. Beide Programme sind auf einem Industrie-PC installiert, der sich in der Fahrerkabine des Mähdreschers befindet und von dem aus der gesamte Prozess gesteuert und kontrolliert werden kann. So wird Start und Ende der Spektrometermessung in Abhängigkeit von der Gutstromlänge durch die Zusammenarbeit dieser Programme gesteuert, wobei die Signale von dem kapazitiven Sensor EC5525NPAP-1 (Fa. Carlo Gavazzi Industri a/s) geliefert werden, der die Messstrecke erfasst. Auch die Häufigkeit der Spektrometerkalibrierung in Bezug auf einen Weiß- und Dunkelstrom-Standard kann in den entsprechenden Programmmenüs des Harvest Managers vorgegeben werden und erfolgt dann während der Ernte automatisch, indem der Spektrometermesskopf auf die Position der entsprechenden Standards geschwenkt wird.

Online Temperaturmessung der Körnerproben

Die Oberflächentemperatur des Gutstromes jeder Parzelle wurde mit dem CI Temperatursensor der Fa. Raytek GmbH gemessen. Dieser wurde im NIR-Modul fest eingebaut und so angesteuert, dass ein mittlerer Temperaturwert über den Gutstrom ermittelt wird.

Der Sensor arbeitet berührungslos mit einem IR-Thermoelement im Wellenlängenbereich von 7-18 μm .

Trockenmassebestimmung

Die Trockenmasse der Referenzproben wurde unmittelbar nach dem Erntevorgang durch Trocknung der Proben im Trockenschrank bei 105°C und 36 h Dauer ermittelt. Die Berechnung der Trockenmasse erfolgte nach der Formel:

$$\text{TM [\%]} = 100 \frac{m_{tr}}{m_{tr} + m_w};$$

m_{tr} : Trockenmasse, m_w : Masse des Wassers (ANONYM 1997)

Datenbasis

Die Datenbasis der Untersuchungen ist in Tabelle 1 dargestellt. Im Jahr 2001 wurde in der KWS Saat AG, Einbeck in Zusammenarbeit mit der FAL ein umfangreiches Laborexperiment an Körnermaisproben durchgeführt, in dem die Probenpräsentation am NIRS-Modul des Mähdreschers simuliert wurde, um die prinzipielle Eignung des Spektrometers CORONA 45 NIR und der Messanordnung für die zu lösende Aufgabe zu prüfen. Im selben Jahr wurden erste Versuche mit einem Mähdrescher mit NIRS-Modul durchgeführt, der von der Fa. J. Haldrup a/s der FAL kostenlos zur Verfügung gestellt wurde. In den Erntejahren 2002 und 2003 wurden von der KWS und APZ mit betriebseigenen Mähdreschern insgesamt 20.600 Körnermaisparzellen aus Sortenversuchen an 4 Standorten in Deutschland, 2 Standorten in Belgien und 4 Standorten in den Niederlanden geerntet und die Daten, wie oben beschrieben ermittelt. Außerdem wurden der Prozessablauf sowie Art und Umfang aufgetretener Störungen erfasst und dokumentiert.

Tabelle 1: Übersicht über die in die Untersuchung einbezogenen Körnermais-Proben aus Sortenversuchen des Erntejahres 2001

	Erntejahr 2001	Erntejahr 2002	Erntejahr 2003
Firma	Parzellen/Proben TM %-Bereich	Parzellen TM %-Bereich	Parzellen TM %-Bereich
FAL	130 55-70	- —	—
APZ	51 65-75	3388 60-76	7356 59-86
KWS	1600* 59-77	4177 57-76	5682 59-82

*Laborversuch mit Simulation der Messbedingungen des Mähdrescher-NIRS-Moduls

Kalibrationsentwicklung

Die Rohspektren wurden zunächst mit dem Programm CORA gefiltert. Die entsprechenden Filter wurden mit dem Programm MASK FACTORY (Carl Zeiss Jena GmbH) entwickelt. Das Kalibrationsset, auf dessen Basis das Kalibrationsmodell von 2001 berechnet wurde, besteht aus jeweils einem Teilprobensatz aus den Ernteversuchen der FAL, der APZ und dem Laborexperiment der KWS. Die restlichen Proben der 3 Quellen wurden zur Validation des Kalibrationsmodells herangezogen. Dieses Kalibrationsmodell wurde zur Schätzung der Trockenmasse der Körnermaisproben der Ernte im Jahr 2002 verwendet. Der Kalibrationsatz wurde dann um Teilprobensätze von jeweils 4 Versuchen der KWS und APZ aus dem Jahr 2002 erweitert und ein neues Kalibrationsmodell berechnet, welches mit den Daten der restlichen 14 Versuche aus 2002 validiert wurde. Dieses neue Kalibrationsmodell wurde wiederum zur Schätzung der Trockenmasse der Körnermaisproben der Ernte im Jahr 2003 verwendet. Die aktuelle Kalibration enthält 561 Proben aus drei Erntejahren und drei Geräte CORONA 45 NIR. Die Auswertung des Datenmaterials erfolgte mit der Chemometriesoftware WINISI (Infrasoft International). Die abschließenden Kalibrationsmodelle wurden mit dem Programm GRAMS (Galactic Industries Corporation) erstellt. Die Kalibration beruht auf der linearen Regressions-Methode PLS (Partial Least Square).

2. Ergebnisse und Diskussion

Kontinuierliche Probenpräsentation und Spektrenfilterung

Der Gutstrom auf dem Transportband des NIR-Moduls erhält durch eine Abstreichvorrichtung eine konstante Schichthöhe von ca. 3 cm. Beginn und Ende der Messungen werden durch einen Sensor signalisiert. Die Breite des Gutstromes entspricht der Breite des Transportbandes von 15 cm (Transportband mit aufgesetztem Rand). Der Durchmesser des Spektrometermessfleckes beträgt 2 cm. Innerhalb der Untersuchungen wurde mit folgender Spektrometereinstellung gearbeitet: Drei Einzelspektren wurden zu einem vorgemittelten Spektrum zusammengefasst und dieses im sogenannten Multifile (M-file) abgelegt. Diese drei Spektren bilden einen Messzyklus. Zwischen den Messzyklen wurde ein Messintervall von 100 ms aus Gründen der Datenübertragungsrate eingeschaltet. Die Anzahl der Messzyklen ergibt sich bei gleichen Bandgeschwindigkeiten aus der Länge der Messstrecke, d.h. letztlich aus dem Ertrag der Parzelle. Das Mittelwertspektrum aus den Einzelspektren der Messzyklen ist die Grundlage für die Schätzung entsprechender Parameter der Parzelle im Predict-Modus der Software CORA, hier der Trockenmasse. Senkrecht zur Bewegungsrichtung des Bandes treten aufgrund der Schütteeigenschaften des Gutes keine Störungen der Schicht auf. In Bewegungsrichtung des Bandes entstehen am Anfang und am Ende der Messstrecke Randeffekte, die sich in einer mehr oder weniger kontinuierlichen Abnahme der Schichtdicke äußern, bzw. bei sehr geringer Schichtdicke auch Lücken in der Schicht zeigen. Die Ultraschallsensoren können diese Randeffekte nur ungenügend ausgleichen. Verringerung der Schichtdicke ist gleichbedeutend mit Vergrößerung des Abstandes zwischen Gutoberfläche und Sensor. Dadurch kommt es aufgrund der Messgeometrie des Spektrometers (optimaler Abstand = 13 mm) zur Verkleinerung des Messfleckes, weil sich das Objekt außerhalb des Fokus befindet. In den Absorptionsspektren ($A = \log 1/R$) äußert sich dieser Zusammenhang in sogenannten Spektren-Offsets. Diese können zwar durch den digitalen Filter SNV (Standard normal variate) minimiert werden, bei zu starkem Abfall der Reflexion wird die Messung aber instabil, so dass diese Spektren herausgefiltert werden müssen.

Ein weiterer Effekt ist, dass mit dünner werdender Kornschicht auf dem Band (bis hin zu Schichtlücken) Korn-/Band-Mischspektren auftreten. Auch diese Spektren verfälschen die Informationen über die gewünschten Guteigenschaften und müssen deshalb ebenfalls herausgefiltert werden. Die Erstellung entsprechender Filter wurde mit der Soft-

ware MASK FACTORY (Carl Zeiss Jena GmbH) realisiert. Als effektivster Filter für alle mit dem System gemessenen Spektren erwies sich der Filter $D = \{-0,0001 \leq d^2 A / d\lambda^2 \leq 0,0001\}$ für $\{1100\text{nm} \leq \lambda \leq 1060\}$; $A = \log 1/R$. In Bild 1 ist ein Spektren-Multifile in gefiltertem und ungefiltertem Zustand dargestellt.

Die Wirkung des Filters auf die Qualität der Schätzwerte verdeutlicht Bild 2. Auf der Abszisse ist die Sequenz der Messzyklen über eine Parzelle abgetragen. Der Bezug dieser Sequenz zur spektrometrisch „beprobten“ Gutoberfläche ergibt sich aus dem Messmodus, der Integrationszeit und der Bandgeschwindigkeit. Die Integrationszeit wird intern im Spektrometer aus der Messung des Weißstandards errechnet. Bei der im Mittel der Messreihen verwendeten Integrationszeit von ca. 24 ms und der eingestellten Bandgeschwindigkeit von 0,3 m/s ergibt sich eine Messflecklänge pro Scan von 2,72 cm und eine Messflecklänge pro Messzyklus von 4,16 cm. Die Strecke des Messintervalls beträgt 3 cm.

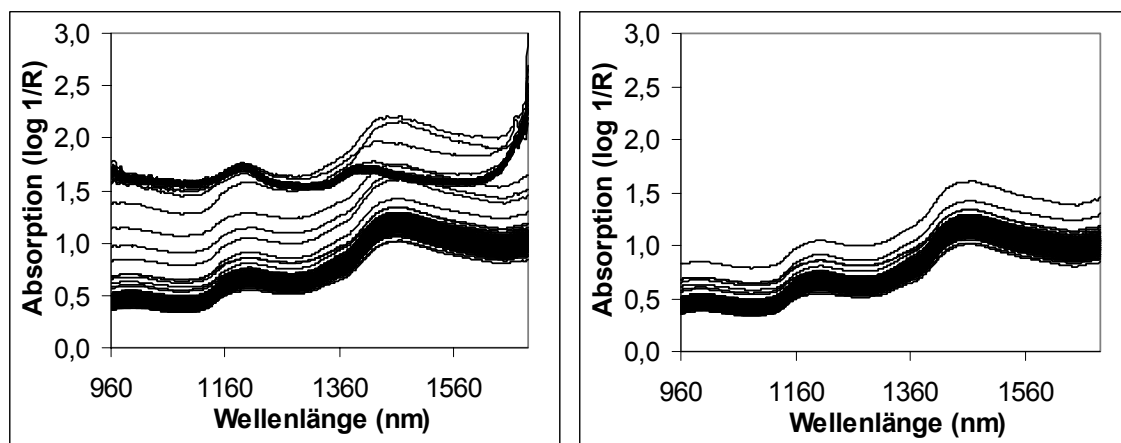


Bild 1: Maiskörner-Spektren-Multifile links ungefiltert, rechts gefiltert

Das heißt, jeder Trockenmasseschätzwert, der in Bild 2 über der Messzyklensequenz abgetragen ist, steht für eine erfasste Probenfläche von $6,53 \text{ cm}^2$. In Bezug auf die Gutoberfläche auf dem Transportband werden damit ca. 6 % der Fläche spektrometrisch beprobt. In Bezug auf das Gutvolumen muss die Eindringtiefe der NIR-Strahlung in die Kalkulation einbezogen werden. Veranschlagt man die Eindringtiefe in Abhängigkeit von der Absorptivität des Materials zwischen 1 und 2 cm, so liegt das spektrometrisch beprobte Volumen des Parzellenertrages zwischen 2 und 4 %.

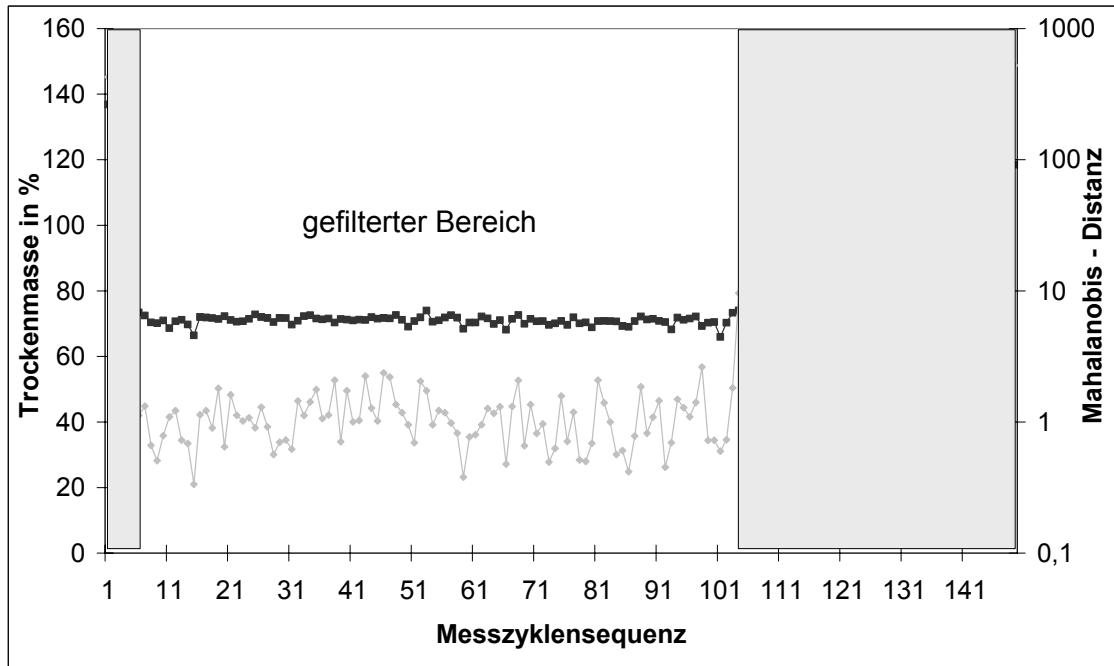


Bild 2: Messzyklensequenz einer Körnermaisparzelle, schwarz: geschätzte Trockenmasse, grau: Mahalanobis-Distanz der Mittelwertspektren der Messzyklen

Aus Bild 2 ist ersichtlich, dass die ermittelten Schätzwerte über die Parzelle, nach Filterung der Randeffekte, nur gering variieren und sich damit das Merkmal Korntrockenmasse der Parzelle mit hoher Präzision schätzen lässt. So beträgt der Mittelwert der Trockenmasse in diesem Beispiel 70,9 % bei einem Standardfehler des Mittelwertes von 0,12. Die Gültigkeit dieser Schätzungen wird durch die Mahalanobis-Distanz angezeigt, die sich im gefilterten Bereich durchweg unter einem Wert von 3 bewegt, d.h. dass die Variabilität der Probenspektren durch die im Kalibrationssatz abgedeckt wird.

Die Schätzung der Korntrockenmasse mit der PLS-Methode würde sich ohne Filterung der Randeffekte wesentlich verschlechtern. In einer Beispielsrechnung mit gefilterten bzw. ungefilterten Spektren lag der SEP ohne Randeffekte bei 1,05, mit Randeffekten jedoch bei 3,06.

Die mit der „Mask Factory“ erstellten Filter werden in die Software CORA importiert und bei der online Schätzung auf der Erntemaschine verwendet.

Temperatureffekte

Unter den Klimabedingungen Nord-West Europas kann die Temperatur während der Maisernte in einem Bereich von 5 bis 30°C schwanken. Aufgrund der mikroklimatischen

Verhältnisse im Pflanzenbestand teilen sich diese Schwankungen nicht in diesem Ausmaß dem Erntegut mit. Weit größeren Einfluss dagegen hat die Exposition des NIR-Moduls zum Sonneneinfallswinkel. Wird das NIR-Modul direkter Sonneneinstrahlung ausgesetzt, kann es zu erheblicher Aufheizung im Inneren des Moduls kommen. Passiert nun der Körnerstrom das NIR-Modul, wird die Wärme auf die oberflächennahe Schicht des Körnerstromes übertragen. Dieser gemessene Prozess erfolgt mit rasanter Geschwindigkeit (< 1 s), weil einerseits die Wärmeleitung der Körner aufgrund des vergleichsweise geringen Wassergehaltes sehr gering ist und andererseits die Eindringtiefe des IR-Thermoelements aufgrund des langwelligen Arbeitsbereiches von 7-18 μm ebenfalls sehr gering ist. Bild 3 visualisiert die Oberflächentemperatur der Körnerproben, wie sie im NIR-Modul vom Raytek-Sensor gemessen wurde, aufgelöst über die Fläche eines Versuchsfeldes. Der räumliche Bezug des beschriebenen Prozesses wird deutlich, wenn man berücksichtigt, dass in diesem Fall der Mähdrescher in W-O- und O-W-Richtung geerntet hat, das NIR-Modul sich auf der linken Seite der Erntemaschine befindet und diese Konstellation in Beziehung zur Azimutwinkeländerung der Sonne gesetzt wird.

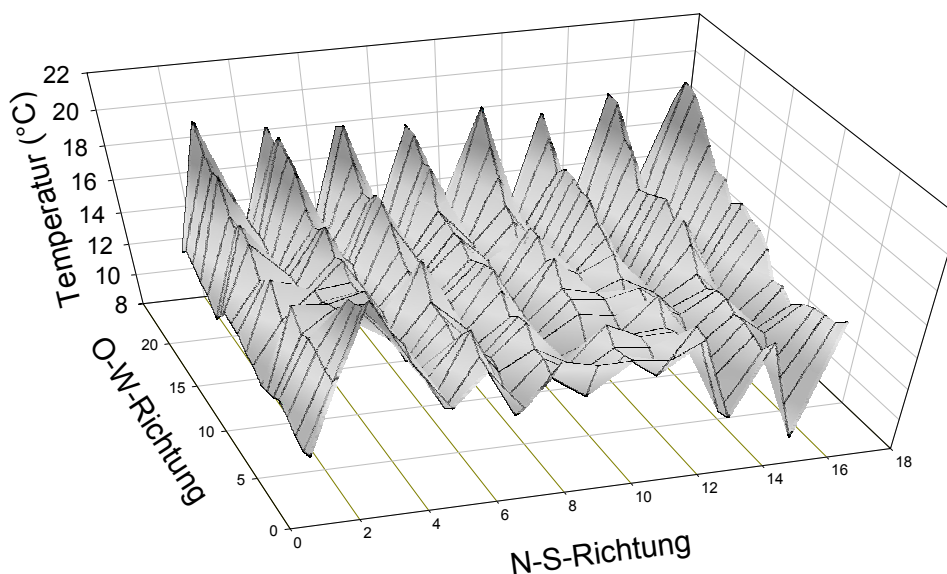


Bild 3: Flächenbezogene Variabilität der Proben temperatur im NIR-Modul auf einem Versuchsfeld während der Ernte

Die Spektren wasserhaltiger Proben werden durch die Proben temperatur beeinflusst. Die Temperaturänderung bewirkt die Änderung der Stärke, bzw. Auflösung von Wasserstoffbrückenbindungen des Wassers und damit Änderungen in den Molekülschwingungszuständen. In den entsprechenden Spektren kommt es zu Änderungen in der In-

tensität und Position der OH-Banden (IWAMOTO *et al.* 1987). Weicht die Temperatur der zu schätzenden Probe von der Temperatur der Proben des Kalibrationssatzes ab, treten systematische Fehler bei der Schätzung auf. In einem Kalibrations-/Validationsexperiment wurden Kalibrationen in 3 Temperaturklassen erstellt und damit 4 Temperaturklassen validiert (Bild 4). Dabei wird deutlich, dass ein „kälteres“ Kalibrationsmodell die Trockenmasse wärmerer Proben überschätzt und im umgekehrten Fall unterschätzt. Das Kalibrationsmodell, das den gesamten Temperaturbereich des Experiments enthält, schätzt hingegen die Trockenmasse aller Temperaturklassen mit einem systematischen Fehler (bias) um „0“.

Versuche, Kalibrationsmodelle zu schaffen, die die Probentemperatur kompensieren, sind in der Literatur beschrieben (ABE *et al.* 2000; PEIRS *et al.* 2003). Dabei konnte nachgewiesen werden, dass globale Modelle, die eine repräsentative Variation der Probentemperatur (bezogen auf die zukünftig zu schätzenden Proben) abdecken, anderen Modellen, die die Temperatur z.B. als x- bzw. y-Variable enthalten, in der Schätzgenauigkeit (SEP) ebenbürtig und aus praktischen Gründen sogar vorzuziehen sind. Im Kalibrationsmodell von 2002 ist die Probentemperatur normal verteilt mit dem Mittelwert von 11,4°C und der Standardabweichung von 3,8°C. Geht man von einem 2 σ -Intervall aus, dann ist das Modell für einen Temperaturbereich von 3,8 bis 19°C gültig.

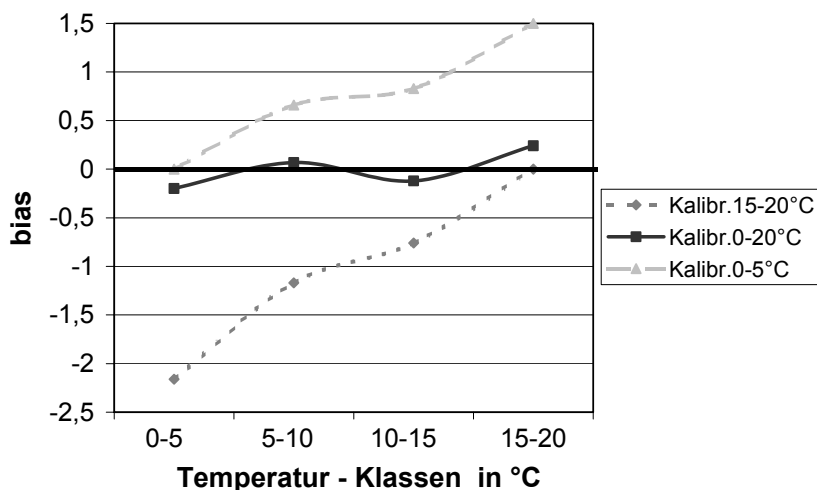


Bild 4: Einfluss der Temperatur auf den systematischen Fehler der Schätzung der Trockenmasse

Kalibrations- und Validationsergebnisse

Die Ergebnisse der Kalibration und Kreuzvalidierung auf der Basis des in Punkt 2 genannten Kalibrationsprobensatzes sind in Tabelle 2 dargestellt. Es ist erkennbar, dass mit jeder Erweiterung des Modells, d.h. mit der Hinzunahme weiterer Variabilität, der Fehler der Kreuzvalidierung tendenziell zunimmt und der Anteil der erklärten Variation an der gesamten Variation 1-VR tendenziell abnimmt. Noch klarer tritt diese Tendenz anhand des Varianzverhältnisses SD/SEC(V) hervor. Dieses beträgt für den Laborversuch: 7,19, für die Kalibration 2001: 5,97 und für das Kalibrationsmodell 2002: 4,40. An der Standardabweichung der Population des jeweiligen Kalibrationssets ist erkennbar, dass sich die Hinzunahme weiterer Variabilität nicht in der Variabilität des Merkmals Trockenmasse widerspiegeln muss, sondern demgegenüber in der Matrixvariabilität gemäß der phänotypischen Spannweite zu suchen ist.

In Bild 5 ist dieser Effekt anhand der Schätzung der Trockenmasse der Körnermaisproben aus der Ernte 2003 zu beobachten. Das Kalibrationsmodell 2001 schätzt die Trockenmasse mit einem mittleren Schätzfehler (SEP) von 1,56 % TM. Durch Erweiterung dieses Modells mit Daten aus der Ernte 2002 zum Kalibrationsmodell 2002 ergibt sich bei der Validierung der gleichen Ernteproben von 2003 ein mittlerer Schätzfehler von 1,06. Das ist umso bemerkenswerter, als im Kalibrationsprobensatz des Modells 2002 ein TM-Bereich von rund 59-76 % enthalten ist, der als typisch angesehen werden kann, dieses Modell aber zur Schätzung der Proben des extrem trockenen Jahres 2003 mit einem TM-Bereich von 59-82 % herangezogen wurde.

Tabelle 2: Ergebnisse der Kalibration und Kreuzvalidierung

	n	min	max	\bar{x}	SD	SEC	RSQ	SEC (V)	1-VR
Laborversuch 1,6,6,1; SNV+detr; PLS	1567	58,6	76,9	67,0	3,45	0,47	0,98	0,48	0,98
Kalibration 2001 1,6,6,1;SNV+detr; PLS	230	58,2	75,9	66,5	3,64	0,48	0,98	0,61	0,97
Kalibration 2002 1,6,6,1; SNV+detr; PLS	539	58,6	75,9	67,3	3,26	0,7	0,95	0,74	0,95

SEC: Standardfehler der Kalibrierung
 RSQ: Bestimmtheitsmaß der Kalibrierung
 SECV: Standardfehler der Kreuzvalidierung
 1-VR: Erklärter Varianzanteil in der Kreuzvalidierung
 SD: Standardabweichung

Auch bei Stützung der Population der Erntedaten von 2003 auf den TM-Bereich des im Modell 2002 enthaltenen ergibt sich ein SEP von 1,04, also diesbezüglich keine signifikante Differenz zum SEP der gesamten geschätzten Population. Das heißt, dass die extrapolierten Schätzwerte keinen höheren Fehler aufweisen.

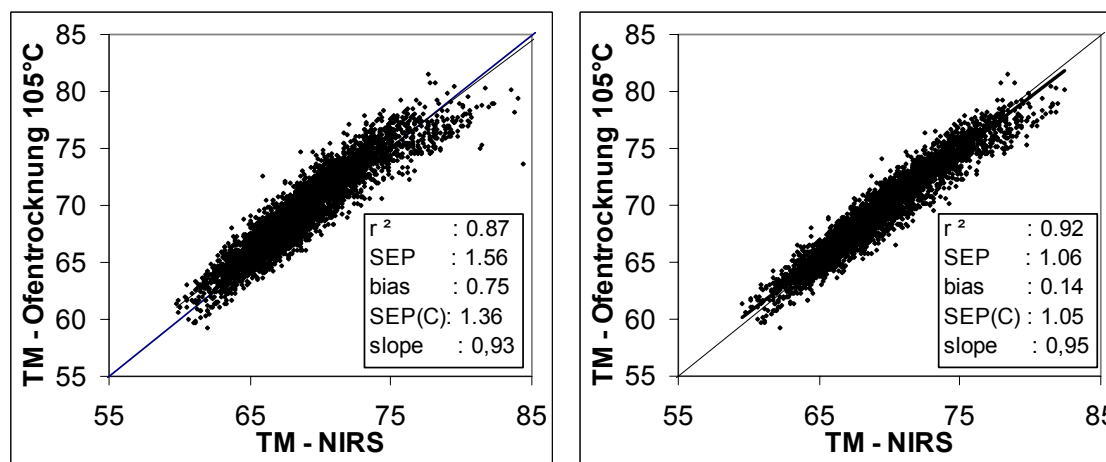


Bild 5: Ergebnisse der Trockenmasseschätzung der Daten aus der Ernte 2003 mit dem Kalibrationsmodell 2001 (links) und mit dem Kalibrationsmodell 2002 (rechts)

Gemäß der geschilderten Vorgehensweise wird zukünftig auch das Modell 2002 mit Proben aus dem Erntejahr 2003 ergänzt und dieses neue Modell zur online-Schätzung der Trockenmasse auf dem Mähdrescher in der Ernte 2004 verwendet werden. Für die weitere Qualifizierung dieses Modells sollen dann in der Ernte 2004 nicht mehr alle Proben der Referenzuntersuchung zugeführt werden, sondern auf dem Mähdrescher eine gezielte Auswahl nach der Mahalanobis-Distanz der ermittelten Spektren sowie einem vorgegebenen Trockenmasseintervall (Plausibilitätstest) erfolgen.

Leistung und Prozessqualität

In einer verhältnismäßig kurzen Entwicklungszeit ist es gelungen, im Erntejahr 2003 bereits über 13.000 Parzelle zu ernten. Die technische Leistungsfähigkeit des Systems liegt mit ca. 100 Parzellen pro Stunde im Bereich einer akzeptablen Leistung für das züchterische Versuchswesen. Die Leistungsfähigkeit des Systems sowie die Richtigkeit, Präzision und Robustheit der Kalibriermodelle sind eine wesentliche Seite des technischen Prozesses. Die andere Seite ist die Prozessstabilität, d.h. die Gewährleistung eines sicheren Zusammenwirkens aller Prozessglieder und –folgen auch bei hundertfacher Wiederholung unter Praxisbedingungen. In dieser Hinsicht wurden in Auswertung der Erfahrungen, die in den zwei Haupteinsatzjahren gewonnen wurden, zahlreiche

Verbesserungen an diesem System vorgenommen. Diese betrafen softwareseitig den Datenaustausch zwischen den Programmen CORA und Harvest Manager sowie die automatische Schwarz-/Weißkalibration des Spektrometers. Konstruktive Verbesserungen wurden am NIR-Modul derart vorgenommen, dass die entstehende Wärme schnell abgeleitet wird. Auch elektrische Elemente wurden z.T. gegen weniger störanfällige ausgetauscht.

Trotz all dieser prozessstabilisierenden Verbesserungen darf nicht übersehen werden, dass es sich beim Einsatz von Spektrometern auf Erntemaschinen um optoelektronische Systeme handelt, die einen vergleichsweise höheren Anspruch an Pflege und Wartung stellen. So kann es trotz Absaugvorrichtungen zur Verschmutzung der Optik kommen. Diese ist also zu kontrollieren und regelmäßig zu reinigen. Auch in diesem Punkt sind Verbesserungen der Software geplant, die dann im Zuge der Weißkalibrierung dem Fahrer einen nicht tolerierbaren Verschmutzungsgrad signalisieren.

Der ökonomische Effekt des NIR Harvest Line Konzepts zur Trockenmassebestimmung des Erntegutes im züchterischen Versuchswesen liegt zum Einen in der Einsparung von Energie, die für das Betreiben der entsprechenden Trockenschränke notwendig wäre, zum Anderen in der Einsparung von Arbeitskräftestunden. Ein weiterer Effekt entsteht durch die Verbesserung der erreichbaren Genauigkeit und Präzision der Trockenmassebestimmung mit dem NIR Harvest Line Konzept gegenüber dem Trockenschrankverfahren, wie in Tabelle 3 anhand der statistischen Parameter der Versuchsauswertung klar belegt wird.

Tab. 3: Statistische Parameter der Versuchsauswertung

Parameter	TM (Trockenschrank)	TM (NIR Harvest Line)
REP1 %	74.4	89.2
C.V. %	1.49	0.64
LSD5	1.53	1.01
r (1. vs. 2. rep)	0.78	0.92

REP1 %: Repeatability (1 %) gibt den Anteil genetisch nutzbarer Variation im Verhältnis zur gesamten phänotypischen Variation (einschließlich des Versuchsfehlers) in einem definierten Umweltbereich (z.B. 1 Ort) an

CV %: Variationskoeffizient (s %)

LSD5: Grenzdifferenz (5 %)

r (1.vs.2. rep): Korrelation zwischen 1. und 2. Wiederholung

3. Literatur

- ABE H, IYO C, KAWANO S (2000)** A study on the universality of a calibration with sample temperature compensation. *J. Near Infrared Spectrosc.* 8: 209-213
- ANONYM (1997)** Methodenbuch Bd. 3, Chemische Untersuchung von Futtermitteln, Methode 3.1, VDLUFA Verlag Bonn
- DARDENNE P, FEMENIAS N (2000)** In (Eds A.M.C. Davies and R. Giangacomo) *Near Infrared Spectroscopy: Proc. 9th Int. Conf.*, p121
- IWAMOTO M, UOZUMI J, NISHINARI K (1987)** Preliminary investigation of the state of water in foods by near infrared spectroscopy. *Proc Int. NIR/NIT Conf* pp. 3 –12, Hollo J, Kaffka KJ, Goenczy JL (Eds), Budapest/Hungary
- KORMANN G (2001)** Untersuchungen zur Integration kontinuierlich arbeitender Feuchtemesssysteme in ausgewählte Futtererntemaschinen. Diss. A, TU München
- PAUL C, RODE M, FEUERSTEIN U (2000)** Forage analysis in true field by NIRS diode array instrumentation. *Proceedings of the 18th European Grassland Federation Congress 2000, Aalborg/Dänemark*, in: *Grassland Science in Europe 5*, 259-261 (Soegaard, K. *et al.* eds.)
- PAUL C, RODE M, HÄUSLER A, PFITZNER C (2002)** Einführung der NIRS-gestützten Erfassung des Trockenmassegehalts in die Versuchsernte von Futterpflanzen. BLE Abschlussbericht, FAL Braunschweig
- PEIRS A, SCHEERLINCK N, NICOLAI BM (2003)** Temperature compensation for near infrared reflectance measurement of apple fruit soluble solids contents. *Postharvest Biology and Technology* 30: 233-248
- PFITZNER C, PAUL C (2002)** Erste Ergebnisse der Anwendung des NIRS Harvest Line Konzepts auf Mähdruschfrüchte. Tagungsband DLG, AG Futterpflanzen, Versuchstechnikertagung, 29.01.2002, Haus Düsse

Advanced Optoelectronic System – ein Multisensorsystem zur gezielten Unkrautkontrolle

Advanced Optoelectronic System – a multi-sensor system for targeted weed control

Rainer H. Biller, Walter Ihle, Jörn Titze, Hartmut Berkefeld, Jürgen Schadt
Institut für Betriebstechnik und Bauforschung, Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft (FAL), Bundesallee 50, 38116 Braunschweig. E-Mail: rainer.biller@fal.de

Zusammenfassung: *Precision Farming* im chemischen Pflanzenschutz ist möglich, wenn Unkräuter von Nutzpflanzen unterschieden werden können und dann gezielt und treffsicher nach Schadensschwellen kontrolliert werden. Am Institut für Betriebstechnik und Bauforschung wird ein *Advanced Optoelectronic System (AOS)* entwickelt, welches mit einem Multisensorsystem - bestehend aus RADAR-Sensor, Inclinometer, Beschleunigungssensoren und Windsensor - die Treffsicherheit des Spritzstrahls unabhängig von äußeren Bedingungen sicherstellt und mit einem neu entwickelten AOS-Sensor einen *spektralen Fingerabdruck* aus dem von den Pflanzen reflektierten Umgebungslicht erstellt, mit Hilfe dessen wesentliche Unkräuter von Nutzpflanzen unterschieden werden.

Deskriptoren: precision farming, chemischer Pflanzenschutz, Pflanzenerkennung, optische Sensoren

Summary: *In chemical plant protection Precision Farming is possible by distinguishing weeds from useful crops and then controlling them in a targeted manner when they exceed the economical damage threshold. At the Institute of Production Engineering and Building Research, an Advanced Optoelectronic System (AOS) will be developed which uses a multi-sensor-system – consisting of R A D A R-Sensor, inclinometer, accelerometer and anemometer – to ensure accuracy of aim regardless of ambient conditions and taking a spectral fingerprint of the ambient light reflected by the plants, through which important weeds can be distinguished from useful crops.*

Keywords: *precision farming, chemical plant protection, plant detection, optical sensors*

1. Einleitung

Die Landwirtschaft im Dritten Jahrtausend ist geprägt von den Begriffen *Precision Farming* und *Precision Agriculture*. Dies gilt auch für den chemischen Pflanzenschutz und bedeutet, dass Herbizide nur dort ausgebracht werden sollen, wo wirtschaftliche Schadensschwellen von bestimmten Unkräutern überschritten sind. Möglich ist dies nur, wenn man Nutzpflanzen und Unkräuter voneinander unterscheiden kann und dann zielsicher das Pflanzenschutzmittel ausbringt (AUTORENKOLLEKTIV 2001). Prinzipiell werden zur Lösung dieses Problems zwei Ansätze verfolgt: der Einsatz von Bildverarbeitung (GERHARDS *et al.* 2002, PRESSESTELLE DER RHEIN. F.-W.-UNIV. BONN) und der Einsatz optischer Sensoren (RUCKELSHAUSEN *et al.* 2002, WARTENBERG *et al.* 2000, WANG *et al.* 2001, BILLER *et al.* 2000).

Die Verwendung optischer Sensoren zur Unterscheidung von Unkräutern und Boden wurde schon seit den frühen 80er Jahren untersucht (HAGGAR *et al.* 1983), wobei dazu die grundsätzlich unterschiedlichen Reflexionseigenschaften von Boden und Pflanze bezüglich des auf sie treffenden Umgebungslichtes herangezogen werden. Erst seit Anfang der 90er Jahre ist aber ein mit optischen Sensoren zur Pflanzenerkennung arbeitendes System für eine Feldspritze handelsüblich erhältlich (FELTON *et al.* 1992). Da dieses System nicht zwischen Nutzpflanzen und Unkräutern unterscheiden kann, ist sein Einsatzbereich begrenzt.

Im Institut für Betriebstechnik und Bauforschung wird dieser zweite Ansatz verfolgt und auch im Rahmen von Drittmittelprojekten bearbeitet mit dem Ziel, auf der Basis der Reflexionseigenschaften von Nutzpflanzen und Unkräutern diese zu unterscheiden und dann die Unkräuter gezielt zu kontrollieren, welche die wirtschaftliche Schadensschwelle überschritten haben (BILLER *et al.* 1997, BILLER, SCHICKE 2000, BILLER, IHLE 2000).

2. Advanced Optoelectronic System (AOS)

Das Multisensorsystem

Die Lösung dieser Aufgabe besteht aus einem Multisensorsystem, welches zum einen die Unterscheidung von Pflanzen ermöglicht und zum anderen sicherstellt, dass genau dort appliziert wird, wo auch die zu kontrollierenden Unkräuter detektiert wurden.

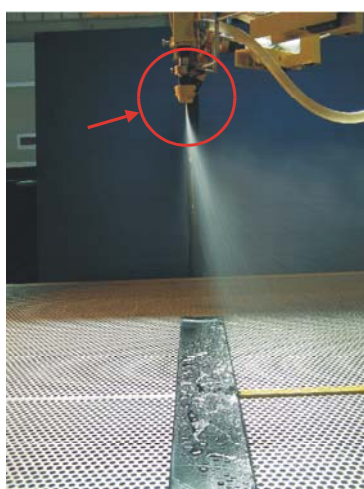
Die Treffsicherheit wird beeinflusst durch Veränderungen in der Fahrgeschwindigkeit des Traktors, durch Spritzgestängeschwankungen und durch Fahrt- und Umgebungswind.

Zur Anpassung an veränderliche Fahrgeschwindigkeiten wird das Signal eines R A D A R-Sensors verwendet, um den Spritzzeitpunkt davon abhängig zu verändern.

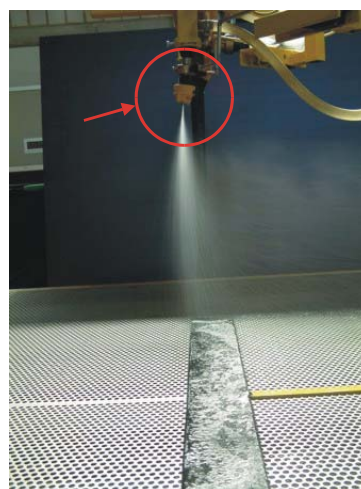
Zwei Inklinometer, eines am Traktor und eines an der Feldspritze, liefern die Information, ob und wie sich der Abstand des Spritzgestänges zum Boden verändert hat. Diese Information ist deshalb wichtig, weil vor dem Spritzvorgang ein prozentualer Anteil des Sensorsichtfeldes eingestellt wird, der von dem zu kontrollierenden Unkraut bedeckt sein muss, um einen Spritzvorgang auszulösen. Durch Abstandsveränderungen (vertikale Spritzgestängeschwankungen) verändert sich dieser Anteil und wird deshalb softwaremäßig angeglichen.

Horizontale Spritzgestängeschwankungen können dazu führen, dass zu lange auf einer Stelle gespritzt wird. Über Beschleunigungssensoren wird die Horizontalgeschwindigkeit des Spritzgestänges ermittelt und die aus der Fahrgeschwindigkeit gewonnene Spritzverzögerung angepasst. Für den Fall, dass eine Spritzdüse über eine schon gespritzte Stelle schwingt, wird diese abgeschaltet.

Fahrtwind sowie Umgebungswind lenken den Spritzstrahl ab und beeinträchtigen ebenfalls die Treffsicherheit, Bild 1.



Spritzkegel ohne Verstellung



Spritzkegel mit Verstellung

Bild 1: Ablenkung des Spritzstrahls durch Umgebungswind (5 m/s) und Auswirkung einer motorischen Spritzkegelverstellung

Der Ausgleich des Windeinflusses geschieht durch eine motorische Spritzdüsenverstellung in Abhängigkeit von der resultierenden Windgeschwindigkeit und der resultierenden Windrichtung. Für die Entwicklung des Algorithmus für die windabhängige Spritzdüsenachführung wurde ein Versuchsstand aufgebaut, Bild 2.



Bild 2: Prüfstand zur windabhängigen Spritzdüsenverstellung

Im Hintergrund ist ein kurzer Windkanal zu sehen, in dem eine homogene turbulenzfreie Windströmung bis 6 m/s erzeugt wird. Im Vordergrund ist die Verstellung für die Windrichtung zu sehen. Es können Windrichtungen von $\pm 45^\circ$ simuliert werden. Für die Messung von Windrichtung und Windgeschwindigkeit wird ein Ultrasonic-Anemometer eingesetzt, von dem die x- und y-Komponenten des Umgebungswindes ausgegeben werden können.

Dem Projekt liegt zugrunde, dass die Pflanzenerkennung und -unterscheidung mit optischen Sensoren erfolgen soll. Die optischen Sensoren (Fotodioden und Bandpassfilter) erfassen das von den Pflanzen reflektierte Umgebungslicht. Sie sind sehr schnell und können online eingesetzt werden.

Das Sichtfeld des Sensors sollte in etwa so groß sein wie das Spritzfeld einer Flachstrahldüse, wobei die Überlappung nebeneinander liegender Sichtfelder und Spritzfelder aus Gründen der Einsparung nur etwa 20 % bis 30 % betragen sollte. Die Ausdeh-

nung des Sichtfeldes ist vom Abstand des Sensors zum Boden abhängig und wird durch eine Schlitzblende vor der Fotodiode festgelegt.

Fotodioden haben eine vom Einfallswinkel des Lichtes abhängige Empfindlichkeit, die cosinusförmig verläuft. Damit aber eine Pflanze einer bestimmten Größe immer das gleiche Signal liefert, unabhängig von ihrer Position im Sichtfeld, wird diese Empfindlichkeitskurve durch einen Graustufenfilter mit neutraler Dichte zwischen 400 nm und 2000 nm ausgeglichen. Das bedeutet, dass zur Sichtfeldmitte das einfallende Licht abgeschwächt wird.

Die Pflanzenunterscheidung geschieht durch die Erfassung des reflektierten Umgebungslichtes. Durch Bandpassfilter werden nur bestimmte ausgewählte Wellenlängenausschnitte aus dem Spektrum zugelassen – es wird praktisch ein **spektraler Fingerabdruck** genommen.

Für diese Wellenlängen muss auch das Umgebungslicht direkt erfasst werden, um veränderte Umgebungslichtbedingungen durch Wolken oder Tagesverlauf auszugleichen.

Werden mehrere Fotodioden und zugehörige Bandpassfilter verwendet, besteht das Problem, dass aufgrund der geometrischen Anordnung und Ausdehnung jede Fotodiode mit vorgeschaltetem Bandpassfilter schon bei stehender Feldspritze einen anderen Feldausschnitt sieht und somit für die eine Fotodiode eine Pflanze aus dem Sichtfeld herausfallen und für die andere Fotodiode eine neue Pflanze hinzukommen kann. Dieser Effekt wird bei vertikalen Spritzgestängeschwankungen noch verstärkt.

Eine Lösung dieses Problems ist gegeben, wenn nur eine Fotodiode in Form einer Sandwich-Fotodiode, verwendet wird, welche für das gesamte interessierende Spektrum des Umgebungslichtes empfindlich ist. Dabei sieht eine Fotodiode nach unten und empfängt das reflektierte Umgebungslicht, während eine zweite Fotodiode nach oben sieht und das Umgebungslicht direkt empfängt. Eine vor den Fotodioden rotierende Scheibe mit Bandpassfiltern selektiert das Umgebungslicht nach den ausgewählten Wellenlängenbereichen.

Die einzelnen Komponenten des AOS-Sensors zeigt Bild 3. Der Aufbau des Sensors sowie den fertiggestellten Prototyp zeigen die Bild 4 und 5.



Bild 3: Komponenten des AOS-Sensors (von oben im Uhrzeigersinn: Gehäuseoberteil, Aufnahme für die Umgebungslicht-Fotodiode, Verstärkungselektronik, Aufnahme für die Bandpassfilter und Filter, Gehäuseunterteil mit Aufnahme für die Sichtfeld-Fotodiode)

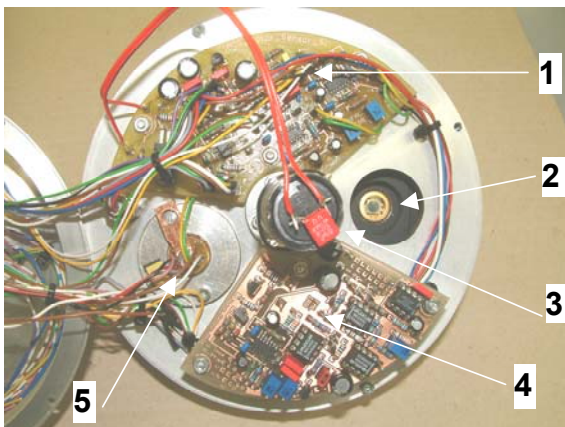


Bild 4: Aufbau des AOS-Sensor mit zwei Sandwich-Fotodioden (2,5), Antriebsmotor (3) Verstärker für die Fotodioden (1,4)

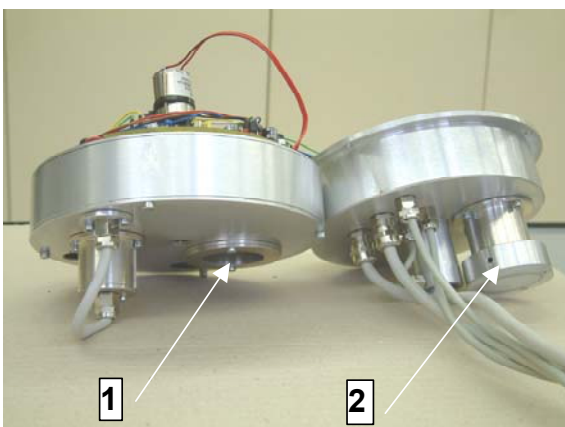


Bild 5: AOS-Sensor mit Fenster für Sichtfeld-Fotodiode (1) und Schacht für Umgebungslichtaufnahme für die Sichtfeld-Fotodiode (2)

Für die Vernetzung der Sensoren und Aktoren wurde ein multimasterfähiges Feld-BUS (Binary Unit System) auf Basis des CAN (Controller Arenetwork) mit einer Datenrate von 250 kbit/s aufgebaut, Bild 6.

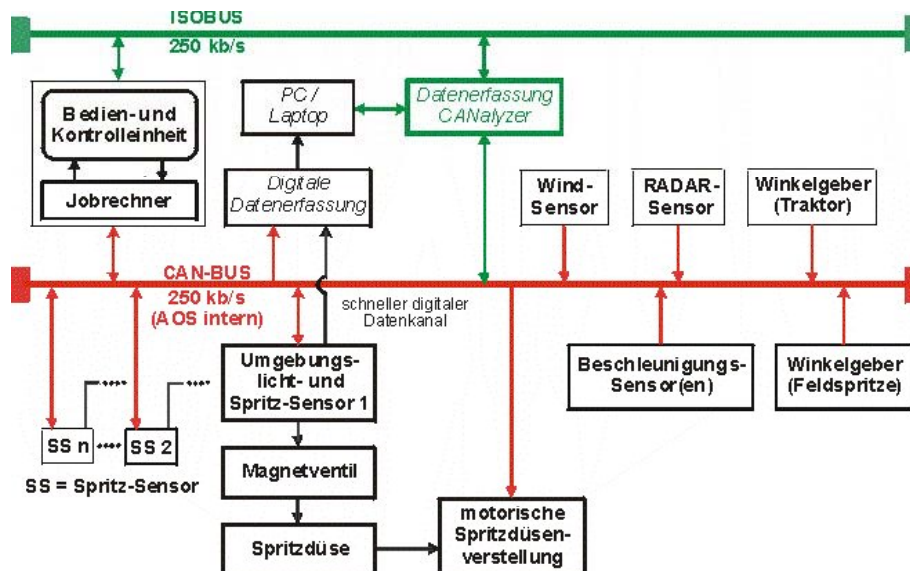


Bild 6: Systemarchitektur des Multisensorsystems AOS

CAN ist der zukünftige Standard im landwirtschaftlichen Bereich für die Kommunikation zwischen Traktor und Anbaugerät und wird als ISO11783 oder ISOBUS (ISO: International Organization for Standardization) bezeichnet.

Kernstücke des Multisensorsystems sind der Sensor für die Reflexionsmessung und die Erfassung des Umgebungslichtes sowie die weiteren Spritzsensoren ohne Umgebungslicht-Fotodiode. Jeder Sensor ist in seiner Spritzentscheidung autark und kann das zugehörige Magnetventil mit Spritzdüse ansteuern. Über das Netzwerk CAN-BUS (AOS-intern) werden die Umgebungslicht-Messwerte des kombinierten Sensors allen weiteren Spritzsensoren (SS 1 ... SS n) zugänglich gemacht.

Die Signale des R A D A R -Sensors, der Beschleunigungssensoren (an zwei Punkten des Spritzgestänges) und der Winkelgeber (Neigungssensoren; Inclinometer) am Traktor (in der Traktorlängsachse) und Spritzgestänge (Gestängemitte) sowie des Windsensors stehen über das Netzwerk ebenfalls allen Spritzsensoren zur Verfügung.

Die Bedien- und Kontrolleinheit übernimmt die Visualisierung ausgewählter Messwerte sowie die Steuerung des Gesamtsystems. Zusätzlich ermöglicht sie die Verbindung der beiden Netzwerke ISOBUS und CAN-BUS (AOS intern).

Um die Interoperabilität und Kompatibilität zwischen den eigenen Geräten und Geräten von Fremdfirmen sicherzustellen, wurden Datenbankelemente des ISOBUS verwendet. Zur internen Messung der Reflexionswerte wurde die Datenbank um eigene Elemente erweitert. Die Kommunikation ist physikalisch kompatibel zum SAE-Standard J1939 (Society of Automotive Engineers). Für das Protokoll wird ausschließlich CAN 2.0b mit 29-bit-extended-CAN-Identifiern verwendet.

Ausgesuchte Messwerte werden zur Kontrolle und Auswertung über einen schnellen digitalen Datenkanal direkt am Sensor erfasst und auf einem PC oder einem Laptop aufgezeichnet. Alle über das Netzwerk versendeten Nachrichten können zusätzlich über einen CAN-Datenlogger angezeigt und ausgewertet werden.

Reflexionsmessungen

Für die Unterscheidung von Nutzpflanzen und Unkräutern anhand von Reflexionseigenschaften in ausgewählten Wellenlängenbereichen des Umgebungslichtes sind eine Vielzahl von Messungen erforderlich, sowohl im Labor als auch auf dem Feld. Nur so können Unterschiede zwischen den Pflanzen erarbeitet werden, aber auch die Grenzen der Unterscheidungsfähigkeit ermittelt werden. Wie Versuchsergebnisse aus dem Labor zeigen, sind durchaus deutliche pflanzenabhängige Reflexionsunterschiede vorhanden, Bild 7.

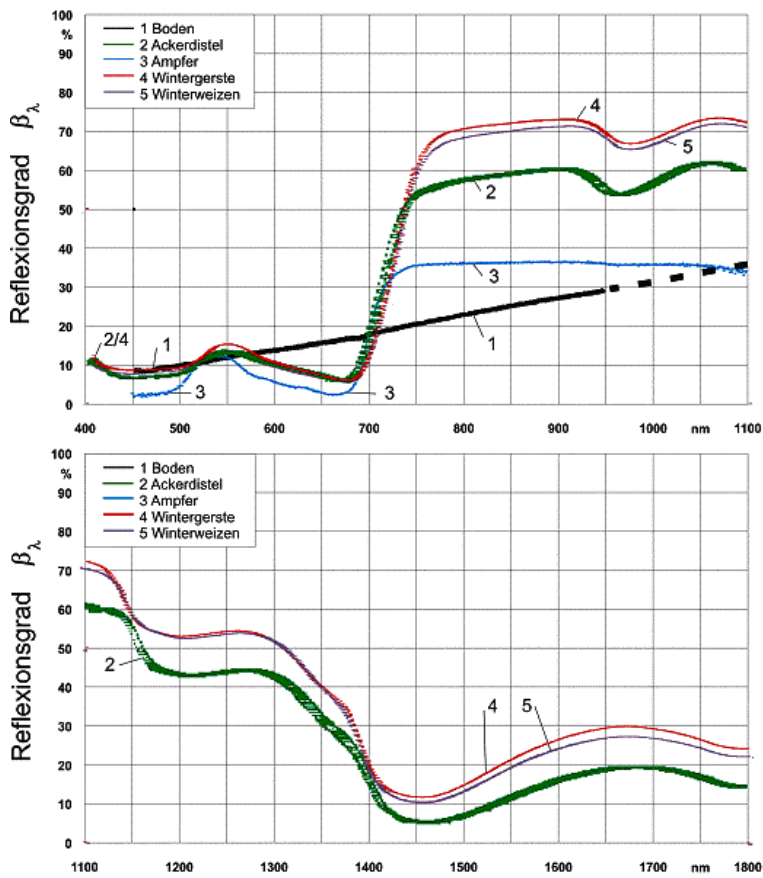


Bild 7: Reflexion von Wintergetreide, Ackerdistel, Ampfer und Boden

Für die Messungen auf dem Feld wurde bisher der erste Prototyp eines Mehrwellenlängen-Sensors mit fünf Fotodioden und Filtern, aufgebaut auf einem Messwagen, Bild 8, eingesetzt.

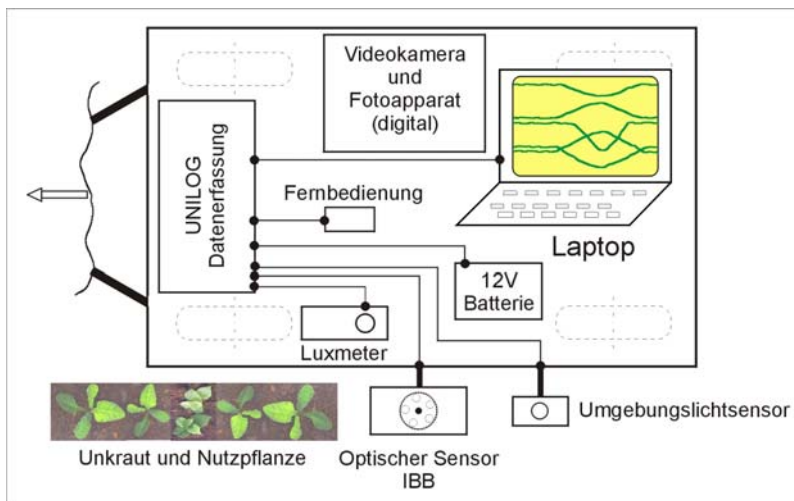


Bild 8: Schematische Darstellung des Messwagens



Bild 9: Messwagen im Einsatz auf dem Feld

In 2003 standen drei Feldabschnitte mit Nutzpflanzen und Unkräutern und vier Feldabschnitte nur mit Unkräutern zur Verfügung. Insgesamt wurden die Reflexionsdaten von 21 Unkrautarten und drei Nutzpflanzen über den Zeitraum von vier Monaten erfasst. Die Messungen werden jeweils statisch und in der Überfahrt (dynamisch) durchgeführt. Zur Verbesserung der dynamischen Messungen wurde der Sensor an eine motorisch betriebene Vorschubeinheit angebracht, die den Sensor mit konstanter Geschwindigkeit über die Messstrecke führte. Die Position der Pflanzen wurde markiert und diese Markierung mit einer Lichtschranke abgetastet. Die Messstrecke wurde ebenfalls vermessen und die Position der Pflanzen festgehalten. So kann der exakte Bezug von Messwert zu Messstrecke und zu den Pflanzen hergestellt werden. Dies ist besonders wichtig, wenn bei den Messungen die Unkräuter und Nutzpflanzen gemischt wachsend erfasst werden sollen, was bei den Versuchen im November und Dezember der Fall war.

Ein Beispiel für eine solche Reflexionsmessung zeigten Bild 10a und 10b.

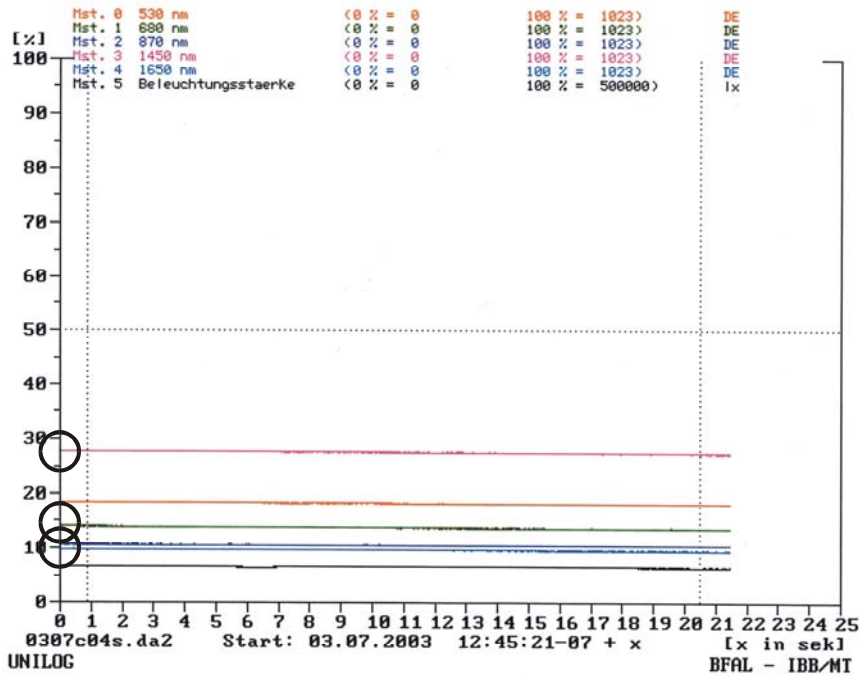


Bild 10a: Reflexion einer Vogelmiere, statisch gemessen

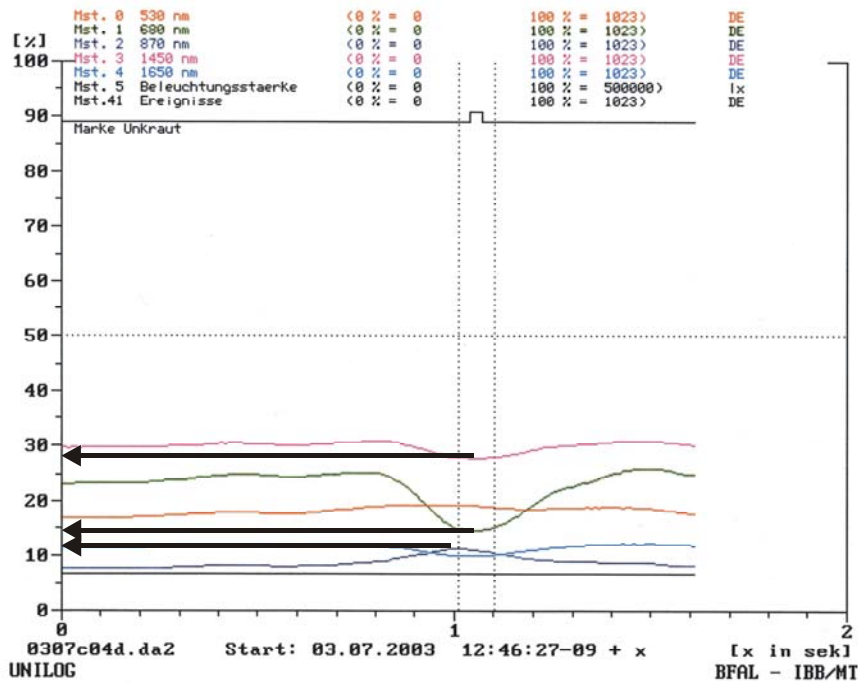


Bild. 10b: Reflexion einer Vogelmiere, dynamisch gemessen

Dargestellt ist die Reflexion einer Vogelmiere bei der statischen und der dynamischen Messung. Bei der dynamischen Messung, Bild 10b, ist über der Messstrecke zunächst die Reflexion der Umgebung zu sehen, in diesem Fall Boden. Bei der Marke für das Unkraut gleicht sich diese Reflexion derjenigen der Vogelmiere an, siehe Bild 10a, um danach wieder die Werte für den Boden anzunehmen. Die ermittelten Daten werden zur Zeit für die Bildung eines Unterscheidungsalgorithmus ausgewertet.

3. Ausblick

Die Realisierung einer Online-Pflanzenunterscheidung und –Herbizidapplikation wird die bisherige Flächenspritzung ablösen und vor allem ökologische aber auch ökonomische Vorteile erbringen. Aufgrund der hohen Ansprüche an Sensortechnik und Informationstechnik wird dieses System aller Voraussicht nicht für die kleinen und mittleren Betriebe geeignet sein, diesen aber über Lohnunternehmer oder bei Betriebsgemeinschaften zur Verfügung stehen. Aufgrund der begrenzten Sichtfeldauflösung werden auch sehr wahrscheinlich kleine Unkräuter im Zweiblattstadium nicht mit dieser Technik erfasst werden können, sondern sind über eine zweite Spritzleitung mit geringer Dosierung in Flächenspritzung zu kontrollieren. Die Zukunft wird zeigen, ob nicht in der Kombination der zur Zeit verfolgten Ansätze für gezielte teilflächenspezifische Unkrautbekämpfung die Lösung liegt.

4. Literaturverzeichnis

- AUTORENKOLLEKTIV (2001)** Precision Farming im Pflanzenschutz am Beispiel Unkrautbekämpfung. KTBL-Schrift 402
- BILLER RH, IHLE W (1997)** Die sehende Feldspritze - Unterscheidung von Nutzpflanzen und Unkräutern - online mit Hilfe optoelektronischer Sensoren. Agritechnica '97, Hannover, 9.-15. 11. 1997
- BILLER RH, et al.(2000)** Verminderung des Aufwandes an Herbiziden in der Pflanzenproduktion durch zielflächenorientierte Applikation. Abschlußbericht zum DBU-Projekt 06331, Juni 2000, S. 75
- BILLER RH, SCHICKE R (2000)** Multi-frequency optical identification of different weeds and crops for herbicide reduction in precision agriculture. In: Proc. of the 5th Intern. Conference on Precision Agriculture, 16.-17.07. 2000, University of Minnesota, St. Paul, MN, USA
- BILLER RH, IHLE W (2000)** Pflanzenunterscheidung mit optischen Sensoren. Landtechnik 55, H. 2, S. 148-149
- FELTON WL, MCCLOY KR (1992)** Spot Spraying. Agric. Engng. H. 11, S. 9-12

- GERHARDS R, et al. (2002)** Site-Specific Weed Control in Maize, Sugar Beet, Winter Wheat and Winter Barley. *Precision Agriculture*, 3, S. 25-35
- HAGGAR RJ, et al. (1983)** A prototype handheld patch sprayer for killing weeds, activated by spectral differences in crop/weed canopies. *J. agric. Engng. Res.* 28, S. 349-358
- Pressestelle der Rhein. F.-W.-Univ. Bonn:** Unkrautspritze sieht, wo sie spritzen muss.
<http://www.uni-bonn.de/aktuelles/presse-informationen>
- RUCKELSHAUSEN A, et al. (2002)** Fremdlichtunabhängige Messung der Flächenbelegung in Pflanzenkulturen: Entwicklung von Low-Cost-Systemen mit neuen Spektro Sensoren und gepulster Beleuchtung. *Proc. VDI/MEG-Tagung Landtechnik*, S. 145-150
- WARTENBERG G, DAMMER K-H (2000)** Teilflächenspezifische Unkrautregulierung im Echtzeitbetrieb. *Proc. VDI/MEG Tagung Landtechnik*, S. 281-287
- WANG N, et al. (2001)** Design of an optical weed sensor using spectral characteristics. *Transact. of the ASAE*. 44 (2), S. 409-419

Optische Differenzierung von Wildlachs und Zuchtlachs

Optical differentiation of wild salmon and farmed salmon

Michael Kroeger

Bundesforschungsanstalt für Fischerei, Palmaille 9, D-22767 Hamburg, Germany

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

Kurzfassung: Der zunehmende Verzehr von Fischprodukten aus konventionell gefarmten Lachsen, aus ökologisch gefarmten Lachsen und Wildlachsen macht eine objektive und einfache Methode zur Differenzierung der Produkte notwendig. Die Analyse von Oberflächenmustern von Filets ist eine erprobte Methode zur Artenerkennung (KROEGER & SCHUBRING, 2001) und Qualitätsbestimmung (KROEGER, 2003), die für den Einsatz zur Bestimmung des Aufzuchtverfahrens angepasst wurde. Dazu werden die Proben mit Licht eines engbandigen Wellenlängenbereichs bestrahlt, ein Bild aufgezeichnet und dieser Vorgang für andere Wellenlängenbereiche wiederholt. Vom UV bis zum nahen IR werden so Bilder mit spektroskopischen Informationen erzeugt und zu einem Multispektralbild kombiniert. Für eine Differenzierung werden im Auswertungsprozess Bilder ausgewählt, die mit nur wenigen Wellenlängen korrespondieren. Eine weitere Verbesserung der Differenzierung lässt sich durch eine Mehrgitterdarstellung der Multispektralbilder erreichen, indem der Auswahlprozess für Wellenlängen für jede Auflösungsstufe durchgeführt wird.

Deskriptoren: Mustererkennung, Bildverarbeitung, Spektroskopie, Lachs

Summary: *Increasing consumption of fish products from conventional farmed salmons, from ecological farmed salmons and from wild salmons requires an objective and rapid method for differentiation of products. Analysis of surface patterns from fillets is a tested method for species identification (KROEGER & SCHUBRING, 2001) and determination of quality (KROEGER, 2003) and was fitted for differentiation of salmons due to their type of farming. Samples are illuminated by light of a narrow spectral band followed by image recording. This process is repeated for different wavelengths. From UV to near IR images with spectroscopic signature are generated and combined to a multispectral image. For differentiation only a subset of the multispectral image corresponding to a few wavelengths is used for evaluation. An improvement in the differentiation is achieved by the multigrid representation for all the wavelengths.*

Keywords: *Pattern recognition, image processing, spectroscopy, salmon*

1. Einleitung

Verändertes Qualitätsbewusstsein von Verbrauchern hat zu einem zunehmenden Verzehr von Lachsprodukten geführt, die aus nicht-konventionell gefarmten Lachsen (Ökolachsen) und aus Wildlachsen hergestellt wurden. Im Rahmen von OEKOFINA, einem Gemeinschaftsprojekt von Bundesforschungsanstalten aus dem Forschungsverbund „Produkt und Ernährungsforschung“, sollten Methoden zum Nachweis von ökologisch erzeugten Produkten entwickelt werden. Insbesondere sollte geklärt werden, ob sich Unterschiede zwischen konventionellem Farmlachs, Ökolachs und Wildlachs mit physikalischen und chemischen Methoden ermitteln lassen. Die Bildverarbeitung hatte die Aufgabe, mögliche Einflüsse der Aufzuchtmethode auf die Muskelstrukturen der Fische zu erkennen und damit eine zerstörungsfreie Differenzierung zu ermöglichen.

2. Material und Methoden

Sämtliche Untersuchungen wurden an Farmlachs aus Irland und Norwegen, Ökolachs aus Irland und Wildlachs aus Irland durchgeführt. In einem Inspektionsfenster der Größe 23 mm x 17 mm wurden Oberflächenmuster von Filets mit einer nahezu telezentrischen Optik (korrigiert von 380 nm bis 1000 nm) und einer 2/3“ CCD Kamera (736 x 568 Pixel) erfasst. Jedes Bild wurde radiometrisch kalibriert und eine AOI (area of interest) von 512 x 512 Pixel für die weitere Verarbeitung verwendet. Bild 1 zeigt ein typisches Oberflächenmuster einer Lachsprobe, aus dem Merkmale für eine mögliche Differenzierung abgeleitet werden. Grundlage für einen Mustererkennungsprozess liefert die Struktur von Muskelfasern, die sich durch ihre lineare und parallele Anordnung auszeichnen und mit der gewählten geometrischen Auflösung erfasst werden können (Bild 2). Auf dem Bild (AOI) wird ein Fenster der Größe 16 x 16 Pixel definiert, das pixelweise über das gesamte Bild verschoben wird. Jedes Fenster zeigt linear orientierte Strukturen (Bild 3), deren Symmetrieeigenschaften (BIGÜN & GRANLUND, 1987) mit einem numerischen Wert gekennzeichnet werden. Dieser Wert wird mit Hilfe des Strukturensors (JÄHNE, 2002) für jeden Verschiebungsschritt durch Lösung des Eigenwertproblems (COURANT & HILBERT, 1968) ermittelt, indem aus den 3 unabhängigen Komponenten des Tensors

$$\lambda'_{xy} \quad \lambda'_{xx} \quad \lambda'_{yy}$$

die rotationsinvariante Kohärenz

$$\Omega = [(\lambda'_{yy} - \lambda'_{xx})^2 + (2\lambda'_{xy})^2] / (\lambda'_{xx} + \lambda'_{yy})^2$$

berechnet wird.

Mit der Verschiebung des Fensters über sämtliche Pixel wird das Originalbild in ein Kohärenzbild transformiert und die Häufigkeitsverteilung aller lokalen Kohärenzwerte ermittelt. Die lokale Kohärenz liegt im Intervall $[0,1]$, sie wird für das Kohärenzbild in das Graustufenintervall $[0,255]$ umgesetzt. Aus der Häufigkeitsverteilung dient eine Teilmenge von ca. 10 äquidistanten Daten als Eingangsvektor für einen Klassifikator (PCA, neuronales Netz u.a.) (JOHNSON & WICHERN, 1992). Die Wellenlänge λ des eingestrahlten Lichts hat Einfluss auf den lokalen Kohärenzwert und bietet durch die Abhängigkeit der Häufigkeitsverteilung von der Wellenlänge einen Zugang für die Differenzierung durch Spektralbilder. Spektroskopische Informationen sind Voraussetzung für eine Differenzierung von Lachsproben nach Aufzuchtart. Durch Bestrahlung der Proben mit monochromatischem Licht eines engen Wellenlängenbereichs von LEDs (light emitting diodes) lassen sich spektroskopische Informationen gewinnen. Die LEDs werden im Bildverarbeitungsprozess sequentiell angesteuert und der Wellenlängenbereich vom Ultraviolett bis zum nahen Infrarot in unterschiedlichen Schrittweiten abgedeckt. Zu jeder Wellenlänge wird ein monochromatisches Bild erzeugt, sämtliche mit einer Probe korrespondierenden Bilder zu einem Multispektralbild kombiniert und jede Schicht dieses Bildes mit dem Strukturoperator transformiert. Weitere Informationen lassen sich aus den Spektralbildern durch Transformation der einzelnen Schichten im Skalenraum ξ gewinnen und damit Muster mit unterschiedlicher Ortsfrequenz erfassen. Lokale Kohärenzdaten sind damit Punkte im 4-dimensionalen Raum $\Omega(x,y,\lambda,\xi)$ (x,y Bildfläche, λ Wellenlänge des eingestrahlten Lichts, ξ Skalenparameter), die nach unterschiedlichen Gesichtspunkten auf einen 2-dimensionalen Raum (Kohärenz-Häufigkeit) projiziert werden und Ausgang für die Differenzierung sind (Bild 4). Die Bilderfassung und das preprocessing liefert Daten, die invariant gegen Rotation und Beleuchtungseinflüsse sind. Aus den Multispektralbildern abgeleitete Merkmale reduzieren die Bildinformationen bis auf einen für die Differenzierung relevanten Kern und erlauben so ein postprocessing in geringen Zeiten (Bereich von Millisekunden).

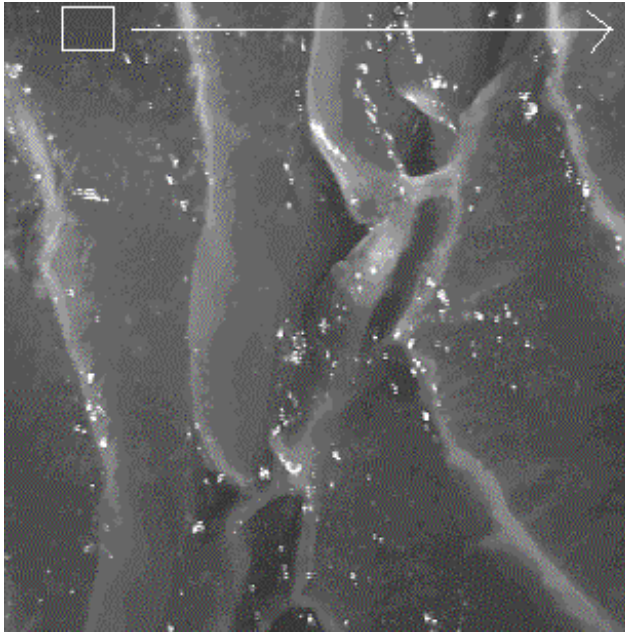


Bild 1: Radiometrisch kalibriertes Oberflächenbild eines Lachsfilets bei 525 nm, Kantenlänge 16 mm

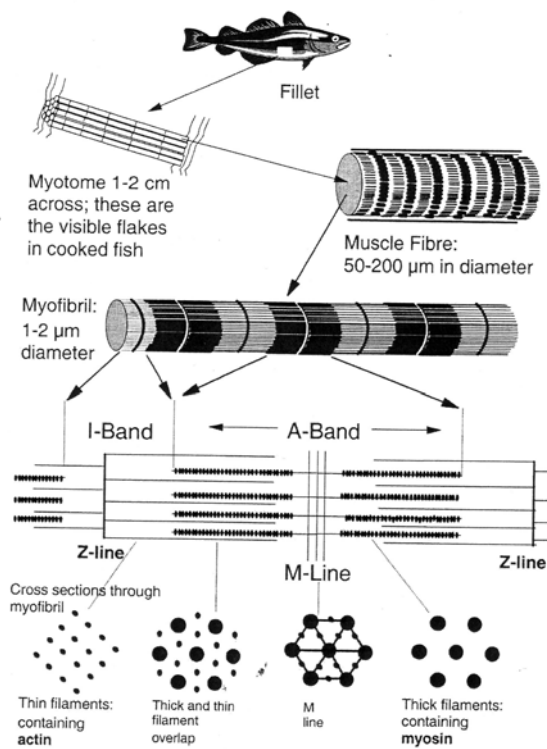


Bild 2: Modell von Fisch-Muskelstrukturen (aus: GOODBRAND, 2002)

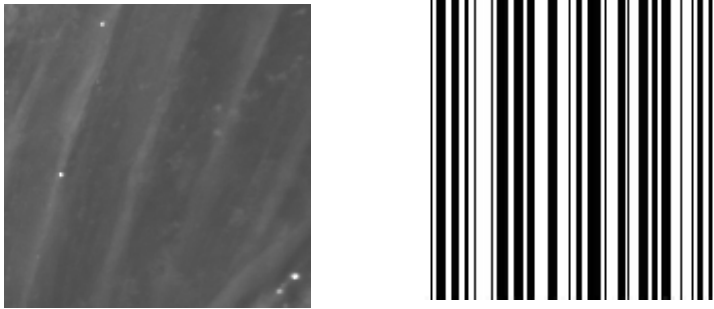


Bild 3: Muskelstrukturen im verschiebbaren Fenster 16 x 16 Pixel mit einer Kantenlänge von ca. 30 µm/Pixel Originalbild (links), Modell (rechts)

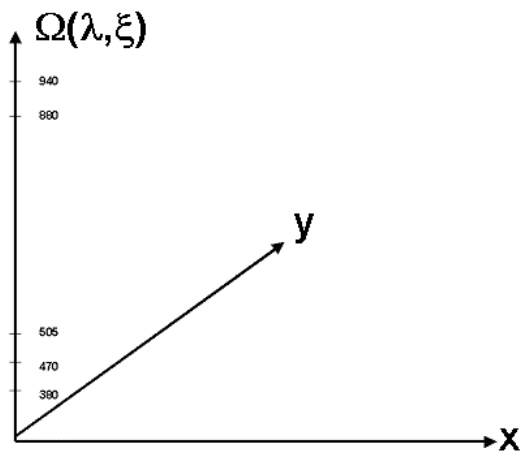


Bild 4: 3D-Bildraum mit den Bildkoordinaten und der Kohärenz als Funktion von Wellenlänge und Skalenparameter

3. Ergebnisse

Die Transformation eines Graustufenbildes (Bild 1) in ein Kohärenzbild ist in den Bildern 5 a-c für konventionell gefarmten Lachs (a), Ökolachs (b) und Wildlachs (c) für die Wellenlänge 525 nm zu sehen. Zwischen allen 3 Bildern sind Unterschiede visuell kaum wahrnehmbar, die Umsetzung in Häufigkeitsdiagramme liefert jedoch Eingabevektoren, die Klassifikatoren für eine Unterscheidung ermöglichen. In den Bildern 6 a-c und 7 a-c wird das gleiche Originalbild in einer Mehrgitterdarstellung in zwei weiteren Auflösungsstufen gezeigt. Aus ihnen lassen sich Eingabevektoren ableiten, die in Kombination mit dem Eingabevektor des mit dem Originalbild korrespondierenden Kohärenzbildes eine Verbesserung der Unterscheidung ergeben. Spektroskopischen Informationen kommt jedoch die größte Bedeutung zu. Deutliche Unterschiede lassen sich in den Bildern 8 a-e erkennen. Diese sind Binärbilder von Kohärenzbildern einer Probe (Wildlachs) für die Wellenlängen

380 nm, 470 nm, 525 nm, 660 nm, 940 nm mit einem Schwellenwert für maximale Kohärenz bei $\lambda = 525$ nm.

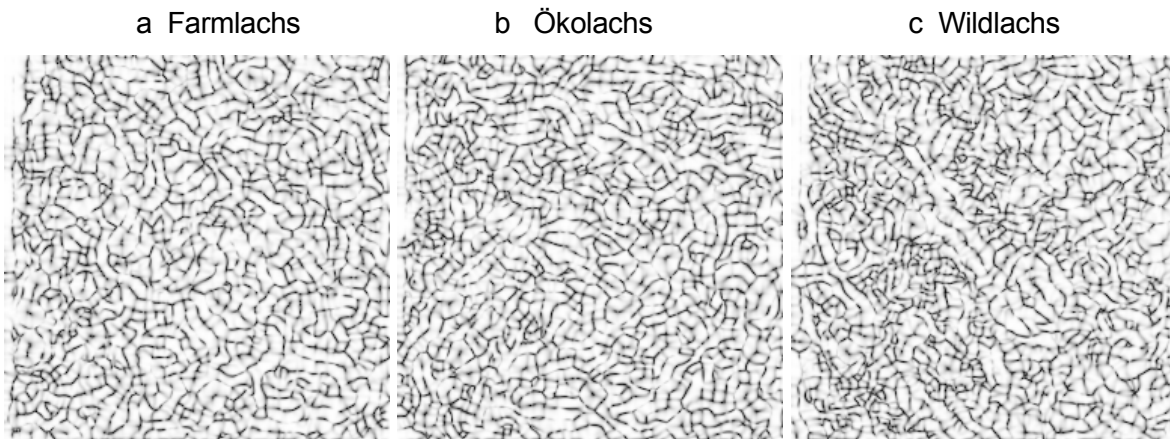


Bild 5: a, b, c Kohärenzbilder für das Originalbild mit $\lambda = 525$ nm

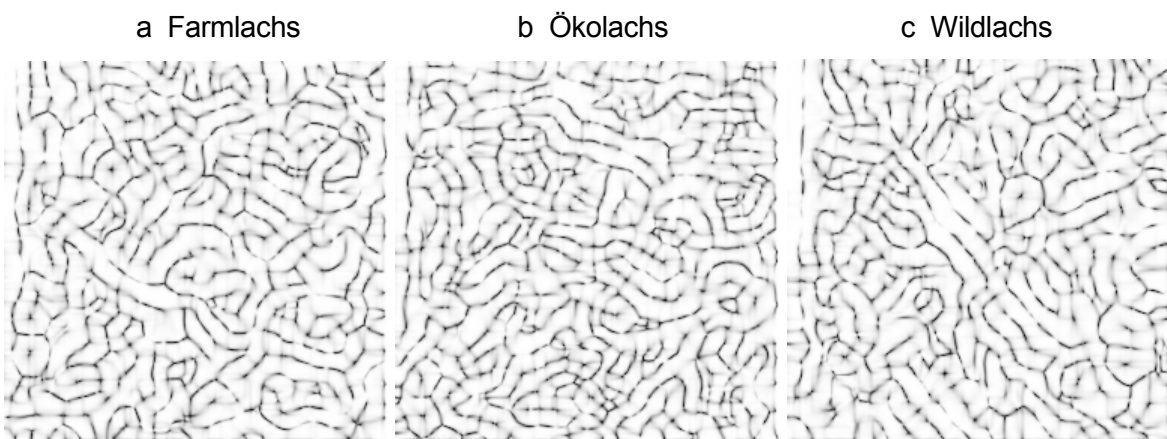


Bild 6: a, b, c Kohärenzbilder für die Auflösungsstufe Laplace 1 mit $\lambda = 525$ nm

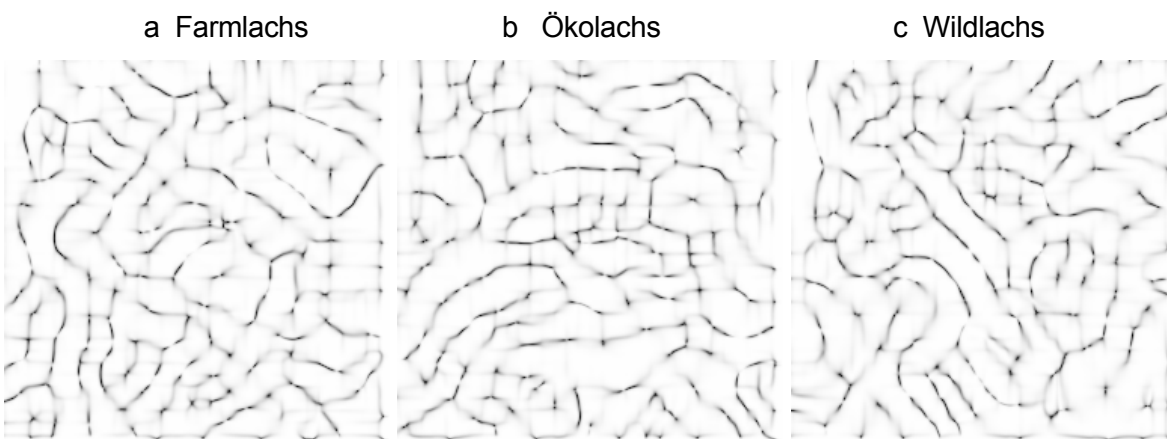


Bild 7: a, b, c Kohärenzbilder für die Auflösungsstufe Laplace 2 mit $\lambda = 525$ nm

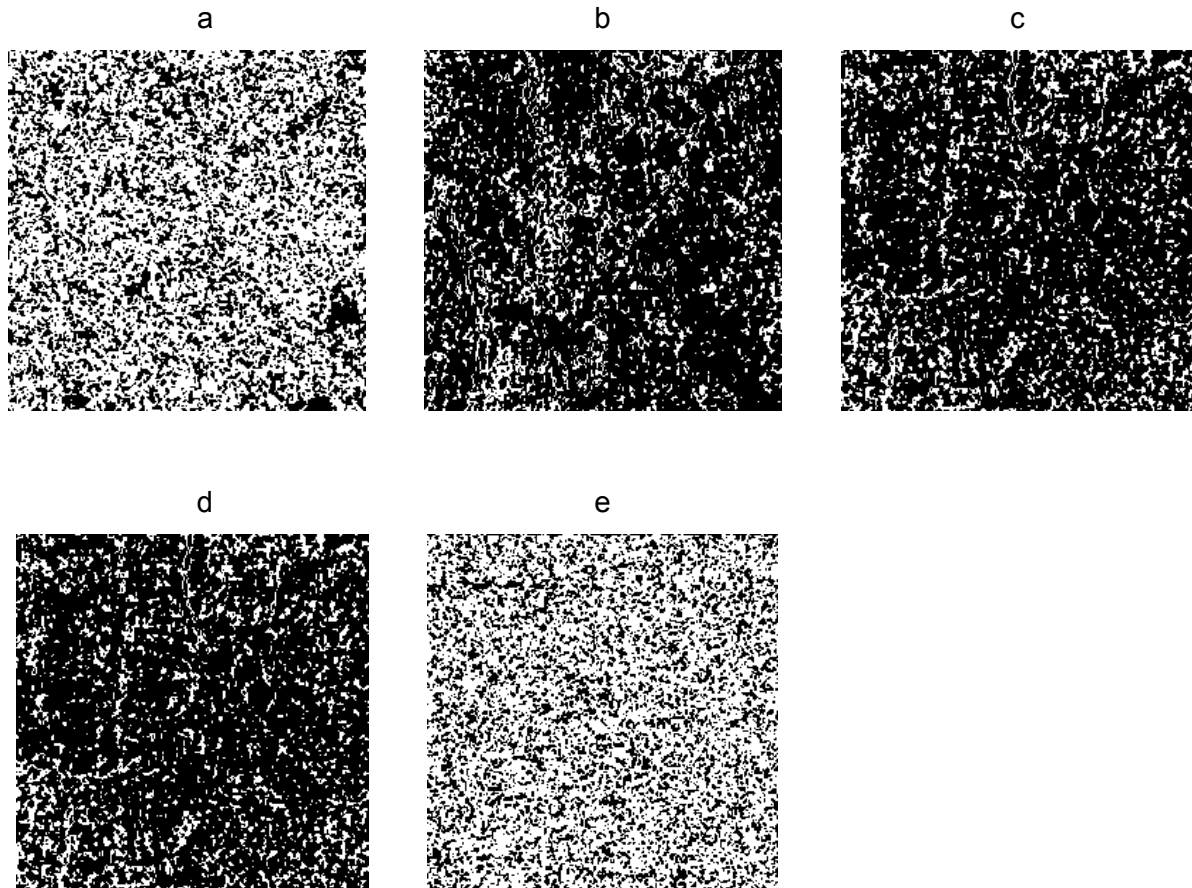


Bild 8: Kohärenz-Binärbilder von Wildlachs für $\lambda = 380$ nm (a), 470 nm (b), 525 nm (c), 660 nm (d), 940 nm (e)

Kohärenzverteilungsmuster für Farmlachs, Ökolachs und Wildlachs für eine Wellenlänge $\lambda = 660$ nm zeigen die Bilder 9, 10 und 11 für jeweils 10 Proben (FL, OL, WL). Unterschiede lassen sich insbesondere zwischen Wildlachs (WL) und den gefarmten Lachsen (FL, OL) erkennen, Differenzierungsmöglichkeiten zwischen konventionell gefarmtem Lachs (FL) und Ökolachs bestehen wegen der großen Standardabweichungen beim Ökolachs nicht.

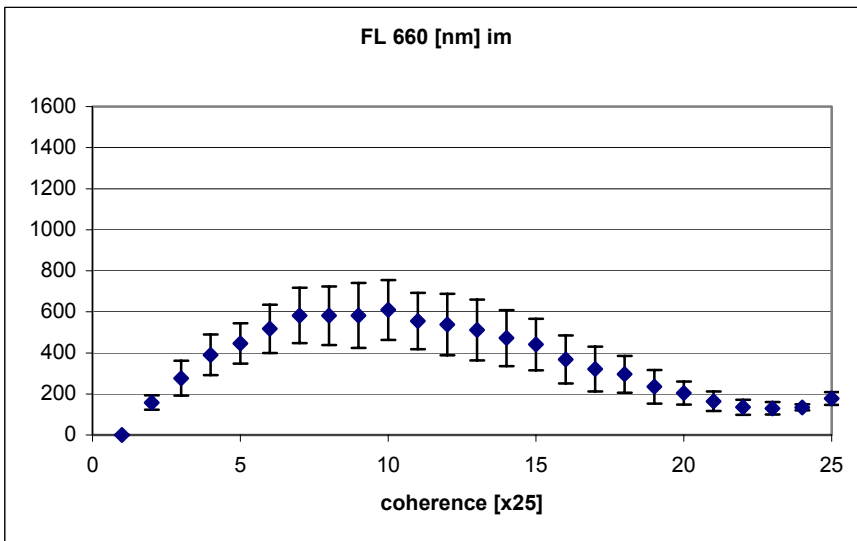


Bild 9: Kohärenzverteilung für Farmlachs vom Originalbild (im)

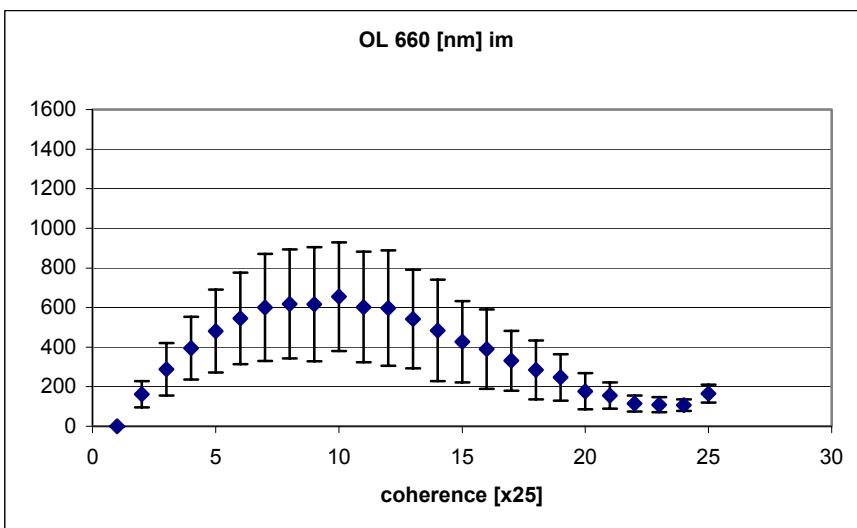


Bild 10: Kohärenzverteilung für Ökolachs vom Originalbild (im)

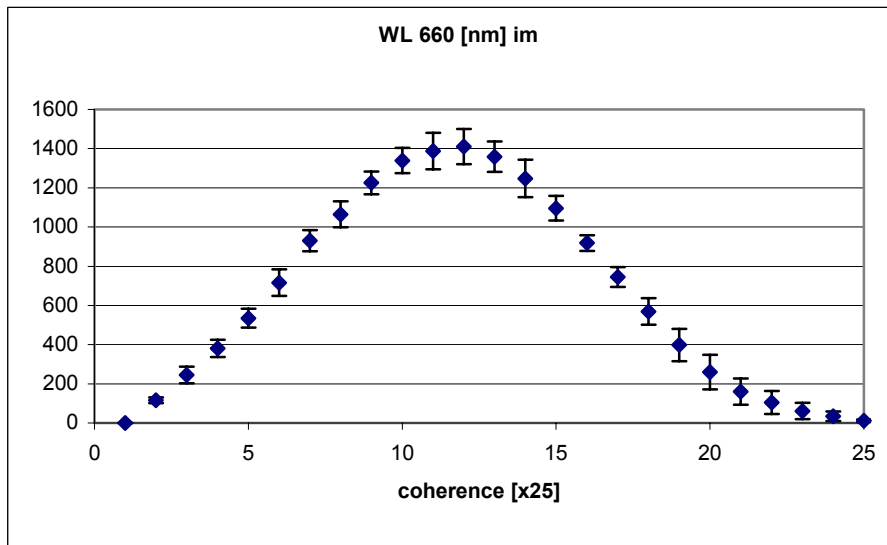


Bild 11: Kohärenzverteilung für Wildlachs vom Originalbild (im)

Die starke Abhängigkeit der Kohärenzverteilungsmuster von der Wellenlänge des eingestrahlten Lichtes zeigen die Bilder 12 und 13. Hier sind die Mittelwerte der Kohärenzhäufigkeiten für Farmlachs, Ökolachs und Wildlachs für 660 nm und 595 nm für je 10 Probestiere gezeigt. In beiden Diagrammen ist eine Unterscheidung zwischen Farmlachs (FL und OL) und Wildlachs (WL) möglich, nicht jedoch zwischen klassisch gefarmten Lachs (FL) und Ökolachs (OL). Die Verwendung einer anderen Darstellung in einer Mehrgitterpyramide zeigt für 400 nm (Bild 14) einen Unterschied zwischen klassisch gefarmtem Lachs (FL) und Ökolachs (OL) und Wildlachs (WL). Eine Unterscheidung zwischen Ökolachs und Wildlachs ist jedoch nicht möglich.

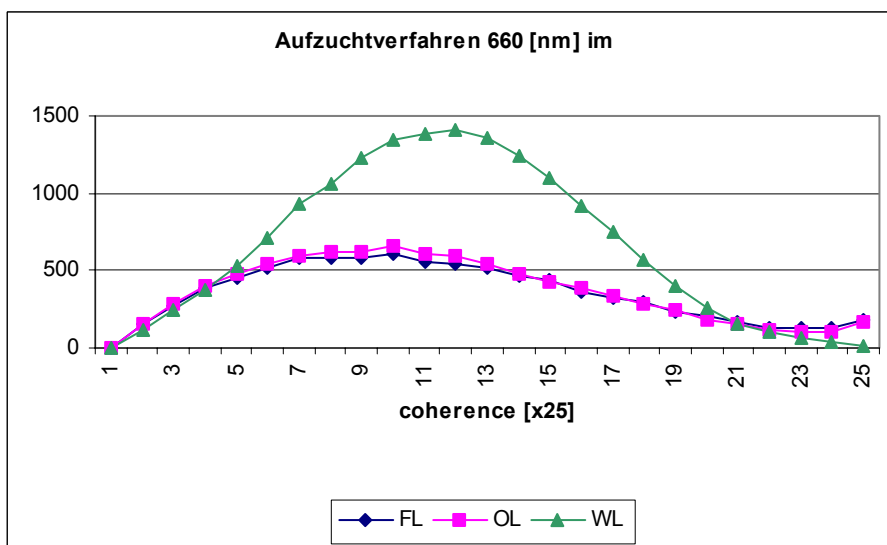


Bild 12: Kohärenzverteilung Farmlachs (FL), Ökolachs (OL), Wildlachs (WL) Originalbild (im), λ = 660 nm

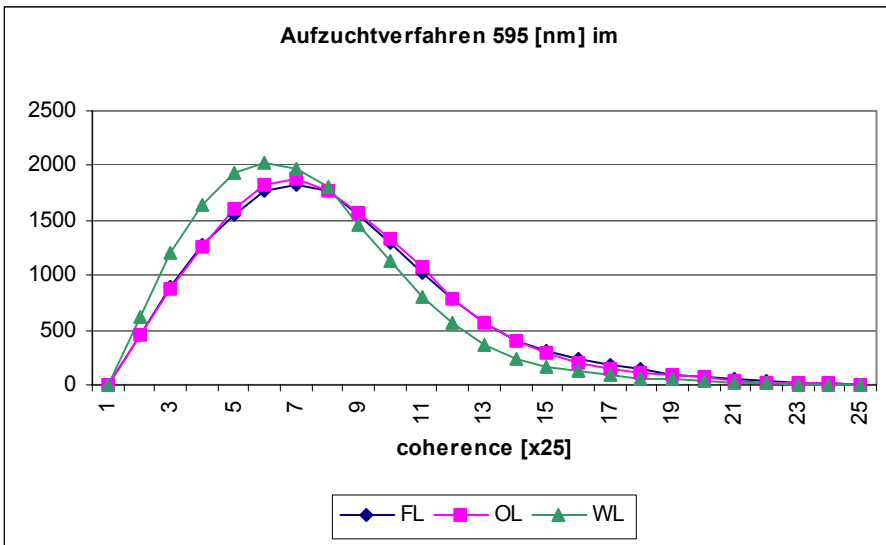


Bild 13: Kohärenzverteilung Farmlachs (FL), Ökolachs (OL), Wildlachs (WL)
Originalbild (im), $\lambda = 595 \text{ nm}$

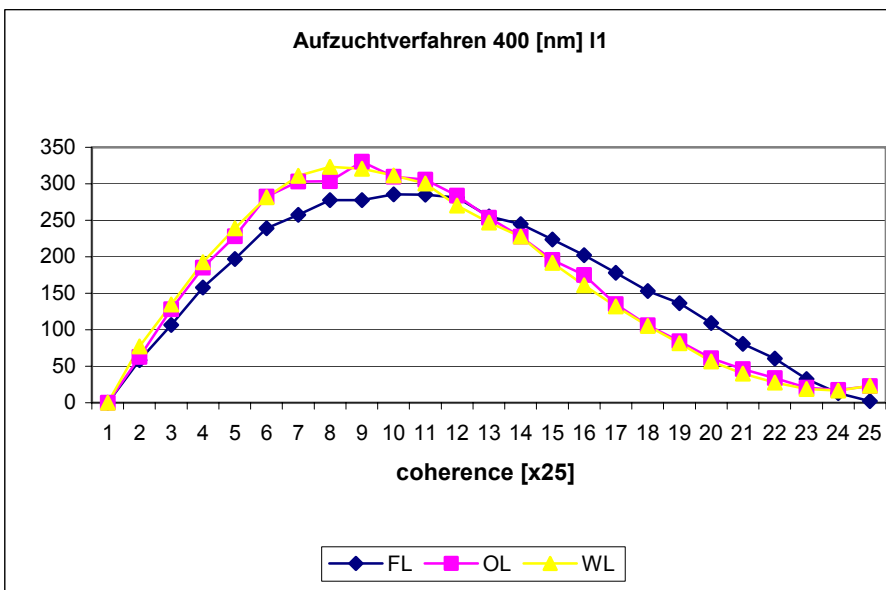


Bild 14: Kohärenzverteilung Farmlachs (FL), Ökolachs (OL), Wildlachs (WL)
 $\lambda = 400 \text{ nm}$, Laplace-Pyramide I1

Auswertungen an über 200 Proben haben gezeigt, dass sich eine Trennung der Aufzuchtarten von Lachsen durch Analyse von Bildern nicht durchführen lässt, wenn diese mit nur einer Wellenlänge oder einer Skala korrespondieren. Für eine Trennung bedarf es einer geeigneten Kombination von Bildern, die eine Korrespondenz mit unterschiedlichen Wellenlängen und Skalen haben. In der Tabelle 1 sind die Ergebnisse der Differenzierung von Farmlachs (FL), Ökolachs (OL) und Wildlachs (WL) bei einem Proben-

umfang von je 30 Proben (aus unterschiedlichen Lieferungen) für unterschiedliche Kombinationen von Wellenlängen bei konstanter Skalierung aufgeführt. Als Klassifikator wurde die Partial Least Square Methode verwendet (WOLD *et al.*, 1983), sie zeigt geringfügig bessere Ergebnisse als die Hauptkomponentenanalyse oder ein neuronales Netz. Für die Wellenlängenkombination 400 nm, 470 nm, 525 nm und 595 nm konnte ein konstantes Ergebnis von über 84 Prozent korrekter Zuordnung der Bilder zu den Proben erreicht werden. Durch Ankopplung einer weiteren Skala (I1) bei gleicher Wellenlängenkombination konnte die korrekte Zuordnung auf über 89 Prozent gesteigert werden, der zeitliche Aufwand für die Auswertung hat sich aber nahezu vervierfacht.

Tabelle 1: Einfluss der Wellenlängenkombination auf die korrekte Zuordnung der Bilder bzw. Proben zu den Aufzuchtverfahren

Wellenlänge	SEC	SEP	R2	RMSEC	RMSEV
400	0,82551	0,85954	0,02647	0,73836	0,81543
400+470	0,67670	0,67937	0,77104	0,42798	0,64451
400+470+525	0,90678	1,24750	0,28052	0,75867	1,18350
400+470+525+595	0,32434	0,48733	0,88926	0,29010	0,46232
400+470+525+595+660	0,30881	0,43430	0,87494	0,27620	0,41201
400+470+525+595+660+940	0,46500	0,34695	0,78378	0,41591	0,32914
470+525+595+660+940	0,34545	0,46797	0,85083	0,30898	0,44396
525+595+660+940	0,50842	0,29433	0,49563	0,45474	0,27922
595+660+940	0,30458	0,61208	0,90838	0,27242	0,58067
660+940	0,51529	0,57314	0,69022	0,43113	0,54373
940	0,69017	0,86407	0,44773	0,61730	0,81973
400+525+595	0,31454	0,49598	0,83108	0,26317	0,47053
400+470+525+595	0,38924	0,40190	0,84629	0,32567	0,38100

SEC standard error of calculation
 SEP standard error of prediction
 R2 coefficient of determination
 RMSEC root mean squared error calibration
 RMSEV root mean squared error validation

4. Ausblick

Eine Analyse der Oberflächenmuster von Fischfilets ermöglicht die Unterscheidung von Wildlachs und gefarmten Lachs und auch von konventionell und ökologisch gefarmten Lachs. Voraussetzung sind spektroskopische Informationen in den Bildern. Die korrekte Zuordnung von über 80 Prozent aller Probenbilder kann durch Kopplung weiterer Skalen etwas erhöht werden, der zeitliche Aufwand für die Auswertung ist jedoch zu hoch, um das System für eine Online-Differenzierung einsetzen zu können. Da jedoch das Fenster an jeder Position mit nur einer einzigen Maßzahl klassifiziert wird, liegt in der Berechnung weiterer lokaler Eigenschaften ein Weg, die Genauigkeit des Verfahrens auch unter zeitkritischen Bedingungen zu steigern.

5. Literatur

- BIGÜN J, GRANLUND GH (1987)** Optimal orientation detection of linear symmetry. Proceedings ICCV'87, London, pp. 433-438
- COURANT R, HILBERT D (1968)** Methoden der mathematischen Physik I. Springer, Berlin, pp. 234-337
- GOODBRAND R (2002)** Functional Properties of Fish Proteins. In: C. Alasalvar and T. Taylor (Eds.) Seafood – Quality, Technology and Nutraceutical Applications, Springer, Berlin
- JÄHNE B (2002)** Digital Image Processing. Springer, Berlin
- JOHNSON RA, WICHERN DW (1992)** Applied Multivariate Statistical Analysis, Prentice-Hall, New Jersey
- KROEGER M, SCHUBRING R (2001)** Recognition of Fish Species by Surface Pattern Classification of Skinned Fillets, Deutsche Lebensmittel-Rundschau 6, pp.216-221
- KROEGER M (2003)** Image analysis for monitoring the quality of fish. In: Luten, J.B.; Oehenschläger, J.; Olafsdottir, G. (Eds.), Quality of Fish from Catch to Consumer Wageningen Academic Publishers, Wageningen
- WOLD S, MARTENS H, WOLD H (1983)** The Multivariate Calibration Problem in Chemistry Solved by the PLS Method, Proc. Conf. Matrix Pencils, Springer, Heidelberg,

Geometrische Entzerrung von Schrägaufnahmen für die bodengestützte Fernerkundung

Geometric correction of oblique imagery for ground-based remote sensing

Holger Lilienthal und Ewald Schnug

Institut für Pflanzenernährung und Bodenkunde, Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft (FAL)
Bundesallee 50, 38116 Braunschweig

e-mail: holger.lilienthal@fal.de; ewald.schnug@fal.de

Zusammenfassung: Aktuelle Bildinformationen sind für die landwirtschaftliche Bestandesführung von großem Nutzen. Die häufig auftretende Bewölkung in Mitteleuropa verhindert aber oft eine Datenbereitstellung mit optischen Aufnahmesystemen (Luft- und Satellitenbilder). Mit Hilfe des bodengestützten Fernerkundungssystems LASSIE lassen sich aktuelle Bildinformationen über den Bestand in Echtzeit gewinnen. Die Aufnahmeeigenschaften des Systems führen jedoch aufgrund der Stationarität zu extremen Bildgeometrien, die sich mit Techniken der Photogrammetrie entzerren lassen.

Schlüsselworte: Bodengestützte Fernerkundung, LASSIE, dynamische Karten, Photogrammetrie

Abstract: *Topical image information of vegetation is of great interest in agricultural field management. The frequent cloudy weather situations in Central Europe often prevent data acquisition with optical sensor systems (aerial and satellite imagery). By means of the ground based remote sensing system LASSIE present image information can be gathered in almost real time. The stationary of the system leads to extreme picture geometry of the raw data, which can be geo-rectified with techniques of photogrammetry.*

Keywords: *Ground based remote sensing, LASSIE, dynamic maps, photogrammetry*

1. Einleitung

Aktuelle, schlagbezogene Bildinformationen sind für die landwirtschaftliche Praxis von großem Nutzen. Auf der lokalen Ebene des landwirtschaftlichen Betriebes lassen sich Fernerkundungsaufnahmen zum Auffinden von heterogenen Teilflächen im Bestand einsetzen (KÜHBAUCH 2002, PANTEN 2002), um schnell und ökonomisch Strategien zur Boden- und Pflanzenprobennahme aus den Bilddaten ableiten (SCHNUG ET AL. 2000), sowie aus Archivdaten räumlich wiederkehrende Strukturen erkennen zu können (GRENZDÖRFER 1999). Zudem eignen sich die Informationen zur Entwicklung von Managementstrategien und zur anschließenden Erfolgskontrolle von bereits durchgeführten Bewirtschaftungsmaßnahmen, bzw. zur Anpassung und Optimierung der Bestandesführung.

Wichtig ist dabei zu berücksichtigen, dass die Fernerkundung Phänomene, aber keinesfalls Ursachen erfasst. Eine Kausalanalyse muss vom Anwender/Interpreten durchgeführt werden (KÜHBAUCH 2002, PANTEN 2002). Die Fernerkundung ermöglicht beispielsweise die Lokalisierung von Flächen, die ein unterschiedliches Wachstum aufweisen. Sie ist aber bisher nicht in der Lage, Aussagen über die Ursache dieser Wachstumsunterschiede, wie Wasserversorgung, Nährstoffmangel oder Bodenverdichtung, zu treffen. In der landwirtschaftlichen Praxis ist jedoch schon die bloße Lokalisierung von Heterogenitäten bereits ein wichtiger Indikator für weitere Untersuchungen der Flächen.

Der optischen Fernerkundung stehen jedoch eine Reihe von meist technisch bedingten Problemen gegenüber, die im Folgenden kurz skizziert werden:

Bewölkung

Die optische Fernerkundung zeichnet das von der Erdoberfläche reflektierte Sonnenlicht auf. Bei kompletter Bewölkung kann keine Information gewonnen werden. Insbesondere die Witterungsbedingungen in Mitteleuropa beeinträchtigen die Verfügbarkeit von wolkenfreien Bilddaten. Eine Recherche nach Satellitenbildern ab 1984 für die Region Braunschweig ergab, dass nur ca. 10 % der verfügbaren Daten wolkenfrei sind (Bild 1).

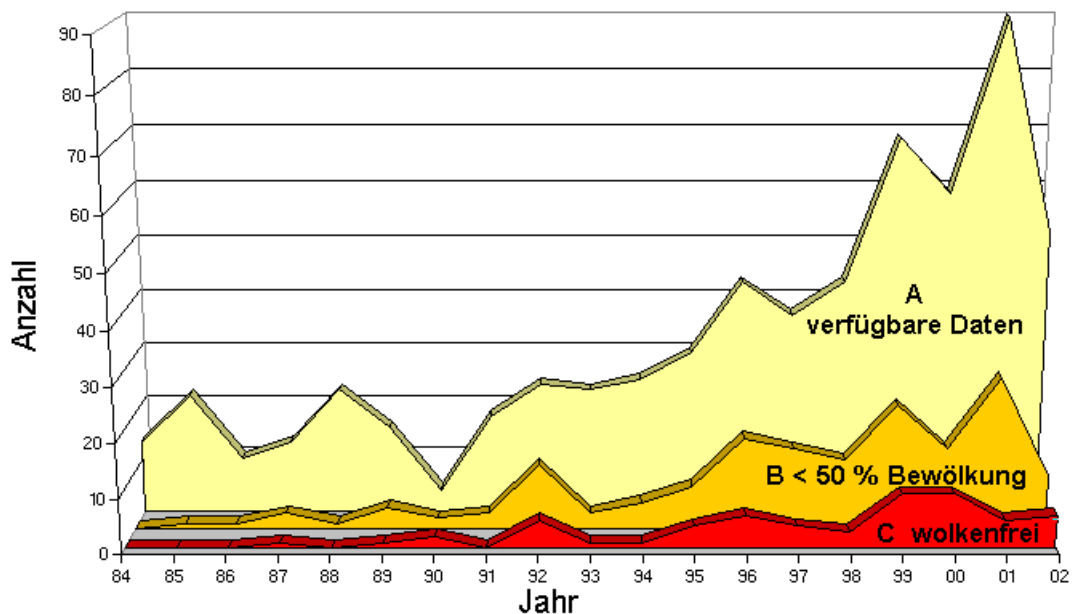


Bild 1: Anzahl der verfügbaren Satellitenbilder für die Region Braunschweig.
 A: Insgesamt verfügbar, B: weniger als 50 % der Fläche bewölkt, C: wolkenfrei.
 (Quellen: EURIMAGE, SPOTIMAGE, DLR, USGS 2003).

Während die Gesamtanzahl der verfügbaren Bilder seit 1991 durch den Start immer neuer Satelliten angestiegen ist, hat sich die Anzahl der wolkenfreien Daten nur in geringem Maße erhöht. Das Problem der Bewölkung wird noch dadurch verstärkt, dass die Satelliten durch ihre Flugbahn eine Region auf der Erde erst nach einer definierten Repetitionsrate wieder überfliegen. Diese Repetitionsrate oder zeitliche Auflösung beträgt je nach Satellit zwischen 16 (*Landsat*) und 26 (*Spot*) Tagen (LÖFFLER 1985).

Besonders erschwerend ist auch die Häufigkeit von Bewölkungen innerhalb eines Jahres. Beobachtungen unbewachsener Böden sind das ganze Jahr über möglich, Bestandesbeobachtungen, welche Grundlage für die Steuerung von Produktionsmaßnahmen sein sollen, jedoch nur während der Hauptwachstumsphasen, die sich bei den meisten Feldfrüchten auf den Zeitraum von Mitte März bis Mitte Juli beschränken (GRENZDÖRFFER 1999). In den hiesigen Klimaten treten aber gerade dann besonders häufig geschlossene Wolkendecken auf.

Das prozentuale Verhältnis zwischen tatsächlicher und potenzieller Sonnenscheindauer gibt die Bewölkungsverhältnisse für die einzelnen Monate wieder (Bild 2). Zu erkennen ist, dass in den Monaten März und April nur ca. ein Drittel der potenziell möglichen Sonnen-

scheindauer erreicht wird, in den sonnenreichsten Monaten Mai bis August nur rund 40 % der potenziell möglichen.

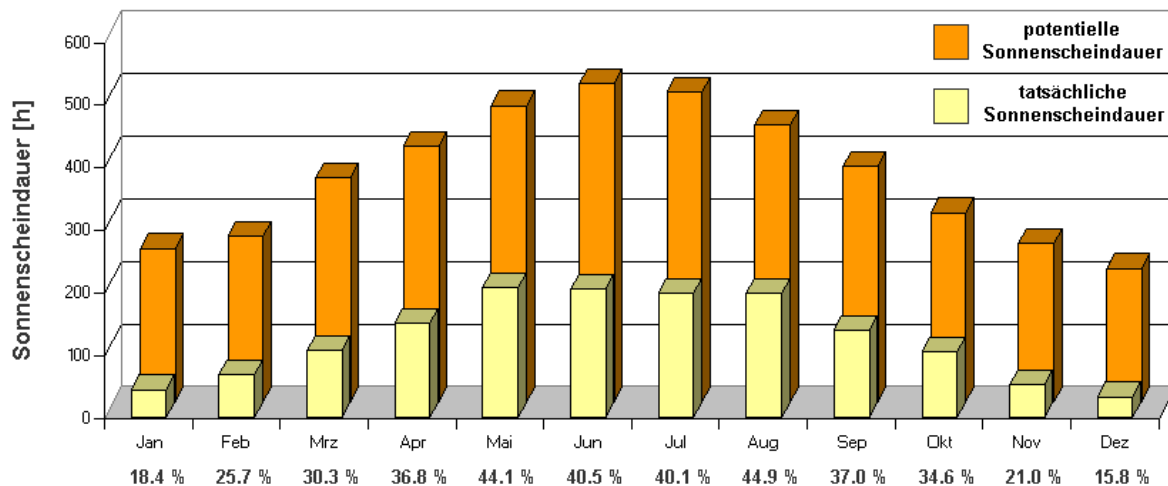


Bild 2: Vergleich der tatsächlichen und potenziellen Sonnenscheindauer in Stunden für die Region Braunschweig. Datengrundlage: Agrarmeteorologische Forschung (AMF) des DWD und eigene Berechnung.

Zeitliche Verfügbarkeit

Wurde eine Region wolkenfrei vom Satelliten aufgezeichnet, so benötigt die Rohdatenverarbeitung, wie das Auslesen der Daten vom Satelliten und die Korrektur systematischer Fehler, mindestens 14 Tage. Bei weiterer Prozessierung, wie die Korrektur des Atmosphäreinflusses und eine Geokodierung, kann es bis zu 6 Wochen dauern bis die Daten beim Anwender vorliegen (GRENZDÖRFFER 1999).

Das Erscheinungsbild landwirtschaftlicher Flächen und die Dauer und Abfolge der für pflanzenbauliche Maßnahmen in Frage kommenden Zeitfenster variieren von Jahr zu Jahr und zwischen den Fruchtarten (KÜHBAUCH 2002). Eine Dokumentation durch Fernerkundung erfordert wiederholte zeitliche Aufnahmen im Abstand von vier bis 14 Tagen, je nach Fruchtart und Fragestellung (ALLAN 1990). Als Grundlage für produktionstechnische Maßnahmen sind daher fast nur Aufnahmen in Echtzeit geeignet.

Ein neuartiges Konzept für die landwirtschaftliche Fernerkundung wurde am Institut für Pflanzenernährung und Bodenkunde der Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft (FAL) entwickelt und könnte die bisherigen Probleme lösen:

2. LASSIE

Ein sogenanntes **LASSIE** (**L**ow **A**ltitude **S**tationary **S**urveillance **I**nstrumental **E**quipment), bestehend aus digitalen Kameras, die an exponierten Positionen in der Landschaft aufgestellt werden. Es operiert unterhalb der Wolkendecke und ist damit in der Lage, in nahezu jeder Witterungssituation Daten zu liefern (PANTEN *et al.* 1998, SCHNUG *et al.* 2000). Die Daten können automatisch entzerrt, geokodiert und als Echtzeitdaten in ein Geographisches Informationssystem (GIS) eingebunden werden.

Die Kameras befinden sich auf einem Schrittmotor, der durch eine Rotation um 360° eine komplette Abdeckung der Landschaft ermöglicht. Werden mehrere dieser LASSIE in der Landschaft verteilt, ist eine Abdeckung größerer Flächen möglich (PANTEN *et al.* 1998).

Die Georeferenzierung der Bilddaten kann durch die stationäre Lage des Sensors vereinfacht und beschleunigt werden. Die Kamera ist auf einem Schwenk-/Neigekopf montiert, der vorprogrammierte Positionen mit einer hohen Genauigkeit anfahren kann. Dadurch ist die Geometrie der Bilder, die zu unterschiedlichen Zeiten, aber von der gleichen Position aufgenommen wurden, identisch. Die zur Korrektur benötigten Parameter müssen nur einmal bestimmt werden und können dann für alle weiteren Bilddaten von der Aufnahme-position wieder verwendet werden. Damit ist eine weitgehende Automatisierung der Entzerrung für ein operationelles System möglich. Eine detaillierte Darstellung der Systemeigenschaften ist bei LILIENTHAL (2003) zu finden.

Die schräge Aufnahmegeometrie des LASSIE führt zur unterschiedlich starken Verzerrungen innerhalb der Einzelbilder. Die Einflussfaktoren und Korrekturmöglichkeiten werden im Folgenden näher dargestellt.

3. Geometrische Eigenschaften

Das Sensorsystem kann um 360° rotiert und um 90° geneigt werden. Durch die Neigung der Kameras variiert der Einfallswinkel (θ). Bei einem konstanten Öffnungswinkel (β) des Sensors, vorgegeben durch die Zoomeinstellung der Optik, wird daher die von einem Pixel erfasste Fläche im Fernbereich größer als im Nahbereich (Bild 3).

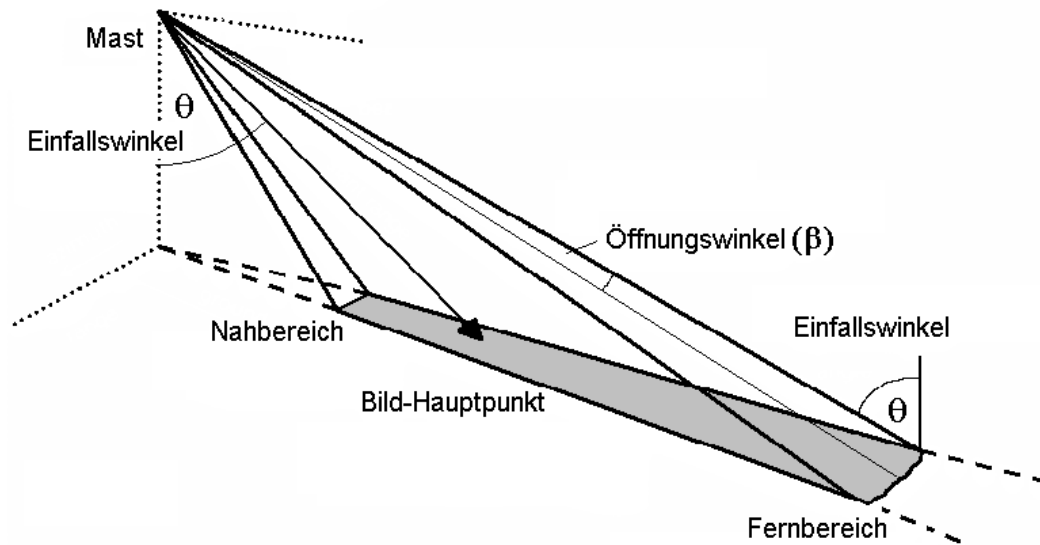


Bild 3: Geometrische Aufnahmesituation des LASSIE.

Die effektive Pixelgröße ist abhängig vom Einfallswinkel. Je größer der Winkel, desto größer ist die aufgezeichnete Fläche, die in einem Pixel zusammengefasst wird (Bild 4).

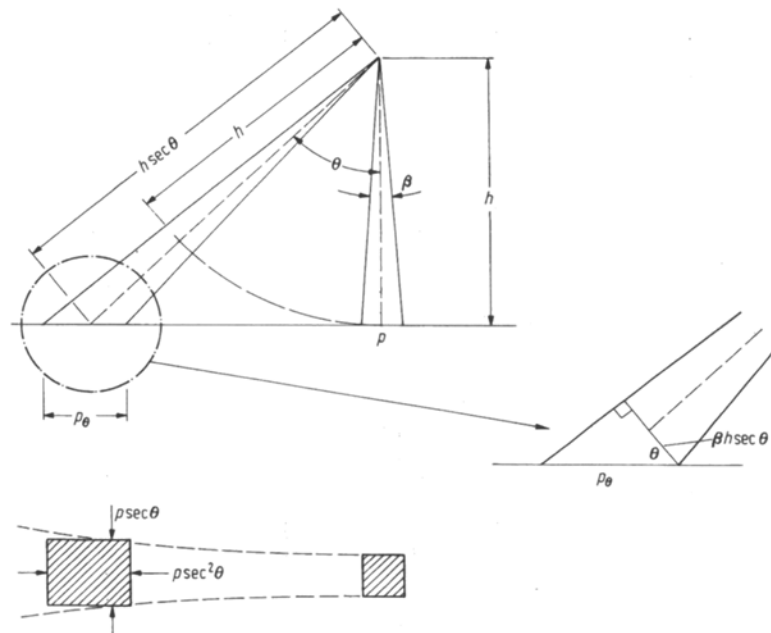


Bild 4: Einfluss des Einfallswinkels θ auf die Pixelgröße (RICHARDS 1994).

Die effektive Pixelgröße lässt sich nach Formel 1.1 wie folgt berechnen:

$$P_{\theta} = \beta \cdot h \cdot \sec^2 \theta \Rightarrow P \cdot \sec^2 \theta \quad [1.1]$$

Die effektive Pixelgröße (P_θ) ergibt sich aus dem quadrierten Sekans des Einfallswinkels (θ) multipliziert mit der tatsächlichen Pixelgröße (P). Mit dem quadrierten Sekans des Einfallswinkels lässt sich der Verzerrungsfaktor berechnen, der sich mit zunehmendem Einfallswinkel ergibt. In Bild 5 ist der Verzerrungsfaktor in Abhängigkeit vom Einfallswinkel abgetragen:

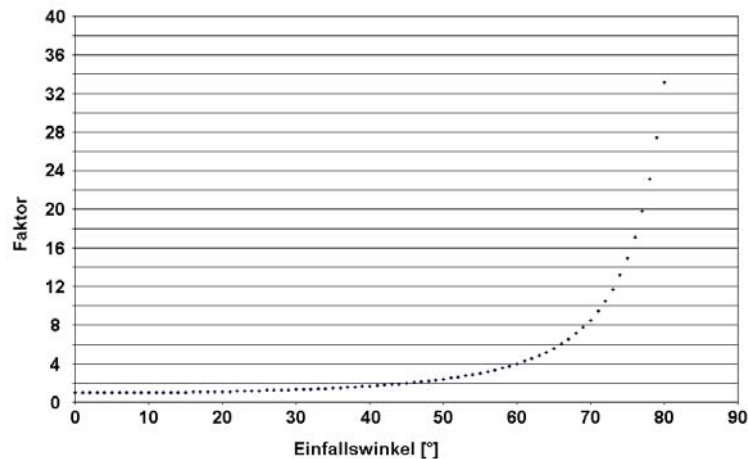


Bild 5: Abhängigkeit des Verzerrungsfaktors vom Einfallswinkel.

Aus Bild 5 wird deutlich, dass der Verzerrungsfaktor bis zu einem Einfallswinkel von 45° relativ gering ist. Ein Pixel, das mit einem Einfallswinkel von 45° aufgenommen wird zeichnet eine doppelt so große Fläche wie eine Nadiraufnahme (Senkrechtaufnahme, bei 0° Einfallswinkel) auf. Ab einem Neigungswinkel von 45° steigt der Verzerrungsfaktor stark an, so dass die geometrische Auflösung immer schlechter wird, da die Information einer größeren Fläche in einem einzigen Mischpixel gemittelt wird. Dieser Effekt wird als „Panorama Verzerrung“ bezeichnet (RICHARDS 1994).

4. Radiale Versetzung

Die vom LASSIE System gewonnenen Bilddaten sind eine zentralperspektivische Abbildung. Das bedeutet, alle Strahlenbündel laufen in einem Punkt (dem Objektiv) zusammen. Charakteristisch für die Zentralperspektive ist, dass Gelände- und Objektpunkte, die über der Bezugsfläche (mittlere Höhe im Bildmittelpunkt) liegen vom Bildmittelpunkt radial nach außen versetzt werden (Bild 6). Analog werden Objekte die tiefer als die Bezugsebene liegen nach innen versetzt (ALBERTZ 1991).

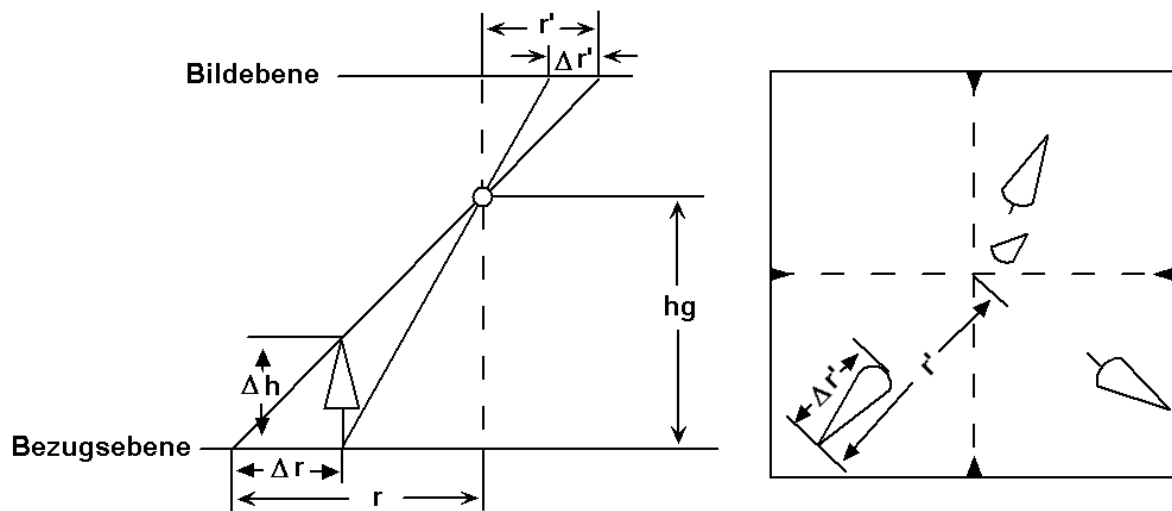


Bild 6: Radialer Versatz durch Höhenunterschiede (ALBERTZ 1991, verändert).

Dieser Effekt kann für reliefbedingte Höhenunterschiede durch die Verwendung eines digitalen Höhenmodells bei der geometrischen Korrektur kompensiert werden. Für Einzelobjekte wie Bäume, Zaunpfähle oder Gebäude ist eine Korrektur nur dann möglich, wenn ein digitales Oberflächenmodell verfügbar ist. Das ist in der Regel nicht der Fall, so dass derartige Objekte vor der geometrischen Korrektur aus den Bilddaten ausmaskiert werden müssen.

5. Geometrische Korrektur

Die LASSIE Sensoren fahren beim Aufnehmen des Geländes immer wieder exakt die gleichen Aufnahmepositionen an. Die jeweiligen Aufnahmestreifen können daher immer mit denselben Korrekturparametern korrigiert werden. Dadurch ergibt sich der Vorteil, dass die Parameter nur einmal für einen Aufnahmetermin und für die jeweiligen Bildstreifen bestimmt werden müssen. Alle weiteren Aufnahmen können dann auf Basis der ermittelten Werte korrigiert werden.

Konventionell werden vertikale aufgenommene Bilddaten mit Techniken der polynomischen Transformation geometrisch korrigiert (ERDAS 2001). Diese Methoden basieren auf mathematischen Anpassungsfunktionen, berücksichtigen aber nicht die spezifische Verzerrung der Bilder, bzw. die Ursachen für die Deformationen bei Schrägaufnahmen. Soll eine Vielzahl von Einzelbildern korrigiert werden, die anschließend geometrisch exakt zu-

einander passen müssen, reichen die einfachen Techniken nicht mehr aus (ERDAS 2001). Insbesondere bei extremen Schrägaufnahmen, wie sie von den LASSIE Systemen geliefert werden, ist eine Rekonstruktion der Bildgeometrie und eine genaue Lagekorrektur, die auch das Relief mit berücksichtigt, notwendig.

6. Nahbereichs-Photogrammetrie

Während die Vermessung aus Luftbildern als klassische Photogrammetrie bezeichnet wird, nennt man die Vermessung von Objekten am Erdboden mit Hilfe von Bildern „terrestische“ oder „Nahbereichs“-Photogrammetrie. Ziel ist es, die geometrische Situation zum Aufnahmezeitpunkt zu rekonstruieren, um anschließend eine Bildverzerrung auf ein Landeskoordinaten-System durchzuführen.

Die Rekonstruktion der geometrischen Situation während der Aufnahme findet in zwei Schritten statt:

1. Bestimmung der inneren Orientierung der Kamera
2. Bestimmung der äußeren Orientierung der Kamera

Innere Orientierung

Die Bestimmung der inneren Orientierung legt das Projektionszentrum der Kamera in Bezug zur Bildebene fest. Sie wird benötigt, um die Pixel, die im Bildkoordinatensystem vorliegen, in ein Landeskoordinatensystem (z.B. Gauß-Krüger) zu überführen.

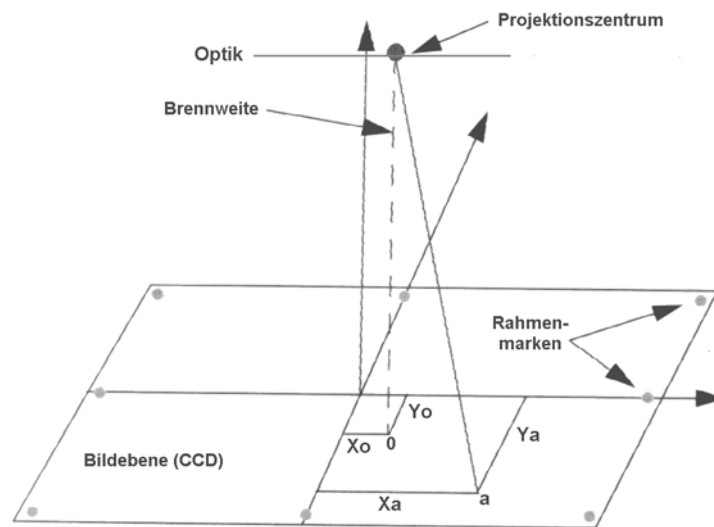


Bild 7: Interne Kamerageometrie (ERDAS 2001).

Die innere Orientierung kann durch die drei Parameter Brennweite, X- und Y-Koordinate des Bildhauptpunktes bestimmt werden (Bild 7).

Klassische Luftbilder werden mit sogenannten Reihenmesskammern aufgenommen. Diese Kameras besitzen feste Brennweiten und genau eingemessene Markierungen, die sogenannten Rahmenmarken. Die Brennweite und Rahmenmarken sind genau bestimmt (kalibriert), so dass die innere Orientierung einfach durch Vermessen der Rahmenmarken ermittelt werden kann.

Die LASSIE Systeme besitzen eine Optik mit variabler Brennweite, zudem sind keine vermessenen Rahmenmarken vorhanden und die Lage der Bildebene (CCD Chips) ist nicht exakt eingemessen. Die innere Orientierung kann also nicht auf dem herkömmlichen Weg bestimmt werden, trotzdem ist es möglich sie abzuschätzen. Dazu wird die Technik des *selbstkalibrierenden Bündelblockausgleiches* verwendet.

Äußere Orientierung

Die äußere Orientierung entspricht der Lage des Sensors im Raum zum Aufnahmeterrain. Zur Bestimmung der äußeren Orientierung werden die Position des Sensors (X-, Y- und Z-Koordinate), die Lage zum Referenzkoordinatensystem (beschrieben durch die Drehwinkel ω , φ , κ), sowie mindestens 3 Kontrollpunkte mit Höhe im Gelände benötigt (Bild 8).

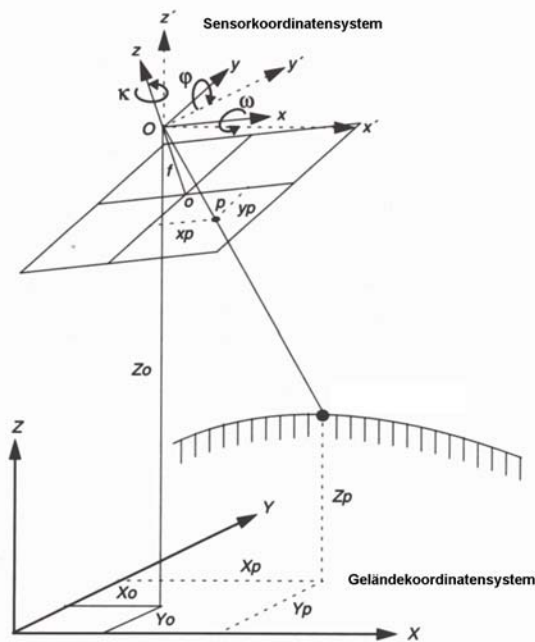


Bild 8: Schematische Darstellung der Parameter der äußeren Orientierung (ERDAS 2001, verändert).

Insgesamt definieren neun Parameter die Zentralprojektion des Bildes. Sofern die innere Orientierung durch Kalibrierung bekannt ist, können die sechs Parameter der äußeren Orientierung durch indirekte Bestimmung über Passpunkte (Bild- und Ortskoordinaten) gewonnen werden (KRAUS 1997).

Bündelblockausgleichung

Hat man mehrere, räumlich überlappende Einzelbilder zur Verfügung, so kann man diese zur Bestimmung der Parameter der äußeren Orientierung durch Bündelblockausgleich verwenden. Dabei wird eine mathematische Beziehung zwischen mehreren Einzelbildern sowie den Sensoreigenschaften und der Lage im Raum ermittelt. Die äußere Orientierung wird für jedes Bild im Block mit den anderen Bildern berechnet. Dabei werden die Lösungen für den Block über die Methode der kleinsten Quadrate angenähert.

Die Bildkoordinaten und das Projektionszentrum (die Parameter der inneren Orientierung) definieren ein räumliches Strahlenbündel, das mit bekannten (vermessen) Kontrollpunkten im Gelände verbunden ist (Bild 9). Die Kontrollpunkte, deren Koordinaten durch Vermessung bekannt sind (markiert durch die Dreiecke) finden sich in mehreren Einzelbildern

wieder. Ebenso lassen sich Bildpunkte finden, die in zwei oder mehreren Bildern vorhanden sind. Diese werden als Verknüpfungspunkte oder Tie-Points bezeichnet.

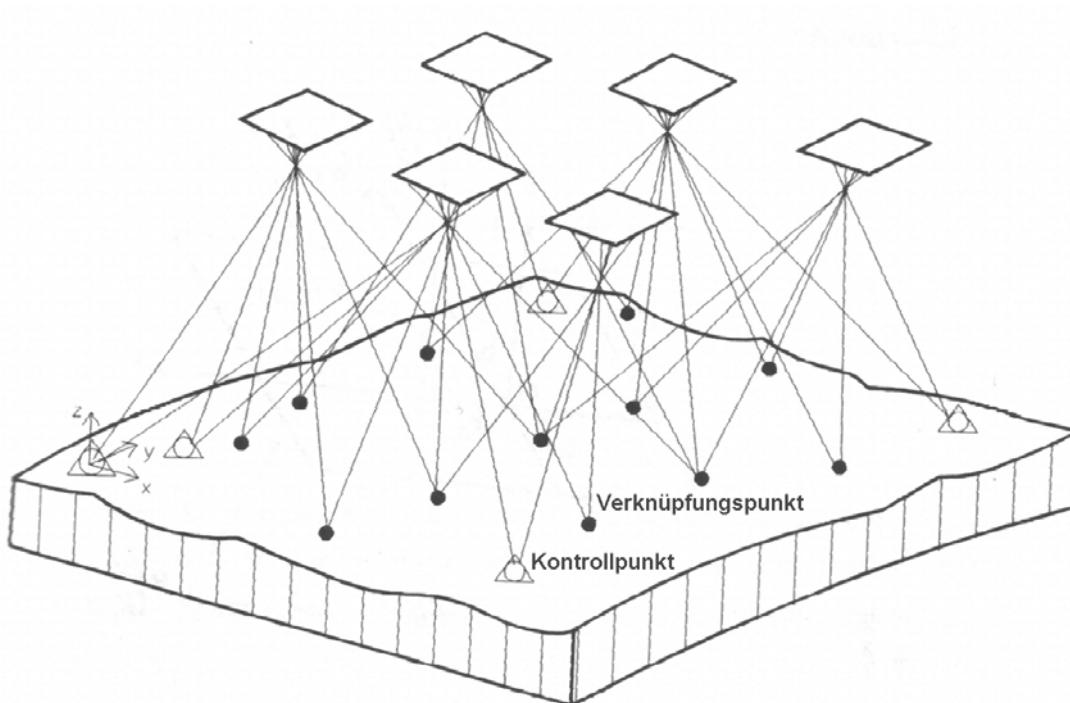


Bild 9: Schematische Darstellung des Bündelblockausgleiches (KRAUS 1997, verändert).

Das Strahlenbündel wird nun so lange verschoben und gedreht, bis die entsprechenden Strahlen an den Verknüpfungspunkten gut zum Schnitt kommen und mit den Kontrollpunkten möglichst gut zusammentreffen (KRAUS 1997).

Im Überlappungsbereich zweier Bilder gibt es für jeden Kontrollpunkt zwei Bildkoordinaten (x,y) . Da zum Aufnahmezeitpunkt der Kontrollpunkt mit dem entsprechenden Bildpunkt auf einer Geraden lag (Kollinearität), lassen sich zwei Gleichungen aufstellen, die den Zusammenhang zwischen Bild- und Kontrollpunkt beschreiben. Diese Gleichungen werden als Kollinearitätsgleichungen oder Beobachtungsgleichungen bezeichnet. Ist ein Kontrollpunkt in beiden Bildern zu identifizieren, können vier Kollinearitätsgleichungen aufgestellt werden.

Bei drei Kontrollpunkten im Überlappungsbereich von zwei Bildern ergeben sich zwölf Gleichungen (vier pro Kontrollpunkt). Werden jetzt noch sechs Verknüpfungspunkte im

Überlappungsbereich der beiden Bilder gesucht, können weitere 24 Gleichungen aufgestellt werden (vier pro Verknüpfungspunkt).

Die Anzahl der Unbekannten ergibt sich aus den sechs Parametern der äußeren Orientierung für das erste Bild, weitere sechs Parameter für das zweite Bild, sowie jeweils drei pro Verknüpfungspunkt (X,Y,Z), also insgesamt 30 Unbekannte. Diesen 30 Unbekannten stehen 36 Gleichungssysteme gegenüber, so dass die Gleichungssysteme gelöst werden können, und damit die äußere Orientierung hergestellt werden kann.

Selbstkalibrierender Bündelblockausgleich

Die innere Orientierung lässt sich leicht für kalibrierte Kameras herstellen. Im Fall der LASSIE Systeme sind diese Parameter aber nicht hinreichend bekannt. Bei der sogenannten Selbstkalibrierung verschmilzt die Kalibrierung mit der photogrammetrischen Punktbestimmung bzw. mit der photogrammetrischen Orientierung (KRAUS 1996). Die Elemente der inneren Orientierung werden einfach als weitere Unbekannte in den Bündelblockausgleich mit einbezogen. Die höhere Anzahl der Unbekannten erfordert dann zusätzliche Kontroll- und Verknüpfungspunkte.

Durch die Identifizierung weiterer Kontrollpunkte können zusätzliche Parameter (additional Parameter, AP) aus dem Bündelblock abgeleitet werden. Durch eine Wichtung der Punkte kann entschieden werden, ob die innere Orientierung völlig unbekannt ist, oder aber ausgehend von einem Initialwert verbessert werden soll (KRAUS 1996). Zusätzlich können bei nicht kalibrierten Aufnahmesystemen noch ein Versatz des Bildhauptpunktes und Objektiv-Verzeichnungen auftreten. Auch diese Effekte können im Bündelblockausgleich durch weitere Passpunkte und Korrekturpolynome ausgeglichen werden. Diese AP haben sich als äußerst wirkungsvolle Zusatzinformation zur Kompensation systematischer Fehler erwiesen und werden mittlerweile auch zur Auswertung von Messbildern eingesetzt (KRAUS 1997).

WOLF und DEWITT (2000) betonen, dass die Vielzahl von weiteren Parametern, die durch den Bündelblockausgleich bestimmt werden sollen, zu numerischer Instabilität führen können, wenn Vertikalaufnahmen mit geringen Höhenunterschieden vorliegen. Sie schlagen vor, weitere Bilder mit unterschiedlichen Neigungswinkeln aufzunehmen, die zu besseren Ergebnissen beim Ausgleich führen. Hier erweist sich das LASSIE System als kon-

zeptionell besonders geeignet, da das Aufnahmeprinzip auf variablem Neigungswinkel beruht.

In der Praxis wird der Bündelblockausgleich durch die Bestimmung von Kontroll- und Verknüpfungspunkten erreicht. Die Parameter der inneren Orientierung werden grob als Initialwerte vorgegeben und durch die Selbstkalibrierung optimiert. Die Qualität der geometrischen Korrektur hängt also im wesentlichen von der Güte der im Gelände ermittelten Kontrollpunkte ab. Eine genaue Vermessung der Lage und der Höhe sind für die Bildentzerrung also unbedingt notwendig.

7. Geometrische Entzerrung

Das Ziel einer geometrischen Entzerrung ist die Korrektur der Lagefehler, die durch die Aufnahmegeometrie hervorgerufen werden. Gleichzeitig werden die Bilddaten auf eine Kartenprojektion entzerrt. Damit wird es möglich, Strecken und Flächen in den korrigierten Bilddaten zu messen.

Die Entzerrung der Schrägaufnahmen erfolgt mit photogrammetrischen Techniken unter Verwendung von Kontrollpunkten, die im Gelände mit GPS vermessen wurden. Dabei entsteht beim korrigierten Bild der Eindruck, man würde senkrecht von oben auf das Gelände schauen. Dieser Eindruck ist genau genommen nur für geringe Einfallswinkel korrekt. Im Fernbereich wird sehr schräg auf die Oberfläche geschaut, und das entzerrte Bild gibt nur den Eindruck einer Draufsicht wieder. Aus diesem Grund wird der Begriff *Pseudo-Nadir* Aufnahme eingeführt, um Verwechslungen mit echten Nadiraufnahmen, wie beispielsweise Luftbildern, auszuschließen. Das Ergebnis einer Entzerrung ist in Bild 10, die eine Originalaufnahme (oben) und das korrigierte Ergebnisbild (unten) zeigt, dargestellt.



Bild 10: Oben: Original Schrägaufnahme. Unten: Entzerrtes Pseudo-Nadirbild. Aufnahme vom 25. Mai 2003.

Eine komplette Erfassung der umgebenden Landschaft mit einem LASSIE kann nur durch die Montage der Einzelbilder zu einem Gesamtbild erreicht werden. Die Entzerrung kann separat für jedes Einzelbild durchgeführt werden, oder gleichzeitig für alle Bilder als Block. Die Entzerrung im Block liefert eine deutlich bessere Geometrie, da die Überlappungsbereiche benachbarter Bilder zum selbstkalibrierenden Bündelblockausgleich verwendet werden können.

Der Unterschied in der geometrischen Genauigkeit zwischen Einzelbildentzerrung und Blockausgleich ist in Bild 11 dargestellt.

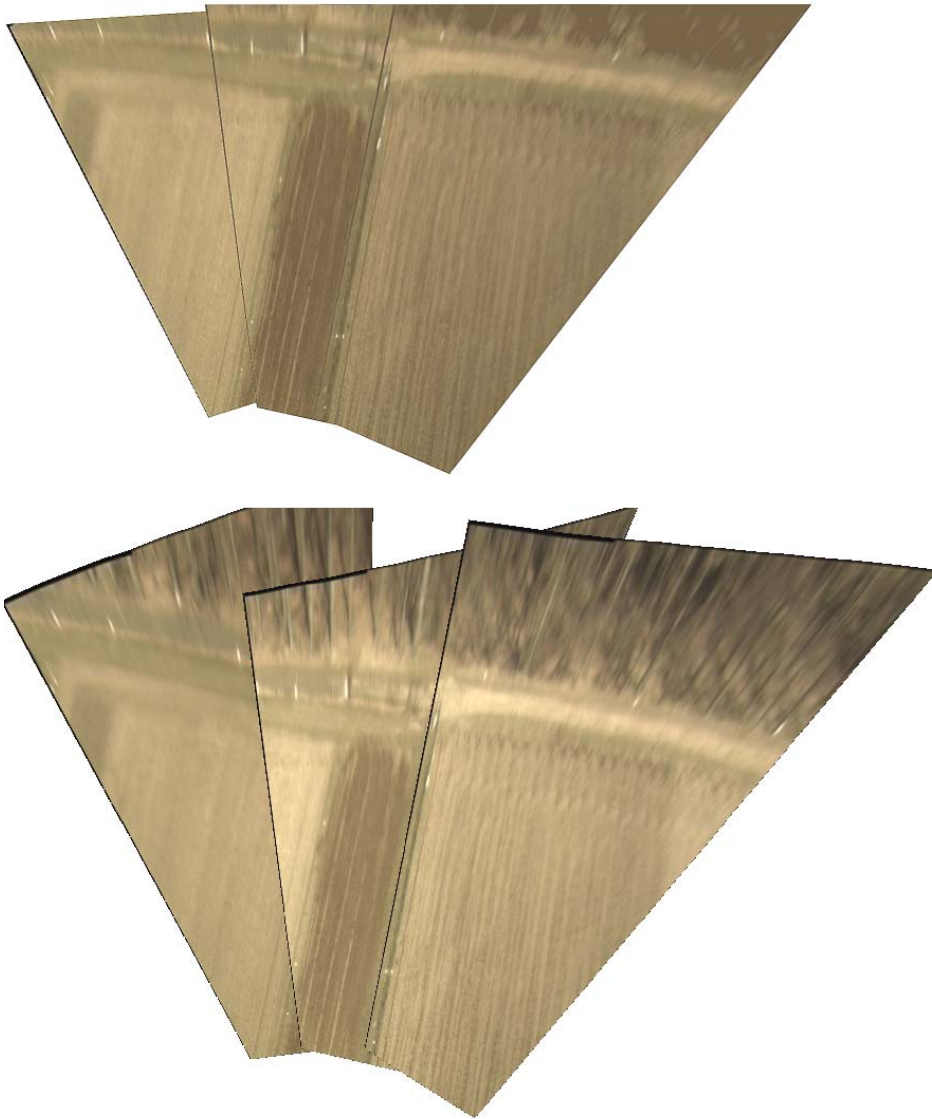


Bild 11: Unterschiedliche geometrische Genauigkeit bei der Mosaikherstellung. Oben: Entzerrung mit Bündelblockausgleich, unten: Einzelbildentzerrung. Aufnahme vom 24.03.2003

Ausgehend vom Bündelblockausgleich können für jedes Einzelbild die Korrekturparameter berechnet werden. Diese Parameter sind die Kalibrierwerte, mit denen alle folgenden Bilder der entsprechenden Kameraposition entzerrt werden können.

8. Schlussfolgerung

Bodengestützte Fernerkundungssysteme bieten die Möglichkeit, die Datenverfügbarkeit von aktuellen Bilddaten, insbesondere bei Bewölkung, deutlich zu erhöhen. Die systembedingte Aufnahmegeometrie führt zu extrem verzerrten Abbildungen, die sich aber mit den Techniken der Photogrammetrie korrigieren lassen. Damit steht ein Werkzeug zur Verfügung, das kontinuierlich geo-referenzierte Bilddaten über die Bestände liefern kann, und somit wertvolle Informationen als Entscheidungshilfe für die landwirtschaftliche Praxis bietet.

9. Literatur

ALBERTZ J (1991) Grundlagen der Interpretation von Luft- und Satellitenbildern. 204 p, ISBN 3-534-07838-1

ALLAN JD (1990) Sensors, platforms and applications; Acquiring and managing remotely sensed data. In: Steven M D, Clark J (eds) Applications of remote sensing in agriculture. Kent: Butterworths, pp 1-18, ISBN 0-408-04767-4

ERDAS (2001) Imagine Orthobase user's guide. Atlanta, USA, 524 p

GRENDÖRFFER G (1999) Dokumentation und Analyse kleinräumiger Heterogenität mit Fernerkundung und GIS. In: Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (KTBL) (ed) Erfassung kleinräumiger Heterogenität. Münster-Hiltrup, pp 93-105, ISBN 3-7843-1993-9

KRAUS K (1996) Photogrammetrie. Band 2 Verfeinerte Methoden und Anwendungen. Bonn: Dümmler, 488 p, ISBN 3-427-78653-6

KRAUS K (1997) Photogrammetrie. Band 1 Grundlagen und Standardverfahren. Bonn: Dümmler, 394 p, ISBN 3-427-78646-3

KÜHBAUCH W (2002) Fernerkundung – Eine Zukunftstechnologie im Präzisionspflanzenbau. In: Werner A, Jarfe A (ed) Precision Agriculture - Herausforderung an integrative Forschung, Entwicklung und Anwendung in der Praxis. pp 79-87, ISBN 3-9808279-0-9

LILIENTHAL H (2003) Entwicklung eines bodengestützten Fernerkundungssystems für die Landwirtschaft. Landbauforschung Völkenrode SH 254.

LÖFFLER E (1985) Geographie und Fernerkundung. Teubner Studienbücher. 244 p, ISBN 3-519-03423-9

PANTEN K (2002) Ein Beitrag zur Fernerkundung der räumlichen Variabilität von Boden- und Bestandesmerkmalen. Landbauforschung Völkenrode Sonderheft 232, 135 p, ISBN 3-93314-57-9

PANTEN K, HANEKLAUS S, SCHRÖDER D, SCHNUG E (1998) Remote Sensing as an Aid for the Spatial Management of Nutrients. Proc. 4th Int. Conf. Prec. Agric., 19-22. July 1998, St. Paul, Minnesota, Part A, pp 1501-1511

RICHARDS JA (1994) Remote sensing digital image analysis: An introduction. Berlin: Springer-Verlag, 340 p, ISBN 3-540-58219-3

SCHNUG E, HANEKLAUS S, LILIENTHAL H, PANTEN K (2000) LASSIE : An innovative approach for the continuous remote sensing of crops. Asp Appl Biol 60:147-153

WOLF PR, DEWITT BA (2000) Elements of photogrammetry with applications in GIS. Boston, USA: McGraw Hill 608 p ISBN 0-07-292454-3

Ableitung von Vegetationsparametern aus multidimensionalen Radardaten

Extraction of vegetation parameters from multi-dimensional radar data

Erik Zillmann, Holger Lilienthal und Ewald Schnug

Institut für Pflanzenernährung und Bodenkunde (PB), Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft (FAL), Bundesallee 50, D-38106 Braunschweig, Germany, e-mail: pb@fal.de

Zusammenfassung: In der vorliegenden Studie wurde die Eignung von Radarbilddaten zur Ableitung der Vegetationsparameter Bestandesdichte und frische Biomasse von Winterweizen analysiert. Die Ergebnisse basieren auf Radarmessungen des multidimensionalen E-SAR Sensors (DLR-Oberpfaffenhofen) in Mecklenburg-Vorpommern aus den Jahren 2001 und 2002. Die Bestandesparameter wurden in Abhängigkeit der Geomorphologie des Geländes beprobt. Sowohl Radareinzelkanäle, als auch Kanal-kombinationen wurden hinsichtlich ihres Informationsgehalts analysiert, um die Nutzbarkeit von Radar zur teilflächenspezifischen Differenzierung von Bestandesparametern zu bewerten.

Schlüsselwörter: SAR-Daten, Fernerkundung, Winterweizen, Bestandesvariabilität, Radar

Abstract: *In the presented study the properties of radar imagery for predicting the canopy parameter stem density and fresh biomass of winter wheat were investigated. The results discussed herein are based upon airborne radar-data which were acquired by the multidimensional E-SAR sensor (DLR Oberpfaffenhofen) in Mecklenburg-Western Pomerania in the years 2001 and 2002. During a ground truth campaign canopy data was manually determined in dependence on geomorphology of the test sites. Single radar bands as well as several different band combinations were tested for determining stem density and biomass. This paper presents an assessment of using radar-data to discriminate in-field variations of canopy development.*

Key-words: SAR-Data, Remote Sensing, winter wheat, crop variability, radar

1. Einleitung

Die Kenntnis über die räumliche Variabilität der Bestandesentwicklung innerhalb landwirtschaftlicher Flächen kann zur Optimierung variabler Betriebsmittelapplikationen herangezogen werden (BJERRE 1999, MILLER *et al.* 2002). Den Methoden der Fernerkundung wird ein großes Potenzial zur aktuellen Variabilitätserfassung und zur Ableitung teilflächenspezifischer Bewirtschaftungsmaßnahmen zugesprochen (MORAN *et al.* 1997, DIXON & MCCANN 1997, BRISCO *et al.* 1998). Optische Sensoren können pflanzenbaulich relevante Bestandesinformation bereitstellen, sind aber aufgrund ihrer Witterungsabhängigkeit in der kontinuierlichen Datenverfügbarkeit eingeschränkt. Wenig Beachtung fand bisher in diesem Zusammenhang die Radarfernerkundung, welche aufgrund der verwendeten langwelligen Mikrowellenstrahlung (1 mm – 1 m) weitgehend unabhängig von atmosphärischen Bedingungen ist und daher ständige Datenverfügbarkeit gewährleistet.

Bevor die Radarfernerkundung jedoch als wirksames Instrument in der landwirtschaftlichen Praxis Verwendung finden kann, muss zunächst geklärt werden, ob bestandesinterne Variabilitäten erkannt und Beziehungen zwischen den Radarrückstreuwerten und pflanzenbaulich relevanten Bestandesmerkmalen ermittelt werden können. Verschiedene Arbeiten zeigten bereits Zusammenhänge zwischen Radarmessungen und verschiedenen Bestandesparametern (PAMPALONI *et al.* 1997, PALOSCIA 1998, MORAN 1999, MACELLONI *et al.* 2001), doch wurde bisher nicht der Versuch unternommen, deren räumliche Variabilität zu erfassen.

Aufgrund der speziellen Sensitivität der Radarstrahlung gegenüber strukturellen Eigenschaften der Vegetation (BRISCO & BROWN 1998) wurden in der vorgestellten Untersuchung die Beziehungen zu den Bestandesparametern Bestandesdichte und frische Biomasse analysiert. Ziel der Arbeit war die Erfassung und Modellierung schlaginterner Variabilität auf Basis statistischer Zusammenhänge.

Radarfernerkundung

Im Gegensatz zu optischen Aufnahmesystemen ist Radar ein aktives Fernerkundungsverfahren, welches die elektromagnetische Strahlung eigenständig erzeugt, emittiert und als von der Erdoberfläche reflektierte Strahlung (Rückstreuung) detektiert. Daraus ergibt sich ein von optischen Aufzeichnungen grundlegend verschiedener Informationsgehalt. Optische Daten liefern Informationen über die Reflexionswirksamkeit biochemischer Boden –

und Bestandesparameter, dagegen wird das Radarrückstreusignal vor allem von biophysikalischen Eigenschaften der Geländeoberfläche und dem Wassergehalt bestimmt (SCHMULLIUS & EVANS 1997).

Synthetic Aperture Radar (SAR) sendet während des Überfluges kohärente Radarimpulse seitlich (*Range*), d.h. senkrecht zur Flugrichtung (*Azimuth*), in einem keulenförmigen Strahl aus. Der aufgezeichnete Geländestreifen liegt somit seitlich versetzt und parallel zur Flugbahn des Sensors (Seitensicht radar). Die Trennung verschiedener Objekte erfolgt dabei in Range-Richtung über den Laufzeitunterschied des Radarimpulses und in Azimuth-Richtung über die Radarstrahlbreite (KLAUSING & HOLPP 2000). Durch das Aufnahmeprinzip verursachte geometrische Verzerrungen, wie Layover, Foreshortening und Radarschatten führen zu radiometrischen Störungen im Radarbild, die nicht korrigierbar sind (LEWIS *et al.* 1998). Die dominierende radiometrische Störung wird durch destruktive Interferenz kohärenter Wellen hervorgerufen und wird als Speckle-Effekt bezeichnet. Er kann während der Vorverarbeitung mittels verschiedener Filtermethoden reduziert werden (LEE *et al.* 1994).

Erst die absolute Kalibrierung der aufgezeichneten Intensitätswerte in Radarrückstreukoeffizienten (σ^0) ermöglicht einen quantitativen Vergleich der Radarmessungen verschiedener Geländeobjekte einer Aufnahme. Die Kalibrierung unter Einbeziehung des lokalen Einfallswinkels korrigiert sowohl Reliefeinflüsse, als auch Near-Far-Range Effekte, welche durch den im Aufnahmestreifen variierenden Einfallswinkel resultieren (Bild.1).

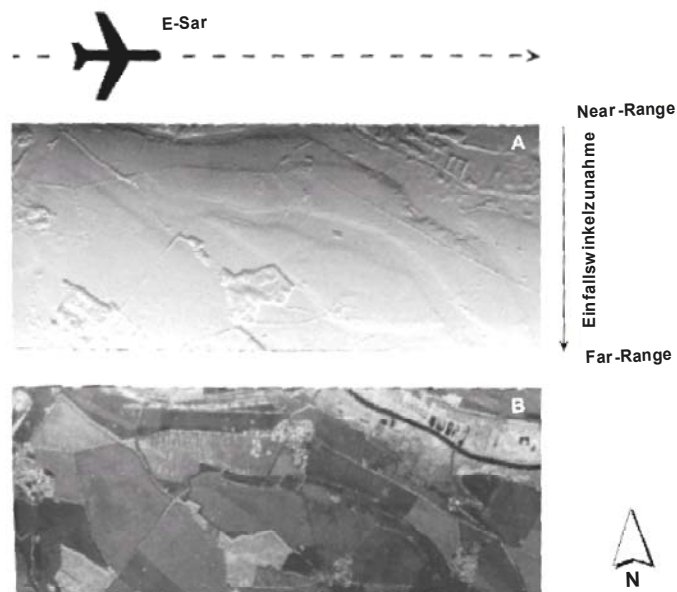


Bild 1: Einfluss des Einfallswinkels auf die Rückstreuintensität. A: Geocodierte Incidence Angle Map (IAM) der L-Band-Konfiguration; B: unkalibriertes ground-range Amplituden-Bild (L-HH).

Die Radarrückstreuintensität wird durch komplexe Wechselwirkung verschiedener system- und objektbedingter Aufnahmefaktoren bestimmt (Bild 2). Insbesondere den Parametern Wellenlänge und Polarisation kommt große Bedeutung zu. Da langwellige Strahlung den Vegetationsbestand bis zum darunter liegenden Boden durchdringen kann, wird im Allgemeinen ein Mischsignal aufgezeichnet. Die Interaktion zwischen Mikrowellen und Vegetationsbestand erfolgt hauptsächlich an Objekten (Halme, Blätter), deren Größe und Ausrichtung in etwa der Wellenlänge und Polarisation entsprechen (BRISCO & BROWN 1998).

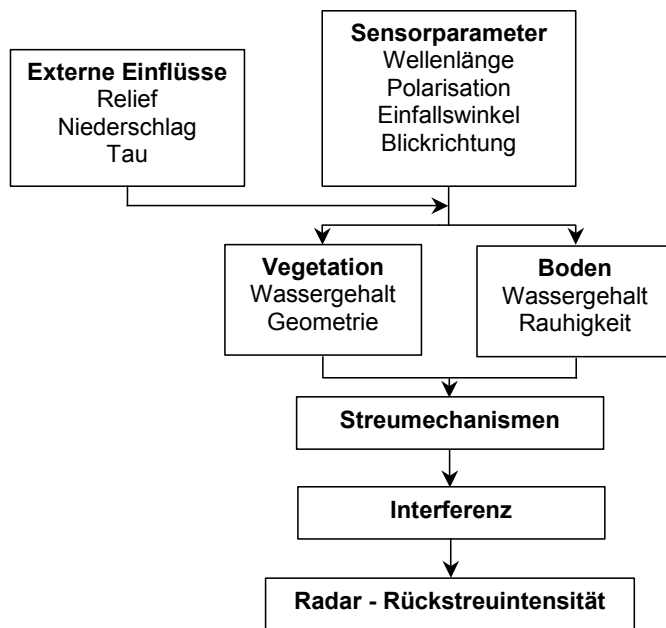


Bild 2: Die Radarrückstreuintensität beeinflussende system- und objektbedingte sowie externe Faktoren.

2. Material und Methoden

Die Untersuchungen wurden auf drei Schlägen (90 – 130 ha) mit Winterweizenbeständen in Neetzow / Mecklenburg-Vorpommern (13,5° E; 53,9° N) durchgeführt. In den Vegetationsperioden der Jahre 2001 und 2002 wurden insgesamt 5 Messkampagnen durchgeführt, um Referenzdaten für verschiedene Entwicklungsstadien zu erfassen.

Ground truth

Die Anzahl der Stichproben muss sich an der Variabilität des untersuchten Parameters orientieren (CURRAN & WILLIAMSON 1985). Aufgrund der Zielsetzung der Untersuchung wurden anhand der verfügbaren Daten (Ertragsdaten, Bodenkarten, Geländemodelle etc.) Beprobungsstrategien entwickelt, die eine möglichst gute Abdeckung der natürlichen Bodenheterogenität gewährleisten, welche zu unterschiedlicher Ausprägung der Vegetation führen kann. Als bestimmender Faktor für variable Standortfruchtbarkeit gilt das Geländere relief (SCHRÖDER 1999).

In 2001 wurde eine stratifizierte Probennahme basierend auf Klassen unterschiedlichen potentiellen Wassergehalts (MOORE *et al.* 1993) durchgeführt. Im Jahr 2002 wurde die Ground truth in einem Raster- und entlang eines Transekts ermittelt. Die Positionierung

der Probepunkte erfolgte in diesem Fall unter Integration der Hangneigung und der relativen Ertragsdaten des Vorjahres, die in einem GIS (Geographisches Informationssystem) miteinander verschnitten wurden (ZILLMANN 2004). Die Stichprobenzahl wurde so gewählt, dass die gesamte Probenahme zeitnah der Radaraufnahme realisiert werden konnte (Tab. 1) und die Probepunkte wurden mit einem GPS mit $\pm 2,5$ m Genauigkeit eingemessen.

Die Stichproben wurden in einem Abstand von 50 m erhoben, welcher ausreichend ist, um Bodenvariabilitäten hinreichend zu erfassen (HANEKLAUS *et al.* 1997). Die Vegetationsparameter wurden für eine Fläche von $\frac{1}{4}$ m² ermittelt. Hierfür wurde die oberirdische Biomasse abgeschnitten und gewogen bzw. die Halme ausgezählt. Detailliertere Informationen zur Probenahme sind in ZILLMANN (2004) aufgeführt.

Tab. 1: Anzahl der Stichproben auf den Testflächen in Neetzow an verschiedenen Aufnahme-terminen.

Testfläche	08. Mai 2001	09. Juni 2001	07. April 2002	08. Mai 2002	05. Juni 2002
3.2	n.e.	n.e.	12	18	18
10.3	18	19	26	26	25
10.2	14	14	n.e.	n.e.	n.e.

n.e. = Daten nicht erhoben

Parallel zu den Radaraufzeichnungen wurden Falschfarben-Infrarot Luftbilder aufgenommen, aus denen der NDVI - *Normalized Difference Vegetation Index* - (ROUSE *et al.* 1974) der Weizenbestände berechnet wurde. Aufgrund vorhandener Zusammenhänge zwischen NDVI und Biomasse (TUCKER 1979, WANJURA & HATFIELD 1987, TAYLOR *et al.* 2000, FLOWERS *et al.* 2001) wurde darauf basierend ein Referenzzustand der räumlichen Biomasseverteilung für Verifikationszwecke modelliert.

Radardaten

Die Radardaten wurden mit dem E-SAR Sensor (*Experimental Synthetic Aperture Radar*) des DLR (Oberpfaffenhofen), einem multi-dimensionalen flugzeuggetragenen Radarsensor, der in verschiedenen Frequenzbereichen und Polarisierungen arbeitet (HORN 1997), aufgezeichnet. Im Rahmen der Studie wurden Rückstreuwerte für verschiedene Wellen-

längen im L-Band (23 cm) und im X-Band (3 cm) mit vertikaler (VV) und horizontaler (HH) Ko-Polarisation gemessen. Zusätzliche Kreuz-Polarisation (HV, VH) war lediglich im L-Band verfügbar, so dass insgesamt sechs verschiedene Radarkanäle für die Analyse genutzt werden konnten. Der Einfallswinkel in der Mitte des Aufnahmestreifens (*center swath*) betrug 35° und die geometrische Auflösung der Bilddaten 1 m.

Die aufgezeichneten Radarrückstreuwerte wurden verschiedenen Prozessierungs- und Vorverarbeitungsschritten unterzogen (Kalibrierung, Speckle-Filterung mit 5 x 5 Frost Filter) und anschließend durch Verrechnung der Einzelkanäle eine Vielzahl unterschiedlicher Kanalkombinationen (Polarisationsindex) generiert (ZILLMANN 2004).

Statistische Analyse

Die Korrelationsanalyse zwischen Radarrückstreuung und Bestandesparametern wurde anhand der Radarsignatur durchgeführt, welche entsprechend den geografischen Koordinaten der Probepunkte aus den Bilddaten extrahiert wurde. Aufgrund geringfügiger Lageungenauigkeiten, sowohl der georeferenzierten Radarbilder als auch der GPS-Messungen, wurden die Rückstreuwerte einer kreisförmigen Fläche von 19 m^2 ($r = 2,5 \text{ m}$) um den Probepunkt herum gemittelt. Die Wahl einer größeren Extraktionsfläche hätte die notwendige Repräsentativität der Stichprobe in Frage gestellt, die sich an der kleinräumigen Bestandesheterogenität des Winterweizens orientiert.

3. Ergebnisse und Diskussion

Die aufgezeichneten Radarbilddaten zeigten einen unterschiedlichen Informationsgehalt der Einzelkanäle, welcher auf deren unterschiedliche Sensitivität gegenüber strukturellen Eigenschaften des Winterweizenbestandes zurückzuführen ist (Bild 3). Die Unterschiedlichkeit der Einzelkanäle wird durch die Korrelationsanalyse bestätigt, welche im Allgemeinen nur geringe statistische Zusammenhänge zwischen den Kanälen ausweist (ZILLMANN 2004).

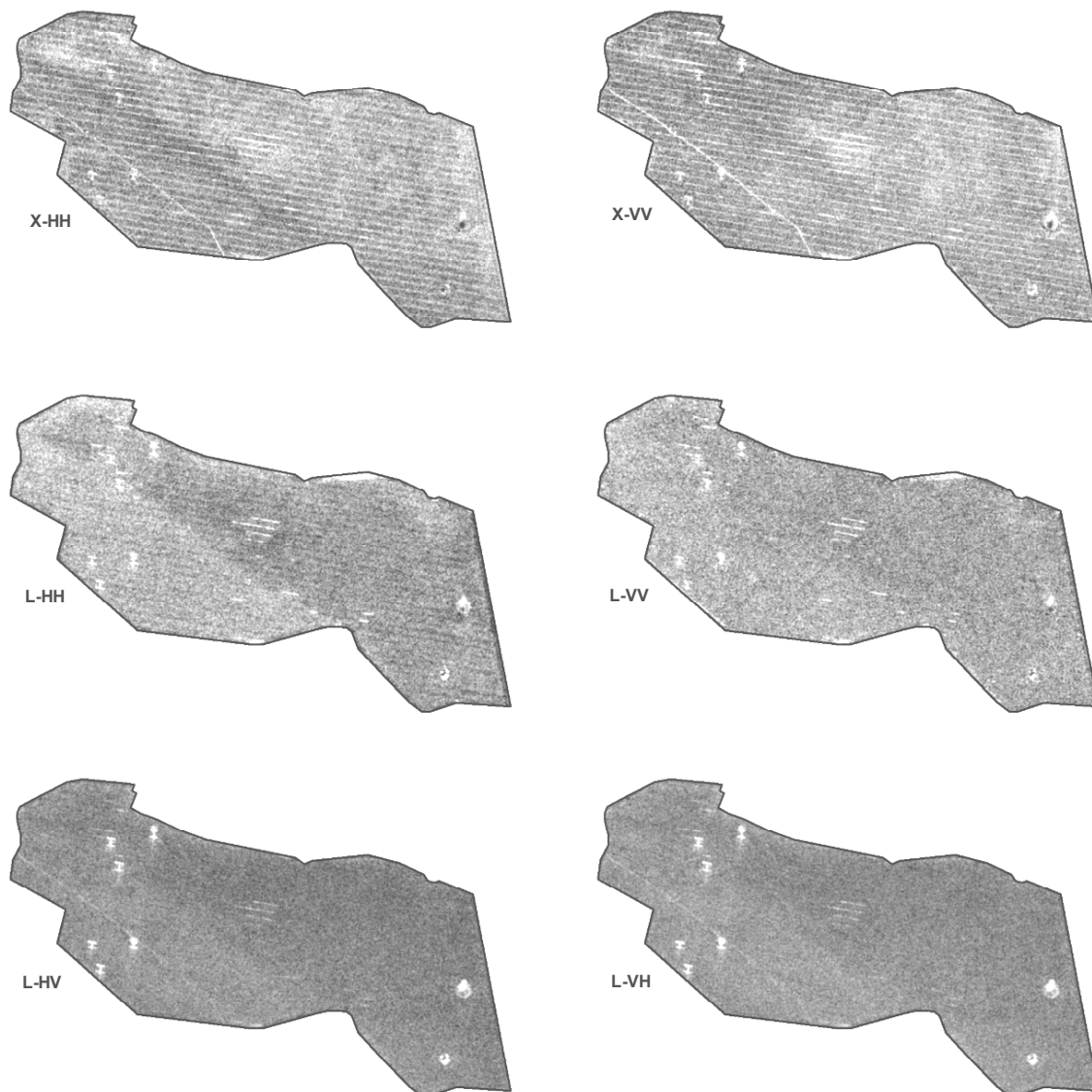


Bild 3: Einzelkanaldarstellung der Rückstreuintensität des Weizenbestandes der Testfläche 10.3 in Neetzow während des Schossens am 08. Mai 2002 (BBCH-Code 32, nach MEIER 2001).

In Bild 3 ist eindeutig das konträre Rückstreuverhalten des Winterweizens in den beiden Wellenlängen erkennbar, d. h. Bereiche mit hoher Rückstreuung im X-Band (helle Grautöne) haben geringere Rückstreuwerte im L-Band (dunkle Grautöne). Die Radarbilder weisen eine hohe Variabilität der Rückstreuintensität innerhalb des Schlages auf, die insbesondere in den horizontalen Polarisationen beider Wellenlängen eindeutige räumliche Flächendifferenzierungen ermöglicht.

Die räumliche Strukturierung der Radarrückstreuung ist nahezu identisch mit der im Infrarot-Luftbild abgebildeten Struktur unterschiedlicher Vegetationsentwicklung, welche durch

veränderte Reflexion vor allem im Spektrum des nahen Infrarot und Rot hervorgerufen wird (Bild 4). Die Intensität der Rotfärbung steigt mit zunehmender Vegetationsbedeckung an. Die Radarrückstreuung der Einzelkanäle (Bild 3) zeigt für Teilflächen mit höherer Biomasse eine augenfällig abnehmende Intensität in beiden Polarisationen des X-Bandes, wohingegen sie im L-Band zunimmt. Diese Zusammenhänge zeigen somit eindeutig das vorhandene Potenzial von Radar zur Erfassung räumlicher Bestandesvariabilität in Winterweizen.

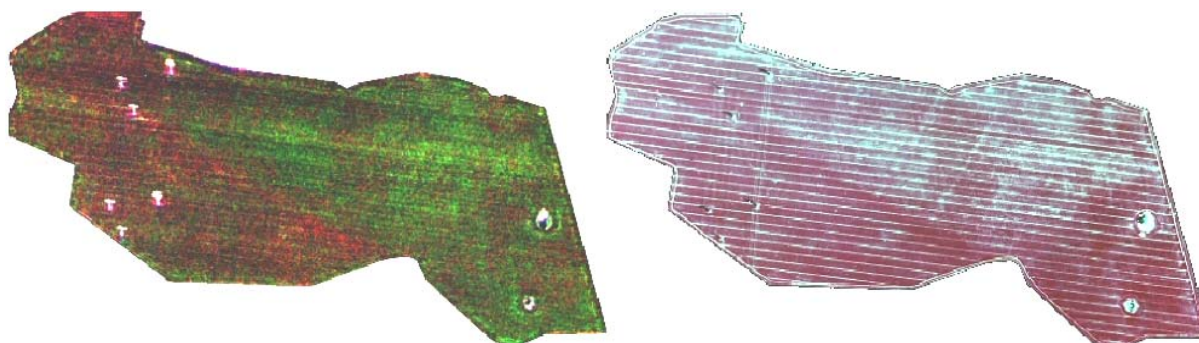


Bild 4: Räumliche Variabilität des Winterweizenbestandes der Testfläche 10.3 in Neetzow während des Schossens am 08. Mai 2002 (BBCH-Code 32, nach MEIER 2001). Links: 3-Kanal-Radarfarbbild in den Kanälen Rot: L-VV, Grün: X-VV und Blau: L-HV, rechts: Falschfarben-Infrarot-Luftbild.

Die Ergebnisse zeigen weiterhin, dass mittels Korrelationsanalyse lediglich mittelstark ausgeprägte Zusammenhänge zwischen der einkanaligen Radarinformation und Bestandesmerkmalen aufgedeckt werden können (Tab. 2). Tendenziell lagen stärkere Beziehungen mit der kurzwelligen Strahlung des X-Bandes, als mit der langwelligen des L-Bandes vor. Dies deutet auf ein größeres Potenzial kurzer Wellenlängen zur Erfassung schlaginterner Variabilität hin.

Tab. 2: Korrelationskoeffizienten (r) der linearen Korrelation (nach PEARSON) zwischen σ^0 der Einzelkanäle und den Bestandesmerkmalen frische Biomasse und Bestandesdichte von Winterweizen auf den drei Testflächen in Neetzow an den verschiedenen Aufnahmezeitpunkten (2001/2002).

		FM _v [g m ⁻²]									
		08. Mai 2001		09. Juni 2001		07. April 2002		08. Mai 2002		05. Juni 2002	
Testfläche/ Radarkanal		10.2 (n=11)	10.3 (n=16)	10.2 (n=13)	10.3 (n=18)	3.2 (n=12)	10.3 (n=26)	3.2 (n=17)	10.3 (n=26)	3.2 (n=15)	10.3 (n=24)
σ^0_{L-HH}	[dB]	-0,12	0,55*	0,11	0,39	0,39	0,32	0,50*	-0,16	0,02	0,22
σ^0_{L-HV}		-0,09	0,36	0,08	0,05	0,24	0,50	0,13	-0,06	0,17	0,26
σ^0_{L-VV}		-0,36	0,21	0,19	0,52*	0,26	0,55**	-0,47	-0,31	0,25	0,15
σ^0_{L-VH}		0,19	0,21	0,04	0,16	-0,10	0,28	0,18	0,25	0,12	0,30
σ^0_{X-HH}		-0,20	-0,63**	0,81**	0,27	-0,28	0,27	-0,30	-0,40*	0,07	-0,38
σ^0_{X-VV}		0,36	-0,50*	0,51	0,56*	-0,37	0,42*	-0,56*	-0,17	-0,18	-0,17
$\sigma^0_{r-cross}$		0,07	0,34	0,06	0,10	0,06	0,44	0,17	0,10	0,15	0,28
		Bestandesdichte [Halme m ⁻²]									
σ^0_{L-HH}	[dB]	-0,15	0,56*	0,07	0,37	0,25	-0,14	0,32	0,05	-0,06	0,12
σ^0_{L-HV}		0,44	0,46	0,00	0,07	0,31	0,15	-0,02	-0,02	0,23	0,20
σ^0_{L-VV}		-0,02	0,23	0,14	0,51*	0,34	0,05	-0,47	-0,37	0,25	0,14
σ^0_{L-VH}		0,27	0,23	0,02	0,18	0,12	0,38	-0,17	0,24	0,17	0,28
σ^0_{X-HH}		-0,05	-0,47	0,77**	0,37	-0,33	-0,12	-0,07	-0,40*	-0,10	-0,56**
σ^0_{X-VV}		0,38	-0,41	0,53	0,55*	-0,20	0,32	-0,41	-0,14	-0,06	-0,40
$\sigma^0_{r-cross}$		0,44	0,41	0,01	0,12	0,22	0,27	-0,10	0,11	0,20	0,24

r-cross: Mittelwert der Kreuz-Polarisationen, FM_v: Biomasse Frischgewicht, Signifikanzniveau *: $\alpha = 0,05$, **: $\alpha = 0,01$

grau unterlegt sind die jeweils höchsten, signifikanten Korrelationen $> |0,5|$ zwischen Bestandesmerkmal und σ^0

Die Verwendung multi-dimensionaler Radarinformation in Form von Polarisationsindizes führte in der Mehrzahl der Fälle zu einem Anstieg der Korrelationen mit den Bestandesmerkmalen. Insbesondere eine Kanalkombination aus beiden Wellenlängen führte oftmals zu guten Ergebnissen. Hier schien vor allem die Kombination aus einem Kanal des X-Bandes und einer Kreuz-Polarisation des L-Bandes ein hohes Informationspotenzial bereitzustellen. Die entsprechenden Ergebnisse sind exemplarisch anhand der Daten des Jahres 2002 in Tabelle 3 dargestellt.

Tab. 3: Höchste Korrelationskoeffizienten (r) der linearen Korrelation (nach PEARSON) zwischen Polarisationsindizes und Bestandesmerkmalen von Winterweizen der Testflächen in Neetzow (2002).

FM _v [g m ⁻²]						
Termin	07. April 2002		08. Mai 2002		05. Juni 2002	
Testfläche	3.2 (n=12)	10.3 (n=26)	3.2 (n=17)	10.3 (n=26)	3.2 (n=15)	10.3 (n=24)
PI	LHH - XHH	LHH+LHV +LVV+LVH	LHH-XVV	(LVH+XHH) /(LVH-XHH)	(XHH+XVV) /(XHH-XVV)	(r _{-cross} +XHH) /(r _{-cross} -XHH)
r	0,53	0,54**	0,66**	0,46*	-0,36	0,50
Bestandesdichte [Halme m ⁻²]						
PI	(LVV-XHH) /(LVV+XHH)	XHH-XVV	(LHH+XVV) /(LHH-XVV)	(LVH+XHH) /(LVH-XHH)	LHV-XHH	(r _{-cross} +XHH) /(r _{-cross} -XHH)
r	-0,62*	-0,39*	0,55*	0,44*	0,30	0,65**

FM_v: Biomasse Frischgewicht, PI: Polarisationsindex, r_{-cross}: Mittelwert der beiden Kreuz-Polarisationen, Signifikanzniveau *: α = 0,05, **: α = 0,01

Die Stärke der Korrelationen ist jedoch gering, so dass sie als Basis für landwirtschaftliche Anwendungen nur bedingt nutzbar sind. Diese Aussage relativiert sich, wenn aufgrund von ungünstigen Witterungsbedingungen keine optischen Fernerkundungsdaten, sondern lediglich Radardaten als Informationsquelle über die Bestandesvariabilität zur Verfügung stehen.

Des Weiteren ist die praktische Anwendung durch fehlende Konsistenz in der Radarrückstreuung erheblich eingeschränkt. So zeigten verschiedene Weizenbestände im gleichen Entwicklungsstadium, sowohl zum gleichen Aufnahmeterrain als auch im Vergleich verschiedener Vegetationsperioden abweichende Rückstreuintensitäten. Lediglich das Verhältnis der einzelnen Kanäle zueinander war vergleichbar (ZILLMANN 2004). Die Korrelationsanalysen zeigten keine Regelmäßigkeiten in der Eignung einzelner Kanäle oder Kanalkombinationen über den Wachstumsverlauf des Winterweizens hinweg.

Die hohe Variabilität der Rückstreuung basiert auf der Veränderung der Geometrie des Getreidebestandes im Verlauf seiner Entwicklung. Zu Beginn der Vegetationsperiode liegt eine geringe Bodenbedeckung mit dominierenden horizontalen Strukturen vor. Mit Einsetzen des Längenwachstums verändert sich die Geometrie des Bestandes zu Gunsten vertikaler Strukturen (Halme). Die dadurch veränderte Interaktion zwischen den einzelnen

Radarkanälen und dem Bestand führt zu veränderter Rückstreuintensität. Weitere strukturelle Veränderungen, welche durch die Ausbildung der einzelnen Blattetagen, des Fahnenblattes und der Ähre auftreten, können das Rückstreusignal aufgrund ihrer zufälligen Orientierung im Raum sehr variabel beeinflussen (LE TOAN *et al.* 1984, HOEKMAN & BOUMAN 1993, BROWN *et al.* 2001). Weiterhin geht eine starke Beeinflussung der Radarrückstreuung von externen Faktoren wie Tau und Niederschlag (GILLESPIE *et al.* 1990, DAMPNEY *et al.* 2001), als auch Wind aus (BRISCO *et al.* 1993, HOBBS *et al.* 1998). BOUMAN & VAN KASTEREN (1990) sehen insbesondere den Wind als Grund für die hohe Rückstreuvariabilität von Getreidebeständen in verschiedenen Jahren. Die Bodenfeuchte kann die Radarrückstreuintensität vor allem langer Wellenlängen beeinflussen (ULABY *et al.* 1996).

4. Schussfolgerung

Die Resultate machen deutlich, dass die Radarfernerkundung derzeit bedingt zur Erfassung kleinräumiger, schlaginterner Bestandesvariabilität geeignet ist. Es lassen sich räumliche Strukturen unterschiedlicher Bestandesentwicklung abgrenzen, ohne deren Kausalität eindeutig klären zu können. Die Lokalisierung solcher Heterogenitäten ist jedoch schon eine Informationsgrundlage auf deren Basis weitere Untersuchungen erfolgen können.

Als Ursache für die fehlende Kausalität ist vor allem die hohe Variabilität des Rückstreusignals unabhängig von den Bestandesmerkmalen frische Biomasse und Bestandesdichte zu nennen. Diese Variabilität wird insbesondere durch den Einfluss verschiedener zeitlich variabler und teilweise schwer erfassbarer Faktoren, wie z. B. Wind, Tau, Blattstellung und Bodenfeuchte, hervorgerufen. Des Weiteren ist die schlaginterne Variabilität der Bestände zu homogen, als dass sie durch die vorhandene radiometrische Auflösung des Radars adäquat erfasst werden kann. Der in allen Radaraufzeichnungen auftretende Speckle-Effekt, führt zu objektunabhängigen Rückstreusignalen und erschwert eine kleinräumigen Variabilitätserfassung erheblich. Er konnte durch angewendete Filteralgorithmen nur minimiert, aber nicht vollständig eliminiert werden.

Es wurde weiterhin deutlich, dass das Informationspotenzial multi-dimensionaler Radardaten im Hinblick auf die Variabilitätserfassung innerhalb von Winterweizenbeständen höher zu bewerten ist, als das eines Einzelkanal-Radars.

5. Literatur

- BJERRE KD (1999)** Disease maps and site specific fungicide application in winter wheat. In: Precision Agriculture '99, ed. J.V. Stafford. Sheffield, UK: Sheffield Academic Press., pp.495-504
- BOUMAN BAM, VAN KASTEREN HWJ (1990)** Ground-based X-Band (3-cm wave) radar backscattering of agricultural crops. II. Wheat, Barley and Oats; the Impact of Canopy Structure. Remote Sensing of Environment, 34, 93-105
- BRISCO B, BEDARD D, NAUNHEIMER JJ, BROWN RJ (1993)** Environmental Effects on Radar Data of Agricultural Areas, Proceedings of 16th Canadian Symposium on Remote Sensing, Sherbrooke, Québec, June 7-10, 1993, pp. 283-288
- BRISCO B, BROWN RJ (1998)** Agricultural Applications with Radar. In Henderson FM & Lewis AJ (eds.) 1998: Principles and application of imaging Radar, Manual of remote sensing, Third edition Vol. 2, , New York: John Wiley & Sons, pp. 381-406, ISBN 0-471-29406-3
- BRISCO B, BROWN RJ, HIROSE T, MC NAIRN H, STAENZ K (1998)** Precision Agriculture and the Role of Remote Sensing: A Review; Canadian Journal of Remote Sensing, Vol. 24, No 3, 1998, pp. 315-327
- BROWN SCM, BENNETT JC, QUEGAN S, COOKMARTIN G, MORRISON K (2001)** Measurements of Radar Scattering from Wheat Canopies and their Relevance to Recovering Crop Parameters. Proc. of 8th Int. Symposium on Physical Measurements and Signatures in Remote Sensing – ISPRS -, 8-12 January, Aussois, France, 293-296
- CURRAN PJ AND WILLIAMSON HD (1985)** The accuracy of ground data used in remote sensing investigations, Int. J. Of Remote Sensing, 6: 1637-1651
- DAMPNEY P, QUEGAN S, MEADOWS P (2001)** Advanced Radar for Measuring Green Area Index (GAI), Biomass and Shoot Numbers in Wheat. Home-Grown Cereals Authority (HGCA) Project Report No. 252 (RADWHEAT) [online]. UK, zu finden in <http://www.hgca.com/ftpaccess/docs/projectreports/report252.pdf> [zitiert am 01.04.2003]
- DIXON J, MCCANN M (1997)** Precision Agriculture in the 21st Century: Geospatial and Information Technologies in Crop Management. Washington D.C.: National Academy Press, 118, p, ISBN 0-309-05893-7
- FLOWERS M, WEISZ R, HEINIGER R (2001)** Remote sensing of winter wheat tiller density for early nitrogen application decisions. Agron. J. 93:783-789
- GILLESPIE TJ, BRISCO B, BROWN RJ, SOFKO GJ (1990)** Radar Detection of a Dew Event in Wheat, Remote Sensing of Environment, 33, 151-156
- HANEKLAUS S, RUEHLING I, SCHROEDER D, SCHNUG E (1997)** Studies on the Variability of Soil and Crop Fertility Parameters and Yields in different landscapes of Northern Germany. Precision Agriculture 1997, Vol. II, 785-792, J.V. Stafford (Ed.) Scientific Publishers Ltd., UK
- HOBBS S, ANG W, SEYNAT C (1998)** Wind and Rain Effects on SAR Backscatter from Crops. In: Proceedings of the 2nd International Workshop on Retrieval of Bio- and Geophysical Parameters from SAR Data for Land Applications, ESTEC, Netherlands, 21. - 23. Okt. 1998

- HOEKMAN DH, BOUMAN BAM (1993)** Interpretation of C- and X-band radar images over an agricultural area, the Flevoland test site in the Agriscatt-87 campaign, *Int. J. Remote Sensing*, Vol. 14, No. 8, 1577-1594
- HORN R (1997)** The DLR Airborne SAR Project E-SAR [online]. Germany, zu finden in http://www.dlr.de/NE-HF/projects/ESAR/igars96_scheiber.html [zitiert am 28.02.2003]
- KLAUSING H, HOLPP W (2000)** Radar mit realer und synthetischer Apertur: Konzeption und Realisierung. München: Oldenbourg Wissenschaftsverlag GmbH, 399 p, ISBN 3-486-23475-7
- LE TOAN T, LOPES A, HUETE M (1984)** On the relationships between radar backscattering coefficient and vegetation canopy characteristics, In *Proceedings of. IGARSS '84 Symposium*, Strasbourg, pp. 155-160
- LEE JS, JURKEVICH I (1994)** Speckle Filtering of Synthetic Aperture Radar Images: A Review, *Remote Sensing Reviews*, Vol. 8, pp. 313-340
- LEWIS AJ, HENDERSON FM, HOLCOMB DW (1998)** Radar Fundamentals: The Geoscience Perspective. In Henderson FM & Lewis AJ (eds.) 1998: Principles and application of imaging Radar, *Manual of remote sensing*, Third edition Vol. 2, , New York: John Wiley & Sons, pp. 131-176, ISBN 0-471-29406-3
- MACELLONI G, PALOSCIA S, PAMPALONI P, MARLIANI F, MARCO G (2001)** The relationship between the backscattering coefficient and the biomass of narrow and broad leaf crops - In: *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing 2001*, Vol. 39, No. 4, S. 873 – 884
- MEIER U (2001)** Entwicklungsstadien mono- und dikotyler Pflanzen, BBCH Monografie, Biologische Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft, 2. Auflage, [online] Deutschland, zu finden in <<http://www.bba.de/veroeff/bbch/bbchdeu.pdf>> [zitiert am 10.03.2003]
- MILLER PCH, LANE AG, WHEELER HC (2002)** Optimising Fungicide Application according to Crop Canopy Characteristics in Wheat. Home-Grown Cereals Authority (HGCA), Project Report No. 277 [online] zu finden in <http://www.hgca.com/ftpaccess/docs/projectreports/report277.pdf> [zitiert am 27.03.2003]
- MORAN MS, INOUE Y, BARNES EM (1997)** Opportunities and Limitations for Image-Based Remote Sensing in Precision Crop Management, *Remote Sensing of Environment*, 61:319-346
- MORAN MS, HYMER DC, QI J, KERR V (1999)** Radar imagery for precision crop and soil management. Proc. Int. Conference on Precision Agriculture, 19-22 July, St. Paul, Minnesota, pp. 1423-1434
- PALOSCIA S (1998)** An empirical approach to estimating leaf area index from multifrequency SAR data. *Int. J. of Remote Sensing*, 19 (2): 359-364
- PAMPALONI P, MACELLONI G, PALOSCIA S, SIGISMONDI S (1997)** The Potenzial of C- and L-Band SAR in assessing vegetation biomass: the ERS-1 and JERS-1 experiments, in *Proceedings of the Third ERS Symposium*, Florence, pp. 1729-1733
- ROUSE JW, HAAS RH, SCHELL JA, DEERING DW, HARLAN JC (1974)** Monitoring the vernal advancement and retrogradation (greenwave effect) of natural vegetation. NASA/GSFC Type III Final Report, Greenbelt, Md. p 371

- SCHMULLIUS CC, EVANS DL (1997)** Review article Synthetic Aperture Radar (SAR) Frequency and Polarization Requirements for Applications in Ecology, Geology, Hydrology, and Oceanography: A tabular Status Quo after SIR-C/X-SAR, *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 18, No 13, 2713 – 2722
- SCHRÖDER D (1999)** Strategien zur Erfassung der kleinräumigen Heterogenität. In: *Erfassung der kleinräumigen Heterogenität*, KTBL-Arbeitspapier 264, pp. 47-52
- TAYLOR JC, WOOD GA, WELSH JP, KNIGHT S (2000)** Exploring management strategies for precision farming of cereals assisted by remote sensing. *Aspects of Applied Biology* 60, Remote Sensing in agriculture, pp. 53-60
- TUCKER CJ (1979)** Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment*, Vol. 8, No. 2, pp 127-150
- ULABY FT, DUBOIS PC, VAN ZYL J (1996)** Radar Mapping of Surface Soil Moisture, *Journal of Hydrology*, 184, pp. 57-84
- WANJURA DF, HATFIELD JL (1987)** Sensitivity of spectral vegetative Indices to crop biomass, *Trans ASAE* 30:810-816
- ZILLMANN E (2004)** Einsatz multi-dimensionaler Radardaten zur Erfassung der räumlichen Variabilität von Bestandesmerkmalen. Dissertation Universität Braunschweig, Landbauforschung Völkenrode Sonderheft 266

Thermographie im Kartoffellager

Thermography in potato store

Klaus Gottschalk, Sabine Geyer, Hans-Jürgen Hellebrand, Ralf Schlauderer
Institut für Agrartechnik Bornim e.V. ATB. Max-Eyth-Allee 100, 14469 Potsdam
e-mail: kgottschalk@atb-potsdam.de

Kurzfassung: Die Anwendung der Infrarot-Thermographie bietet die Möglichkeit, die Temperaturverteilung über weite Bereiche im Lager zu erfassen. Einflüsse der Luftströmungen auch auf geringe und rasche Temperaturänderungen lassen sich darstellen. Es wurde erarbeitet, inwieweit mittels IR-Thermographie erfasste Temperaturwerte sich für eine Klimasteuerung eignen.

Schlüsselwörter: Infrarot-Thermographie; Kartoffellager; Lagerklimatisierung

Summary: *The application of thermography gives the possibility to determine the temperature distribution within a wide area of a store. Low local temperature differences are measurable by means of a infra-red thermal camera system, and influences of airflow changes can be visualised. It was verified to which extent online measured thermal imaging temperature data in a convective ventilated potato store can serve as temperature measurements for climate control.*

Keywords: *Infra-red thermography; potato store; environment control*

1. Einleitung

In Lagerhäusern müssen zur Qualitätssicherung landwirtschaftlicher Produkte während der Lagerperiode Klimaparameter eingehalten werden. Eine bestangepasste Klimatisierung erfordert eine möglichst hohe Anzahl von Temperatur-Messfühlern (Sensoren) an geeigneten Positionen im Lagerhaus, um den Zustand der Produkte möglichst genau zu erfassen (GOTTSCHALK 2002). Die derart gemessenen Temperaturdaten liefern allerdings nur lokale Informationen zu den Produktzuständen. Durch den Einsatz einer Infrarot-Thermographie-Kamera (IR-Kamera) lässt sich ein Gesamtbild über die lokalen Unterschiede der Temperaturverläufe an der Oberfläche des Lagerguts gewinnen. Thermographisch erfasste Oberflächentemperaturen der Lagerprodukte eignen sich als Informationsquelle für die Steuerung eines Belüftungsregimes.

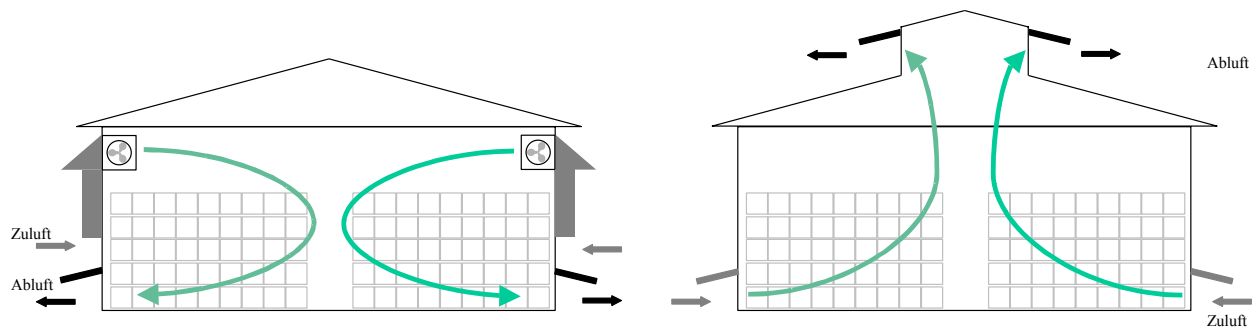


Bild 1: Lüftungsprinzipien von Kistenlagern für Kartoffeln; links mit Zwangsbelüftung über Ventilatoren, rechts freie konvektive Lüftung (FKL)

Die Thermographie bietet die Möglichkeit, Aufwärm-, und Abkühlvorgänge und weitere Lagerklimatisierungsprozesse in Form von Filmsequenzen zu visualisieren. Mit der IR-Kamera können schnell geringste Temperaturunterschiede erfasst werden. Allerdings muss beim Einsatz der IR-Kamera neben den hohen Anschaffungskosten (Infrarot-Bildsensor, besondere Optiken, spezielle Auswertesoftware) berücksichtigt werden, dass die gemessene Oberflächentemperatur des Lagerguts nur bedingt die Solltemperatur des gesamten Lagerguts repräsentiert. Zudem erfordert die Interpretation der Thermographieaufnahmen besondere Untersuchungen (HELLEBRAND *et al.* 2002a, HELLEBRAND *et al.* 2002b, HELLEBRAND *et al.* 2001).

Lagerung von Kartoffeln im Kistenlager

Die Erhaltung eines ausgeglichenen Klimas in einem Großkistenlager für Kartoffeln ist nicht einfach zu realisieren. Lagergrundflächen bis zu 5000 m² und Kistenstapelhöhen bis

zu 8,5 m, speziell in konvektiv belüfteten Lagern (FKL), stellen die Klimasteuerung vor die große Herausforderung, überall im Lager die angestrebte optimale Temperatur von 5°C aufrecht zu erhalten. Insbesondere bei FKL-Lagern zeigt es sich, dass mit fortlaufender Lagerungszeit trotz erreichter und gehaltener durchschnittlicher Kartoffeltemperatur von etwa 5,0°C die Temperaturen in 1 m Höhe gegenüber denen in 8,5 m Höhe über die normal bestehenden Temperaturdifferenz von etwa 1,5°C stetig auseinander laufen (Bild 9). Am Ende der Lagerperiode im April kann es deshalb vorkommen, dass die Kartoffeln in den untersten Schichten etwas zu kühl und in den obersten Schichten zu warm gelagert werden. Vor allem in den oberen Schichten ist vorzeitiges Auskeimen und weiterer Schwund durch Transpiration der Fall. Aufgrund solcher Belüftungsfehler ist Schwund bis zu 2,4 % zu erwarten (SCHUHMANN 2002).

Untersuchungen zur Anwendung der Thermographie

Es wurden Vergleichsmessungen zwischen konventioneller und Infrarot- Messtechnik durchgeführt. Dazu wurde eine mit konventionellen Sensoren präparierte Lagerkiste mit Kartoffeln während der Belüftung in einer Klimakammer thermographisch überwacht. In einem Großkisten-Kartoffellager mit freier konvektiver Lüftung (FKL, Bild 1) wurden Messungen mittels einer stationär installierten IR-Kamera sowie mittels im Lagergut verteilten Einzelsensoren vorgenommen (Bilder 3 und 5). Damit war eine kontinuierliche Überwachung der Lagerklimatisierung möglich. Eine Software zur Daten-Fernübertragung wurde entwickelt, die konventionell und thermographisch gewonnene Temperaturwerte sammelte und zum Institut online übermittelte.



Bild 2: Photographische Ansicht des Versuchsstands eines Stapels im Kartoffel-Kistenlager

Zur Ermittlung der Daten erfolgten während der Lagerperiode Messungen im Großkisten-Kartoffellager der FRIWEIKA e.G. in Weidensdorf/Sachsen (KERN *et al.* 2002). Die Daten wurden über eine Standleitung zum Institut übertragen. In einem weiteren Arbeitsschritt wurde das Klima im Kartoffellager versuchsweise direkt auf der Basis der thermographischen Daten gesteuert.



Bild 3: Thermographiekamera ThermoCam SC 500 (FLIR Systems GmbH) am stationären Messplatz mit Staub- und Feuchteschutz, der als Trichter ausgebildet ist

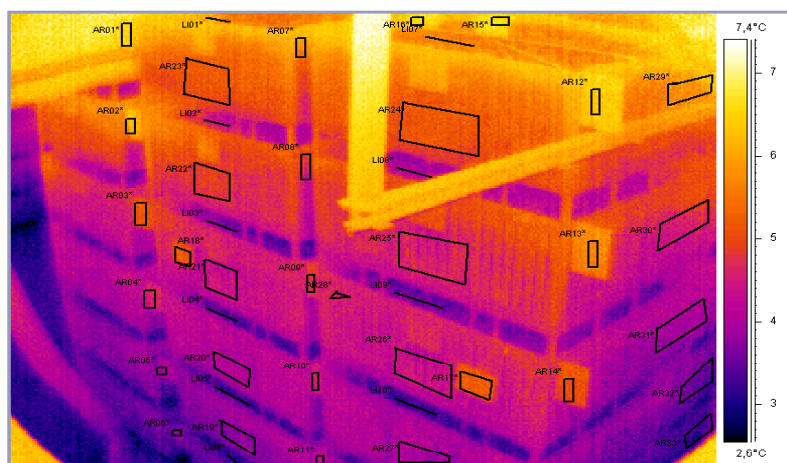


Bild 4: Infrarotbild eines Kartoffel-Großkistenlagers mit ausgewählten Bereichen für die Temperaturmessungen

Der Versuchsstand wurde mit Papierfahnen (sog. Papiermarker; Bild 2) bestückt, auf denen schnelle Temperaturänderungen sichtbar werden und die Entfernung zur Kamera berücksichtigt werden können. Weiterhin waren Referenzplatten für eine Korrektur bei der Umrechnung der IR-Daten in reale Temperaturen wesentlich.

Es wurde ein räumliches Modell erstellt, das die Auswirkungen der Belüftung auf die Temperaturen der Oberflächen und im Inneren des Lagergutes visualisiert (Bild 5). Unter Berücksichtigung einer Modellrechnung soll die Klimasteuerung zur Belüftung des Kartoffellagers in der Weise verbessert werden, dass die Luftströmungsvorgänge eine möglichst gleichmäßige Temperaturverteilung im Lager gewährleisten.

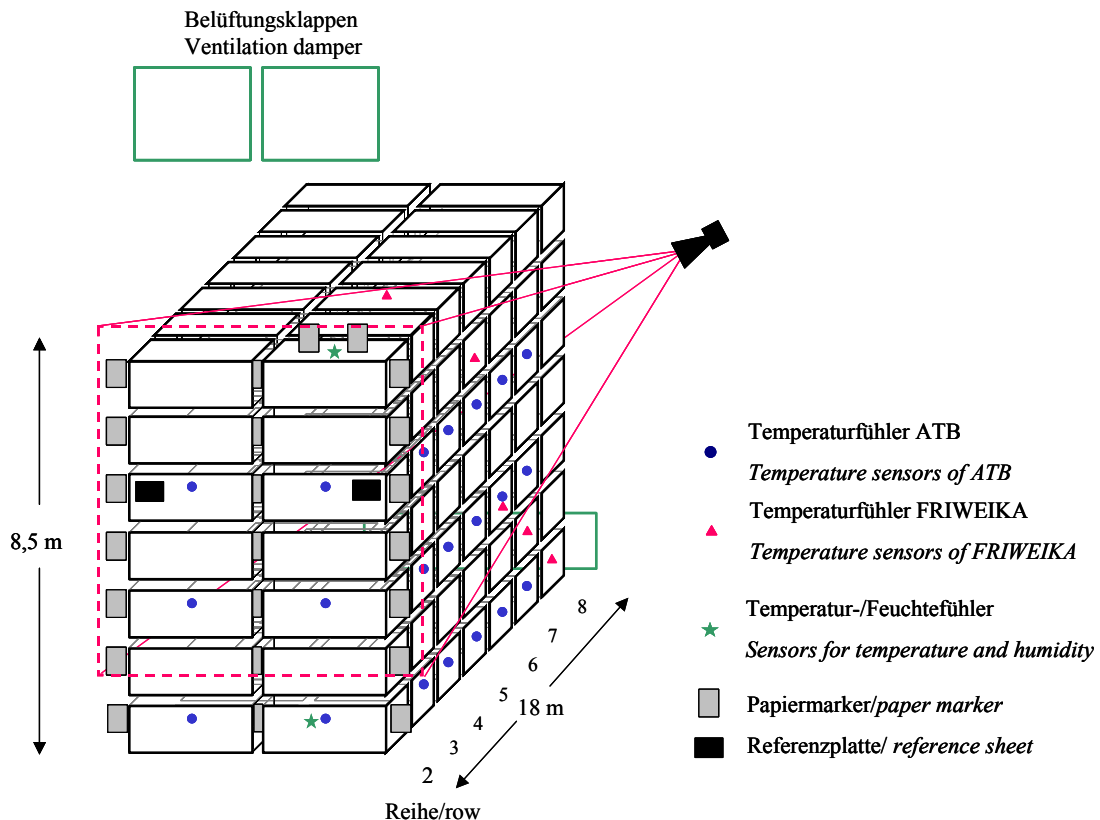



Bild 5: Skizze des stationären Messstands mit den Anordnungen der konventionellen Messtechnik (40 Sensoren für Temperaturen und teilweise für Luftfeuchte) sowie der thermographischen Messtechnik

Auswertung der Thermographie-Daten

Alle Körper senden Wärmestrahlung aus. Das Spektrum und die Intensität dieser Strahlung hängen von der Temperatur ab. Die Wellenlängen der Wärmestrahlung liegen dabei im Infrarot-Bereich entsprechend dem Wellenlängenbereich $\lambda = 8,5$ bis $12 \mu\text{m}$. Die Thermographie ist ein Verfahren, das diese Wärmestrahlung visualisiert. Somit können Temperaturverteilungen auf den Oberflächen beliebiger Körper erfasst werden. Der bei uns interessierende Temperaturbereich ist -10°C bis $+30^\circ\text{C}$.

Bei dem hier verwendeten thermographischen Messverfahren wird die Wärmestrahlung eines Körpers im Infrarot-Wellenlängenbereich erfasst. Die Strahlungsleistung Φ hängt nach dem Stefan-Boltzmannschen Strahlungsgesetz sowohl von der Oberflächentemperatur T als auch vom Emissionsgrad ε der emittierenden Fläche A ab 

$$\Phi = \sigma \varepsilon T^4 A$$

Der Proportionalitätsfaktor σ ist eine Naturkonstante und nach Stefan-Boltzmann benannt: ($\sigma = 5,67032 \cdot 10^{-8} \cdot \text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^4$).

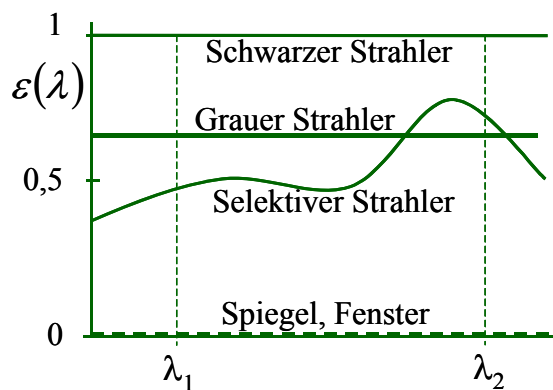
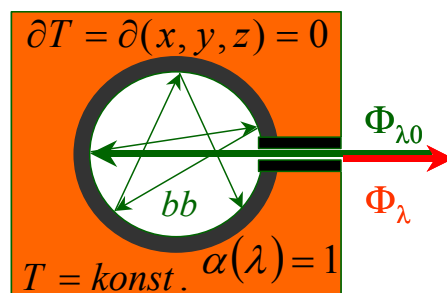


Bild 6: Der ‚Schwarze Strahler‘ ist das Idealbild des Wärmestrahlers. Er absorbiert und emittiert zu 100 % die gesamte Wärmestrahlung (Emissionsgrad $\varepsilon = 1$)

Der Emissionsgrad ε gibt die Beziehung zwischen der spezifischen Ausstrahlung eines Schwarzen Körpers ($\varepsilon = 1$) und der eines realen Körpers bei derselben Temperatur wieder (Bild 6). Der Emissionsgrad $\varepsilon(\lambda, T)$ ist eine Materialkenngröße und im allgemeinen gilt

$$\varepsilon(\lambda, T) < 1.$$

Er hängt weiterhin ab von der Wellenlänge λ , der Temperatur T , dem Material und den Oberflächeneigenschaften sowie dem Abstrahlwinkel des zu untersuchenden Objekts.

Somit muss jedem Gegenstand auf dem erfassten IR-Bild (Bild 4) ein entsprechender Bereich mit einem definierten Emissionsgrad zugewiesen werden, der aus der Literatur (EBERT 1962, KING 1987, SCHUSTER *et al.* 2000, LAROCCA 1996) oder nach eigenen Untersuchungen (HELLEBRAND *et al.* 2002a, HELLEBRAND *et al.* 2002b, HELLEBRAND *et al.* 2001) gewonnen wurde (Tab. 1).

Tabelle 1: Emissionsgrade unterschiedlicher Materialien.

Material	Emissionsgrad ϵ
Kartoffeln	0,85 - 0,92 [EBERT 1962, KING 1987, SCHUSTER <i>et al.</i> 2000, LAROCCA 1996]
Holz	0,87 - 0,91 [EBERT 1962, KING 1987, SCHUSTER <i>et al.</i> 2000, LAROCCA 1996, LUTZ <i>et al.</i> 1997]
Weißes Schreibpapier (Papiermarker)	0,953 [BEUCHE]
Emissionsgradfolie	0,94
Geschwärzte Referenzplatte	0,92 [BEUCHE]
Kupfer poliert	0,04 [LUTZ <i>et al.</i> 1997]

Die verwendete Auswerte-Software ThermaCam® benötigte zur korrekten Temperaturwiedergabe genaue Angaben über die Umgebungsbedingungen der IR-Kamera (Temperatur, Luftfeuchte) sowie die Kameraentfernung zum Messpunkt für jedes gewählte Gebiet.

Kalibrierung des Infrarot-Messverfahrens

Besondere Aufmerksamkeit musste der Kalibrierung des Infrarot-Messverfahrens gewidmet werden. Wie oben erwähnt, wurde die Temperatur der interessierenden Messgebiete aus der Strahlungsleistung, die von der Kamera erfasst wird, errechnet. Die direkte Berechnung der Temperatur nach dem Strahlungsgesetz führt zu einer Fehlinterpretation; daher ist eine Nachkorrektur erforderlich. Zunächst war der tatsächliche Emissionsgrad der betrachteten Oberfläche zu beachten (siehe oben, Tab. 1). Weiterhin erforderte die Kamera Einstellparameter, da die Kamera ihre eigenen Eigenschaften einbezieht, (u.a. Eigenschaften der eingesetzten Optik), sowie die Einflüsse Umgebungstemperatur und

-Feuchte während des Messzeitpunkts, und den Abstand zur Objektoberfläche für eine interne Messwertkorrektur berücksichtigt. Zum direkten Vergleich der Infrarotmesstechnik mit der konventionellen Messtechnik wurden an den Kartoffelkisten zwei Metallplatten mit bekanntem Emissionsgrad als Referenz angebracht, an der Temperaturänderungen mit einem Kontaktthermometer konventionell erfasst werden konnten. In einer älteren Version wurden die Platten als Peltier-Elemente ausgeführt. Derartige Platten lassen sich durch Anlegen einer elektrischen Spannung kühlen oder erwärmen. Die Temperatur an den Platten wurde frei gewählt und über einen Temperaturregler auf einen konstanten Wert gehalten. Die Platten waren mit einer Emissionsfolie mit bekanntem, definierten Emissionsgrad beschichtet. Bei späteren Varianten erübrigte es sich jedoch, die Temperatur konstant zu halten, da ohnehin für die nachfolgend beschriebene Fehlerkorrektur eine variable Referenztemperatur notwendig war (Bild 7). Die Referenzplatten wurden daher nachfolgend einfach als beschichtete Aluminiumplatten ausgeführt, die an den Außenseiten der Kisten derart angebracht waren, dass ein Abstand von ca. 5 cm von den Kistenoberflächen eingehalten wurde. Dies gewährleistete eine freie Belüftung der Platten.

Eine temperaturabhängige Abweichung von bis zu ca. 2 K war ohne die Durchführung von Korrekturmaßnahmen zu beobachten (Bild 8). Da auch die Umgebungstemperaturen einen wesentlichen Einfluss auf das Ergebnis haben, war dieser Einfluss zu kompensieren. Hierzu mussten die Daten über einen längeren Zeitpunkt erfasst werden, mit denen eine Korrelationsanpassung mittels der Gaußschen Fehlerquadrat-Methode durchgeführt wurde. Eine lineare Anpassung über die Abweichung der Messwerte mit dem Mittelwert ergab eine gute Korrekturmöglichkeit (Bild 7).

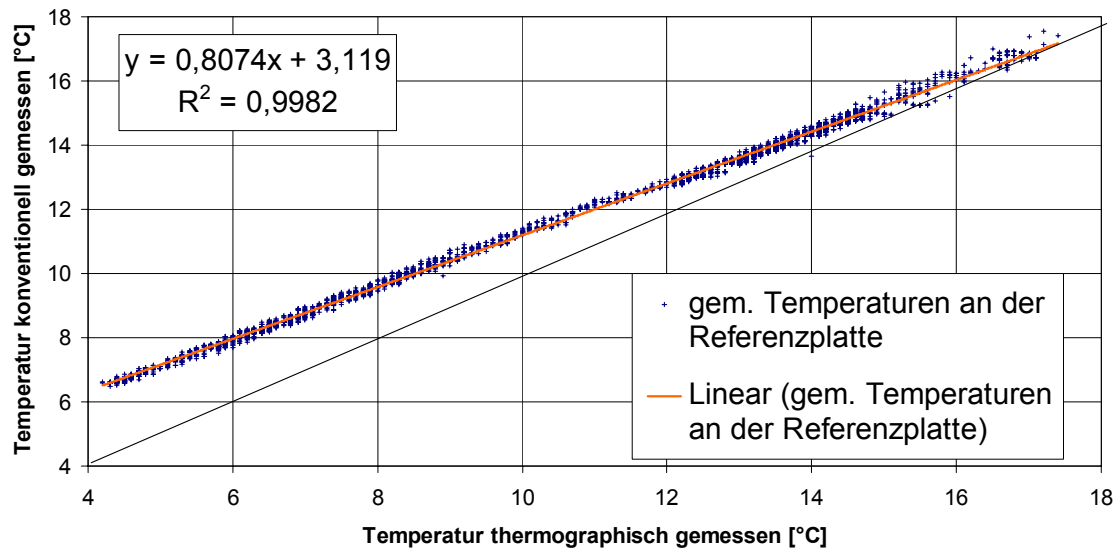


Bild 7. Temperaturerfassung mit konventioneller und thermographischer Messtechnik an einer Referenzplatte sowie Korrektur über Mittelwertabgleich und Regressionsgerade

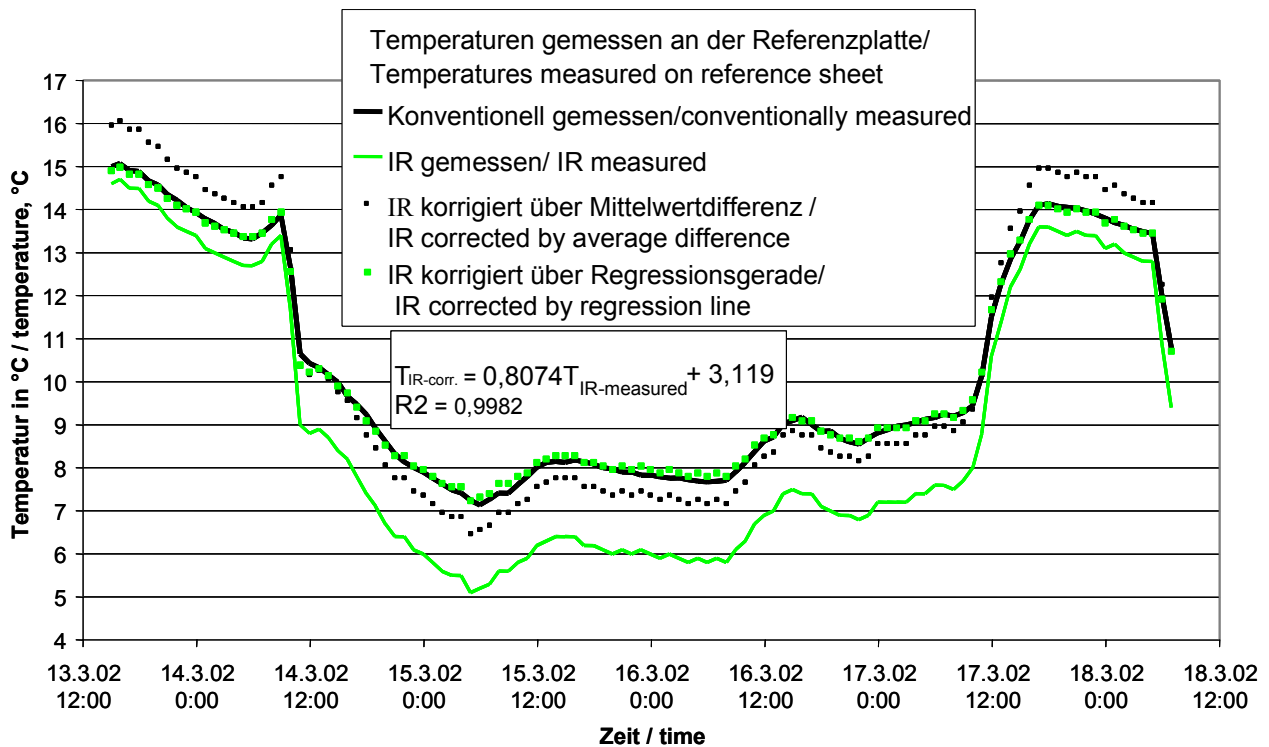


Bild 8: Verlauf der Lagertemperaturen von Kartoffeln in einem frei konvektiv belüfteten Großkistenlager (durchschnittliche Lagertemperatur der Kartoffeln) während der Lagerperiode 2002 / 2003; mittels IR-Kamera ermittelte sowie korrigierte Werte

Gewinnung der Temperaturdaten

Mit Hilfe der entwickelten Software wurden die konventionellen und thermographisch gewonnenen Temperaturdaten vom stationären Messstand im 15 kt-Großkistenlager in Weidensdorf gesammelt (vgl. Bild 1) und zum Institut online übermittelt. Zusätzlich erlaubte die Software Einblicke in den betriebseigenen Klimadaten-Regelungsautomaten mit Angaben der Wetterdaten, Lagertemperaturen und Klappenöffnungszeiten zu nehmen und relevante Daten zur Auswertung herüberzuladen.

Die Klimadaten der Lagerperioden 2002 / 2003 und 2003 / 2004 wurden anschließend ausgewertet, um sie in ein Rechenmodell einbeziehen zu können, das die Vorhersage der Temperaturverteilung im Inneren der Kisten und in den von der IR-Kamera nicht ‚sichtbaren‘ Bereichen ermöglicht. In das räumliche Modell gingen die Temperaturveränderungen bzw. Auswirkungen der Belüftungsvorgänge ein, die an Papiermarkern schnell und verzögert auch an der Gutoberfläche bzw. Kistenoberfläche erkennbar waren. Derzeit wurden reale Messwerte mit einer Anzahl konventioneller Messfühler erfasst und mit den aus der Belüftungsmodellrechnung gewonnenen Werten verglichen und für eine optimierte Belüftungssteuerung verrechnet.

Aus den Untersuchungen konnte bereits aufgezeigt werden, dass unterschiedliche Belüftungsvorgänge wie Aufwärmen und Abkühlen durch die Thermographie anschaulich in Filmsequenzen visualisiert werden konnten. Es zeigte sich, dass Papierfahnen (Bild 2, 4) schnell auf Temperaturänderungen reagieren, die durch die Luftströmungen entstehen, sobald über die Belüftungsklappen Frischluft zugeführt wurde. Durch die geringen Wärmekapazitäten und definierten Emissionsgrade von Papierfahnen konnten mittels derartiger ‚Papiermarker‘ schnelle Temperaturänderungen und damit Luftströmungsvorgänge im IR-Kamerabild sichtbar gemacht werden. Holzfronten und Referenzplatte reagierten ebenfalls schnell auf Temperaturänderungen als Kartoffeloberflächen, aber langsamer als die Papiermarker. Belüftungsbedingte Temperaturänderungen im Lagerraum wurden nach entsprechend längeren Zeitperioden im Inneren des Lagerguts nachgewiesen.

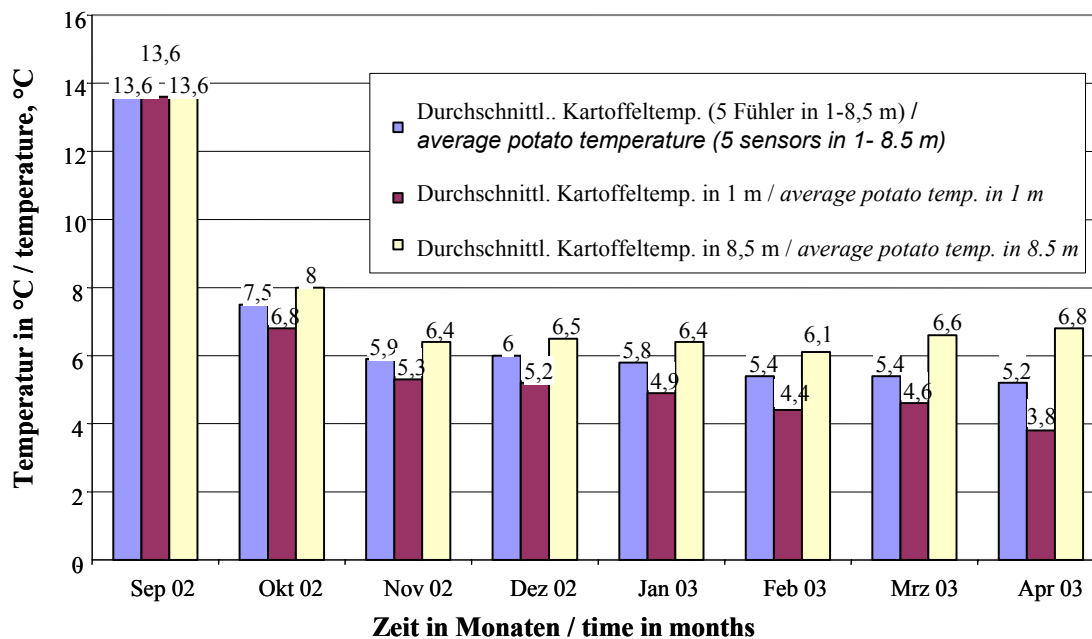


Bild 9: Temperaturverläufe im Lager während einer Lagerperiode; gegen Ende der Lagerperiode nahmen die Temperaturunterschiede zwischen den unteren und oberen Positionen im Stapel zu

2. Ergebnisse

Die Untersuchungsergebnisse zeigten, dass sich Infrarotbilder grundsätzlich zur Gewinnung von Datensätzen für die Klimasteuerung eignen. Eine großräumige Überwachung eines Lagerhauses ist aber bislang nur begrenzt möglich, zum einen da der Bildausschnitt der IR-Kamera zur Erfassung großer Lagerflächen eingeschränkt ist (Bild 2), zum anderen ist die Auswertung der IR-Bilder aufwendig. Bei der Umwandlung der IR-Daten in exakte Temperaturen über die ThermaCam® Software sind einige Faktoren zu berücksichtigen, um die korrekte Temperatur zur ermitteln:

- Genaue Angaben der Umgebungsbedingungen der IR-Kamera (Temperatur und Luftfeuchte);
- Eingabe des entsprechenden Emissionsgrades (für Kartoffeln, Kisten, usw. unterschiedlich) für jedes ausgewählte Temperaturgebiet auf dem IR-Bild;
- Angabe der Entfernung von der Kamera zum Messpunkt für jedes gewählte Gebiet;
- Vergleich der konventionellen und thermographischen Messungen an einer Referenzfläche;
- Korrektur der Thermographiedaten über eine Ausgleichsgerade.

Weiterhin muss berücksichtigt werden, dass die gemessene Oberflächentemperatur des Lagergutes nur bedingt die Solltemperatur des gesamten Lagerguts repräsentiert. Damit Infrarotkameras dennoch als Temperaturregeber für die Klimasteuerung dienen können, müssen während der Untersuchungsphase noch konventionell erfasste Temperaturdaten im Stapelinneren hinzugezogen werden. Nur über geeignete Algorithmen können aus den jeweiligen Oberflächentemperaturen die Temperaturen im Stapelinneren berechnet werden. Hierfür werden mit Hilfe der IR-Kamera, welche die Oberflächentemperaturen ausgedehnter Lagerbereiche erfasst und Belüftungsvorgänge visualisiert, sowie mit ergänzenden konventionellen Thermofühlern Temperaturverläufe zwischen dem Kartoffelstapelinneren und der Oberfläche ermittelt. Aus den gewonnenen Temperaturdaten können die Strömungsverläufe ermittelt und ein entsprechendes 3D-Modell zur Vorhersage der Temperaturverteilung im Stapelinneren aufgestellt werden.

Bislang arbeiten thermodynamische Modelle der Stoff- und Wärmeaustauschvorgänge zwischen den Kartoffelschichten und der durchströmenden Luft bei *gleichförmigen* Strömungen. Mit den IR-Daten sind die Auswirkungen der Luftströmungen an den Temperaturänderungen auf der Oberfläche der Kartoffelkisten erkennbar und die Temperaturgradienten messbar. Ein neues zu erstellendes 3D Modell berücksichtigt die *realen* Luftströmungen zur Berechnung der Temperaturen im Inneren der Kisten. Unter Berücksichtigung dieser Modellrechnung ist die Klimasteuerung zur Belüftung des Kartoffellagers zu verbessern. Die Luftströmungsvorgänge können derart über die Klappenansteuerungen beeinflusst werden, dass eine möglichst gleichmäßige Temperaturverteilung im Lager gewährleistet wird.

Die bisherigen Arbeiten zeigten, dass die Anforderungen an die IR-Kamera als quantitativ exakter Temperaturregeber für eine optimierte Belüftungssteuerung nach dem 3D Belüftungsmodell hoch sind. Für diese Aufgabenstellung werden daher eine Hochleistungskamera mit anspruchsvoller Technik sowie ein Computer für die Steuerung und Übertragung des Datenmaterials eingesetzt.

Betriebswirtschaftliche Bewertung

Aussagen zu den möglichen betriebswirtschaftlichen, umwelt-relevanten und technologischen Konsequenzen der Anwendung von Infrarotkameras in Lagerhäusern werden benötigt, um die möglichen Potenziale frühzeitig zu untersuchen und darzustellen. Für die be-

triebswirtschaftliche Bewertung ist vor allem zu klären, inwieweit die derzeit erforderlichen hohen Investitionen für die eingesetzte Technologie rentabel sind, bzw. ob davon auszugehen ist, dass die erforderlichen Investitionen in absehbarer Zeit geringer werden.

Die Kosten hierfür sind derzeit noch hoch und belaufen sich z.B. für die verwendete Kamera inklusive Zubehör auf netto 66.125.- Euro. Die entsprechenden Jahreskosten wurden mit ca. 11.000 € berechnet. Geht man von einem durchschnittlichen Kartoffelpreis von 8,36 €/dt aus, so müsste für ein Lager in der Größenordnung von 15.000 Tonnen, das zu 80 % belegt ist, der Einsatz der Technologie zu einer Verringerung des Lagerverlustes um rund 1,2 % führen, damit sich die Investition in diese Technik lohnt.

Geht man von den Daten von SCHUHMAN (2002) aus, dass in vielen Betrieben durch Lüftungsfehler bzw. falsche Belüftung 2-3 % Schwund/Verluste im Kartoffellager entstehen, so erscheinen diese Werte zwar hoch, aber durchaus im Rahmen des zumindest theoretisch möglichen Einsparpotenzials. Bei der Preisentwicklung für die benötigten Hochleistungskameras kann kurz- und mittelfristig trotz einer erheblichen Dynamik des Gesamtmarktes nicht mit wesentlich reduzierten Kosten gerechnet werden.

Gelingt es mit Hilfe der Thermographie FKL-Lager ‚optimal‘ zu steuern, so ist mit einer erheblichen Umweltentlastung vor allem durch die Einsparung von elektrischer Energie zu rechnen, im Gegensatz zu zwangsbelüfteten Lagern. Die Höhe variiert stark je nach jahresbedingtem Belüftungsbedarf. Es kann damit gerechnet werden, dass für ein 15 kt-Lager Primärenergie in Höhe von 580...2.830 GJ, klimarelevante Gase in Höhe von 36...179 t CO₂-Äq., ein Versauerungspotenzial von 76...308 kg / SO₂-Äq. sowie ein Eutrophierungspotenzial von 22...38 kg / P₃O₄-Äq. je Jahr eingespart werden können.

Es besteht auch die Möglichkeit, die IR-Kamera beratend bei der qualitativen „Schnellprognose“ von Kartoffellagern einzusetzen, so dass sich die Kosten der Kamera über verschiedene Lager verteilen würden und der Einsatz je Kartoffellager günstiger wäre. Bei diesem Ansatz könnten Fragen wie „Welche Temperaturverteilung liegt im Lager vor?“, „Können/müssen Maßnahmen ergriffen werden, um das Lagerklima zu verändern?“ beantwortet werden. Auch ist ein Vergleich verschiedener Lagerbelüftungstypen möglich.

Es ist zu erwarten, dass eine optimierte Belüftungssteuerung, in die zusätzlich ein mit IR-Daten gewonnenes 3D Belüftungsmodell entwickelt wird, zu einer besseren Erhaltung der Produktqualität im FKL-Lager führt und damit auch zu einer deutlichen Umweltentlastung beiträgt.

3. Ausblick

Die Thermographie eröffnet neue Aspekte, Klimatisierungsprozesse zu visualisieren und auszuwerten (GOTTSCHALK 2002). Durch die Anwendung der Thermographie sind nun Möglichkeiten gegeben, Modellrechnungen besser zu verifizieren. Sie muss jedoch als eines von mehreren Analysemitteln angesehen werden. Auch erfordert die Auswertung der IR-Bilder viel Erfahrung. Eine Korrektur der thermographisch ermittelten Temperaturwerte ist für eine korrekte quantitative Temperaturerfassung unerlässlich.

Wirtschaftliche Erfolgsaussichten zur Nutzung der Thermographie als Temperaturregler in Großkistenlagern hängen in großem Maße von der relativen Vorzüglichkeit des Verfahrens im Vergleich zu den konkurrierenden konventionellen Verfahren ab. Aufgrund des relativ hohen Investitionsbedarfs für die Infrarot-Kamera und die zusätzlich benötigte Ausstattung und Personalbedarf, wird das Verfahren unter den herrschenden Rahmenbedingungen nur für große Lager von Interesse sein können. Hier können aber die Lager mit optimierter Belüftungssteuerung die Kosten der Kamera durch eine Schwundreduzierung von 1,2 % innerhalb von 7 Jahren amortisieren (GOTTSCHALK *et al.* 2003).

4. Literatur

BEUCHE H. mündliche Mitteilungen

EBERT H (1962) Physikalisches Taschenbuch (in German, Handbook of Physics). Vieweg & Sohn Braunschweig, pp 349-354

GOTTSCHALK K (2002) Kartoffellagerung – Methoden und Trends bei der Klimaregelung und Luftströmung. Kartoffelbau 53 (12), S. 460-463

GOTTSCHALK K, HELLEBRAND HJ, SCHLAUDERER R, GEYER S, BEUCHE H, FICHT I, JACOBS H, RICHTER IG (2003) Anwendung der Thermographie zur Optimierung der Belüftungssteuerung bei der Lagerhaltung landwirtschaftlicher Produkte. Tagungsband, Statusseminar High-Tech Innovationen für Verfahrensketten der Agrarproduktion, IHK Potsdam, 29.-30.09.2003

- HELLEBRAND HJ, 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 HJ, BEUCHE H, LINKE M (2002a)** Thermal imaging. A promising high-tech method in agriculture and horticulture. In "Physical Methods in Agriculture - Approach to Precision and Quality" edited by J. BLAHOVEC and M. KUTILEK, Kluwer Academic/Plenum Publishers (ISBN 0-306-47430-1), New York, p. 411-427
- HELLEBRAND HJ, BEUCHE H, LINKE M (2002b)** Berührungslose Temperaturbestimmung (Remote temperature measurement). ATB Jahresbericht, 50-51, on-line available:
<http://www.atb-potsdam.de/hauptseite-deutsch/ATB-Schriften/Jahresberichte/Jahresberichte/Jabe2002/Jahresbericht-2002-gesamt.pdf>
- KERN A, KRUMBIEGEL D, PÖTKE E, SCHUHMAN P (2002)** Qualitätsschonende Lager- und Lüftungssysteme. Der Kartoffelbau 53: 226-233
- KING WJ (1987)** Emissivity and absorption, in R C Weast ed, Handbook of Chemistry and Physics. CRC Press, Boca Raton (Florida), pp E-393 - E-395
- LUTZ P ET AL (1997)** Lehrbuch der Bauphysik, B.G. Teubner Stuttgart, 4. Auflage
- LARocca AJ (1996)** Artificial Sources, in "Sources of Radiation", editor ZISSIS GJ, vol. 1 of "The Infrared & Electro-Optical Systems Handbook" (8 volumes), exec. eds. ACCETTA JS and SHUMAKER DL, ERI Ann Arbor (Michigan) and SPIE Optical Engineering Press Bellingham (Washington), pp 49-135
- SCHUHMAN P (2002)** Zur Wirtschaftlichkeit der Lagerung von Kartoffeln. Juli 2002.
www.landwirtschaft-mv.de/k-lager_mv
- SCHUSTER N, KOLOBRODOV VG (2000)** Thermal imaging. Wiley-VCH Berlin Weinheim New York, 339 p, p 59



Ein Beitrag zur computergestützten Erfassung der Blattmorphologie bei Möhre (*Daucus carota* L.)



R. Ahne, Th. Nothnagel, J. Franke

Institut für Gartenbauliche Kulturen, Bundesanstalt für Züchtungsforschung an Kulturpflanzen
Neuer Weg 22 / 23, D 06484 Quedlinburg

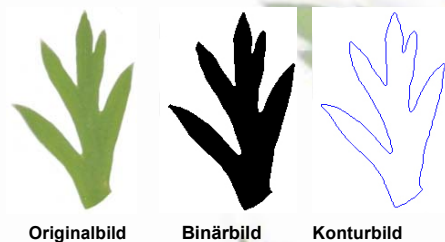
Die visuelle Erfassung der Blattmerkmale erfolgt gegenwärtig nach einem üblichen Boniturschlüssel für eine Sortenzulassung (IPGRI und OPOV) (Beispiel auf der rechten Seite). Bedingt durch die Feingliederung des Laubblattes der Möhre ist die computergestützte Analyse sehr kompliziert und anspruchsvoll. Weiterhin ist die Variationsbreite der Blattform bei Sorten- und Wildmaterial erheblich. Für eine objektive Merkmalerfassung der Blätter sind daher neue analytische Wege zu beschreiten. Einfache geometrische Strukturen führen zu keinem brauchbaren Ergebnis. Es wird das Gesamtobjekt in die Bildanalyse und zur Identifizierung einbezogen. Durch den Einsatz der elliptischen Fourieranalyse lassen sich komplexe Merkmale mit hinreichender Genauigkeit ableiten (untere Bildreihe).



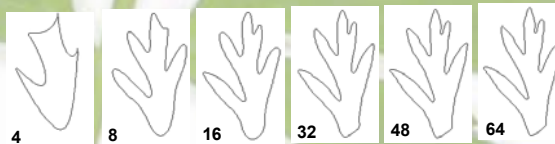
Einteilung der Blattstruktur in "fein", "mittel" und "grob"

Elliptische Fourier - Analyse an geschlossenen Objektkonturen

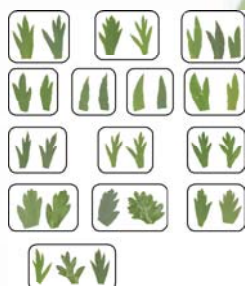
Die elliptische Fourieranalyse geschlossener Objektkonturen (Kuhl und Giardina 1982) wurde zur Charakterisierung von Blattsegmenten angewendet. Mit zunehmender Koeffizientenzahl können detailliertere Strukturen approximiert werden. Für die Blattanalyse bei Möhren sind 32 Koeffizienten ausreichend (siehe Beispiel auf rechter Seite).



Originalbild Binärbild Konturbild
Bearbeitungsschritte auf der Basis von Bildverarbeitungsoperationen



Die Wirkung der Bildrekonstruktion mit unterschiedlichen Fourierkoeffizienten

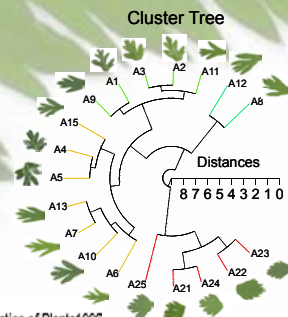
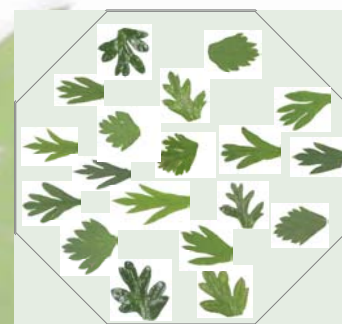


Clusterbildung durch euklidische Distanz mit Fourierkoeffizienten

Die visuelle Bonitur soll durch ein objektives Verfahren ersetzt werden. Auf der Basis der elliptischen Fourierkoeffizienten, als Eingangsdaten für das Statistikprogramm SYSTAT (Version 9) wird eine hierarchische Clusterbildung vorgenommen. Es werden von 32 elliptischen Fourierkoeffizienten mit Hilfe der euklidischen Distanz die centroiden Cluster berechnet.

Das linke Bild zeigt das Ergebnis der vorwiegend auf größte Ähnlichkeit gesteuerten Paarbildung des Clusterverfahrens.

Das rechte Bild zeigt im Ergebnis die Clusterbildung in radialer Baumstruktur mit den zugehörigen Bildsegmenten.



IPGRI: Descriptors for wild and cultivated Carrots (*Daucus carota* L.). International Plant Genetic Resources Institute 1998
UPOV: Guidelines for the Conduct of Tests for Distinctness, Homogeneity and Stability. International Union for the Protection of New Varieties of Plants 1990
Kuhl, F. P. : C. R. Giardina: Elliptic Fourier Features of a Closed Contour. Computer Graphics and Image Processing 18, 236-258 (1982)

Spektrale Signatur und Qualität von Äpfeln während der Fruchtentwicklung am Baum

Spectral signature and quality of apples during fruit development on the tree

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

Zusammenfassung: Für die Bestimmung des optimalen Erntezeitpunktes sowie die Beurteilung der Verkaufsqualität werden exakte Aussagen über die Entwicklung und Reife der Früchte benötigt. Mit Hilfe spektralfotometrischer Messungen im sichtbaren und nahinfraroten Wellenlängenbereich lassen sich gleichzeitig mehrere qualitätsrelevante Parameter schnell und nichtdestruktiv bestimmen. Zur Untersuchung der Entwicklung der Grund- und der Deckfarbe bei ‚Elstar‘ vor und während der Ernte wurde ein tragbares optisches Spektrometer mit drahtloser Datenübertragung eingesetzt. Die Pigmententwicklung wurde mittels eines Chlorophyll- und eines Anthozyanindex bestimmt. Während der Chlorophyllindex kontinuierlich abnimmt, steigt der Anthozyanindex zunächst mehr oder weniger kontinuierlich an und fällt zum Ende hin ab. Die Eignung dieser Indizes zur Bestimmung des optimalen Erntetermins ist noch zu prüfen.

Deskriptoren: Apfel, Fruchtentwicklung, Reife, Pigmente, spektrale Signatur, Erntezeitpunkt

Summary: *To determine the optimum harvest date as well as the quality for sale, exact data on development and maturity of fruits are required. By using of spectral optical measurements within visible and near-infrared wavelength range, several parameters can simultaneously be determined in rapid and non-destructive way. To study the development of ground and blush colour on ‘Elstar’ apples before and during harvest, a portable optical spectrometer with wireless data transfer has been used. The development of pigments has been determined by means of a chlorophyll and a anthocyanin index. The chlorophyll index decreases continuously, while the anthocyanin index shows at first increasing and at last decreasing course. The suitability of these indices to determine the optimum harvest date has to be examined yet.*

Keywords: *Apple, fruit development, maturity, pigments, spectral signature, harvest date*

1. Problemstellung

Die Qualität von Äpfeln wird an Hand äußerer Merkmale wie Fruchtgröße, -form und -farbe sowie über den Gehalt an wertgebenden Inhaltsstoffen wie Zucker, Säure und Vitaminen beurteilt. Zur Zeit beschränken sich Mindestanforderungen an die innere Qualität auf Zuckergehalt und Fruchtfleischfestigkeit. Um eine hohe Qualität zu erreichen, müssen die Früchte bei optimaler Reife entsprechend der vorgesehenen Verwendung gepflückt und gegebenenfalls gelagert werden. Die Fruchtreifung lässt sich an der Bildung von Ethylen, am Abbau von Stärke und Chlorophyll sowie am Weichwerden des Fruchtfleischs feststellen. Die gebräuchlichste Methode zur Bestimmung des optimalen Erntezeitpunkts bei Äpfeln ist der Reifeindex nach Streif, welcher auf der Messung der drei Merkmale Fleischfestigkeit, Zuckergehalt und Stärkeabbauwert beruht (HÖHN *et al.* 1999). Diese Merkmale lassen sich zwar nur destruktiv, aber auch durch den Praktiker mit relativ einfachen Hilfsmitteln bestimmen. Um reproduzierbare Aussagen zu erhalten, sind allerdings Erfahrung und Übung notwendig. Es wird auch darauf hingewiesen, dass die Beurteilung des Stärkeabbaus durch den Einfluss zahlreicher Störfaktoren erschwert wird, insbesondere durch die Behangsdichte und die Witterung. Darüber hinaus muss auch die Position der Früchte in der Baumkrone durch geeignet geplante Probenahme berücksichtigt werden. Die vorliegenden Erfahrungen besagen, dass von Jahr zu Jahr und von Standort zu Standort bei der gleichen Sorte Unterschiede auftreten. Da die Früchte einer Sorte nicht gleichmäßig reifen, wird im Hinblick auf die Lagerung an Stelle eines optimalen Pflückzeitpunktes die Angabe eines Erntefensters bevorzugt (HÖHN *et al.* 1999).

Der für das Aufhellen der Grundfarbe verantwortliche Abbau von Chlorophyll sowie die Ausbildung der für viele Sorten qualitätsrelevanten Deckfarbe durch Anthozyan werden in der Praxis mangels geeigneter technischer Hilfsmittel bisher nicht quantitativ erfasst. Teilweise existieren sortenspezifische Farbtafeln. Eine nichtdestruktive Farbmessung nach den gängigen Methoden reicht im allgemeinen nicht aus, weil sich Grund- und Deckfarbe damit nicht trennen lassen.

Demgegenüber bieten spektralfotometrische Messungen im sichtbaren und nah-infraroten Wellenlängenbereich grundsätzlich die Möglichkeit für eine getrennte nichtdestruktive Bestimmung der unterschiedlichen Pigmente und darüber hinaus weiterer Inhaltsstoffe (MERZLYAK *et al.* 2003, PARK *et al.* 2002). Durch Bereitstellung von kostengünstigen für den

Obstbau geeigneten Geräten könnte die Fruchtentwicklung und –reife schneller und präziser als bisher erfasst werden.

2. Zielsetzung

Seit mehreren Jahren werden von der Industrie relativ kostengünstige miniaturisierte Spektrometermodule für den Wellenlängenbereich von 300 bis 1100 nm hergestellt. Mit Hilfe eines solchen Moduls und kommerziell verfügbaren OEM Baugruppen wurde ein leicht tragbares Spektrometer mit Glasfasersonde aufgebaut (TRUPPEL 2003). Die Übertragung der gemessenen Daten erfolgt drahtlos zu einem PC. Der spezifisch für partielle Lichttransmission entwickelte Messkopf ermöglicht eine gute mechanische Ankopplung an den Apfel. Er enthält eine ringförmige Anordnung von Mini-Glühlampen zur Beleuchtung der Fruchtoberfläche und mittig den optischen Eingang in die zum Spektrometer führende Glasfaser (Bild 1). An der aufgeschnittenen Frucht ist erkennbar, wie das Licht der Glühlampen in das Fruchtfleisch eindringt und gestreut wird. Der in die Mitte des Messkopfs zurückgestreute Teil des Lichts wird von der Glasfaser aufgenommen und spektral ausgewertet. Dadurch kommen in der spektralen Signatur innere Qualitätsmerkmale stärker zur Geltung als bei Messungen der Lichtreflexion nur an der Fruchtoberfläche.



Bild 1: Sensorkopf für partielle Lichttransmission am Apfel

Dieses Spektrometersystem wurde zur Messung der spektralen Signatur ein und derselben Früchte während der Entwicklung und Reife am Baum eingesetzt. Gegenstand dieses Beitrags ist die Bewertung der Messergebnisse dieses Spektrometers zur Erfassung der Pigmentveränderungen an den Früchten.

3. Material und Methoden

In einer zweijährigen Ertragsanlage in der Region Werder bei Berlin wurden die spektral-optischen Signaturen von ‚Elstar‘-Äpfeln während der Erntesaison 2003 gemessen (ROHRBACH *et al.* 2004). Mehrere Bäume von zwei benachbarten Reihen inmitten des Bestandes wurden ausgewählt und an diesen je zehn Früchte mit nummerierten Etiketten versehen. An einem auf jeder Frucht markierten Messfeld wurden wiederholt Messungen während der Fruchtentwicklung am Baum durchgeführt. Die Messungen erfolgten zunächst im wöchentlichen, später im halbwochentlichen Rhythmus. Bei einigen Bäumen wurden bis zu zwölf spektralfotometrische Messungen im Zeitraum vom 6. August bis 22. September durchgeführt. An jedem zweiten Messtermin wurden auch Fotos der vermessenen Früchte aufgenommen (Bild 2). Im vorliegenden Artikel wurden die Untersuchungen der Früchte von zwei Bäumen dargestellt, die sich hinsichtlich ihres Fruchtbehangs unterschieden. Nach Abschluss der Messungen am Baum wurden die Früchte gepflückt und im Labor Referenzwerte der Fruchtqualität (Fruchtvolumen, Fruchtmasse, Stärkeindex, Brixwert und Festigkeit) ermittelt. Teilweise waren die Früchte schon überreif und konnten nicht vollständig ausgewertet werden.

Für die Messungen an den Früchten wurde das in der Zielsetzung beschriebene tragbare Spektrometersystem eingesetzt. Der Operator trug den einhändig bedienbaren Messkopf in der rechten Hand und legte ihn zur Messung an die Oberfläche der zu messenden Frucht an. Durch Knopfdruck wurde die Messungen ausgelöst. Der Messvorgang dauerte etwa drei Sekunden. Das von der Glasfaser aufgenommene aus der Frucht zurückgestreute Licht wurde zu einer am Unterarm fixierten Box geführt, in der sich das miniaturisierte Spektrometermodul befand. Von dort gelangten die elektronischen Messsignale per Kabel zur Steuerelektronik, die in einem Rucksack getragen wurde. Im Rucksack befand sich neben der batteriegestützten Stromversorgung ein Funkmodul zur Übertragung und Speicherung der spektralfotometrischen Messdaten zu einem Funkempfänger am PC Notebook, welches in bis zu 30 m Entfernung in einem PKW in der Fahrgasse stationiert war. Unmittelbar vor jeder Messung wurde vom Operator die Identifikationsnummer der Frucht auf das Mikrofon eines Head-Set gesprochen, wobei diese Information über ein zweites drahtloses Funksystem ebenfalls zum PC übertragen und dort gespeichert wurde. Über diese Audioverbindung wurden umgekehrt vom PC aus automatisch Statusmeldungen zum Messablauf auf die Kopfhörer des Head-Set zum Operator übertragen.

Zur Auswertung der spektraloptischen Daten im Hinblick auf die Pigmententwicklung wurden der Chlorophyllindex und der Anthozyanindex nach MERZLYAK *et al.* 2003 berechnet. Für den Chlorophyllindex IC wurde die Formel $IC = R(800 \text{ nm})/R(700 \text{ nm})$, und zur Berechnung des Anthozyanindex IA die Formel $IA = R(800 \text{ nm})/R(550 \text{ nm}) - R(800 \text{ nm})/R(700 \text{ nm})$ verwendet. Hierbei bedeutet R die relative Intensität des reflektierten Lichts bei der angegebenen Wellenlänge, kalibriert auf Weißstandard.



Bild 2: Ausfärbung ein und derselben Frucht während der Entwicklung am Baum in der Zeit vom 13.08. bis 22.09.2003

4. Ergebnisse und Diskussion

Die Fotos der Entwicklung einer Frucht am Baum lassen erkennen, dass bereits am 22.08. erste Anzeichen der Deckfarbe sichtbar wurden. Am 04.09. lag schon eine großflächige Ausbildung der Deckfarbe vor, die danach noch an Intensität zunahm und schließlich am 22.09. von einer ausgeprägten Wachsschicht überzogen war.

Die Entwicklung der spektralen Signatur der in Bild 2 gezeigten Frucht mit zunehmender Reife widerspiegelt sehr deutlich die Zunahme der relativen Lichtintensität im Wellenlängenbereich zwischen 650 und 700 nm wegen des abnehmenden Chlorophyllgehalts (Bild 3). Das damit verbundene Aufhellen der grünen Grundfarbe wird durch den Chlorophyllindex $R 800 \text{ nm} / R 700 \text{ nm}$ (MERZLYAK *et al.* 2003) angezeigt (Bild 4). Der Index nahm während der Reife kontinuierlich ab. Die einzelnen Früchte unterschieden sich im Verlauf ihrer Indizes. Diese Unterschiede könnten durch die unterschiedliche Fruchtposition im Baum bedingt sein, was jedoch im Rahmen dieser Arbeit nicht systematisch untersucht wurde.

Bei einem Baum mit hohem Fruchtbehang (Baum 1: 79 Früchte) verlief erwartungsgemäß die Abnahme des Chlorophyllindex langsamer als bei einem mit niedrigem Fruchtbehang (Baum 2: 22 Früchte). Vergleicht man die Kennlinien des „frühesten“ und des „spätesten“ Apfels, so ergibt sich ein Erntefenster von etwa drei Wochen. Dies ent-

spricht auch den Erfahrungen aus der Praxis, denn ‚Elstar‘ wird mehrmals geerntet. Der Einfluss des Fruchtbehangs auf die Entwicklung und den Reifefortschritt der Früchte der beiden Bäume wird auch an Hand der Ergebnisse der Laboranalysen deutlich (Tafel 1). Im Labor konnten von Baum 1 alle zehn spektral gemessenen Früchte, von Baum 2 jedoch wegen Überreife und teilweisen Verderbs nur fünf der ursprünglichen zehn Früchte analysiert werden.

Tafel 1: Mittelwerte der im Labor bestimmten Qualitätsparameter der Früchte von zwei Bäumen

Parameter	Baum 1	Baum 2
Fruchtvolumen, cm ³	175	246
Frischmasse, g	145,1	197,0
Stärkeindex	9,9	9,6
Brixwert	14,0	15,6
Fruchtfleischfestigkeit, N	61,3	48,5

Die sortentypisch während der Reife ausgebildete rote Deckfarbe wird durch den Anthozyanindex $R\ 800\ \text{nm}/R\ 550\ \text{nm} - R\ 800\ \text{nm}/R\ 700\ \text{nm}$ (MERZLYAK *et al.* 2003) angezeigt (Bild 5). Auch hier waren individuelle Unterschiede zwischen den Früchten eines Baums festzustellen. Wie schon beim Chlorophyllabbau, war ein Entwicklungsvorsprung bei Baum 2 zu sehen, wobei dieser Index jedoch nicht kontinuierlich verlief, sondern gegen Ende eine rückläufige Tendenz zeigte. Die beobachtete kontinuierlich zunehmende Tendenz der an Hand der Fotos sichtbaren Deckfarbenausprägung steht im Gegensatz hierzu. Der Grund für diesen Widerspruch wird in einer ungenügend angepassten Berechnungsformel für den Anthozyanindex an die Sorte ‚Elstar‘ gesehen. MERZLYAK *et al.* 2003 hatten andere Sorten untersucht, die möglicherweise starke Unterschiede zu ‚Elstar‘ aufwiesen.

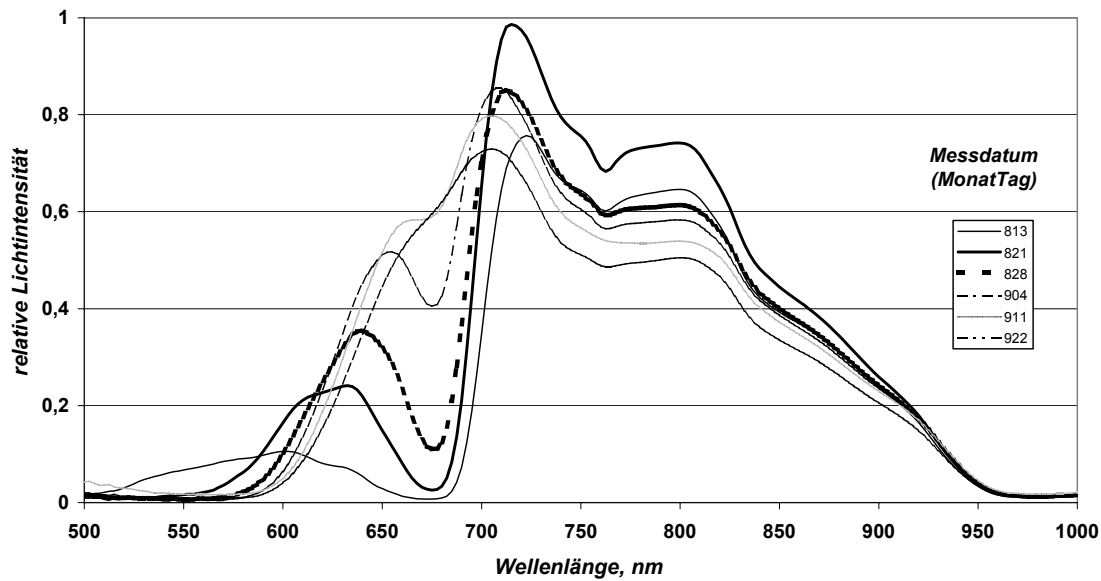


Bild 3: Gang der spektralen Signatur der in Bild 2 gezeigten Frucht

5. Schlussfolgerungen

Die gemessenen spektralen Signaturen und die Indizes für den Chlorophyll- und Anthozyanengehalt zeigen im sichtbaren Wellenlängenbereich mit der Reife verbundene Veränderungen der Pigmentgehalte sensitiv an. Eine sortenspezifische Anpassung der Indizes zur Bewertung der Pigmentgehalte ist jedoch erforderlich. Inwieweit diese Indizes zur Bestimmung des optimalen Erntetermins geeignet sind, ist durch weitere entsprechende umfangreiche Untersuchungen zu überprüfen.

Das eingesetzte Messverfahren bietet ein hohes Potenzial zur Erfassung der spektraloptischen Eigenschaften von Früchten und zur objektiven Beurteilung ihrer Qualität.

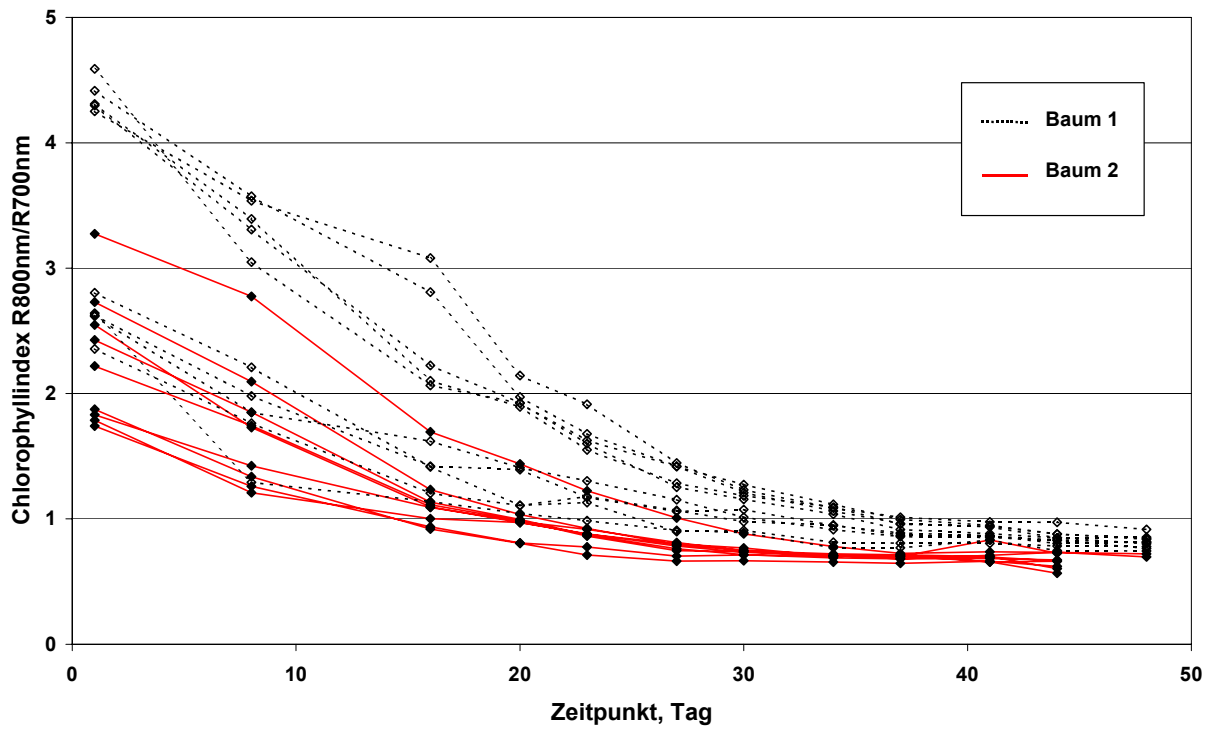


Bild 4: Verlauf der Chlorophyllindizes der Früchte der beiden untersuchten Bäume

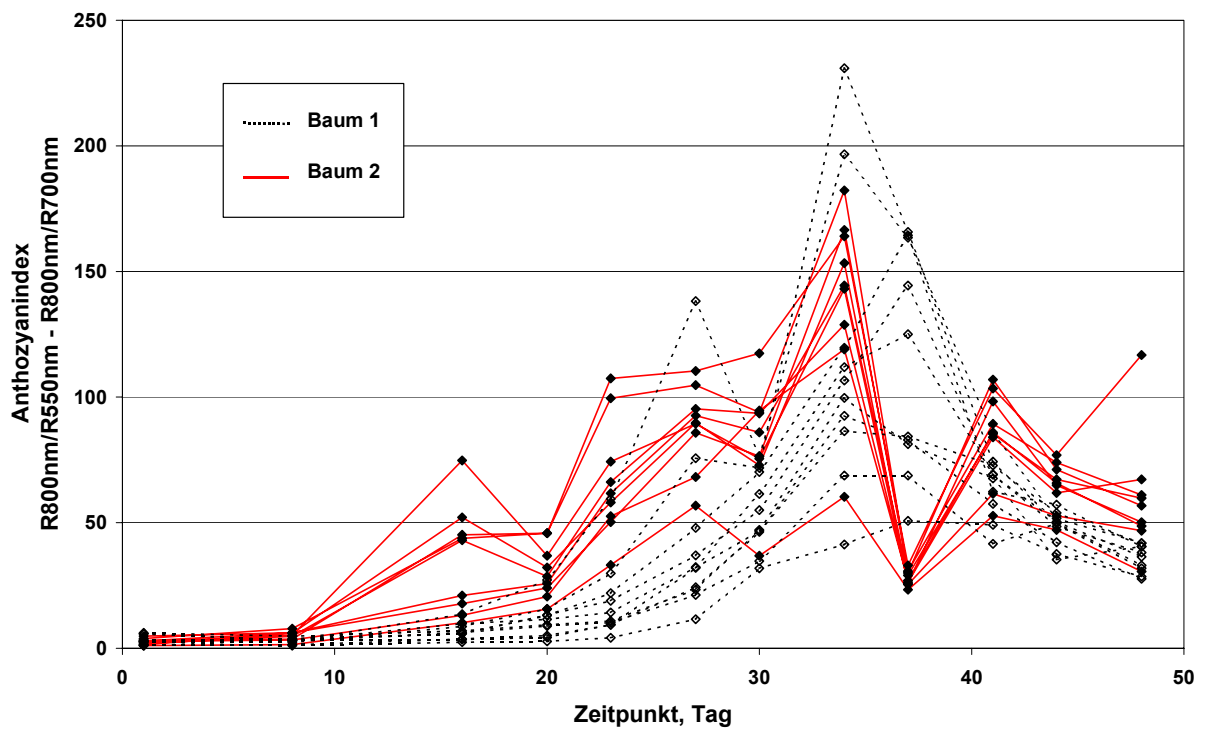


Bild 5: Verlauf der Anthozyanindizes der Früchte der beiden untersuchten Bäume

6. Literatur

HÖHN E, DÄTWYLER D, GASSER F, JAMPEN M (1999) Streifindex und optimaler Pflückzeitpunkt von Tafelkernobst. Schweiz. Z. Obst-Weinbau, Nr.18: 443-446

MERZLYAK MN, SOLOVCHENKO AE, GITELSON AA (2003) Reflectance spectral features and non-destructive estimation of chlorophyll, carotenoid and anthocyanin content in apple fruit. Post-harvest Biology and Technology 27: 197-211

PARK B, ABBOTT JA, LEE K-J, CHOI C-H, CHOI K-H (2002) Near infrared spectroscopy to predict soluble solids and firmness in apples. ASAE paper no. 02-3066

ROHRBACH A, ZUDE M, TRUPPEL I, HEROLD B (2004) Spektralfotometrische Überwachung der Pflückreife von Äpfeln. Landtechnik, 59: 98-99

TRUPPEL I. (2003) Tragbares funkangekoppeltes Minispektrometer. Bornimer Agrartechn. Berichte, 34: 56-69

Methode zur optoelektronischen Online-Bestandsdichtemessung in der teilflächenspezifischen Bewirtschaftung

Method for opto-electronic on-line measurement of crop density in site-specific farming

Jörg Preckwinkel¹, Guido Thösink¹, Andreas Linz¹, Johannes Marquering²,
Arno Ruckelshausen¹

¹ Interdisziplinärer Forschungsschwerpunkt Intelligente Sensorsysteme, Fachhochschule Osnabrück, Albrechtstraße 30, 49076 Osnabrück

E-mail: j.preckwinkel@fh-osnabrueck.de

² AMAZONEN-Werke H. Dreyer GmbH & Co. KG, Am Amazonen-Werk 9-13, 49205 Hasbergen-Gaste

Zusammenfassung: Eine neue optoelektronische Methode zur berührungslosen Messung des Höhenprofils von Pflanzenbeständen wird vorgeschlagen, wobei Triangulationsensoren mit hoher geometrischer und zeitlicher Auflösung zum Einsatz kommen. Mittels statistischer Online-Auswertung werden aus der Höhenmessung einzelner Pflanzen Kenndaten für die teilflächenspezifische Landbewirtschaftung gewonnen, z.B. die mittlere Wuchshöhe oder die Pflanzendichte. Die reduzierten Daten stehen dem Anwender via CAN-Bus zur Interpretation und Weiterverarbeitung zur Verfügung.

Deskriptoren: Laserdistanzsensor, Triangulation, Höhenprofil, Pflanzenbestandsdichte.

Summary: *A new opto-electronic method is proposed for the contactless measurement of height profiles in crop using triangulating distance measurement sensors with a high geometric and temporal resolution. Characteristic data is gained by a statistical on-line analysis of the measured height from individual plants. This reduced data, e.g. the average plant height or the crop density, can be deployed for site-specific farming and is provided via CAN-bus for user applications.*

Keywords: *laser distance sensor, triangulation, height profile, crop density*

1. Einleitung

Grundlage für die präzise teilflächenspezifische Landwirtschaft ist die möglichst genaue Kenntnis über den Zustand des Pflanzenbestandes. Wichtige Voraussetzung zur Ermittlung dieser Informationen sind zuverlässige Sensordaten. Verschiedene Verfahren stehen zur Verfügung. Neben der Offline-Auswertung von Satelliten- oder Flugzeugaufnahmen oder GPS-gestützten Verfahren mit ihren prinzipbedingten Nachteilen gibt es auch unterschiedliche Ansätze für die Online-Messung. Jedoch haben die komplexen Randbedingungen bei Feldeinsätzen mit den einhergehenden zahlreichen Störgrößen bislang einen umfassenden Sensoreinsatz verhindert. Systeme die auf spektraler Analyse beruhen, z.B. zur Stickstoffdüngung (THIESSEN 2001, GRAEFF *et al.* 2001), haben den Nachteil von hohen Investitionskosten und einer komplexen Interpretation der Messdaten. Mechanische Verfahren (EHLERT *et al.* 2002) lassen dagegen einen höheren Wartungsaufwand erwarten, und das Messsignal muss mittels zusätzlicher Sensorinformationen korrigiert werden.

Im Rahmen einer Kooperation zwischen den Amazonen-Werken H. Dreyer GmbH & Co. KG und der Fachhochschule Osnabrück wurde daher eine Methode für ein berührungsloses und damit nahezu verschleißfreies Sensorsystem entwickelt. Zum Einsatz kommen schnelle und relativ kostengünstige optoelektronische Distanzsensoren, mit deren Hilfe zuverlässige Informationen über den Pflanzenbestand ermittelt werden sollen. Die ausgangsseitigen Daten des Sensorsystems kann der Anwender direkt verwenden oder mit Informationen aus Datenbanken verrechnen, und damit zu einer Ertragsoptimierung beitragen (VORRICHTUNG... 2002). Es gibt bereits Arbeiten, die sich mit der Kombination von Höhenmessungen und anderen Messparametern (z.B. NDVI, „Normalised Difference Vegetation Index“) unter der Verwendung von Ultraschall-Distanzsensorik auseinandersetzen (SCOTFORD *et al.* 2003). Jedoch erfüllen die Ultraschallsensoren nicht die Anforderungen an die örtliche und zeitliche Auflösung, weshalb hier optoelektronische Distanzsensoren eingesetzt werden.

2. Das Messprinzip

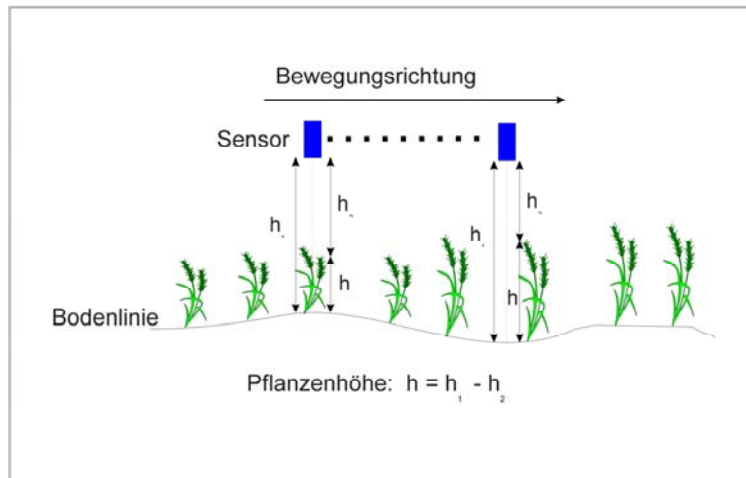


Bild 1: Messprinzip des Sensorsystems

Ein oder mehrere Triangulationssensoren sind vor der Zugmaschine angebracht. Wie die Skizze in Bild 1 zeigt, weist der messende Lichtstrahl vertikal in Richtung des Bodens. Während der Überfahrt wird in regelmäßigen Abständen der vom Sensor gemessene Distanzwert abgetastet. Das somit erhaltene detaillierte Höhenprofil wird durch Differenzbildung zwischen lokalen Minimal- und Maximalwerten zur Bestimmung einer durchschnittlichen Pflanzenhöhe herangezogen. Da in dem Profil sowohl Pflanzen- als auch Bodenmesswerte enthalten sind, werden so Bodenunebenheiten ausgeglichen. Die verwendeten Sensoren erlauben Abtastraten von mehr als 1 kHz, wodurch bei einer Geschwindigkeit von 10 km/h in einem Raster von wenigen Millimetern abgetastet wird. Am Markt stehen verschiedene Sensortypen zu Verfügung, die sich hauptsächlich in der Form der Lichtquelle (LED, Laser), des Empfängerelements (PSD, CCD), der Distanzbereiche oder der Anwendung verschiedener Modulationsverfahren unterscheiden. Bei den eingesetzten Sensoren handelt es sich um Laser-Triangulationssensoren der Firma Baumer electric (www.baumerelectric.com) die Laserdioden verwenden und einen Messbereich von 200 mm bis 1000 mm aufweisen.

Die Abtastung der Sensorsignale übernimmt ein Mikrocontroller. Er führt eine A/D-Wandlung des anliegenden Höhenmesswerts durch und speichert die Werte zwischen. Wenn eine genaue Distanzmessung aufgrund von Störeinflüssen nicht möglich ist, kann der jeweilige Sensor dies über einen Alarmausgang mitteilen. Mit Hilfe dieser Information kann im Mikrocontroller eine Filterung der ungültigen Daten vor der eigentlichen Auswer-

tung durchgeführt werden. Der Benutzer erhält schließlich die gefilterten und verarbeiteten Daten über den CAN-Bus. Falls eine externe Datenbank verfügbar ist, kann in Kombination mit diesen Informationen die Pflanzenmasse prognostiziert werden.

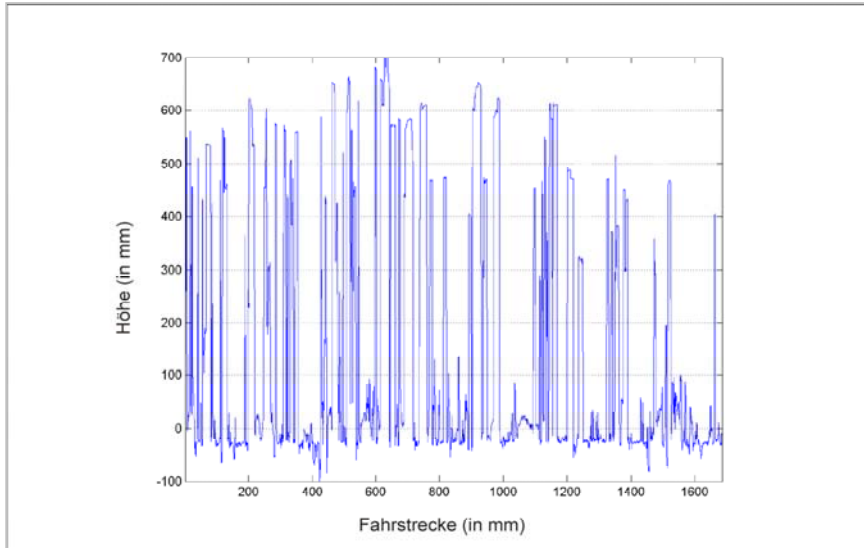


Bild 2: Höhenprofil einer kurzen Messstrecke in Hafer

3. Versuchsergebnisse

Es wurden verschiedene Untersuchungen durchgeführt. Eine motorisch angetriebene Drehscheibe diente dabei im Labor zur Simulation von Geschwindigkeiten bis zu 10 km/h. Die Sensoren von Baumer electric waren in der Lage, Objektbreiten von wenigen Millimetern Breite im gesamten untersuchten Geschwindigkeitsbereich zuverlässig zu messen. Mit einem manuell geschobenen Messwagen wurden im Feld einige Messreihen aufgenommen. Bild 2 zeigt einen kurzen Ausschnitt eines Höhenprofils von Hafer. Die Spitzen repräsentieren dabei Pflanzensignale. Ein auf die Achse des Messwagens geflanschter Drehimpulsgeber definierte den Messtakt und damit die horizontale Auflösung von einem Millimeter.

Bild 3 zeigt eine typische Häufigkeitsverteilung der Sensormesswerte. Deutlich ist eine Bimodalität zu erkennen, die Boden- und Pflanzensignale voneinander trennt. Mit dem Einsatz von pflanzenspezifischen Software-Filteralgorithmen ist eine Höhenbestimmung möglich.

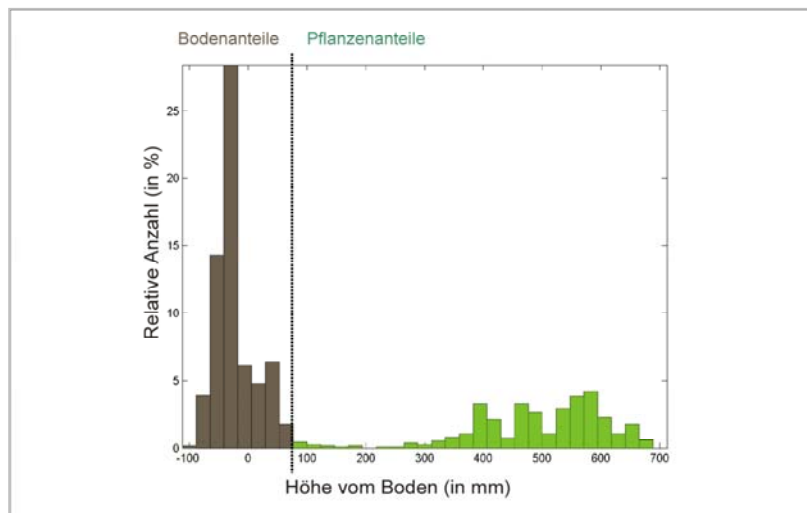


Bild 3: Häufigkeitsverteilung der Höhenmesswerte

4. Fazit

Ein neues optoelektronisches Sensorsystem für Messungen des Pflanzenbestandes wurde in ersten Labor- und Feldversuchen dynamisch getestet und lieferte Erfolg versprechende Ergebnisse. Optoelektronische Distanzsensoren eignen sich für die Messung der Pflanzenhöhe bei Geschwindigkeiten bis zu 10 km/h und darüber. Dabei ist die Auflösung so hoch, dass eine statistische Auswertung der Signale möglich ist. Spezifische Filteralgorithmen in der mikrocontrollerbasierten Auswertung können die Profildaten je nach Anwendung reduzieren. Das System arbeitet verschleißfrei und nahezu unabhängig von Bodenunebenheiten und Vibrationen. Im weiteren Verlauf ist eine systematische Untersuchung verschiedener Nutzpflanzen in unterschiedlichen Wachstumsstadien geplant. Dabei ist das Ziel der Aufbau einer Korrelationsdatenbank mit weiteren Pflanzenmerkmalen, wie beispielsweise der Pflanzenmasse.

5. Literatur

EHLERT D, DOMSCH H (2002) Sensor Pendulum-Meter in Field Tests. AGENG 2002, Budapest, paper number 02-PA-003

GRAEFF S, STEFFENS D, SCHUBERT S (2001) Präziser Düngen mit Sensoren. DLG Mitteilungen 116, H. 4, S. 50 – 51

SCOTFORD IM, MILLER PCM (2003) Characterisation of winter wheat using measurement of normalised difference vegetation index and crop height. Precision Agriculture 2003, Wageningen Academic Publisher, The Netherlands, pp 621-626

THIESSEN E (2001) Erfahrungen mit der sensorgesteuerten Stickstoffdüngung. Landtechnik 56, H. 4, S. 278 – 279

VORRICHTUNG ZUR MESSUNG DER PFLANZENBESTANDSDICHTE. (2002) Deutsche Patentschrift 103 29 472.4, 2002

www.baumerelectric.com

Potenzial der automatischen Bildanalyse für die Zustandsbestimmung landwirtschaftlicher Kulturen

Potentials of crop state assessment by automatic image analysis

Martin Kraft

Institut für Technologie und Biosystemtechnik; Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft;
Bundesallee 50; 388116 Braunschweig

E-mail: martin.kraft@fal.de

Kurzfassung: Bildanalytische Verfahren finden zunehmendes Interesse für die Zustandsbeschreibung von Pflanzenbeständen. Der Beitrag skizziert, welche Pflanzenzustandsparameter durch die Auswertung vertikaler Farbaufnahmen im Bestand geschätzt werden können und welche Klassen von Auswertungsverfahren hierfür benötigt werden. Betrachtet werden Verfahren zur Auswertung von Farbe und Form in Pflanzengemeinschaften, Einzelpflanzen und Pflanzenteilen.

Deskriptoren: Bildanalyse, Pflanzenzustand, Pflanzenwachstum, Nährstoffmangel, Farb-analyse

Summary: *Recently an increasing interest evolved in the use of automatic image analysis methods for the state assessment of agricultural crops. This article presents plant state parameters, which might be estimated by means of image analysis. The classes of applicable or needed algorithms are mentioned. These include the evaluation of colour as well as form parameters of plant groups, single plants, or plant parts.*

Keywords: *Image analysis, crop state, crop growth, nutrient deficiency, colour analysis*

1. Einleitung

Die Zustandsbeschreibung mittels automatischer Bildanalyse ist nicht neu. CASADY *et al.* (1996) haben mit Hilfe der Bildanalyse Größenparameter an seitlich aufgenommenen Reispflanzen bestimmt. PETRY UND KÜHBAUCH (1988) haben in vertikalen Aufnahmen grüne Pflanzen segmentiert, um den Unkrautbedeckungsgrad zu ermitteln. RICHARDSON *et al.* (2001) haben Kalibrierversuche zur automatisierten Quantifizierung von Lücken in Rasen veröffentlicht; siehe zu diesem Thema auch den Beitrag von LOCK *et al.* (2004) in diesem Band.

Am Institut für Technologie und Biosystemtechnik der FAL wurde die Bildanalyse erfolgreich zur automatischen Ermittlung des Bodenbedeckungsgrades in pflanzenbaulichen Versuchen eingesetzt. Im ersten Versuchsjahr konnte der Einfluss der Stickstoffdüngung auf den Bodenbedeckungsgrad anhand der automatischen Bildauswertung gezeigt werden (KRAFT, 2003). In den Bildern wurde zudem eine Farbauswertung vorgenommen. Dabei erwies sich z.B. der Farbsättigungsgrad der grünen Blattflächen als wesentlich aussagekräftiger und weniger störanfällig als der Farbton.

2. Bildsegmentierung und Interpretation des Bodenbedeckungsgrades

Allen automatisierten Verfahren zur Auswertung von Aufnahmen über Pflanzenbeständen gemein ist der erste Auswertungsschritt, nämlich die Klassifikation und Segmentierung der Bildpunkte in die Klassen Boden und Pflanze (Bild 1).



Bild 1: Winterweizen (Batis). Die Bodenpixel wurden automatisch ausgeblendet.

Unter natürlichen Bedingungen wird diese Segmentierung durch verschiedene Störquellen erschwert. Zu diesen Störquellen zählen wechselnde Beleuchtungsbedingungen und Inhomogenitäten des Bodens, z.B. Stroh, Steine oder andere Gegenstände. Im Laufe des Wachstums bilden sich teilweise bemooste Bodenstellen, die aufgrund ihrer grünen Farbe nicht trivial von den Nutzpflanzen unterschieden werden können. In höheren Pflanzenbeständen stellte sich außerdem heraus, dass die tiefer liegenden Bildausschnitte aufgrund des sehr geringen Lichteinfalls schwer zu klassifizieren sind.

Ein realer Einsatz der automatischen Bildauswertung in einer Produktionsumgebung kommt nur in Frage, wenn keine aufwändige Kalibrierung oder Erhebung von Trainingsdaten für die Klassifikation erforderlich ist. Deshalb kommt der Entwicklung sehr robuster und für ein breites Anwendungsfeld vortrainierter Klassifikationsverfahren eine erste Schlüsselrolle zu. Hier besteht noch Forschungs- und Entwicklungsbedarf, insbesondere auch Bedarf an umfangreichem Datenmaterial zu Trainings- und Testzwecken. Dieser Bedarf besteht sowohl für die Anwendungen der Pflanzenzustandsbeschreibung als auch z.B. für die bildgestützte Unkrauterkenkung.

3. Erkennung von Nutzpflanzenlücken oder anderen Pflanzen im Bestand

Mit der erfolgreichen Klassifizierung einer Vertikalaufnahme in Boden- bzw. Pflanzenpixel steht automatisch auch der grüne Bodenbedeckungsgrad als Anteil der grünen Pflanzenbildpunkte am Gesamtbild zur Verfügung. Der Bodenbedeckungsgrad kann bei niedrigem Blattflächenindex (LAI) näherungsweise als solcher interpretiert werden und ist somit ein wichtiger Parameter zur Wachstumsbeschreibung. Problematisch ist die Interpretation des reinen Zahlenwertes allerdings dann, wenn die Anzahl und räumliche Verteilung der Nutzpflanzen im Bildausschnitt vom Idealwert abweicht. Fehlen beispielsweise Pflanzen, so ergibt sich ein niedriger Bedeckungsgrad auch dann, wenn die vorhandenen Pflanzen in einem sehr guten Wachstumszustand sind (Bild 2).

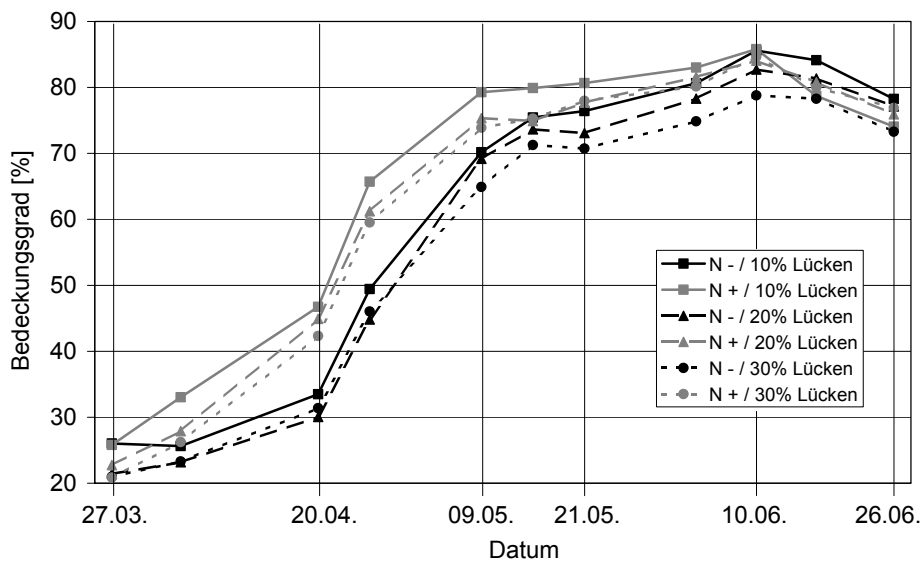


Bild 2: Lücken durch Ausfall mehrerer Pflanzen in einem Winterweizenbestand führen zu einem reduzierten Bodenbedeckungsgrad. Der Bodenbedeckungsgrad kann deshalb nur bei Kenntnis der Lücken als Ernährungsindikator interpretiert werden.

Eine sinnvolle Interpretation des Bodenbedeckungsgrades als Wachstumsparameter ist deshalb nur möglich, wenn Informationen über eventuelle Lücken oder ungleiche Verteilung der Pflanzen vorliegen. Verfahren zur automatischen Gewinnung dieser Informationen sind bisher nicht bekannt geworden.

Während Pflanzenlücken im Bildausschnitt zur Reduzierung des Bedeckungsgrades führen, haben Unkrautpflanzen den entgegengesetzten Effekt. Sofern im Bildausschnitt andere Pflanzen als die Nutzpflanzen enthalten sind, müssen diese von den Nutzpflanzen unterschieden werden, wenn man den Bedeckungsgrad als Parameter des Nutzpflanzenbestandes interpretieren will. Hierfür werden Algorithmen und Verfahren einzusetzen sein, wie sie bereits für die optische Unkrauterkenung entwickelt werden. Dies schließt sowohl formanalytische als auch farbanalytische Verfahren zur Unkrauterkenung bzw. zur Unterscheidung von Nutz- und Unkrautpflanzen ein.

Der bildanalytisch bestimmte Bodenbedeckungsgrad kann wie bereits erwähnt bei jüngeren Pflanzen als Näherungswert für den Blattflächenindex interpretiert werden und stellt somit einen wichtigen Indikator für den Wachstumszustand der Pflanzen dar. Der Bodenbedeckungsgrad könnte außerdem in Verbindung mit einer spektralen flächenintegrierenden Messtechnik wie z.B. dem Hydro-N-Sensor zur Erhöhung der Aussagekraft dienen.

4. Farbauswertung

Die automatische Bildanalyse kann zur Farbauswertung der Pflanzen oder von Pflanzenteilen eingesetzt werden. Im Unterschied zu flächenintegrierenden Spektralmessverfahren ist es dabei möglich, die Farbauswertung auf die Pflanzen zu beschränken und Bodenbildpunkte von der Farbauswertung auszuschließen. Im Falle einer Standard-Farbaufnahme steht zwar keine (für die Vegetationscharakterisierung sehr interessante) Nahinfrarotinformation (NIR) zur Verfügung. Mit den sichtbaren RGB-Kanälen (Wellenlängenbereiche rot, grün, blau) lassen sich aber Erkenntnisse über den Pigment- und Chlorophyllgehalt der Pflanzenteile gewinnen.

Ein reduzierter Chlorophyllgehalt lässt die Blätter gelblicher erscheinen. Mit spektraloptischen Reflexionsmessverfahren einschließlich flugzeug- und satellitengestützter Sensoren ist es meistens nicht möglich, die Ursache des reduzierten Chlorophyllgehaltes genau festzustellen. Hier hat die Bildanalyse weitergehendes Potenzial. Beispielsweise werden bei Stickstoffmangel zunächst die älteren Blätter gelb und sterben ab. Eine Vergilbung infolge Schwefelmangel tritt dagegen bei den jüngsten Blättern einer Pflanze auf (SCHNUG *et al.*, 2004). Mit konventioneller flächenintegrierender Reflexionsmessung können diese Symptome nicht unterschieden werden. Erst mit der Bildanalyse wird es möglich, die einzelnen sichtbaren Teile der Pflanze anzusprechen und zu erkennen, ob eine Gelbverfärbung an den jüngsten oder an den ältesten Blättern auftritt.

Die Bildanalyse hat insbesondere dort Potenzial, wo Ernährungsmängel zu einzelnen Farbflächen oder unterschiedlicher Färbung z.B. der Blattadern oder -spitzen führen. Ein typisches Beispiel sind die spezifischen Symptome bei Magnesiummangel: Dabei verfärben sich die Blatteile zwischen den Blattadern oder sterben sogar ab, während das Blatt direkt an den Adern noch grün bleibt. Derartige Effekte erfordern eine Farbanalyse in Kombination mit einer Erkennung von Form- und Ortsmerkmalen.

Neben der Erkennung der Ernährungssituation hat die Farbanalyse auch Potenziale zur Erkennung von Erkrankungs- oder Schädlingsbefallsituationen, z.B. bei virenbedingten lokalen Verfärbungen.

5. Formanalyse

Neben der Farbanalyse sind auch von der Formanalyse Aussagen über den Pflanzenzustand zu erwarten. In Frage kommen Formparameter von der einfachen Blattgröße oder der Blattlänge sowie -breite bis zur Verlaufsanalyse des Blattrandes oder der Blattadern.

Ein Mangel an Nährstoffen führt in vielen Fällen zu geringerem Wuchs. Dieser kann sich in geringerer Länge oder Breite der Blätter darstellen. Auch vertikale Wachstumsparameter wie die Höhe der Pflanzen oder der Abstand der Internodien können in Mangelsituationen kleiner ausfallen. Reduzierter Wuchs tritt als Folge ganz verschiedener Mangelursachen auf. Die Identifizierung und Quantifizierung dieser Formparameter wird deshalb für eine Vielzahl von Fragestellungen und Anwendungen benötigt, die vom Versuchswesen bis zur Düngungssteuerung reichen können. Ein Schluss von einer geringen Wuchsgröße auf deren Ursache wird in der Regel aber nur bei bekannten Parametern möglich sein.

In einzelnen extremen Mangelsituationen können sich auch typische Verformungen der Blätter ergeben. So wurde beispielsweise eine löffelförmige Wölbung bei starkem Schwefelmangel beobachtet (SCHNUG *et al.*, 2004; HALL, 2001).

Traditionell stellen Formmerkmale ein wichtiges Element der Sortenbeschreibung sowie in der Pflanzenzüchtung dar. Die automatische Bildanalyse steht kurz davor, auch in diesem Anwendungsgebiet Fuß zu fassen. Beispielhaft sei auf den Beitrag von AHNE *et al.* (2004) in diesem Band verwiesen, in dem die Blattmorphologie von Möhrenblättern bildanalytisch ausgewertet und beschrieben wird. Methoden und Parameter, die für den Anwendungsbereich der Sortenbeschreibung entwickelt werden, dürften auch für die Pflanzenzustandsbeschreibung von Interesse sein.

6. Zusammenfassung und Ausblick

Die automatische Bildanalyse hat vielfältiges Potenzial als Instrument zur Pflanzenzustandsbeschreibung im pflanzenbaulichen Versuchswesen und in der Produktion. Bisher stehen allerdings kaum praxistaugliche Auswertungsverfahren zur Verfügung.

Notwendig sind im ersten Schritt robuste universelle Verfahren für die Bildsegmentierung Boden/Pflanze. Bisherige Verfahren erfordern definierte Versuchs- und Aufnahmebedingungen sowie Kalibrations- und Testaufnahmen. Der damit verbundene Aufwand bzw. die damit verbundenen Einschränkungen stehen der Akzeptanz der Bildanalyse als verfügbares Standardwerkzeug entgegen. Zukünftige Verfahren müssen über vortrainiertes Wissen verfügen und sich ohne Mitwirkung des Anwenders selbst auf die verschiedenen Aufnahmebedingungen einstellen.

Auf das segmentierte Bild bauen weitere bildanalytische Verfahren in drei Kategorien auf (Bild 3).

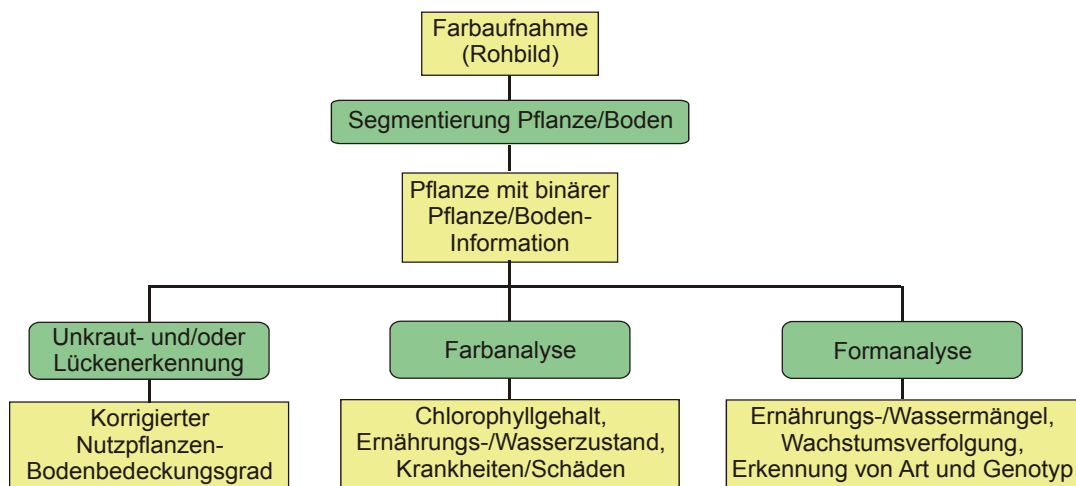


Bild 3: Potenziale der Pflanzenzustandsbestimmung durch automatische Bildanalyse.

Je nach Fragestellung muss die Bildsegmentierung durch eine Analyse der Verteilung der Nutzpflanzenindividuen im Bild ergänzt werden, z.B. im Hinblick auf Pflanzenlücken, oder auch durch eine Unterscheidung der Pflanzen in die angebauten Nutzpflanzen und Begleitpflanzen.

Die Farbanalyse, insbesondere die ortsbezogene Farbanalyse von Teilflächen der Pflanzenblätter, verspricht einiges Potenzial zur Beschreibung des Ernährungszustandes und bei Krankheiten. Die in der Fernerkundung entwickelten und bewährten Auswertungsverfahren lassen sich hierfür allerdings kaum einsetzen. Erstens beinhalten die dort untersuchten Vegetationsindizes immer den Anteil des vom sichtbaren Boden re-

flektierten Lichtes und zweitens benötigen die meisten Vegetationsindizes der Fernerkundung mindestens einen Nahinfrarotkanal, der in einer RGB-Kamera nicht zur Verfügung steht. Für die Anwendung der Farbauswertung bei Nutzpflanzen in Farbaufnahmen besteht erheblicher Forschungsbedarf.

Forschungsbedarf besteht auch für die Anwendung der Formbeschreibung zur Zustandsbestimmung von Nutzpflanzen. Derzeit laufende Entwicklungen in den Anwendungsumfeldern Unkrauterkenennung und Sortenbeschreibung lassen die Entstehung von Werkzeugen und Methoden erwarten, die auch für die formbasierte Zustandsbeschreibung einsetzbar sein werden.

7. Literatur

- CASDY WW, SINGH N, COSTELLO TA (1996)** Machine Vision for Measurement of Rice Canopy Dimensions. Trans. ASAE, Vol. 39 (5), pp 1891-1898.
- HALL M (2001)** Sulphur Fertilizer Application in Crop Production. Government of Alberta, Agri-Facts Agdex 542-10.
- KRAFT M (2003)** Bildanalytische Bestimmung des Bodenbedeckungsgrades in Winterweizen. Bornimer Agrartechnische Berichte 34, S. 29-37.
- PETRY W, KÜHBACH W (1988)** Messung des Unkrautdeckungsgrades durch echtfarbentüchtige quantitative Bildanalyse auf Personalcomputern. KALI-Briefe (Büntehof), 19 (4), S. 311-323.
- RICHARDSON MD, KARCHER DE, PURCELL LC (2001)** Quantifying Turfgrass Cover Using Digital Image Analysis. Crop Science, Vol. 41, pp 1884-1888.
- SCHNUG E, GAY R, HANEKLAUS S (2004)** Visual diagnosis of sulphur nutrition in major agricultural crops. In: M. Fotyma, T. Filipek & W. Lipinski (Eds.) Proceedings of Scientific Conference on Biogeochemistry of Sulfur in Agricultural System Fertilizers and Fertilization, August 21-22 2004 in Pulawy, Poland. ISSN 1509-8095.

Reduzierung des reliefbedingten Topographie-Effektes zur Verbesserung der Radiometrie von Satellitendaten

Reduction of terrain induced topographic effects to improve radiometry in satellite data

Anja Brauer, Holger Lilienthal, Ewald Schnug
Institut für Pflanzenernährung und Bodenkunde, Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft (FAL), Bundesallee 50, 38116 Braunschweig
E-mail: pb@fal.de

Zusammenfassung: Die Fernerkundung stellt ein nützliches Instrument zur Untersuchung regionaler Nutzungsänderungen der Landschaft zur Verfügung. Insbesondere die Datenarchive ermöglichen es, Aussagen über zurückliegende Nutzungen zu treffen.

Voraussetzung für die Analyse von zeitlichen Veränderungen ist, dass die Satellitenaufnahmen unterschiedlicher Jahre und Jahreszeiten untereinander vergleichbar sind.

Insbesondere in stark reliefiertem Gelände treten große Unterschiede in der Bildradiometrie auf, die auf unterschiedliche Beleuchtungsverhältnisse (z.B. Sonnen- und Schattenhang) zurück zu führen sind.

Ein Korrekturansatz am Beispiel eines See-Einzugsgebietes in Neuseeland wird im Folgenden näher dargestellt.

Schlüsselwörter: Fernerkundung, Satellitendaten, Landnutzungsklassifikation, C-Faktoren-Korrektur, topographische Normalisierung, Neuseeland

Abstract: *Remote sensing offers a useful tool for the investigation of landscape changes on a regional scale. In particular data archives allow to perform investigation about past land use. Multi-temporal analysis of remote sensing images needs a careful pre-processing to normalise illumination effects based on different data acquisition dates. Especially in rugged terrain strong differences in the image radiometry arise, resulting from different lighting conditions (e.g. shadow vs. sun). A correction approach using a weighted cosine correction has been tested in the catchment area of Lake Taupo in New Zealand.*

Keywords: *Remote sensing, Satellite data, land use classification, C-Factor-Correction, topographic normalisation, New Zealand*

1. Einleitung

In stark reliefierten Gebieten ergeben sich unter variierenden Beleuchtungsverhältnissen für gleiche Objekte verschiedenartige Reflexionssignaturen in einem Satellitenbild. So erscheint z.B. eine Wiese an einem Schattenhang dunkler als ihr Pendant am Sonnenhang (SANDMEIER 1997). Diese topographisch bedingten Unterschiede führen dazu, dass Gebiete trotz gleicher Oberflächen- und Reflexionseigenschaften im Satellitenbild unterschiedliche Reflexionswerte ausweisen (HEROLD *et al.* 2000). Innerhalb einer Landnutzungsklassifikation wirkt sich dieser Effekt negativ auf die Klassifikationsgüte aus, da aufgrund einer schlechteren spektralen Trennung Klassen falsch zugeordnet werden. Vor allem bei Veränderungsanalysen der Landschaft ist eine genaue Landnutzungsklassifikation von großer Bedeutung. In der digitalen Bildverarbeitung sind unterschiedliche Methoden zur Verringerung reliefbedingter Unterschiede in Satellitendaten entwickelt worden. Das Ziel eines optimalen Verfahrens zur topographischen Normalisierung ist es, die Reflexionswerte geneigter Flächen auf Werte zu normalisieren, die denen von ebenen Flächen entsprechen.

Am Beispiel eines stark reliefierten See-Einzugsgebietes in Neuseeland wird im Folgenden die Bedeutung einer genauen Vorkorrektur mit topographischer Normalisierung der Satellitendaten vorgestellt.

2. Material und Methoden

Das Einzugsgebiet des Lake Taupo in Neuseeland diente als Untersuchungsraum für die Satellitenbildauswertung. Die Verschlechterung der Gewässerqualität des Sees wird im Allgemeinen auf eine Intensivierung der Landwirtschaft im Einzugsgebiet zurückgeführt. Ein Beleg dafür konnte bisher aber noch nicht erbracht werden. Die Analyse der Landnutzung und deren Änderung über die Zeit liefert Aufschlüsse über die tatsächliche Entwicklung des Raumes.

Insgesamt wurden zwei Satellitenszenen klassifiziert und die Veränderungen in Abhängigkeit der Zeit betrachtet. Im Vorfeld wurden Störeinflüsse bedingt durch Atmosphäre und Relief aus den Datensätzen entfernt.

Eingangsdaten

Für die Untersuchung der Landnutzung im Einzugsgebiet des Sees standen zwei Satellitenszenen (25.12.1990 Landsat 5 TM; 16.03.2003 Landsat 7 ETM+) zur Verfügung.

Für die Georeferenzierung der Satellitendaten und die Herstellung eines digitalen Höhenmodells wurden die offiziellen Vektordaten (Basis-Maßstab 1:50.000) von Neuseeland verwendet (LAND INFORMATION NEW ZEALAND 2000).

Vorverarbeitung

Die Vorverarbeitungsschritte wurden auf Basis der Vollszenen (183 km x 173 km) durchgeführt. Die Landnutzungskartierung sowie die Veränderungsanalyse erfolgte innerhalb eines für den Taupo-See berechneten Einzugsgebietes. In Bild 1 ist die Abfolge der Vorverarbeitungsschritte dargestellt. Für eine detaillierte Beschreibung aller einzelnen Arbeitsschritte wird auf BRAUER (2003) verwiesen.

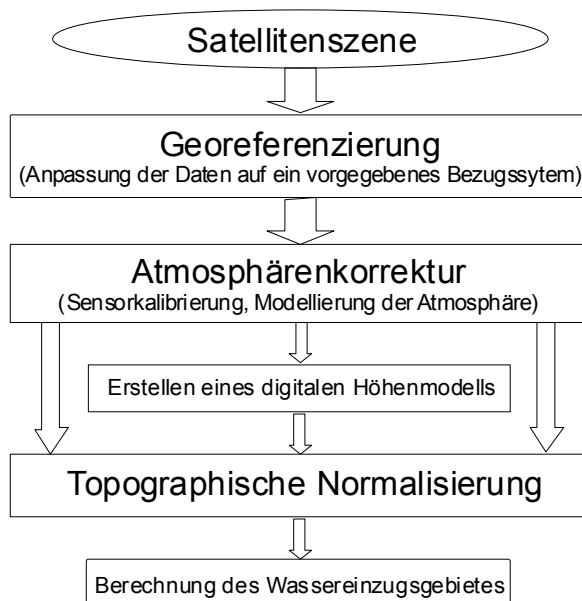


Bild 1: Ablaufschema für die Vorverarbeitung von Satellitendaten.

Topographische Normalisierung

Einfache Korrekturverfahren zur Reduzierung des topographischen Effektes basieren ausschließlich auf der Annahme einer Lambert'schen Reflexion (wie z.B. die Kosinuskorrektur), d.h. einer gleichmäßigen, richtungsunabhängigen diffusen Rückstreuung der Strahlung an der Oberfläche (CIVCO 1989).

Derartige Modelle führen oft zu Überkorrekturen auf Flächen mit einem Sonnenstandswinkel $< 55^\circ$ und verhindern dadurch eine Verbesserung der Klassifikationsgenauigkeit (TEILLET *et al.* 1982, CIVCO 1989, COLBY 1991, ITTEN *et al.* 1992, EKSTRAND 1996).

Eine Erweiterung der einfachen Kosinuskorrektur durch die Einbeziehung sogenannter Dämpfungsvariablen stellt die „C-Faktoren-Korrektur“ dar, basierend auf einem semiempirischen Modellansatz von ITTEN *et al.* (1992).

Der Einstrahlungswinkel (i) repräsentiert, unter Annahme eines Lambert'schen Reflektors, den Anteil direkter Sonneneinstrahlung, der ein Flächenelement erreicht. Definiert wird der Winkel (i) als Winkel zwischen der Sonneneinstrahlung und der Flächennormalen eines Bodenelementes. Dieser lässt sich aus Zenit- (sz) und Azimutwinkel (sa) der Sonne, sowie der Hangneigung (s) und der Exposition (a) einer Pixelfläche berechnen (Bild 2). Der Kosinus dieses Winkels wird im Folgenden als Illumination bezeichnet.

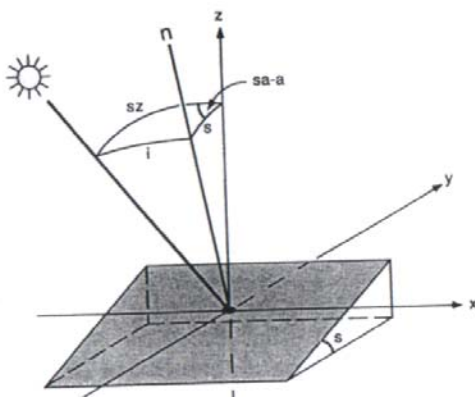


Bild 2: Geometrische Situation zur Bestimmung des Einfallswinkels (i). (SANDMEIER 1997).

Es gilt:

$$\text{Illumination: } \cos(i) = \cos(sz) \cdot \cos(s) + \sin(sz) \cdot \sin(s) \cdot (\cos(sa - a)) \quad (1)$$

- i = Winkel zwischen Sonneneinstrahlung und Flächennormalen eines Pixels (Einstrahlungswinkel)
- sz = Sonnenzenitwinkel
- s = Hangneigung des Geländes (slope)
- sa = Azimutwinkel der Sonne
- a = Exposition des Geländes (aspect)

TEILLET *et al.* (1982) führten die empirische Komponente C zur Modellierung der diffusen Einstrahlung und zur Dämpfung von Überkorrekturen bei niedrigen Einstrahlungswinkeln

ein. Untersuchungen von ITTEN *et al.* (1992) belegten, dass die C-Faktor-Korrekturmethode in stark reliefierten Gebieten zu einer besseren Klassifikationsgenauigkeit führt als andere empirische Verfahren, wie beispielsweise die Minnaert Korrektur. Genauere Beschreibungen dieser Verfahren finden sich unter anderem in HYUNKOOK (2002), MEYER *et al.* (1993), DEGUI & GILLESPIE (1998) und MCDONALD *et al.* (2000).

Die C-Faktor-Korrekturmethode wurde bislang hauptsächlich für die Klassifikation von Wäldern in stark reliefiertem Gelände verwendet (ITTEN *et al.* 1992, MEYER *et al.* 1993, DEGUI & GILLESPIE 1998 und MCDONALD *et al.* 2000).

Als Vorarbeit der topografischen Normalisierung wurde aus einem digitalen Höhenmodell mit einer Bodenauflösung von 30 m die Exposition (aspect) sowie die Hangneigung des Geländes (slope) bestimmt. Anschließend wurde die Illumination nach Formel (1) berechnet.

Um den Wichtungsfaktor C zu erhalten, wurde eine lineare Regression der Grauwerte gegen $\cos(i)$ durchgeführt (Bild 3). Die Variable C ergibt sich abschließend als Quotient aus Interzept (b) und Anstieg (m) der Regressionsgeraden (Formel (2)).

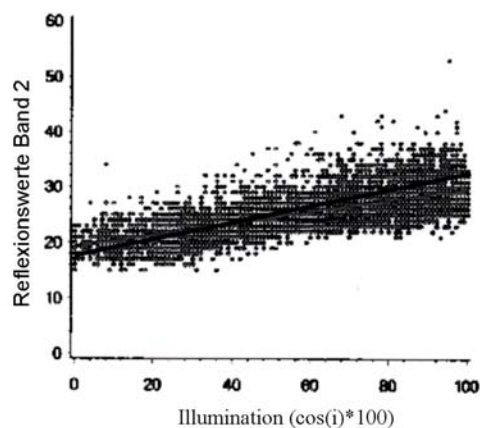


Bild 3: Lineare Regression der original Reflexionswerte gegen den Illuminationswinkel $\cos(i)$.

C-Faktor:
$$C = \frac{b}{m} \quad (2)$$

Für die topografische Normalisierung der Satellitendaten wurde der C-Faktor zur Dämpfung niedriger Einfallswinkel in das Kosinusetz integriert (Formel (3)).

C-Faktoren-Korrektor:
$$p_i^* = Lt \frac{\cos(sz) + C}{\cos(i) + C} \quad (3)$$

- p_i^* = beleuchtungskorrigierte Objektreflexion
 Lt = vom Sensor gemessene Strahlung
 C = aus Regression erhaltener Korrekturfaktor
 $\cos(i)$ = berechnete Illumination
 $\cos(sz)$ = Kosinus des Sonnenzenitwinkels zum Zeitpunkt der Aufnahme

Nach SANDMEIER (1997) soll die Regression zwischen Illumination und den Grauwerten eines Kanals objektspezifisch erfolgen, da sonst die unterschiedlichen spektralen Eigenschaften der Objekte das Ergebnis der Relieffkorrektur negativ beeinflussen können. Aus diesem Grund erfolgte die Bestimmung der C-Faktoren separat für jede Objektklasse.

Hierzu wurde für jede Satellitenszene der NDVI (Normalized Vegetation Index) nach ROUSE *et al.* (1974) berechnet und die Objektklassen Wald/Forst-Plantagen, Strauchvegetation, Weideland und Boden/Gestein bestimmt. Die Berechnung der C-Faktoren erfolgte anschließend für jede dieser Objektklassen.

Landnutzungsklassifikation

Bild 4 zeigt eine Übersicht der Verarbeitungsschritte der Landnutzungsklassifikation, wobei die Kombination aus unüberwachter und überwachter Klassifikation als hybrider Klassifikationsansatz bezeichnet wird (HILDEBRANDT 1996).

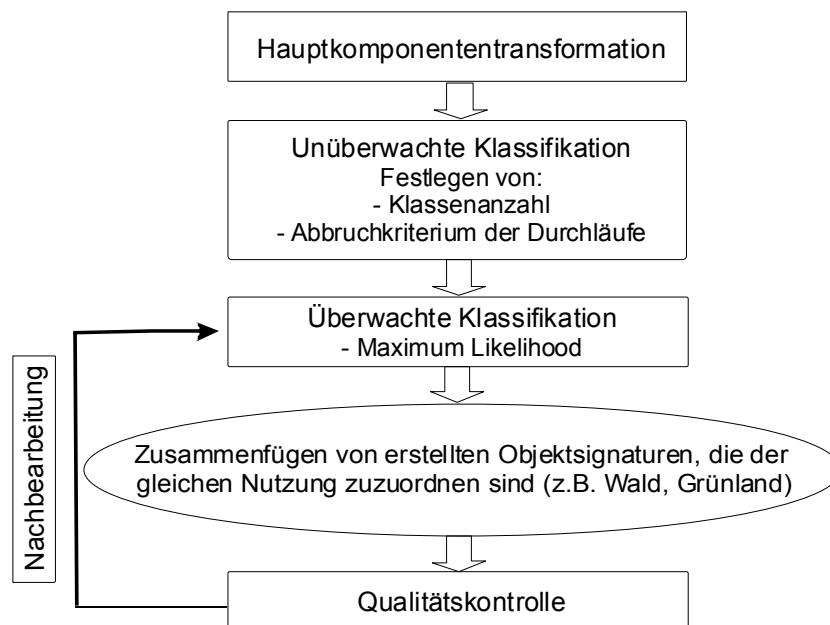


Bild 4: Übersicht der eingesetzten Verarbeitungsschritte der Landnutzungsklassifikation.

Zur Validierung der Qualitätsverbesserung durch eine topographische Normalisierung, wurden sowohl unkorrigierte als auch topographisch normalisierte Datensätze beider Jahre einer Landnutzungsklassifikation unterzogen.

Qualitätskontrolle

Für Aussagen über die Güte einer Klassifikation in Bezug auf die Erfassung der realen Objektklassen, muss eine Qualitätskontrolle der Klassifikation erfolgen. Die abschließende Bewertung der Landnutzungsklassifikation erfolgte mit Hilfe sogenannter Fehlermatrizen. In diesen Matrizen werden die Klassifikationsergebnisse der Bildelemente klassenweise den tatsächlichen Objektklassen gegenübergestellt. Bild 5 zeigt den Aufbau einer Fehlermatrix für eine Klassifikation mit q Klassen.

		Referenzdaten (j)				
		Klasse	1	2	...	q
Klassifikation (i)	1	X_{11}	X_{12}	...	X_{1q}	X_{1+}
	2	X_{21}	X_{22}	...	X_{2q}	X_{2+}

	q	X_{q1}	X_{q2}	...	X_{qq}	X_{q+}
Summe		X_{+1}	X_{+2}	...	X_{+q}	N

Bild 5: Aufbau einer Fehlermatrix für eine Klassifikation mit q Klassen (HYUNKOOK 2002, verändert).

Dargestellt werden die Pixel (X_{ij}), einer zugeordneten Klasse (i) und deren Referenzklasse (j). Weiterhin beschreiben die Ausdrücke $X_{+j} = \sum_{i=1}^q x_{ij}$ die Summe der Spalten j ,

$X_{i+} = \sum_{j=1}^q x_{ij}$ die Summe der Zeilen i und N die Gesamtmenge der zu überprüfenden Pixel (HYUNKOOK 2002). Die Gesamtgenauigkeit einer Klassifikation berechnet sich aus dem Verhältnis der Summe der Hauptdiagonalen ($x_{11}, x_{22} \dots x_{qq}$), d.h. der richtig klassifizierten Pixel, und der Gesamtzahl der zu überprüfenden Pixel (N) (Formel (4)).

Gesamtgenauigkeit:
$$P_{all} = \frac{\sum_{i=j=1}^q X_{ij}}{N} \quad (4)$$

3. Ergebnisse und Diskussion

Die Reduzierung des Reliefeinflusses durch das angewendete Verfahren führte zu einer Verbesserung der Landnutzungsklassifikation.

Die Tabellen 1 und 2 zeigen, dass die Berechnung der C-Faktoren individuell für jede Szene erfolgen muss. Außerdem wird deutlich, dass sich die Werte stark zwischen den Klassen unterscheiden.

Tabelle 1: Berechnete C-Faktoren für die topographische Normalisierung der Satellitenszene (Landsat 5 TM) Taupo-See in Neuseeland vom 25.12.1990. m = Anstieg, b = Interzept, c = C-Faktor, errechnet aus der Regressionsgeraden zwischen den Reflexionswerten der Landnutzung und Illumination für jeden Kanal.

		Wald/Forst-Plantagen	Strauchvegetation	Grünland	Boden/Gestein
Kanal1 (0,45-0,52 μ m]	b	0,81	-46,07	11,16	69,24
	m	0,24	107,35	43,71	-9,69
	c	3,30	-0,43	0,26	-7,14
Kanal2 (0,52-0,60 μ m)	b	2,02	-36,95	2,02	67,42
	m	39,30	96,33	39,25	-2,06
	c	0,05	-0,38	0,05	-32,67
Kanal3 (0,63-0,69 μ m)	b	1,68	-11,91	70,21	118,42
	m	27,54	55,91	-37,33	-58,37
	c	0,06	-0,21	-1,88	-2,03
Kanal4 (0,76-0,90 μ m)	b	-14,73	-210,50	133,70	88,92
	m	201,16	443,03	95,22	90,66
	c	-0,07	-0,48	1,40	0,98
Kanal5 (1,55-1,75 μ m)	b	-6,48	-6,48	422,42	99,30
	m	96,52	96,52	-367,91	76,16
	c	-0,07	-0,07	-1,15	1,30
Kanal7 (2,08-2,35 μ m)	b	-3,51	-99,49	205,73	120,16
	m	41,35	187,49	-181,46	-25,62
	c	-0,08	-0,53	-1,13	-4,69

Tabelle 2: Berechnete C-Faktoren für die topographische Normalisierung der Satellitenszene (Landsat 7 ETM⁺) Taupo-See in Neuseeland vom 16.03.2003. m = Anstieg, b = Interzept, c = C-Faktor, errechnet aus der Regressionsgeraden zwischen den Reflexionswerten der Landnutzung und Illumination für jeden Kanal.

		Wald/Forst-Plantagen	Strauchvegetation	Grünland	Boden/Gestein
Kanal1 (0,45-0,52µm]	b	-0,14	7,12	9,67	4,32
	m	16,21	22,53	8,40	67,61
	c	-0,01	2,28	1,15	0,06
Kanal2 (0,52-0,60µm)	b	16,28	51,27	14,11	15,61
	m	5,73	-78,92	15,07	59,62
	c	2,84	-0,65	0,94	0,26
Kanal3 (0,63-0,69µm)	b	14,42	3,76	9,85	25,65
	m	1,69	28,61	13,78	43,21
	c	8,55	0,13	0,72	0,59
Kanal4 (0,76-0,90µm)	b	42,52	94,93	74,75	85,50
	m	74,56	-17,88	83,80	45,53
	c	0,57	-5,31	0,89	1,88
Kanal5 (1,55-1,75µm)	b	25,35	57,38	43,02	72,34
	m	27,26	-7,33	52,68	46,00
	c	0,93	-7,83	0,82	1,57
Kanal7 (2,08-2,35µm)	b	18,16	24,93	21,32	49,51
	m	7,80	10,88	26,51	33,21
	c	2,33	2,29	0,80	1,49

Allgemein führte die Reliefkorrektur zu einer spektralen Anpassung gleicher Objektklassen mit unterschiedlichen Hangneigungen (Bild 5). Besonders deutlich ist die Reduzierung der Hangneigung im Bild zu erkennen.

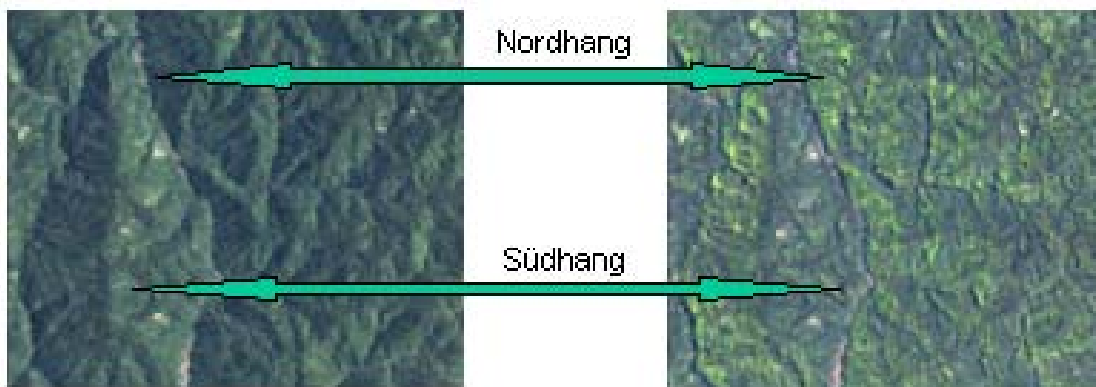


Bild 5: Topographische Normalisierung. Links: Optischer Reliefeindruck am Beispiel eines Waldstückes im Einzugsgebiet des Taupo-Sees, Neuseeland im Jahr 1990 (RGB=321) Rechts: Reduzierung des Reliefeinflusses.

An den Übergangsbereichen zwischen zwei Nutzungsformen kann es zur Ausbildung von Fragmenten kommen. Dabei befinden sich die überkorrigierten Bereiche vorwiegend am Übergang von Waldgebieten zu anderen Objektklassen (Bild 6).

Diese Bildbereiche sind durch Mischpixel, also Pixel, die einen Teil Wald und eine andere Nutzung enthalten, gekennzeichnet. Für die Berechnung der C-Faktoren werden diese Pixel einer Klasse zugewiesen und auch mit dem für diese Klasse errechneten C-Faktor korrigiert. Dies kann die Bildung von Fragmenten hervorrufen. Ein anderer Grund für die Entstehung von Fragmenten kann an einem zu grob aufgelösten Höhenmodell liegen.

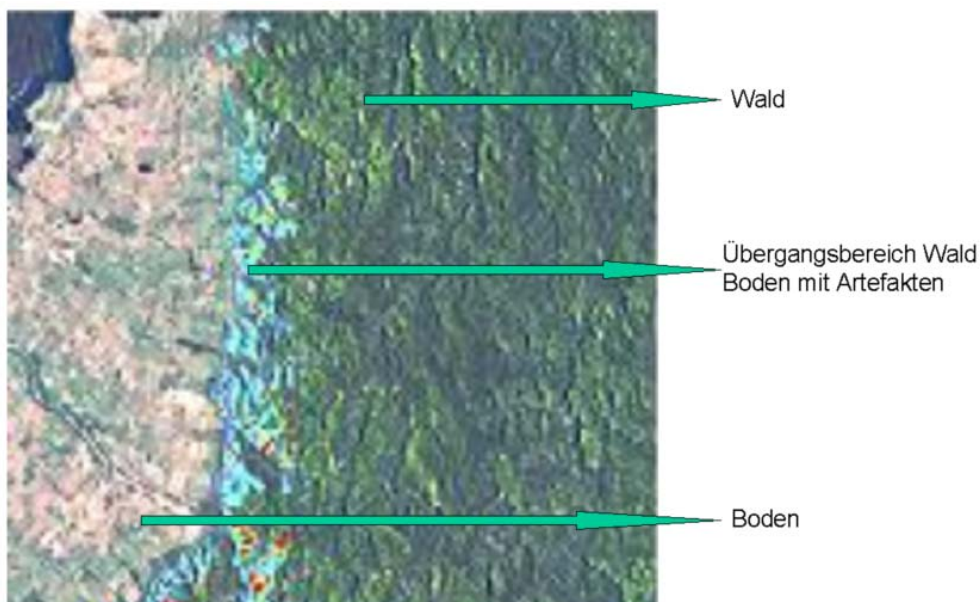


Bild 6: Artefaktbildung nach durchgeführter topographischer Normalisierung mittels C-Faktoren-Korrektur.

Landnutzungsklassifikation

Die Anzahl der resultierenden Klassen nach jedem Klassifikationsschritt ist in Tabelle 3 dargestellt. Als Ergebnis wurden alle Klassen acht Landnutzungen zugewiesen (Tabelle 4).

Tabelle 3: Anzahl der Klassen für die Verarbeitungsschritte der Landnutzungsklassifikation für das Wassereinzugsgebiet Taupo-See in Neuseeland von 1990 und 2003. Ohne Reliefkorrektur: atmosphärenkorrigierte Satellitenszenen ohne topographische Normalisierung, mit Reliefkorrektur: atmosphärisch und topographisch korrigierte Satellitenszenen

	1990 ohne Reliefkorrektur	1990 mit Reliefkorrektur	2003 ohne Reliefkorrektur	2003 mit Reliefkorrektur
unüberwachte Klassifikation	70	70	70	70
Ellipsen ohne Überlappung (Trainingsgebiete für die überwachte Klassifikation)	63	64	55	53
nachklassifiziert nach Distance File	2	2	3	3
Gesamtspektral- signaturen	65	66	58	56
Landnutzungsklassen	8	8	7	7

Tabelle.4: Resultierende Objektklassen der Landnutzungsklassifikation für das Wassereinzugsgebiet des Taupo-Sees in Neuseeland.

Klassennummer	Nutzung
1	Felsen/Rohboden
2	offene Böden/Bebauung
3	Gewässer
4	Feuchtgebiete
5	Gras-/Strauchvegetation
6	Grünland
7	Forst-Plantagen
8	natürlicher Wald

Güte der Klassifikation

Zur Bewertung der Klassifikationsgenauigkeit ist eine Validierung der Endergebnisse notwendig. Des Weiteren bietet die Genauigkeitsüberprüfung die Möglichkeit, zu kontrollieren, welchen Einfluss die topographische Normalisierung der Satellitendaten auf die Landnutzungsklassifikation ausübt.

Bei der Durchführung der Genauigkeitsanalyse wurden alle kartierten Landnutzungsklassen eines jeden Datensatzes anhand einer Fehlermatrix bewertet.

Insgesamt wurden 110 (Szene 1990) bzw. 107 (Szene 2003) Testpixel nach dem Zufallsprinzip aus den klassifizierten Bildern auf die Richtigkeit ihrer Zuordnung hin überprüft. Dabei war die Anzahl der Testpixel nicht für alle Landnutzungsklassen gleich, sondern orientierte sich an den jeweiligen prozentualen Flächenanteilen der Landnutzungen.

Anhand der Fehlermatrizen konnte eine detaillierte Analyse der Güte der Fehlklassifikationen aller Landnutzungen erfolgen. Insgesamt liegt bei den Satellitendaten mit durchgeführter Reliefkorrektur die Gesamtgenauigkeit der Klassifikation höher als bei den klassifizierten Daten ohne vorab durchgeführter topographischer Normalisierung (Tabelle 5).

Tabelle 5: Ergebnisse der Genauigkeitsanalyse

Jahr	1990		2003	
	Mit Reliefkorrektur	Ohne Reliefkorrektur	Mit Reliefkorrektur	Ohne Reliefkorrektur
Gesamtgenauigkeit	86,36 %	83,63 %	83,18 %	75,70 %

4. Schlussfolgerung

Der Störeinfluss des Reliefs auf die Qualität von Landnutzungsklassifikationen kann deutlich nachgewiesen werden. Die Verwendung der C-Faktoren-Methode eignet sich gut, um den Topographie-Effekt in Satellitenbilddaten zu reduzieren. Des Weiteren konnte gezeigt werden, dass sich mittels dieses Verfahrens die Genauigkeit der Landnutzungsklassifikation erhöhen lässt. Limitierende Faktoren sind die Qualität und Verfügbarkeit hochauflösender digitaler Geländemodelle und eine zu grobe Festlegung von Landnutzungsklassen, die sich in Artefaktbildung an Übergangsbereichen von Objektklassen widerspiegelt.

5. Literatur

- BRAUER A (2003)** Satellitengestützte Landnutzungskartierung eines weidewirtschaftlich genutzten Einzugsgebietes in Neuseeland. TU Bergakademie Freiberg, Diplomarbeit
- CIVCO DL (1989)** Topographic normalization of Landsat Thematic Mapper digital imagery. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 55 (9): 1303-1309
- COLBY JD (1991)** Topographic normalization in rugged terrain. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 57 (5): 531-537
- DEGUI G; GILLESPIE A (1998)** Topographic Normalization of Landsat TM Images of Forest Based on Subpixel Sun-Canopy-Sensor Geometry. Remote Sensing of Environment, 64: 166-175
- EKSTRAND S (1996)** Landsat TM-Based Forest Damage Assessment: Correction for Topographic Effects. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 62 (2) 151-161
- HEROLD M; KLENKE M; MÜLLER B; MÜSCHEN B; STEINNOCHER K (2000)** Zur radiometrischen Reliefkorrektur in Fernerkundungsdaten. Photogrammetrie, Fernerkundung, Geoinformation, 5: 347-354
- HILDEBRANDT G (1996)** Fernerkundung und Luftbildmessung. Wichmann, 676 p, ISBN 3-87907-238-8
- HYUNKOOK CHO (2002)** Untersuchungen über die Erfassung von Waldflächen und deren Veränderungen mit Hilfe der Satellitenfernerkundung und segmentbasierter Klassifikation. Dissertation, Göttingen
- ITTEN KI; MEYER P; KELLENBERGER T; LEU R; SANDMEIER S; BITTER P (1992)** Radiometric and geometric correction of TM-data of mountainous forested areas. Proc. of IGARSS'92, Houston, 1650-1652.
- LAND INFORMATION NEW ZEALAND (2000)** Topographic Map 260, 1:50.000, Vectordata,
- MCDONALD ER; WU X; CACCETTA PA; CAMPBELL NA (2000)** Illumination correction of Landsat TM data in south east NSW, Proceedings of the Tenth Australasian Remote Sensing Conference, available on cdrom.
- MEYER P; ITTEN KI; KELLERBERGER T; SANDMEIER S; SANDMEIER R (1993)** Radiometric corrections of topographically induced effects on Landsat TM data in an alpine environment. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 48 (4): 17-28
- ROUSE JW; HAAS RH; SCHELL JA; DEERING DW; HARLAN JC (1974)** Monitoring the vernal advancement and retrogradation (greenwave effect) of natural vegetation. NASA/GSFC Type III Final Report, Greenbelt, Md. 371 p
- SANDMEIER S (1997)** Radiometrische Korrektur des Topographieeffekts in optischen Satellitenbilddaten - Vergleich eines semi-empirischen Verfahrens mit einem physikalisch-basierten Modell. Photogrammetrie, Fernerkundung, Geoinformation 1: 23-32.
- TEILLET P; GUIDON B; GOODENOUGH DG (1982)** On the Slope-Aspect Correction of Multispectral Scan. Canadian journal of remote sensing 8 (2): 84-106

In der Reihe
Bornimer Agrartechnische Berichte

sind bisher erschienen:

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

Heft 22	Kriterien der Nachhaltigkeit in der Verfahrensentwicklung für die Nutztierhaltung	1999
Heft 23	Situation und Trends in der Landtechnik / Erneuerbare Energien in der Landwirtschaft	1999
Heft 24	Institut für Landtechnik der Deutschen Akademie der Landwirtschaftswissenschaften zu Berlin 1951 bis 1965	1999
Heft 25	Computer-Bildanalyse in der Landwirtschaft (Workshop 1999 / 2000)	2000
Heft 26	Computer-Bildanalyse in der Landwirtschaft (Workshop 2001)	2001
Heft 27	Approaching Agricultural technology and Economic Development of Central and Eastern Europe	2001
Heft 28	6 th International Symposium on Fruit, Nut, and Vegetable Production Engineering	2001
Heft 29	Measurement Systems for Animal Data and their Importance for Herd Management on Dairy Cow Farms	2002
Heft 30	Produktion, Verarbeitung und Anwendung von Naturfasern	2002
Heft 31	Computer-Bildanalyse in der Landwirtschaft (Workshop 2002)	2002
Heft 32	Biogas und Energielandwirtschaft - Potenzial, Nutzung, Grünes Gas TM , Ökologie und Ökonomie	2003
Heft 33	Sozioökonomische Aspekte zu Perspektiven des Offenlandmanagements Bericht aus den sozioökonomischen Forschungen der BMBF-geförderten Verbundvorhaben des Förderschwerpunktes Biotop- und Artenschutz / Integrierte Naturschutzforschung (01LN)	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

Interessenten wenden sich an:

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

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

Schutzgebühr: 13,- €